



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1940

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Evaluación de la efectividad y eficiencia de la extinción de incendios forestales en Andalucía

ORTEGA, M. (1) LÓPEZ SANCHO, A.(2) MOLINA, J.R. (1)

(1) Forest Fire Laboratory (LABIF). Forestry Engineering Department. University of Cordoba. 14071 Cordoba. Spain.

(2) Wildfire behaviour analysis and planification unit. Plan INFOCAM, Castilla-La Mancha Fire Service. GEACAM. Spain.

Resumen

El empleo de índices para evaluar la efectividad y eficiencia en la extinción ha cobrado creciente importancia debido a la necesidad de optimizar la gestión de incendios forestales, especialmente en un contexto de cambios en su régimen, y ante las limitaciones presupuestarias de las administraciones competentes. Esta investigación consiste en un análisis de la efectividad y eficiencia de la extinción de incendios forestales en Andalucía durante un período de nueve años (2011-2019) a través del cálculo de tres índices: el Factor de Contracción Superficial (ACF), la Eficiencia Técnica (TE) y el Índice de Gestión (MI). Para ello se requirieron datos relacionados con el comportamiento observado del fuego y datos operacionales oficiales publicados por INFOCA, junto con simulaciones realizadas con el software Visual-SEVEIF sobre comportamiento del fuego y sus impactos económicos.

Este trabajo sugiere que ACF y TE fueron los índices que mejor explicaron, respectivamente, la efectividad y la eficiencia de la extinción de los incendios forestales estudiados. Se encontraron varios factores que influyen significativamente en estos índices. Los incendios que ocurrieron al principio de la campaña de incendios y los que se controlaron de noche fueron los que se gestionaron con mayor efectividad. Por el contrario, los incendios de rápida propagación, especialmente los que tienen el viento como su principal vector de propagación (incendios de viento), se controlaron con menor efectividad. Además, variables operacionales como el tiempo de control influyen positivamente en ACF y TE.

Este novedoso análisis identificó los factores que tuvieron mayor influencia en la efectividad y eficiencia en la extinción de incendios forestales en Andalucía, proporcionando una mejor comprensión de los rendimientos operacionales lo que puede ayudar a la elección de una asignación más óptima de los recursos de extinción.

Palabras clave

Relación coste-beneficio, Relación coste-efectividad, Factor de contracción superficial, eficiencia técnica, índice de gestión, Visual-SEVEIF, costes de extinción, impacto económico

Introducción

El nuevo régimen de incendios y la ocurrencia simultánea de grandes incendios (ROGERS et al., 2020; SAN MIGUEL-AYANZ et al., 2022) requieren una asignación óptima de los recursos de extinción (RODRÍGUEZ Y SILVA et al., 2016; CASTELLNOU et al., 2019; ORTEGA et al., 2023b). La equilibrada distribución del presupuesto y la priorización de los esfuerzos de extinción son esenciales para una gestión eficaz, especialmente cuando los incendios extremos superan las



capacidades de extinción (MOLINA et al., 2019a). Para ello, y como apoyo a la toma de decisiones, los gestores necesitan herramientas de evaluación del riesgo (CALKIN et al., 2011; THOMPSON et al., 2022), resultando clave la inclusión de la evaluación económica de los impactos causados por el fuego. Esta evaluación debe ser integral, considerar el comportamiento del fuego y sus implicaciones ecológicas y económicas (FARBER et al., 2002) y contemplar tanto los recursos tangibles (RODRÍGUEZ Y SILVA et al., 2012) como los intangibles (WANG et al., 2021). Además, dadas las restricciones presupuestarias para la gestión forestal, es crucial evaluar la efectividad y eficiencia de las operaciones de extinción en escenarios de incendios forestales reales (FRIED & GILL, 2008). Según KOCH y KRAWCHUK (Krawchuk (2013), la efectividad de la gestión del incendio implica evaluar hasta qué punto las estrategias y tácticas implementadas logran los resultados deseados en términos de control del fuego y reducción de los impactos. FRIED & GILL (2008) subrayan que la eficiencia en la gestión del incendio implica utilizar óptimamente los recursos disponibles para maximizar los beneficios, teniendo en cuenta las restricciones presupuestarias y los recursos limitados.

