

Accésit SECF 2021 en el apartado Tesis Doctoral

**Caracterización del combustible del dosel arbóreo
mediante sensores remotos y evaluación del efecto de
las claras sobre el comportamiento y severidad potenciales
del fuego en pinares del NO de España**

**Characterization of canopy fuel from remote sensing
and assessment of thin-only effect on potential fire behaviour and severity
in pine forests in NW Spain**

Arellano-Pérez, S.^{1,2*}; Ruíz-González, A.D.¹; Vega, J.A.³;
Álvarez-González, J.G.¹

¹ *Unidad de Gestión Ambiental y Forestal Sostenible (UXAFORES), Departamento de Ingeniería Agroforestal,
Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidad de Santiago de Compostela,
Campus Universitario s/n, 27002 Lugo, España.
stefano.arellano@gmail.com; anadaria.ruiz@usc.es; josea2.vega@gmail.com; juangabriel.alvarez@usc.es*

² *Agresta S. Coop., Calle Duque de Fernán Núñez, 2, 28012 Madrid, España*

³ *Centro de Investigación Forestal de Lourizán, PO Box 127, 36080 Pontevedra, España*

* Autor de correspondencia: stefano.arellano@gmail.com

Resumen

En la presente tesis doctoral se han desarrollado modelos para estimar la distribución vertical de la carga de combustible disponible del dosel arbóreo, tanto a partir de datos LiDAR como de variables de rodal medidas en campo. Además, se han obtenido modelos de estimación de variables del combustible de superficie y del dosel arbóreo a partir de imágenes del satélite Sentinel-2A, que permiten generar cartografía del riesgo potencial de fuego de copas. Por otro lado, se ha evaluado el efecto a medio plazo del tratamiento de clara por sí sola, sin intervención en los combustibles de superficie, sobre el complejo de combustible y el comportamiento y la severidad potenciales del fuego, así como la capacidad de los rodales quemados para proteger el suelo contra la erosión post-incendio. Todos estos estudios se realizaron en pinares del noroeste de España y los resultados obtenidos aportan nueva información sobre combustibles forestales, conectándola con el comportamiento esperado del fuego en incendios, siendo de gran utilidad no sólo en la gestión del fuego forestal sino también en la gestión forestal en general.

Palabras clave: *carga de combustible disponible de superficie, densidad aparente del dosel (CBD), fuego de copas, LiDAR, Sentinel-2A, velocidad de propagación del fuego.*

Abstract

In this PhD thesis, models have been developed to estimate the vertical distribution of the available canopy fuel load, both from LiDAR data and from stand variables measured in the field. In addition, models for estimating surface fuel and canopy variables have been obtained from Sentinel-2A satellite images, which allow the generation of a mapping of the crown fire potential risk. On the other hand, the mid-term effect of thin-only treatment, without intervention on surface fuels, on the fuel complex and potential fire behaviour and severity, as well as the capacity of burned stands to protect the soil against post-fire erosion, has been assessed. All these studies were carried out in pine forests in northwestern Spain and the results obtained provide new information on forest fuels, connecting it with the expected fire behaviour, being of great use not only in fire management but also in forest management in general.

Palabras clave: *available surface fuel load, canopy bulk density (CBD), crown fire, LiDAR, Sentinel-2A, fire spread rate.*

1. Introducción

Los fuegos de copa suelen ser más rápidos e intensos que los de superficie y, por lo tanto, resultan muy peligrosos y difíciles de combatir (Alexander y Cruz, 2011). Aunque frecuentemente generan situaciones de alto riesgo para las zonas habitadas y graves impactos en la vegetación, el agua, el suelo y los hábitats de diferentes especies, también cumplen un importante papel ecológico. En Galicia, noroeste de España, los pinares son el tipo de cubierta forestal más propensa a sufrir fuegos de copa (Fernandes y Rigolot, 2007; Vega *et al.*, 2008; Arellano *et al.*, 2017), lo que se refleja en que las plantaciones de alguna especie de pino son las de mayor superficie quemada en la región. Esto es favorecido por la extensa superficie ocupada por estas especies y las características estructurales de sus combustibles. La carga de combustible disponible (W_a) del estrato de superficie, y la carga de combustible disponible (CFL), la altura de la base (CBH) y la densidad aparente (CBD) del dosel arbóreo de copas, junto con la distancia vertical entre los estratos del combustible de superficie y del dosel arbóreo (FSG), son las más importantes variables estructurales implicadas en los fuegos de copa (Ruiz-González y Álvarez-González, 2011; Jiménez *et al.*, 2013; Fernández-Alonso *et al.*, 2013). Hay, sin embargo, una notable falta de datos cuantitativos sobre estas variables, especialmente a escala de paisaje, y esa escasez afecta a la capacidad de predecir mejor numerosos procesos biofísicos ligados al fuego forestal y desarrollar más eficazmente las actividades relacionadas con su gestión. La medición directa de la mayoría de estas variables no es posible, o no es práctica, y por ello sus valores suelen estimarse indirectamente mediante el empleo de modelos predictivos. Para construir esos modelos la tecnología LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) y las imágenes de satélite pueden resultar de gran utilidad (Keane *et al.*, 2000; González-Ferreiro *et al.*, 2014), pero su uso para esta finalidad es todavía escaso en la región. Además, hay una falta de información sobre la capacidad de los sensores remotos para clasificar los tipos potenciales de fuego, en base a las variables del combustible obtenidas mediante aquellos.

Los gestores forestales tratan de limitar el inicio y la propagación de los incendios de copa en Galicia, a través de tratamientos que modifican las características estructurales del combustible de superficie y del dosel arbóreo, y dentro de ellos la clara es una práctica común para ese fin. Sin embargo, es frecuente en los gestores y propietarios forestales de la región asumir que la clara, por si sola, es decir sin ser acompañada de ningún tratamiento del combustible de superficie, reduzca el potencial comportamiento del fuego y sus efectos (Ruiz-González *et al.*, 2015; Hevia *et al.*, 2018). En otros casos la escasez de presupuesto les hace priorizar la clara sola, beneficiosa desde el punto de vista silvícola pero que puede serlo menos desde la perspectiva de prevención de incendios. Aunque estudios previos realizados en otras partes del mundo indican que la clara sola muestra baja eficacia en la reducción del riesgo de incendio (Omi *et al.*, 2006; Fulé *et al.*, 2012; Madrigal *et al.*, 2017) no existen estudios específicamente desarrollados testando ese resultado, con datos de campo, en el noroeste de España. Además, la duración de la eficacia del tratamiento de clara sola sobre el complejo de combustible es incierta y ese aspecto es de par-

ticular interés en Galicia. Por otra parte, la investigación sobre el efecto de la, clara a medio plazo, en la atenuación de la severidad del fuego en el área tratada, es generalmente muy escasa.

Teniendo en cuenta lo anterior, los objetivos de esta investigación doctoral fueron:

1. Modelizar la distribución vertical de CFL a partir de métricas LiDAR y de variables de rodal medidas en pinares de Galicia (Artículos 1-2: González-Ferreiro *et al.*, 2017 y Fidalgo-González *et al.*, 2019).
2. Explorar la capacidad de las imágenes del satélite Sentinel-2A para obtener modelos de estimación de las características estructurales de los combustibles de superficie y del dosel, a nivel rodal, y su eficacia para clasificar adecuadamente el tipo de fuego potencialmente originado bajo diferentes escenarios (Artículo 3: Arellano-Pérez *et al.*, 2018).
3. Evaluar en masas de *P. pinaster* y *P. radiata* del noroeste de España:
 - a). A propensión a potenciales fuegos de copas activos de masas aclaradas y sin aclarar en ambas especies.
 - b). Los efectos a medio plazo del tratamiento de clara, por si sola, sobre el complejo de combustible, el comportamiento y la severidad potenciales de un fuego que afectara a estas masas.
 - c). La capacidad de los rodales quemados para proteger el suelo contra la erosión post-incendio (Artículo 4: Arellano-Pérez *et al.*, 2020).

2. Material y métodos

En primer lugar, se presenta en la *Tabla 1* un resumen de los datos y principales métodos utilizados en los cuatro artículos incluidos en la presente tesis doctoral, con el propósito de ofrecer una visión comparativa de los aspectos comunes y diferenciadores de cada uno de ellos. Seguidamente se describen con detalle los aspectos más relevantes del apartado de material y métodos de cada uno de los artículos.

A continuación, se muestra la localización de:

- a). Las parcelas de pinar (*P. pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris*) del Cuarto Inventario Forestal Nacional (*Fig. 1*) en Galicia (Artículos 1-2).
- b). Mediciones periódicas en una red de parcelas de ensayos de claras (*Fig. 2*), instaladas en rodales de *P. pinaster* (22 sitios) y *P. radiata* (19 sitios) en el noroeste de España (Artículos 3-4).

Tabla 1. Resumen comparativo de aspectos relevantes de material y métodos de cada uno de los artículos incluidos en la presente tesis.

Artículo	1 y 2	3	4
Tema central	Modelización de características de combustibles		Efectos de claras sobre combustibles, comportamiento y severidad del fuego y protección del suelo
Modelos desarrollados	Distribución vertical de <i>CFL</i>	<i>SFL</i> , <i>FSG</i> , <i>CBH</i> y <i>CBD</i>	Cobertura de suelo por acículas soflamadas caídas (SC_{sn})
VARIABLES explicativas cuantitativas	Métricas LiDAR y variables de rodal	Bandas espectrales e índices de vegetación de Sentinel-2A	Carga de acículas soflamadas caídas (W_{sn})
VARIABLES explicativas cualitativas	---	Tratamiento y especie	---
Nivel	Rodal (por agregación de valores de árbol individual)		
Especies	<i>P. pinaster</i> , <i>P. radiata</i> <i>P. sylvestris</i>	<i>P. pinaster</i> y <i>P. radiata</i>	
Tipo de masa		Pura	
Área estudio	Galicia	Galicia y zona occidental de Asturias y León	
Datos de campo	Parcelas del IFN4	Red de parcelas de ensayo de claras	
Georreferenciación	Garmin	Trimble-Geo-7X	
Sensor remoto	RIEGL LMS-Q680	MSI (Multi Espectral Instrument)	--
Métodos estadísticos	Ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones FIML (Pp y Pr) y SUR (Ps)	Regresión no paramétrica RF y MARS	Regresión no lineal y modelo mixto lineal generalizado (GLMM)
Modelos existentes aplicados en pasos intermedios	1) Perfiles de copa (Crecente-Campo <i>et al.</i> , 2009; 2013) 2) Biomasa de copa del árbol (Diéguez-Aranda <i>et al.</i> , 2009)		
		3) Carga de combustible de superficie (Arellano-Pérez, 2011; Brown, 1974)	
		4) Variables de comportamiento del fuego (Van Wagner, 1977; Cruz <i>et al.</i> , 2004; 2005)	4) Variables de comportamiento del fuego (Byram, 1959; Van Wagner, 1977; Cruz <i>et al.</i> , 2005; Fernandes <i>et al.</i> , 2009; 2014) 5) Severidad del fuego (Van Wagner, 1973; Vega <i>et al.</i> , 2011; Hevia <i>et al.</i> , 2017)
Escenarios meteorológicos		Tres condiciones de quema (Mitsopoulos y Dimitrakopoulos, 2007)	Percentiles extremos de M_s y U_{10}
Software estadístico		R y SAS	

