

# **¿Los Tratamientos de Combustible Reducen los Costos de Supresión de Incendios Forestales y Daños a la Propiedad? Análisis de los Costos de Supresión y Daños a la Propiedad en los Bosques Nacionales de los Estados Unidos<sup>1</sup>**

**John Loomis<sup>2</sup>, José J. Sánchez<sup>3</sup>, Armando González-Cabán<sup>3</sup>, Douglas Rideout<sup>4</sup> and Robin Reich<sup>4</sup>**

## **Resumen**

Este trabajo reporta los resultados de dos pruebas de hipótesis sobre si los tratamientos de reducción de combustible usando métodos prescritos de quema y mecánicos reducen los costos de supresión de incendios forestales y daños a la propiedad. Para probar estas dos hipótesis se recopilieron datos sobre tratamientos de combustible, costos de supresión de incendios y daños a la propiedad asociados con incendios forestales en los Bosques Nacionales de los Estados Unidos durante un período de cinco años. Los resultados de las regresiones múltiples muestran que sólo en California el tratamiento mecánico de combustible redujo los costos de supresión de incendios forestales. Sin embargo, los resultados de nuestras segundas pruebas de hipótesis de que los tratamientos de combustible, al hacer que los incendios forestales sean menos dañinos y más fáciles de controlar, puedan reducir los daños a la propiedad (por ejemplo, estructuras-graneros, edificios, etc. y residencias perdidas) parece confirmarse para los acres tratados con la quema prescrita. En tres de las tres regiones geográficas de los Estados Unidos que experimentaron pérdidas significativas de propiedades, la quema prescrita redujo el número de estructuras dañadas por incendios forestales.

Palabras clave: reducción mecánica de combustible, quemado prescrito, daños a la propiedad, costos de supresión de incendios forestales

---

<sup>1</sup> Una versión abreviada de este trabajo se presentó en el Quinto Simposio Internacional sobre Economía, Planificación y Política de Incendios: Servicios de Incendios Forestales y Ecosistemas, 14-18 de noviembre de 2016, Tegucigalpa, Honduras.

<sup>2</sup> Profesor, Departamento de Economía Agrícola y de Recursos, Universidad Estatal de Colorado, Fort Collins, CO 80523; Correo electrónico: John.Loomis@colostate.edu

<sup>3</sup> Estadístico de Investigación y Economista de Investigación, respectivamente, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Riverside, CA 92507.

<sup>4</sup> Profesores, Departamento de Ciencias Forestales y Cuencas, Universidad Estatal de Colorado, Fort Collins, CO 80523

## Introducción

En todo el mundo, grandes incendios forestales e incendios en la interfaz forestal-urbana (IFU) han aumentado en frecuencia, tamaño, costos de supresión y daños a la propiedad. Por ejemplo, durante el último decenio el Servicio Forestal del USDA solo ha incurrido en costos de supresión de incendios forestales de más de \$ 19 mil millones combatiendo incendios forestales que han quemado más de 39 millones de hectáreas de bosques y matorrales (NIFC 2014). Además, en el período de 1999 a 2010 se quemaron más de 1100 casas y se perdieron 230 vidas (Gude et al., 2013). Además, se reconoce cada vez más la ineffectividad de combatir incendios en ecosistemas donde las políticas previas de exclusión de incendios han llevado a acumulaciones peligrosas de combustible. Por ejemplo, ver el informe GAO 2015 (GAO: 1) que dice... *"Sin embargo, durante el siglo pasado, varias prácticas de manejo de la tierra, incluyendo la supresión de incendios, han interrumpido la frecuencia normal de incendios en muchos ecosistemas de bosques y pastizales en los Estados Unidos, resultando en acumulaciones anormalmente densas de vegetación..."* "La revisión de incendio cuatrienal del 2014 (Hamilton 2015: iii) afirma además que *"... Los niveles de combustible también están en niveles sin precedentes debido al cambio climático, décadas de supresión que han limitado los incendios a niveles de pre-guerra de 25 a 40 millones de acres quemados por año a 5 millones o menos desde los años 1960, y un declive en el manejo forestal activo..."* Una estrategia para revertir esta tendencia es realizar tratamientos de reducción de combustible tales como la quema prescrita y la reducción mecánica de combustible. En general, dentro de la comunidad de manejo de incendios se cree que tales tratamientos de reducción de combustible, serán efectivos en la reducción de los costos de supresión de incendios forestales y daños a la propiedad. Este documento prueba las hipótesis de que las prácticas actuales de tratamiento de combustible reducen los costos de supresión de incendios forestales y los daños materiales asociados con incendios forestales en los bosques nacionales de los Estados Unidos durante los últimos cinco años.

