

Documento nº 4

MEMORIA CIENTÍFICA INICIAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

La memoria inicial del proyecto de investigación solicitado debe incluir, al menos, los siguientes apartados. Para su cumplimentación tengan en cuenta los criterios de valoración recogidos en el artículo 8 de las Bases Reguladoras y en el apartado Undécimo de la convocatoria, así como las recomendaciones para la redacción de proyectos de investigación de ACSUCyL.

1.- TÍTULO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

Ajuste, validación e implantación del modelo físico PhFFS de incendios forestales.

2.- NOMBRE DEL/LA INVESTIGADOR/A PRINCIPAL DEL PROYECTO:

María Isabel Asensio Sevilla

3.- ENTIDAD U ORGANISMO SOLICITANTE:

Universidad de Salamanca

4.- CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO: *(Correspondencia con el aptdo. Undécimo.1.b.4º de la convocatoria).*

4.1.- Antecedentes y el estado actual del tema.

Según el último informe anual europeo sobre incendios forestales (Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa, 2014) de la EFFIS (European Forest Fire Information System) los incendios forestales suponen una amenaza actual y futura para los ecosistemas de los países europeos y otras regiones mediterráneas. Este informe incide en el aumento del riesgo de incendios forestales debido a las anomalías climáticas que se vienen produciendo recientemente, en cuanto a temperaturas más elevadas y sequías más severas. El cambio climático pone de nuevo en primer término el riesgo que suponen para nuestros bosques los incendios forestales, puesto que además, los sistemas forestales son a su vez fundamentales para la reducción de los gases del efecto invernadero, y por tanto son un punto clave en el reto de frenar el cambio climático.

España es uno de los países de la cuenca mediterránea más afectados por los incendios forestales. Según fuentes del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, en la primera década del siglo XXI, el fuego arrasó más de un millón de hectáreas de superficie forestal en nuestro país; y en el año 2012, especialmente dramático, más de 200.000 hectáreas de superficie forestal, de las cuales más de 40.000 hectáreas pertenecían a Castilla y León.

Los esfuerzos para luchar contra los incendios forestales deben reforzarse a todos los niveles, desde todas las administraciones, autonómicas, nacionales y europeas, pero también desde todos los sectores que puedan aportar una mejora en el conocimiento de los incendios forestales y por lo tanto en la lucha para atajar este problema. En este sentido, el sector científico, con la colaboración de investigadores de diversas áreas de conocimiento, y

la participación del sector tecnológico y empresarial, junto con las administraciones públicas, puede proporcionar importantes avances.

Desde el punto de vista de la investigación científica, la modelización matemática se ha convertido hoy en día en una herramienta esencial para el análisis y la predicción de un gran número de fenómenos físicos, en particular el tema que nos compete en este proyecto sobre modelización de la propagación de incendios forestales. La modelización matemática incluye diversas etapas: la formulación matemática del fenómeno, la resolución numérica del problema matemático involucrado, el análisis de sensibilidad y el ajuste de los parámetros del modelo. Todos estos aspectos conducen a la validación del modelo siempre a través de su ajuste mediante su aplicación a casos reales, para generar una herramienta operativa y útil que revierta en un beneficio tecnológico a la sociedad. Para ello es imprescindible la colaboración multidisciplinar de diversas áreas de conocimiento.

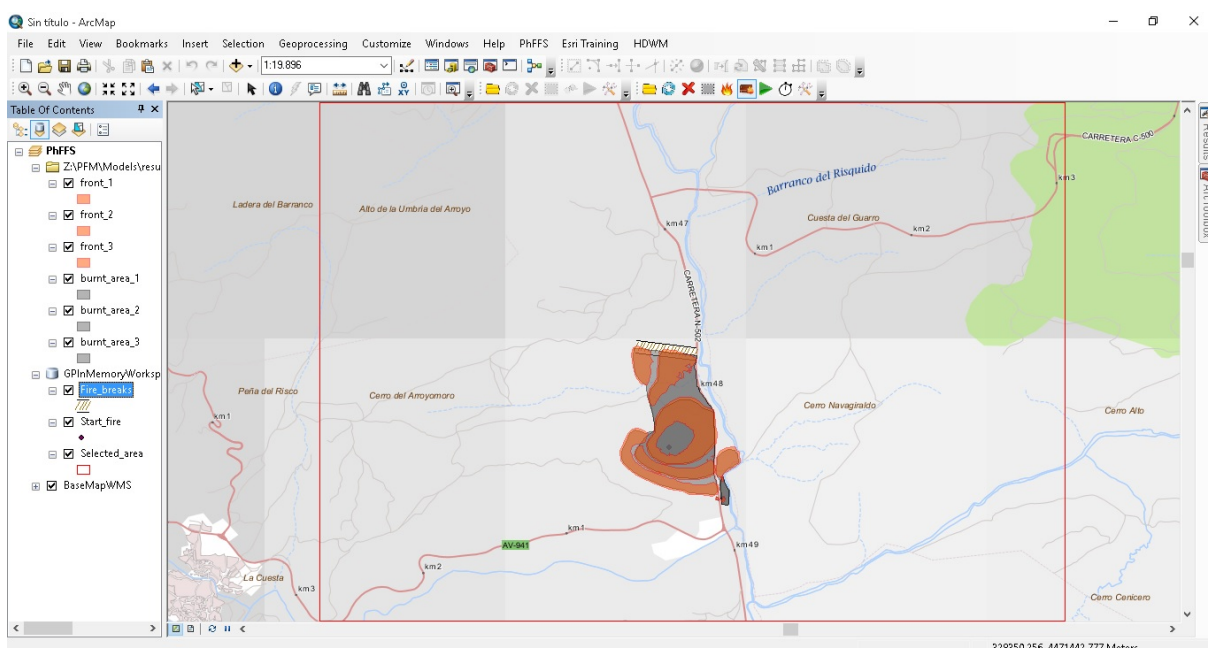
El aumento de la potencia de cálculo de los sistemas informáticos actuales, así como la mejora de las capacidades de la actual tecnología de información espacial (sistemas de información geográfica, sistemas de detección remota), ofrecen un enorme potencial para la simulación efectiva del comportamiento de los incendios forestales, permitiendo mejorar tanto los modelos de propagación del fuego como los modelos de combustibles. Estos nuevos avances tecnológicos han intensificado el interés de la comunidad científica en la modelización del comportamiento del fuego, pues su aplicabilidad se hace más factible.

Respecto a los modelos de propagación del fuego, existen diversos tipos atendiendo a diferentes aspectos. Atendiendo al sistema físico que se modeliza existen principalmente modelos de fuegos de superficie y modelos de fuegos de copas, entre otros. Atendiendo a las variables estudiadas, existen los modelos que estudian la propagación (velocidad) del fuego y modelos que estudian las características del frente de fuego (profundidad, altura de llama, inclinación,...). Pero la principal clasificación atiende a la naturaleza de las ecuaciones del modelo, desde modelos de tipo empírico, pasando por modelos semi-empíricos o semi-físicos, hasta los modelos físicos o teóricos, terminología que varía en función de los autores [1, 2, 3, 4]

Uno de los modelos semi-empíricos más conocido y de mayor implantación es el modelo de Rothermel [5], base del sistema de predicción del comportamiento del fuego BEHAVE, y origen de la mayor parte de los softwares computacionales existentes para la predicción del avance de un frente de fuego sobre sistemas de información geográfica (FARSITE en Estados Unidos [6], SiroFire (CSIRO Bushfire Spread Simulator) en Australia [7], Geofogo [8] o FireStation [9] en Portugal, Cardin en España [10]). Aunque los modelos semi-empíricos han tenido una fuerte implantación por su sencillez y rapidez, presentan serias dificultades de extrapolación, su adaptación al área mediterránea no estuvo exenta de dificultades y los resultados no son plenamente satisfactorios. En las últimas décadas, una nueva tendencia ha tomado fuerza, centrándose en los modelos teóricos o físicos, desarrollando modelos más complejos pero que permiten predecir todo tipo de comportamientos de fuegos forestales. La complejidad de los sistemas de ecuaciones a resolver en este tipo de modelos y la dificultad de los cálculos es evidente, pero los avances

en el desarrollo de técnicas numéricas de computación y potencia de cálculo de los medios tecnológicos actuales hacen este tipo de modelos altamente competitivos. Algunos de estos modelos son FIRETEC de Los Alamos National Laboratory, USA [11], PIF97 del Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, Francia [12] o WFDS del National Institute of Safety Technology, USA [13].

