

04-034

FOREST MANAGEMENT PROPOSAL BASED ON THE ASSESSMENT OF FOREST FIRE CONSEQUENCES.

Gómez-Elvira Corroto, María ⁽¹⁾; Martínez Falero, José Eugenio ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Politécnica de Madrid

Forest fires are random and present a probability of occurrence and consequences which are determined by a specific scenario (orography, vegetation, climatology...). The occurrence of a fire is hard to predict, but not their consequences. The consequences of a forest fire can be measured as burnt area, for instance, or as burnt area value. Nevertheless, in Spain, preventive management of forests against forest fires is usually implemented taking into consideration fire risk indexes instead of their potential consequences. The increasing tendency to confuse risk with consequences is the cause. Some kind of relationship between them seems logical, but this approach is not always accurate: an area with high risk index of fire does not imply, necessarily, the unleashing of important consequences if a fire occurs. And, in the same way, areas where a low measure of risk is calculated can presume huge consequences. The present work pretends (1) to analyze these consequences, by modelling the Potential Burnt Area, wich depends on statistical data of forest fires and characteristic variables of study area; and (2) to present forest management proposal which minimizes the consequences.

Keywords: Forest management; forest fires; risk of fire.

PROPUESTA DE ACTUACIONES DE GESTIÓN FORESTAL BASADA EN EL ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS LIGADAS A INCENDIOS FORESTALES.

Los incendios forestales son aleatorios, con una probabilidad de ocurrencia y unas consecuencias, que vienen definidas por un escenario concreto (orografía, vegetación, climatología...). Es difícil predecir la ocurrencia de un incendio, pero no tanto sus consecuencias. Las consecuencias de un incendio pueden medirse como superficie quemada, por ejemplo, o como valor de lo quemado. A pesar de ello, en España, la gestión preventiva de los montes contra incendios forestales suele realizarse tomando como referencia índices de riesgo de incendios y no sus posibles consecuencias. Esto se debe a que se tiende a confundir riesgo con consecuencias. Parece lógico pensar que pueden tener algún tipo de relación, pero no tiene por qué: una zona con un alto índice de riesgo no implica, necesariamente, que al acontecer un incendio existan unas consecuencias importantes. Y, por otro lado, en zonas donde exista un riesgo bajo, la ocurrencia de un incendio puede suponer grandes consecuencias. En el presente trabajo se pretende (1) analizar estas consecuencias, modelizando la Superficie Quemada Potencial que depende de datos de estadísticas de incendios forestales y de variables que caracterizan la zona de estudio, y (2) presentar una propuesta de actuaciones de gestión forestal que haga mínimas esas mismas consecuencias.

Palabras claves Gestión forestal; incendios forestales; riesgo de incendios.

Correspondencia: María Gómez-Elvira Corroto maria.gomez-elvira.corroto@upm.es
José Eugenio Martínez Falero (eugenio.mfalero@upm.es)



1. Introducción

1.1. Incendios forestales

La Ley 43/2003 de Montes define un incendio forestal como el fuego que se extiende sin control sobre combustibles forestales situados en el monte.

Los incendios forestales forman parte de la dinámica de los ecosistemas mediterráneos, actuando como agentes modeladores del paisaje. También son una de las emergencias más recurrentes en la Península Ibérica, pudiendo crear situaciones de alarma social, que se ven agravadas cuando entran en peligro vidas humanas, además de las posibles pérdidas ecológicas y económicas que pueden suponer.

Por ello, el comportamiento del fuego ha sido objeto de muchos estudios, llegándose a conocer los factores que más influyen y las consecuencias que de ellos pueden derivarse (Velez 2009).

Entre estos factores se encuentran factores topográficos (pendiente, exposición...) y factores meteorológicos (viento, precipitación, temperatura...), además de la vegetación (combustibles).

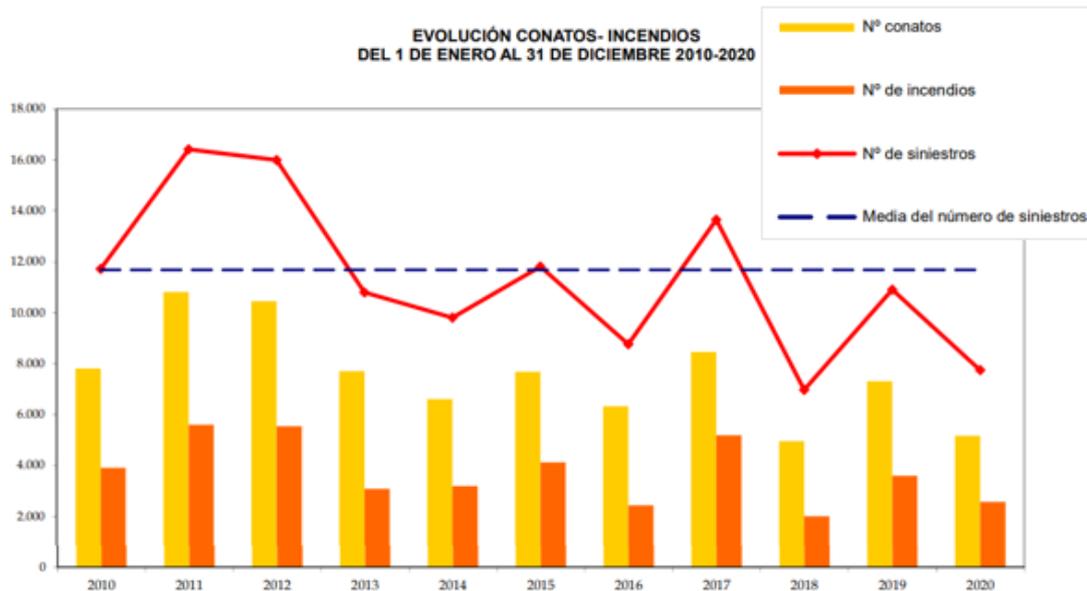
Los llamados modelos de combustible hacen referencia a la vegetación forestal susceptible a la ignición y a la inflamabilidad, estableciendo una clasificación en función de la propagación del fuego a través de ellos. Una de las clasificaciones más conocidas de modelos de combustibles es la que efectuó Rothermel en 1972.

Además, entre las propiedades que caracterizan a los incendios forestales se puede destacar su estacionalidad. En la Península Ibérica, la mayoría de los incendios forestales acontecen en la época estival, que se corresponde con la estación seca.

