



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-385

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Estimación de las emisiones de CO₂ en masas sometidas a tratamientos de mejora mediante la simulación de incendios forestales a partir de datos LiDAR

CANTÓN MEGÍA, J.¹, MARINO DEL AMO, E.¹ y MOLINA TERRÉN, D.M.²

¹ Agresta S.Coop.

² Universidad de Lleida.

Resumen

Los ecosistemas mediterráneos están expuestos a los incendios forestales y han evolucionado con la recurrencia de este factor ecológico natural. La actual situación socioeconómica del medio rural ha provocado un incremento en número y en intensidad (por la acumulación de combustible) de los incendios provocados por el ser humano. Este cambio puede provocar efectos adversos como el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este trabajo pretende poner en valor los datos LiDAR para calcular las emisiones de CO₂ producidas por incendios forestales en masas arboladas, generar una cartografía de alta resolución de los principales parámetros implicados en el cálculo de las emisiones y valorar los efectos que los tratamientos de mejora de las masas arboladas tienen sobre las emisiones de CO₂. La metodología empleada se basa en la simulación del comportamiento del fuego para determinar la biomasa consumida y las emisiones de CO₂ en dos escenarios temporales, al inicio del Plan especial del proyecto de ordenación del monte y al finalizar el mismo, diseñados a partir de datos LiDAR, datos de inventario forestal, realizado también a partir de datos LiDAR, y de los tratamientos selvícolas planificados. Se ha determinado que los tratamientos selvícolas planificados han minorado la severidad del fuego, pero que las emisiones de CO₂ han aumentado entre los dos escenarios.

Palabras clave

Escenarios de simulación; FlamMap; severidad; fracción de biomasa consumida; gases de efecto invernadero

1. Introducción

Los ecosistemas mediterráneos están expuestos a los incendios forestales y han evolucionado con la recurrencia de este factor ecológico natural. La actual despoblación y abandono de la montaña mediterránea europea ha provocado un aumento de la cubierta vegetal y de la biomasa (y por ende el combustible disponible), la expansión incontrolada de las interfaces urbana-forestal y forestal-rural y un incremento del número de incendios forestales provocados por el ser humano (VÉLEZ, R., 2009; BODI et al., 2012). Numerosos trabajos señalan los efectos que los fuegos forestales tienen en fuegos posteriores (FERNANDES et al., 2015, MOLINA et al., 2016a). Los escenarios de cambio climático pronostican para la Península Ibérica un aumento de la temperatura en todas las estaciones, especialmente en verano, un aumento de las precipitaciones a finales del otoño y principios del invierno, y una disminución de las precipitaciones en primavera y principios de verano. Este conjunto de circunstancias favorecerá la ignición y alargarán la temporada de incendios en el ámbito peninsular en las próximas décadas (CARVALHO et al., 2011; HERRERA et al., 2013), circunstancia que provocará un aumento de la cantidad de gases de efecto invernadero que se liberan a la atmósfera provenientes de los incendios forestales.

La combustión de la biomasa durante los incendios forestales libera a la atmósfera diversos tipos de gases y aerosoles que tienen un importante impacto en la atmósfera y el clima (ALVES et al., 2010). Los principales compuestos liberados son CO₂ y CO y en menor medida CH₄, compuestos

orgánicos volátiles (COV), N₂O y aerosoles. CO₂, CH₄ y N₂O son las sustancias que mayor impacto generan sobre el clima, ya que tienen la capacidad de ser opacas a la radiación infrarroja proveniente de la tierra y contribuir así al proceso denominado como “efecto invernadero”. De estas sustancias, es el CO₂ el que mayor forzamiento radiativo genera y es el gas de referencia para la medida del potencial de calentamiento global.

Para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de incendios forestales existen dos grandes enfoques bajo los cuales se ha abordado esta problemática: el llamado *bottom-up*, cuando se obtienen datos de área incendiada y biomasa preexistente mediante teledetección, y la cantidad consumida y los factores de emisión por tipo de gas se obtienen a partir de resultados experimentales, generalmente hallados en la bibliografía o mediante medidas de satélite de la energía radiativa para calcular la biomasa consumida; el otro enfoque es el llamado *top-down*, que utiliza las correlaciones existentes entre la profundidad óptica de aerosoles y la presencia de distintos gases en la columna (PATON-WALSH et al, 2012). En España, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural (MAGRAMA, 2015) cuantifica las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas por los incendios forestales a partir de los datos de los inventarios forestales nacionales 2, 3 y 4 para cuantificar la biomasa y la información de los partes de incendios forestales.

En este trabajo, se utilizará una metodología tipo *bottom-up*, para abordar el cálculo de las emisiones de CO₂ desde una escala local, como es la de un monte. En España, las referencias de trabajos en este sentido comienzan a ser numerosas, utilizando metodologías tipo *bottom-up*, pero siempre a partir de datos de incendios reales y utilizando técnicas de teledetección para evaluar la severidad de los incendios y la biomasa consumida o a partir de valores citados en la literatura sobre fracción de biomasa consumida (SANCHEZ et al., 2007; VALERO et al., 2007; CHAVES, 2014). Fuera de España, estos estudios son numerosos desde hace varios años (WIEDINMYER et al., 2006; NARAYAN et al., 2007; ALVES et al., 2010; PATON-WALSH et al., 2012; EVTYUGINA et al., 2013).