El modelo PhFFS (Physical Forest Fire Spread) desarrollado por el grupo investigador es un modelo físico simplificado basado en las leyes físicas de conservación resuelto de forma efectiva y eficiente con técnicas numéricas que lo hacen competitivo frente a otros modelos de tipo semi-físico. El actual modelo PhFFS, tiene su origen en un primer modelo físico bidimensional de una fase que tenía en cuenta la convección y la difusión y que se publicó por primera vez en 1996 [14, 15]. La radiación, como uno de los factores de transmisión de calor más importantes en los incendios, se incorporó al modelo inicial mediante un término de radiación local en [16]. La influencia de la humedad y de la absorción de calor por la pirólisis se incluyó en el modelo en [17]. Simultáneamente se modificó el efecto de la radiación con un término no local que permite reflejar el efecto de la inclinación de la llama en la radiación, debido a la pendiente del terreno o el viento [18]. Esta es la actual versión del modelo PhFFS, recientemente registrada en el Registro General de la Propiedad Intelectual, con número de asiento registral 00/2015/4720. Desde el principio se han hecho esfuerzos en la visualización de los resultados de las simulaciones [19], para acercar el producto al usuario final. También se ha trabajado en mejorar la viabilidad del modelo con simulaciones de casos reales [20] y experimentales [21]. Además se ha avanzado en el diseño de una herramienta de mayor utilidad que permite corregir las simulaciones obtenidas por el modelo mediante la incorporación de datos reales mediante técnicas de asimilación de datos [22]. En la actualidad el modelo PhFFS es operativo a través de ArcGis como un add-in para las zonas de las que se dispone de un mapa completo de tipos de combustibles, tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen.



Como se ha comentado anteriormente, el modelo de propagación de incendios PhFFS está basado en las leyes de conservación. Matemáticamente se reduce a varias ecuaciones en derivadas parciales, principalmente de convección-reacción-difusión que tienen que resolverse con técnicas numéricas. Para la resolución numérica de este tipo de ecuaciones se dispone de varios métodos, siendo probablemente los más conocidos los denominados: método de diferencias finitas y método de elementos finitos. Nuestro equipo tiene una amplia experiencia en el método de elementos finitos, en concreto en métodos mixtos [23,24] y adaptativos [25]. El desarrollo y el diseño de nuevos métodos que permitan resolver eficientemente los modelos planteados, es fundamental para obtener simulaciones realistas en tiempo real. Otro tipo de técnicas que pueden contribuir positivamente en este aspecto son la descomposición de dominios y la paralelización del cálculo.

El viento tiene una influencia crítica en la propagación de los incendios forestales. Por ello, la simulación numérica del viento es un ingrediente auxiliar imprescindible para la simulación numérica de la propagación de incendios forestales, además de tener aplicaciones directas en sí misma. El grupo de investigación que presenta esta propuesta, también ha desarrollado un modelo de campos de viento, denominado High Definition Windfield Model (HDWM), registrado en el Registro General de la Propiedad Intelectual, con número de asiento registral 00/2015/4721. Este modelo puede usarse de forma acoplada junto con el modelo de propagación de incendios PhFFS, o de forma independiente. La idea que subyace tras el modelo de campos de viento HDWM se basa en la adaptación de los principios de los modelos de aguas poco profundas, a los escenarios en los que habitualmente se desarrollan los incendios forestales, en los que la dimensión horizontal es mucho mayor que la vertical. De este modo, la aproximación asintótica de las ecuaciones de Navier-Stokes, permiten calcular un campo de viento tridimensional en la capa de aire bajo influencia del fuego, usando únicamente ecuaciones bidimensionales. Este modelo se publicó por primera vez en [26], y los detalles de la aproximación asintótica se recogen en [27]. En [28], se compara este modelo con otro modelo tridimensional de masa consistente y se aplica a un ejemplo real. En [29] se detalla como el campo de viento que proporciona el modelo se puede ajustar a una serie de mediciones meteorológicas puntuales mediante un problema de control óptimo.

Otro elemento meteorológico que, en menor medida que el viento, también tiene una influencia destacada en la incidencia y peligrosidad de los incendios es el grado de exposición a la radiación solar de los combustibles forestales. Según mencionan expertos en la lucha contra los incendios forestales, el efecto de la radiación solar sobre el contenido de humedad del combustible es un aspecto que se debe tener en cuenta en los modelos de simulación de incendios forestales. Miembros del grupo de investigación solicitante tienen experiencia en modelización de la radiación solar [30].

Otros dos aspectos importantes en el proceso de modelización matemática de un fenómeno físico como el que nos ocupa, y que ya hemos mencionado, son el análisis de sensibilidad del modelo y el ajuste de parámetros. El análisis de sensibilidad de un modelo matemático indica qué factores (parámetros y variables de entrada) son más relevantes y por tanto hay que estimar con mayor precisión. Además permiten diseñar de forma eficiente

el posterior ajuste de parámetros del modelo. Las técnicas de análisis de sensibilidad global [31] se usan ampliamente en modelos de simulación medioambientales y en particular se han empleado en modelización de incendios forestales [32]. Para el modelo PhFFS desarrollado por el equipo, se ha hecho el análisis de sensibilidad en casos experimentales de laboratorio [21].

El ajuste de parámetros es fundamental en el diseño de un modelo matemático eficiente y este se debe realizar de forma paralela a la simulación de diversos y variados ejemplos reales. Para predecir adecuadamente el estado de un sistema físico, es necesario identificar el conjunto de parámetros que caracterizan el sistema y que no cambian con el tiempo (o que sólo cambian debido a intervenciones externas). Estos parámetros son invariantes del sistema. Para identificar estos parámetros se tiene que resolver el llamado problema inverso que se puede formular como un problema de optimización. En la práctica se ajusta el valor de los parámetros de manera que la función de coste que mide la distancia entre los resultados que proporciona el modelo para estos valores de los parámetros y las medidas experimentales, tome el valor mínimo. Como ya hemos mencionado, el ajuste de parámetros del modelo PhFFS se ha llevado a cabo tanto en ejemplos experimentales [21] como en ejemplos reales [20] para un incendio ocurrido en el término municipal de Serradilla del Llano al sur de la Provincia de Salamanca en septiembre de 2009. En este ejemplo real el ajuste se realizó teniendo en cuenta únicamente el estado final del incendio, pues no se disponía con precisión de la posición del frente de fuego en instantes intermedios entre el inicio y el momento en que se declara el fuego controlado.

Por otro lado, un modelo predictivo de incendios forestales debe ser capaz de incorporar datos reales actualizados (viento, posición de frente de fuego, etc.) de forma interactiva para corregir su simulación. El modelo PhFFS permite integrar datos experimentales mediante técnicas de asimilación de datos utilizando el filtro de Kalman. La asimilación de datos permite corregir las predicciones obtenidas por el modelo mediante la integración de los datos experimentales, proporcionando de este modo predicciones más probables en los tiempos siguientes. Se trata por tanto, de un proceso de dos fases (corrección, predicción) que se repiten de modo alterno con el objetivo de mejorar el pronóstico. El filtro de Kalman [33] se trata de un procedimiento matemático que disminuye el “ruido” y permite obtener estimaciones óptimas de un estado, a partir de la predicción proporcionada por el modelo y a partir de datos experimentales. El filtro de Kalman revolucionó la teoría del control y en la actualidad es una herramienta omnipresente en muchas ramas de la ingeniería, meteorología e incluso economía. Existen diversas variantes del filtro del Kalman que amplían su uso a problemas no lineales. Entre ellas los denominados *Extended Kalman Filter (EKF)* [34] y *Ensemble Kalman Filter (EnKF)* [35]. Para que los resultados del EnKF supongan una buena aproximación, se precisa de la simulación de un gran número de estados. La implementación eficiente del proceso requiere técnicas de paralelización y el uso de grandes equipos informáticos. El EnKF ha tenido una amplia difusión en los últimos años y ha sido aplicado con éxito en la simulación de corrientes oceánicas y meteorología [36]. Esta experiencia sugiere que la adaptación de estas técnicas a los modelos físicos de propagación mejorará la capacidad predictiva de los modelos [37]. Como ya hemos mencionado, el grupo investigador ya ha incorporado técnicas de asimilación de datos

usando la versión determinista del EnKF en [22]. El siguiente paso es abordar el problema del ajuste de parámetros mediante técnicas de filtro de Kalman. El filtro de Kalman puede ser utilizado en el proceso de asimilación de datos no solo para obtener un estado del sistema más probable en un instante determinado sino también para ajustar los parámetros del modelo que determinan ese estado, es decir, se considera el valor de estos parámetros como parte del estado. De esta manera se pueden utilizar la técnica del filtro de Kalman para ajustar dinámicamente los parámetros del modelo.

Como hemos descrito hasta ahora, el modelo de propagación de incendios PhFFS desarrollado por el grupo investigador, así como el modelo de viento HDWM, están muy avanzados. Para que ambos modelos tengan una verdadera utilidad práctica y generen un conocimiento tecnológico útil es necesario validarlos y ajustarlos. Para ello es necesario recopilar datos de casos reales y simularlos con nuestros modelos. Esto permitirá mejorar los modelos, ajustar sus parámetros, mejorar la aplicación de la asimilación de datos, y en definitiva llegar al objetivo final de conseguir mejorar la utilidad de los modelos.

Para poder llevar a cabo el mayor número posible de simulaciones de casos reales se precisa de la colaboración de personas con experiencia de campo, grupos de investigación de otras áreas de investigación más próximas a la ingeniería forestal, empresas del sector privado y administraciones públicas.