Este estudio ofrece a los gestores herramientas para evaluar la efectividad y eficiencia de la extinción, basadas en el análisis de los impactos del fuego. Los resultados de este trabajo pueden ser empleados para priorizar estrategias de prevención, respaldar las decisiones durante emergencias por incendios forestales y optimizar la eficiencia de la extinción.

Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la efectividad y eficiencia de la extinción de incendios forestales en 39 incendios reales acontecidos en Andalucía entre 2011 y 2019 a través de la estimación de tres índices: Factor de Contracción Superficial (ACF), Eficiencia Técnica (TE) e Índice de Gestión (MI).

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se empleó el software Visual-SEVEIF (RODRÍGUEZ Y SILVA et al., 2013; ORTEGA et al., 2023a), un simulador de la propagación de incendios forestales basado en el modelo de Rothermel (ROTHERMEL, 1983; ANDREWS, 2014) que incluye un módulo económico para evaluar los impactos del fuego, tanto en los recursos naturales tangibles como intangibles (MOLINA et al., 2009; RODRÍGUEZ Y SILVA et al., 2013; ORTEGA et al., 2023a). La valoración económica se fundamenta en los cambios de valor neto de los recursos según el efecto esperado del fuego en función de su intensidad y de la resiliencia del ecosistema (MOLINA et al., 2009). La base de datos para esta investigación se construyó a partir de la información oficial proporcionada por la agencia de extinción de incendios forestales de Andalucía (INFOCA) y los resultados obtenidos de simulaciones realizadas con Visual-SEVEIF. El área quemada real (ha) se calculó a partir del perímetro oficial del incendio en el momento en que se declaró controlado. También se recopiló variables del comportamiento del fuego, como la velocidad de propagación observada (m/min), la longitud de las llamas observada (m), el vector de la propagación del incendio (topografía, viento y convección), el tipo de incendio (superficial y de copa), así como datos operativos como la fecha, tiempo de respuesta (min), tiempo de control (h), tiempo de control diurno (h), tiempo de control nocturno (h), provincia y modelo de combustible (en el punto de ignición y el más representativo en el interior del perímetro del incendio). A partir de estos datos, se calcularon otras variables como la tasa de crecimiento (ha/h), la presencia



de interfaz urbano-forestal y la franja horaria (diurna y nocturna). Además, se estimaron los costes reales de supresión (€, €/ha, €/h) a partir de los costes unitarios por tipo de recurso de extinción, establecidos oficialmente por la Junta de Andalucía. Esta estimación consideró el número de recursos despachados y su tiempo de trabajo en cada incendio estudiado. Las variables simuladas fueron el área quemada potencial (ha), los impactos económicos potenciales del incendio (€) y los impactos económicos reales del incendio (€). El área quemada potencial se refiere al área estimada que podría ser afectada por un incendio forestal bajo condiciones específicas, representando la extensión máxima que el incendio podría alcanzar sin trabajos de extinción (propagación libre). La duración de la simulación corresponde al tiempo hasta que el incendio se declaró controlado (sin expansión adicional del perímetro). El Factor de Contracción Superficial (ACF) se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$ACF = 1 - A_r / A_p \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde A_r es el área real quemada con los esfuerzos de extinción (ha) y A_p es el área potencial quemada (ha) sin considerar el efecto de los recursos de supresión. El ACF varía entre 0 y 1. Los valores cercanos a 1 indican la mayor efectividad en la supresión. El ACF puede clasificarse en categorías cualitativas: Baja efectividad ($ACF \leq 0.28$), Efectividad moderada ($0.28 < ACF \leq 0.48$), Alta efectividad ($0.48 < ACF \leq 0.8$) y Muy alta efectividad ($ACF > 0.8$) (RODRÍGUEZ Y SILVA & GONZÁLEZ-CABÁN, 2016).