## Revisión de Literatura

En general, las tres razones más comunes encontradas en la literatura para explicar el aumento actual en los daños causados por incendios forestales y los costos de supresión son: 1) la acumulación de combustibles resultado en parte por políticas pasadas de supresión de incendios, 2) temperaturas más cálidas y condiciones de sequía, y 3) expansión del IFU en paisajes propensos al fuego. Nuestra revisión de la literatura está organizada alrededor de estas tres razones, aunque el énfasis está en la 1 y la 3, ya que estas pueden ser influenciadas por el manejo forestal.

Desde una perspectiva teórica, Rideout et al. (2008) exploraron el tema de si los tratamientos de combustible tienen el potencial de reducir los costos de supresión de incendios forestales en el área tratada. Ellos mostraron que es difícil establecer una relación inequívoca entre los tratamientos de combustible y los costos de supresión resultantes, sin tener en cuenta el nivel implícito de daños netos por incendio. Además, los tratamientos anteriores del combustible a menudo hacen que los esfuerzos de supresión de incendios sean más efectivos y, por lo tanto, más, no menos, la supresión puede justificarse en áreas que han sido tratadas, que en áreas no tratadas (el cual puede ser demasiado inseguro para participar en la supresión de incendios forestales o la supresión de incendios forestales hará poco para reducir los daños). Por otra parte, debido a que la supresión de incendios puede ser más efectiva, el tamaño final del incendio podría ser menor, lo que potencialmente reduce los costos de supresión de incendios y daños a la propiedad. Pero el efecto neto de estas posibles relaciones es una cuestión empírica que sólo se puede abordar con datos sobre los costos reales de supresión de incendios en las áreas tratadas frente a las no tratadas. Por lo tanto, nos dirigimos primero a la literatura existente para ver lo que los análisis empíricos previos han encontrado y para guiar nuestras pruebas empíricas de hipótesis.

Un estudio de los costos de supresión en el oeste de Estados Unidos por Gebert et al. (2007), encontró que los valores más altos de vivienda dentro de las 20 millas de una ignición de incendios forestales aumentaron los gastos de supresión. Todas las demás variables que influyeron en los costos de supresión fueron las variables biofísicas como el comportamiento extremo del fuego, las condiciones de sequía, los niveles de intensidad de incendios forestales y el componente de liberación de energía.

Yoder y Ervin (2012) fueron uno de los primeros en realizar un análisis de los costos de supresión de incendios a nivel de condado en el oeste de Estados Unidos y probar si existe alguna relación entre los costos de tratamiento de combustible y los costos de supresión de incendios forestales. Para llevar a cabo este análisis, Yoder y Ervin manejaron los costos de supresión en función de: acres, acres de quema prescritas (RX), acres mecánicamente adelgazados, cantidad gastada en la quema RX, cantidad gastada en adelgazamiento, tipo de vegetación, área de la IFU, temperatura y precipitación.

Yoder y Ervin incluyeron cuatro años de valores rezagados de acres quemados y áreas de adelgazamiento para captar la efectividad relativa de estos tratamientos de combustible con el tiempo. Si bien su modelo tenía un poder explicativo razonablemente alto (71% o 0.71  $R^2$ ) generalmente ni los acres tratados con quema prescrita ni el costo de la quema prescrita, ni los acres adelgazados ni el costo del adelgazamiento tuvo un efecto negativo y significativo en los costos de supresión (solo una variable de las 16). Sin embargo, es posible que su modelo exhiba un grado de multicolinealidad; como uno esperaría de los acres adelgazados y el costo de adelgazamiento, así como acres

quemados y el costo de la quema estarían altamente correlacionados, y por lo tanto esto podría enmascarar una relación significativa.

