

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA***

INFORMACIÓN LIDAR Y CARTOGRAFÍA PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE
INCENDIOS FORESTALES EN LOS TÉRMINOS MUNICIPALES DE CÁSEDA, GALLIPIENZO, JAVIER Y
UJUÉ

.....

presentado por

JAVIER RESANO TOLEDO (*k*)

aurkeztua

GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO RURAL
GRADUA NEKAZARITZAKO ELIKAGAIEN ETA LANDA INGURUNEAREN INGENIARITZAN

MARZO, 2018

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**INFORMACIÓN LIDAR Y CARTOGRAFÍA
PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO
DE INCENDIOS FORESTALES EN LOS
TÉRMINOS MUNICIPALES DE
CÁSEDA, GALLIPIENZO, JAVIER Y UJUÉ**

Por:

Javier Resano Toledo

Directores:

Rosa María Canals Tresserras

Juan Carlos Cisneros Samper

Marzo de 2018

RESUMEN

El cambio de usos del suelo ocurrido en las últimas décadas ha producido como respuesta directa, el abandono de prácticas forestales, ocasionando pérdida de mosaico forestal y propiciando el desarrollo de masas forestales más densas. Además, el calentamiento global y la ocurrencia de periodos climáticos extremos de mayor intensidad, como por ejemplo las sequías, tienen como consecuencia una mayor disponibilidad y predisposición del combustible al paso del fuego. Es decir, el cambio climático y de usos del suelo, está modificando los patrones de comportamiento de los incendios forestales siendo cada vez de mayor intensidad y envergadura.

El objetivo del presente trabajo es determinar la capacidad de extinción en cuatro municipios de la Navarra media, mostrando de manera clara aquellas áreas que brindan oportunidad de control de un supuesto incendio, de aquellas que no. Además, se determinarán para estas áreas los principales ejes de propagación del fuego, pudiendo estimarse de manera aproximada los puntos estratégicos de gestión de la masa forestal.

A partir de datos LiDAR obtenidos de un escáner laser aéreo de la zona de estudio, se procesará la información obtenida y se establecerá la tipología de vegetación forestal, su distribución y la topografía de la zona. Después se realizarán simulaciones de un incendio ocurrido en la zona de estudio en el pasado, ajustando el comportamiento de la vegetación al paso del fuego para unas condiciones meteorológicas establecidas de alto riesgo de ocurrencia de gran incendio forestal. Una vez realizados los ajustes necesarios y establecido el patrón de comportamiento de la vegetación de dicha zona al paso del fuego, se modelizará ese comportamiento para el resto de la superficie objeto de estudio.

El resultado final del proyecto será una cartografía de comportamiento del fuego para los cuatro municipios estudiados, en los que quedarán definidas las zonas que superan la capacidad de extinción de los equipos actuales, las zonas que brindan oportunidad de extinción y los principales ejes de propagación que describiría un supuesto fuego que tuviera lugar en la zona.

PALABRAS CLAVE

- Incendio forestal
- LiDAR
- Cartografía forestal
- Prevención de incendios
- SIG
- Comportamiento fuego

ABSTRACT

Land abandonment in the last decades has produced the withdrawal of forest practices, homogenizing the landscape and increasing the forest density. Besides, global warming and extreme climate periods like droughts has as a consequence a high amount of biomass that can burn, which means more intense and larger forest fires. We can say that climate change and land abandonment is modifying forest fires behavior, making them more intense and larger.

This project aims to determine the capacity of the fire extinction in four districts of Navarra, showing clearly the areas that have the opportunity of fire control and those that doesn't. Moreover, it will be determined for these areas the main paths of fire propagation, being able to estimate approximately the strategical points where cleaning forest tasks have to be made.

Based on LiDAR data obtained from an aerial laser record of the districts studied, the information obtained will be processed and classified depending on forest vegetation typology and distribution and landscape topography. Besides, simulations based on an historical fire and considering extreme weather conditions will be performed. The simulation adjusted will serve as a model for the rest of the districts.

The final result of the project will be a cartography of the fire behavior in the four districts studied, that will show the districts that exceed the extinction capacity of the current equipment, the districts with extinction potential and the main paths of fire propagation in the area.

KEY WORDS

- Forest fire
- LiDAR
- Forest cartography
- Fire prevention
- SIG
- Fire behavior

AGRADECIMIENTOS

A Juan Carlos Cisneros, sargento de Bomberos de Navarra y codirector del trabajo, por todo el apoyo y conocimientos transmitidos y por poner a mi disposición todas las herramientas necesarias para llevar a cabo este estudio. También agradecer su esfuerzo incansable en el área forestal aplicando y desarrollando nuevas técnicas y tecnologías en prevención y extinción de incendios forestales en Navarra.

A Rosa María Canals, directora del trabajo. Gracias por permitirme llevar a cabo este reto y por confiar en mí desde el principio.

A Fermín Alcasena, sin su colaboración y ayuda, nunca habría llegado hasta aquí.

A mi familia, por enseñarme a seguir mi propio camino independientemente de las dificultades que se presenten, por creer en mí y por apoyarme incondicionalmente.

ÍNDICE

RESUMEN	1
PALABRAS CLAVE	3
ABSTRACT	5
KEY WORDS.....	7
AGRADECIMIENTOS	9
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 CAMBIO GLOBAL: CAMBIO DE USOS DEL SUELO Y CAMBIO CLIMÁTICO.....	13
1.1.1 Cambio de usos del suelo.....	13
1.1.2 Cambio climático	13
1.2 DINÁMICA DE LOS INCENDIOS EN ESPAÑA EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS	15
1.2.1 Evolución entre 1970-2010	15
1.2.2 Evolución entre 2011-2017	17
1.2.3 Previsión futura	18
1.2.4 Incendios y su categorización.....	19
1.3 PREVENCIÓN VS. EXTINCIÓN DE INCENDIOS. NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS.....	20
1.3.1 Medidas preventivas.....	21
1.3.2 Nuevas tecnologías en la prevención de incendios	22
2. OBJETIVOS	25
3. MATERIAL Y MÉTODOS	27
3.1 ÁREA DE ESTUDIO Y SU ELECCIÓN	27
3.2 DATOS LIDAR Y FUENTES CARTOGRÁFICAS EMPLEADAS	28
3.3 SOFTWARE EMPLEADOS	28
3.4 METODOLOGÍA	30
3.4.1 Parámetros de entrada	30
3.4.2 Landscape File	34
3.4.3 Simulación de un incendio de diseño	37
3.4.4 Parámetros de comportamiento del fuego.....	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	41
4.1.1 Modelo digital de elevaciones.....	41
4.1.2 Modelo digital de pendientes.....	42
4.1.3 Modelo digital de orientaciones.....	42
4.1.4 Modelos de combustible.....	43
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE FARSITE.....	43
4.2.1 Situación sinóptica de un GIF en la Navarra Media	43
4.2.2 Primeras simulaciones	44
4.2.3 Simulación final ajustada	45
4.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE FLAMMAP	46
4.3.1 Parámetros de comportamiento del fuego	46
4.3.2 Análisis de los resultados en un SIG.....	50
5. CONCLUSIÓN.....	55
6. ANEXOS	57
Anexo I: Resultados visualizados por la dirección de la extinción.....	57
7. BIBLIOGRAFÍA.....	59

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CAMBIO GLOBAL: CAMBIO DE USOS DEL SUELO Y CAMBIO CLIMÁTICO

La ocurrencia de grandes cambios ambientales relacionados con las fluctuaciones climáticas y con la actividad humana se conoce como Cambio Global y representa un nuevo escenario en las relaciones entre las sociedades humanas y el medio ambiente (Lasanta et al. 2015).

1.1.1 Cambio de usos del suelo

Desde hace más de un siglo se abandonan tierras agrícolas y ganaderas en los países desarrollados. Es el resultado, en gran parte, de la pérdida de viabilidad económica del sector primario, pero también de la escasa adaptación de explotaciones y campos de cultivo a las exigencias actuales (elevada competitividad, fuerte mecanización, alta productividad, cauces de comercialización muy organizados, ...), de la degradación de áreas agropecuarias y de medidas políticas de gestión y conservación de la tierra (Lasanta, 2016).

En España, el abandono de tierras afecta sobre todo a las áreas de montaña, que desde las primeras décadas del siglo XX (y muy especialmente entre los años 50 y 80 del pasado siglo), han visto cómo las laderas se dejaban de cultivar a la vez que muchos pastos se embastecían por falta de pastoreo. Más recientemente, el abandono incide en campos agrícolas de tierras llanas, unas veces como consecuencia de la aplicación de la PAC, que entre 1989 y 2008 incentivó la retirada de tierras agrícolas de forma permanente o temporal, y otras por la degradación/contaminación del suelo y por la falta de agua (Lasanta, 2016).

Como consecuencia de la modificación de los sistemas de explotación agrario, ganadero y forestal, unidos a los procesos de industrialización, el monte está recuperando terrenos que estaban destinados a prácticas humanas, produciendo la pérdida de paisaje en mosaico que ha predominado en el entorno rural. El resultado de esto supone un cambio en la tipología y distribución de los combustibles, ha aumentado la superficie matorralizada y arbolada, provocando el desarrollo de masas forestales más densas, con alta continuidad horizontal y vertical de combustible.

1.1.2 Cambio climático

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (Stocker et al. 2013).

Cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850. En el hemisferio norte, es probable que el periodo 1983-2012 haya sido el periodo de 30 años más cálido de los últimos 1.400 años (Stocker et al. 2013).

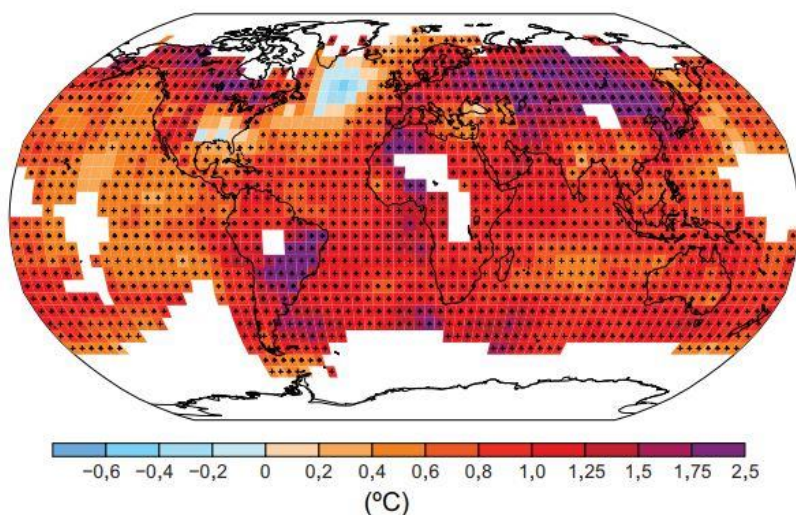


Figura 1: Cambio observado en la temperatura de la superficie, entre 1901-2012. Fuente: IPCC, 2013.

El cambio climático y los bosques están íntimamente ligados. Por una parte, los cambios que se producen en el clima mundial están afectando a los bosques debido a que las temperaturas medias anuales son más elevadas, a la modificación de las pautas pluviales y a la presencia cada vez más frecuente de fenómenos climáticos extremos, como por ejemplo sequías.

En las últimas décadas, sin embargo, los intensos y rápidos cambios que están ocurriendo a escala mundial y que constituyen el cambio global (cambio climático, cambio de uso del territorio, movimientos demográficos, etc), han provocado que el mundo rural se desplome, y con él, el uso del monte. La explotación en régimen extensivo de los herbívoros domésticos está siendo sustituida por una ganadería cada vez más intensiva, de animales estabulados, poco diversificados (en cuanto a especies y razas) y con un nivel de herbivorismo (pastoreo) y uso del pasto muy bajo. Las actividades forestales tradicionales que mantenían limpios los bosques (carboneo, uso de leñas) han desaparecido en muchos casos y la extracción de madera ha quedado limitada a la rentabilidad del proceso de extracción. En definitiva, el paisaje está cambiando en el lapso de una generación y nuevos conceptos como el de matorralización están surgiendo con fuerza en Europa. El paisaje se cierra y las superficies boscosas van en aumento (Canals, 2014)

1.2 DINÁMICA DE LOS INCENDIOS EN ESPAÑA EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS

1.2.1 Evolución entre 1970-2010

Se definen como Grandes Incendios Forestales (GIF) aquellos de más de 500 hectáreas de superficie forestal afectada (ADCIF, 2012).

La evolución del número de Grandes Incendios Forestales junto con el total de siniestros, englobando en siniestros a todos los incendios forestales mayores de 1 hectárea, durante casi cuatro décadas, desde el año 1970 al 2010, se muestra en los siguientes gráficos.

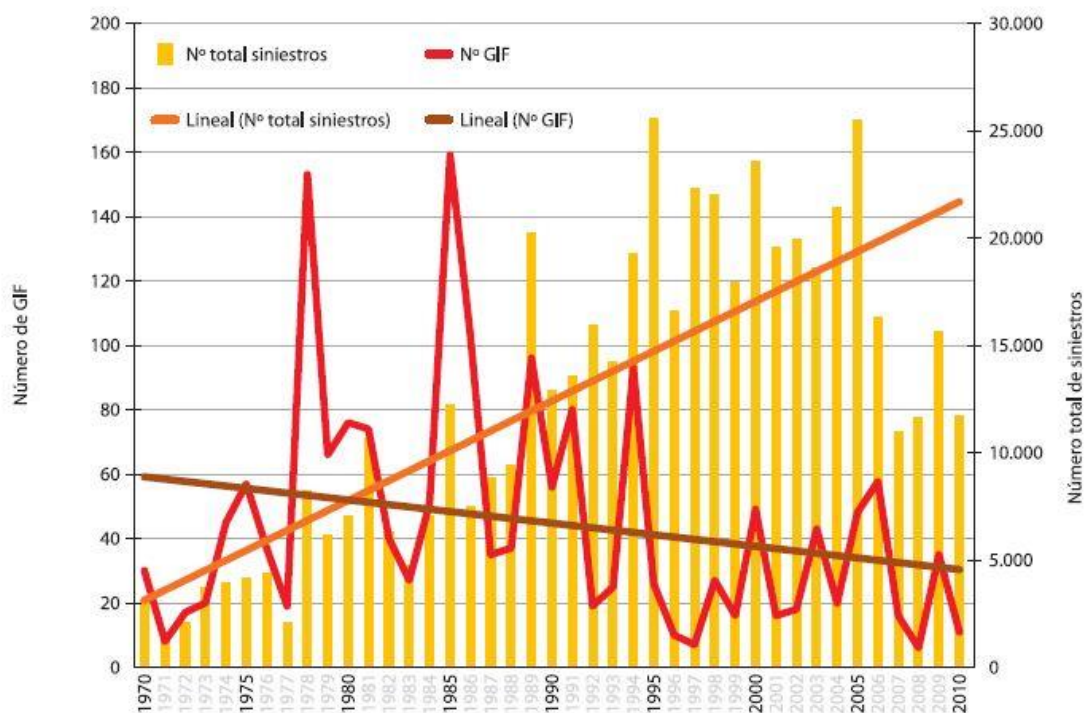


Figura 2: Evolución del número total de siniestros y de los grandes incendios forestales, 1970-2010.

Fuente: ADCIF, 2012.

La década de 1980-1989 fue el periodo en el que se registraron una mayor incidencia de GIF, con una media decenal de 70 GIF/año. Una de las causas de esto fue la ocurrencia de un largo periodo de sequía que se prolongó desde 1978 a 1984. A partir de 1978, se registraron un número de GIF en progresión ascendente que culmina en los 159 GIF ocurridos en 1985. En los años 90, fue 1994, con 93 GIF, el peor año no tanto por número de siniestros sino por las superficies afectadas, que supusieron un 77% de la superficie forestal total afectada por incendios forestales, respecto al total de la superficie calcinada por los mismos. Desde 1992 y hasta 1996 en España se vivió otro periodo de intensa sequía. A pesar de ello, la media anual de GIF descendió a 36, aproximadamente la mitad que en la década anterior.