CFL = carga de combustible disponible del dosel, *SFL* = carga total del combustible de superficie, *FSG* = distancia vertical entre los estratos del combustible de superficie y del dosel, *CBH* = altura de la base del dosel, *CBD* = densidad aparente del dosel, Pp = *P. pinaster*, Pr = *P. radiata*, Ps = *P. sylvestris*, FIML = Full Information Maximum Likelihood, SUR = Seemingly Unrelated Regression, RF = Random Forest, MARS = Multivariate Adaptive Regression Splines, M_s = humedad estimada del combustible fino muerto de la superficie, U_{10} = velocidad del viento exterior a 10 m

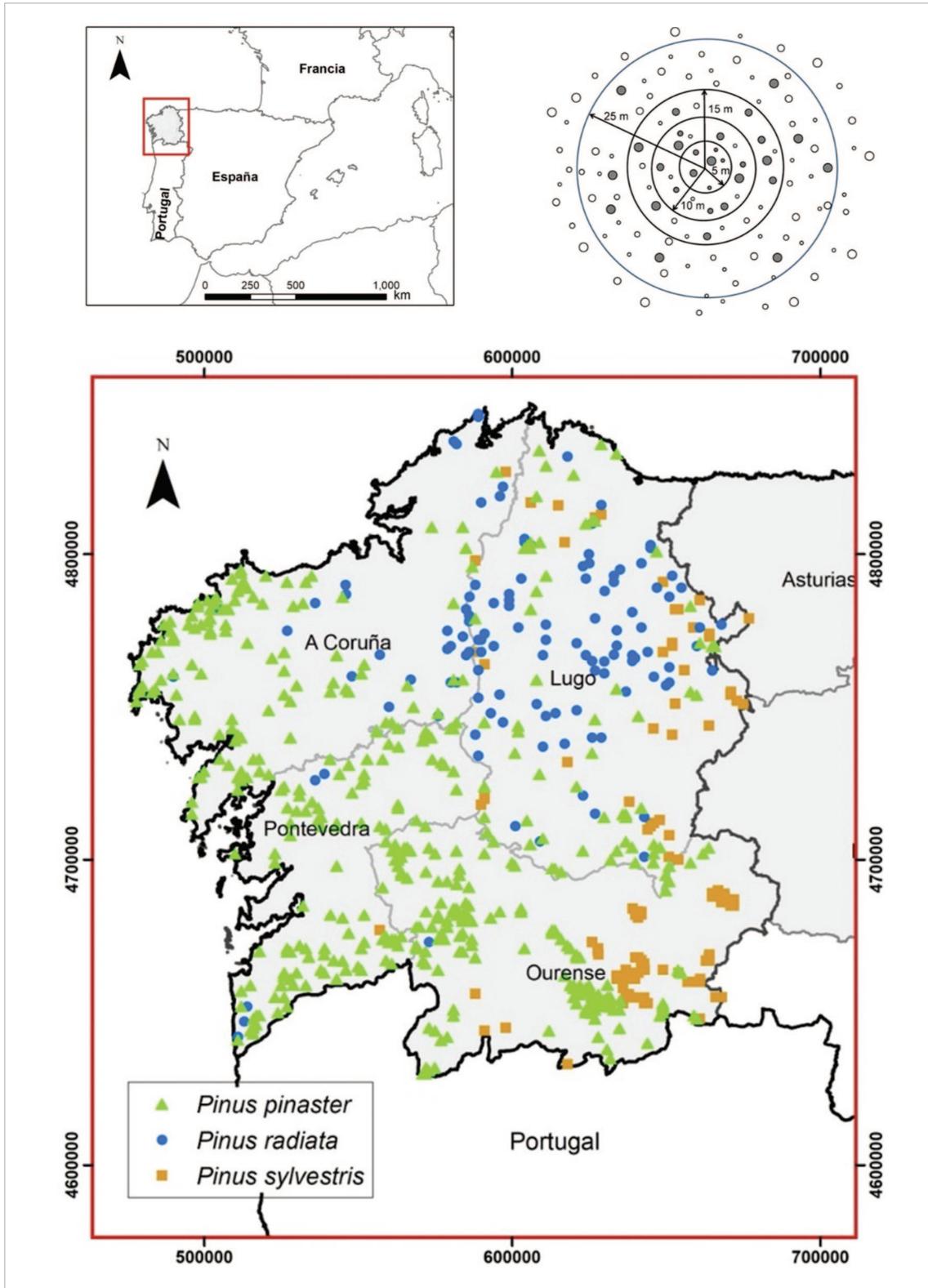


Figura 1. Localización de las parcelas de *P. pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris* del IFN4 seleccionadas en este estudio (izquierda) y esquema de la parcela de muestreo utilizada en el IFN (derecha inferior).

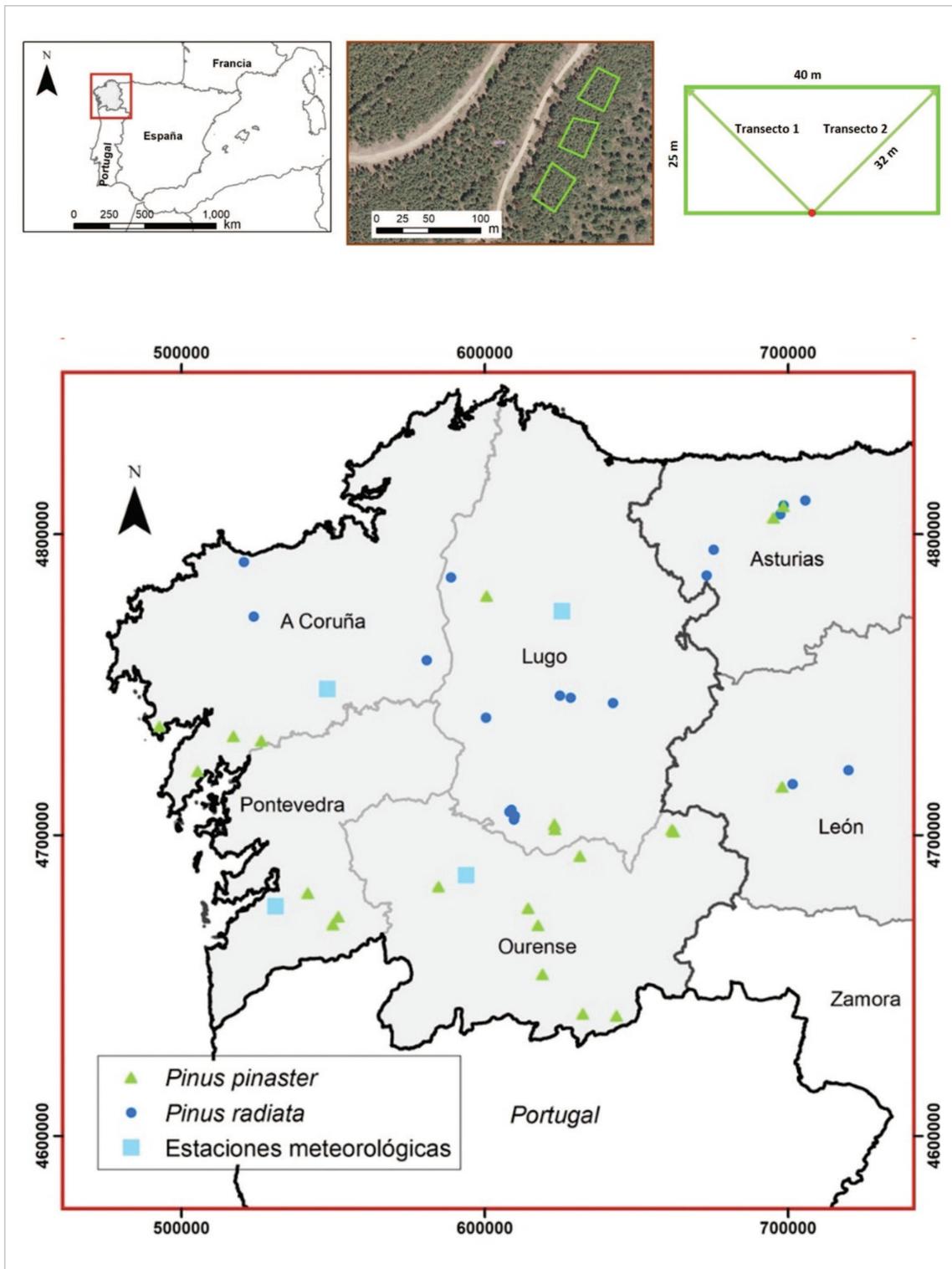


Figura 2. Localización geográfica de la red de parcelas de ensayos de clara en *P. pinaster* y *P. radiata* (izquierda). Ejemplo de tres parcelas de muestreo (polígonos verdes) en una de las localizaciones de ensayo (medio derecha). Croquis de los transectos de inventario del combustible de superficie en cada parcela (inferior derecha)

3. Resultados

3.1 Artículos 1-2

Respecto al primer objetivo (Artículos 1-2), en un primer paso se determinó la distribución vertical de la biomasa fina de la copa (< 6 mm de diámetro), a nivel de árbol individual, para después obtener, por agregación, el perfil vertical de CFL en cada parcela (*Fig. 3*), caracterizado mediante la función de densidad de probabilidad