En el sector empresarial, nuestro grupo viene colaborando con la empresa Tecnosylva S.L., con sede en León, desde hace ya una década. En julio de 2009 Tecnosylva S.L. y el grupo de investigación solicitante firmaron un contrato de prestación de servicios para la realización de un estudio de modelos físicos para incendios forestales, nubes tóxicas y viento, de alta resolución. En mayo de 2010 se firmó igualmente un acuerdo de colaboración en el marco del proyecto CENIT “Tecnologías para el combate integral contra incendios forestales y para la conservación de nuestros bosques – Prometeo”. Tecnosylva S.L. ha desarrollado una herramienta para el análisis de la propagación de incendios forestales basado en el modelo de Rothermel y un servicio de cartografía de combustibles forestales de alta resolución. El intercambio de información entre nuestro equipo y Tecnosylva S.L. ha enriquecido a ambas partes. Esta colaboración continúa en la actualidad, recientemente se ha firmado un acuerdo de colaboración para el desarrollo de los objetivos que se plantean en la presente solicitud y que se adjunta al Documento nº3 de la solicitud. El interlocutor designado por Tecnosylva para la comunicación con nuestro grupo de investigación en el marco del presente proyecto, Santiago Monedero Timón, realizó su tesis doctoral sobre la simulación de incendios forestales, bajo la dirección de dos miembros del grupo L. Ferragut, y la investigadora principal del proyecto, M. I. Asensio.

En la administración pública, con el permiso del Director General del Medio Natural, de la Conserjería de Fomento y Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León, desde hace tres años venimos colaborando con el Jefe de la Sección de Protección de la Naturaleza del Servicio Territorial de Medio Ambiente de Salamanca, D. Ignacio Juárez Relaño. Esta colaboración continua a día de hoy como queda patente en el compromiso de colaboración

firmado a tenor de la solicitud del presente proyecto y que se adjunta al Documento nº3 de la solicitud.

Otras personas con amplia experiencia de campo en la extinción de incendios colaboran con nuestro grupo de investigación, como Arsenio Morillo Rodríguez [38], con quien se están realizando una serie de trabajos en la simulación del incendio forestal de Osoño (Vilardevós)-Verín-Ourense de Agosto de 2009 en el que él participó como director de extinción. Se dispone de información muy detallada de este ejemplo real, con datos de perímetros intermedios y final, muy útil para implementar la asimilación de datos.

Recientemente se ha iniciado una nueva colaboración con un grupo de investigación del Departamento de protección forestal, del Centro de Investigación Forestal de Lourizán de la Xunta de Galicia, dirigido por José Antonio Vega Hidalgo con el objetivo de profundizar en el conocimiento de los modelos de combustibles [39] y las características de estos que más influyen en la propagación de los incendios con el objetivo de mejorar la eficiencia del modelo PhFFS. Este grupo de investigación ha hecho constar su interés por colaborar con el trabajo de investigación propuesto en esta propuesta, y así lo hace constar en la carta que se adjunta al Documento nº3 de la solicitud.

Conviene destacar la importancia que los modelos de combustibles tienen en el buen funcionamiento de un modelo de propagación de incendios. Un buen conocimiento de las características del tipo de combustible forestal existente así como estimaciones del comportamiento del fuego en cada tipo de combustible, son clave para la consecución de un buen modelo de propagación de incendios forestales. El modelo PhFFS permite su adaptación a distintas clasificaciones de combustibles forestales existentes como la de Rothermel [40], la de Scott y Burgan [41], y otras clasificaciones que se puedan llevar a cabo atendiendo a las características específicas de la vegetación propia de zonas concretas.

El desarrollo de los dos modelos construidos por este grupo de investigación, el modelo de propagación de fuego PhFFS, y el modelo de campos de viento HDWM, ha sido posible gracias a la financiación obtenida por los miembros del grupo en convocatorias competitivas a lo largo de los últimos años, 4 nacionales y 3 autonómicos. La mayor parte de estos proyectos de investigación han sido dirigidos por el investigador senior del grupo, L. Ferragut. El necesario relevo generacional ha propiciado un cambio en el investigador principal del grupo y del presente proyecto, ocupando en la actualidad esta posición M.I. Asensio, que ha sido miembro del grupo investigador desde su inicio, participante activa de todos los proyectos de investigación conseguidos y del diseño de los modelos PhFFS y HDWM desarrollados por el grupo.

Referencias bibliográficas: el nombre de autor subrayado indica que miembro del equipo investigador o de la empresa colaboradora Tecnosylva S.L.

[1] Sullivan, A.L. (2009) Wildland surface fire spread modeling. 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 349-368.

[2] Sullivan, A.L. (2009) Wildland surface fire spread modeling. 1990-2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 369-386.

[3] Sullivan, A.L. (200) Wildland surface fire spread modeling. 1990-2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 387-403.

[4] Pastor, E., Zárate, L. Planas, E, Arnaldos, J. (2003) Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, pp. 139-153.

[5] Rothermel, R.C. (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service. Research paper INT-115.

[6] Finney, M.A. (2004) FIRESITE: Fire area simulation model, development and evaluation. USDA Forest Service. Research paper RMRS-RP 4, Revised.

[7] J.R. Coleman, A.L. Sullivan, (1995) SiroFire: the CSIRO bushfire spread simulator. *Proc. Inst. Foresters Aust. 16th Biennial Conf., Canberra*, pp. 309–319

[8] de Vasconcelos, M. J. P., Pererira, J. M. C., and Zeigler, B. P. (1995) Simulation of fire growth in GIS using discrete event hierarchical modular models. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 4, pp.54-62.

[9] Lopes, A. M. G., Cruz, M. G., and Viegas, D. X. (2002) FireStation - an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography. *Environmental Modelling & Software*, 17, pp. 269-285.

[10] Martínez Millán, J. et al., (1991) CARDIN, un sistema para la simulación de la propagación de incendios forestales. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria, MAPA. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales, Separata nº 10. Madrid.

[11] Linn, R., Reisner, J., Colman, J. J., and Winterkamp, J. (2002) Studying wildfire behavior using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire*, 11(3-4), pp.233-246.

[12] Dupuy, J. and Larini, M. (1999) Fire spread through a porous forest fuel bed: a radiative and convective model including fire-induced flow effects. *International Journal of Wildland Fire*, 9(3), pp.155-172.

[13] Mell, W., Jenkins, M., Gould, J., and Cheney, P. (2007) A physics based approach to modeling grassland fires. *International Journal of Wildland Fire*, 16, pp.1-22.

[14] Ferragut, L., Asensio, M.I., Montenegro, R., Plaza, A., Winter, G., Serón, F.J. (1996) A model for fire simulation in landscapes. *Computational Fluid Dynamics'96*. pp. 111-116.

[15] Montenegro, R., Plaza, A. Ferragut, L. Asensio, M.I. (1997) Application of a nonlinear evolution model to fire propagation. *Nonlinear Analysis, Theory, Methods & Applications*, 30(5), pp. 2873-2882.

[16] Asensio, M.I., Ferragut, L. (2002) On a wildland fire model with radiation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 54; pp. 137-157.

[17] Ferragut, L., Asensio, M.I., Monedero, S. (2007) A numerical method for solving convection-reaction-diffusion multivalued equations in fire spread modelling. *Advances in Engineering Software*, 38; pp. 366-371.

[18] Ferragut, L., Asensio, M.I., Monedero, S. (2007) Modelling radiation and moisture content in fire spread. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 23; pp. 819-833.

[19] Serón, F.J., Gutiérrez, D., Magallón, J., Ferragut, L., Asensio, M.I. (2005) The evolution of a wildland fire front. *The visual computer*, 21; pp. 152-169.

[20] Ferragut L., Asensio M.I., Cascón J.M., Prieto D. (2015) A simplified wildland fire model applied to a real case. *Advances in Differential Equations and Applications*, SEMA SIMAI Springer Series, 4, pp. 155-167.

[21] Prieto D., Ferragut L., Asensio M.I., Cascón J.M. (2015) Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model. *Advances in Engineering Software*, 90, pp.98-106.

[22] Ferragut L., Asensio M.I., Cascón J.M., Prieto D. (2015) A wildland fire physical model well suited to data assimilation. *Pure and Applied Geophysics*, 172, pp. 121-139.

[23] Asensio, M.I., Ferragut, L. (2000) Total error estimates of mixed finite element methods for nonlinear reaction-diffusion equations. *Neural, Parallel & Scientific Computations*, 8, pp. 169-190.

[24] Ferragut, L., Asensio, M.I. (2002) Mixed finite element methods for a class of nonlinear reaction diffusion problems. *Neural, Parallel & Scientific Computations*, 10, pp. 91-112.

[25] Cascón, J.M.; Ferragut, L., Asensio, M.I. (2006) Space-time adaptive algorithm for the mixed parabolic problem. *Numer. Math.* 103(3), pp. 367-392.

[26] Asensio, M.I., Ferragut, L., Simon, J. (2002) Modelling of convective phenomena in forest fire. *Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. RACSAM*, 96(3); pp. 299-313.