En la última década 2001-2010 se ha consolidado esta tendencia ligeramente descendente en el número de GIF.

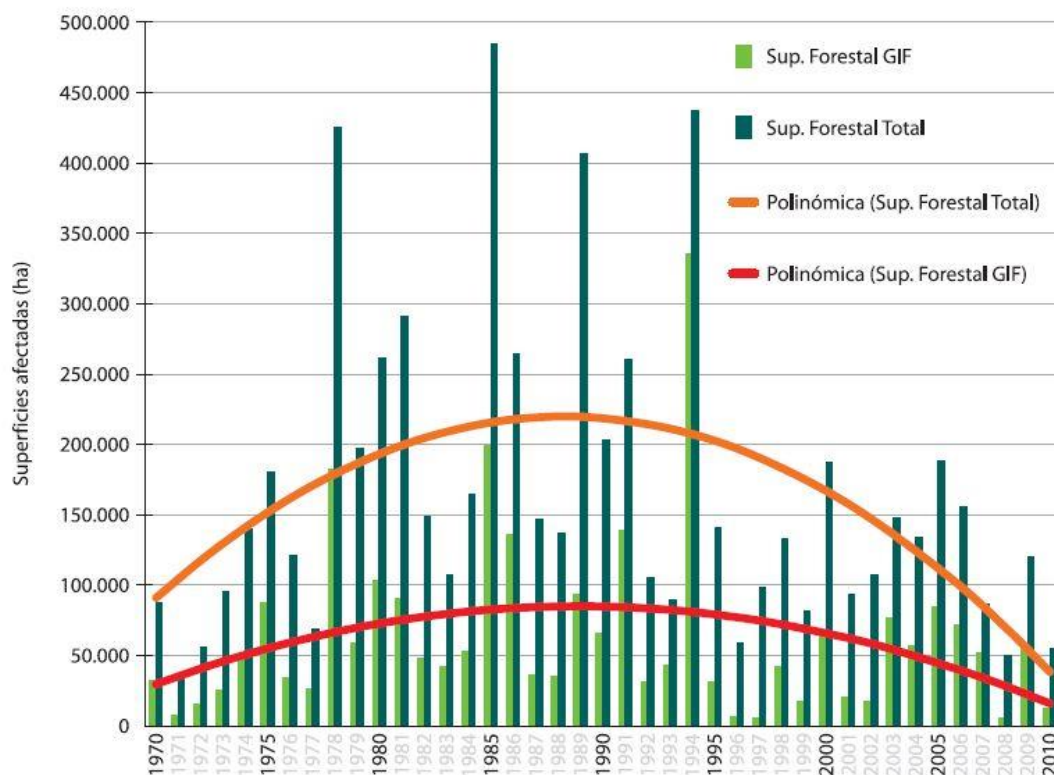


Figura 3: Evolución de la superficie total afectada y de la superficie total afectada por GIF, 1970-2010.
Fuente: ADCIF, 2012.

En el gráfico 3, se puede ver la evolución de las superficies afectadas por los grandes incendios forestales y por el total de siniestros en el periodo 1970-2010. La superficie forestal afectada por GIF alcanzó su máximo en 1994. La década de los 80 fue la que presentó una mayor incidencia en superficie forestal afectada por grandes incendios forestales, en términos absolutos. Desde esa fecha ha ido disminuyendo con el paso de los años.

La década de los 90 fue sensiblemente mejor que la anterior, pero presenta altibajos notables, como 1994 y 1997, años de los valores máximo y mínimo, respectivamente, de la serie histórica de la superficie forestal afectada por grandes incendios forestales. Esta tendencia se ha afianzado en la década 2000-2009, alcanzando un valor medio por debajo del 60% del valor máximo, alcanzado en el periodo 1980-1989. Esta última década es la que menos superficie ha tenido afectada tanto por el total de siniestros como por los grandes incendios. El año 2005 fue el año en que mayor superficie forestal fue afectada por grandes incendios, presentándose desde esa fecha una tendencia ligeramente decreciente.

1.2.2 Evolución entre 2011-2017

En el gráfico 3 se muestra la tendencia de los grandes incendios forestales en España desde el 2011 hasta el 2017, último año con datos estadísticos.

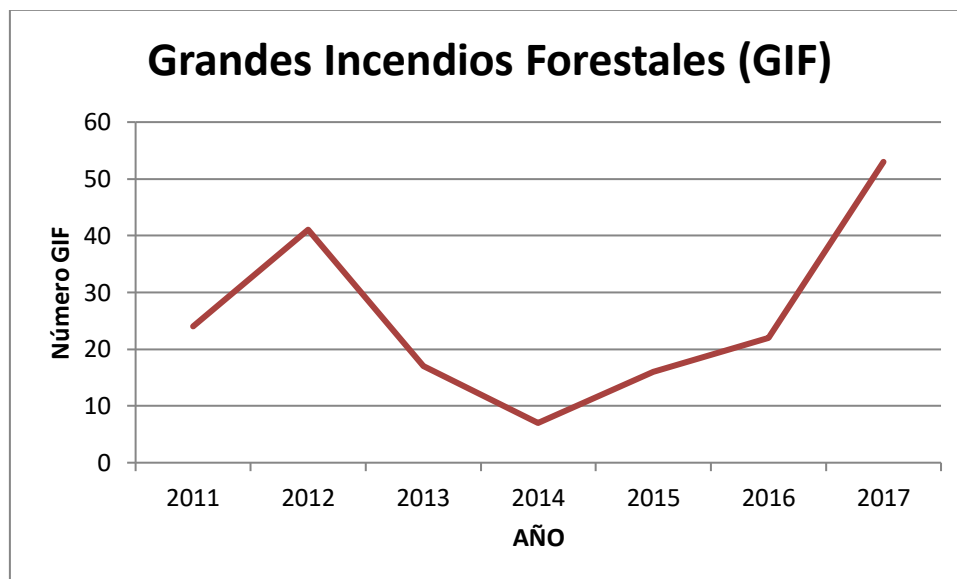


Figura 4: Grandes Incendios Forestales 2011-2017. Fuente: ADCIF (2011-2017).

En la última década, el año 2012 estuvo marcado por una alta ocurrencia de grandes incendios forestales debido al carácter cálido del año, con una temperatura media superior al valor medio normal. Y también fue un año de escasas precipitaciones con una media un 15% por debajo del valor medio normal. Después hubo un progresivo descenso de los GIF en los dos años siguientes por tener ese año un ligero carácter más fresco. A partir del 2015 los GIF ocurridos cada año han ido en aumento, siendo el año 2017 el segundo peor año de incendios forestales en España de la última década, con 54 GIF.

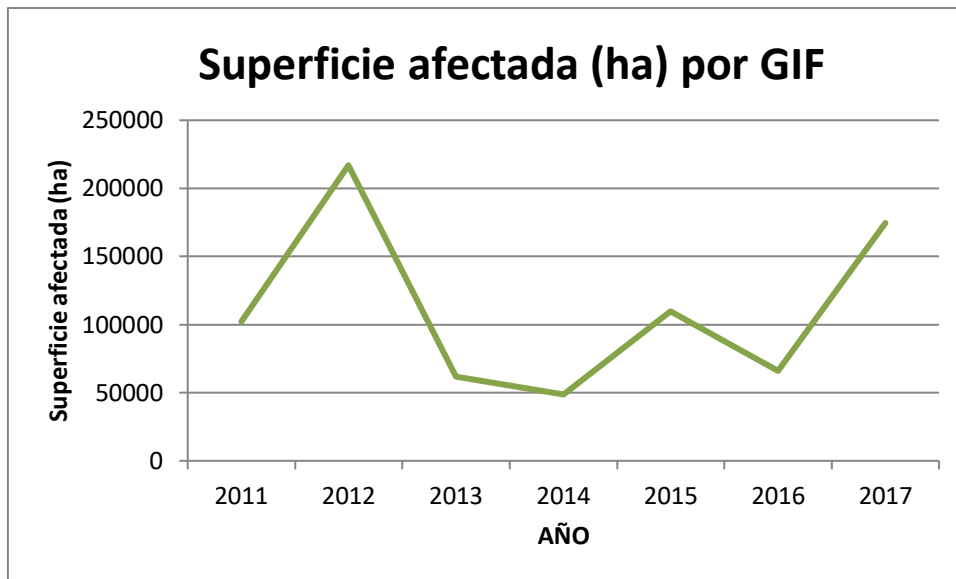


Figura 5: Superficie afectada por Grandes Incendios Forestales 2011-2016. Fuente: ADCIF (2011-2017)

La tendencia de la superficie forestal afectada por los grandes incendios está cambiando respecto a la de finales de los noventa. Cada vez las condiciones meteorológicas son más adversas y las superficies afectadas son mayores. En las décadas desde 1990 hasta el 2010, la superficie afectada por GIF fue reduciéndose desde las 80.000 hectáreas afectadas en 1990 hasta cerca de 20.000 hectáreas en el año 2010. Como se puede observar en la Figura 5, fue a partir del año 2011 cuando las superficies afectadas por GIF ascienden notablemente, produciéndose picos que rondan las 200.000 hectáreas en los años 2012 y 2017.

1.2.3 Previsión futura

El cambio global está relacionado con diversos factores que tienen implicaciones en el cambio del régimen de incendios. Cambios en la densidad y distribución de la población humana, abandono rural, cambios en la gestión, invasiones vegetales en muchos ecosistemas, incremento del dióxido de carbono. Salvo los cambios de densidad que implican un incremento en las igniciones, la mayoría de los demás factores conllevan un incremento en la cantidad y continuidad del combustible (Pausas, 2012).

El cambio global ha provocado que la superficie de bosque en Europa aumente más de un tercio desde 1900 (Fuchs et al. 2014).

La ausencia de gestión y planificación ha conducido a muchos bosques al abandono y como consecuencia en los países del arco mediterráneo como España se producen grandes incendios forestales. Con el cambio climático esta situación tenderá a agravarse. Los ecosistemas mediterráneos están entre los más vulnerables del mundo y sufrirán impactos muy severos. El incremento de temperaturas causará así, periodos

más fuertes de sequías y olas de calor extremas, cada vez más frecuentes y duraderas. Esta situación someterá a la vegetación a unas condiciones hídricas más severas, agudizando su inflamabilidad y combustibilidad y por tanto, incrementando el riesgo a sufrir grandes incendios forestales con más frecuencia e intensidad (IPCC, 2014).

Como ya se ha visto la tendencia de ocurrencia de incendios forestales se ha reducido considerablemente, en el periodo 2006-2015 un 37% con respecto a la década anterior. Lo mismo sucede con la superficie afectada por los mismos. La eficacia de los medios de extinción ha progresado, según datos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Pero el problema de fondo, no son los incendios en general, sino aquellos de alta intensidad y difícilmente controlables. Los avanzados sistemas de extinción actuales no han logrado reducir el número de GIF, 23 de media cada año en las últimas décadas. Aunque los GIF apenas suponen un 0,12% del total, en ellos arde el 37% de la superficie que se quema anualmente (ADCIF, 2012).

Este cambio global está provocando que los incendios sean cada vez más grandes y más destructivos, y aunque los medios de extinción son mejores y más eficientes, cuando el incendio adquiere unas dimensiones determinadas, la capacidad de extinción se ve superada y el incendio es incontrolable. Esta situación extrema permanece hasta que se modifican algunas condiciones que favorecen su propagación. La solución no sólo radica en la mejora continua de los medios de extinción y la tecnología que emplean, sino que resulta fundamental y de gran importancia el aumento de actuaciones de mejora y aprovechamiento de las masas forestales.

1.2.4 Incendios y su categorización

El paisaje ha evolucionado al ritmo de los cambios socioeconómicos siguiendo las pautas biológicas de colonización de campos de cultivo y de respuesta de las estructuras arboladas a los cambios de explotación. De forma natural, el comportamiento de los incendios se ha ido adaptando a cada una de las fases de esta evolución del paisaje, determinando las diferentes generaciones de incendios (Canals, 2014).

Una generación de incendios viene definida por un escenario donde existe un factor que limita la capacidad de extinción, posibilitando que el incendio pueda convertirse en un GIF. Este factor es extrínseco a los servicios de extinción e intrínseco al paisaje y a sus diferentes fases de evolución, las cuales pueden coincidir en el tiempo y en el espacio (Costa et al. 2011).

1. Primera generación: GIF por continuidad de combustible: Se inicia a finales de los 50, principios de los 60. Son incendios de superficie de media intensidad, con perímetros muy largos que queman entre 1.000 y 5.000 hectáreas. Sobre todo son incendios conducidos por viento. La propagación está condicionada por la disponibilidad de combustible continuo que hay en superficie, principalmente

herbazales y arbustos. Los campos de cultivo se están abandonando y ya no rompen la continuidad (Costa et al. 2011).

2. Segunda generación: GIF por velocidad de propagación: Hacia los años 80 en determinadas zonas del país como Cataluña, se originan incendios de mayor intensidad y velocidad, de 5.000 a 10.000 hectáreas. Son incendios conducidos por el viento y la topografía. La velocidad de propagación supera a las líneas de extinción. La propagación está condicionada por la acumulación de combustible debida al abandono de cultivos y de la actividad agropecuaria y forestal tradicional, que permite incendios más rápidos e intensos que se propagan puntualmente mediante focos secundarios (Costa et al. 2011).

3. Tercera generación: GIF por intensidad de fuego de copas: A finales de los 90 empiezan a desarrollarse más incendios que afectan a grandes superficies de 10.000 a 20.000 hectáreas. Se trata de fuegos de copas, que se producen debido al intenso calor y que originan columnas convectivas y focos secundarios masivos a largas distancias. Estos incendios tienen pocas oportunidades de extinción y sufren cambios de comportamiento más rápidos que superan la capacidad de movimiento de la información por la cadena de mando y por lo tanto de los recursos de extinción. Aparecen con mayor frecuencia episodios meteorológicos de olas de calor. La propagación se produce por las copas de los árboles debido a la continuidad vertical y a la homogeneidad de los bosques, fruto de la falta de gestión forestal y de la política histórica de extinción de incendios de media y baja intensidad (Costa et al. 2011).

4. Cuarta generación: GIF cruzando interfases urbano-forestales: Este tipo de GIF ya han aparecido en Cataluña, a partir del año 2000. Son fuegos que pueden ocurrir en interfases urbano-forestal y quemar más de 1.000 hectáreas. Son grandes incendios que se propagan por la masa forestal y por los jardines y casas sin dificultades debido a la densidad de vegetación y a la continuidad de carga de combustible entre la zona forestal y la zona urbanizada (Costa et al. 2011).

5. Quinta generación: Simultaneidad de GIF cruzando interfases urbano-forestales. Megafuegos: Este tipo de GIF se han producido en los últimos años en Chile, EE.UU y Canadá. En España todavía no han aparecido. Son fuegos de copas simultáneos que involucran interfases urbanas y forestales. Sus comportamientos son extremos, y son fuegos muy rápidos y virulentos que cruzan amplias zonas urbanizadas (Costa et al. 2011).

1.3 PREVENCIÓN VS. EXTINCIÓN DE INCENDIOS. NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS.

La evolución y mejora de los medios de extinción, así como las estrategias de extinción, ha sido muy grande en las últimas décadas. A pesar de ello, los medios de extinción son muy eficaces para incendios de baja y media intensidad, pero no para los de alta intensidad, que continúan fuera de la capacidad de extinción y se convierten en los responsables de la mayor parte de la superficie quemada. Los grandes incendios forestales superan durante largos periodos de tiempo la capacidad

de extinción de los medios, hasta que no se produce un cambio en continuidad de combustible, en meteorología o en el terreno, el fuego está fuera de control.

En consecuencia, es en la prevención donde se tiene que trabajar para reducir el riesgo de que un incendio forestal se convierta en un gran incendio forestal. A continuación se exponen las principales medidas que pueden implementarse para la prevención de incendios forestales.