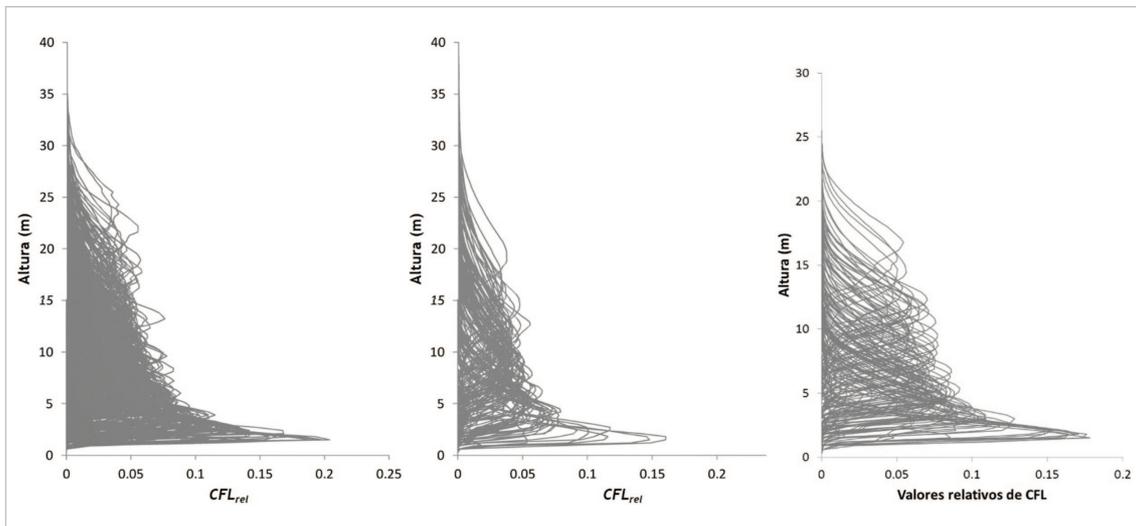


Figura 3. Perfiles verticales observados de la distribución de los valores relativos de la carga relativa de combustible disponible del dosel (CFLrel) en altura (m) para cada una de las parcelas. *P. pinaster* (izquierda), *P. radiata* (centro) y *P. sylvestris* (derecha).

de Weibull. En un segundo paso, se ajustaron simultáneamente dos sistemas diferentes de modelos para estimar las variables del dosel de copas que definen la distribución vertical de CFL, uno basado en métricas LiDAR (*Tab. 2*) y otro en variables de rodal (*Tab. 3*). Los perfiles estimados de CFL, a partir de las métricas LiDAR explicaron el 52%, el 49% y el 41% de la variabilidad observada para *P. pinaster* (*Fig. 4. Izquierda*), *P. radiata* y *P. sylvestris*, respectivamente; mientras que los perfiles basados en variables de rodal explicaron el 84% (*Fig. 4. Derecha*), 86% y 89% para estas mismas tres especies, en el mismo orden. Las variables del combustible del sistema de ecuaciones propuesto pueden ser usadas, entre otras utilidades, como inputs de modelos físicos de comportamiento del fuego que demandan información detallada del combustible y también para evaluar la efectividad de diferentes alternativas de gestión del combustible para reducir el riesgo de fuego de copa en pinares.

Tabla 2. Modelos distribución vertical de la carga de combustible disponible del dosel (CFL), parámetros y estadísticos de bondad del ajuste de los sistemas ajustados simultáneamente a partir de métricas LiDAR para *P. pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris* incluyendo ecuaciones para estimar la altura de la base del dosel (CBH) y la altura media del rodal (\bar{h}) ME = Eficiencia del modelo y RMSE = Raíz del error medio cuadrático. Todos los parámetros estimados fueron significativos ($p < 0.05$).

Especie	Variable dependiente	Modelo	ME	RMSE
<i>P. pinaster</i>	CFL (kg m ⁻²)	$\hat{CFL} = 0.0257 \cdot h_{99}^{1.1019} \cdot PFR_{Ahmean}^{0.0488}$	0.4031	0.3172
	mCBH (m)	$\hat{CBH} = 0.1858 \cdot h_{99}^{1.0722}$	0.4756	2.1247
	m ₁	$\hat{m}_1 = 0.4955 \cdot h_{99}^{1.0980}$	0.7295	2.3022
	m ₂	$\hat{m}_2 = 0.0869 \cdot h_{99}^{1.5784}$	0.4724	4.0912
	CBH (m)	$\hat{CBH} = -1.1754 + 0.4611 \cdot h_{99}$	0.4630	2.6164
	(m)	$\bar{h} = 1.8104 + 0.7868 \cdot h_{99}$	0.7175	2.6108
<i>P. radiata</i>	CFL (kg m ⁻²)	$\hat{CFL} = 0.0387 \cdot h_{99} + 0.0038 \cdot PFR_{Ahmean}$	0.4524	0.2926
	mCBH (m)	$m\hat{CBH} = 0.2214 \cdot h_{99}$	0.5204	1.6370
	m ₁	$\hat{m}_1 = 0.6165 \cdot h_{99}^{0.9823}$	0.7398	1.9923
	m ₂	$\hat{m}_2 = 0.0411 \cdot h_{99}^{1.8416}$	0.4323	3.5782
	CBH (m)	$\hat{CBH} = -1.3627 + 0.4088 \cdot h_{99}$	0.6657	1.8312
	\bar{h} (m)	$\bar{h} = 2.5159 + 0.7965 \cdot h_{99}$	0.7173	2.7718
<i>P. sylvestris</i>	CFL (kg m ⁻²)	$\hat{CFL} = 0.4657 + 0.0566 \cdot h_{70} + 0.0048 \cdot PAR_{A4}$	0.2698	0.5480
	mCBH (m)	$m\hat{CBH} = 0.7684 + 0.3863 \cdot h_{mean}$	0.3608	1.6108
	a ₁	$\hat{a}_1 = 1.5015 + 0.2500 \cdot h_{max}$	0.4614	1.5227
	a ₂	$\hat{a}_2 = 1.9709 + 0.0484 \cdot h_{max}$	0.2396	0.5025
	CBH (m)	$\hat{CBH} = 0.5630 \cdot h_{90}$	0.5911	2.1080
	\bar{h} (m)	$\bar{h} = 3.7780 + 0.6866 \cdot h_{90}$	0.6112	2.4196

mCBH y CBH = alturas mínima y media de la base del dosel, respectivamente, m₁ y m₂ = momentos de primer y segundo orden, a₁ y a₂ = parámetros de escala y de forma de la función Weibull, \bar{h} = altura media del rodal, h_i = percentil i-ésimo de altura de los retornos láser, PFR_{Ahmean} = porcentaje de primeros retornos láser por encima de la altura media de los retornos (hmean), h_{max} = altura máxima de los retornos láser, PARA4 = porcentaje del total de retornos laser por encima de 4 m

Tabla 3. Modelos de distribución vertical de la carga de combustible disponible del dosel (CFL), parámetros y estadísticos de bondad del ajuste de los sistemas ajustados simultáneamente a partir de variables de rodal para *P. pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris*. ME = Eficiencia del modelo y RMSE = Raíz del error medio cuadrático. Todos los parámetros estimados fueron significativos ($p < 0.05$)

Especie	Variable dependiente	Modelo	ME	RMSE
<i>P. pinaster</i>	CFL (kg m ⁻²)	$\hat{CFL} = 0.0265 \cdot G$	0.9668	0.0747
	$mCBH$ (m)	$m\hat{CBH} = 0.0107 \cdot H^{0.7615} \cdot dg^{1.2144}$	0.6444	1.4748
	m_1	$\hat{m}_1 = 0.3752 \cdot H^{1.0792} \cdot dg^{0.1153}$	0.9608	0.8775
	m_2	$\hat{m}_2 = 0.3946 \cdot H^{1.9370} \cdot dg^{-0.8420}$	0.6448	3.3604
<i>P. radiata</i>	CFL (kg m ⁻²)	$\hat{CFL} = 0.0299 \cdot G$	0.9847	0.0488
	$mCBH$ (m)	$m\hat{CBH} = 0.0306 \cdot H^{1.3747} \cdot G^{0.2493}$	0.7045	1.3003
	m_1	$\hat{m}_1 = 0.3092 \cdot H^{1.1326} \cdot G^{0.0649}$	0.9637	0.7477
	m_2	$\hat{m}_2 = 0.1055 \cdot H^{1.7609} \cdot G^{-0.2286}$	0.7418	2.4237
<i>P. sylvestris</i>	CFL (kg m ⁻²)	$\hat{CFL} = 0.4657 \cdot G^{0.9469}$	0.9579	0.1330
	$mCBH$ (m)	$m\hat{CBH} = 0.0564 \cdot H^{1.5901}$	0.7692	1.0262
	a_1	$a_1 = 0.3642 \cdot H^{0.9702} \cdot G^{0.0510}$	0.8046	0.9554
	a_2	$a_1 = 1.6912 + 0.0191 \cdot G + 0.0351 \cdot H$	0.5809	0.3904

$mCBH$ = altura mínima de la base del dosel, m_1 y m_2 = momentos de primer y segundo orden, a_1 y a_2 = parámetros de escala y de forma de la función Weibull, H = altura dominante (m), G = área basimétrica (m² ha⁻¹), dg = diámetro medio cuadrático (cm)

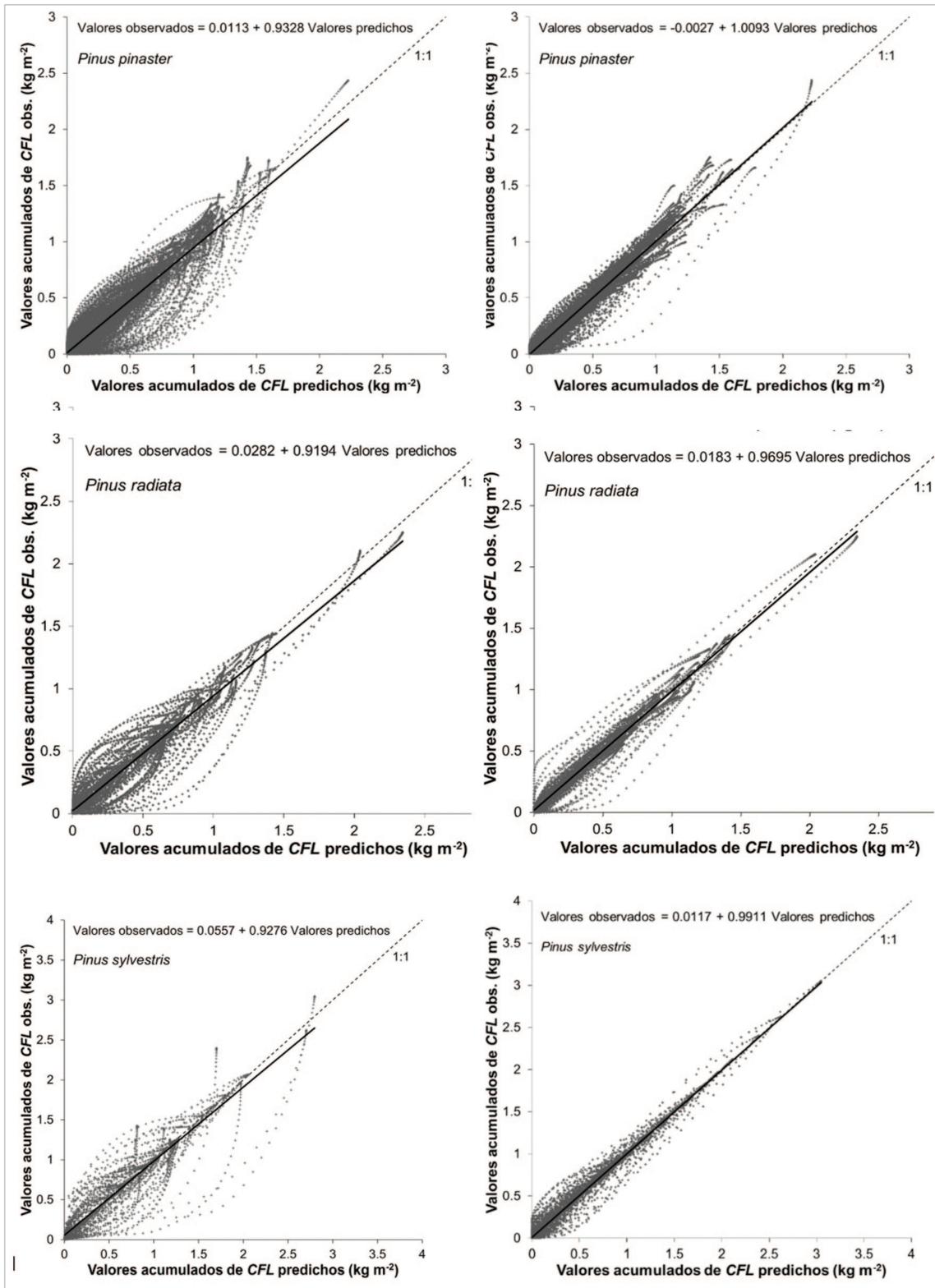


Figura 4. Valores observados frente a predichos de las distribuciones verticales acumuladas de la carga de combustible disponible del dosel (CFL) a partir de métricas LiDAR (izquierda) y a partir de variables de rodal (derecha) para las tres especies de pino.