[27] Asensio, M.I., Ferragut, L., Simon, J., 2005. A convection model for fire spread simulation. *Applied Mathematical Letters*, 18; pp. 673-677.

[28] Ferragut, L., Montenegro, R., Montero, G., Rodríguez, E., Asensio, M.I., Escobar, J.M. (2010) Comparison between 2.5-D and 3-D realistic models for wind field adjustment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98; pp. 548-558.

[29] Ferragut, L., Asensio, M.I., Simon, J. (2011) High definition local adjustment model for 3D wind fields performing only 2D computations. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 27; pp. 510-523.

[30] Montero, G., Escobar, J.M., Rodríguez, E. Montenegro, R. (2009) Solar radiation and shadow modelling with adaptive triangular meshes. Solar Energy, 83 (7), pp. 998-1012.

[31] Saltelli A et al. (2008) Global sensitivity analysis. The Primer. (John Wiley & Sons Ltd, England)

[32] Salvador, R., Piñol, J., Tarantola, S. and Pla, E. (2001) Global sensitivity analysis and scale effects of a fire propagation model used over Mediterranean shrublands. Ecological Modelling, 136, pp. 175-189.

[33] Welch, G. & Bishop, G. (2004) An Introduction to the Kalman Filter. TR 95-041. Department of Computer Science. University of North Carolina at Chapel Hill.

[34] Chui, K. C. & Chen, G. (2009) Kalman Filtering with Real-Time Applications. Springer.

[35] Evensen, G. (1994) Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. Journal of Geophysical Research 99 (C5) (10), 143-162.

[36] Evensen, G. (2009) Data assimilation, The Ensemble Kalman Filter. Springer.

[37] Mandel, J., Beneethum, L., Beezley, J. Coen J., Douglas, C. Kim M. & Vodacek A. (2006) A Wildfire Model with Data Assimilation. UCDMSC/CCM Report no. 233, Center For Computational Mathematics Reports. University of Colorado at Denver and Health Sciences Center.

[38] Morillo, A. (2011) Análisis del comportamiento del fuego forestal observado y simulado: Estudio del caso del incendio forestal de Osoño (Vilardevós)-Verín-Ourense. Trabajo fin de Máster. Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela.

[39] Vega Hidalgo, J.A. Arellano Pérez, S., Ruiz González, A.D., Arellano Mancilla, A. (2013) Nuevos modelos de combustibles forestales de Galicia. 6º Congreso Forestal Español.

[40] Anderson, H. E., (1982) Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior. USDA Forest Service. General Technical Report INT-122.

[41] Scott, J. H. and Burgan, R. E., (2005) Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model. USDA Forest Service. General Technical Report RMRS-GTR-153.

4.2.- Objetivos generales y específicos.

Objetivo general

El objetivo general del presente proyecto es, como se señala en el título del mismo, ajustar y validar el modelo de simulación de incendios forestales PhFFS (Physical Forest Fire Spread) desarrollado por el grupo de investigación solicitante, y transferir la tecnología resultante a los sectores públicos y privados interesados en la misma.

Objetivos específicos

Para alcanzar este objetivo general, el proyecto se vertebrará a través de los siguientes objetivos específicos:

1. Mejorar el modelo de simulación de incendios PhFFS incorporando la modelización de la fase gaseosa. En el modelo actual la fase gaseosa está parametrizada a través de la altura y temperatura de la llama, se introducirá un submodelo simplificado de la fase gaseosa que permita el cálculo de estos parámetros.
2. Incorporar al modelo de simulación de incendios PhFFS el efecto de la radiación solar sobre el contenido de humedad del combustible. A partir de los modelos de radiación solar desarrollados por el grupo, se adaptarán sus resultados al modelo de propagación de fuego.
3. Mejorar las técnicas de asimilación de datos previamente incorporadas al modelo mediante la utilización del filtro de Kalman local con el objetivo de incrementar la eficiencia mediante la incorporación de métodos de descomposición ortogonal propia (POD).
4. Adaptar el código de los modelos PhFFS y HDWM para su utilización sobre plataformas informáticas de supercomputación (supercomputador CALENDULA, de la Fundación Centro de Supercomputación de Castilla y León (FCSCCL)).
5. Recopilar y analizar datos de casos reales de incendios forestales, principalmente en la Provincia de Salamanca, resto de la Comunidad Autónoma de Castilla y León y la Comunidad Autónoma de Galicia.
6. Identificar las características de los combustibles forestales directamente relacionadas con los parámetros del modelo PhFFS mejorado, que permitan generar mapas de combustibles forestales adaptados al modelo PhFFS.
7. Analizar el modelo PhFFS mejorado mediante técnicas de análisis de sensibilidad global para determinar los parámetros del modelo más influyentes como paso previo a su ajuste, en ejemplos reales recopilados.
8. Realizar simulaciones de casos reales mediante el modelo PhFFS mejorado para su ajuste y validación.
9. Comparar el modelo físico PhFFS mejorado del grupo investigador y del modelo semi-empírico de tipo Rothermel de la empresa Tecnosylva S.L, a través de la simulación de diversos casos reales y el análisis de los resultados obtenidos.

10. Integrar el modelo PhFFS mejorado en un Sistema de Información Geográfico (GIS). Esto automatizará la adquisición de los datos necesarios para una simulación y se mejorará la accesibilidad del modelo y la interpretación de los resultados

11. Divulgar el modelo PhFFS mejorado mediante su acceso a través de una plataforma on-line lo que permitirá su uso por parte de los sectores dedicados a la prevención, seguridad y gestión de incendios forestales.

Para alcanzar los objetivos anteriormente mencionados se desarrollarán una serie de tareas que serán convenientemente desglosadas en los siguientes apartados. A continuación se muestra, a modo de resumen, una tabla donde aparecen enumeradas las actividades, el estado del arte de las mismas, el salto tecnológico asociado a cada de ellas, así como los resultados que se esperan obtener tras la investigación.

ACTIVIDAD	ESTADO DEL ARTE	INCREMENTO TECNOLÓGICO	RESULTADOS ESPERADOS
A1. Mejoras en el modelo PhFFS	El modelo de propagación de incendios PhFFS está plenamente desarrollado y es competitivo frente a otros modelos similares..	Incorporación de mejoras en la fase gaseosa, influencia de la radiación solar, asimilación de datos y adaptación del código.	Modelo de propagación de incendios PhFFS mejorado.
A2. Ajuste y validación del modelo PhFFS	El modelo PhFFS ya se ha usado con éxito en simulaciones de ejemplos experimentales y reales.	Recopilación y análisis de fuegos reales, simulación comparada de los mismos con el modelo PhFFS y modelo de Tecnosylva S.L.	Modelo de propagación de incendios PhFFS ajustado, validado y comparado.
A3. Implantación y visualización del modelo PhFFS	El actual modelo PhFFS ya funciona sobre ArcGis en zonas que disponen de mapas de combustibles.	Integración del modelo PhFFS mejorado en plataforma GIS, ampliación de su aplicabilidad y accesibilidad mediante acceso on-line	Modelo PhFFS accesible al usuario final.

4.3.- Metodología.

La fase de desarrollo en la que se encuentra el modelo de propagación de incendios PhFFS es muy avanzada, por lo que metodología de este proyecto se debe diseñar teniendo

en cuenta de que se dispone y que es lo que aún se necesita y se pretende conseguir. En este sentido, la metodología del presente proyecto se basa en cuatro principios básicos:

- 1- **Interdisciplinariedad.** La colaboración de investigadores y profesionales de diversas áreas de conocimiento es fundamental para el éxito del proyecto. Por una parte expertos en matemática aplicada que hemos desarrollado el modelo de propagación de incendios PhFFS, que aportamos un conocimiento preciso del modelo, y la capacidad para proporcionarle las mejoras necesarias. Por otra parte el investigador postdoctoral que deberá tener un perfil de ingeniero informático o similar con experiencia en sistemas de información geográfica y plataformas web. En tercer lugar ingenieros forestales con diferentes perfiles: expertos en gestión forestal y medioambiental, nuevas tecnologías (GIS, teledetección, simuladores) que aporta la empresa Tecnosylva S.L. (ver Documento nº3 de la solicitud); expertos en técnicas de protección contra incendios, mitigación del impacto ambiental del fuego, y combustibles forestales que aporta el Centro de Investigación Forestal de Lourizán de la Xunta de Galicia (ver Documento nº3 de la solicitud); y personal con experiencia directa en la lucha contra incendios de la Sección de Protección de la Naturaleza del Servicio Territorial de Medio Ambiente de Salamanca (ver Documento nº3 de la solicitud).
- 2- **Eficiencia.** Los distintos grupos que colaboran en el proyecto no sólo aportan diferentes capacidades y conocimientos, sino que aportan instalaciones y equipamientos diversos que redundarán en beneficio del desarrollo del proyecto. La eficiencia en el uso coordinado de dichos recursos será determinante.
- 3- **Coordinación.** La variedad en formación y experiencia de todos los grupos que colaboran en este proyecto hace que la labor de coordinación sea esencial para alcanzar el éxito en los objetivos propuestos. Esta labor de coordinación está estrechamente vinculada con la labor de seguimiento del proyecto que se vertebrará en torno a las labores de divulgación, publicación de resultados en revistas internacionales indexadas y en congresos nacionales e internacionales relacionados con la temática del proyecto.
- 4- **Documentación.** Un aspecto esencial del proyecto es la simulación mediante el modelo PhFFS de casos reales, el mayor número posible, para que el ajuste y validación del modelo sea lo más eficiente posible. La adquisición, gestión y tratamiento de toda esta información, así como de los resultados que se obtengan es de vital importancia. Acceder a datos reales de incendios forestales es quizá la parte que entraña más dificultades de todo el proyecto. Aunque en la actualidad se están desarrollando y poniendo en marcha sistemas de monitorización y medición automáticas de incendios forestales, su uso no está muy extendido, y el acceso a la información que recogen no es fácil. De igual forma, el desarrollo de mapas actualizados de combustibles forestales no es completo ni homogéneo en todo el territorio nacional.