1.3.1 Medidas preventivas

1. Silvicultura: Consiste en la realización de labores silvícolas en masas forestales, para reducir la continuidad vertical y horizontal del combustible. Estas labores suelen ser muy costosas y el territorio ocupado por bosques es muy amplio. Se podría reducir su utilización a zonas que tengan un alto riesgo de propagación de incendios, es decir, seleccionar esas zonas críticas y gestionarlas. Es lo que se conoce como Puntos Estratégicos de Gestión (PEG).

2. Herbivorismo: La existencia de herbívoros a lo largo de la historia de la tierra ha jugado un papel clave para mantener bajos niveles de biomasa vegetal, lo que ha limitado el tamaño e intensidad de los incendios. En la actualidad, el herbivorismo salvaje es muy reducido en España y la ganadería extensiva utilizadora de los recursos vegetales naturales apenas tiene peso, por haberse generalizado la ganadería estabulada e intensiva (Pausas, 2012).

Por ello, promover la recuperación de la ganadería extensiva y proteger el herbivorismo salvaje es fundamental para reducir la carga combustible de las masas forestales. El biodesbroce y el pastoreo son técnicas muy sostenibles para gestionar la biomasa vegetal.

3. Fuego prescrito: Los incendios se producen desde el inicio de la vida terrestre. El fuego es parte inherente del sistema. Muchas características de los vegetales son adaptaciones al fuego, como la capacidad de rebrotar, cortezas gruesas, rotura por calor de la dormición de semillas, etc (Pausas, 2012).

El fuego controlado por el hombre ha sido un elemento importante en silvicultura, agricultura y ganadería, y un proceso importante en la formación de patrones de paisaje y en la diversidad ecológica y cultural desde tiempos prehistóricos. Mediante quemas controladas se puede gestionar la biomasa forestal y reducir la continuidad de combustible que va a propiciar la generación de un Gran Incendio Forestal. De las medidas preventivas descritas anteriormente, ninguna es la solución por separado, la combinación de todas ellas será la que reduzca la continuidad del combustible vegetal, y por tanto el riesgo de generación de un gran incendio forestal. El objetivo de estas medidas es la creación de un paisaje en mosaico que existía históricamente y que se ha ido perdiendo en el último siglo.

Finalmente, también son necesarias las labores de formación y divulgación, y en concreto, la realización de campañas de concienciación de la población con el uso del fuego, porque el 96% de los incendios de España son causados por el hombre (ADCIF, 2012).

1.3.2 Nuevas tecnologías en la prevención de incendios

La interpretación de variables como imágenes por satélite, datos históricos, modelos del terreno, vegetación de la zona y ecuaciones matemáticas, podría crear patrones de comportamiento del fuego claves para este tipo de desastres en dos sentidos: como prevención en las áreas que los datos interpretados determinen que tienen un alto riesgo de incendios, y como ayuda en las labores de extinción de los fuegos que se produzcan, ya que existe tecnología que proporciona datos en tiempo real y facilita las labores de las brigadas que trabajen en la zona.

Datos cartográficos LiDAR

1. Introducción: El LiDAR (Light Detection And Ranging) es un sistema activo de detección remota basado en un escáner láser, este sensor usa una fuente de radiación electromagnética propia, lo que le permite operar 24 horas: noche y día. Esta tecnología aerotransportada y combinada con un sistema inercial y un GPS que trabaja a tiempo real permite obtener una mayor densidad de medidas de las superficies que cualquier otro sistema conocido, presentando la ventaja frente a otros sensores de poder penetrar en la cubierta vegetal y capturar de esta forma información de diferentes estratos de vegetación y del suelo (Tomé, 2017).

2. Funcionamiento: El sensor emite pulsos discretos en la banda del infrarrojo cercano (1064 nm) con una frecuencia que varía de un equipo a otro pero que puede rondar los 150.000 HZ. La densidad de puntos depende de la configuración del sensor y del diseño del vuelo, de menos de 1 hasta más de 80 pulsos por metro cuadrado. El comportamiento del pulso depende del tipo de superficie con la que colisiona:

- En superficies sólidas se produce un único retorno (eco).
- En el agua no se produce retorno del pulso.
- En cubiertas vegetales se obtienen más de un retorno (eco). Es la característica fundamental en el ámbito forestal para describir la estructura de la vegetación.



Figura 6: Huella del pulso láser. Fuente: Agresta S. Coop (2017).

Cuando se emite un pulso láser, ese pulso tiene una superficie llamada "huella del pulso". En esa huella todas las superficies reflectantes dentro de la huella del pulso, generan una onda de retorno del pulso láser, por tanto cada pulso emitido puede tener varios retornos que recogerán la información de la superficie terrestre. La densidad de puntos de la información LiDAR que se consigue con los pulsos láser y sus retornos dependerá de la densidad de pulsos emitidos por unidad de superficie.

3. Datos LiDAR disponibles en España: El Instituto Geográfico Nacional (IGN) obtuvo a partir de 2009 Modelos Digitales del Terreno de alta precisión a partir de tecnología LiDAR, dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). En Navarra la cobertura data de los años 2011 y 2012.

4. Aplicación datos LiDAR: A partir del procesado de datos LiDAR, se puede obtener información sobre la topografía del área de estudio (Modelo Digital de Elevaciones), sobre la distribución de la vegetación, mediante la determinación de la fracción de suelo ocupado por las distintas cubiertas vegetales, así como información de la estructura y de la altura de la vegetación.

Programas informáticos específicos

Existe en el mercado software libre que permite simular incendios forestales y ajustar su comportamiento a una zona determinada, como son FARSITE Y FlamMap. Estos programas informáticos ofrecen tras la entrada de los parámetros que contienen las características del área de estudio, como resultado una aproximación real del comportamiento que puede tener el fuego. Además, entre las numerosas aplicaciones, permite simular en tiempo real, a la vez que está ocurriendo un gran incendio forestal, de manera que se puede prever de forma aproximada puntos de oportunidad de extinción y aquellos que superarán capacidad de extinción.

También existe software de pago como es el caso de WildFire Analyst de la empresa española *Tecnosylva*, que proporciona análisis en tiempo real del comportamiento de incendios forestales. Simula la propagación de incendios forestales en segundos para apoyar la toma de decisiones en tiempo real. Genera diferentes resultados analíticos, como son mapas y gráficos, pudiendo transmitir los resultados a aquellas personas que lo necesiten mediante aplicaciones habilitadas para web y móvil.

2. OBJETIVOS

En el presente estudio se pretende realizar una cartografía de las zonas dentro y fuera de la capacidad de extinción, y los ejes principales de propagación del fuego, en el supuesto de un incendio forestal en la Comunidad Foral de Navarra en los términos municipales de Javier, Cáseda, Gallipienzo y Ujué. La realización de estos mapas permitirá mejorar la efectividad de las labores de extinción desempeñadas por los medios terrestres y aéreos desplegados en la zona, al poder prever de forma aproximada los puntos críticos de propagación del incendio.

Para estudiar el comportamiento del combustible vegetal al paso del fuego en la zona de estudio, se simulará unas condiciones meteorológicas de alto riesgo de incendio forestal, y se utilizará como información de base un incendio histórico ocurrido en la zona bajo unas condiciones meteorológicas similares a las establecidas (condiciones GIF).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDIO Y SU ELECCIÓN

El presente trabajo se desarrolla dentro de la Comunidad Foral de Navarra, en los municipios de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué. El municipio de Ujué pertenece a la merindad de Olite, mientras que los municipios de Javier, Cáseda y Gallipienzo pertenecen a la merindad de Sangüesa.

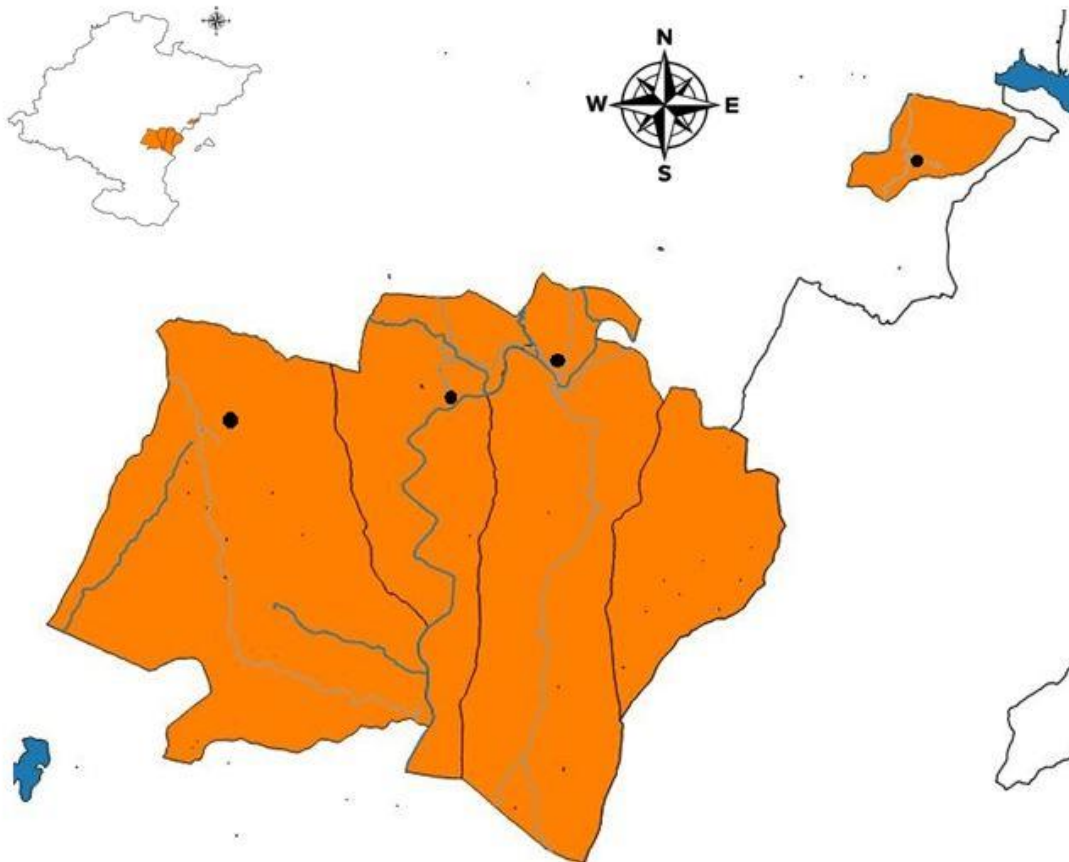


Figura 7: Localización Javier, Cáseda, Gallipienzo y Ujué en Navarra. En color azul están el pantano de Yesa (al noreste), la laguna de Pitillas (al suroeste) y el río Aragón con sus principales afluentes. En gris las carreteras que recorren los términos municipales.

Se han escogido estos términos municipales para su estudio, por un lado, porque la zona tiene una alta reincidencia histórica de incendios forestales. Por otro lado, la distribución de la red hidrográfica provoca que el río Aragón suponga una barrera para los medios de extinción. Sumando también la escasez de pistas rurales que limitan el acceso y la alta superficie forestal, hacen que esta zona tenga un alto potencial para la generación de un GIF con posible afección a gran cantidad de superficie arbolada.

3.2 DATOS LIDAR Y FUENTES CARTOGRÁFICAS EMPLEADAS

La información LiDAR para la posterior obtención de los diferentes estratos de vegetación y de la topografía del área de estudio se obtiene del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Esta plataforma online proporciona datos LiDAR disponibles de la última cobertura (2011). La información LiDAR viene en archivos que cubren una superficie de 2x2 km.

Además, la información de la vegetación forestal del área de estudio también se obtiene del Instituto Geográfico Nacional (IGN), del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), que está integrado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT). Esta plataforma online ofrece información relativa a la ocupación del suelo en una escala de 1:25.000, divide el territorio en polígonos, de manera que recoge en cada uno de ellos información detallada sobre su cobertura.

Atendiendo a la cobertura de cada polígono obtenida desde SIOSE, media el sistema de clasificación de los 40 tipos de modelos de combustible establecidos por Scott y Burgan (2005), se realizará posteriormente un mapa con los diferentes modelos de combustible y su distribución, que será uno de los archivos de entrada para la simulación y la obtención de los resultados finales.

Modelos de combustible establecidos por Scott y Burgan (2005):

- Modelos del 90 al 99: No combustibles.
- Modelos del 100 al 119: Combustibles herbáceos
- Modelos del 120 al 139: Combustibles herbáceos y arbustivos.
- Modelos del 140 al 159: Combustibles arbustivos.
- Modelos del 160 al 179: Combustible formado por arbolado con sotobosque.
- Modelos del 180 al 199: Combustible formado por arbolado sin sotobosque.
- Modelos del 200 al 219: Combustible formado por arbolado con restos de poda sin recoger.

3.3 SOFTWARE EMPLEADOS

1. FARSITE (*Fire Area Simulation*): es un simulador dinámico, que a partir de modelos matemáticos, modeliza la progresión espacial de las llamas, así como sus variables principales de comportamiento para cada píxel de forma interrelacionada. Este simulador dinámico necesita una base cartográfica que debe construirse en un Sistema de Información Geográfica (SIG) en formato *ráster* (ASCII).

Es necesario para que se pueda realizar la modelización de un fuego de superficie, archivos *ráster* de exposiciones, pendientes, elevaciones, modelos de combustible, fracción de cubierta de cubierta, es decir, el grado de recubrimiento forestal del suelo. Además de ficheros de información meteorológica sobre el tiempo atmosférico y el viento y de humedad de los combustibles. FARSITE además, implementa los modelos de propagación de fuegos de superficie, transición a fuegos de copas, propagación de fuegos activos de copas, paveseo a partir de antorcheo de árboles y aceleración del fuego, de forma que realiza salidas gráficas del comportamiento del fuego, en variables como son longitud de llama, intensidad del frente lineal, velocidad de propagación, calor por unidad de área, etc.

Entre otras muchas aplicaciones, FARSITE permite simular incendios históricos, ajustando el comportamiento de los distintos tipos de modelos de combustible. Con este software se podrá realizar una aproximación bastante fiable del comportamiento real que tiene el fuego bajo unas condiciones meteorológicas establecidas. Además puede estimar el efecto de los distintos medios de extinción en un incendio, ya que posibilita el empleo de barreras a la propagación y ataque directo, indirectos, paralelo y aéreo.

2. FlamMap: es un simulador estático que también necesita de una base cartográfica, puesto que describe los principales parámetros de comportamiento celda a celda. Es decir, calcula todos los parámetros de forma independiente para cada píxel pero sin las interrelaciones que establece FARSITE. FlamMap además permite calcular la humedad de los combustibles muertos. En este simulador las condiciones sinópticas permanecen constantes, por lo que no es posible apreciar variaciones temporales del comportamiento del fuego en función de la meteorología, limitando su uso en el ámbito de la extinción. Es por ello que cuando se trabaja con este simulador se escogen unas condiciones sinópticas representativas y favorables para el desarrollo de un gran incendio forestal.

Este software también incorpora herramientas que calculan las isócronas y los vectores de propagación del fuego, pudiendo identificarse en sus nodos oportunidades de extinción o los puntos críticos para la propagación. También tiene una herramienta que permite modelizar los vientos locales a partir de un viento dominante. Además, FlamMap es una herramienta eficaz para evaluar el comportamiento del fuego a escala de monte, comarca o incluso provincia. Además permite obtener cartografía de detalle, exportable a un sistema de información geográfica (SIG), de los parámetros de comportamiento del fuego necesarios para determinar las áreas fuera de capacidad de extinción, principales ejes de propagación y puntos críticos.

3. FUSION: es un programa que permite procesar información LiDAR para aplicaciones forestales.

4. QGIS: es un Sistema de Información Geográfica (SIG). Este software permite manejar y trabajar con formatos raster y vectoriales, así como bases de datos.