En España, las estadísticas de incendios forestales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) muestran una tendencia decreciente del número de incendios en los últimos años (Figura 1). Sin embargo, el presupuesto destinado a la extinción y prevención de incendios va en aumento. Tradicionalmente, la mayoría de este presupuesto se destinaba para la extinción, pero recientemente estas dos partidas se han ido igualando.

Por poner un ejemplo, en Castilla-La Mancha, el presupuesto para prevención y extinción de incendios durante 2020 fue de 83,6 millones de euros, destinándose 44,5 millones de euros a la campaña de prevención (en 2019 se destinaron 41,7). Para la campaña de 2021, Castilla-La Mancha invertirá 49,8 millones de euros en la prevención (Osbodigital 2021).

Figura 1. Evolución de los incendios forestales en 2010-2020 (Fuente: Estadísticas MAPA)



1.2. Análisis del riesgo

Existen numerosos trabajos y estudios acerca del riesgo de incendios y de índices de predicción de este riesgo. No obstante, el análisis del riesgo de incendios forestales se suele efectuar considerando los riesgos medios, es decir, los riesgo más “normales”, los más probables (Taleb 2011^a). Así, al transformar estos riesgos medios en consecuencias, se obtienen unas consecuencias “medias” que pueden quedar muy lejos de la realidad. Y son estas consecuencias “medias” las que se tienen de referencia para la planificación de actuaciones de prevención y asignación de medios de extinción.

La elección de los índices de riesgo de incendios, y no las posibles consecuencias que puedan derivarse, para la gestión preventiva de los montes se debe a que se tiende a confundir riesgo con consecuencias. Parece lógico pensar que pueden tener algún tipo de relación, pero no tiene por qué: una zona con un alto índice de riesgo no implica, necesariamente que, al acontecer un incendio, existan unas consecuencias importantes. Y, por otro lado, en zonas donde exista un riesgo bajo, la ocurrencia de un incendio puede suponer grandes consecuencias.

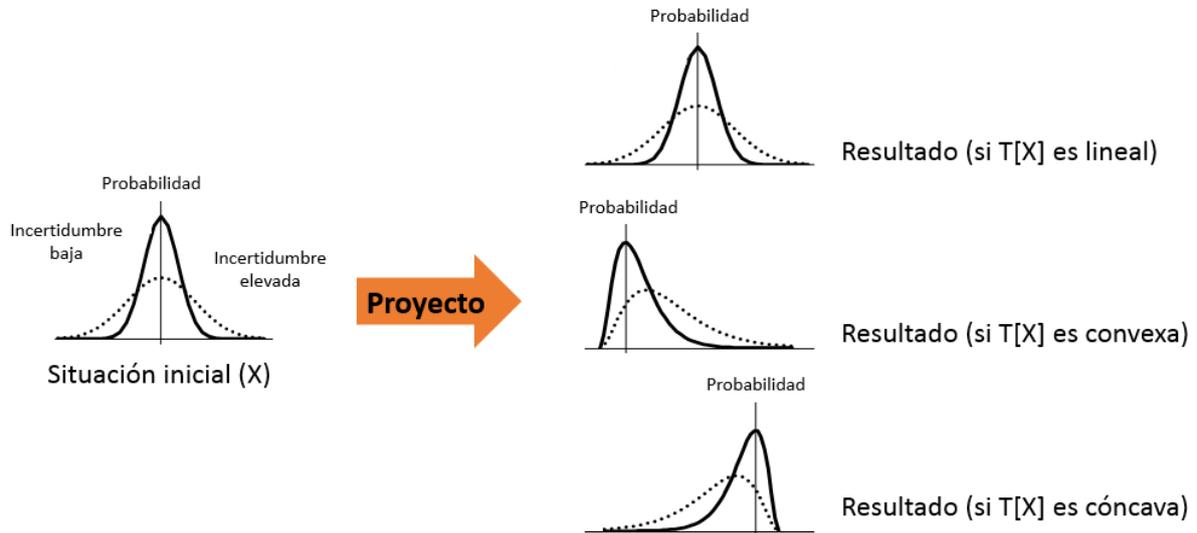
Por ello, en lugar de intentar predecir la ocurrencia de los incendios forestales, a través de los mencionados índices de riesgo, la tendencia debería encaminarse hacia intentar prevenirlos, desde el punto de vista de minimizar sus consecuencias.

Simplificando los desarrollos que subyacen en la teoría de proyectos, un proyecto supone la formulación de unas medidas que se aplican a una situación inicial $[X]$ para obtener unos resultados $[T(X)]$. Si la situación de partida es aleatoria, el resultado de aplicar las medidas también lo será.

Dada una transformación no lineal de una variable X : $Y=T(X)$, la no consideración de que X sea aleatoria (si lo fuera) es una importante fuente de error. De hecho, todo gana o pierde con la aleatoriedad. Las cosas que pierden con la aleatoriedad son frágiles. Por el contrario, las cosas que ganan de la incertidumbre son “antifrágiles” (Taleb 2011^b). Parece adecuado copiar a la naturaleza y buscar la antifragilidad aunque, lamentablemente, la humanidad está muy a

menudo expuesta a la fragilidad sin saberlo. Las principales razones son (Taleb 2011^b) el error de la confulación (confusión de un suceso con la exposición al mismo) y pasar por alto el sesgo de la convexidad (Figura 2).

Figura 2. Diferencias entre considerar el riesgo de una perturbación y sus consecuencias



Así, por ejemplo, en la gestión de incendios forestales, al trabajar con T , se sustituye el cálculo de la probabilidad de la ocurrencia del incendio, por la fragilidad de las masas forestales ante ese suceso cuando están sometidas a un procedimiento específico de gestión. Para eso es necesario considerar la sensibilidad de las pérdidas en un ambiente complejo -como es la propia naturaleza- ante la ocurrencia aleatoria de desastres naturales.

De hecho, cuando se gestiona el riesgo, incluso un aumento en la aleatoriedad de los inputs (variabilidad) puede mejorar la probabilidad de obtener resultados positivos (ver de nuevo la Figura 2).

1.3. Evaluación de daños y consecuencias

En relación con las consecuencias de los incendios forestales, el sistema legal de Estados Unidos especifica que la evaluación de daños debe ser igual al coste de restaurar el recurso afectado más el valor económico perdido durante el período de afectación del recurso (Velez 2009). Una forma de cuantificar las consecuencias de un incendio forestal puede ser a través de la superficie quemada o la cantidad de CO₂ emitido, a lo que habría que añadir un indicador del valor de lo quemado.