4.4.- Plan de trabajo.

En este apartado se desglosarán las actividades resumidas en la tabla del apartado 4.2, detallando los participantes de cada tarea (miembros del grupo investigador, investigador

posdoctoral, empresa colaboradora y otros grupos colaboradores). Para referirnos a las tareas en las que participará la empresa colaboradora, indicaremos su nombre Tecnosylva S.L., sin detallar que miembros de la misma realizarán las labores especificadas. Para referirnos a la colaboración de la Sección de Protección de la Naturaleza del Servicio Territorial de Medio Ambiente de Salamanca en determinadas tareas, usaremos las siglas M.A. Salamanca. Para referirnos a la colaboración del grupo de investigación del Departamento de protección forestal, del Centro de Investigación Forestal de Lourizán de la Xunta de Galicia, en determinadas tareas indicaremos “Grupo de Investigación de Lourizán” (G.I. Lourizán). Para referirnos a la colaboración del experto en extinción de incendios forestales Arnesio Morillo en determinadas tareas, indicaremos su nombre. Cada participante irá acompañado de una sigla que indica su grado de implicación y responsabilidad en la tarea asignada, siendo estas las siguientes: RP- responsable principal, C- coordinador, P- participante. Se incluye también una serie de hitos previstos para mejorar el proceso de coordinación, seguimiento y evaluación de la ejecución del proyecto, así como la cronología de todas las actividades programadas.

Actividades y Tareas:

Actividad 1. Mejoras en el modelo PhFFS.

Tarea 1.1 Mejora del modelo PhFFS incorporando la modelización de la fase gaseosa.

Participantes: M. I. Asensio (C), L. Ferragut (RP), J.M. Cascón (P).

Tarea 1.2 Incorporación al modelo PhFFS del efecto de la radiación solar sobre el contenido de humedad del combustible.

Participantes: L. Ferragut (C), G. Montero (RP), R. Montenegro (P), J.M. Cascón (P).

Tarea 1.3 Mejora de las técnicas de asimilación de datos.

Participantes: M.I. Asensio (C), J.M. Cascón (RP), L. Ferragut (P).

Tarea 1.4. Adaptación del código de los modelos PhFFS y HDWM para su utilización sobre plataformas informáticas de supercomputación.

Participantes: M.I. Asensio (C), L. Ferragut (RP), J.M. Cascón (P), R. Montenegro (P), G. Montero (P), investigador postdoctoral (P).

Tarea 1.5. Actividades de formación. Formación del nuevo investigador postdoctoral

Participantes: M.I. Asensio (C), investigador postdoctoral (RP)

Tarea 1.6 Actividades de divulgación. Redacción de artículos y asistencia a congresos.

Participantes: M.I. Asensio (C, RP), L. Ferragut (P), J.M. Cascón (P), G. Montero (P), R. Montenegro (P), investigador postdoctoral (P).

Actividad 2. Ajuste y validación del modelo PhFFS.

Tarea 2.1 Recopilación y análisis de datos de casos reales de incendios forestales.

Participantes: M.I. Asensio (C), Tecnosylva S.L. (RP), A. Morillo (P), I.J. Relaño (P).

Tarea 2.2 Identificación de las características de los combustibles forestales directamente relacionadas con los parámetros del modelo PhFFS.

Participantes: M.I. Asensio (C), L. Ferragut (RP), Lourizán (P), A. Morillo (P).

Tarea 2.3 Elaboración de mapas de combustibles forestales directamente relacionadas con los parámetros del modelo PhFFS.

Participantes: M.I. Asensio (C), L. Ferragut (P), Tecnosylva S.L.(RP), Lourizán (P), A. Morillo (P).

Tarea 2.4 Análisis de sensibilidad global del modelo PhFFS en casos reales.

Participantes: M.I. Asensio (C, RP), investigador posdoctoral (P).

Tarea 2.5 Simulaciones de casos reales mediante el modelo PhFFS y análisis de resultados.

Participantes: M.I. Asensio (C, RP), L. Ferragut (P), J.M. Cascón (P), G. Montero (P), R. Montenegro (P), investigador posdoctoral (P).

Tarea 2.6 Ajuste de parámetros del modelo PhFFS.

Participantes: M.I. Asensio (C), L. Ferragut (RP), J.M. Cascón (P), investigador posdoctoral (P).

Tarea 2.7 Simulaciones de casos reales mediante el modelo de la empresa Tecnosylva S.L. y análisis de resultados.

Participantes: M.I. Asensio (C), Tecnosylva S.L. (RP)

Tarea 2.8 Comparación del modelo PhFFS y el modelo de la empresa Tecnosylva S.L..

Participantes: M.I. Asensio (C), L. Ferragut (RP), J. M. Cascón (P), Tecnosylva S.L. (P), investigador posdoctoral (P).

Tarea 2.9. Actividades de formación. Formación del nuevo investigador postdoctoral.

Participantes: M.I. Asensio (C), Tecnosylva S.L. (P), investigador posdoctoral (RP).

Tarea 2.10 Actividades de divulgación. Redacción de artículos y asistencia a congresos.

Participantes: M.I. Asensio (C, RP), G. Montero (P), R. Montenegro (P), L. Ferragut (C), J.M. Cascón (P), investigador postdoctoral (P).

Actividad 3. Implantación y visualización del modelo PhFFS.

Tarea 3.1 Integración del modelo PhFFS mejorado en ArcGis.

Participantes: M.I. Asensio (C, RP), investigador postdoctoral (P), Tecnosylva S.L. (P).

Tarea 3.2 Integración del modelo PhFFS mejorado en una plataforma on-line.

Participantes: M.I. Asensio (C,RP), investigador postdoctoral (P), Tecnosylva S.L. (P)

Tarea 3.3 Actividades de divulgación. Redacción de artículos y asistencia a congresos.

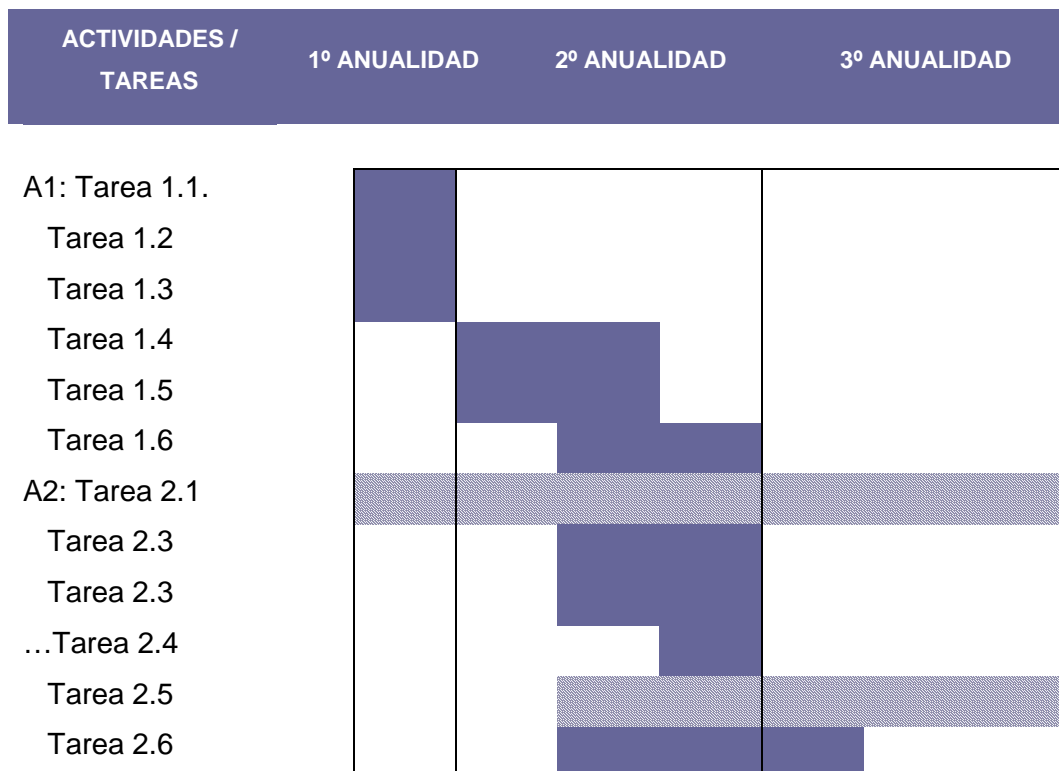
Participantes: M.I. Asensio (C, RP), G. Montero (P), R. Montenegro (P), L. Ferragut (C), J.M. Cascón (P), Investigador postdoctoral (P).