2. Objetivos

El objetivo fundamental ha sido estimar las emisiones de CO₂ de la parte aérea de la masa forestal a partir de incendios forestales simulados. Además, se han considerado otros objetivos específicos: poner en valor la utilidad de la tecnología LiDAR para el cálculo de las emisiones de CO₂; cuantificar y realizar una cartografía de alta resolución de los combustibles forestales, la biomasa arbórea existente, la severidad del fuego a partir de la simulación del comportamiento del fuego, la biomasa arbórea consumida y las emisiones de CO₂, además de valorar los efectos que los tratamientos de mejora de las masas arboladas tienen en el consumo de biomasa arbórea y las emisiones de CO₂.

3. Metodología

La base de los cálculos de las emisiones será la ecuación propuesta por IPCC (2006):

$$L_{fire} = A \cdot B \cdot C_f \cdot G_{ef} \quad (1)$$

donde L_{fire} es la cantidad de gases de efecto invernadero por incendio forestal en toneladas, A es el área quemada en hectáreas, B es el valor estimado de las reservas de biomasa en toneladas por hectárea, C_f es el factor de combustión (adimensional) o eficiencia de la combustión, definido como la fracción de biomasa consumida por el fuego y G_{ef} es el factor de emisión del gas en toneladas por toneladas de materia seca.

Se ha partido, para el conocimiento de la biomasa preexistente, de los datos de inventario del proyecto de ordenación del monte de Utilidad Pública Ametler (GVA-AGRESTA, 2015), redactado a lo

largo de los años 2014 y 2015, abordado con tecnología LiDAR a partir de la información capturada dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). La fracción de biomasa consumida en las masas arboladas se ha cuantificado a partir de la simulación del comportamiento del fuego con el simulador estático FlamMap (FINNEY, 2006) en base a unas condiciones meteorológicas particulares y a unos combustibles caracterizados a partir del procesado de los datos LiDAR del PNOA. Los cálculos de las emisiones se han realizado en dos escenarios temporales: al inicio del Plan especial del proyecto de ordenación del monte y al finalizar el mismo, considerando los crecimientos previstos de la masa arbolada y las cortas planificadas. Los tratamientos selvícolas propuestos consisten en la mejora de las masas repobladas de pino carrasco mediante clareos semisistemáticos con criterio de selección negativo, claras para favorecer la naturalización de las masas y podas bajas para romper la continuidad vertical del combustible. El peso de las claras propuesto es mayor en las umbrías, pudiendo extraer un máximo del 30% del área basimétrica, y algo menor en las solanas, donde se ha establecido un máximo del 20% del área basimétrica en cada intervención.

3.1. Zona de estudio

Se ha seleccionado el monte Ametler, de 948,84 ha, perteneciente al catálogo de montes de Utilidad Pública de la Comunidad Valenciana con el número de catálogo CS104, y situado en el término municipal de Alcalà de Xivert, en la provincia de Castellón. La superficie forestal es de 947,60 ha, de las cuales 621,15 se consideran arboladas (fracción de cabida cubierta superior al 5%) y 326,45 no arboladas. La superficie inforestal es muy escasa, 1,24 ha. Presenta un relieve montañoso, con fuertes pendientes (media del 34%) y abundantes barrancos. El rango altitudinal se sitúa entre los 172 y 568 msnm. Las orientaciones dominantes son la norte y la sur, en proporciones similares. Está poblado fundamentalmente por formaciones de *Pinus halepensis* Mill. procedentes en su gran mayoría de repoblaciones realizadas en las décadas de 1970 y 1980, con una densidad media superior a los 900 pies/ha. También existen pequeños rodales de *Cupressus sempervirens* L. procedentes de las mismas repoblaciones.

3.2. Datos de inventario y cortas

Los datos del inventario forestal del monte y de las cortas planificadas, utilizados para el cálculo de la biomasa preexistente y el diseño de los escenarios de simulación, han sido los siguientes:

- Mapa de las formaciones forestales del monte, en formato vectorial y escala 1:5.000.
- Variables dasométricas a partir del inventario realizado en 2015 (sólo en las masas consideradas arboladas del monte) mediante tecnología LiDAR por métodos de masa (HYYPÄ et al., 2008; FERNÁNDEZ Y RODRÍGUEZ, 2013) a partir de los datos del PNOA del año 2009. en una cartografía en formato vectorial, en teselas de un tamaño máximo de 625 m²: número de pies por hectárea, área basimétrica en metros cuadrados por hectárea, diámetro medio cuadrático en centímetros, altura dominante en metros, volumen con corteza en metros cúbicos por hectárea e incremento anual de volumen con corteza en metros cúbicos por hectárea.
- Datos de existencias al final del Plan especial, para los que se habían tenido en cuenta el crecimiento de la masa y las extracciones planificadas.

3.3. Datos LiDAR del PNOA

Los datos LiDAR del PNOA se han utilizado para el diseño de los escenarios de simulación de Flammap, concretamente para la obtención de un modelo digital de elevaciones (MDE) y la cartografía de los combustibles forestales.

Se han procesado tres estratos (procesado entre 2 y 30 metros de altura, para caracterizar el arbolado; procesado entre 0,5 y 30 metros de altura, para caracterizar toda la vegetación existente;

procesado entre 0,5 y 2 metros de altura, para caracterizar el sotobosque y el matorral) utilizando el software FUSION (MCGAUGHEY, 2014), para un tamaño de celda de 25 metros. Los puntos situados por debajo de los 0,5 m no se han utilizado, para evitar que los retornos considerados suelo interfieran en los resultados.