3.2 Artículo 3

Relativo al segundo objetivo (Artículo 3), y de acuerdo con los estadísticos de bondad del ajuste (Tab. 4), el modelo no paramétrico RF (Random Forest), obtenido a partir de bandas espectrales e índices de vegetación procedentes del satélite Sentinel-2A (Fig. 5), proporcionó estimaciones más precisas que las suministradas por el método MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines), explicando más del 12%, 37%, 47% y 31% de la variabilidad observada en la carga total del combustible de superficie (SFL), FSG, CBH y CBD, respectivamente, a nivel rodal. Previamente fue necesario evaluar el comportamiento del modelo RF para diferenciar entre las dos especies de pino y los tres tratamientos de clara mediante la matriz de confusión y el valor del índice Kappa. La precisión global de este modelo fue del 83,74% con un valor Kappa de 0.8044 (Tab. 5). Para evaluar el funcionamiento de estos modelos, se utilizaron por separado los valores observados y estimados de las cuatro variables del combustible para predecir el tipo de fuego potencial (super-

Tabla 4. Estadísticos de bondad del ajuste obtenidos para cada variable del combustible del dosel y de superficie modelizada y método (RF = Random Forest y MARS = Multivariate Adaptive Regression Splines).

Variable de combustible	RF		MARS	
	rRMSE (%)	Pseudo R ²	rRMSE (%)	Pseudo R ²
SFL (Mg ha ⁻¹)	34.79	0.1233	43.21	0.0180
FSG (m)	24.05	0.3755	27.08	0.3285
CBH (m)	20.23	0.4771	26.69	0.3104
CBD (kg m ⁻³)	32.76	0.3125	33.97	0.2972

SFL = carga total de combustible de superficie, FSG = distancia vertical entre los estratos del combustible de superficie y del dosel, CBH = altura de la base del dosel, CBD = densidad aparente del dosel

Tabla 5. Matriz de confusión asociada al modelo RF (Random Forest) ajustado para las diferentes especies y tratamientos

			Observado						Precisión del usuario
			P. pinaster			P. radiata			
			C	LT	HT	LT	LT	HT	
Predicho	P. pinaster	C	19	4	3	0	1	0	70.30%
		LT	2	18	1	1	0	0	81.8%
		HT	1	0	18	0	2	0	85.7%
	P. radiata	C	0	0	0	16	0	0	100%
		LT	0	0	0	1	16	3	80.00%
		HT	0	0	0	1	0	16	94.12%
Precisión del productor			86.36%	81.82%	81.82%	84.21%	84.21%	84.21%	83.74%

C = control, LT = clara débil, HT = clara fuerte.

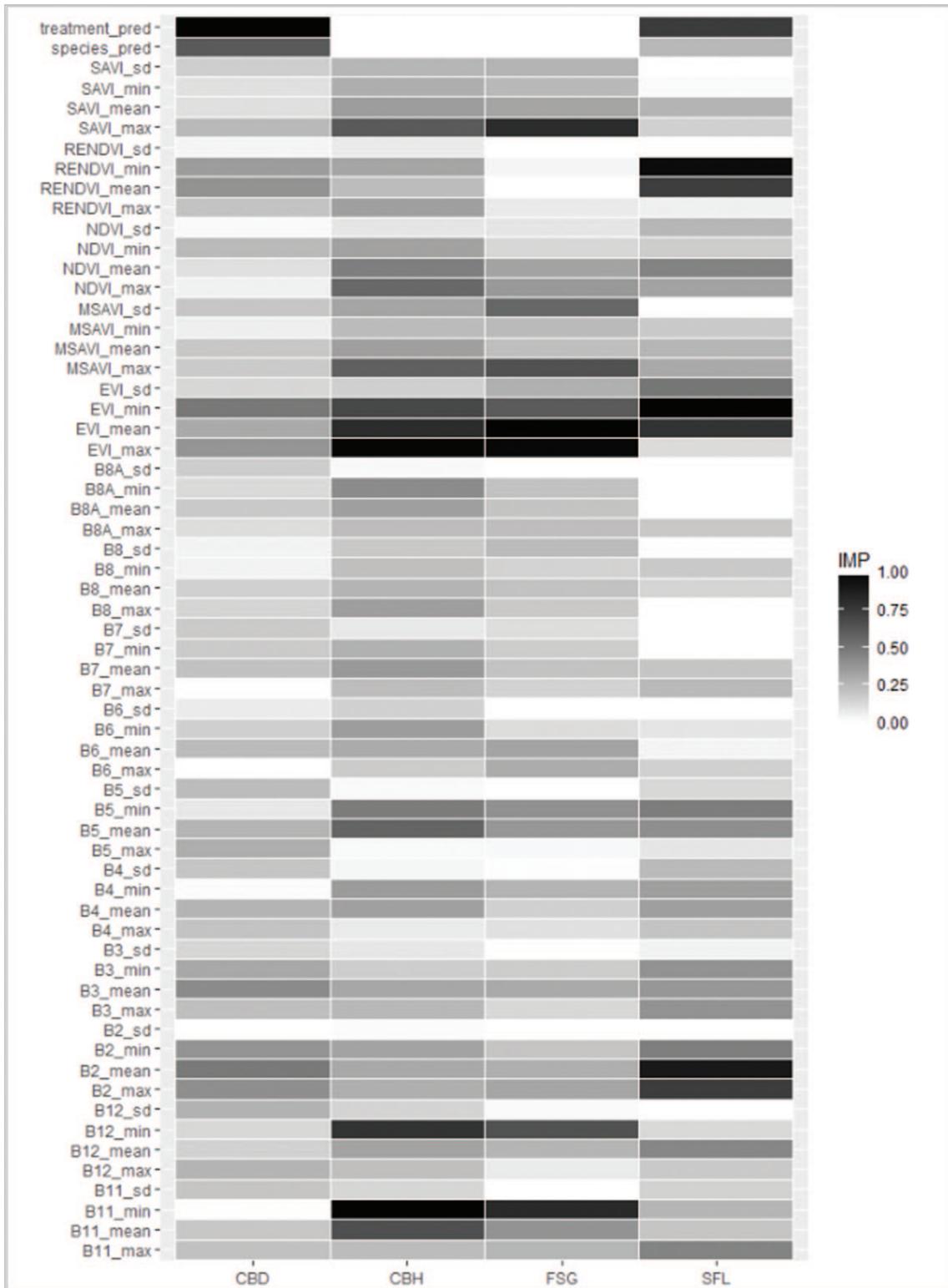


Figura 5. Importancia relativa de cada una de las variables y métricas S-2A utilizadas para modelizar CBD, CBH, FSG, SFL según la metodología RF (Random Forest). CBD = densidad aparente del dosel, CBH = altura de la base del dosel, FSG = distancia vertical entre los estratos del combustible de superficie y del dosel y SFL = carga total del combustible de superficie.

ficie, copas pasivo o copas activo) para cada parcela de estudio, considerando tres condiciones de quema diferentes (baja, moderada, y extrema). Los resultados de la matriz de confusión (*Tab. 6*) indicaron que el 79.8% de los fuegos de superficie y el 93.1% de los fuegos de copas activos fueron clasificados correctamente; mientras tanto, la tasa más alta de clasificación errónea se observó para los fuegos de copas pasivos, que, no obstante, mostraron el 75.6% de las muestras correctamente clasificadas.

Tabla 6. Matriz de confusión para la comparación entre las categorías de fuego (superficie, pasivo, activo) obtenidas con los valores observados de las variables del combustible y con los valores estimados con Random Forest de dichas variables del combustible.

		Observado			
		Activo	Pasivo	Superficie	Precisión del usuario
Predicciones RF	Activo	94	10	9	83.2%
	Pasivo	7	31	12	62.0%
	Superficie	0	0	83	100%
Precisión del productor		93.1%	75.6%	79.8%	84.6%

3.3 Artículo 4

En cuanto al tercer objetivo (Artículo 4), los resultados indicaron que las masas de *P. pinaster* fueron más propensas a sufrir potenciales fuegos de copas activos que las de *P. radiata*, independientemente del tratamiento selvícola. Por otra parte, las masas sin aclarar de ambas especies de pino mostraron más facilidad para generar fuegos de copas activos que las tratadas con clara fuerte. Además, la clara fuerte por sí sola tuvo consecuencias duraderas en la estructura del dosel arbóreo de *P. pinaster* y *P. radiata* porque seis años después de realizarla, CFL y CBD eran todavía significativamente menores en las masas tratadas (*Fig. 6*).

Por su parte, las cargas total y fina del combustible de superficie resultaron significativamente mayores en las parcelas de clara para ambas especies que en las no tratadas (*Fig. 7*). Ese aumento fue más evidente en los restos gruesos de 100h y 1000h, aunque las cantidades inventariadas no sugieren un incremento sustancial de la severidad potencial del fuego en el suelo.

En el proceso de simulación llevado a cabo se consideraron diferentes escenarios de peligro de incendio, mediante combinaciones de la velocidad de viento exterior a 10 m y de humedad del combustible fino muerto de superficie hasta alcanzar sus percentiles extremos del área de estudio. Los resultados mostraron que la clara por sí sola podría reducir significativamente el riesgo de fuego de copas activo y su velocidad de propagación para ambas especies (*Fig. 8*), a medio plazo, mientras que la probabilidad de producirse un fuego de copas pasivo aumentaba, debido principalmente al incremento de los combustibles de superficie.