Hitos:

Durante la duración del proyecto se plantean los siguientes hitos:

- Hito 1: primera anualidad: (22/03/2016 – 30/06/2016)
 - Actividad 1: Tarea 1.1, Tarea 1.2, Tarea 1.3
- Hito 2: segunda anualidad: (01/07/2016 – 30/06/2017)
 - Actividad 1: Tarea 1.4, Tarea 1.5, Tarea 1.6.
 - Actividad 2: Tarea 2.1, Tarea 2.2, Tarea 2.3, Tarea 2.4, Tarea 2.5, Tarea 2.6, Tarea 2.7, Tarea 2.9, Tarea 2.10.
- Hito 2: tercera anualidad: (01/07/2017 – 30/06/2018)
 - Actividad 2: Tarea 2.5, tarea 2.6, Tarea 2.7, Tarea 2.8, Tarea 2.10.
 - Actividad 3: Tarea 3.1, Tarea 3.2, Tarea 3.3

Cronograma: (cada sector representa un cuatrimestre, la primera anualidad sólo tiene un cuatrimestre) Se debe tener en cuenta que hay tareas que por sus especiales características se deben prolongar en el tiempo, como la recopilación de datos de incendios y la simulación de casos reales, pues se intentará simular casos recientes a medida que estos se produzcan. Este tipo de tareas se han señalado con de forma diferente el en cronograma.



Tarea 2.7				
Tarea 2.8				
Tarea 2.9				
Tarea 2.10				
A3: Tarea 3.1				
Tarea 3.2				
Tarea 3.3				

4.5.- Capacidad y adecuación del equipo de investigación.

Los cinco miembros del equipo de investigación solicitante que conforman la UIC018 llevan colaborando desde el inicio de sus respectivas carreras investigadoras. De hecho, el investigador senior, L. Ferragut, ha sido el director de tesis de los otros cuatro miembros del grupo. Señalar que la tesis de la investigadora principal M.I. Asensio, titulada “Simulación numérica de procesos de combustión en medios naturales”, dirigida por L. Ferragut fue el punto de inicio del actual modelo de propagación de incendios PhFFS sobre el que se basa el presente proyecto, y también ha sido el hilo conductor de la mayor parte de la producción científica y de los proyectos de investigación en los que ha participado el equipo. A su vez, M.I. Asensio ha codirigido junto a L. Ferragut la tesis del miembro más joven del grupo, J.M. Cascón. Esto demuestra que el equipo tiene una composición equilibrada en cuanto a experiencia e historial. Además es un grupo interdisciplinar, formado por tres ingenieros industriales y dos matemáticos, y todos ellos han centrado su investigación en la simulación de diversos problemas medioambientales.

El grado de interdisciplinariedad se ve reforzado por la colaboración con los otros grupos y la empresa colaboradora, en su mayor parte integrados por ingenieros de montes, ingenieros informáticos, técnicos especialistas en GIS, y personas con experiencia directa en la extinción de incendios forestales. Todo esto equilibra de forma adecuada la composición del equipo y sus colaboradores.








La investigadora principal, M.I. Asensio, ha sido investigadora principal en una Acción Integrada en la que colaboraron diversos grupos internacionales, y ha participado en todos los proyectos de investigación previos obtenidos por el equipo investigador como investigadora, pues lleva vinculada el grupo de investigación desde su origen. El cambio en la dirección del equipo investigador y por tanto en el investigador principal de este proyecto, responde a las necesidades de renovación generacional del mismo.

Entre los 5 miembros del equipo de investigación han publicado en los últimos 10 años más de 100 artículos en revistas internacionales con índice de impacto, muchos de ellos relacionados con el tema de la presente propuesta. Los artículos publicados por el equipo investigador más directamente relacionados con la presente propuesta se relacionan en la bibliografía del apartado 4.1 de este documento, y se señalan de forma específica subrayando el nombre de los autores que pertenecen al equipo.

El equipo investigador ha obtenido financiación en 7 proyectos de investigación directamente relacionados con el tema de la presente propuesta: 4 proyectos nacionales coordinados y 3 autonómicos.

Tres de los miembros del equipo investigador tienen 4 sexenios de investigación, el resto de miembros del grupo, incluida la investigadora principal, tienen 2 sexenios de investigación.

Todos los miembros del equipo mantienen una intensa colaboración con otros grupos de investigación, nacionales e internacionales, caben destacar:

-  G. Sangalli, F. Brezzi, D. Marini, M. Benzi, M. Pennacchio y V. Simoncini del Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche, Pavia, Italia.
-  Ricardo H. Nochetto, Department of Mathematics and Institute for Physical Science and Technology, University of Maryland, College Park, USA.
-  Erwin Hernández, Departamento de Matemática. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
-  Tomas P. Barrios. Departamento de Matemática y Física Aplicadas, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.
-  Antonio Huerta, Antonio Rodríguez Ferrán y col. Laboratori de Càlcul Numèric, Dpto de Matemática Aplicada III, Universidad Politècnica de Catalunya, España.
-  M. Jesús Sánchez, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca, Departamento de Química y Geoquímica Ambiental (CSIC), Salamanca, España.
-  María González Taboada. Departamento de Matemáticas, Universidade da Coruña, A Coruña, España.

No se detallan aquí más méritos relevantes del equipo investigador pues toda esa información queda acreditada por el reconocimiento de Unidad de Investigación Consolidada otorgada al grupo.

Respecto a la capacidad formativa del equipo investigador, en cuanto a tesis doctorales y trabajos fin de master dirigidas por los miembros del grupo de investigación, destacar que L. Ferragut ha dirigido 10 tesis, G. Montero 10 tesis, R. Montenegro 5 tesis y 4 trabajos fin de master, y M.I. Asensio 2 tesis: Algunas de estas tesis han obtenido Premio Extraordinario de Doctorado. Como ya se ha mencionado previamente, el interlocutor designado por Tecnosylva para la comunicación con nuestro grupo de investigación en el marco del presente proyecto, S. Monedero, realizó su tesis doctoral sobre la simulación de incendios forestales, bajo la dirección del miembro del grupo L. Ferragut y la Investigadora principal M.I. Asensio con mención de Doctorado Europeo.

El equipo de investigación continúa manteniendo un alto potencial para la formación de nuevos doctores. En la actualidad varios miembros del grupo están dirigiendo el trabajo de tesis de Diego Prieto Herráez, actualmente PDI contratado con cargo a un Art. 83 LOU firmado con La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria titulado "Módulo de resolución

de sistemas de ecuaciones lineales asociados al simulador numérico composicional y su paralelización”, en el Programa de Doctorado Interuniversitario en Geotecnologías Aplicadas a la Construcción, Energía e Industria de la Universidad de Salamanca y Vigo, en el que se desarrollarán varios temas de los propuestos en este proyecto. El miembro del equipo investigador Arsenio Morillo Rodríguez está elaborando su tesis titulada “Tipología de incendios forestales en Galicia: análisis exploratorios de factores determinantes”, bajo la dirección de Ana Daria Ruíz González y José Antonio Vega Hidalgo, en la Escuela Politécnica Superior de Lugo de la Universidad de Santiago de Compostela y el Centro de Investigación Forestal de Lourizán de la Xunta de Galicia.

En cuanto a la adecuación del equipo con respecto a la presente propuesta de investigación, mencionamos a continuación los objetivos ya alcanzados por el equipo, agrupados en tres secciones: simulación de incendios forestales, desarrollo de nuevos métodos numéricos, modelización de otros problemas medioambientales.

Simulación de incendios:

1. Desarrollo completo de un modelo físico simplificado de propagación de incendios (PhFFS) que incluye el efecto de la convección y la radiación, y tiene en cuenta aspectos importantes como la humedad, tipo y distribución del combustible, pendiente del terreno y viento.
2. Primeras simulaciones numéricas de casos reales y experimentales de incendios.
3. Análisis de sensibilidad y primeros ajustes de parámetros del modelo de propagación de incendios (PhFFS).
4. Incorporación de técnicas de asimilación de datos al modelo de propagación de incendios (PhFFS).
5. Desarrollo de un modelo de campos de viento (HDWM) y su incorporación al modelo de simulación de incendios (PhFFS).