Más recientemente, Gude et al. (2013) usó incendios en la Sierra Nevada de California para estimar la relación entre la vivienda y los costos de supresión de incendios. Es decir, si la presencia de viviendas está asociada con aumentos en los costos de supresión de incendios después de controlar otros parámetros biofísicos (por ejemplo, tamaño, terreno, clima, etc.). Su estudio encontró un aumento pequeño, pero estadísticamente significativo en los costos de supresión con la presencia de hogares dentro de un radio de 6 millas de un incendio forestal activo. Schofield et al. (2015) analizó el efecto de la configuración espacial de casas en la IFU sobre los costos de combatir cerca de 300 incendios forestales en Colorado, Montana y Wyoming de 2002 a 2011. Schofield et al. (2015: 3) encontró que no sólo los hogares en la IFU importan, sino que si los hogares están muy dispersos en ese paisaje (por ejemplo, el desarrollo de parcelas de 35 acres en común en Colorado) en contra de si se agrupan juntos tuvo un efecto significativo sobre los costos de supresión de incendios forestales. Gude et al. (2014) evaluó los factores que determinan los costos de supresión de incendios incluyendo el Programa Firewise. En su modelo, el tamaño del incendio, la duración del incendio y la dificultad del terreno tuvieron la mayor influencia en los costos de supresión de incendios. La variable del Programa Firewise no fue significativa.

Por último, Thompson y Anderson (2015) adoptaron un método de modelado para evaluar los efectos del tratamiento del combustible en los costos de supresión de incendios. Compararon tres enfoques de modelado que se aplicaron en diferentes áreas geográficas (por ejemplo, Oregón, Arizona y la Gran Cuenca). A lo largo de este amplio período geográfico, encontraron que existía el potencial de reducir los costos de combatir los incendios forestales mediante tratamientos de combustible. Sin embargo, señalaron (Thompson y Anderson, 2015: 169): *"En segundo lugar, la relativa rareza de los grandes incendios forestales en cualquier punto dado en el paisaje y la baja probabilidad proporcionada de cualquier área quemada en cualquier año sugiere la necesidad de tratamientos a gran escala de combustibles... Así, para ahorrar grandes cantidades de dinero en la supresión de incendios, las agencias de manejo de tierras podrían necesitar gastar grandes cantidades de dinero en el tratamiento de combustible a gran escala"*. Este será un punto al que volveremos en nuestra conclusión.

¿Qué podemos concluir de la literatura? En primer lugar, con el fin de aislar el efecto del tratamiento del combustible sobre los costos de supresión de incendios forestales, es importante controlar si el incendio fue en la IFU y las variables biofísicas. Específicamente, los costos de supresión de incendios forestales estaban relacionados con el tamaño del incendio, el terreno (por ejemplo, la pendiente) y los niveles de intensidad de incendios forestales. Las cargas de combustible más altas (por ejemplo, la densidad y el tipo de vegetación) también parecen afectar el costo de supresión de

incendios forestales, y la reducción de la carga de combustible es uno de los propósitos de la quema prescrita y de los tratamientos mecánicos de combustible. Por lo tanto, la especificación en nuestro modelo empírico incluye todos estos factores en un intento de controlarlos cuando son evaluados ya sea que el tratamiento de reducción de combustible reduce los costos de supresión de incendios forestales.

Los tratamientos de combustible son cada vez más vistos como un medio para reducir la gravedad de los incendios forestales, y hacer que estos fuegos sean más fáciles de controlar y suprimir. Un objetivo secundario es reducir los daños a la propiedad y las vidas perdidas debido a los incendios forestales. Si bien estos son objetivos deseables de un programa de tratamiento de combustible, la quema prescrita y la reducción mecánica de combustible son costosas de llevar a cabo. Como tal, tienen que ser presupuestados. Para presupuestarlos, es necesario contar con algún método sistemático para estimar los costos.