3.4 METODOLOGÍA

Para definir el comportamiento de la vegetación en un incendio forestal se establece una valoración aproximada de la respuesta que dan los distintos tipos de modelos de combustible clasificados por Scott y Burgan (2005) al fuego, bajo unas condiciones meteorológicas establecidas.

Para realizar la valoración del comportamiento de los distintos modelos de combustible que condicionan la propagación del incendio, es necesario simular un incendio forestal ocurrido históricamente en la zona de estudio, bajo condiciones meteorológicas bien definidas. Con sucesivas simulaciones de este incendio histórico se realizan los ajustes necesarios de la capa de entrada de modelos de combustible hasta que el perímetro resultante de la simulación se aproxima al perímetro real del incendio histórico estudiado. Una vez realizados los ajustes de la capa de modelos de combustible con la aplicación FARSITE, se emplea el simulador estático FlamMap para determinar las zonas dentro y fuera de capacidad de extinción y los ejes principales de propagación de un supuesto incendio forestal que afecte a la zona de estudio.

Estos resultados se exportarán a un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en este caso se trabaja con QGIS, donde se analizarán y se procesarán obteniendo las áreas que el supuesto incendio tendrá un comportamiento errático y superará la capacidad de extinción (en color rojo) y aquellas donde su intensidad decrecerá y supondrá una ventana de actuación para los medios de extinción (en color verde).

3.4.1 Parámetros de entrada

Como se ha comentado, para la modelación de un fuego de superficie, es necesario unos archivos de entrada. En primer lugar será necesario obtener las características de la superficie sobre la que se va simular el incendio a partir de datos LiDAR y de su procesado.

Procesado de datos LiDAR

1. Clasificación de la nube de puntos: La información LiDAR permite de cada dato capturado, tener información de sus coordenadas (X, Y, Z), e información de la intensidad de retorno del pulso láser que genera el punto. Sin embargo, no se tiene información de que tipo de objeto se trata, salvo si es agua.

Para poder operar con LiDAR es necesario la clasificación de los datos a partir de la información en bruto, para ello se emplean métodos que trabajan con algoritmos de filtrado y clasificación. Para los formatos que se han utilizado en el trabajo se clasifican los puntos atendiendo al estándar ASPRS (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*).

Parámetros topográficos a partir del procesado LiDAR

1. Modelo Digital del Terreno (MDT): Un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. El LiDAR al ofrecer información continua relacionada con el suelo y la vegetación (Coordenadas X, Y, Z, intensidad), supone una fuente importante de información para generar modelos digitales del terreno.

2. Modelo Digital de Elevaciones (MDE): Mediante el procesamiento de datos LiDAR, se genera el modelo digital de elevaciones (MDE) a partir de la elevación del terreno en cada punto. El MDE es el modelo digital del terreno (MDT) con mayor utilización en el campo forestal.

3. Modelo Digital de Pendientes: La pendiente tiene un efecto directo sobre el cálculo de la velocidad de propagación del fuego, mediante la ecuación de Rothermel (1972), que está incorporada en los simuladores de incendios con los que se trabaja:

- Incremento de la velocidad de propagación e intensidad del fuego a favor de la pendiente, pendiente arriba.
- Disminución de la velocidad de propagación e intensidad del fuego en contra de la pendiente, es decir, ladera abajo.

4. Modelo Digital de Orientaciones: La orientación de las laderas proporciona variabilidad de combustibles vegetales presentes, en función de la exposición solar que tengan esas laderas:

- Pendiente con orientación Sur: Será una zona de solana y debido a la mayor incidencia de la radiación solar, serán laderas con menor humedad en la vegetación y combustibles más ligeros.
- Pendiente con orientación Norte: Será una zona de umbría, con laderas de menor exposición solar. Dominarán los combustibles más pesados y con mayor humedad.

Estratos de vegetación a partir del procesado LiDAR

1. Cobertura de la masa arbolada: La cobertura de la masa arbolada se refiere a la fracción de cabida cubierta (FCC) del estrato arbolado. Esta variable en los simuladores influye sobre los cálculos de los factores de reducción del viento y sombreado que afectan a los modelos de combustible. Por debajo del dosel de copas, la velocidad del viento se reduce significativamente.

A partir de la información derivada del procesado de datos LiDAR se obtiene directamente una estimación precisa de la FCC mediante el porcentaje de números de retornos del estrato arbolado respecto al total de la nube de puntos.

2. Altura de la vegetación arbolada: La altura del arbolado es una de las variables de entrada en los modelos utilizados para la determinación de fuegos de copas (Van Wagner 1977,1993). La altura del arbolado se utiliza para estimar la carga de

combustible de las copas, que es a su vez necesaria para calcular la velocidad de propagación del fuego en el arbolado. Esta velocidad de propagación sirve para determinar el tipo de fuego de copas (activo, pasivo).

También es importante la altura del arbolado para determinar la reducción del viento a la altura media de la llama, que es una información requerida por la ecuación de Rothermel (1972) para determinar la velocidad de propagación del fuego de superficie. A mayor altura de arbolado la velocidad efectiva del viento será menor en el frente de llama situado por debajo del dosel de copas.

Para la obtención de este parámetro estructural de la vegetación mediante datos LiDAR se ha considerado un percentil elevado de las alturas en la nube de puntos. Se ha escogido el percentil 90 de alturas, que corresponde a la altura tal que el 90% de los retornos de los pulsos láser están por debajo de ella. Se ha escogido el percentil 90 de alturas porque engloba a la mayor parte de los retornos del pulso láser, y con ello se estima de forma bastante fiable la altura de la vegetación.

3. Altura de la base de las copas: La altura de la base de las copas (*Crown Base Height, CBH*) es otro parámetro fundamental que influye en la simulación del comportamiento del incendio, porque determina la existencia de fuegos de copas.

El modelo empleado de Van Wagner (1977) requiere esta información para determinar la transición de fuego de superficie a fuego de copas, mediante el cálculo de la intensidad crítica. Es decir, el fuego de superficie se convertirá en un fuego de copas cuanto la intensidad del frente de llama iguale o supere ese valor de intensidad crítica, que representa la energía necesaria para elevar la temperatura de los combustibles finos de la copa hasta la temperatura de ignición. Cuanto mayor sea la altura de la base de la copa, mayor será la energía necesaria para la inflamación de los combustibles, de manera que la intensidad crítica será mayor.

De la misma forma que la altura de la vegetación, la altura de la base de las copas se puede obtener de forma directa considerando un percentil bajo de las alturas de los retornos del estrato arbolado. Se ha escogido el percentil 10 de las alturas que corresponde a la altura tal que sólo el 10% de los retornos del pulso láser emitido están por debajo de ella.

4. Densidad aparente de las copas: La densidad aparente de copas (*Crown Bulk Density, CBD*) es un parámetro fundamental para la determinación del tipo de fuego de copas. En caso de existir actividad de copas en el incendio simulado, la densidad de copas se utiliza para determinar el umbral entre un fuego de copas pasivo (antorcheo) y un fuego de copas activo cuya propagación es mucho más rápida que la de un fuego de superficie. Para ello se utilizan las ecuaciones de Van Wagner (1977, 1993) y de Rothermel (1991), que se consideran conjuntamente para definir la velocidad crítica de propagación y la velocidad de propagación de las copas.

La actividad de los fuegos de copas se determina mediante una compleja interrelación de diferentes factores y ecuaciones. En resumen, se tiene por un lado un efecto negativo de CBD sobre la velocidad de propagación crítica, que consiste en que a mayor densidad de copas menor será la velocidad de propagación crítica. Por otro lado, la densidad de copas afecta a la cantidad de combustible consumido que afecta

a la velocidad de propagación del fuego en las copas según la ecuación de Rothermel (1991), que a su vez se modifica en función de la fracción de copa quemada determinada según Van Wagner (1993).

Finalmente, el tipo de fuego de copas se define de la siguiente forma:

- Si la velocidad de propagación es menor que la velocidad crítica, el fuego de copas se define como pasivo.
- Si la velocidad de propagación es mayor que la velocidad crítica, el fuego de copas se define como activo.
- Si la velocidad de propagación de las copas avanza con independencia de la combustión de superficie, el fuego de copas se define como independiente.




Passive or Torching	Active	Independent
		
Low windspeed, low Crown Bulk Density & Cover, low Crown Base Height.	Higher windspeed, high Crown Bulk Density & Canopy Cover, low Crown Base Height.	Very high windspeed, very high Crown Bulk Density & Canopy Cover.

Figura 8: Tipos de fuegos de copas y principales parámetros que los determinan en FARSITE Y FlamMap. Fuente: Agresta S. Coop (2017)

Una de las principales limitaciones para la obtención de este parámetro a partir de datos LiDAR es que los retornos de la nube de puntos no sólo proceden de los combustibles finos (follaje, ramillas, etc.) sino también de las ramas más gruesas de las copas que poco influyen en el comportamiento del fuego.

Por ello, la densidad de copas no es un parámetro de estimación directa a partir de datos LiDAR. Para su obtención se va a emplear un método indirecto mediante estimaciones empíricas obtenidas a partir de datos LiDAR y mediciones de campo que proporcionan ecuaciones alométricas (Andersen et al. 2005)

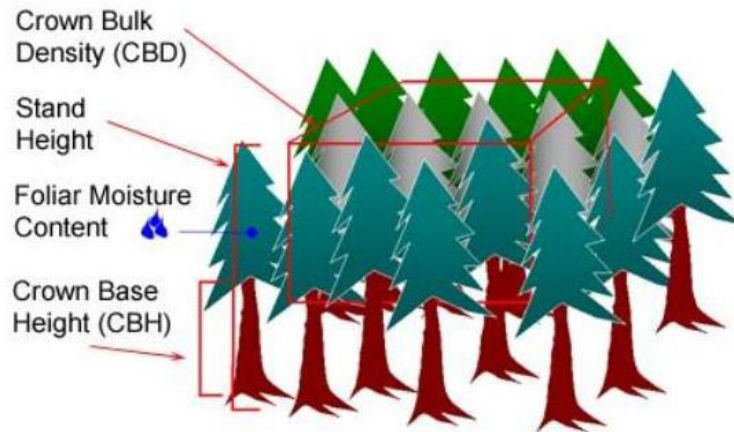


Figura 9: Esquema de los datos de entrada de los combustibles de las copas utilizados en FARSITE Y FlamMap.
Fuente: Agresta S. Coop (2017)

Tipología y distribución de la vegetación. Modelos de combustibles

Partiendo de la información obtenida desde el Instituto Geográfico Nacional, de la plataforma online SIOSE, se obtiene información de los distintos polígonos en los que está organizado el territorio y de la cobertura vegetal que tiene cada uno de ellos.

La información obtenida del archivo vectorial de ocupación del suelo se exporta a Excel, donde se crea una columna adicional en la que se introduce en cada polígono el modelo de combustible de acuerdo al sistema de clasificación de modelos de combustible establecidos por Scott y Burgan (2005).

Una vez establecida la capa de modelos de combustible en formato vectorial, se convierte a formato raster, con la misma extensión y tamaño de pixel que los modelos digitales del terreno para su posterior combinación.

3.4.2 Landscape File

De este modo se crea el archivo Landscape File (LCP). Este archivo incorpora tanto la información espacial de carácter fisiográfico como de la estructura de la vegetación. Este archivo conjunto será la base para la simulación.

En definitiva, los archivos que se han necesitado para su creación han sido:

- Modelo Digital de Elevaciones.
- Modelo Digital de Pendientes.
- Modelo Digital de Orientaciones.
- Modelos de Combustible.
- Fracción de Cobertura del Arbolado

- Altura de la Vegetación Arbolada.
- Altura de la Base de las Copas del Arbolado.
- Densidad Aparente de las Copas del Arbolado.

Para que sea posible realizar la simulación serán necesarios además del LCP, archivos con información sobre la humedad del combustible y archivos con información meteorológica.

Humedad del combustible:

La humedad de los combustibles es un parámetro crítico que va a condicionar significativamente la propagación del fuego y el comportamiento general del incendio. Los simuladores FARSITE y FlamMap, además del archivo LCP, requieren un archivo con las humedades iniciales del combustible al comienzo de la simulación. Estos valores se especifican para cada modelo de combustible incluido en el archivo LCP, para los siguientes tipos de combustibles superficiales:

- Combustibles muertos: Se clasifican en tres tipos en función del tiempo (horas) que tardan en equilibrar su contenido de humedad con la humedad relativa ambiental.
 - 1 Hora: Tamaño combustible menor de 6 mm.
 - 10 Horas: Tamaño combustible entre 6 mm y 2,5 cm.
 - 100 Horas: Tamaño combustible entre 2,5 cm y 7,5 cm.
- Combustibles vivos: Se diferencian entre herbáceos y leñosos.

En general cuanto menor sea la humedad del combustible, mayor será la velocidad de propagación, intensidad del fuego y el combustible consumido. Como las condiciones meteorológicas para el estudio son aquellas que puedan provocar la ocurrencia de un gran incendio forestal, se han seleccionado aquellas condiciones que se dieron en el incendio de Ujué. Humedades para el combustible vivo herbáceo del 90% y para el leñoso del 70%. Además para los combustibles muertos la humedad inicial fue de:

- Humedad 6% para combustibles de 1 Hora.
- Humedad 8% para combustibles de 10 Horas.
- Humedad 10% para combustibles de 100 Horas.

La modificación del contenido de la humedad de los combustibles muertos a lo largo del día es crucial para determinar los cambios en el comportamiento del fuego de las simulaciones. Los factores ambientales que influyen en el contenido de humedad de los combustibles muertos son:

- Temperatura y humedad relativa del aire.

- Radiación solar.
- Precipitación.

Estos factores además varían espacialmente dependiendo de las características fisiográficas y ambientales particulares de cada celda de la simulación. La información meteorológica se ha obtenido de la plataforma online METEOSIG - MeteoLogica. Esta información meteorológica es imprescindible para el desarrollo de las simulaciones, se localiza en los archivos meteorológicos de tiempo atmosférico (WTR) y viento (WND).

1. Archivo tiempo atmosférico (WTR): El archivo de tiempo atmosférico incluye:

- Precipitación diaria: cantidad y duración.
- Temperatura del aire: Valores máximos y mínimos alcanzados, y su correspondiente hora para cada día.
- Humedad relativa del aire: valor máximo y mínimo diario.

Estos datos de temperatura, humedad y precipitación se requieren para modelizar la variación de la humedad de los combustibles muertos, en función de la topografía y el sombreado de la vegetación.

2. Archivo viento (WND): El viento es un parámetro que influye significativamente en el comportamiento del fuego en un incendio. Afecta a la transmisión de calor (radiación y convección) al modificar la geometría de las llamas, y favorece la combustión mediante el aporte de oxígeno.

Esto implica la influencia directa sobre velocidad de propagación, longitud de llamas, intensidad del fuego, etc. Además tiene un efecto indirecto sobre los combustibles al disminuir su contenido de humedad.

En los simuladores FARSITE y FlamMap, el viento se requiere para calcular la velocidad de propagación del fuego según la ecuación de Rothermel (1972), que a su vez se utiliza para determinar la intensidad del fuego. La longitud de llama también está relacionada, por lo que un aumento de viento también supondrá unas llamas mayores.

Los datos incluidos en el archivo WND son:

- Velocidad del viento (km/h) diaria y horaria.
- Dirección del viento (grados) diaria y horaria.
- Nubosidad (cobertura %) diaria y horaria.

La información meteorológica que se necesita para la generación de los archivos WTR Y WND se obtienen de la web del Gobierno de Navarra, del portal Meteorología y climatología de Navarra, donde se dispone de datos de todas las estaciones.

Se escoge la estación meteorológica automática de Ujué por su proximidad al incendio histórico objeto de estudio, que recoge la información de las condiciones meteorológicas que tuvieron lugar durante el incendio ocurrido en la zona en Julio de 2014 y que se va a estudiar.