Por último, entre las posibles actuaciones encaminadas a minimizar estas consecuencias y daños se pueden mencionar las siguientes: crear o mejorar la red de cortafuegos, mejorar la

accesibilidad para la llegada de medios de extinción, alejar las zonas pobladas del monte, aumentar la diversidad estructural y específica de la vegetación...

2. Objetivos

Los objetivos que se plantean con este trabajo son:

1. En primer lugar, analizar las consecuencias de incendios forestales acontecidos en la provincia de Cuenca (Castilla-La Mancha), modelizando la superficie quemada potencial, en función de los factores ambientales que caracterizan la zona en que se produce cada incendio.
2. Para después, poder presentar una propuesta de actuaciones de gestión forestal que haga mínimas esas consecuencias.

3. Métodos y materiales

3.1. Gestión del riesgo

Es cierto que puede ser difícil conocer la distribución de probabilidades de las variables de entrada, pero, aun así, como se explica a continuación, se puede trabajar con las consecuencias de los proyectos hasta que nos encontremos cómodos para gestionar los posibles resultados.

Para eso vamos a gestionar el riesgo a través del concepto de Fragilidad. Para su cálculo, se usa la esperanza de la cola no condicionada de la variable X que indica el riesgo de que se produzcan catástrofes (la distribución de probabilidades - $f_\lambda(x)$ - se conoce, a excepción del parámetro λ).

Para un nivel de estrés K : $\xi = \int_{-\infty}^K x f_\lambda(x) dx$. La sensibilidad de ξ a variaciones en sucesos raros es un buen indicador de la fragilidad, robustez y anti-fragilidad (Taleb 2011^b). En este contexto, la fragilidad (V) se define como la sensibilidad (la primera derivada), de la estimación de ξ con respecto a la semi-desviación izquierda: $s^-(\lambda) = \int_{-\infty}^\Omega (\Omega - x) f_\lambda(x) dx$ que, a su vez, se calcula para un valor de referencia fijo Ω . Es decir:

$$V(X, f_\lambda, K, s^-) = \frac{\partial \xi}{\partial s^-}(K, s^-)$$

Pero nuestro interés no es la sensibilidad al riesgo de que se produzca una catástrofe natural. Buscamos la fragilidad en las consecuencias de los desastres naturales, que definiremos analíticamente como una transformación $Y = \varphi(x)$ del riesgo. Si se mantiene la notación anterior para X y se introduce una nueva variable Y , tal que $Y = \varphi(x)$ tiene una función de densidad g_λ , que $\Omega_Y = \varphi(\Omega)$ y que $u^-(\lambda)$ es la semi-desviación izquierda de Y . Para un nivel de "ataque" $L = \varphi(K)$, el riesgo de Y es la integral de cola de Y y se calcula como en el caso de X :

$$\zeta(L, u^-(\lambda)) = \int_{-\infty}^K (\Omega_Y - y) g_\lambda(y) dy$$

La fragilidad heredada de Y con respecto a X , a un nivel de stress $L = \varphi(K)$ y a un nivel de semi-desviación izquierda $s^-(\lambda)$ de X es su derivada parcial:

$$V_X(Y, g_\lambda, L, s^-(\lambda)) = \frac{\partial \zeta}{\partial s^-}(L, u^-(\lambda))$$

Para la cuantificación de estos conceptos, se propone utilizar una heurística "fast-and-frugal", que captura la exposición del error del modelo y que no requiere un modelo previo de

probabilidad (ver (Taleb et al. 2012) para su formulación general y aplicación a problemas financieros).

Taleb y Douady (2012) han demostrado que se puede detectar la fragilidad a partir de la convexidad de la función $Y = \varphi(x)$ que describe las consecuencias de la ocurrencia aleatoria de riesgos naturales (X). En el caso de convexidad, el promedio de los resultados de las consecuencias de los desastres naturales no será igual a los resultados del desastre más esperado. Esto se determina a través de una heurística (H) que identifica la no linealidad en el escenario que se está analizando:

$$H = \frac{f(\alpha + \Delta) - f(\alpha - \Delta)}{2} - f(\alpha)$$

donde $f(x)$ es la ganancia o pérdida (del VAN para la gestión de recursos naturales en el escenario de analizado y en la zona de aplicación) para un cierto nivel α en los valores de los factores que caracterizan el escenario, Δ es un cambio en α y H debe interpretarse en relación con el capital total (el VAN total de la zona de trabajo con el escenario analizado) para que pueda escalarse y permita la comparación de resultados.

Cuando $H = 0$ el escenario analizado es robusto.

Cuando, con respecto al VAN total, H es significativamente menor que 0, el escenario es frágil, en el sentido de que las pérdidas adicionales por una pequeña perturbación desfavorable serán mucho mayores que las ganancias adicionales con un pequeño stress favorable. En esta situación, el escenario analizado no "digiere" bien la variabilidad de las catástrofes naturales que es consustancial a los ecosistemas mediterráneos.

Cuando H es significativamente mayor que 0, estamos ante un escenario anti-frágil.

3.2. Clasificación de la información disponible.

Otro problema que enfrenta la gestión del riesgo es definir la información relevante en una señal $x \in X$ como la información que esta señal proporciona sobre otra señal $y \in Y$. En nuestro caso X pueden ser todas las variables que influyen en las consecuencias de los incendios forestales e Y , la materia vegetal consumida por los incendios.

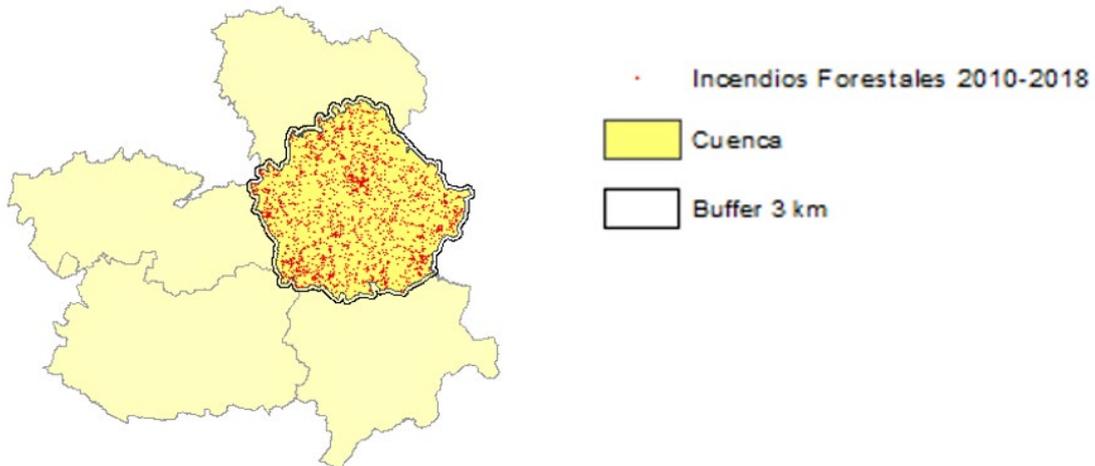
En este artículo se ha exprimido la información que X proporciona sobre Y a través del algoritmo "cuello de botella" (Tishby, Pereira y Bialek 1999 y Chechik et al. 2005) formado por un conjunto limitado de la información digitalizada \tilde{X} . Este algoritmo clasifica la variable Y mediante un problema de optimización limitada que puede considerarse como una generalización de la teoría de la distorsión de la tasa en la que la medida de distorsión $d(x, \tilde{x})$ emerge de las distribuciones conjuntas de X e Y . El enfoque arroja un conjunto exacto de ecuaciones autoconsistentes para las reglas de codificación $X \rightarrow \tilde{X}$ y $\tilde{X} \rightarrow Y$

3.3. Zona de estudio

Para el presente trabajo se ha centrado la atención en la Comunidad de Castilla-La Mancha, por disponer de la serie de datos históricos de los incendios forestales acontecidos. Y dentro

de esta comunidad, se ha escogido la provincia de Cuenca como zona de estudio, por su tradición y aprovechamiento forestal.

Figura 3. Mapa de la provincia de Cuenca en Castilla-La Mancha.



Para poder analizar los incendios que acontecen cercanos a los límites de la provincia, se ha efectuado un buffer de 3 km alrededor de su perímetro, para eliminar el efecto borde.

En cuanto a los datos empleados, se dispone: por un lado, de simulaciones de incendios, y por otro lado, datos reales de incendios acontecidos.

3.4. Estadísticas de incendios forestales

Los datos reales se corresponden con la serie de datos históricos de los incendios forestales acontecidos en la provincia de Cuenca, en el marco del Plan INFOCAM, y facilitados por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.

De esta base de datos se han seleccionado los incendios acontecidos en la provincia de Cuenca, entre los años 2010-2018. Para cada incendio, existe información de las

coordenadas del punto de inicio, la hora de la detección, los tiempos de llegada de los medios de extinción, y la superficie quemada, entre otro tipo de datos.

En total, para el periodo de tiempo 2010-2018, en la provincia de Cuenca, se han seleccionado 2525 incendios.

Tabla 1. Resumen de las superficies quemadas y número de incendios por año, en la provincia de Cuenca durante el periodo 2010-2018.

Año	Nº IIFF	Superficie forestal				Superficie No Forestal				Superficie total			
		min	max	media	suma	min	max	media	suma	min	max	media	suma
2010	165	0,00	5,00	0,13	21,70	0,00	13,64	0,28	46,74	0,00	13,65	0,41	68,44
2011	306	0,00	281,00	1,39	425,25	0,00	52,50	1,25	382,64	0,01	281,00	2,64	807,89
2012	425	0,00	192,42	2,16	917,51	0,00	104,70	1,11	472,78	0,00	267,38	3,27	1390,29
2013	328	0,00	58,20	0,61	199,26	0,00	142,06	2,21	724,56	0,00	200,26	2,82	923,82
2014	262	0,00	23,20	0,47	122,72	0,00	23,64	0,75	197,23	0,00	23,64	1,22	319,95
2015	313	0,00	66,08	0,68	212,40	0,00	195,00	2,50	781,93	0,00	197,01	3,18	994,33
2016	274	0,00	418,85	3,93	1075,66	0,00	135,76	3,61	987,83	0,00	480,72	7,53	2063,49
2017	291	0,00	1009,00	4,79	1393,31	0,00	29,50	0,59	171,52	0,00	1009,00	5,38	1564,83
2018	161	0,00	8,03	0,23	37,76	0,00	22,94	0,30	48,52	0,00	30,97	0,54	86,27
	2525				4405,58				3813,74				8219,31

3.5. Simulación de incendios forestales

Para simular los incendios, en los mismos puntos en los que acontecieron los incendios recogidos en las estadísticas de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, se han utilizado las siguientes variables:

- MDT (Modelo Digital del Terreno)

El Modelo Digital del Terreno utilizado procede del centro de descargas del IGN (Instituto Geográfico Nacional), en formato ráster, de resolución 25x25 m.

A partir de este mapa, además de la altitud, se extrae la pendiente y la orientación.

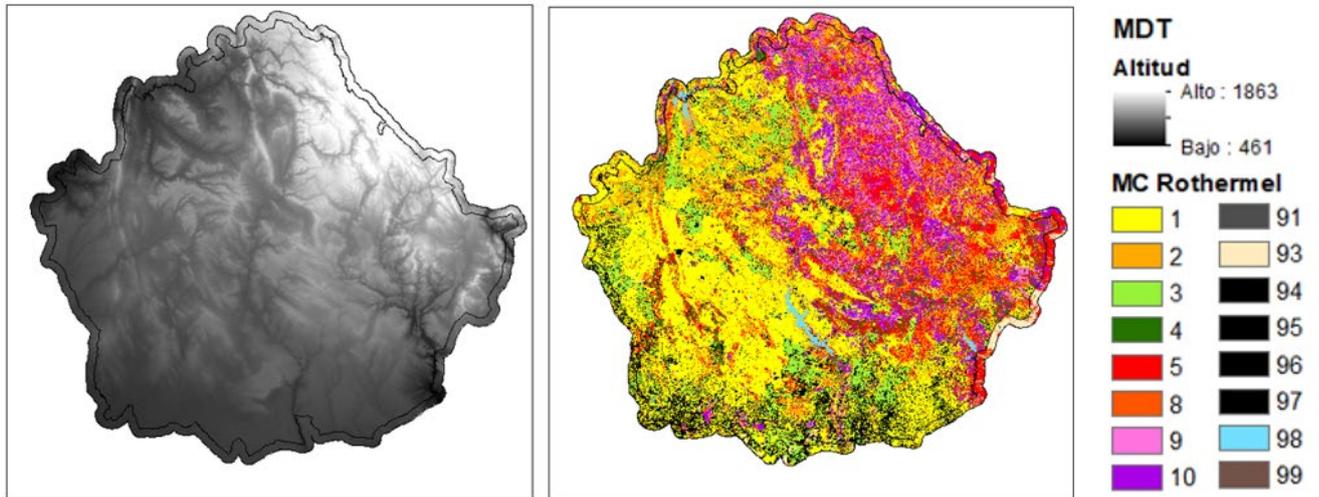
- Modelos de combustible

El mapa de combustible utilizado se ha extraído de la plataforma GINFOR (Gestión de Información Forestal) de la Junta de Castilla-La Mancha, en formato ráster, con una resolución de 25x25 m.

Este mapa utiliza la clasificación de modelos de combustible de Rothermel (1972). Según esta clasificación existen 13 modelos de combustibles, no habiendo presencia de todos ellos en la provincia de Cuenca. Los modelos que pueden verse en la imagen siguiente con números 91,93, 94, 95, 96, 97,98 y 99 se corresponden con zonas no forestales, no susceptibles a ser

quemadas, como pueden ser cultivos agrícolas en regadío, masas de agua, suelo desnudo y zonas urbanas y edificadas.

Figura 4. Modelo Digital del Terreno (MDT), a la izquierda; y mapa de modelos de combustible de Rothermel, a la derecha, en la provincia de Cuenca.



En la provincia de Cuenca existen tres estaciones meteorológicas donde se registra la velocidad media diaria del viento: Cuenca (8096), San Clemente (4090Y) y Tarancón (3094B). Cada incendio forestal se ha asociado a una de estas estaciones teniendo en cuenta su proximidad a ellas según triángulos de Thiessen.

Estos datos se encuentran en la Base de Datos Meteorológica AEMET-OPENDATA.

En cuanto a los datos de dirección del viento, se ha utilizado información de la dirección predominante mensual, obtenida de los mapas de viento de WindFinder.

De acuerdo a la rosa de los vientos, se han asociado números del 1 al 16 para cada dirección.

Tabla 2. Rosa de los vientos y código de clasificación de las direcciones del viento.

Código	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
dir. viento	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO	N	NNE	NE	ENE

- Humedad (NDVI)

La disponibilidad de agua para las plantas, lo que determina su estado vegetativo, está relacionada con la capacidad de retención de agua del suelo (Farrar, Nicholson y Lare 1994)

y las precipitaciones. Para tener en cuenta este factor, se ha elegido el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

El índice NDVI se calcula a partir de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

En la ecuación (1), el NIR es el Near Infrared Ray (MODIS band 2) y el RED el Red band (MODIS band 1).

El sensor MODIS (Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ofrece información de índices de vegetación. Entre los productos disponibles, se encuentra el MOD13Q1, que genera una capa de NDVI, cada 16 días en resoluciones espaciales de 250, 500 y 1000 m.

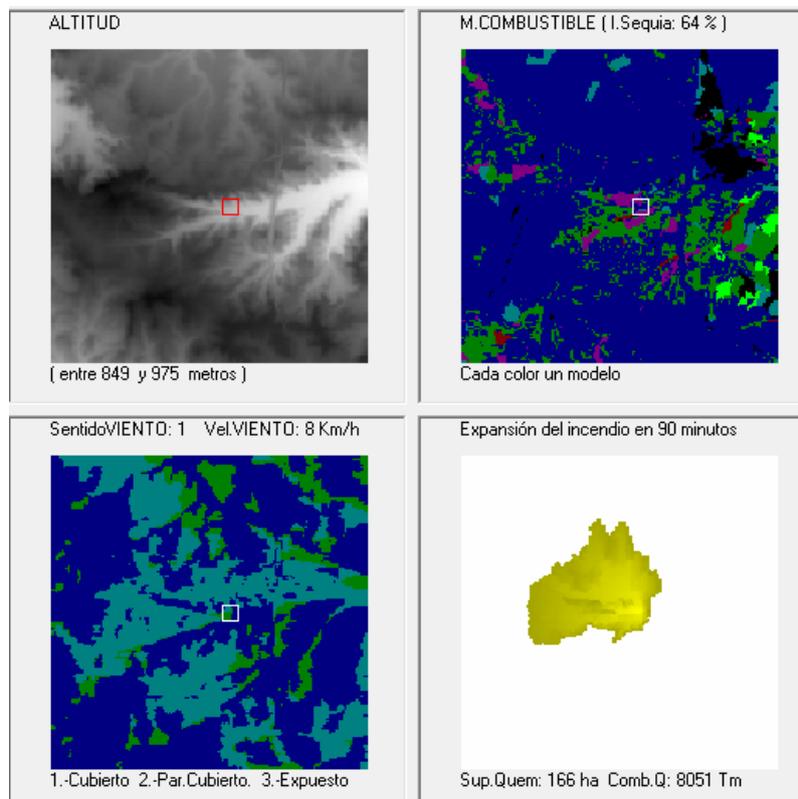
Para este trabajo se ha escogido la resolución de 250 m, y esta información, teniendo en cuenta la fecha y localización, se ha asociado a cada incendio forestal.

3.6. Expansión teórica del incendio

El proceso de cálculo de expansión de los incendios considera las variables anteriormente mencionadas: MDT, modelos de combustible, viento y humedad.

Los resultados (consecuencias de los incendios) son la superficie quemada potencial y las toneladas de CO₂ quemadas potenciales, para cada punto de incendio.

Figura 5. Ejemplo de simulación de un incendio.



4. Resultados y discusión

Se ha aplicado el método de clasificación descrito en la sección anterior a las variables definidas en el apartado de material para los 2525 incendios reportados y se han identificado tres clases de incendios (ver Tabla 3). Estas clases se comportan de forma muy diferente en cuanto a la superficie quemada y al combustible reales quemados en cada incendio, como se puede comprobar por los valores del estadístico F de las últimas dos variables de la Tabla 3 (29,6426 y 14,8206 respectivamente).

Tabla 3. Análisis de la varianza de las variables utilizadas para la clasificación de los tipos de incendios

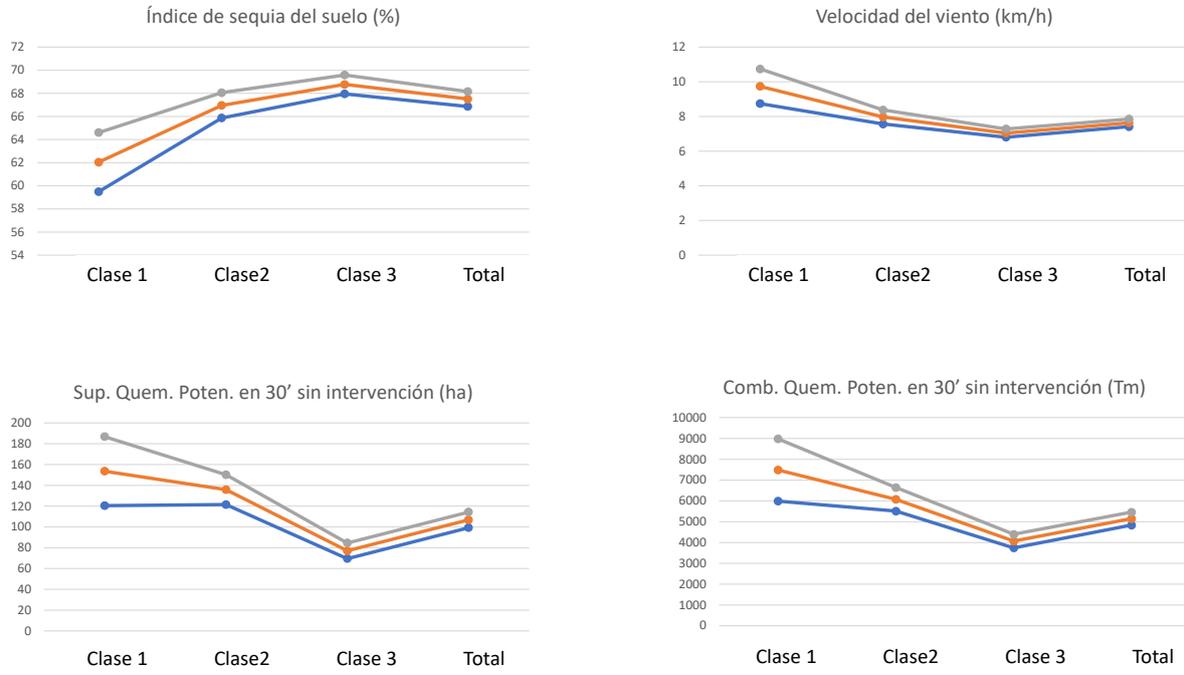
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	TOTAL	
<i>Índice sequía del suelo (%)</i>					
Ndatos	202	1012	1307	2521	
Media	62,05	66,96	68,77	67,51	
Dtípica	18054	17,75	15,01	16,55	
F					15,1418**
<i>Velocidad del viento (km/h)</i>					
Ndatos	202	1012	1307	2521	
Media	9,74	7,97	7,04	7,63	
Dtípica	7,23	6,56	4,42	5,67	
F					23,0244**
<i>Superficie quemada potencial en 30 min sin intervención humana (ha)</i>					
Ndatos	202	1012	1307	2521	
Media	153,6	135,84	77,09	106,8	
Dtípica	240,11	232,58	138,68	192,97	
F					33,7027**
<i>Exposición media de lo potencialmente quemado en 30 min (1:Cubierto, 2:Parc.Cub., 3:Expuesto)</i>					
Ndatos	202	1012	1307	2521	
Media	1,82	1,8	1,8	1,8	
Dtípica	0,67	0,67	0,62	0,64	
F					0,0836
<i>Tiempo real de llegada de los recursos de extinción (min)</i>					
Ndatos	194	964	1282	2440	
Media	48,04	35,23	28,66	32,79	
Dtípica	38,85	30,34	26,48	29,68	
F					0,9532
<i>Tiempo real de control del incendio (min)</i>					
Ndatos	203	1007	1304	2514	
Media	188,89	125,69	61,05	97,27	
Dtípica	366,75	892,04	249,2	602,69	
F					5,762*
<i>Superficie quemada en el incendio real (ha)</i>					
Ndatos	206	1012	1307	2525	
Media	16,11	4,03	0,62	3,25	
Dtípica	81,68	21,84	2,93	27,47	
F					29,6426**
<i>Combustible vegetal quemado en el incendio real (Tm)</i>					
Ndatos	206	1012	1307	2525	
Media	448,57	63,99	1,39	62,96	
Dtípica	3424,1	785,76	10,4	1101,69	
F					14,8206**

La misma Tabla 3 permite identificar otras variables significativas en la clasificación de los incendios mediante el análisis de su varianza en las clases identificadas. Como se puede apreciar, las variables que explican la intervención humana directa en la extinción de los incendios (tiempo de llegada de los recursos de extinción y tiempo necesario para controlar el incendio) son nada o poco significativas (valor de la F de 0,9532 y 5,7620 respectivamente) para la clasificación de los incendios, por lo que se puede concluir que los recursos humanos de extinción están igualmente distribuidos en toda la provincia para combatir los incendios que se puedan producir. Otras variables no son significativamente diferentes en las clases identificadas (como el grado de cobertura vegetal y la dirección del viento). Por último, ciertas variables, que hacen referencia a los posibles estados de la naturaleza (diferentes escenarios naturales de los incendios) sí que se comportan de forma diferente en cada una de las clases de incendios. Estas variables son la humedad del suelo, la velocidad del viento y la morfología

y la tipología del combustible (las dos últimas se describen a través de la superficie quemada y del combustible quemado más probables en 30 minutos y sin intervención humana).

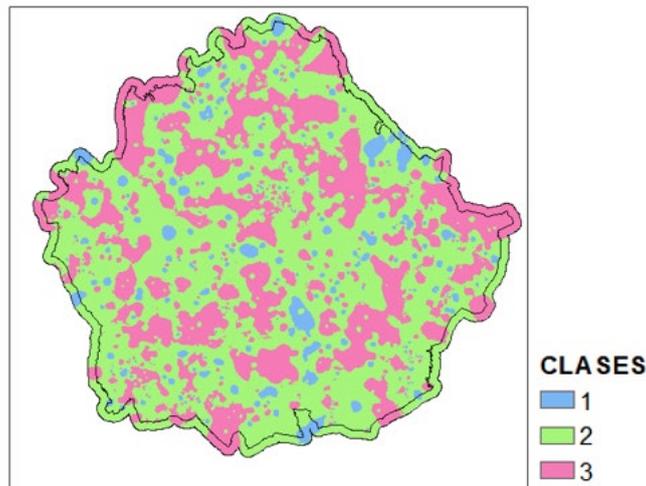
La Figura 6 muestra los intervalos de confianza para las cuatro variables naturales significativas mencionadas (humedad, velocidad del viento, superficie y cantidad del combustible quemados sin intervención humana) en las tres clases de incendios y en el total de los incendios de Cuenca. Si se acepta que se ha optimizado la localización y funcionamiento de los recursos humanos de extinción, la gestión de los incendios sólo se puede mejorar mediante la modificación de las variables naturales mencionadas. Pero por su propia naturaleza, sólo se podrá actuar sobre ellas si se integra la gestión de los incendios en la gestión forestal general.

Figura 6. Intervalos de confianza al 95% en las variables significativas para los incendios reportados en 2010-2018 en Cuenca.



La mencionada clasificación de los incendios se ha extendido geográficamente al territorio más próximo a cada incendio (ver Figura 7)

Figura 7. Clasificación de la provincia de Cuenca por los tipos de incendio que se producen.

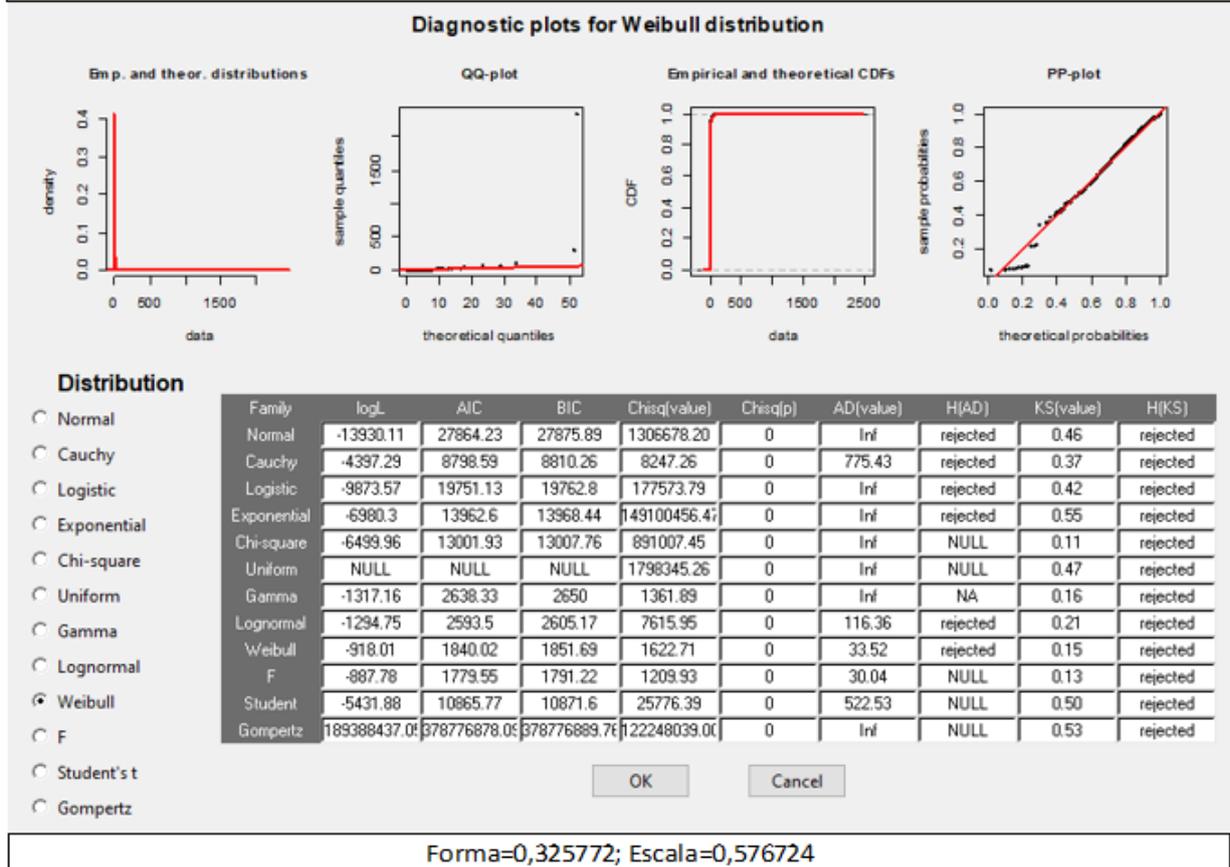


Con objeto de realizar una cuantificación de la mejora de los resultados que puede aportar la gestión de las variables naturales, se ha modelado la aleatoriedad de dos variables significativas referidas a la gestión forestal antes del combate y al resultado del incendio después de aplicar los recursos de extinción. La comparación de los cuantiles de p% de probabilidad (q_p), es decir las ordenadas que dejan su izquierda un p% de probabilidad de que

se produzca un incendio en que consuma más de q Tm de combustible vegetal por unidad de superficie sin intervención humana y con intervención, proporciona una cuantificación de la mejora que se produciría al incidir solamente en las variables naturales. A título de ejemplo, la Figura 8 muestra los mejores ajustes para las dos variables descritas en toda la provincia de Cuenca y la Tabla 4 resume los ajustes obtenidos, además, para las tres clases de incendios.

Figura 8. Ajuste de funciones de densidad por rutinas de R

Tm de combustible quemado en los incendios de toda la provincia de Cuenca por unidad de superficie en los años 2010-2018



Tm de combustible que se hubieran quemado en los incendios de toda la provincia de Cuenca por unidad de superficie en los años 2010-2018 si no hubieran actuado los recursos de extinción