3.4. Escenarios de simulación

Topografía. Se ha generado una cartografía de elevaciones en formato ráster de 25 metros de paso de malla a partir del procesado de la nube de puntos LiDAR. Las cartografías de pendientes y orientaciones, también en formato ráster y de la misma resolución que *elevaciones* se han obtenido a partir de la cartografía anterior mediante el software ArcGIS 10.1. Las cartografías que componen la topografía se han mantenido constantes entre ambos escenarios temporales de simulación.

Modelos de combustible. Se ha realizado una cartografía de modelos de combustible específica para el monte mediante una adaptación de la metodología propuesta por MARINO et al. (2016) para el conjunto de las islas forestales canarias. La metodología empleada tiene como objetivo desarrollar algoritmos de decisión para la asignación de modelos de combustible basados en la información que aportan las diferentes variables LiDAR en combinación con la cartografía de formaciones forestales. Se ha seleccionado el sistema de clasificación del combustible NFFL de Rothermel adaptado a España (ICONA, 1987) por ser el de mayor difusión actualmente en España.

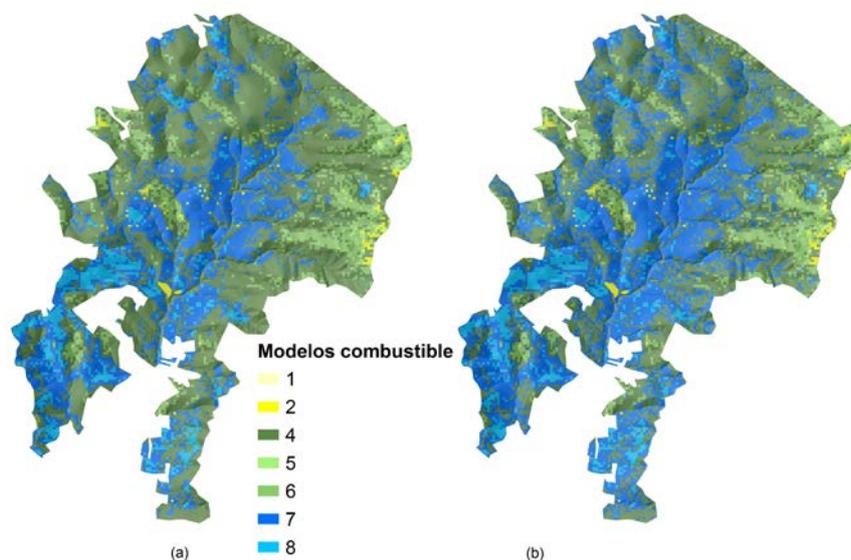


Figura 1. Modelos de combustible al comienzo (a) y al final (b) del Plan especial.

La generación de esta cartografía ha seguido el siguiente esquema metodológico:

- i. Generación de la cartografía de estructuras tridimensional de la vegetación a partir de los estadísticos LiDAR y los tratamientos selvícolas planificados.
- ii. Aplicación de algoritmos de decisión para definir los modelos de combustible a partir de la estructura tridimensional de la vegetación y las formaciones forestales.
- iii. Generación de la cartografía de modelos de combustible en los dos escenarios considerados (Figura 1).

Otros variables de los combustibles. Se han realizado también las siguientes cartografías a partir de los datos LiDAR del PNOA y los datos del proyecto de ordenación:

- Cobertura del arbolado a partir del porcentaje de primeros retornos respecto del total en el procesado LiDAR entre 2 y 30 m. Para el escenario final, se ha modificado en función del porcentaje de área basimétrica extraída.
- Altura del arbolado a partir de los datos de inventario del monte en los dos escenarios.
- Altura de la base de las copas y densidad aparente de copas a partir de los modelos matemáticos propuestos por MITSOPOULOS & DIMITRAKOPOULOS (2013).

Viento y humedad de los combustibles. Se ha seleccionado un viento medio de 25 km/ha (MOLINA, 2009) y una dirección de componente este (270 °). Se ha seleccionado para la humedad de los combustibles el escenario aportado por ROTHERMEL (1991) para condiciones de humedad extremadamente baja.

3.5. Eficiencia de la combustión. Severidad del fuego

La eficiencia de la combustión, o también denominada fracción de biomasa consumida, se asume tradicionalmente como un parámetro constante, suponiendo que el combustible vegetal se consume completamente; sin embargo, debería ser considerado una variable dinámica. El parámetro está estrechamente relacionado con la severidad del incendio (OLIVIA y CHUVIECO, 2011). No obstante, no se debe confundir la severidad del fuego, relativa a los efectos producidos por las llamas en el ecosistema, con la intensidad del fuego, que es un parámetro relativo al comportamiento del incendio que cuantifica la energía liberada por las llamas (KEELEY, 2009).