3.4.3 Simulación de un incendio de diseño

El incendio de diseño es un fuego que propaga bajo una situación crítica de viento Sur. Antes de simular un incendio de diseño es necesario realizar los ajustes de la velocidad de propagación del fuego para cada combustible definido y también las variables de entrada. Para ello es imprescindible la simulación de un incendio histórico. En este caso se simulará un Gran Incendio Forestal (GIF) ocurrido en los municipios de Ujué y Pitillas en 2014.

Descripción del incendio histórico de Ujué:

El GIF ocurrido en los municipios de Ujué y Pitillas el 18 de Julio de 2014, afectó a una superficie de 770,8 Ha, con un perímetro de 11 kilómetros. Tuvo una duración hasta su control de 13 horas y 40 minutos.



Figura 10: Perímetro del Gran Incendio Forestal de Ujué 2014. Fuente: Bomberos de Navarra (2014).

El incendio tuvo como patrón principal de propagación el viento de dirección Sureste (123° - 141°). Durante las primera horas, la extinción resultó muy complicada por el fuerte viento (rachas máximas de 67 km/h y una velocidad media mantenida de 35 km/h). La cabeza principal del incendio se detuvo cuando llegó al Canal de Navarra, entonces el flanco derecho se convirtió en el motor del incendio y en punto crítico. El trabajo en el flanco izquierdo estuvo ralentizado debido a su mala accesibilidad y a la previsión de viento Sur para la mañana siguiente, suponiendo un riesgo para los medios terrestres de extinción. Alrededor de las 5:30 de la madrugada comenzó a

subir la humedad relativa, el viento moderó su velocidad y se consiguió controlarlo hacia las 10:00 de la mañana del día 19.

Simulación del incendio de Ujué:

Para la simulación del incendio objeto de estudio se utiliza la herramienta informática FARSITE. Además se dispone de información precisa sobre las actuaciones de los medios de extinción, así como un conocimiento detallado de la progresión real del incendio. Toda la información necesaria ha sido facilitada por Bomberos de Navarra.

Las coordenadas de inicio del incendio fueron: x: 623410 - y: 4700212, el foco inicial estuvo muy próximo a la carretera NA-5311.

La figura 11 detalla la información proporcionada por Bomberos de Navarra, relativa a las zonas del perímetro donde se realizaron labores de extinción, con medios terrestres (líneas de mangueras, herramientas manuales, angledozer, etc.) y medios aéreos.

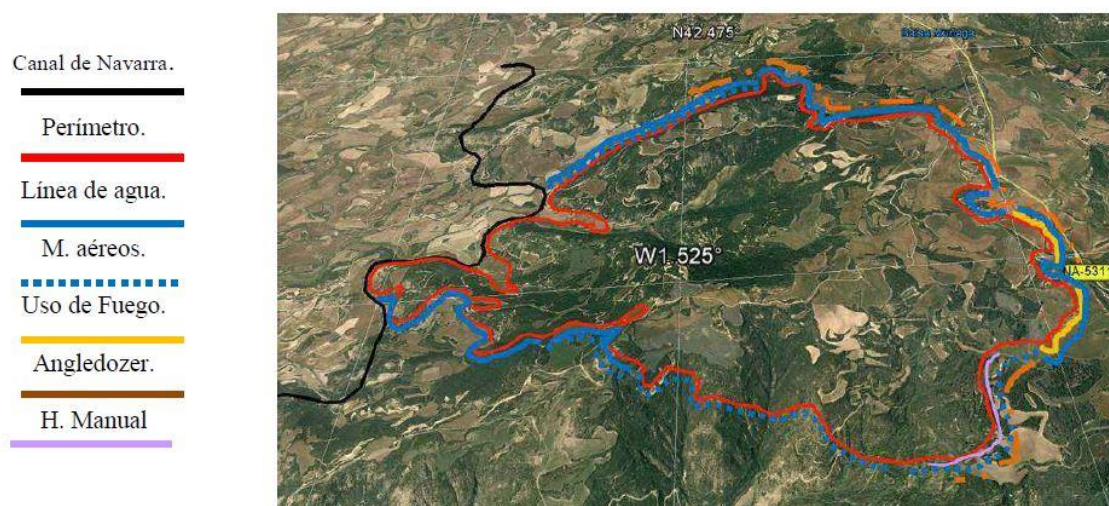


Figura 11: Labores de extinción realizadas por los medios aéreos y terrestres. Fuente: Bomberos de Navarra (2014)

Ajuste del incendio de diseño al histórico:

Las sucesivas simulaciones del incendio de diseño muestran el comportamiento de los distintos modelos de combustible al paso del fuego, para cada zona en concreto y para cada condición meteorológica definida.

También se tienen en cuenta y se introducen en las simulaciones las actuaciones de los medios de extinción.

Como se ha comentado anteriormente, la respuesta de los distintos modelos de combustible al paso del fuego varía de una zona a otra de forma significativa. La situación meteorológica de cada momento también condiciona al incendio pudiendo agravar su comportamiento u ofrecer ventanas favorables de actuación.

Para ajustar ese comportamiento a la realidad, teniendo en cuenta todas las variables que afectan a la propagación del incendio, se realizan simulaciones del incendio histórico hasta obtener el patrón de comportamiento y un perímetro del incendio de diseño que sea similar al histórico.

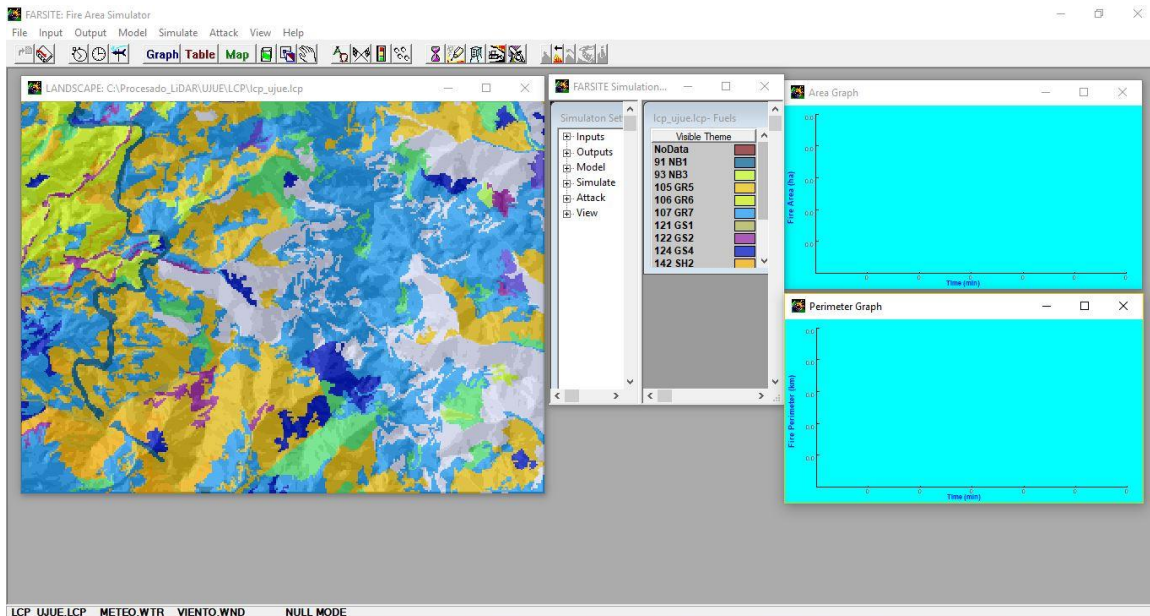


Figura 12: Área de Simulación del GIF de Ujué 2014 con FARSITE. Los diferentes colores que aparecen en la celda de simulación corresponden a los distintos modelos de combustible de cada polígono del área de estudio. Estos colores los genera aleatoriamente FARSITE para cada simulación.

3.4.4 Parámetros de comportamiento del fuego

Una vez simulado el comportamiento del incendio histórico, para conocer los parámetros de comportamiento del fuego para todo el polígono de análisis simularemos con FlamMap, empleando las mismas variables de entrada.

En la aplicación Flammap se introduce el comportamiento de los distintos modelos de combustible ajustados en FARSITE, para las condiciones meteorológicas establecidas. De forma que los resultados se aproximan al comportamiento real del fuego en esos municipios. Se realizará la simulación del área de estudio que engloba los municipios de Javier, Cáseda, Gallipienzo y Ujué. Además de un radio exterior a ellos de 5 km para tener en cuenta incendios que ocurren fuera de esos municipios y que avanzan hasta afectar a estos.

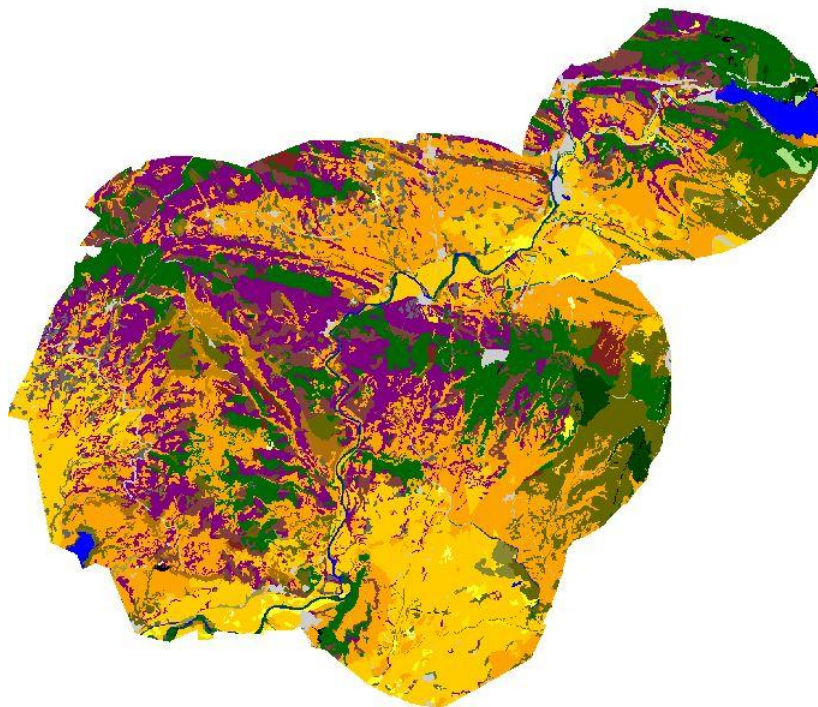


Figura 13: Área de simulación en FlamMap. Los diferentes colores los introduce FlamMap de forma aleatoria para cada simulación. Corresponden a los distintos modelos de combustible del área de estudio. En el noreste de la figura se aprecia una superficie azul que corresponde a una parte del pantano de Yesa.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En las siguientes figuras se muestran información relativa a los modelos digitales de elevaciones, pendientes orientaciones del cuadrante que engloba los municipios de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué. Además, se muestra la tipología de modelos de combustibles presentes en esos términos municipales y en un radio exterior de 5km que se ha escogido teniendo en cuenta que es posible que el incendio se inicie fuera de dichos municipios y que llegue a afectarles.

4.1.1 Modelo digital de elevaciones

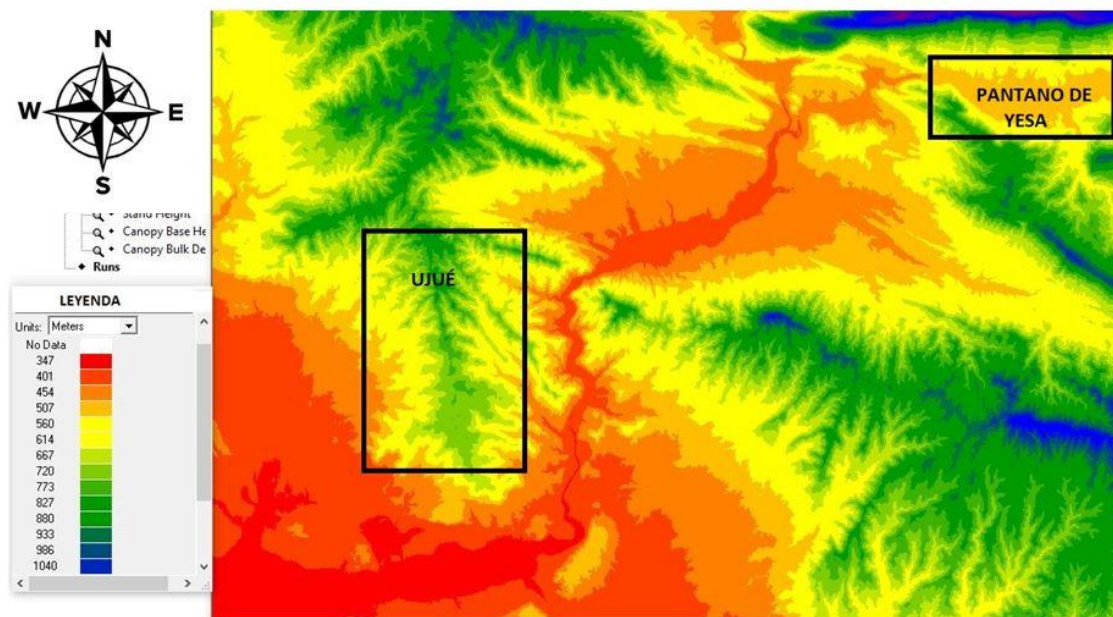


Figura 14: Modelo digital elevaciones del cuadrante que engloba los términos municipales objeto de estudio. En la imagen se observa en color rojo y naranja las zonas más bajas y en color verde y azul las zonas de mayor altitud. Además, se muestra en la parte superior derecha la localización de una parte del pantano de Yesa.

4.1.2 Modelo digital de pendientes

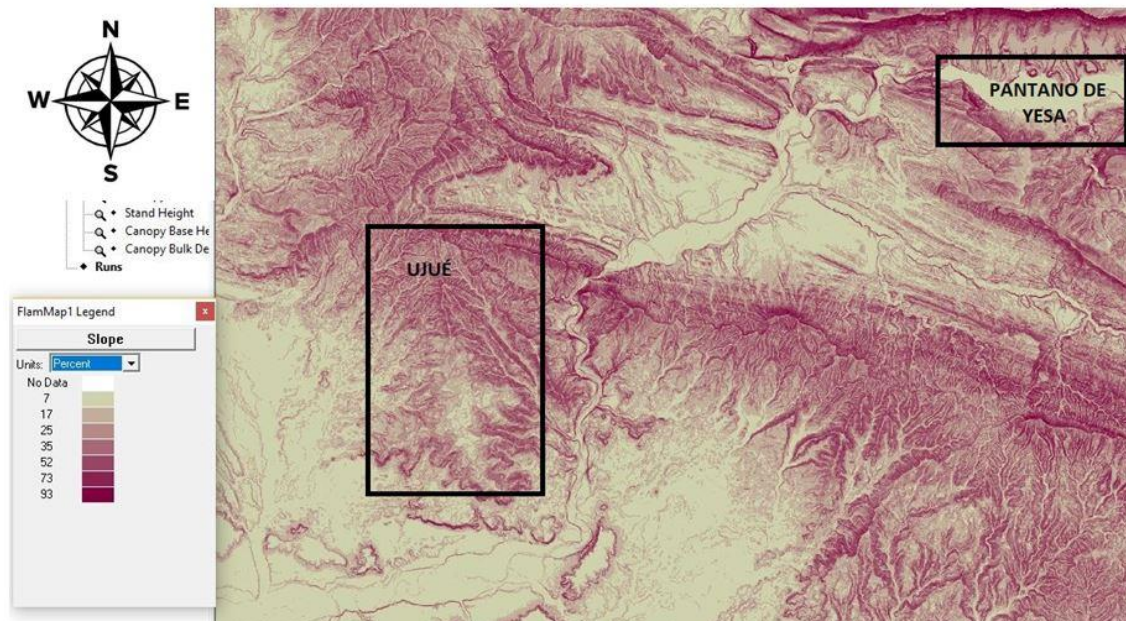


Figura 15: Modelo digital de pendientes del cuadrante que engloba los términos municipales objeto de estudio. En la imagen se muestra el pantano de Yesa en la parte superior izquierda. Los colores claros corresponden a zonas de poca o nula pendiente, los colores morados corresponden a zonas de fuerte pendiente.