La severidad potencial de un incendio afectando a las masas tratadas, en términos de altura de copa soflamada (*Fig. 9*), volumen de copa soflamada (*Fig. 10*) y probabilidad de mortalidad del arbolado (*Fig. 11*), apenas empeoró con la clara.

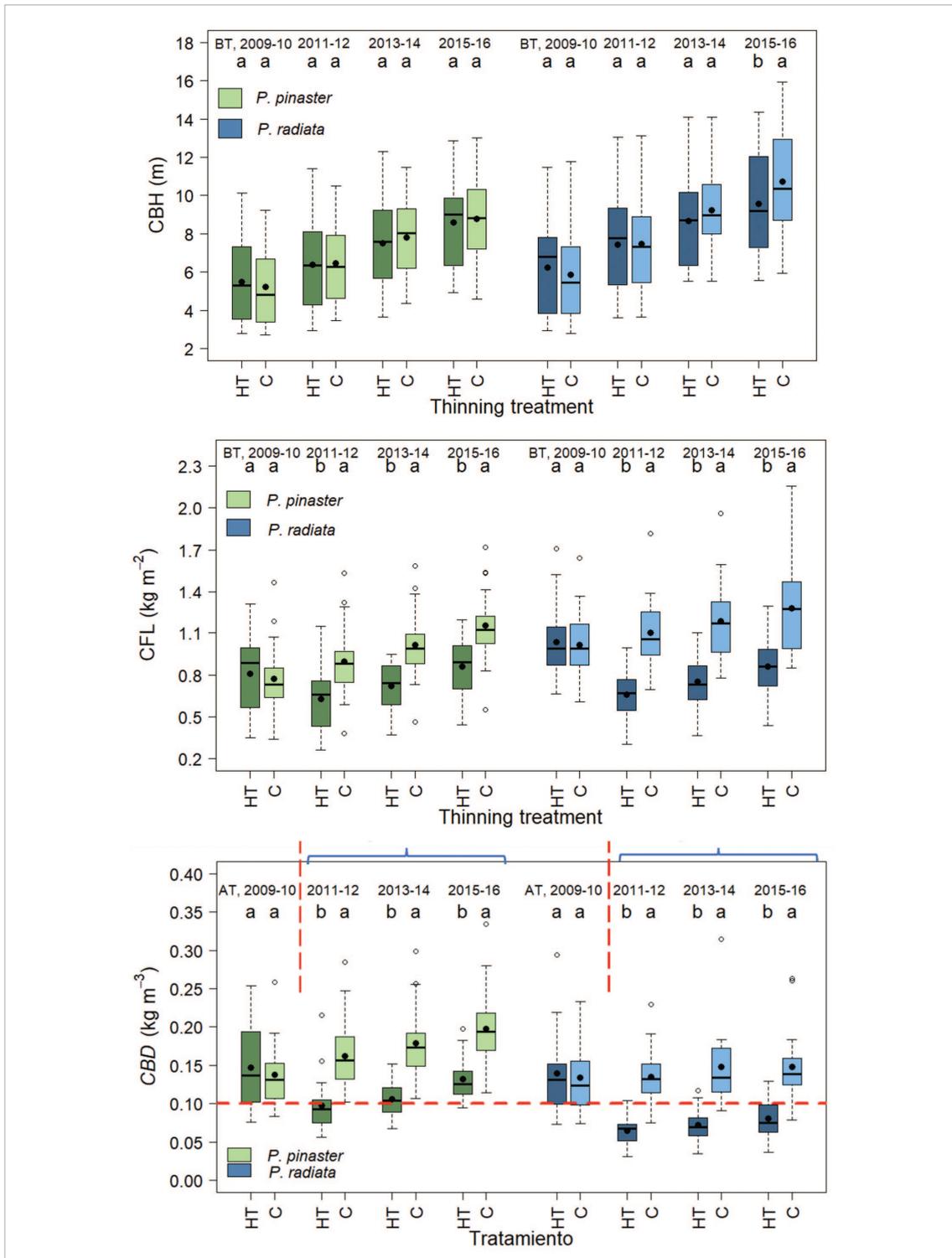


Figura 6. Diagrama de cajas de CBH (superior), CFL (medio), CBD (inferior) para cada especie (*P. pinaster* y *P. radiata*), inventario y tratamiento de clara. CBH = altura de la base del dosel, CFL = carga del combustible disponible del dosel, CBD = densidad aparente del dosel, C = control, HT = clara fuerte. AT = Antes del tratamiento. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los valores medios ($\alpha = 5\%$). Puntos negros representan los valores medios

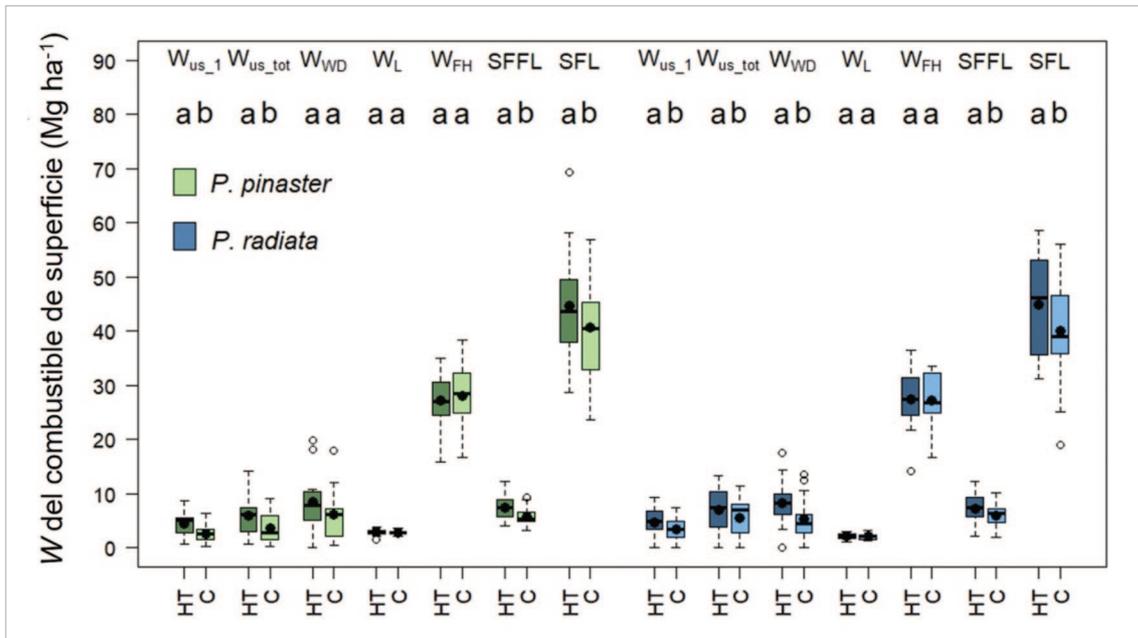


Figura 7. Diagrama de cajas de CBH (superior), CFL (medio), CBD (inferior) para cada especie (*P. pinaster* y *P. radiata*), inventario y tratamiento de clara. CBH = altura de la base del dosel, CFL = carga del combustible disponible del dosel, CBD = densidad aparente del dosel, C = control, HT = clara fuerte. AT = Antes del tratamiento. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los valores medios ($\alpha = 5\%$). Puntos negros representan los valores medios.

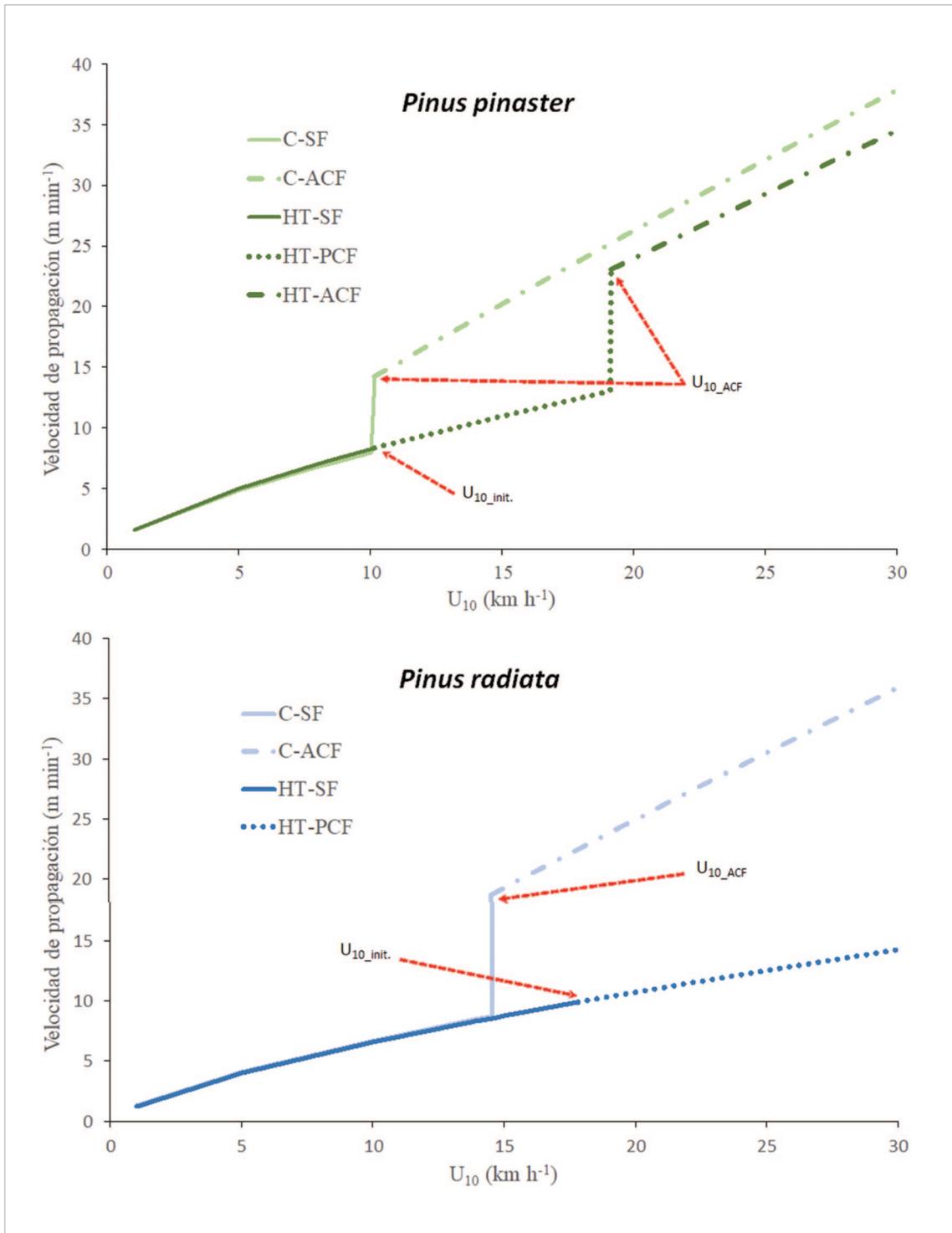


Figura 8. Velocidad de propagación del fuego estimada en función de la velocidad del viento exterior a 10 m (U₁₀, km h⁻¹) en las parcelas representativas de cada tratamiento para *P. pinaster* (superior) y *P. radiata* (inferior) seis años después de clara. Se usó un valor fijo de humedad del combustible fino seco de la superficie (M_s) del 9%. U_{10_init} = U₁₀ umbral para iniciar un fuego de copas, U_{10_ACF} = U₁₀ umbral para iniciar un fuego de copas activo. C = control, HT = clara fuerte, SF = fuego de superficie, PCF y ACF = fuego de copas pasivo y activo, respectivamente.