Tabla 1. Valores de fracción de biomasa consumida a partir de la severidad y valores de fracción de copa consumida (CFB). La CFB es un parámetro utilizado por en el Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System y predice la fracción de copas consumidas por un fuego. Los valores del parámetro se sitúan entre 0 y 1: un valor menor de 0,1 indica un fuego de superficie; si el valor es superior a 0,9 indica un fuego activo de copas, y el consumo total de las mismas; valores entre 0,1 y 0,9 indican un fuego pasivo de copas, con valores entre 10 y 90% de copas consumidas

CFB	Severidad (PAUSAS et al., 2002)		Eficiencia de la combustión en coníferas (DE SANTIS et al., 2010)
<0,2	Baja	Fuego ligero, la copa mantiene > 20% de las hojas verdes.	0,25
0,2- 0,8	Moderada	La mayor parte de las hojas (> 80%) de la copa de los árboles están socarradas (muertas) pero no consumidas. Las hojas verdes se pueden encontrar en la parte alta de la copa (< 5%) y algunas hojas de la parte baja pueden estar consumidas. Los árboles están mayoritariamente marrones (manteniendo las hojas socarradas) después del fuego.	0,47
>0,8	Alta	Fuego severo: la copa de los árboles tiene > 80% de las hojas consumidas y el resto, si hay alguna, socarrada.	0,65

La eficiencia de la combustión de la ecuación (1) en cada escenario de simulación se ha determinado a partir de la severidad potencial del incendio simulado según los valores de DE SANTIS et al. (2010), el tipo de severidad esperada propuesto por PAUSAS et al. (2003) para masas de *Pinus halepensis* Mill., y los valores de la fracción de copa consumida (CFB) (VAN WAGNER, 1993) obtenido a partir de las simulaciones con FlamMap (Tabla 1). A partir de los valores de la Tabla 1 se ha generado una ecuación polinómica que ha permitido establecer el valor de la eficiencia de la combustión a partir de los valores de la CFB.

3.6. Biomasa aérea preexistente

La biomasa aérea preexistente en toneladas en cada escenario de simulación se ha calculado a través de un factor de expansión de biomasa (BEF por sus siglas en inglés), multiplicado por el

volumen con corteza en metros cúbicos. El valor de referencia para *Pinus halepensis* Mill. es 0,74 y para *Cupressus* sp. es 0,55 (COST, 2002).

3.7. Factor de emisión

Se ha seleccionado como factor de emisión el mostrado por EVTYUGINA et al. (2013) de 1.377 g de CO₂/kg de biomasa seca, al haberse obtenido a partir de incendios reales en unas condiciones asimilables a las propuestas en el presente trabajo.

4. Resultados

4.1. Severidad y eficiencia de la combustión

La distribución de la severidad (Figura 2) y la fracción de biomasa consumida al inicio y final del Plan Especial obtenidos a partir del parámetro de fracción de copa consumida (CFB) de la simulación en FlamMap se muestran en la Tabla 2. Estos valores ponen de manifiesto una ligera disminución de la severidad del fuego en el conjunto de las superficies arboladas del monte, existiendo un claro trasvase desde una "severidad moderada" a una "severidad baja" al final del Plan Especial. El análisis indica que el promedio de severidad esperada varía entre 0,28 y 0,19 entre el inicio y el final del Plan especial. En el caso de las masas de *P. halepensis* Mill. procedentes de repoblación, que han sido las únicas donde se han propuesto tratamientos de mejora, se constata una disminución global de la severidad, tanto en las teselas propuestas para tratamientos como en las que no (Tabla 3).

Tabla 2. Distribución en hectáreas de la severidad a partir de la fracción de copa consumida (CFB, valores entre paréntesis) y eficiencia de la combustión al inicio y final del Plan Especial para el conjunto de las superficies arboladas del monte.

Severidad	Eficiencia de la combustión	Superficie (ha)	
		Inicio Plan Especial	Final Plan especial
Baja (<0,2)	<0,25	325,13	406,63
Moderada (0,2-0,8)	0,25-0,65	246,75	182,73
(>0,8)	>0,65	49,27	31,8

Tabla 3. Distribución en hectáreas y en valores promedio de la fracción de copa consumida (CFB) (entre paréntesis valores de desviación estándar) al inicio y final del Plan Especial para el conjunto de las masas de *P. halepensis* procedentes de repoblación.

Tratamientos selvícolas	Superficie (ha)			Promedio CFB		
	Inicio Plan especial	Final Plan especial	Variación (%)	Inicio Plan especial	Final Plan especial	Variación (%)
Si	200,50	227,99	13,71	0,17 (0,27)	0,11 (0,22)	-33,58
No	83,87	58,39	-30,38	0,35 (0,33)	0,25 (0,30)	-27,10