4.1.3 Modelo digital de orientaciones

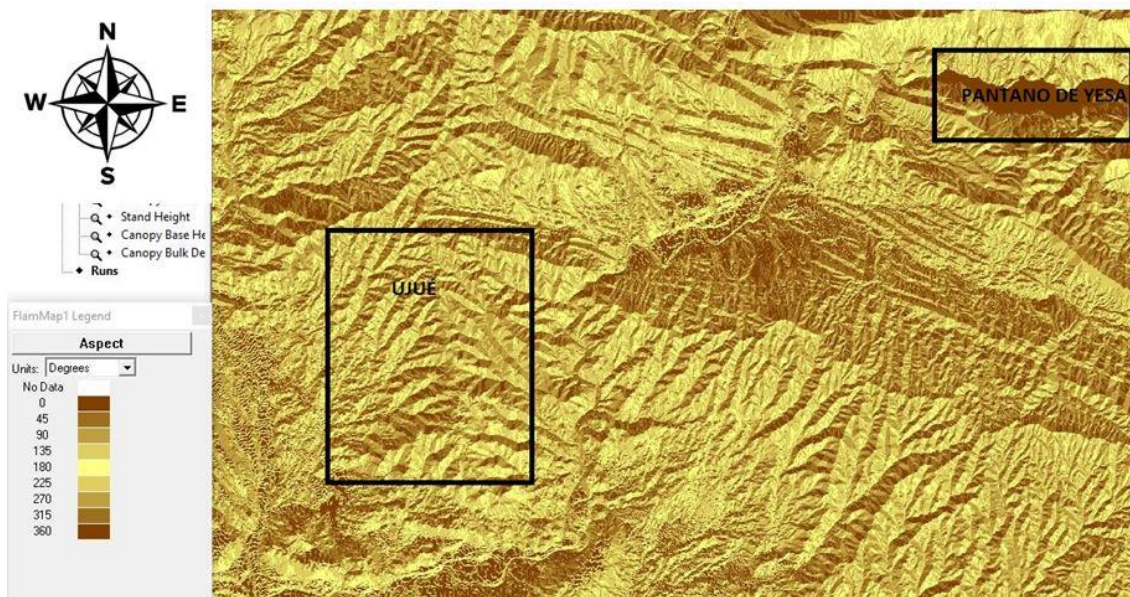


Figura 16: Modelo digital de orientaciones del cuadrante que engloba los términos municipales objeto de estudio. Se observa en la parte superior izquierda el pantano de Yesa. Los colores en marrón claro corresponden a zonas de orientación Norte y los marrones más oscuros a zonas de exposición Sur.

4.1.4 Modelos de combustible

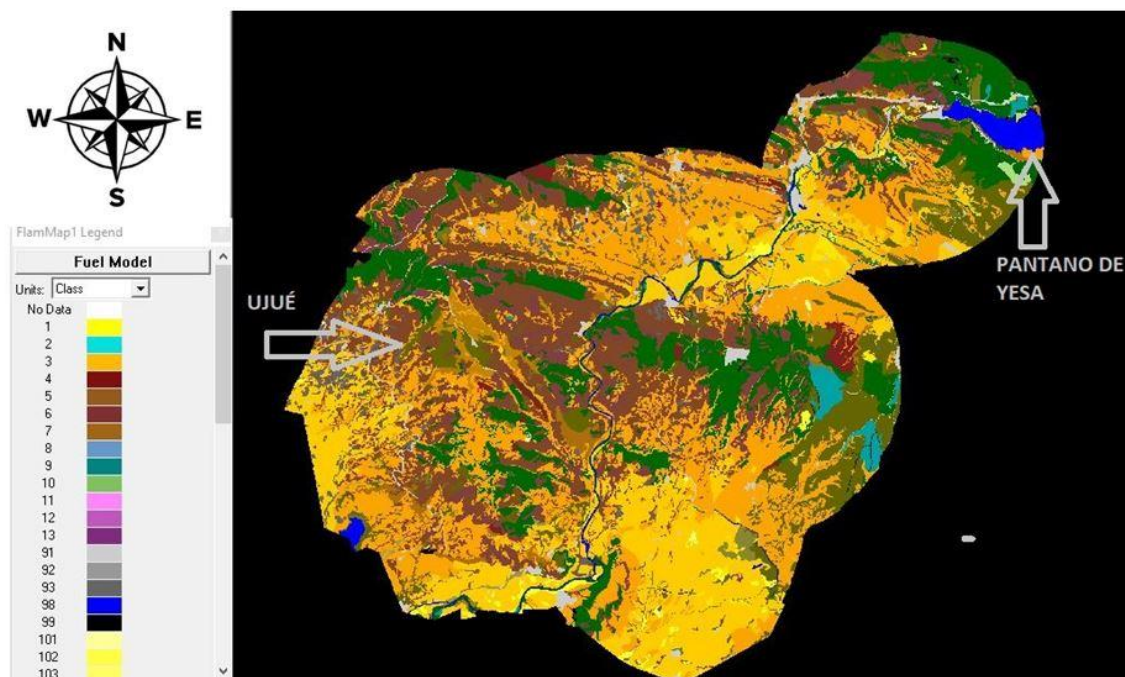


Figura 17: En la figura se muestran en distinto color los diferentes tipos de modelos de combustible de los términos municipales objeto de estudio y de un radio exterior a ellos de 5km que se ha establecido para tener en cuenta que el fuego puede originarse fuera del área de estudio y afectar a esta.

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE FARSITE

4.2.1 Situación sinóptica de un GIF en la Navarra Media

Existen una serie de factores determinantes que proporcionan días críticos con muchas posibilidades de que se cree un GIF. Estos factores determinantes son llamados la escala del 30, que corresponden a:

- Más de 30°C de temperatura.
- Menos de 30% de humedad relativa.
- Más de 30km/hora de velocidad de viento.

A los cuales también se le pueden sumar:

- Más de 30 días sin llover.
- Más de 30% de pendiente.

Estos factores son valores aproximados que proporcionan esa situación sinóptica. A estos factores se suman los periodos críticos de fuego, que son episodios durante los cuales las condiciones meteorológicas son muy favorables a la actividad de incendios

forestales, como son las olas de calor, los periodos de sequias y los vientos terrales del verano.

4.2.2 Primeras simulaciones

Con la primera simulación se obtiene una idea general del comportamiento del incendio de diseño, el área del incendio resultante de Ujué es de 2.000 Ha aproximadamente, frente a las 770,8 Ha del incendio histórico.



Figura 18: Primera Simulación del Incendio de Diseño en FARSITE, sin la actuación de los medios de extinción y sin el ajuste, empleando únicamente los valores teóricos de comportamiento del incendio. Los diferentes colores de la figura muestran los distintos tipos de modelos de combustible, estos colores los genera FARSITE aleatoriamente en cada simulación.

Este primer resultado muestra que es necesario realizar ajustes en el comportamiento de los distintos modelos de combustible. Además hay que introducir los medios de extinción en las zonas que actuaron, de forma que mediante sucesivas simulaciones y los ajustes necesarios, se vaya modelando el incendio de diseño hasta aproximarse al histórico.

4.2.3 Simulación final ajustada

Tras realizar sucesivas simulaciones y los ajustes necesarios a todas ellas, se ha obtenido como resultado el incendio de diseño. Este incendio tiene unos parámetros de comportamiento similares al histórico de Ujué. Además, la superficie final quemada y la longitud total del perímetro exterior se aproxima a la del incendio histórico.

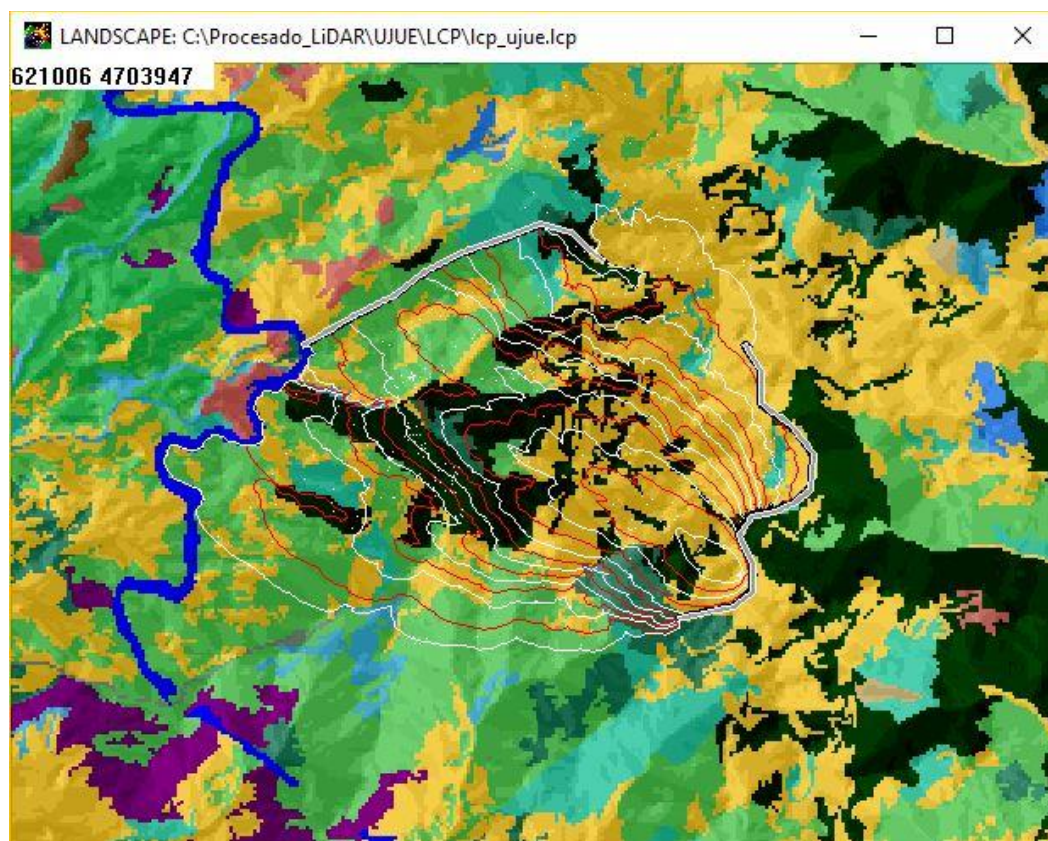


Figura 19: Incendio de diseño ajustado al histórico de Ujué 2014 realizado en FARSITE, incluyendo las labores de extinción que se realizaron. Los diferentes colores de la figura muestran los distintos tipos de modelos de combustible, estos colores los genera FARSITE aleatoriamente en cada simulación.

Este incendio de diseño tiene unos parámetros de comportamiento similares al histórico de Ujué. Además, la superficie final quemada y la longitud total del perímetro exterior se aproxima a la del incendio histórico. Con las simulaciones en FARSITE no se busca conseguir que el perímetro del incendio de diseño sea exactamente igual al histórico, esto sería muy difícil y posiblemente no se consiguiera obtener. El objetivo de las simulaciones en FARSITE, consiste en determinar el patrón de comportamiento del incendio histórico en la zona bajo unas condiciones establecidas como de alto riesgo de Gran Incendio Forestal.

Una vez determinado este comportamiento para el área en cuestión, se puede exportar a los cuatro términos municipales, porque al encontrarse muy próximos presentan vegetación similar. Y por tanto los distintos modelos de combustible van a dar respuestas similares al paso del fuego que las que se han calculado con el incendio de diseño. El estudio de los cuatro términos municipales se realizará con FlamMap.

4.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE FLAMMAP

Se van a obtener para toda la superficie estudiada los parámetros de comportamiento que van a servir para determinar qué zonas están dentro y fuera de capacidad de extinción, y que posteriormente se plasmará en un SIG.

4.3.1 Parámetros de comportamiento del fuego

Los parámetros de comportamiento del fuego obtenidos de FlamMap son: velocidad de propagación del incendio, longitud de la llama y actividad de incendios de copas.

1. Velocidad de propagación: Según datos de Agresta S. Coop, un incendio cuya propagación sea superior a 2 m/min supera la capacidad de extinción. Esa velocidad de propagación se considera como la máxima por encima de la cual el incendio está fuera de control.

En la siguiente figura se muestra, la velocidad de propagación del fuego en metros por minuto, para cada pixel del mapa. En total hay 1.015.831 pixeles que superan la velocidad máxima establecida. Cada pixel supone 60 metros cuadrados por lo que hay un total de 6.095ha que superan la velocidad máxima establecida para la extinción y hay 1.702ha que no van a escaparse a su control.

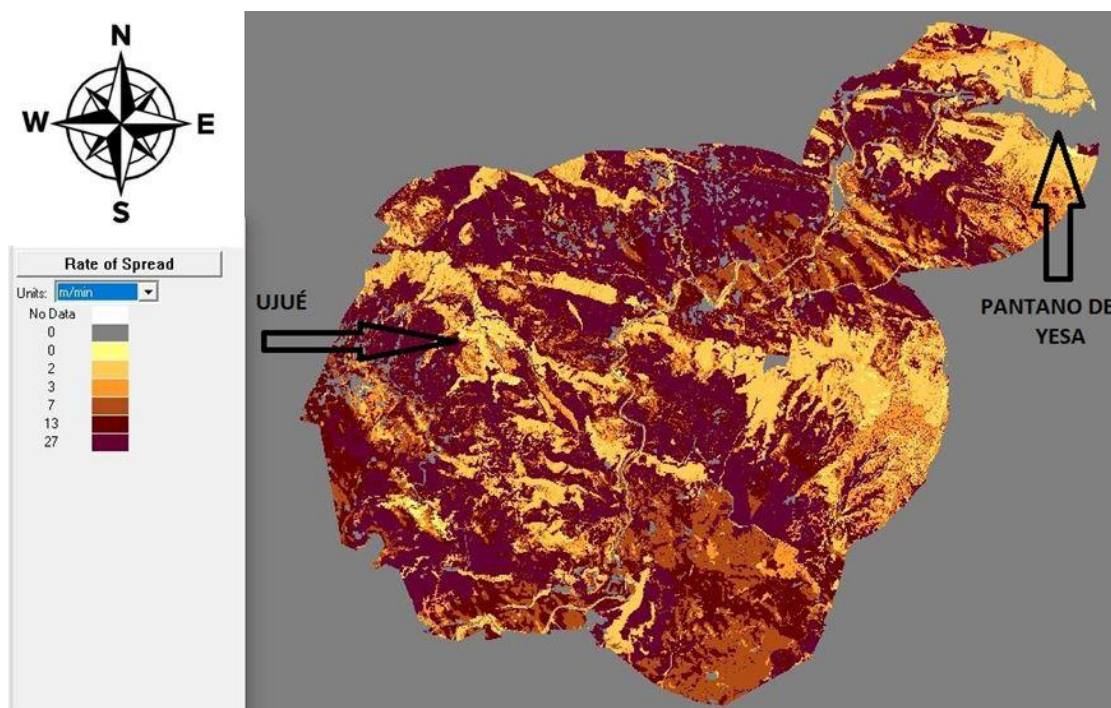


Figura 20: Velocidad de propagación (m/min) obtenida de FlamMap en los términos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué y un radio exterior a ellos de 5km. Los colores en amarillo y naranja claro están dentro de la capacidad de los medios de extinción, en cambio para los colores marrones y morados la velocidad de propagación es muy alta y se encuentran fuera de control.

2. Longitud de llama: La longitud de la llama es un parámetro que muestra claramente cuando el incendio supera la capacidad de extinción. Según Agresta S. Coop, por encima de los 3 metros de longitud de llama el fuego supera capacidad de

extinción. Este valor también se toma como límite de capacidad en otras comunidades autónomas.