La Eficiencia Técnica (TE) se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$TE = 1 - C / (I_p - I_r) \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde C son los costes totales de supresión, tanto de recursos aéreos como terrestres (€), I_p son los impactos económicos potenciales simulados del fuego (€), I_r son los impactos reales del fuego (€), y $(I_p - I_r)$ representan las pérdidas que se evitaron con los esfuerzos de supresión (€). TE puede clasificarse en categorías cualitativas para simplificar el proceso para los gestores de incendios: Baja eficiencia ($TE \leq 0.25$), Eficiencia moderada ($0.25 < TE \leq 0.5$), Alta eficiencia ($0.5 < TE \leq 0.7$) y Muy alta eficiencia ($TE > 0.7$) (RODRÍGUEZ Y SILVA & GONZÁLEZ-CABÁN, 2016).

El Índice de Gestión (MI) se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$MI = (100 * ACF) / (C / A_r) \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde IMI es el Índice de Gestión, ACF es el Factor de Contracción del Área, C son los costes totales de supresión (€), y A_r es el área real quemada con los esfuerzos de extinción (ha). Valores más altos de IMI indican una mayor eficiencia en la supresión. Si el IMI está en su valor máximo, el ACF también estará en su máximo, mientras que el costo de supresión areal (€/ha) estará en su mínimo. Finalmente, utilizamos la correlación de Pearson para evaluar las relaciones entre las variables dependientes estudiadas (ACF, TE y MI). Se utilizó el Modelo Aditivo Generalizado (GAM) para analizar los efectos de los factores operacionales y relacionados con el incendio, tanto continuos como categóricos, sobre las variables dependientes. El nivel de significancia se estableció en $p < 0.05$. Además, la



normalidad del modelo se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, lo que confirmó la idoneidad de los métodos estadísticos empleados. Adicionalmente, nos aseguramos de que no existieran correlaciones significativas entre las variables dependientes ($r < 0,2$).

Resultados

Acorde a los resultados reflejados en la Tabla 1, el Factor de Contracción Superficial (ACF) varió de 0,20 a 0,99, con un valor promedio de 0,67. La Eficiencia Técnica (TE) osciló entre 0 y 1, con un promedio de 0,61. El Índice de Gestión (MI) varió de 0,02 a 2,82, con un valor medio de 0,24. La variable dependiente ACF se modeló en función de variables categóricas (provincia, mes de inicio y franja horaria) y variables continuas (tasa de crecimiento del incendio y tiempo de control). El rendimiento general del modelo fue robusto, explicando el 73,9% de la desviación y con un R-cuadrado ajustado de 0,633. ACF estuvo significativamente influenciado por la provincia, mostrando mayor efectividad en Sevilla (mediana = 0,87, $p = 0,003$). Los incendios que comenzaron en los meses de junio (mediana = 0,39, $p = 0,007$), julio (mediana = 0,825, $p = 0,027$) y agosto (mediana = 0,69, $p = 0,038$) redujeron significativamente el ACF en comparación con los incendios ocurridos en mayo (categoría de referencia, mediana = 0,865). Además, los incendios que comenzaron durante la noche ($p = 0,028$) estuvieron asociados con un ACF significativamente mayor que aquellos que comenzaron durante el día. También, ACF se asoció negativamente con la tasa de crecimiento ($p < 0,001$) y se correlacionó positivamente con el tiempo de control ($p = 0,0017$).