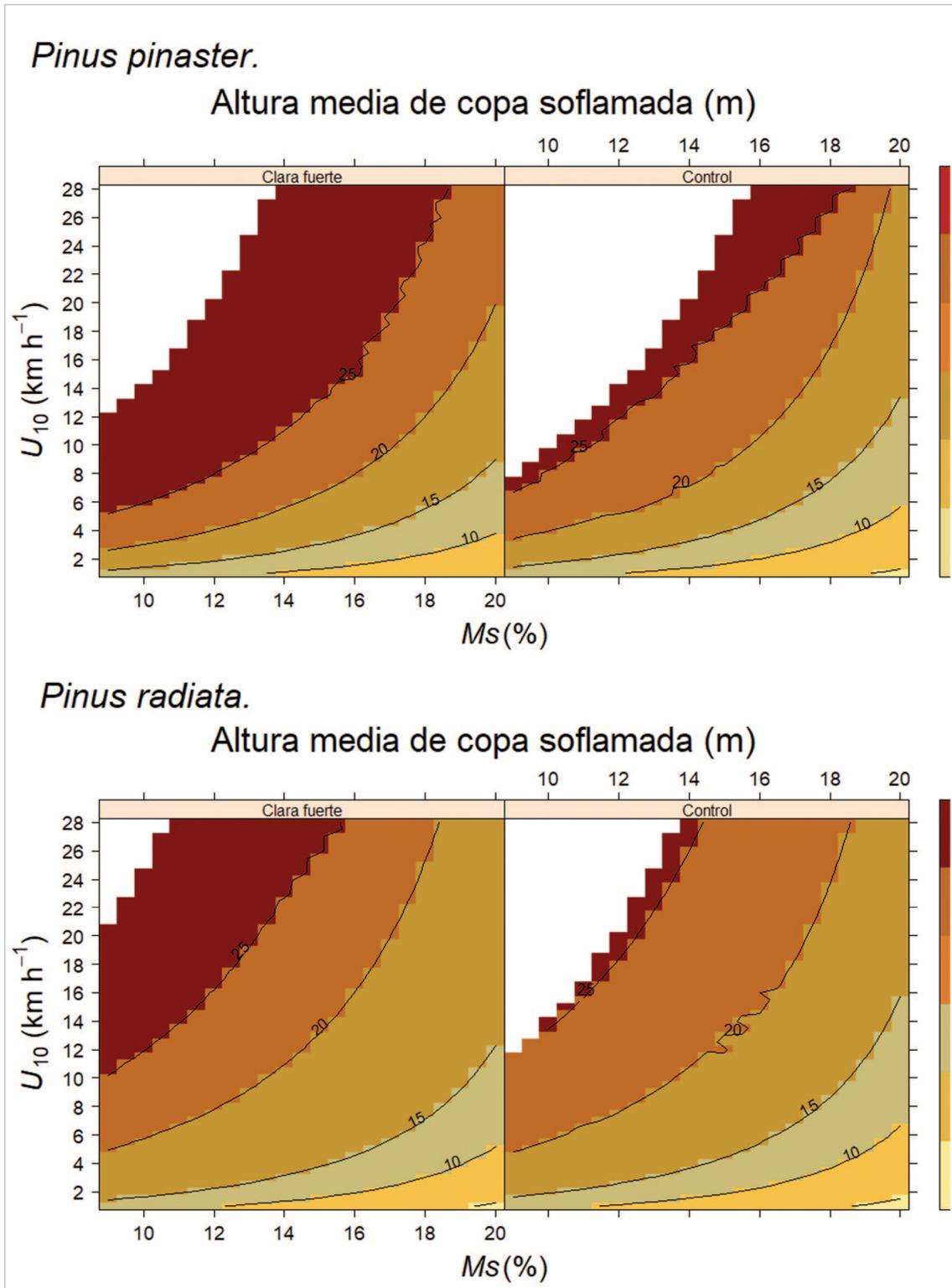


Figura 9. Gráficos de contorno de las estimaciones medias de la altura media de copa soflamada (m) para diferentes combinaciones de Ms y U₁₀ seis años después del tratamiento. Clara fuerte (izquierda), control (derecha), *P. pinaster* (superior) y *P. radiata* (inferior). La zona blanca se corresponde con intensidades lineales del fuego > 4000 kW m⁻¹ y/o al menos una parcela con fuego de copas activo.

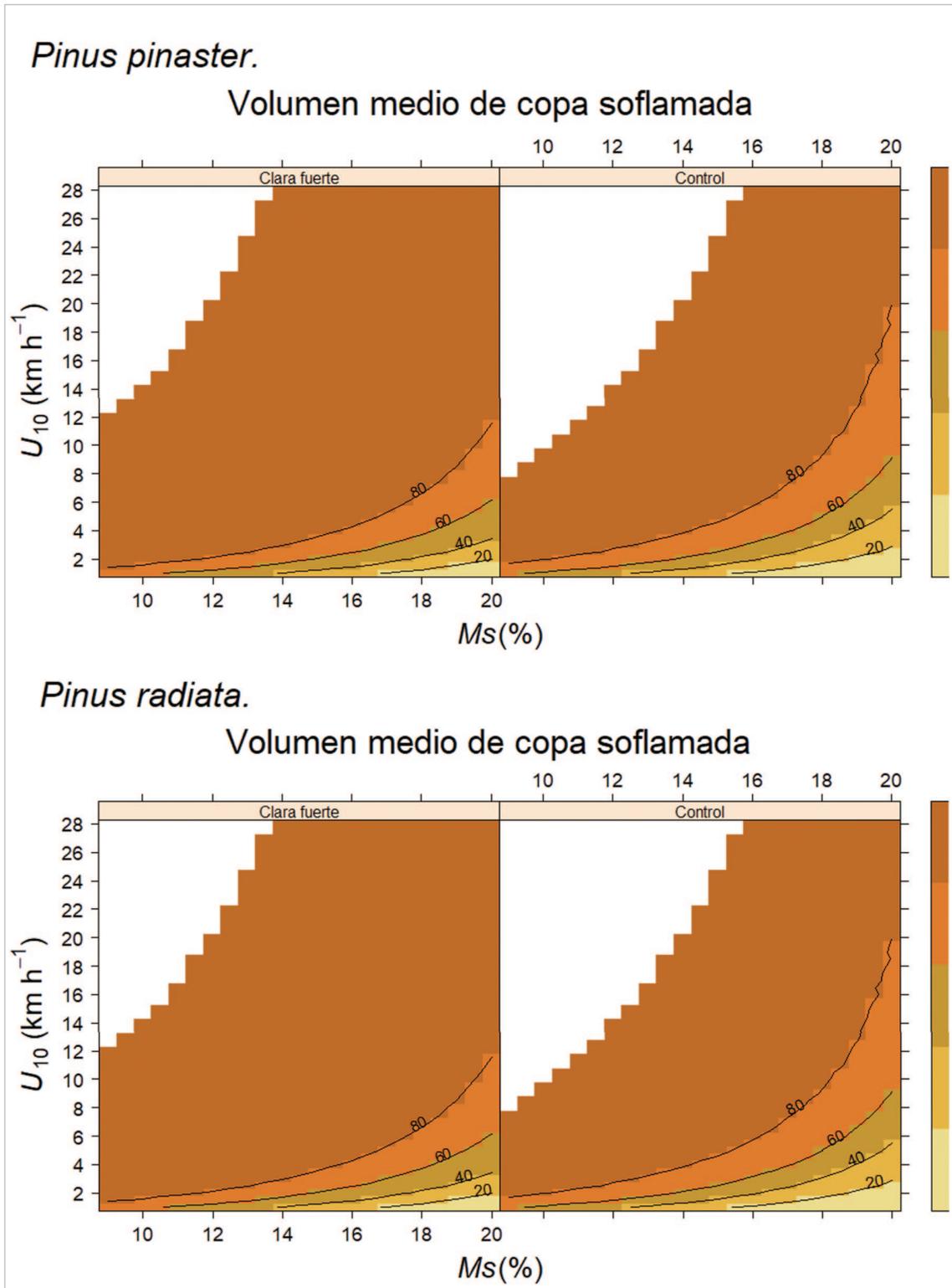


Figura 10. Gráficos de contorno de las estimaciones medias del volumen medio de copa soflamada (%) para diferentes combinaciones de Ms y U10 seis años después del tratamiento. Clara fuerte (izquierda), control (derecha), *P. pinaster* (superior) y *P. radiata* (inferior). La zona blanca se corresponde con intensidades lineales del fuego > 4000 kW m⁻¹ y/o al menos una parcela con fuego de copas activo