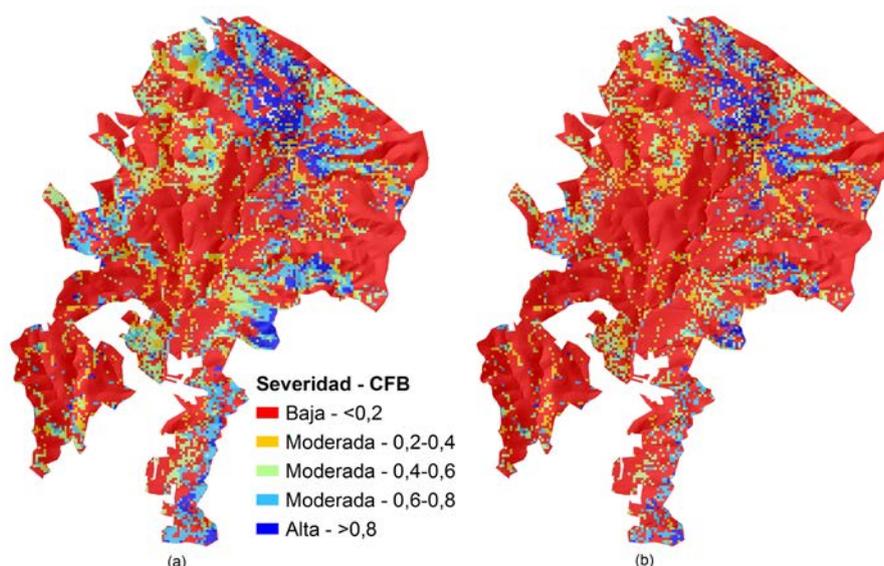


Figura 2. Severidad al comienzo (a) y al final (b) del Plan especial.

4.2. Biomasa preexistente, consumida y emisiones de CO₂

La Tabla 4 y Figura 3 (a) y (b), muestra que la biomasa aérea preexistente se ha incrementado entre los dos escenarios propuestos. También muestra que, a partir de las simulaciones llevadas a cabo, se estima que se consume un 29,48% de la biomasa aérea preexistente al inicio del Plan especial y un 26,60% de la biomasa aérea preexistente al final del Plan especial (Figura 4 (c) y (d)). Si bien porcentualmente el consumo de biomasa es menor al final del Plan especial, en términos totales la biomasa consumida y las emisiones de CO₂ (Figura 4 (e) y (f)) son mayores al final del Plan especial. Los resultados de las teselas en las que se han planificado cortas (Tabla 5) muestran un incremento de la biomasa consumida y de las emisiones de CO₂ entre escenarios, si bien, el incremento en términos porcentuales es menor, 25,61% frente a 23,89%.

Tabla 4. Valores en toneladas por hectárea de la biomasa aérea preexistente y la biomasa aérea consumida y las emisiones de CO₂ estimadas a partir de las simulaciones con FlamMap al inicio y final del Plan Especial para el conjunto del monte. Se muestra el porcentaje de biomasa aérea consumida respecto a la biomasa aérea preexistente.

Escenario	Biomasa aérea preexistente (t/ha)	Biomasa aérea consumida		Emisiones CO ₂ (t/ha)
		(t/ha)	(%)	
Inicio Plan Especial	39,62	11,68	29,48	16,08
Final Plan Especial	49,35	13,13	26,61	18,08
Variación	9,73	1,45	14,90	2,00

Tabla 5. Valores en toneladas por hectárea de la biomasa aérea preexistente y la biomasa aérea consumida y las emisiones de CO₂ estimadas a partir de las simulaciones con FlamMap al inicio y final del Plan Especial para el conjunto de teselas donde se han planificado tratamientos selvícolas. Se muestra el porcentaje de biomasa aérea consumida respecto a la biomasa aérea preexistente.

Escenario	Biomasa aérea preexistente (t/ha)	Biomasa aérea consumida		Emisiones CO ₂ (t/ha)
		(t/ha)	(%)	
Inicio Plan Especial	52,86	13,54	25,61	18,64
Final Plan Especial	60,89	14,54	23,89	20,03
Variación	8,03	1,00	-1,72	1,39