Desarrollo de nuevos métodos numéricos:

1. Desarrollo de estimadores de error y diseño de algoritmos adaptativos en espacio-tiempo para la formulación mixta del problema lineal evolutivo de transmisión de calor.
2. Estudio de convergencia y optimalidad de algoritmos adaptativos de elementos finitos para problemas elípticos. En colaboración con Ricardo H. Nochetto, Department of, Universidad de Maryland, USA.
3. Desarrollo de métodos de estabilización para problemas de convección-difusión-reacción de problemas evolutivos. En colaboración con: B. Ayuso, G. Sangali, Instituto di Matematica Applicada e Tecnologie Informatiche, CNR, Pavia, Italia.
4. Diseño de un método eficiente para la resolución del problema de control asociado a modelo de viento. En colaboración con: M. Benzi, M. Pennacchio, V. Simoncini, Instituto di Matematica Applicada e Tecnologie Informatiche, CNR, Pavia, Italia.
5. Desarrollo de métodos estabilizados basados en formulaciones aumentadas para las ecuaciones de Darcy y Oseen. En colaboración con M. González Taboada, Departamento

de Matemáticas, Universidad da Coruña y T. Barrios, Departamento de Matemática y Física Aplicada, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

6. Diseño de un procedimiento de bases reducidas para la resolución eficiente del modelo de viento HDWM. En colaboración con E. Hernández. Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.

7. Desarrollo de un nuevo generador de mallas de tetraedros, aplicable al modelo del viento HDWM. En colaboración con el Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en la Ingeniería IUSIANI, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Otros problemas medioambientales.

1. Modelización matemática y simulación numérica de transporte de pesticidas. En colaboración con: M. J. Sánchez, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca, Departamento de Química y Geoquímica Ambiental (CSIC), Salamanca.

2. Desarrollo de un modelo multicapa de dispersión de contaminantes. Este modelo ha sido implementado y suministrado a la empresa colaboradora Tecnosylva S.L.

4.6.- Presupuesto, uso de recursos disponibles y justificación del gasto. Incluir un desglose de los gastos por partidas y conceptos de acuerdo con la simulación-previsión de la tabla de la página siguiente:

*-Si incluye además una simulación-previsión de gastos más detallada y desglosada por anualidades, se recomienda que la previsión de gastos para la **primera anualidad** no supere los 4.000 euros ni incluya gastos de personal. Tengan en cuenta que la contratación del personal investigador postdoctoral se realizará a partir del 1 de julio de 2016, solamente para proyectos de 3 anualidades de duración-*

A continuación se relaciona de forma detallada el presupuesto y la justificación del gasto por partidas, y un cuadro resumen por anualidades y partidas de gasto.

a) Gastos en material inventariable científico.

Se dispone de 4 estaciones de trabajo: 1 Dell Precision T690, 2 Dell Precision T7500, 1 Dell Precision T7610 a disposición de los miembros del equipo adscritos a la Universidad de Salamanca. Se presupuesta gasto para la adquisición de otra estación de trabajo de características similares (7.000 €) y un servidor para alojar el software final implementado sobre GIS (4.500 €). La Universidad de Salamanca dispone de licencia de ArcGis, servicio de mantenimiento y housing gratuito para los miembros de la Universidad, del que se hará uso.

b) Gastos en material fungible.

Ayuda para gastos de papelería, tóner, impresión de pósters para congresos 700 €

c) Gastos en Servicios externos al organismo.

Se presupuesta de forma aproximada el coste del uso de las capacidades de cálculo del Centro de Supercomputación de Castilla y León en 6.000 € +21% de IVA. Este presupuesto es meramente orientativo, teniendo en cuenta que el coste de 1 hora de CPU para instituciones públicas es de 0,12 € +21% de IVA. Este gasto se realizará mayoritariamente en la segunda y tercera anualidad.

d) Gastos de viajes y dietas.

El hecho de que algunos de los miembros del grupo forman parte de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, la empresa colaboradora está ubicada en León, y los otros grupos colaboradores están en Galicia, incrementa el gasto en viajes y dietas por lo que en esta partida se presupuesta el máximo permitido 3.000 €, repartido en las tres anualidades.

e) Gastos en difusión de resultados.

Ayuda para gastos de publicación y cuotas de congresos nacionales e internacionales en las revistas y congresos mencionados en el apartado 4.7 de esta memoria. Por concretar algunos datos para justificar este gasto, la revista Int. J. of Wildland Fire tiene un gasto de \$US60 por página más un coste extra por páginas en color; un congreso nacional como CEDYA/CMA tiene una cuota de inscripción de alrededor de 350 €; y un congreso internacional como ECCOMAS en torno a 750 €. Se solicita una ayuda de 6.000 €.

No se contemplan gastos de Open Access puesto que se hará uso del repositorio institucional de la Universidad de Salamanca, Gredos, que en el 18ª edición del Ranking Web de Repositorios, de Enero de 2016 ocupó la posición 83 de 2.297.

f) Gastos de personal para la contratación de un investigador postdoctoral.

Se presupuesta el gasto de un contrato de investigador postdoctoral durante 21 meses, del 01/10/2016 al 31/06/2018 con una partida total de 69.565 €. El perfil del contratado será Ingeniero Informático superior o similar con experiencia en Sistemas de Información Geográfica y servidores web. Las tareas correspondientes a dicho contratado se recogen en el apartado "4.4 Plan de trabajo" de la presente memoria.

g) Gastos indirectos.

Se presupuesta el 15% del gasto de personal, un total de 10.435 €.

PARTIDA DE GASTO	1º ANUALIDAD	2º ANUALIDAD	3º ANUALIDAD
a) Material inventariable	0 €	7.000 €	4.500 €
b) Material fungible	0 €	350 €	350 €
c) Servicios externos	0 €	4.840 €	2.420 €
d) Viaje y dietas	600 €	1.200 €	1.200 €
e) Difusión de resultados	0 €	3.000 €	3.000 €
f) Personal	0 €	29.092 €	40.473 €

g) Costes indirectos	0 €	4.364€	6.071 €
Total	600 €	49.846 €	58.014€

4.7.- Transferencia de resultados.

Los resultados de este proyecto se difundirán a través de la página web del grupo de investigación: <http://diarium.usal.es/sinumcc>

Esperamos que la publicación de los resultados de este proyecto se realice en las siguientes revistas:

Int. J. for Numerical Methods in Engineering
Advances in Engineering Software
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering
Foundations of Computational Mathematics
Int. J. of Wildland Fire
Fire Technology
Combustion Science & Technology
Int. J. of Geographic Information Science

y en los siguientes Congresos:

ECCOMAS Conference on Numerical Methods in Engineering
International Conference on Forest Fire Research
Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería (SEMNI)
Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicaciones y Congreso de Matemática Aplicada (CEDYA/CMA).

Se realizarán seminarios específicos dirigidos a empresas y administraciones públicas interesadas en la aplicación de la herramienta generada durante el proyecto.

CUMPLIMENTE UNA DE LAS DOS TABLAS: OPCIÓN A), o bien OPCIÓN B)

OPCIÓN A)

SIMULACIÓN-PREVISIÓN DEL IMPORTE SOLICITADO PARA UN PROYECTO CON DURACIÓN DE 3 AÑOS Y CON GASTOS PARA LA CONTRATACIÓN DE PERSONAL INVESTIGADOR POSTDOCTORAL, CON POSTERIORIDAD A LA CONCESIÓN, A PARTIR DEL 01/07/2016.

SIMULACIÓN-PREVISIÓN DE REPARTO DEL PRESUPUESTO DE LA SUBVENCIÓN SOLICITADA PARA EL DESARROLLO DE TODO EL PROYECTO.	Importe solicitado (en euros, sin decimales) hasta 120.000 €
a) Gastos en material inventariable científico. Los gastos en electrónica de consumo no están permitidos.	11.500 €
b) Gastos en material fungible.	700 €
c) Gastos en Servicios externos al organismo.	7.260 €
d) Gastos de viajes y dietas, hasta 3.000 €, para todo el proyecto:	3.000 €
e) Gastos en difusión de resultados.	6.000 €
SUBTOTAL (a+b+c+d+e)	28.460 €
SUBTOTAL (a+b+c+d+e+g)	38.895 €
f) Gastos de personal para la contratación de un investigador postdoctoral. Como máximo desde el 1 de julio de 2016 hasta el 30 de junio de 2018). No puede superar los 40.000 € por anualidad= máximo 80.000 €	69.565 €
g) Gastos indirectos, hasta el 15% de los gastos directos de contratación de personal investigador postdoctoral, por anualidad.	10.435 €
IMPORTE TOTAL DE LA SUBVENCIÓN SOLICITADA (a+b+c+d+e+f+g) EN EUROS SIN DECIMALES):	108.460 €

OPCIÓN B)

SIMULACIÓN-PREVISIÓN DEL IMPORTE SOLICITADO PARA UN PROYECTO CON DURACIÓN DE 2 Ó 3 AÑOS Y SIN GASTOS DE CONTRATACIÓN DE PERSONAL.