En la siguiente imagen se muestra la longitud de llama en metros para cada pixel del área ampliada correspondiente a una parte del municipio de Javier, donde se observa claramente, que las zonas en rojo corresponden a aquellas que tendrán una longitud de llama superior a 3 metros y que superarán la capacidad de extinción. En total hay 650513 pixeles que superan la longitud máxima de la llama establecida. Cada pixel supone 60 metros cuadrados por lo que hay un total de 3904ha que superan la longitud de la llama máxima establecida para la extinción y hay 3893ha que no van a escaparse a su control.

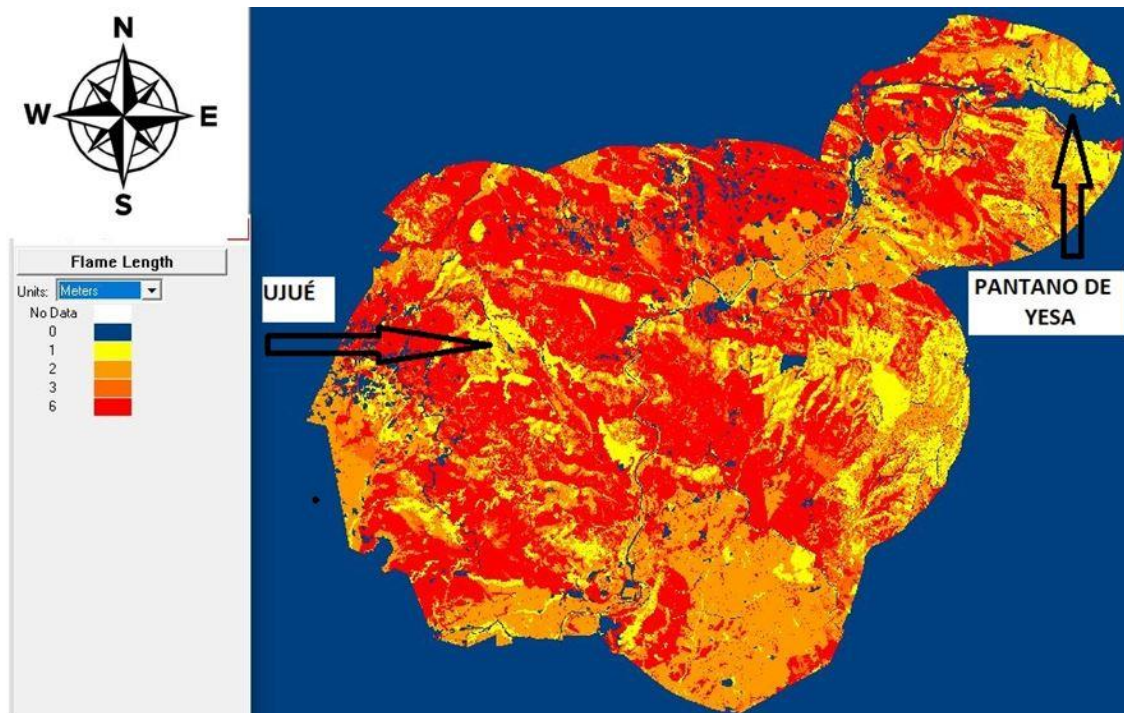


Figura 21: Longitud de la llama (m) obtenida de FlamMap en los términos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué y un radio exterior a ellos de 5km. Los colores en amarillo y naranja están dentro de la capacidad de los medios de extinción, en cambio para el color rojo la longitud de la llama es muy alta y se encuentran fuera de control.

3. Actividad de copas: La actividad de copas indica en qué zonas del mapa el fuego alcanza las copas de los árboles. Generalmente cuando un incendio alcanza las copas de los árboles y se propaga por ellas, alcanza alta intensidad y supera la capacidad de extinción. Los fuegos de copas con un valor mayor a una clase 2 establecida en la simulación de FlamMap, superan la capacidad de extinción.

La siguiente figura muestra en naranja y rojo los pixeles del territorio que tienen una actividad de copas que supera capacidad de extinción, para una zona del municipio de Javier. Apenas hay pixeles del mapa que tengan valor superior a 2, no llegan a 1 ha.

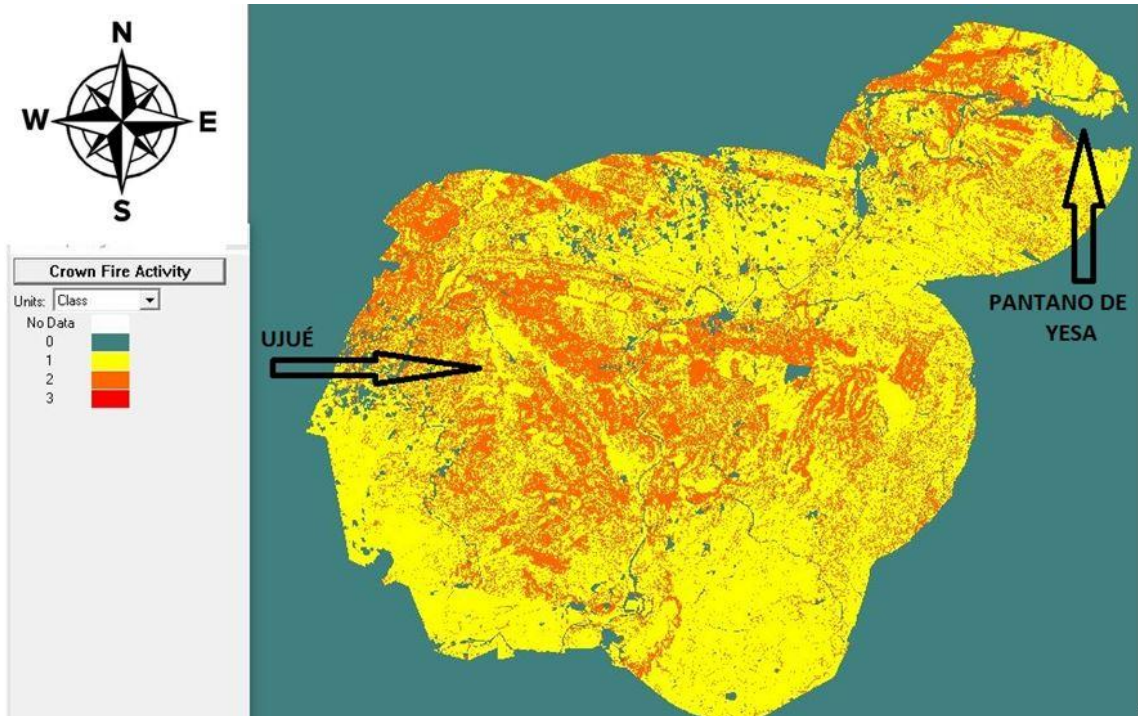


Figura 22: Actividad de copas obtenida de FlamMap en los términos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué y un radio exterior a ellos de 5km. Los colores en amarillo y naranja están dentro de la capacidad de los medios de extinción, en cambio para el color rojo la actividad de copas es muy alta y se encuentran fuera de control.

4. Ejes de propagación del fuego: Para determinar los ejes principales de propagación del fuego, se han establecido puntos de inicio de incendios en zonas que pueden tener un alto potencial de gran incendio forestal. Después FlamMap genera esos ejes principales de propagación.

La siguiente ilustración muestra en blanco los principales ejes de propagación que describiría el fuego en caso de producirse dentro de los términos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué. Los nodos a partir de los cuales se generan ramificaciones y ejes secundarios largos, serán zonas críticas, de las que se hablará posteriormente.

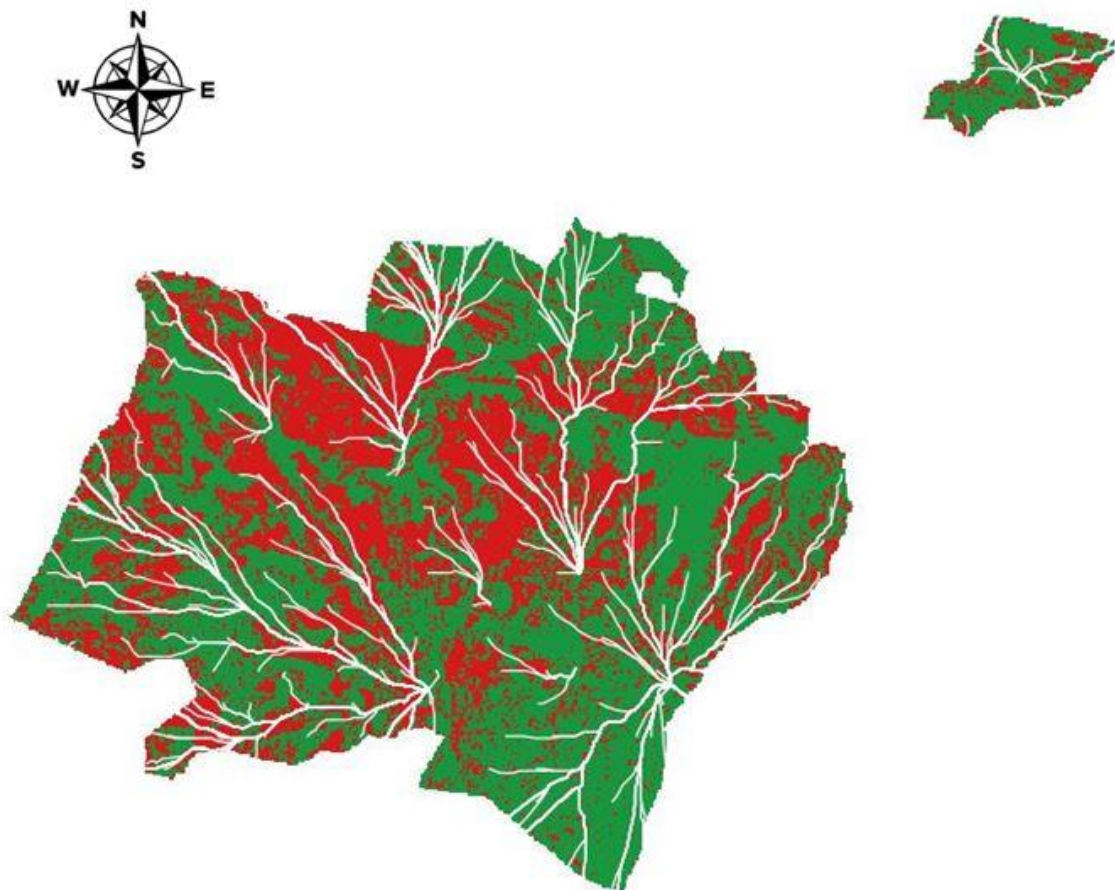


Figura 23: Principales ejes de propagación del fuego (en color blanco) dentro de los términos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué. En rojo se muestran las zonas que están fuera de la capacidad de extinción de los medios y en color verde aquellas zonas que brindan oportunidad de control.

4.3.2 Análisis de los resultados en un SIG

Los resultados obtenidos en FlamMap de velocidad de propagación, longitud de llama y actividad de copas, se trasladan a QGIS, para determinar las superficies fuera de capacidad de extinción. Los valores obtenidos de estos archivos se reclasifican según (costa et al. 2011).

1. Áreas dentro y fuera de capacidad de extinción para el periodo de verano comprendido hasta el 15 de Julio: En la siguiente ilustración se muestra en rojo las zonas que superan la capacidad de extinción dentro de los términos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué. En verde las zonas de oportunidad de extinción, donde los medios de actuación van a poder enfrentarse al fuego y controlarlo. Estos resultados están establecidos para condiciones meteorológicas de GIF.

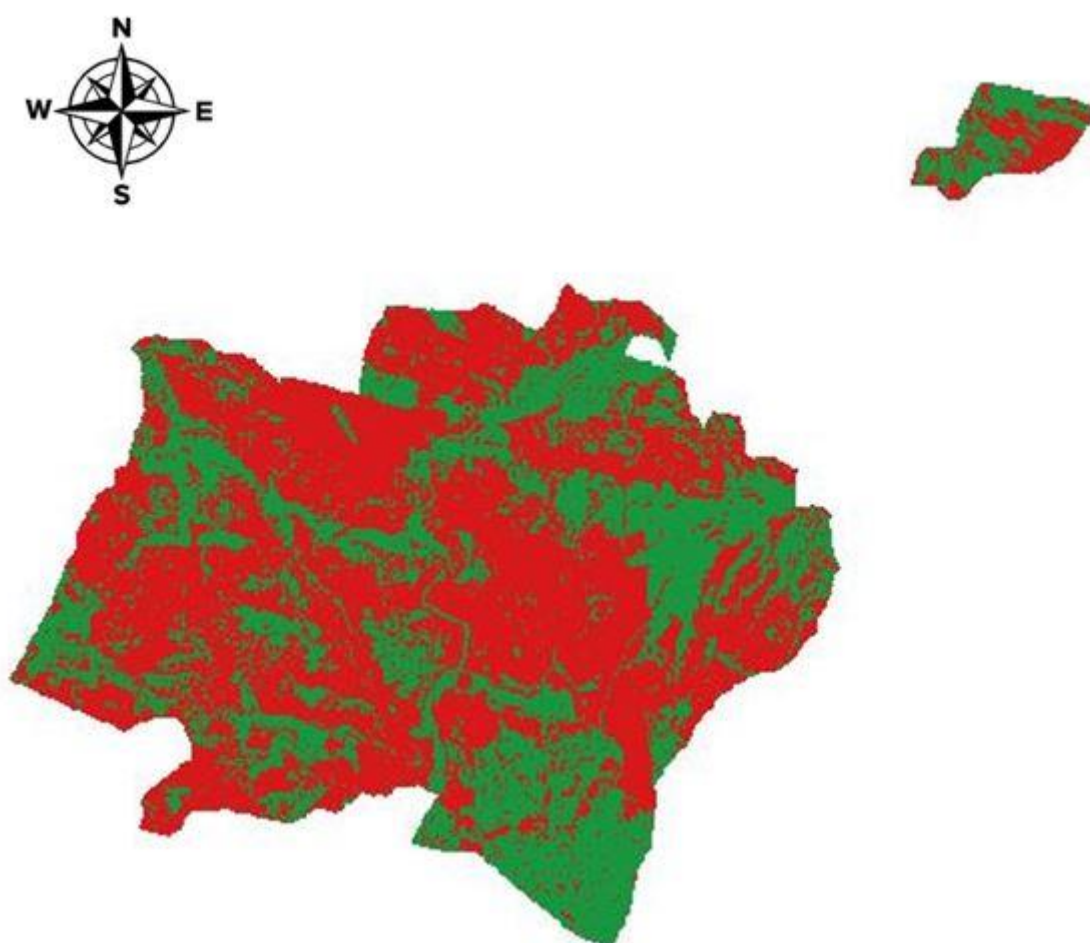


Figura 24: En rojo, zonas que superan la capacidad de extinción dentro de los municipios de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué antes de la cosecha del cereal de secano, que suele terminarse hacia el 15 de Julio. Las condiciones meteorológicas establecidas para estos resultados son las descritas para un GIF.

En la anterior ilustración se observa que hay numerosas zonas del área de estudio que están en rojo y que indican que superan la capacidad de extinción de los medios. Esto era previsible, ya que la zona de estudio se ha escogido estratégicamente como una

zona con una alta densidad forestal y con un gran potencial de generación de gran incendio forestal. Para este cálculo se ha supuesto que las zonas de cereal de secano están sin cosechar y por lo tanto van a propagar el incendio con gran rapidez e intensidad.

2. Áreas dentro y fuera de capacidad de extinción para el periodo de verano comprendido desde el 15 de Julio: La realidad del mosaico forestal y agrícola, es que a partir de la segunda quincena de Julio los campos de cereal de secano están ya cosechados y por tanto durante 75 días aproximadamente de verano, el comportamiento del fuego en las zonas cosechadas será de menor intensidad y de propagación lenta, brindando amplias zonas de oportunidad de extinción.