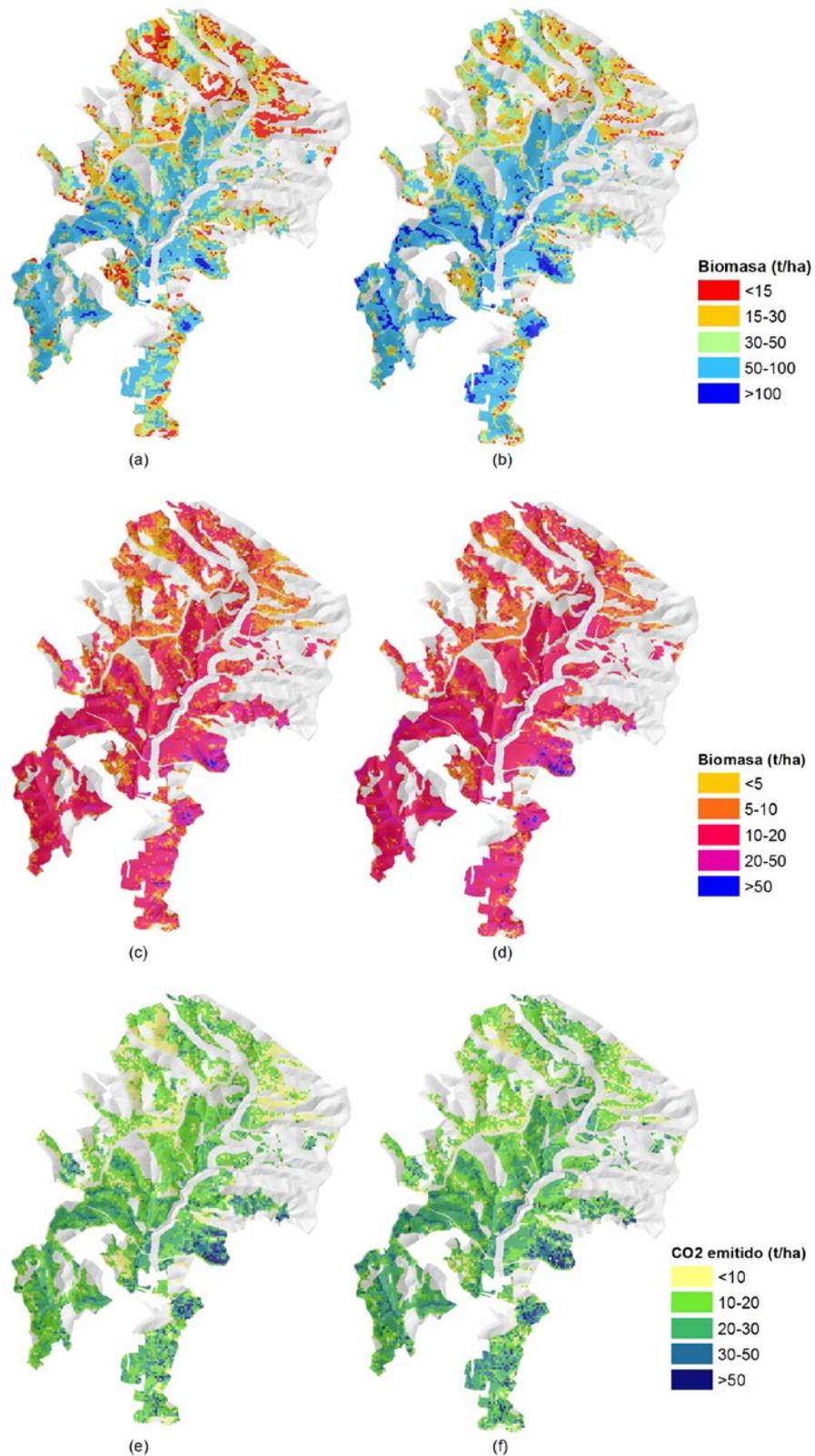


Figura 3. Biomasa preexistente al inicio (a) y final (b) del Plan Especial; biomasa consumida al inicio (c) y final (d) del Plan especial; emisiones de CO2 al inicio (e) y final (f) del Plan especial.

5. Discusión

Los resultados muestran unas emisiones totales de 16,08 t/ha de CO₂ al inicio del Plan Especial y de 18,08 t/ha de CO₂ al final del Plan Especial. La biomasa consumida ha sido de 11,68 t/ha al inicio del Plan especial y 13,13 t/ha al final del Plan Especial, lo que supone un 29,48% y 26,61% de la biomasa preexistente respectivamente. En lo referente a las zonas donde se han planificado cortas, los resultados de la Tabla 5 indican también un aumento de la biomasa consumida y las emisiones por hectárea de CO₂ entre escenarios: las emisiones aumentan de 13,54 t/ha a 14,54 t/ha, si bien también disminuye el porcentaje respecto a la biomasa preexistente. Este cálculo de emisiones, se corresponde únicamente con la parte aérea de las masas arboladas, ya que no se han analizado las emisiones provenientes del matorral y el sotobosque, elementos fundamentales en el comportamiento del fuego y en las emisiones de CO₂. CHAVES (2014), que analiza las emisiones de gases de efecto invernadero de los incendios de Andilla y Cortes de Pallás en 2012, ofrece datos de 38,09 t/ha y 22,71 t/ha de CO₂ para ambos incendios respectivamente, incluyendo la fracción de matorral. VALERO et al. (2007) ofrece datos globales de 43,66 t/ha de emisiones de CO₂ para los incendios de Pontevedra del año 2006, donde también se incluye la fracción de matorral.

Los datos muestran cómo, a pesar de la disminución de la severidad (y por tanto de la fracción de biomasa consumida) entre escenarios se ha producido un aumento en biomasa consumida en términos globales y las emisiones, incluso en las zonas donde se han llevado a cabo tratamientos selvícolas. En ambos casos, el aumento de la biomasa preexistente se muestra como el factor clave que determina ese aumento en las emisiones. La disminución de la severidad en las zonas no sometidas a tratamientos selvícolas se considera relacionada con la menor intensidad del fuego asociada al aumento de la altura del arbolado: a mayor altura, menor velocidad del viento a media lla y por tanto menor velocidad de propagación, y menor intensidad lineal ya que ambas variables están directamente relacionadas según la ecuación de Rothermel (ROTHERMEL, 1991) integrada en FlamMap. Una menor intensidad del fuego implica menor cantidad de energía emitida y, por tanto, una menor afectación de las copas. En las zonas tratadas, a pesar de tener un posible incremento de la velocidad del viento e intensidad del fuego asociada debido a la menor densidad de la masa tras las claras y podas, el aumento de la altura de la base de las copas supondría un menor riesgo de fuego de copas, y por tanto una menor severidad del fuego, al eliminar la continuidad vertical del combustible. Se ve necesario por tanto planificar zonas estratégicas para evitar este incremento de emisiones. El uso de quemas prescritas para reducción la disponibilidad de combustible para fuegos de superficie haría más fácil que los eventuales incendios forestales fuesen de menos intensidad (MOLINA et al., 2016b).