La variable dependiente TE se analizó en función de la variable continua tiempo de control y la variable categórica provincia. El valor de R-cuadrado ajustado de 0,219 indica que aproximadamente el 21,9% de la varianza en TE es explicada por el modelo. El modelo explica el 30,1% de la desviación, lo que indica que proporciona un ajuste moderado, capturando algunas de las relaciones entre las variables independientes y TE.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos y ajuste de ACF, TE y MI

Característica	ACF	TE	MI
Rango	0.20 – 0.99	0 – 1	0.02 – 2.82
Media	0.67	0.61	0.24
Rango Intercuartílico (IQR)	0.40	0.58	0.19
R2	0.63	0.22	No significativo
Variables influyentes	Provincia, mes de inicio, franja horaria,	tasa de crecimiento del fuego, tiempo de control	Provincia, tiempo de control

Discusión

Visual-SEVEIF puede apoyar la estimación de áreas quemadas potenciales e impactos económicos del fuego, lo que lo convierte en una herramienta útil para evaluar los índices de efectividad y eficiencia en la gestión de incendios forestales (ORTEGA et al., 2023a). Según nuestros resultados, ACF y TE proporcionan mejores estimaciones de



efectividad y eficiencia que MI. Además, sugieren que TE y MI podrían recomendarse para su uso en incendios de ataque extendido (MACMILLAN et al., 2022) debido a la necesidad de una planificación y logística más complejas, lo que implica costes más altos que los de las operaciones de ataque inicial. Cuando un incendio escapa del ataque inicial, se requiere una mayor organización y priorización de los esfuerzos de extinción (MACMILLAN et al., 2022). Nuestros resultados destacan la importancia tanto de los factores ambientales como operacionales en los resultados de la extinción de incendios forestales. En cuanto a TE, los incendios que duraron más tiempo estuvieron asociados con una mayor eficiencia. Aunque pueda parecer contradictorio que los incendios más largos puedan llevar a una mayor eficiencia en la supresión, los incendios de mayor duración suelen permitir una mejor planificación y asignación de recursos, ajustando las tácticas de supresión en función de observaciones en tiempo real. Las agencias de gestión de incendios pueden movilizar más personal, equipos, apoyo aéreo a lo largo del tiempo y mejorar la implementación de estrategias, lo que puede conducir a esfuerzos de supresión más efectivos. Además, en estas circunstancias, la eficiencia de costes de la extinción del fuego también puede mejorar al reducir los costes por hora, ya que los gastos de movilización iniciales se compensan con la efectividad prolongada de los recursos. También encontramos diferencias en TE entre las diferentes provincias andaluzas debido a las diferencias en el valor de los servicios ecosistémicos salvados y los costes de extinción.

ACF cambió significativamente a lo largo de la temporada de incendios, con valores más bajos en junio en comparación con los meses de mayor actividad de incendios en Andalucía (julio y agosto). Aunque se esperaría un comportamiento más adverso del fuego en julio y agosto, el rendimiento de los bomberos a principios de temporada puede estar mermado por una menor disponibilidad de recursos de extinción y menor preparación operativa. Además, los incendios que comenzaban durante el día fueron contenidos de manera menos eficaz en comparación con los incendios ocurridos por la noche. Durante la noche, el comportamiento del fuego suele ser menos adverso debido al aumento del contenido de humedad en los combustibles muertos y la disminución general de la velocidad del viento (BROWN et al., 2022). Por lo tanto, aunque los recursos aéreos no pueden operar de noche (SKORIN-KAPOV et al., 2024), la efectividad fue mayor en incendios nocturnos. Por otro lado, los incendios de propagación rápida (tasa de crecimiento) redujeron el ACF probablemente debido a que la propagación del fuego superó las tasas de apertura de línea de defensa a lo largo del perímetro del incendio (ORTEGA et al., 2023b; GARCÍA, 2018). Además, y a pesar de que la diferencia entre los incendios de viento y los topográficos no fue significativa ($p = 0,08$), los incendios de viento tendieron a tener un ACF más bajo. Se trata de incendios que, generalmente, presentan velocidades de propagación y crecimientos del perímetro mayores (ROTHERMEL, 1983; ANDREWS, 2014) con gran generación de salto de pavesas (ALBINI, 1983). Además, los incendios impulsados por la topografía suelen tener un comportamiento de fuego más predecible y oportunidades de supresión en las crestas (POVAK et al., 2018). Las operaciones de extinción también influyeron significativamente en ACF. Así, la duración más corta del incendio hasta el control llevó a una reducción de la efectividad de la extinción del incendio. Esto sugiere que el rendimiento de los bomberos aumenta en ataques extendidos bien establecidos con tácticas y estrategias evaluadas. Sin embargo, no encontramos evidencias estadísticas sobre el papel del tiempo de respuesta en la influencia sobre ACF, probablemente debido



a la baja variabilidad de esta variable dada la fuerte y rápida respuesta de los incendios a todos los incidentes en Andalucía (CASTILLO & RODRÍGUEZ Y SILVA, 2015; FERRER Y SÁNCHEZ, 2007).