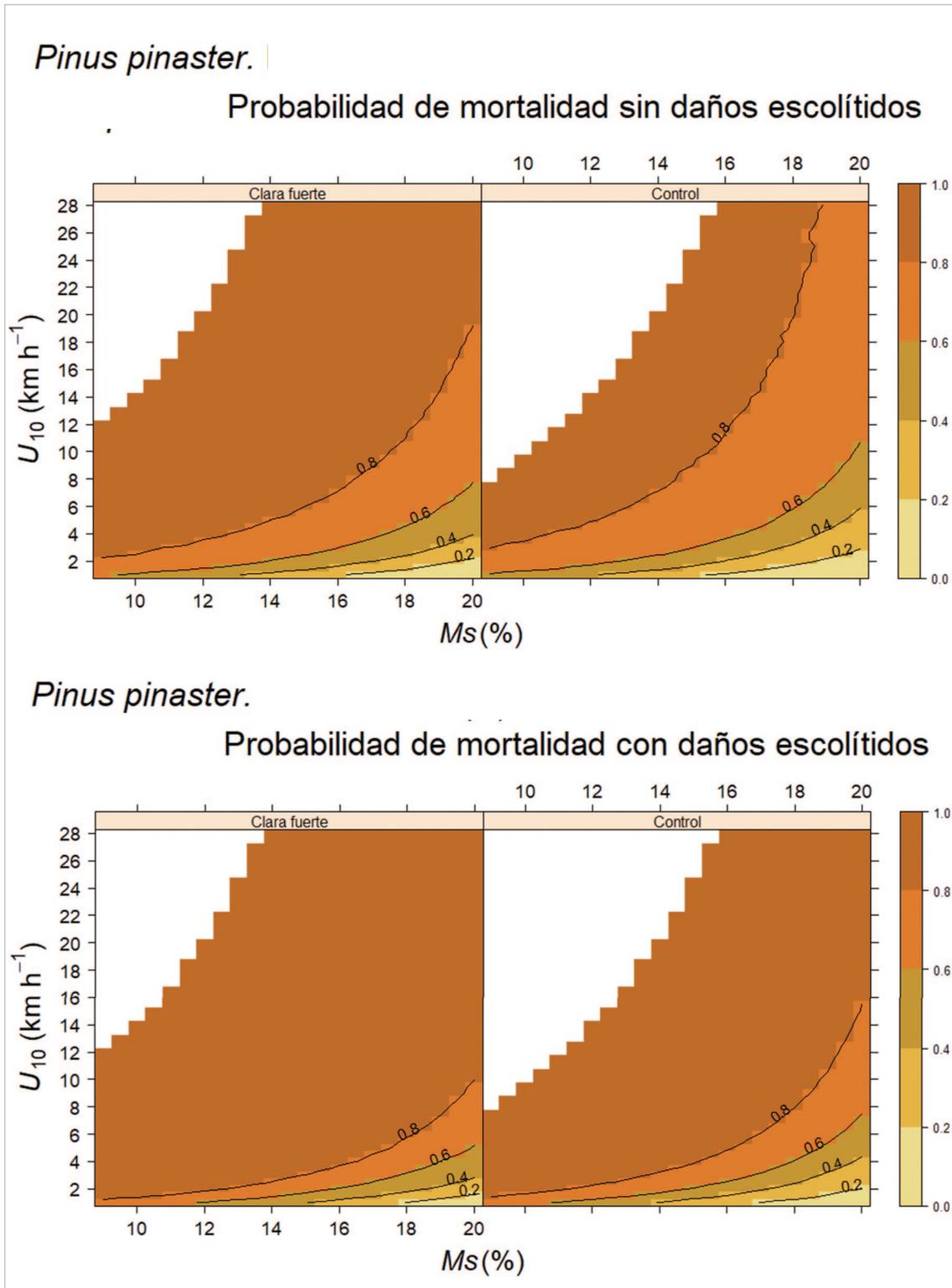


Figura 11. Gráficos de contorno de las estimaciones medias de la probabilidad de mortalidad de arbolado post-fuego (0-1) para diferentes combinaciones de Ms y U10 seis años después del tratamiento. Clara fuerte (izquierda), control (derecha), *P. pinaster* sin ataque de escolítidos (superior) y *P. pinaster* con ataque de escolítidos (inferior). La zona blanca se corresponde con intensidades lineales del fuego > 4000 kW m⁻¹ y/o al menos una parcela con fuego de copas activo.

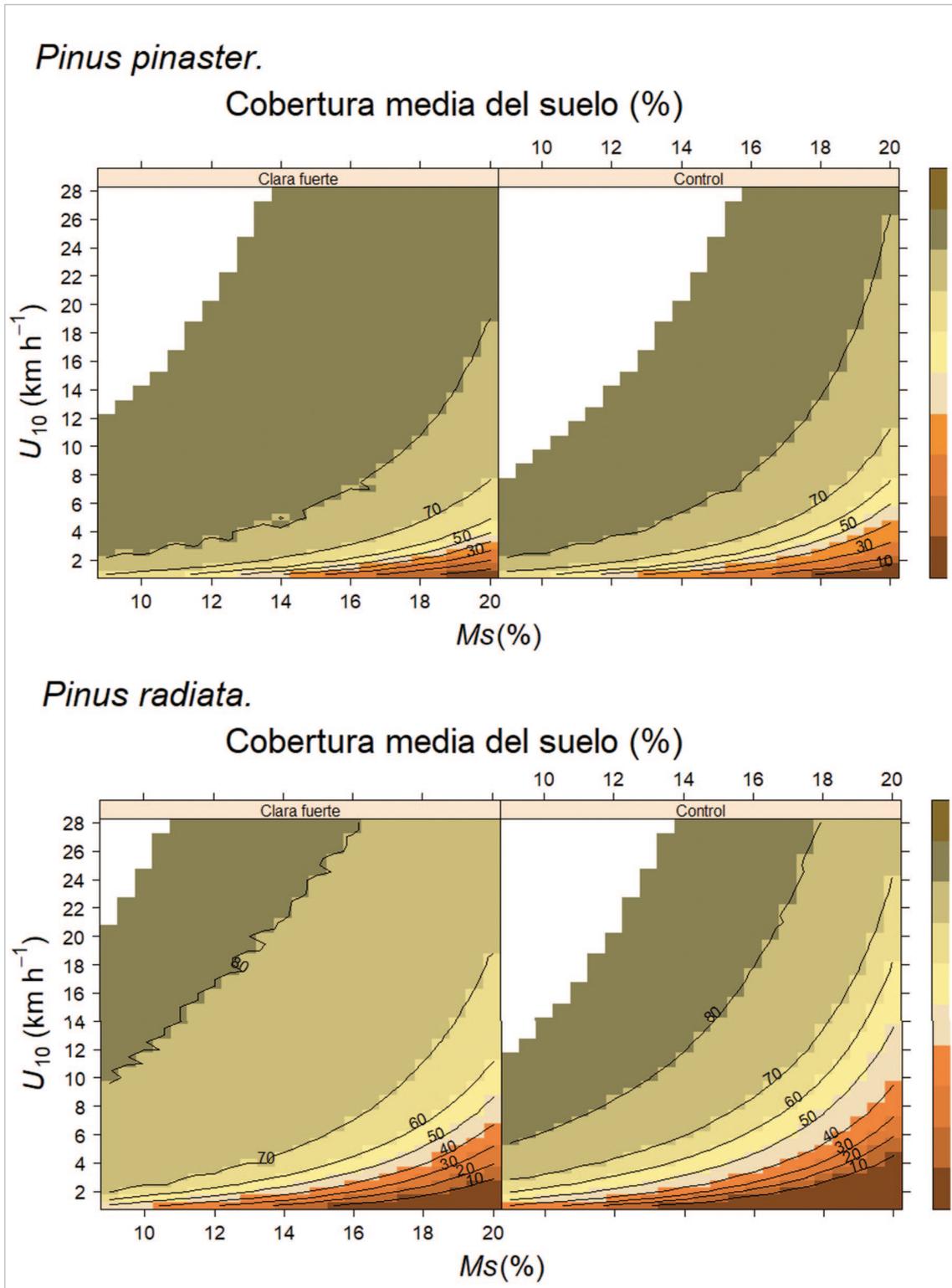


Figura 12. Gráficos de contorno de las estimaciones medias de la de la cobertura del suelo por acículas soflamadas caídas post-fuego (%) para diferentes combinaciones de Ms y U₁₀ seis años después del tratamiento. Clara fuerte (izquierda), control (derecha), *P. pinaster* (superior) y *P. radiata* (inferior). La zona blanca se corresponde con intensidades lineales del fuego > 4000 kW m⁻¹ y/o al menos una parcela con fuego de copas activo.

Además, la protección del suelo contra la erosión post-incendio, expresada por la cobertura de suelo debida a la acícula soflamada caída, mejoró muy ligeramente cuando se realizó una clara previa (*Fig. 12*). Para ello fue necesario previamente desarrollar modelos de estimación (*Tab. 7*) del porcentaje de cobertura de acícula caída (SC_{sn}) para *P. pinaster* y *P. radiata* ajustados a partir de la carga de dichas acículas (W_{sn}).

Tabla 7. Modelos de estimación del porcentaje de cobertura de suelo (SC_{sn}) a partir de la carga de acícula soflamada caída (W_{sn}) para *P. pinaster* y *P. radiata*, junto con sus parámetros y estadísticos de bondad del ajuste

Especie	Variable dependiente	Modelo	ME	rRMSE (%)
<i>P. pinaster</i>	SC_{sn} (%)	$SC_{sn} = 100 \cdot (1 - \exp(-3.6818 \cdot W_{sn}))$	0.9920	2.3252
<i>P. radiata</i>	SC_{sn} (%)	$SC_{sn} = 100 \cdot (1 - \exp(-4.7395 \cdot W_{sn}))$	0.9867	2.9117

4. Conclusiones

4.1 Artículos 1 y 2

- Los modelos basados en métricas LiDAR pueden utilizarse para estimar las principales variables estructurales del combustible del dosel arbóreo y su distribución vertical para generar cartografía a escala del paisaje de estas variables.
- Es necesario seguir avanzando en la mejora de los modelos basados en métricas LiDAR, ya que son menos precisos que los modelos construidos a partir de las variables del rodal.
- Los dos enfoques utilizados para modelizar la distribución vertical del CFL, a partir de métricas LiDAR o de variables de rodal, son compatibles con los dos principales métodos existentes para estimar las variables CFL y el CBD: el método de distribución homogénea, conocido como “load over depth” y el de distribución heterogénea de perfiles verticales.
- Los modelos desarrollados tienen aplicaciones en varios campos de la investigación forestal: por ejemplo, la modelización física del comportamiento del fuego de copa, la contabilidad del carbono, la modelización del régimen de luz del dosel y la fotosíntesis del dosel y la estimación de la biomasa utilizable con fines energéticos

4.2 Artículo 3

- Las imágenes de satélite Sentinel-2A permiten clasificar el territorio por especies de pino y tratamientos selvícolas.

- Los modelos obtenidos a partir de Sentinel-2A para estimar las variables del combustible de superficie y del dosel, mediante técnicas estadísticas de RF y MARS, fueron modestos. Sin embargo, esto no parece limitar su uso para generar mapas del riesgo potencial de fuego de copas.

4.3 Artículo 4

- El tratamiento de clara sola “thin-only” produjo una reducción significativa de CBD. Sin embargo, dicho tratamiento aumentó la carga de los combustibles de superficie.
- Estos efectos resultaron en un aumento de la capacidad de iniciación del fuego de copa, aunque un menor riesgo de fuego activo de copa y una menor velocidad de propagación una vez iniciado.
- También la clara sola produjo un aumento significativo de las cargas de restos leñosos de 100h y 1000h. Sin embargo, estas cantidades no parecían implicar un incremento elevado del riesgo de la severidad del fuego en el suelo.
- Las masas de *P. pinaster* fueron más propensas a sufrir fuegos de copas activos que las de *P. radiata*, independientemente del tratamiento selvícola aplicado (control o clareo fuerte).
- Las masas sin aclarar de ambas especies de pino mostraron más facilidad para generar fuegos de copa activos que las tratadas con clara fuerte. En cambio, en la clara fuerte podrían darse con mayor frecuencia fuegos de copa pasivos.
- La severidad potencial causada a medio plazo por un incendio que afectara a los pinares estudiados, apenas se vio alterada por el tratamiento de clara. Además, la protección del suelo contra la erosión solo mejoró ligeramente con dicho tratamiento.
- Es necesario reducir el combustible de superficie (e.g. quema prescrita, trituración, desbroce...) para aumentar la eficacia de la clara como tratamiento de prevención de incendios y se recomiendan encarecidamente.