SIMULACIÓN-PREVISIÓN DE REPARTO DEL PRESUPUESTO DE LA SUBVENCIÓN SOLICITADA PARA EL DESARROLLO DE TODO EL PROYECTO.	Importe solicitado (en euros, sin decimales) hasta 40.000 €
a) Gastos en material inventariable científico. Los gastos en electrónica de consumo no están permitidos	
b) Gastos en material fungible.	
c) Gastos en Servicios externos al organismo.	
d) Gastos en dietas y viajes, hasta 3.000 € para todo el proyecto:	
e) Gastos en difusión de resultados.	
IMPORTE TOTAL DE LA SUBVENCIÓN SOLICITADA (a+b+c+d+e) EN EUROS SIN DECIMALES):	

5.- INTERÉS DEL PROYECTO: *(Correspondencia con el aptdo. Undécimo.1.b.1º, 2º y 3º de la convocatoria).*

5.1.- Grado de contribución del proyecto al fomento y generación de conocimiento frontera

Los trabajos teóricos sobre mejoras en el modelo de propagación del fuego PhFFS mediante incorporación de la fase gaseosa, mejoras en las técnicas de asimilación de datos, aceleración de los cálculos numéricos mediante técnicas “POD”; junto con los trabajos más experimentales de ajuste del modelo PhFFS mediante la simulación del mayor número posible de casos reales, contribuirán a adquirir nuevos conocimientos acerca de los fundamentos de la propagación de incendios forestales y la simulación matemática de fenómenos de tan elevada complejidad.

Existe además una perspectiva cercana de aplicación práctica y directa del modelo de propagación del fuego PhFFS, así como del modelo de viento HDWM, dado el grado de desarrollo de los trabajos realizados hasta la fecha. Señalar que uno de los objetivos es que dichos modelos sean funcionales a través de su integración en GIS, lo cual a día de hoy es una realidad incipiente, y dar visibilidad al producto final mediante su incorporación a una plataforma online.

Por todo lo expuesto podemos esperar un impacto científico del proyecto remarcable, incluso a nivel internacional gracias a la proyección internacional de la empresa colaboradora, Tecnosylva S.L. Esta empresa es actualmente miembro del proyecto PHAROS: Project on a Multi-Hazard Open Platform for Satellite Based Downstream Services, dentro del programa 7FP-Security, Seventh Framework Programme sobre seguridad de la Comisión Europea.

5.2.- Grado de contribución del proyecto al desarrollo de tecnologías emergentes.

El objetivo final de este proyecto es un producto tecnológico, un modelo de propagación de incendios forestales integrado en un sistema de información geográfica y accesible a través de una plataforma on-line. Se basa en ideas innovadoras de modelos físicos con técnicas numéricas avanzadas. Tiene un enfoque altamente interdisciplinar, colaborando expertos de matemática aplicada y cálculo científico, programación, sistemas de información geográfica, ingeniería y gestión forestal y extinción de incendios forestales. Por último, los resultados que se pretenden obtener tienen una evidente aplicabilidad socioeconómica en el ámbito de la protección medio ambiental, en el sector forestal. Gracias a la integración de la herramienta en un Sistema de Información Geográfica y facilitando su acceso a través de una plataforma on-line, se podrán beneficiar de los resultados del proyecto las empresas especializadas y las administraciones públicas dedicadas a la prevención, seguridad y gestión de incendios forestales con el consecuente impacto económico, social y medioambiental.

5.3.- Grado de contribución del proyecto a promover la generación de conocimiento orientado a la búsqueda de soluciones a los problemas presentados en los retos de la

sociedad identificados en Horizonte 2020, Programa Marco de Investigación e Innovación 2014-2020. Y su relación con las prioridades temáticas de la **RIS3** de Castilla y León seleccionadas en el **Documento nº 1** del Formulario General.

Contribución del proyecto al reto 5 sobre “Acción por el clima, eficiencia de los recursos y materias primas” de los retos de la sociedad identificados en Horizonte 2020, Programa Marco de Investigación e Innovación 2014-2020.

La “Evaluación preliminar de los impactos en España del cambio climático” del “Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)” del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente señala textualmente a cerca de los efectos del cambio climático sobre el riesgo de incendios forestales que: *“Las temperaturas y la falta de agua en el suelo aumentarán, lo que inducirá a una mayor y más duradera desecación de los combustibles. Por lo tanto, la inflamabilidad de los combustibles aumentará. Los índices medios de peligro aumentarán y, en particular, la frecuencia de situaciones extremas. La duración media de la temporada de peligro también aumentará, así como las igniciones causadas por rayos y por negligencias. La frecuencia, intensidad y magnitud de los incendios aumentará.”*

Dado que el objetivo es ajustar y validar una herramienta de simulación de incendios basada en modelos físicos ya muy avanzada, y ponerla a disposición de los potenciales usuarios, el proyecto tiene un gran aplicabilidad en cuanto a predicción del comportamiento de los incendios, apoyo a la planificación de la gestión de la extinción de los incendios forestales, determinación de los índices de gravedad potencial de las zonas forestales y en la interfaz urbano-forestal frente a incendios, etc. Por tanto, se adecúa perfectamente al objetivo de este reto en cuanto a *“...promover la generación de conocimiento científico sobre los efectos del cambio climático y la mitigación de los mismos...”* y *“...la creación de sinergias entre distintos grupos de investigación, empresas y actores sociales.”* Además da respuesta a cuestiones planteadas en el “Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)” en materia de *“mitigación del cambio climático en el sector forestal”*.

Lo avanzado del trabajo realizado hasta ahora por el grupo de investigación y la colaboración con la empresa Tecnosylva S.L. (ver Documento nº3 de la solicitud) sugiere una posible explotación de los resultados esperados orientando el producto final al mercado, esperando que genere interés en las empresas especializadas y las administraciones públicas dedicadas a la prevención, seguridad y gestión de incendios forestales.

Relación del proyecto con las prioridades temáticas de la estrategia regional de investigación e innovación para una especialización inteligente (RIS3) de Castilla y León.

El presente proyecto responde principalmente a la Prioridad 1 del RIS3, sobre “Agroalimentación y recursos naturales como catalizadores de la extensión de la innovación sobre el territorio” en el ámbito de actuación “I+D+I en Gestión Forestal”. Este proyecto aplica la investigación interdisciplinar, la innovación científica y la producción tecnológica en la conservación del valor de los recursos forestales de la Comunidad de Castilla y León, en

los mismos términos explicados previamente en la contribución del proyecto al reto 5 del Horizonte 2020.

En este mismo sentido, también responde a la Prioridad 4 del RIS, en concreto a la parte relativa al “Patrimonio Natural”, en el ámbito de actuación sobre “Sostenibilidad Ambiental” en lo relativo al Cambio Climático.

Por último, en lo relativo a la Prioridad 5, sobre “I+D en Tecnologías de la Información y la Comunicación, Energía y Sostenibilidad”, en el ámbito de actuación de Tecnologías Sostenibles, entendiéndose que los Sistemas de Información Geográfica donde se pretende integrar el modelo de propagación de incendios PhFFS (y también el modelo de viento HDWM) y la plataforma on-line que se espera desarrollar para dar visibilidad a dichos modelos son TIC.

6.- CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA SOBRE MEDIDAS ESPECÍFICAS:

6.1.- Marque con **X** lo que proceda y explique cómo contribuye el proyecto al cumplimiento de la normativa sobre las medidas específicas seleccionadas.

X

Declaro que el proyecto de investigación cumple lo establecido en los principios internacionales y en la normativa vigente en materia de bioética, experimentación animal, bioseguridad, patrimonio histórico y cultural, igualdad de género y protección de datos.

6.2.- Y en cumplimiento del apartado Segundo.3 de la Orden de 25 de febrero de 2016, de la Consejería de Educación, incluyo y explico las medidas específicas a adoptar en orden a garantizar la igualdad de género y la protección del medioambiente en la ejecución del proyecto.

En cuanto a garantizar la igualdad de género, en la contratación de un investigador posdoctoral, en igualdad de condiciones en cuanto a idoneidad curricular para cubrir la plaza, para promover la igualdad de oportunidades entre hombres y mujeres, se priorizará en favor del investigador del sexo menos numeroso en el grupo de investigación.

En cuanto a la protección medioambiental, no se efectuarán experimentos de campo con riesgo medioambiental. Las simulaciones se harán sobre incendios reales ya acontecidos de los que se dispongan datos, y ejemplos experimentales de laboratorio que podrán llevarse a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación Forestal de Lourizán de la Xunta de Galicia, con todas las medidas de seguridad pertinentes.

7- INFORMACIÓN ADICIONAL:

Marque con **X** lo que proceda

X	Declaro que el proyecto de investigación cuenta con colaboración empresarial en el momento de la solicitud, mediante un contrato/convenio u otro medio admitido en derecho que deje constancia fehaciente de la colaboración efectiva del proyecto con al menos una empresa, conforme al artículo 2.1 de las bases reguladoras de estas subvenciones y apartado Segundo.1 de la orden de convocatoria, como consta en el fichero denominado Documento nº 3. Empresas.pdf que se aporta como pdf adjunto al Formulario General.
X	Declaro que todos los investigadores del grupo de investigación son titulados universitarios con actividad docente y/o investigadora incluida en su horario laboral.

8.- OTRAS CONSIDERACIONES QUE DESEE HACER CONSTAR: