



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



La modelización de los costes de extinción en la planificación de los programas de supresión de incendios forestales, una aproximación metodológica

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.¹

¹ Laboratorio de Incendios Forestales, Departamento Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba. Email: ir1rosif@uco.es

Resumen

La gestión operacional de las acciones de extinción, constituyen en la actualidad una importante asignación presupuestaria por parte de las administraciones con responsabilidades en las emergencias por incendios forestales. Si bien a lo largo de los últimos veinticinco años se ha logrado

Una alta profesionalización y tecnificación en los medios y protocolos operacionales dirigidos a la extinción, la evaluación de las inversiones presupuestarias y de los costes asociados para dar respuesta al crecimiento dimensional de la complejidad en las acciones de extinción, no han experimentado el mismo desarrollo. De acuerdo con lo anterior y con el objetivo de generar herramientas para la ayuda en la toma de decisión presupuestaria se presenta en este trabajo la modelización de la función de costes de extinción dependiente de los escenarios operacionales y de las capacidades productivas de los medios de extinción. Los resultados de esta modelización proporcionan un importante cambio de paradigma, al apostar por la proactividad que implica el reconocimiento previo del territorio antes de la ocurrencia de la emergencia. En este sentido y con la información que se obtiene, resulta factible establecer conexiones presupuestarias necesarias entre la gestión preventiva y las operaciones de extinción que el territorio demanda.

Palabras clave

Costes de extinción, productividad operacional, dificultad de extinción.

1. Introducción

En todo proceso de planificación que implique desarrollos posteriores de carácter ejecutivo, la atención a la previsión de gastos y requerimientos de carácter presupuestario es imprescindible. En este sentido y desde el punto de vista de los programas de defensa contra incendios forestales, la gestión presupuestaria y la planificación de las inversiones, se apoya en una parte sobre el histórico de la ocurrencia y las correspondientes asignaciones presupuestarias aplicadas, y por otra en función de estimaciones, en la mayoría de las veces, basadas en percepciones y no en informaciones derivadas de herramientas objetivas econométricas respaldadas científicamente. La problemática del impacto de los incendios forestales a nivel global viene generando por el incremento en la extensión, virulencia y costes de extinción (Rodríguez y Silva, y Molina. 2016), movimientos estratégicos con el fin explorar soluciones a medio y largo plazo que ayuden a proporcionar las adecuadas respuestas de las administraciones responsables, tanto en la prevención como en la extinción y con mayor detalle, dado el incremento de los costes de extinción, en áreas urbano-forestal (Liang et al. 2008), Gude et al. 2013). Si bien ello pasa por un replanteamiento en el diagnóstico y gestión del paisaje forestal, el aprendizaje derivado de la gestión del presupuesto requiere del análisis de los costes (Hand et al. 2014) y de la eficiencia en la definición y aplicación de las inversiones presupuestarias.

2. Objetivos

El objetivo de esta comunicación es la modelización de la función de costes de las operaciones de extinción, con el fin de proporcionar a gestores y responsables de las administraciones públicas en el desarrollo y aplicación de programas de defensa contra los incendios forestales de una herramienta de ayuda a la toma decisión a partir de los datos analizados de la estadística de incendios forestales y de la capitalización de la experiencia generada en las acciones de planificación estratégica para el control y supresión del fuego en los incendios forestales.

3. Metodología

En la modelización de la función de costes, es necesario en primer lugar, el establecimiento de la línea de recorrido que define el proceso. Para ello es importante realizar antes de profundizar en el desarrollo metodológico que ha sido definido en el presente trabajo, una importante clarificación conceptual que permita definir el marco de referencia que envuelve la modelización generada.

3.1. Definición y conceptos

Por coste se entiende comúnmente, desde el punto de vista de la economía, como la suma de gastos asociados a los diferentes inputs que forman parte de una determinada actividad. De acuerdo con ello la elección de un determinado bien, conlleva por parte del consumidor un proceso analítico de evaluación en relación con el grado de satisfacción que representa la elección de un bien frente a otro. En esencia y de acuerdo a conceptos de naturaleza microeconómica, el consumidor ha de decidir en función de la utilidad que le reporta la decisión final de la elección. Sin duda, uno de los elementos que de forma prioritaria influye en la decisión a tomar es el precio del bien. Cuando se trata de una elección más compleja, en la que diferentes bienes conforman un determinado lote, la comparación entre opciones de lotes que incluyen similares bienes, requiere de un análisis de costes y por tanto de gastos que conlleva una determinada elección frente a otras posibilidades. De lo que se desprende que, en esencia, la palabra costes implica la acción contable. En el marco de la producción de bienes, por coste se define la suma de los gastos de cada uno de los materiales (inputs) que son necesarios para alcanzar la consecución de los objetivos de la fabricación y obtención del producto, por tanto en ello se reconoce, la naturaleza diferenciadora de cada material y su propio precio. En esencia, desde un punto de vista matemático y considerando los inputs como una variable, el coste se puede explicar mediante la expresión siguiente:

$$C = \sum_j W_j X_j$$

En dicha expresión C representa el coste, W los precios, X las cantidades de cada uno de los materiales o inputs necesarias en el proceso productivo y el subíndice j identifica los inputs. Sin embargo cuando se habla de función de costes, la definición conceptual es de mayor complejidad y se entiende como una relación entre el coste y un conjunto de variables explicativas que se determinan por un proceso de optimización. Por consiguiente la función de costes indica el mínimo coste de producir cada nivel de output (Álvarez et al. 2003), considerando los precios individuales de los elementos materiales implicados en el proceso de producción. La función de costes se obtiene mediante dos vías posibles, la primera, minimizando el coste de producir el output deseado, sujeto a la restricción que impone la capacidad productiva. De acuerdo con ello, la modelización de la función de costes se encuentra condicionada a la elección de una determinada función que recoge las particularidades de la producción, dicho de otra forma, los condicionantes tecnológicos que condicionan la productividad. El planteamiento matemático implica por tanto un proceso de minimización, condicionado a restricciones de cumplimiento derivados de la función de producción

que caracteriza e identifica la naturaleza del escenario productivo. De acuerdo con ello se ha de cumplir que:

$$C(y, w) = \min_x \sum_j w_j x_j$$

$$\text{s.a. } y = f(x)$$

El condicionado anterior muestra definición conceptual de la función de costes, en la que se establece la relación entre las cantidades óptimas de los factores productivos, dadas las condiciones tecnológicas y los precios de los inputs. El proceso de minimización implica la resolución mediante el multiplicador de Lagrange (λ):

$$\phi = \sum_j w_j x_j + \lambda(y - f(x))$$

Las condiciones de primer orden en el proceso de minimización sujeto al concionante de la función de producción, queda expresado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} w_j - \lambda f_j(x) &= 0 \quad \forall j \\ y - f(x) &= 0 \end{aligned}$$

Las condiciones de primer orden anteriormente indicada, en un proceso productivo con k elementos materiales de entrada constituye un sistema de $k+1$ ecuaciones con $k+1$ incógnitas, es decir las k entradas y el multiplicado de Lagrange (λ). Las cantidades óptimas de los elementos materiales de entrada, $x(y, w)$ y el multiplicador de Lagrange determinado en el óptimo, conforma la solución de minimización buscada. La función de demanda de los elementos materiales de entrada o inputs permite relacionar las cantidades optimizadas de los inputs (x_j), los precios de cada uno de ellos (w) y las cantidades de productos generados en el proceso productivo (y).

La segunda vía de obtención de la función de costes, es considerando la maximización de la producción, sujeta a las restricciones que imponen el coste de los factores productivos. De acuerdo con ello el formato del lagrangiano adopta la siguiente estructura matemática:

$$\phi = Y + \lambda(C - \sum_j w_j x_j)$$

De acuerdo con ello se establece una relación funcional entre el coste de producción, los precios de los inputs y la cantidad de productos cuya expresión matemática es la siguiente y recoge el coste de producción $C(y, w)$, en el marco de la maximización de los rendimientos productivos:

$$C = \sum_j w_j x_j(y, w) = C(y, w)$$

Entre las ventajas fundamentales que ofrece la función de costes, se encuentran la de poder evaluar y analizar el proceso productivo en función de los precios de los inputs y la de poder monitorear sistemas productivos dirigidos hacia objetivos caracterizados por varios productos. Esta opción ofrece sin duda alguna, interesantes oportunidades en la realidad operacional de las acciones de supresión, en la que el concepto multiproducto se puede caracterizar por respuestas productivas ante diferentes escenarios de extinción de incendios forestales.

A partir de la definición conceptual de la función de costes, frente al concepto contable de costes, es necesario en el proceso metodológico definido para la determinar la modelización predictiva de los costes de extinción, definir de que forma se consigue la integración de la productividad con la realidad definida por los elementos materiales en el proceso decisorio. La adaptación del enfoque microeconómico de partida al marco operacional de las acciones de extinción de incendios forestales requiere realizar la transferencia conceptual y de variables a la

geografía operacional de la extinción de los incendios forestales. De acuerdo con ello los inputs se conforman como los diferentes tipos de recursos de extinción que caracterizan los medios aéreos y los medios terrestres. Los precios de los inputs determinan el coste operacional por hora de servicio, en las diferentes actividades de extinción en las que los medios de extinción son empleados. La tecnología productiva, siguiendo la denominación microeconómica, viene determinada por la productividad de los medios de extinción en las acciones de contención y desaceleración del movimiento de avance asociado a las propagaciones del fuego.

Esta capacidad productiva es compleja en su proceso de caracterización y determinación, entre otras cuestiones por la propia naturaleza de las actividades de extinción. Es decir, el resultado de las operaciones de extinción es consecuencia de la interacción múltiple y agregada de las respuestas operacionales propias de cada medio de extinción participante en un determinado sector operacional, ello se puede monitorear en base a los resultados obtenidos. Herramientas como el Factor de Contracción Superficial (FCS) y el Factor de Contracción Lineal (FCL) (Rodríguez y Silva et al. 2010, 2014, 2020) permiten evaluar los logros o déficits de las acciones acordadas y procesar posteriormente la capitalización de la experiencia.

La determinación de la función de producción, en la que a través de la inclusión de variables explicativas relacionadas con las acciones de supresión, tanto en términos de inputs productivos (número, tipos y tiempos operacionales de medios de extinción), como de factores ambientales y de los escenarios operacionales que incorporan información relacionada con limitaciones e ineficiencia de las acciones de extinción, proporciona de forma integrada la capacidad productiva de los medios de extinción asignados a las diferentes áreas sectorizadas del incendio. Siendo necesario incluir las condiciones restrictivas que proporciona la función de producción en la modelización de la función de los costes de extinción, se incluye en el siguiente epígrafe el marco teórico que determina la integración del efecto de los rendimientos operacionales en la función que predice la minimización de los costes de extinción.

3.2. Obtención de la función de costes, versus productividad operacional

La función de producción seleccionada en el presente trabajo ha sido la función de Cobb-Douglas, dada su capacidad explicativa en el marco de los fundamentos de la ciencia microeconómica y los antecedentes en estudios de carácter económico aplicado a la defensa contra los incendios forestales (Rodríguez y Silva, 2017), (Holmes y Calkin, 2013), (Katuwal et al. 2016). La estructura formal de la función de Cobb-Douglas adopta la siguiente expresión:

$$Y = b_0 L^{b_1} K^{b_2}$$

Los inputs que recogen los factores productivos están representados por (L) y por (K), en el caso de tratarse de dos únicos factores o bien (Z_i) en el caso de múltiples factores productivos. La ecuación de costes, en la que se incluyen los factores productivos (L) y (K) y sus precios respectivos (w_L) y (w_K) presenta la siguiente expresión:

$$C = w_L L + w_K K$$

De acuerdo con lo expuesto en el epígrafe anterior, el proceso de modelización de costes seleccionado ha sido el de la segunda opción indicada, es decir desarrollar la función de costes considerando la maximización de la función de producción, sujeta a las restricciones impuestas por costes dependientes de los precios y cantidades de los inputs (w) (Nipum, 2022).

Aplicando la ecuación lagrangiana:

$$\phi = Y + \lambda(C - \sum w_j x_j)$$

al formato de la función de producción de Cobb-Douglas de dos factores productivos y resolviendo el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas la ecuación lagrangiana queda de la siguiente forma:

$$\phi = b_0 L^{b_1} K^{b_2} + \lambda(C - w_L L - w_K K)$$

$$Y = b_0 L^{b_1} K^{b_2}$$

Derivando con relación a (L), (K) y (λ)

$$\frac{\partial \phi}{\partial L} = b_1 \frac{Y}{L} - \lambda w_L = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial K} = b_2 \frac{Y}{K} - \lambda w_K = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = (C - w_L L - w_K K) = 0$$

La resolución del sistema de ecuaciones proporciona la función de costes de extinción, dependiendo de los factores productivos, y condicionada a la maximización de la función de producción de Cobb-Douglas, cuya expresión final es la siguiente:

$$C = \left\{ \left(\frac{1}{b_0} \right) \left[\left(\frac{b_1}{b_2} \right)^{b_2} + \left(\frac{b_2}{b_1} \right)^{b_1} \right] \right\}^{\left(\frac{1}{(b_1+b_2)} \right)} \cdot \left[w_L^{\left(\frac{b_1}{b_1+b_2} \right)} \cdot w_K^{\left(\frac{b_2}{b_1+b_2} \right)} \right] \cdot Y^{\left(\frac{1}{(b_1+b_2)} \right)}$$

3.3. Obtención de la función de producción

La estructura general de la función de producción de Cobb-Douglas aplicada para un conjunto de (n) factores productivos, tiene el siguiente formato:

$$Y = A \cdot x_1^{\alpha_1} \cdot x_2^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot x_n^{\alpha_n}$$

que, en relación con la realidad operacional de los medios de extinción, cada una de las (x_i) variables, representan el número de medios de extinción por cada uno de los tipos, así como variables relacionadas con los factores ambientales y de los escenarios operacionales. En el presente trabajo han sido considerados como factores productivos, el número de horas de intervención de brigadas de extinción (> de 12 componentes), de grupos de especialistas de extinción (7 componentes), de vehículos de extinción, de maquinaria pesada, de helicópteros de transporte y extinción, de helicópteros bombarderos, de aviones anfibios y de aviones de carga en tierra. El efecto de los factores ambientales y locales que aportan información de los escenarios operacionales en donde se desarrollan las acciones de extinción, ha sido incorporado a través del índice de dificultad de extinción (Rodríguez y Silva et al. 2020).

Dada la complejidad de cálculos que representa operar con múltiples variables explicativas relacionadas con los medios de extinción (número, tipos t tiempos de intervención), ha sido creado en el marco de la metodología desarrollada en el presente trabajo, un algoritmo de conversión que permite agregar las variables que caracterizan las acciones de los medios de extinción, en dos únicas variables envolventes. HorasMA, representa la contabilidad de los tiempos de intervención de

medios aéreos que han participado en cada incendio, obtenida mediante la ponderación del número de horas por medio y el factor de proporcionalidad del tiempo de intervención de cada tipo de medio en relación con el tiempo total de intervención de todos los medios aéreos. HorasMT, representa la contabilidad de los tiempos de medios terrestres que han desarrollado acciones de extinción en cada incendio, obtenida mediante la ponderación del número de horas por medio y el factor de proporcionalidad del tiempo de intervención de cada tipo medio en relación con el tiempo total de intervención de todos los medios terrestres. De esta forma la expresión de la función de producción de Cobb-Douglas, adaptada a la productividad de los medios de extinción es la siguiente:

$$Y = b_0 L^{b_1} K^{b_2} R^{b_3}$$

$$Y = b_0 HorasMT^{b_1} HorasMA^{b_2} INDEX^{b_3}$$

La determinación de las potencias de cada una de las variables explicativas, han sido obtenidas mediante el procedimiento econométrico de regresión por mínimos cuadrados ordinarios (MCO), mediante el programa de análisis econométrico GRETl (GNU Regresion, Econometric and Time-series Library), lo que requiere previamente realizar la linealización de la función de producción tomando logaritmos neperianos, adoptando la función de producción la siguiente forma:

$$\ln Y = \ln b_0 + b_1 \cdot \ln(HorasMT) + b_2 \cdot \ln(HorasMA) + b_3 \cdot \ln(INDEX)$$

La variable explicada (Y) en el proceso metodológico desarrollado, ha sido determinada para cada uno de los incendios forestales de la base de datos seleccionada, considerando el número de medios de extinción por cada tipo y su rendimiento promedio de contención de línea de fuego. La suma de la productividad de cada medio, totalizada para medios terrestres y para medios aéreos determina la productividad (m/min) observada para cada uno de los incendios analizados. La expresión matemática incorpora el número de medios de extinción terrestres por cada tipo (Mt_i) empleados, y de igual modo, el número de medios de extinción terrestres por cada tipo (Ma_j). es la siguiente:

$$Rt = \sum_{i=1}^n Mt_i \cdot \rho_i + \sum_{j=1}^m Ma_j \cdot \rho_j$$

Los rendimientos (ρ_i) de los medios de extinción terrestres y (ρ_j) de los medios de extinción aéreos promedios considerados para cada tipo de medio de extinción se muestra en la tabla 1.

Tabla nº1

Medio de extinción	ρ_i (m/min)	ρ_j (m/min)
Brigada (~12 componentes)	8	
Grupo de especialistas (~7 componentes)	5,27	
Autobomba (3.500l)	12,9	
Helicóptero de transporte y extinción		16,8
Helicóptero bombardero		35,12
Avión de carga en tierra		29
Avión anfibio		42,87

La obtención final de la función de producción predictiva ha sido determinada mediante un proceso de “Aprendizaje Automático” ajustado al cumplimiento de la relación:

$$\sum_{i=1}^n Mt_i \cdot \rho_i + \sum_{j=1}^m Ma_j \cdot \rho_j = b_0 HorasMT^{b_1} HorasMA^{b_2} INDEX^{b_3}$$

3.4. Adaptación de la función de costes a tres factores productivos

En el epígrafe 3.2. fue determinada la función de costes genérica para el caso de dos factores productivos. En el presente procedimiento metodológico de adaptación a la realidad operacional de la supresión de incendios forestales, han sido considerados tres factores productivos, número de horas de intervención de medios terrestres, número de horas de intervención de medios aéreos y la dificultad de extinción. De acuerdo con ello, es necesario realizar la adaptación de la función de costes a los tres factores productivos. El sistema de ecuaciones derivado de la aplicación del multiplicado de Lagrange está formado por las siguientes:

$$\frac{\partial \phi}{\partial L} = b_1 \frac{Y}{L} - \lambda w_L = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial K} = b_2 \frac{Y}{K} - \lambda w_K = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial Z} = b_3 \frac{Y}{Z} - \lambda w_Z = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = (C - w_L L - w_K K - w_Z Z) = 0$$

Siendo L= HorasMT, K= HorasMA y Z=INDEX

La resolución del sistema de ecuaciones proporciona la función de costes de extinción, dependiendo de los tres factores productivos, y condicionada a la maximización de la función de producción de Cobb-Douglas. Las ecuaciones obtenidas para cada uno de los tres factores productivos son las siguientes:

$$C = (w_L L + w_K K + w_Z Z)$$

$$L = \left(\frac{w_K b_1}{w_L b_2} \right)^{\frac{b_2}{b_1+b_2+b_3}} \cdot \left(\frac{w_Z b_1}{w_L b_3} \right)^{\frac{b_3}{b_1+b_2+b_3}} \cdot \left(\frac{Y}{b_0} \right)^{\frac{1}{b_1+b_2+b_3}}$$

$$K = \left(\frac{w_L b_2}{w_K b_1} \right) \cdot \left(\frac{w_K b_1}{w_L b_2} \right)^{\frac{b_2}{b_1+b_2+b_3}} \cdot \left(\frac{w_Z b_1}{w_L b_3} \right)^{\frac{b_3}{b_1+b_2+b_3}} \cdot \left(\frac{Y}{b_0} \right)^{\frac{1}{b_1+b_2+b_3}}$$

$$Z = \left(\frac{w_L b_3}{w_Z b_1} \right) \cdot \left(\frac{w_K b_1}{w_L b_2} \right)^{\frac{b_2}{b_1+b_2+b_3}} \cdot \left(\frac{w_Z b_1}{w_L b_3} \right)^{\frac{b_3}{b_1+b_2+b_3}} \cdot \left(\frac{Y}{b_0} \right)^{\frac{1}{b_1+b_2+b_3}}$$

En relación con el tercer factor productivo, representado por el efecto de la dificultad de extinción en la productividad y dado que su presencia en la función de costes no incorpora precio unitario, se considera para simbólico de la unidad ($w_Z=1\text{€}$).

3.4. Base de datos

Para la modelización de la función de costes se ha utilizado una población muestral de un total de 506 incendios de la base de datos estadísticos del Plan INFOCA (Junta de Andalucía) para el período comprendido entre los años 2010 y 2019. Fueron seleccionadas un total de 15 variables determinadas por el nº de brigadas, el nº de grupos especialistas, el nº de autobombas, nº de

helicópteros de transporte y extinción, el nº de helicópteros bombarderos, el nº de aviones de carga en tierra, el nº de aviones anfibios, los respectivos tiempos de intervención de cada recurso y el índice de dificultad de extinción promedio (Rodríguez y Silva et al. 2020). Los incendios seleccionados incluyen operaciones de extinción en ataque inicial, ataque ampliado y gran incendio.

4. Resultados

De acuerdo con el planteamiento metodológico descrito, ha sido determinada la función de producción de Cobb-Douglas, la modelización predictiva de la función de producción ha presentado una capacidad explicativa superior al 84% (coeficiente de determinación corregido $R^2=0,845$) (tabla nº 2). La calidad del ajuste conseguido en la función de producción, de igual modo, se pone de relieve en los gráficos que muestran el comportamiento entre la variable observada y la predicción (figuras nº 1 y 2).

Los niveles de significancia que proporciona el p-valor, ponen de manifiesto la elevada capacidad explicativa de las variables correspondientes a los tiempos de intervención de los medios terrestres, ($p<0,000$) con rechazo de la hipótesis nula al 90%, 95% y 99% ($p=3,71e-66$) y de igual modo para los medios aéreos, ($p<0,000$) con rechazo de la hipótesis nula al 90%, 95% y 99% ($p=3,25e-24$). La tercera variable explicativa, el índice de dificultad de extinción, tiene un nivel de influencia menor en la productividad de los medios de extinción, con p-valor de 0,66.

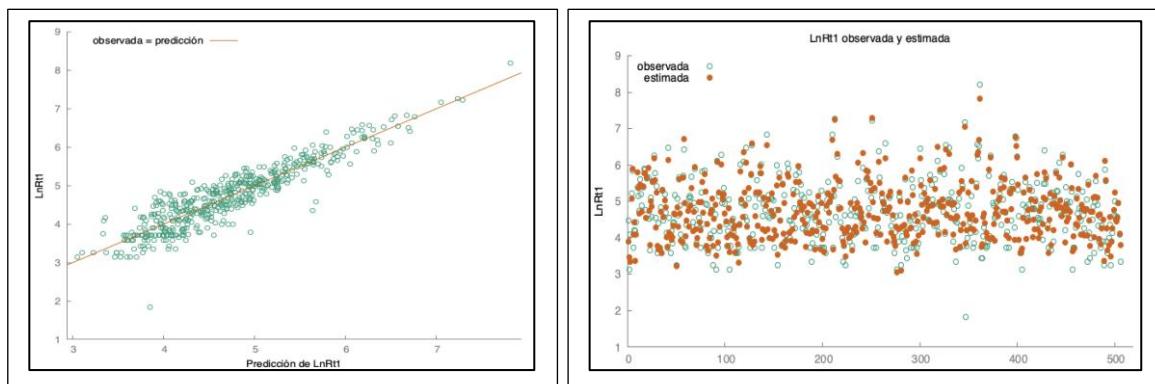


Figura 1 y 2. Gráficos del comportamiento entre la variable observada y la predicción. Elaboración propia.

Tabla 2. Resultado de la modelización de la función de producción. Elaboración propia.

Modelo 1: MC0, usando las observaciones 1–506					
Variable dependiente: LnRt1					
Desviaciones típicas robustas ante heterocedasticidad, variante HC1					
	coeficiente	Desv. típica	Estadístico t	valor p	
const	3.01540	0.0476747	63.25	2.73e-241	***
LnhorasMT1	0.402010	0.0200432	20.06	3.71e-66	***
LnHorasMA1	0.297748	0.0278220	10.70	3.25e-24	***
LnINDEX1	-0.0350871	0.0798954	-0.4392	0.6607	
Media de la vble. dep.	4.724230	D.T. de la vble. dep.	0.830053		
Suma de cuad. residuos	53.29218	D.T. de la regresión	0.325822		
R-cuadrado	0.846835	R-cuadrado corregido	0.845919		
F(3, 502)	990.6121	Valor p (de F)	2.3e-210		
Log-verosimilitud	-148.5439	Criterio de Akaike	305.0877		
Criterio de Schwarz	321.9939	Crit. de Hannan-Quinn	311.7183		
Sin considerar la constante, el valor p más alto fue el de la variable 10 (LnINDEX1)					

Con el fin de incrementar el nivel de significancia del índice de dificultad de extinción (IDEX), se ha realizado un re-escalado del valor del índice, multiplicando el valor por 100 y se ha realizado un segundo ajuste por mínimos cuadrados ordinarios, el resultado obtenido ha mejorado el modelo frente al primero, reduciendo el p-valor en un 50%, y por consiguiente aumentando el nivel de significancia.

Por otra parte, comparando los resultados de los criterios de Akaike, Schwarz y de Hannan-Quinn, obtenidos para cada ambos modelos, se puede observar menores valores en el segundo modelo, lo que corrobora la mejor calidad explicativa y de diseño del segundo modelo con relación al primero (tabla nº 3). De acuerdo con ello, se considera por su mejor comportamiento el modelo segundo, que incluye el re-escalado del índice de dificultad de extinción.

Tabla 3. Resultado de la modelización de la función de producción. Elaboración propia.

Modelo 1: MC0, usando las observaciones 1-506				
Variable dependiente: LnRt1				
Desviaciones típicas robustas ante heterocedasticidad, variante HC1				
	coeficiente	Desv. típica	Estadístico t	valor p
const	3.09695	0.105878	29.25	1.60e-110 ***
LnhorasMT1	0.401610	0.0201133	19.97	1.01e-65 ***
LnHorasMA1	0.301141	0.0285349	10.55	1.19e-23 ***
LnINDEX1001	-0.0284208	0.0317253	-0.8958	0.3708
Media de la vble. dep.	4.724230	D.T. de la vble. dep.	0.830053	
Suma de cuad. residuos	53.23109	D.T. de la regresión	0.325635	
R-cuadrado	0.847010	R-cuadrado corregido	0.846096	
F(3, 502)	993.6627	Valor p (de F)	1.2e-210	
Log-verosimilitud	-148.2537	Criterio de Akaike	304.5074	
Criterio de Schwarz	321.4135	Crit. de Hannan-Quinn	311.1379	
Sin considerar la constante, el valor p más alto fue el de la variable 12 (LnINDEX1001)				

En relación con el comportamiento de los signos de los parámetros obtenidos, se puede indicar que tanto las horas de intervención de los medios terrestres, como los medios aéreos presentan signo positivo, lo que, desde el punto de vista econométrico, pone de manifiesto un correcto comportamiento dada la naturaleza de ambas variables, ya que incrementos en ambas variables reportan incremento en la productividad de los medios de extinción. El índice de dificultad de extinción, de igual modo también presenta un comportamiento correcto, el signo negativo explica cómo todo incremento de valor en la dificultad de extinción representa una minoración en la capacidad productiva de los medios de extinción (tabla nº 4).

Tabla 4. Comportamiento de los signos en los parámetros de las variables explicativas. Elaboración propia

Variable explicativa	Signo	Comportamiento
Horas MT	+	correcto
Horas MA	+	correcto
IDEX	-	correcto

Los resultados del test ANOVA, pone de manifiesta a través del valor proporcionado por F(3, 502) que el p-valor es <0,000= 4,92e-204, y por consiguiente la variabilidad con relación a la media de cada variable y de la tres en su conjunto es muy pequeña, no detectándose comportamientos fuera de los rangos de la reducida variabilidad (tabla nº 5). De igual forma se pone de manifiesto un buen comportamiento en los residuos de la regresión entre las observaciones y las predicciones (figura nº 3).

Tabla 5. Resultado de la modelización de la función de producción. Análisis de la varianza.
Elaboración propia.

Análisis de Varianza:			
	Suma de cuadrados	gl	Media de cuadrados
Regresión	294.646	3	98.2154
Residuo	53.2922	502	0.10616
Total	347.939	505	0.688987

R² = 294.646 / 347.939 = 0.846835
F(3, 502) = 98.2154 / 0.10616 = 925.167 [valor p 4.92e-204]

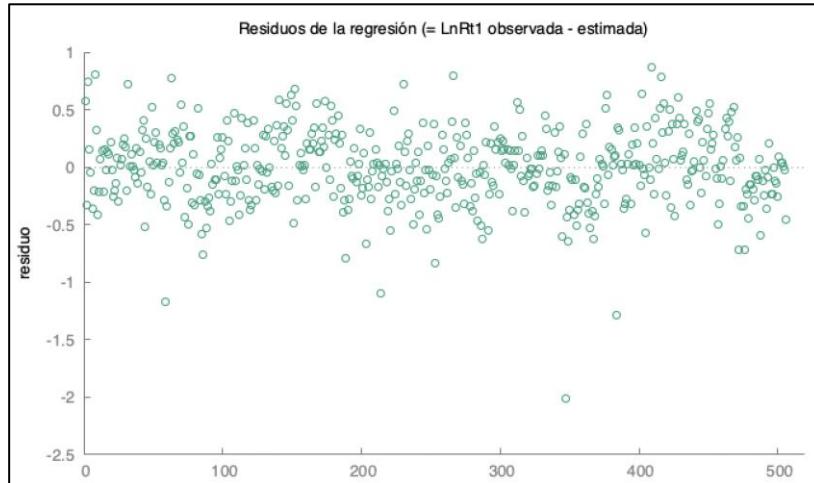


Figura 3. Gráfico de residuos de la regresión (observada-estimada).
Por número de observaciones. Elaboración propia.

La modelización de la función de producción proporciona el valor de la productividad en m/min de contención de línea de fuego, en función de los tiempos de intervención de los medios de extinción y la dificultad de extinción. El valor (Y) obtenido, incluido en la función de coste, proporciona el coste operacional de los medios de extinción intervenientes, sujeto a la restricción de maximización de la capacidad productiva. De acuerdo con el valor de los parámetros de cada una de las tres variables explicativas consideradas en la función de producción, el valor de la predicción del coste de las operaciones de extinción se determina de acuerdo con el siguiente flujo de cálculo (figura nº4):

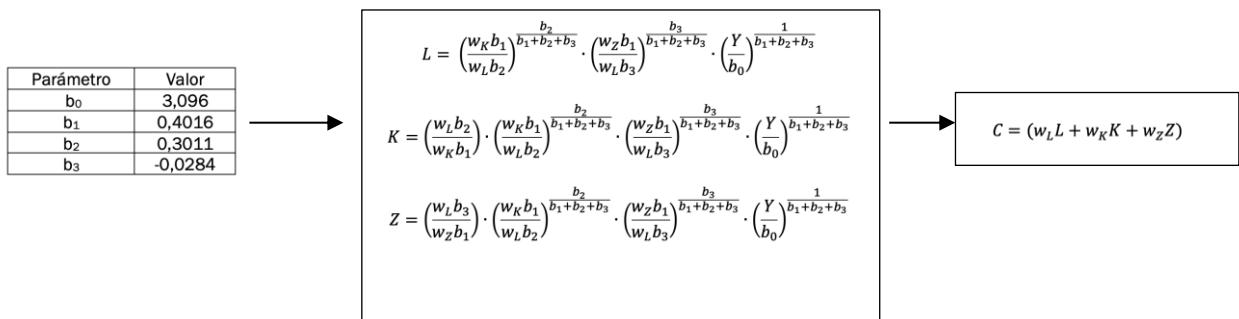


Figura 4. Flujo de cálculo de la función de costes de extinción.

Los precios horarios de los medios de extinción terrestres (w_L) y aéreos (w_K) a introducir en la función de costes se determinan como promedio de los precios de cada tipo de medio y por grupo.

5. Discusión

La aproximación metodológica presentada, proporciona un enfoque novedoso en el que, mediante herramientas econométricas, se ha podido integrar un proceso de maximización productiva de los medios de extinción, cuyo resultado, alcanzado con la determinación de la capacidad productiva de control de línea de fuego y ensamblado en la función de costes, proporciona la predicción de los costes operacionales. Desde el punto de vista de la ayuda en la toma de decisión, la disponibilidad de la función de costes ofrece variadas posibilidades para relacionar la realidad operacional y la planificación estratégica de las acciones de defensa del paisaje forestal frente a los incendios. Por otra parte, ayuda en la reducción de la incertidumbre al poder realizar estudios de contrates entre resultados contabilizados de incendios registrados y tendencias previsibles en escenarios similares en los que la dificultad de extinción se está incrementando por efecto de la complejidad derivada de los efectos alteraciones meteorológicas por efecto del cambio climático.

La incorporación en el modelo de predictivo de la función de producción, de numerosas variables explicativas proporciona sin duda solidez en la determinación de los efectos de los medios de extinción en los rendimientos operacionales, pero incrementa considerablemente la complejidad de cálculo cuando se realiza la maximización de la función de producción mediante la operación lagrangiana. Como solución se ha optado por la creación de variables agregadas. Si bien esta vía hace factible las operaciones algebraicas requeridas para poder determinar los componentes de la función de costes, se asume pérdida de la información que aporta cada variable asociada por tipo de medio de extinción. Ello ocurre cuando se obtiene la variable virtual que totaliza el efecto de todos los medios de extinción terrestres y aéreos. De igual forma ocurre cuando se emplea un valor promedio del precio de los medios de extinción.

La elaboración de mapas de dificultad de extinción, para dos tipos de escenarios meteorológicos, el correspondiente a los valores promedio determinado en series históricas y el derivado de la media de las condiciones extremas, facilita la predicción de la productividad espacializada de las acciones de extinción en función de los escenarios y de las estimaciones numéricas de los tiempos de intervención de los medios de extinción. En la aproximación metodológica no han sido incluidas variables relacionadas con la superficie final de control de los incendios, la presencialidad de zonas de carácter urbano-forestal y la simultaneidad de incendios, responsables estas dos últimas de la generación de perturbaciones en el desarrollo productivo de los medios de extinción intervenientes.

6. Conclusiones

La determinación de las inversiones presupuestarias para el fortalecimiento de los programas de defensa contra los incendios forestales ha de apoyarse en herramientas de ayuda a la toma de decisión, que permitan adscribir de forma eficiente las soluciones estratégicas a las necesidades de la protección y defensa del paisaje forestal frente a los incendios. La novedosa incorporación de modelos econométricos basados en aprendizaje automático, capaces de proporcionar predicciones de rendimiento operacionales, productividad y costes, ofrecen vías de investigación aplicada para el desarrollo de soluciones, tanto generales como particulares en función de los requerimientos de los paisajes a gestionar y proteger. La aproximación metodológica desarrollada en el presente trabajo, proporciona buenas oportunidades y opciones de adaptación y de futuras implementaciones.

7. Agradecimientos

El autor manifiesta su agradecimiento al proyecto VIS4FIRE (RTA2017-00042-C05-01) del ministerio de Ciencia e Innovación y los proyectos de la Unión Europea CILIFO (Interreg-POCTEP-

0753_CILIFO_5_E) y FIREPOCTEP (Interreg-POCTEP-0756_FIREPOCTEP_6_E). De igual modo manifiesta el agradecimiento a la Dirección del Centro Operativo Regional del Plan INFOCA de la Junta de Andalucía por facilitar la información de los registros estadísticos de la ocurrencia de incendios forestales.

8. Bibliografía

ÁLVAREZ PINILLA A.; ARIAS SAMPEDRO C.; OREA SÁNCHEZ L. 2003. Introducción al análisis empírico de la producción. Universidad de Oviedo.

GUDE PH.; JONES K.; RASKER R.; GREENWOOD MC. (2013). Evidence for the effect of homes on wildfire suppression costs. *Int J Wildland Fire* 22(4):537–548.

HAND MS.; GEBERT KM.; LIANG J.; CALKIN DE.; THOMPSON MP.; ZHOU M. (2014) Economics of wildfire management: the development and application of suppression expenditure models. Springer, Dordrecht.

HOLMES, T.P.; CALKIN, D.E. 2013. Econometric analysis of fire suppression production functions for large wildland fires. *Int. J. Wildland Fire* 22, 246e255.

KATUWAL H.; CALKIN D.; HAND M. 2016. Production and efficiency of large wildland fire suppression effort: A stochastic frontier analysis. *Journal of Environmental Management* 166 (2016) 227-236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.030>.

LIANG J.; CALKIN DE.; GEBERT KM.; VENN TJ.; SILVERSTEIN RP. (2008) Factors influencing large wildland fire suppression expenditures. *Int J Wildland Fire* 17(5):650–659

NIPUM S. 2022. Derivation of Cost Schedules from a Production Function. Economics Discussion. <https://www.economicsdiscussion.net/firm/derivation-of-cost-schedules-from-a-production-function-firm/25525> (disponible: 21 de enero de 2022).

RODRIGUEZ Y SILVA F.; GONZALEZ-CABAN A.; (2010). ‘SINAMI’: a tool for the economic evaluation of forest fire management programs in Mediterranean ecosystems. *International Journal of Wildland Fire* 19, 927–936. doi:10.1071/WF09015.

RODRIGUEZ Y SILVA F.; MARTINEZ JRM.; GONZALEZ-CABAN A. (2014) A methodology for determining operational priorities for prevention and suppression of wildland fires. *International Journal of Wildland Fire* 23, 544– 554. doi:10.1071/WF13063.

RODRIGUEZ Y SILVA F.; MOLINA JR. (2016) Los incendios forestales en España en un contexto de cambio climático: Información y herramientas para la adaptación (INFOADAPT). Memoria final del proyecto. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Universidad de Castilla-La Mancha.

RODRÍGUEZ Y SILVA, FCO. 2017. Modelización económrica de la productividad de las operaciones de extinción de incendios forestales en ecosistemas mediterráneos. Trabajo fin de máster en Investigación en Economía. Universidad Nacional de Educación a Distancia UNED. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Madrid.

RODRIGUEZ Y SILVA F. (2017) Aproximación metodológica para modelización econométrica de la productividad en la extinción de incendios forestales. 7º Congreso Forestal Español. Disponible en: <http://7cfe.congresoforestal.es/content/aproximacion-metodologica-para-modelizacion-econometrica-de-la-productividad-en-la-extincion> [Verificado 21 enero 2022].

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; O'CONNOR, C.; THOMPSON, M.; MOLINA, J.R.; CALKIN, D. 2020. Modelling suppression difficulty: current and future applications. *Int. J. Wildland Fire*, página 739 – 753.