La utilización de los datos LiDAR del PNOA permite obtener una cartografía de alta resolución de todos los parámetros implicados en el comportamiento del fuego (archivo paisaje de FlamMap), de la biomasa preexistente y consumida y de las emisiones de CO₂ en los dos escenarios de simulación planteados. Esta cartografía tiene un tamaño máximo de tesela de 25x25 metros, muy adecuado para la utilización en los simuladores de comportamiento del fuego y para la gestión forestal. La adaptación propuesta para elaborar la cartografía de modelos de combustible sobre la metodología de MARINO et al. (2016), resulta sencilla de aplicar al disponer de una cartografía muy precisa de las formaciones forestales procedente del inventario del monte.

El uso del simulador FlamMap ha permitido determinar y poder categorizar la severidad de un incendio forestal en masas arboladas, gracias a la obtención directa de la fracción de copa quemada, parámetro definido en sí mismo como un indicador de la severidad del incendio. Aun así, se cree necesario profundizar en este tema en ambientes mediterráneos, comparando la severidad ocurrida en incendios reales con el comportamiento simulado del fuego, y que se desarrolle una adecuada categorización en función de los diversos parámetros de salida que ofrecen los simuladores.

Se observa también un déficit en la disponibilidad de datos sobre fracción de biomasa consumida y factores de emisión en ambientes mediterráneos; los valores utilizados de DE SANTIS et

al. (2010) y EVTYUGINA et al. (2013) pueden ser fácilmente asimilables al haberse obtenido en ambientes de características similares.

6. Conclusiones

Los resultados ofrecidos en este trabajo muestran que es posible estimar las emisiones de CO₂ de la parte aérea de la masa forestal a partir de la simulación del comportamiento de fuego utilizando los datos LiDAR del PNOA. También ha sido posible valorar el efecto que los tratamientos de mejora propuestos en las masas arboladas tienen sobre el comportamiento del fuego y las emisiones de CO₂. Este trabajo es uno de los primeros según la bibliografía consultada en estimar las emisiones potenciales de CO₂ producidas por incendios forestales utilizando los simuladores de incendios y ha permitido obtener una cartografía de alta resolución de las emisiones de CO₂ y de otros variables de gran importancia en la gestión forestal: combustibles forestales, biomasa preexistente, severidad potencial de un incendio forestales o la fracción de biomasa consumida por el mismo.

La disminución de la severidad no se ha manifestado en una disminución de la biomasa consumida y del CO₂ emitido entre los escenarios planteados. El incremento de la biomasa disponible entre los dos escenarios se ha revelado como el factor determinante para que las emisiones sean superiores. Aun no habiéndose analizado, de no haberse llevado a cabo los tratamientos propuestos a lo largo del Plan especial del proyecto de ordenación, la simulación hubiera reflejado una mayor cantidad de emisiones. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo tratamientos de mejora en las masas arboladas y el diseño de zonas estratégicas de gestión del combustible especialmente enfocados a disminuir la severidad de los incendios para contribuir en la mayor medida posible a la disminución de las emisiones de CO₂. Incluso, se concluye que las ordenaciones forestales deben buscar disminuir la biomasa disponible en el paisaje de modo que reduzcamos las emisiones a la vez que permitimos más opciones a los medios de extinción para controlar la propagación de incendios forestales en aquellas zonas de menos intensidad de llama.

7. Agradecimientos

La contribución de parte de los autores fue posible gracias al proyecto de I+D "GEPRIF" financiado por el INIA, así como por el programa FEDER de la UE.

8. Bibliografía

ALVES, C.A.; GONÇALVES, C.; PIO, C.A.; MIRANTE, F.; CASEIRO, A.; TARELHO, L.; FREITAS, M.C.; VIEGAS, D.X.; 2010. Smoke emissions from biomass burning in a Mediterranean shrubland. *Atmospheric Environment* 44.25 3024-3033.

BODI, M.B.; CERDÁ, A.; MATAIX-SOLERA, J.; DOERR, S.H.; 2012. Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 58 33-55.

GVA-AGRESTA; 2015. Proyecto de ordenación del monte de Utilidad Pública CS104 Ametler. Término municipal de Alcalá de Xivert (Castellón). Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente. Generalitat Valenciana-Agresta S.Coop.

CARVALHO, A.C.; CARVALHO, A.; MARTINS, H.; MARQUES, C.; ROCHA, A.; BORREGO, C.; VIEGAS, D.X.; MIRANDA, A.I.; 2011. Fire weather risk assessment under climate change using a dynamical downscaling approach. *Environmental Modelling & Software* 29-9 1123-1133.

CHAVES, J.; 2014. Incendios forestales y cambio climático. Estimación de emisiones en los incendios de Andilla y Cortes de Pallás. *Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente*. Universidad Politécnica de Valencia.

COST. 2002. Contribution of forest and forestry to mitigate greenhouse effects. Proceedings of the Expert group meeting on biomass expansion factors. Besalú, España.

DE SANTIS, A.; ASNER, G.P.; VAUGHAN, P.J.; KNAPP, D.E.; 2010. Mapping burn severity and burning efficiency in California using simulation models and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 114-7 1535-1545.

EVTYUGINA, M.; CALVO, A.I.; NUNES, T.; ALVES, C.; FERNANDES, A.P.; TARELHO, L.; CASIMIRO PIO, A.V.; 2013. VOC emissions of smouldering combustion from Mediterranean wildfires in central Portugal. *Atmospheric Environment* 64 339-348.