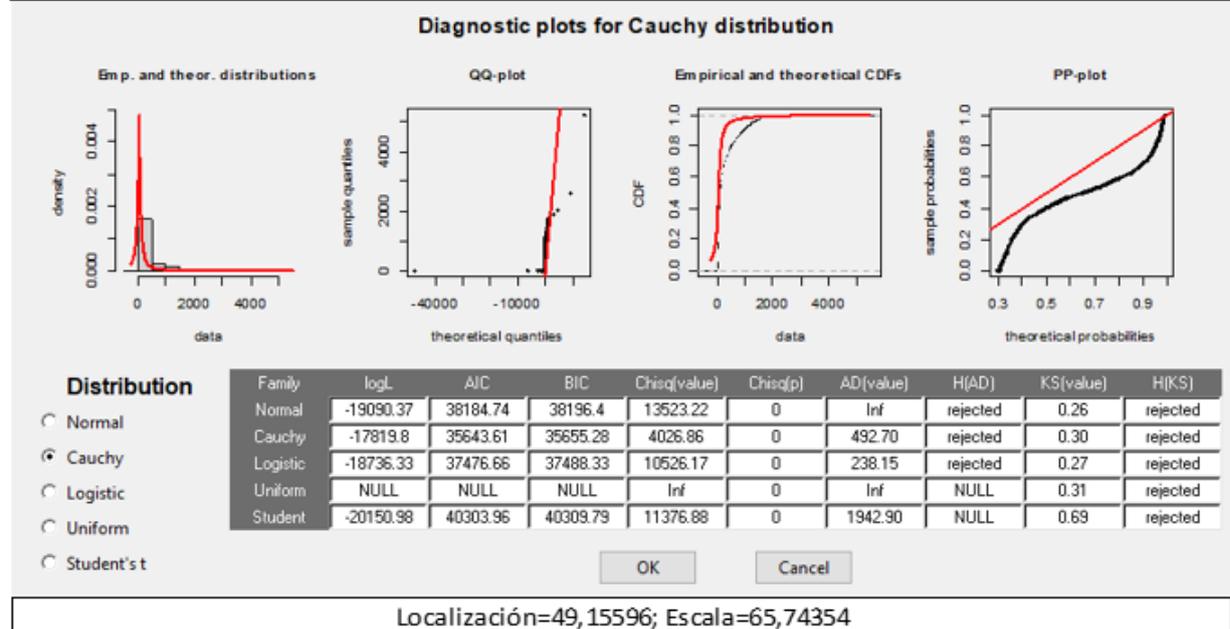


Tabla 4. Principales parámetros de las funciones de densidad ajustadas

Variable	Tm de combustible quemado por unidad de superficie en 30 minutos sin intervención humana (Toda Cuenca)	Tm de combustible quemado por unidad de superficie en el incendio real (Toda Cuenca)	Tm de combustible quemado por unidad de superficie en el incendio real (CLASE 1)	Tm de combustible quemado por unidad de superficie en el incendio real (CLASE 2)	Tm de combustible quemado por unidad de superficie en el incendio real (CLASE 3)
Función densidad	Weibull Forma=0,325772 Escala=0,576724	Couchy Localización=49,15596 Escala=65,74354	Weibull Forma=0,3079719 Escala=8,7458843	Weibull Forma=0,3231687 Escala=0,8328884	Weibull Forma=0,3366123 Escala=1,5411476
$q_{0,875}$	207,8749 Tm/Usup	5,456916 Tm/Usup			
0,1868_α			73,6473%	53,9629%	61,1720%

Independientemente de las p y q elegidas, los resultados muestran que los recursos de extinción son la mejor garantía para reducir las consecuencias de los incendios (a título de ejemplo, los recursos de extinción controlan los incendios de menos de 207,8749 Tm/USup en un 87,5% de los casos y las variables naturales mejorarían los resultados en 5,456916 Tm/USup). Este resultado justifica que recursos de extinción no solo están bien distribuidos espacialmente, sino que su actuación en el combate de los incendios forestales es realmente buena.

Por otra parte, también a título de ejemplo y actuando sólo en la gestión forestal, se podría incrementar la probabilidad de extinguir los incendios que consumieran menos de 0,19 Tm de materia vegetal en un 20% de si se aproximaran las condiciones naturales de la Clase 2 a las de la Clase 1 y en un 12% si se aproximaran las condiciones naturales de la Clase 3 a la Clase 1 (Tabla 4).

Los resultados anteriores se refieren solamente a las variables modelizadas. El lector puede comprender las posibilidades de cuantificar el coste de las mejoras naturales (con sistemas de gestión forestal) y de transformar las estimaciones de las toneladas de combustible quemado en emisiones de CO₂ con objeto de cuantificar los proyectos de gestión forestal para su elegibilidad en el marco de las ayudas a la COVID de la UE.

5. Conclusión

Este artículo desarrolla los primeros pasos en la aplicación de la gestión de proyectos en condiciones de riesgo que se ajusta más a la realidad y permite cuantificar y justificar las inversiones en la gestión de recursos naturales ante organismos externos y ante el público en general.

5. Referencias

- Base de Datos Meteorológica AEMET-OPENDATA. Disponible en: <https://datosclima.es/Aemethistorico/Viento.php>
- Chechik G., Globerson A., Tishby N., Weiss Y. (2005) Information bottleneck for Gaussian variables, *Journal of Machine Learn. Res.* 6, pp. 165-188.
- España. Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes. *Boletín Oficial del Estado*, 22 de noviembre de 2003, núm. 280.
- Farrar T.J., Nicholson S.E., Lare A.R. (1994) The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana: II. NDVI response to soil moisture. *Remote Sens Environ*
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). Centro de descargas: <http://www.ign.es/web/ign/portal>
- Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Plataforma informática GINFOR – Gestión de Información Forestal. Disponible en: <http://visores.castillalamancha.es/ginfor>
- Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (2018). Plan de Emergencias contra Incendios Forestales de Castilla-La Mancha (Plan INFOCAM). Disponible en: https://www.castillalamancha.es/sites/default/files/documentos/pdf/20180108/plan_infocam_2017.pdf
- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (2020). Estadísticas incendios forestales. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/Incendios_default.aspx
- Osbodigital (2021). Castilla-La Mancha invertirá 49,8 millones de euros en prevención de incendios forestales en 2021. Disponible en: <https://osbodigital.es/2021/01/12/castilla-la-mancha-invertira-49-millones-de-euros-en-prevencion/>
- Rothermel R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Taleb N. N. (2011)^a. El cisne negro. El impacto de lo altamente improbable. PAIDOS IBERICA.
- Taleb N. N (2011)^b. Antifragile: Things That Gain from Disorder”, Fall 2012, Random House (US) & Penguin (UK)
- Taleb N. N., Douady R. (2012) Mathematical Definition and Mapping of (Anti)Fragility”, NYU-Poly Working Paper.
- Taleb N. N., Canetti E., Kinda T., Loukoianova E., Schmieder Ch. (2012) A New Heuristic Measure of Fragility and Tail Risks: Application to Stress Testing. International Monetary Fund WP/12/216.
- Tishby N., Pereira F., Bialek W. (1999), The information bottleneck method, in Proceedings of the 37-th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing, pp. 368–377
- Vélez R. (2009). La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias. Madrid (España). Mc Graw Hill.
- Windfinder. Mapas de viento. Disponible en: <https://es.windfinder.com/#9/39.9276/-1.8787>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