Agradecimientos y financiación

Deseo agradecer de manera especial a mis directores de tesis que van de coautores en el presente trabajo. Deseo dar las gracias también a todos los investigadores con los que comparto autoría en los artículos de tesis y a mis compañeros de la Unidad de Gestión Ambiental y Forestal Sostenible, del Centro de Investigación Forestal de Lourizán, del Instituto Superior de Agronomía de Lisboa, del proyecto GEPRIF y VIS4FIRE, de la Agrupación Estratégica de Investigación BioReDes y de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

Además, agradezco al Centro Nacional de Información Geográfica por los datos LiDAR del Plan Nacional Ortofotografía Aérea (PNOA), al Servicio Geológico de Estados Unidos por las imágenes de satélite Sentinel-2A y al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente por el suministro de los datos de campo del cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4).

Este trabajo ha sido financiado por los siguientes proyectos de investigación: i) GEPRIF (RTA 2014-00011-C04) del Ministerio de Economía y Competitividad; ii) VIS4FIRE (RTA 2017-0042-C05-05) del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad; iii) DIABOLO (H2020 GA 633464) de la Comisión Europea y iv) Ayudas del Programa de Consolidación y Estructuración de Unidades de Investigación Competitivas del Sistema Universitario Gallego, en la modalidad de Grupos de Referencia Competitiva (GRC2014/2015) de la Consellería de Educación e Ordenación Universitaria, Xunta de Galicia.

6. Bibliografía

- Alexander, M.E.; Cruz, M.G.; (2011). Crown fire dynamics in conifer forests. In P. A. Werth, B. E. Potter, C. B. Clements, M. A. Finney, S. L. Goodrick, M. E. Alexander, M. G. Cruz, J. M. Forthofer, y S. S. Mcallister (Eds.), *Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: Volume I for Fire Managers*. General Technical Report PNW-GTR-854, 107-143.
- Arellano-Pérez, S. (2011). *Modelos de combustibles forestales de Galicia*. MSc Thesis. Universidad de Santiago de Compostela, Lugo, España.
- Arellano, S.; Vega, J.A.; Ruíz, A.D.; Arellano, A.; Álvarez, J.G.; Vega, D.; Pérez, E.; (2017). *Fotografía de combustibles forestales de Galicia y comportamiento del fuego asociado*. Andavira Editora S. L.
- Arellano-Pérez, S.; Castedo-Dorado, F.; López-Sánchez, C.A.; González-Ferreiro, E.; Yang, Z.; Díaz-Varela, R.A.; Álvarez-González, J.G.; Vega, J.A.; Ruiz-González, A.D.; (2018). Potential of Sentinel-2A data to model surface and canopy fuel characteristics in relation to crown fire hazard. *Remote Sensing*, 10 (1645), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs10101645>
- Arellano-Pérez, S.; Castedo-Dorado, F.; Álvarez-González, J.G.; Alonso-Rego, C.; Vega, J.A.; Ruiz-González, A.D.; (2020). Mid-term effects of a thin-only treatment on fuel complex, potential fire behaviour and severity and post-fire soil erosion protection in fast-growing pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 460(117895), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117895>
- Brown, J.K.; (1974). *Handbook for inventorying downed woody material*. Gen. Tech. Rep. INT-16. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 24 p.
- Byram, G.M. (1959). Combustion of Forest Fuels. In K.P.Davis (Ed.), *Forest fire: control and use* (Vol. 42, Issue 3, pp. 61–89). New York, NY: McGraw-Hill. <https://doi.org/10.2307/1932261>
- Crecente-Campo, F.; Marshall, P.; LeMay, V.; Diéguez-Aranda, U.; (2009). A crown profile model for *Pinus radiata* D. Don in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 257(12), 2370–2379. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.038>
- Crecente-Campo, F.; Álvarez-González, J.G.; Castedo-Dorado, F.; Gómez-García, E.; Diéguez-Aranda, U.; (2013). Development of crown profile models for *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus*

- sylvestris* L. in northwestern Spain. *Forestry*, 86(4), 481–491. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt019>
- Cruz, M.G.; Alexander, M.E.; Wakimoto, R.H.; (2004). Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science*, 50(5), 640–658. <https://doi.org/10.1093/forestsience/50.5.640>
- Cruz, M.G.; Alexander, M.E.; Wakimoto, R.H.; (2005). Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(7), 1626–1639. <https://doi.org/10.1139/x05-085>
- Diéguez-Aranda, U.; Rojo Alboreca, A.; Castedo-Dorado, F.; Álvarez González, J.G.; Barrio-Anta, M.; Crecente-Campo, F.; González González, J.M.; Pérez-Cruzado, C.; Roque Rodríguez, S.; López-Sánchez, C.A.; Balboa-Murias, M.Á.; Gorgoso Varela, J.J.; Sánchez Rodríguez, F.; (2009). *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. Dirección Xeral de Montes, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia.
- Fernandes, P.M.; (2014). Upscaling the estimation of surface-fire rate of spread in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) forest. *IForest*, 7(2), 123–125. <https://doi.org/10.3832/ifor0992-007>
- Fernandes, P.M.; Rigolot, E.; (2007). The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 241(1–3), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.010>
- Fernandes, P.M.; Botelho, H.S.; Rego, F.C.; Loureiro, C.; (2009). Empirical modelling of surface fire behaviour in maritime pine stands. *International Journal of Wildland Fire*, 18(6), 698–710. <https://doi.org/10.1071/WF08023>
- Fernández-Alonso, J.M.; Alberdi, I.; Álvarez-González, J.G.; Vega, J.A.; Cañellas, I.; Ruiz-González, A.D.; (2013). Canopy fuel characteristics in relation to crown fire potential in pine stands: Analysis, modelling and classification. *European Journal of Forest Research*, 132(2), 363–377. <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0680-z>
- Fidalgo-González, L.A.; Arellano-Pérez, S.; Álvarez-González, J.G.; Castedo-Dorado, F.; Ruiz-González, A.D.; González-Ferreiro, E.; (2019). Estimación de la distribución vertical de combustibles finos del dosel de copas en masas de *Pinus sylvestris* empleando datos LiDAR de baja densidad. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 53, 1–16. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.11241>
- Fulé, P.Z.; Crouse, J.E.; Roccaforte, J.P.; Kalies, E.L.; (2012). Do thinning and/or burning treatments in western USA ponderosa or Jeffrey pine-dominated forests help restore natural fire behavior? *Forest Ecology and Management*, 269, 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.025>
- González-Ferreiro, E.; Diéguez-Aranda, U.; Crecente-Campo, F.; Barreiro-Fernández, L.; Miranda, D.; Castedo-Dorado, F.; (2014). Modelling canopy fuel variables for *Pinus radiata* D. Don in NW Spain with low-density LiDAR data. *International Journal of Wildland Fire*, 23(3), 350–362. <https://doi.org/10.1071/WF13054>
- González-Ferreiro, E.; Arellano-Pérez, S.; Castedo-Dorado, F.; Hevia, A.; Vega, J.A.; Vega-Nieva, D.; Álvarez-González, J.G.; Ruiz-González, A.D.; (2017). Modelling the vertical distribution of canopy fuel load using national forest inventory and low-density airborne laser scanning data. *PLoS ONE*, 12(4), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176114>
- Hevia, A.; Crabiffosse, A.; Álvarez-González, J.G.; Ruiz-González, A.D.; Majada, J.; (2017). Novel approach to assessing residual biomass from pruning: A case study in Atlantic *Pinus*

- pinaster Ait. timber forests. *Renewable Energy*, 107, 620–628. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.029>
- Hevia, A.; Crabiffosse, A.; Álvarez-González, J.G.; Ruiz-González, A.D.; Majada, J.; (2018). Assessing the effect of pruning and thinning on crown fire hazard in young Atlantic maritime pine forests. *Journal of Environmental Management*, 205, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.051>
- Jiménez, E.; Vega, J.A.; Fernández-Alonso, J.M.; Vega-Nieva, D.; Álvarez-González, J.G.; Ruiz-González, A.D.; (2013a). Allometric equations for estimating canopy fuel load and distribution of pole-size maritime pine trees in five Iberian provenances. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(2), 149–158. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0374>
- Keane, R.E.; Mincemoyer, S.A.; Schmidt, K.M.; Long, D.G.; Garner, J.L.; (2000). Mapping Vegetation and Fuels for Fire Management on the Gila National Forest Complex, New Mexico, [CD-ROM]. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-46-CD. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 126 p. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-46>
- Madrigal, J.; Fernández-Migueláñez, I.; Hernando, C.; Guijarro, M.; Vega-Nieva, D.J.; Tolosa, E.; (2017). Does forest biomass harvesting for energy reduce fire hazard in the Mediterranean basin? a case study in the Caroig Massif (Eastern Spain). *European Journal of Forest Research*, 136, 13–26. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-1004-5>
- Mitsopoulos, I.; Dimitrakopoulos, A.P.; (2007). Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. *Annals of Forest Science*, 64(3), 287–299. <https://doi.org/10.1051/forest:2007006>
- Omi, P.N.; Martinson, E.J.; Chong, G.W. (2006). Effectiveness of Pre-Fire Fuel Treatments. Final report: Joint Fire Science Program project 03-2. 29 p
- Ruiz-González, A.D.; Álvarez-González, J.G.; (2011). Canopy bulk density and canopy base height equations for assessing crown fire hazard in *Pinus radiata* plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(4), 839–850. <https://doi.org/10.1139/x10-237>
- Ruiz-González, A.D.; Castedo-Dorado, F.; Vega, J.A.; Jiménez, E.; Fernández-Alonso, J.M.; Álvarez-González, J.G.; (2015). Modelling canopy fuel dynamics of maritime pine stands in north-west Spain. *International Journal of Wildland Fire*, 24(1), 92–102. <https://doi.org/10.1071/WF14020>
- Van Wagner, C.E. (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(1), 23–34. <https://doi.org/10.1139/x77-004>
- Vega, J.A.; Fernández, C.; Pérez-Gorostiaga, P.; Fonturbel, T.; (2008). The influence of fire severity, serotiny, and post-fire management on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in three burnt areas in Galicia (NW Spain). *Forest Ecology and Management*, 256(9), 1596–1603. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.005>
- Vega, J.A.; Jimenez, E.; Vega, D.; Ortiz, L.; Pérez, J.R.; (2011). *Pinus pinaster* Ait. tree mortality following wildfire in Spain. *Forest Ecology and Management*, 261(12), 2232–2242. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.019>