FERNANDES, P.; DAVIES, G.M.; ASCOLI, D.; FERNÁNDEZ, C.; FRANCISCO MOREIRA, F.; RIGOLOT, E.; STOOFF, C.R.; VEGA, J.A.; MOLINA, D.M.; 2013. Prescribed burning in southern Europe: developing fire management in a dynamic landscape. Special Issue of *Frontiers in Ecology and the Environment* on Management of Fire-prone Landscapes <http://www.esajournals.org/doi/abs/10.1890/120298> . 11: e4-e14. <http://dx.doi.org/10.1890/120298>.

FERNÁNDEZ LANDA, A.; RODRÍGUEZ PUERTE, F.; 2013. La tecnología lidar en la planificación y gestión forestal: nuevas formas de cálculo de existencias y generación de cartografía de masas forestales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 37 67-73

FINNEY, M.A. 2006. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. (link is external) In: *Fuels management—how to measure success: conference proceedings*. Portland, Oregon.

HERRERA, S.; BEDIA, J.; GUTIÉRREZ, J.M.; FERNÁNDEZ, J.; MORENO, J.M.; 2013. On the projection of future fire danger conditions with various instantaneous/mean-daily data sources. *Climatic Change*. 118. 3 827-840.

HYYPÄ, J.; HYYPÄ, H.; LECKIE, D.; GOUGEON, F.; YU, X.; MALTAMO, M.; 2008. Review of methods of smallfootprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29:5 1339 – 1366.

ICONA; 1987. Clave fotográfica para la identificación de modelos de combustible. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Instituto para la Conservación de la Naturaleza, Área de Defensa contra Incendios Forestales. Madrid.

IPCC; 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4 Agriculture, forestry and other land use.

KEELEY, JE; 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* 18 116–126.

MAGRAMA; 2015. Inventario Nacional de Emisiones a la atmósfera. 1990-2013. Volumen 2: Análisis sectorizado de las emisiones-metodologías. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.

MACGAUGHEY, R.J.; 2014. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. VER 3.42. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, University of Washington. 159 pp. Seattle.

MARINO, E.; RANZ VEGA, P.; TOMÉ MORÁN, J.L.; 2016. Cartografía de alta resolución de modelos de combustible forestal: metodología de bajo coste basada en datos LiDAR. *Foresta* 65 34-42.

- MITSOPOULOS, I.D.; DIMITRAKOPOULOS, A.P.; 2014. Estimation of canopy fuel characteristics of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests in Greece based on common stand parameters. *Eur J Forest Res* 133: 73-79.
- MOLINA, D.M.; 2009. Asignación de Modelo de Combustible para la Planificación. En: Incendios Forestales: Fundamentos y Aplicaciones (Vélez, R. ed.). 265-270. McGraw-Hill. Madrid.
- MOLINA, D.M.; CARDIL, A.; KOBZIAR, L.N.; 2016. Practitioner Perceptions of Wildland Fire Management across South Europe and Latin America. *Forests* 7(9) 184.
- MOLINA, D.M.; FRY, D.L.; GRILLO, F.F.; CARDIL, A.; STEPHENS, S.L.; 2016. Fire history and management of *Pinus canariensis* forests on the western Canary Islands Archipelago, Spain, *Forest Ecology and Management* 382 184-192.
- NARAYAN, C.; FERNANDES, P.M.; VAN BRUSSELEN, J.; SCHUCK, A.; 2007. Potential for CO₂ emissions mitigation in Europe through prescribed burning in the context of the Kyoto Protocol. *Forest Ecology and Management* 251 164-173.
- OLIVIA, P.; CHUVIECO, E.; 2011. Estimación de la eficiencia del quemado a partir de la severidad de quemado. Departamento. Teledetección: Bosques y cambio climático.
- PATON-WALSH, C.; EMMONS, L.K.; WIEDINMYER, C.; 2012. Australia's Black Saturday Fires - Comparison of Techniques for Estimating Emissions from Vegetation Fires. *Atmospheric Environment* 60 262-70.
- PAUSAS, J.; OUADAH, N.; FERRAN, A.; GIMENO, T.; VALLEJO, R.; 2003. Fire severity and seedling establishment in *Pinus halepensis* woodlands, eastern Iberian Peninsula. *Plant Ecology* 169 205-213.
- ROTHERMEL, R.C.; 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. Research Paper INT-438. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.
- SÁNCHEZ, G.; MARTINEZ DE SAAVEDRA, J.; PÉREZ, S.; 2007. Estimación del volumen de Gases de Efecto Invernadero liberados por Incendios Forestales en España (1.990-2.005). *Wildfire 2007*, Sevilla.
- VALERO, E.; PICO, J.; HERRERA, M.; 2007. Cálculo de las Emisiones de CO₂ por los Incendios de 2006 en la Provincia de Pontevedra (Galicia). *Wildfire 2007*, Sevilla.
- VAN WAGNER, C.E.; 1993. Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine. *Canadian Journal of Forest Research* 23 442-449.
- VÉLEZ, R.; 2009. Los factores causantes: las fuerzas y los cambios sociales y económicos. En: Convivir con los incendios forestales: lo que nos revela la ciencia. (Yves Birot, ed.). European Forest Institute. Discussion Paper 15, 23-27.
- WIEDINMYER, C.; QUAYLE, B.; GERON, C.; BELOTE, A.; MCKENZIE, D.; ZHANG, X.; O'NEILL, S.; KLOS, K.L.; 2006: Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling. *Atmospheric Environment* 40 3419-3432.