Conclusiones

La evaluación de la efectividad y eficiencia permite a los gestores de incendios optimizar la asignación de recursos y evaluar los rendimientos operacionales. Este estudio destaca la importancia de utilizar datos de campo para identificar los factores que influyen en la contención y eficiencia de la extinción de incendios forestales. Nuestra investigación reveló que ACF y TE podrían proporcionar una mejor cuantificación de la efectividad y eficiencia, respectivamente, en comparación con MI. Identificamos un conjunto de variables que influyen significativamente en ACF y TE. Los incendios forestales que ocurrieron al principio de la temporada de incendios y las operaciones de extinción realizadas de noche tuvieron una mayor efectividad en la supresión, mientras que los incendios de rápida propagación, especialmente los impulsados por el viento, la redujeron. Además, un mayor tiempo de control influyó positivamente en ACF y TE.

Agradecimientos

En memoria de Francisco Rodríguez y Silva, creador de Visual-SEVEIF.

Los autores agradecen a INFOCA su esfuerzo en la recopilación de datos de incendios forestales y la aportación que ello supone para la ciencia.

Esta investigación recibió financiación del proyecto FireURisk (H2020-LC-417 CLA-2020-101003890) y del proyecto ENFIRES (PID2020-116494RR-C44) de la Agencia Estatal de Investigación (España).

Bibliografía

ALBINI F.A., 1983. Potential Spotting Distance from Wind-Driven Surface Fires. United States Department of Agriculture Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, Utah 84401 Research Paper INT-309, 27 pp.

ANDREWS P.L., 2014. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire* 23(1), 21-33.

BROWN T., ABATZOGLOU J., MCEVOY D., SKELLY D., ST. DENIS L.A., PARKINSON T., 2022. Climate Change and Nighttime Fire Behavior. *Environmental Sciences Proceedings* 17(1), 55.

CALKIN D., THOMPSON M.P., FINNEY M., HYDE K.D., 2011. A Real-Time Risk Assessment Tool Supporting Wildland Fire Decisionmaking. *Journal of Forestry* 109(5), 274-280.

CASTELLNOU M., PRAT-GUITART N., ARILLA E. et al., 2019. Empowering strategic decision-making for wildfire management: avoiding the fear trap and creating a resilient landscape. *Fire Ecology* 15, 31.

CASTILLO M., RODRÍGUEZ Y SILVA F., 2015. Determining response times for the deployment of terrestrial resources for fighting forest fires: A case study: Mediterranean - Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 42(1), 97-107.

FARBER S., COSTANZA R., WILSON M., 2002. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological Economics* 41(3), 375-392.

FERRER G., SÁNCHEZ J., 2007. Sistema de Manejo de Emergencias por Incendios



Forestales (SMEIF). 4th International Wildland Fire Conference. Sevilla. Available in:

<https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/documents/20151/589228/smeif.pdf/5c7521b0-90bc-6c2c-4d16-224d2797832c?t=1434960587000>.

FRIED, J. S., GILL, S. J., 2008. Economic impacts of wildfire management in the United States. In: Fire and Climate Change: A Global Perspective. Springer.

GARCÍA J.P., 2018. Lecciones Aprendidas en el Gran Incendio Forestal de Yeste 2017 (Albacete). Una guía metodológica para la capitalización de la experiencia operativa. Trabajo Final de Máster. Universitat de Lleida. Lleida, 121 pp.

KOCH, J. M., KRAWCHUK, M. A., 2013. Evaluating fire management effectiveness in a changing climate: A case study of the 2012 fire season in the western United States. *Journal of Fire Sciences*, 31(3), 200-220.