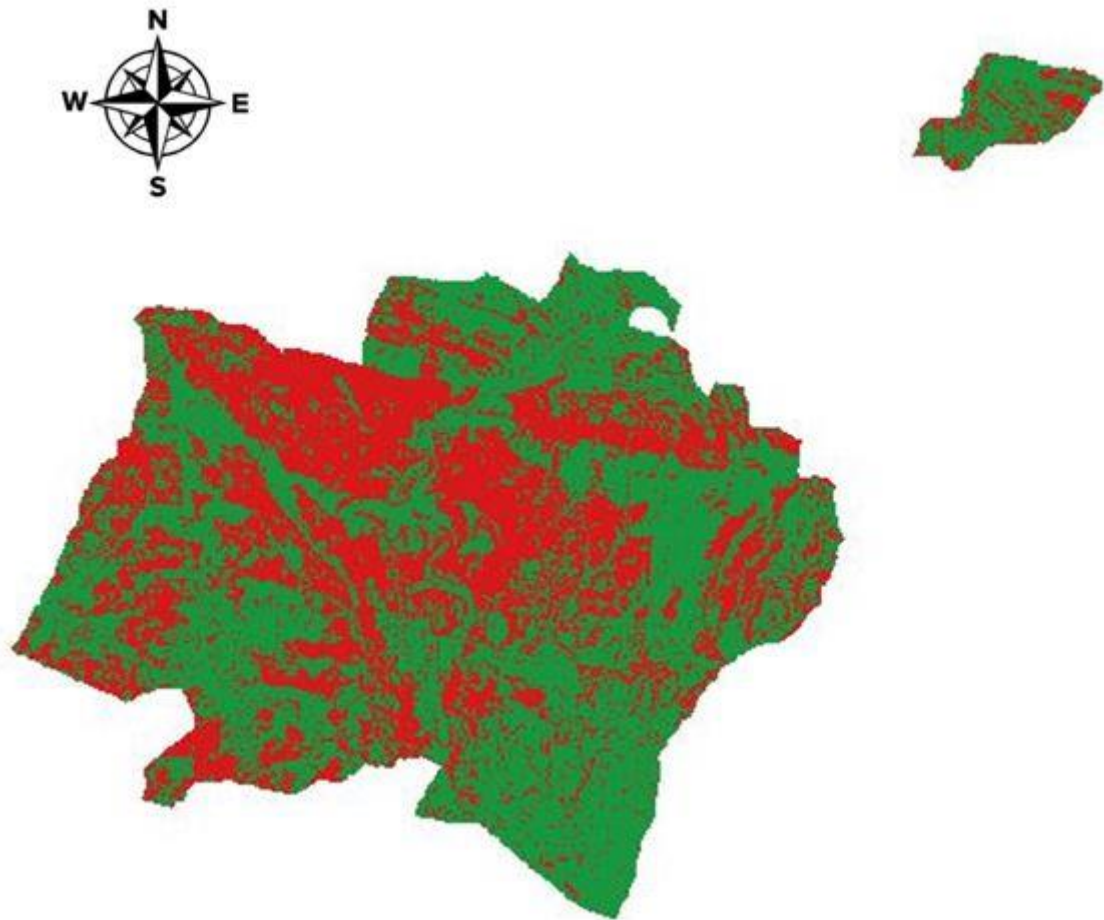


Figura 25: En Rojo zonas que superan la capacidad de extinción dentro de los municipios de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué después de cosecha cereal de secano, aproximadamente a partir del 15 de Julio. Las condiciones meteorológicas establecidas para estos resultados son las descritas para un GIF

El comportamiento de los diferentes combustibles vegetales al paso del fuego, varía de forma continua en el espacio y en el tiempo, por eso, no se puede realizar una valoración exacta de ese comportamiento. El resultado obtenido es una aproximación del comportamiento real que tendrá el fuego en cada pixel, para las condiciones meteorológicas establecidas como de alto riesgo de gran incendio forestal. Esta aproximación al comportamiento real se consigue simulando el incendio histórico de Ujué y los medios de extinción empleados en el mismo, y ajustando la respuesta de los distintos modelos de combustible, siguiendo el criterio de Scott y Burgan (2005).

De acuerdo a los resultados obtenidos de las simulaciones antes y después de cosechar, las áreas que van alcanzar grandes intensidades y/o una alta velocidad de propagación, coinciden con zonas forestales densamente pobladas y con pendientes ascendentes que favorecen la propagación del incendio. Por tanto estos resultados coinciden con el comportamiento teórico del fuego, cuando se da en zonas de alta continuidad horizontal y vertical del combustible, donde la capacidad de los medios de actuación se ve superada y la extinción es muy complicada.

La diferencia entre zonas que alcanzarán una elevada intensidad y superarán la capacidad de extinción de los medios (en rojo) antes y después de la cosecha es muy grande. La zona de estudio está predominada por cultivos de cereal de secano que propagan muy rápidamente el fuego. Una posible solución sería cambiar este tipo de cultivos por otros que sirvan de barrera al paso del fuego, como pueden ser por ejemplo los girasoles o los cultivos de vid.

3. Principales ejes de propagación y estimación de puntos críticos: A partir de los principales ejes de propagación de supuestos incendios obtenidos de la simulación, se observan algunos nodos de los que salen numerosos ejes secundarios y ramificaciones, y suponen un peligro potencial para que un incendio evolucione a un gran incendio forestal.

La combinación de áreas en rojo (fuera de capacidad de extinción) y nodos con numerosas ramificaciones y ejes secundarios serán áreas críticas. Si el incendio llega a esos puntos críticos se prevé que tenga un comportamiento errático y que se propague por numerosos ejes secundarios, realizando carreras secundarias que ampliarán el área afectada y complicarán mucho las labores de extinción.



Figura 26: Área crítica establecida dentro de los términos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué. La imagen ampliada muestra el nodo a partir del cual se produce la ramificación del incendio en varias carreras. En color rojo se muestran las zonas que superan la capacidad de extinción y en verde las zonas que brindan oportunidad de extinción.

En la figura 26 se observa la ampliación de una posible zona crítica a partir de la cual el comportamiento del incendio es errático y se propaga por numerosas carreras secundarias ampliando el incendio por un área muy amplia fuera de capacidad de extinción.

Con la obtención de los ejes principales de propagación de un supuesto incendio en la zona, se obtiene una aproximación de las áreas críticas, las cuales pueden ser puntos estratégicos de gestión claves para evitar la propagación exponencial de un incendio. Si estas zonas críticas se encuentran en campos de cultivo la solución podría ser cultivar girasol o vid en vez de cereal de secano. Si las áreas críticas están en zona forestal, mediante ganadería, aclareo por podas o quemas prescritas podrían suponer un buena forma de gestionarlas.

5. CONCLUSIÓN

Para la superficie que engloba a los términos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué, se han diferenciado y establecido todas aquellas zonas que se comportarán de manera muy intensa ante el paso del fuego y aquellas en las que la intensidad será menor, bajo unas condiciones sinópticas de gran incendio forestal (Menos de 30% de humedad relativa, temperatura de más de 30°C, velocidad de viento de más de 30 km/h, etc). En la zona predomina el cultivo de cereal de secano que propaga muy rápido el fuego y con alta intensidad si se encuentra sin cosechar, y que reduce considerablemente su intensidad cuando se ha cosechado. Estas variaciones se han previsto a la hora de obtener los resultados finales, diferenciando entre un paisaje en mosaico con cereal de secano sin cosechar y otro ya cosechado.

Durante el proceso del trabajo también se han definido los principales ejes de propagación que describirá el fuego si se origina un incendio forestal en dichos términos municipales. Y con ello se ha determinado de forma aproximada algunas áreas críticas presentes en la zona, que tras el paso del fuego por ellas, el incendio evoluciona ampliando considerablemente su frente y la superficie afectada.

Con el empleo y procesado de información aérea LiDAR se ha obtenido la cartografía del área de estudio. Posteriormente se ha empleado esa base cartográfica para la simulación de incendios forestales con las aplicaciones FARSITE y FlamMap, y con los parámetros de comportamiento resultantes, mediante su análisis con un SIG se han obtenido las áreas que están fuera de la capacidad de extinción de los medios y aquellas que brindan oportunidad en su control.

6. ANEXOS

Anexo I: Resultados visualizados por la dirección de la extinción

En la siguiente figura se muestra un ejemplo ampliado para una zona perteneciente al término municipal de Cáteda, con los resultados que visualizarán los mandos de extinción de forma que puedan pronosticar el comportamiento del incendio y los principales ejes de propagación, siéndoles de ayuda para el planteamiento de las estrategias de extinción.

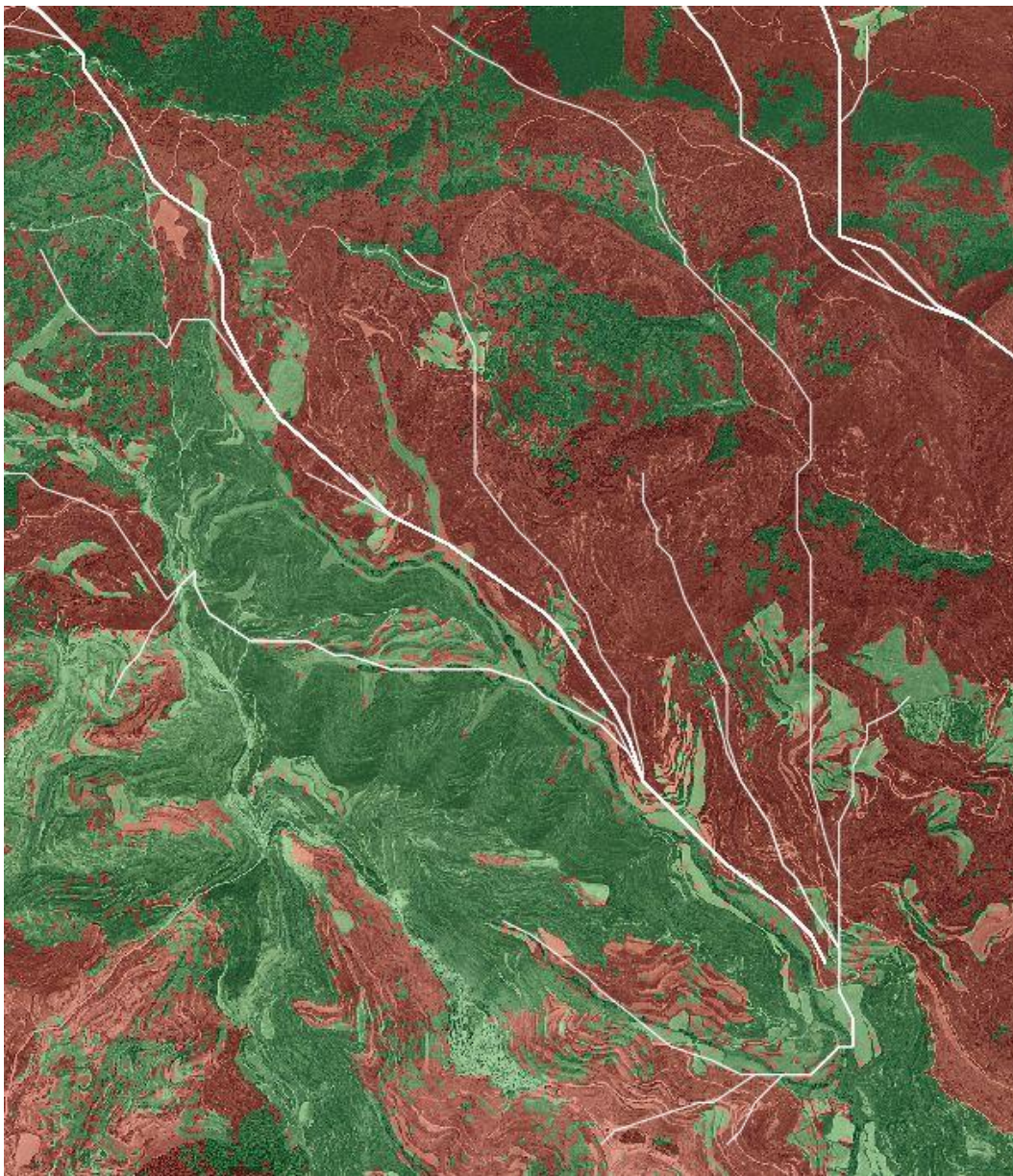


Figura 27: Resultados finales obtenidos sobre una ortofoto de la zona Cáteda. En rojo se muestran las zonas que superan la capacidad de extinción de los medios, en verde aquellas que brindan oportunidad de control y en blanco los principales ejes de propagación que describirá un supuesto incendio forestal en la zona.

7. BIBLIOGRAFÍA

Andersen, et al. (2005). *Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data*, 94, 441–449. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.013>

Calabuig, E. (2017). *Introducción a los simuladores de incendios forestales*. II Edición del Curso Práctico: Simulación de incendios forestales con datos LiDAR y su aplicación en planificación forestal. Agresta S. Coop.

Calabuig, E. (2017). *Simulación de incendios e integración de resultados en un SIG*. II Edición del Curso Práctico: Simulación de incendios forestales con datos LiDAR y su aplicación en planificación forestal. Agresta S. Coop.

Campbell, D. (1995). *The Campbell Prediction System: A Wild Land Fire Prediction System & Language*. D. Campbell ed. 129 p.

Canals, R. M. (2014). *El fuego en el paisaje: Aprendiendo del pasado para gestionar el futuro*. Universidad Pública de Navarra, Departamento de Producción Agraria, 1-18.

Cantón, J. (2017). *Parámetros para la simulación de incendios forestales*. II Edición del Curso Práctico: Simulación de incendios forestales con datos LiDAR y su aplicación en planificación forestal. Agresta S. Coop.

Costa, et al. (2011). *La prevención de los Grandes Incendios Forestales adaptada al Incendio Tipo*. GRAF. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

Cubo, et al. (2012). *Los Incendios Forestales en España. Decenio 2001-2010*. Madrid: Área de Defensa contra Incendios Forestales (ADCIF) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Finney, et al. (2004). *FARSITE: Fire Area Simulator — Model Development and Evaluation*. United States Department of Agriculture (USDA)

Lasanta, et al. (2015). Los efectos geoecológicos del cambio global en el pirineo central español: una revisión a distintas escalas espaciales y temporales. *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, 1-44. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2015.170005>.

Marín Iñesta, J. (2016). *Análisis del histórico y definición de las tipologías de Incendios Forestales en Navarra*. (Trabajo Final de Máster). Universidad de Lleida.

Pausas, J. G. (2012). *Incendios forestales*. CSIC.

Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-115.

Rothermel, R. C. (1983). *How to predict the spread and intensity of forest and rangefires*. Odgen, EE.UU. US. Forest Service. Orden, Utah.

Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). *Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model*, (June)

Stocker, et al (2013). *Cambio climático 2013. Bases físicas*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

Stocker, et al (2014). *Cambio climático Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

Tomé, J. L. (2017). *Introducción a la tecnología LiDAR*. II Edición del Curso Práctico: Simulación de incendios forestales con datos LiDAR y su aplicación en planificación forestal. Agresta S. Coop.

Van Wagner, C. E. (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 23-34. Recuperado el 16 de marzo de 2018 de: <https://doi.org/10.1139/x77-004>.

Van Wagner, C. E. (1993). Prediction of crown fire behaviour in two stands of jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 442-449. Recuperado el 16 de marzo de 2018 de: <https://doi.org/10.1139/x93-062>.

PORTALES WEB

Instituto Geográfico Nacional. (2012). *Centro Nacional de Información Geográfica*. Madrid: IGN. Recuperado el 6 de febrero 2018 de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>

Meteorología y climatología de Navarra. (2018). En *Aemet*. Recuperado el 23 de Febrero, 2018, de <http://meteo.navarra.es/estaciones/estacion.cfm?IDEstacion=30>