MACMILLAN R., SUN L., TAYLOR S.W., 2022. Modeling Individual Extended Attack Wildfire Suppression Expenditures in British Columbia. *Forest Science* 68(4), 376-388.

MOLINA J.R., RODRÍGUEZ Y SILVA F., HERRERA M.A., ZAMORA R., 2009. A Simulation Tool for Socio-economic Planning on Forest Fire Suppression Management. In: Gómez G, Álvarez K, (Eds.). *Forest Fires: Detection, Suppression, and Prevention*. Nova Science Publishers Inc, Hauppauge New York.

MOLINA J.R., GONZÁLEZ-CABÁN A., RODRÍGUEZ Y SILVA F., 2019. Potential Effects of Climate Change on Fire Behavior, Economic Susceptibility and Suppression Costs in Mediterranean Ecosystems: Córdoba Province, Spain. *Forests* 10, 679.

ORTEGA M., SANCHO A., MOLINA J.R., 2023a. Visual-SEVEIF: a tool for economic planning on wildfire decision-making. 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Split/Bol, Croatia. pp. 1-7.

ORTEGA M., RODRÍGUEZ Y SILVA F. MOLINA JR., 2023b. Fireline production rate of handcrews in wildfires of the Spanish Mediterranean region. *International Journal of Wildland Fire* 32, 1503-1514.

POVAK N.A., HESSBURG P.F., SHALTER R.B., 2018. Evidence for scale-dependent topographic controls on wildfire spread. *Ecosphere* 9(10), e02443. [10.1002/ecs2.2443](https://doi.org/10.1002/ecs2.2443).

RODRÍGUEZ Y SILVA F., MOLINA J.R., GONZÁLEZ-CABÁN A., HERRERA M.A., 2012. Economic vulnerability of timber resources to forest fires. *Journal of Environmental Management* 100, 16-21.

RODRÍGUEZ Y SILVA F., MOLINA J.R., HERRERA M.A., RODRÍGUEZ-LEAL J.M., 2013. VISUAL-SEVEIF, a Tool for Integrating Fire Behavior Simulation and Economic Evaluation of the Impact of Wildfires. General Technical Report PSW-GTR-245. Pacific Southwest Research Station. USA, pp 163-178.

RODRÍGUEZ Y SILVA F., GONZÁLEZ-CABÁN A., 2016. Contribution of suppression difficulty and lessons learned in forecasting fire suppression operations productivity: A methodological approach. *Journal of Forest Economics* 25, 149-159.

ROGERS B.M., BALCH J.K., GOETZ S.J., LEHMANN C.E.R., TURETSKY M., 2020. Focus on changing fire regimes: Interactions with climate, ecosystems, and humans. *Environmental Research Letters* 15 030201.

ROTHERMEL R.C., 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. General Technical Report INT-143. U.S. Department of Agriculture,



Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, 161 pp.

SAN-MIGUEL-AYANZ J., DURRANT T., BOCA R., LIBERTÀ G., BRANCO A., DE RIGO Ad., FERRARI D., MAIANTI P., VIVANCOS T. A., OOM D., PFEIFFER H., GRECCHI R., 2022. Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2021.

SKORIN-KAPOV N., MESARIC L., PEREÑÍGUEZ-GARCÍA F., SKORIN-KAPOV L., 2024. Scheduling aerial resource operations for the extinction of large-scale wildfires. *Omega* 122, 102941.

THOMPSON M.P., O'CONNOR C.D., GANNON B.M. et al., 2022. Potential operational delineations: new horizons for proactive, risk-informed strategic land and fire management. *Fire Ecology* 18, 17.

WANG, D., GUAN, D., ZHU, S., KINNON, M. MAC, GENG, G., ZHANG, Q., ZHENG, H., LEI, T., SHAO, S., GONG, P., DAVIS, S. J., 2021. Economic footprint of California wildfires in 2018. *Nature Sustainability*, 4(3), 252–260.