## Especificación del Modelo Empírico y Pruebas de Hipótesis

### Modelo de Costo de Supresión de Incendios Forestales

Sobre la base de los modelos Gude (2014) y Yoder y Ervin (2012), especialmente en este último, se estima un modelo de regresión múltiple para probar hipótesis y cuantificar el efecto de los esfuerzos de tratamiento de combustible en los costos de supresión de incendios forestales y estructuras dañadas.

Nuestros modelos de regresión explican muchas de las variables cuantitativas y cualitativas que influyen en los costos de la supresión de incendios forestales. En particular:

#### Variable dependiente

**Ln (CST)** = log natural de los Costos de Supresión Total

#### Variables explicativas independientes

**Acres\_Mec:** Acres del área del incendio forestal con previo tratamiento mecánico de combustible

**Acres\_RX:** Acres del área del incendio forestal con previo tratamiento de combustible de fuego

**lnIFacres:** log natural del tamaño del incendio forestal en acres

**IFUY:** Variable de cambio de intercepción para saber si el fuego está en un área de la IFU

**Elev:** elevación promedio del área del incendio forestal

**Pendiente:** pendiente promedio dentro de la zona del incendio forestal

**% de carga de combustible bajo:** porcentaje del área con nivel bajo de las cargas de combustible existentes

**% de carga de combustible mixto:** porcentaje del área en el nivel medio o mixto de las cargas de combustible existente

**% de carga de combustible alta:** porcentaje del área en el nivel alto de combustibles existentes

**IntF\_pie:** Nivel de Intensidad de Fuego, medido en pies

**Densidad de la Corona:** densidad aparente de la corona

**Intervalo de Retorno de Fuego:** Promedio del intervalo de retorno del incendio de la vegetación a través del área del incendio forestal

*Termino de interacción*

**IFUY \* Elev:** incluido para ver si había un costo diferencial de combatir incendios forestales en áreas de la IFU a medida que aumentaba la elevación.

El modelo de referencia especificado para todas las regiones geográficas (definido más detalladamente a continuación) es:

$$(1) \ln(CST) = B_0 - B_1(Acres\_Mec) - B_2(Acres\_RX) + B_3(\ln IFacres) + B_4(IFUY) + B_5(Elev) + B_6(Pendiente) - B_7(\% \text{ de carga de combustible bajo}) + B_8(\% \text{ de carga de combustible mixto}) + B_9(IntF\_pies) + B_{10}(Densidad \text{ de la Corona}) + B_{11}(Intervalo \text{ de Retorno de Fuego}) + B_{12}(IFUY * Elev)$$

Los coeficientes de las variables de tratamiento del combustible deben ser negativos y significativos si el tratamiento de pre-supresión de combustible reduce los costos de supresión de incendios. Matemáticamente nuestra hipótesis (con CST como variable dependiente) se puede expresar como:

$$(2) H_0: B_{AcresRX} = 0 \quad H_a: B_{AcresRX} < 0$$

$$(3) H_0: B_{AcresMEC} = 0 \quad H_a: B_{AcresMEC} < 0$$

Las hipótesis se prueban con base en estadística t asintótica sobre los dos tipos de tratamientos de combustible de pre-supresión.

Modelo de daño a la propiedad

$$(2) \ln(\#Estructuras) = A_0 - A_1(Acres\_Mec) - A_2(Acres\_RX) + A_3(\ln IFacres) + A_4(IFUY)$$

Donde #Estructuras es la suma de casas y otras estructuras (graneros, edificios, garajes, etc.) destruidos por incendios forestales.

Las pruebas de hipótesis para daños a la propiedad (#Estructuras) son:

$$(4) H_0: A_{AcresRX} = 0 \quad H_a: A_{AcresRX} < 0$$

$$(5) H_0: A_{AcresMEC} = 0 \quad H_a: A_{AcresMEC} < 0$$

Las hipótesis se prueban a partir de una prueba de t asintótica sobre dos tipos de tratamientos de combustible de pre-supresión.

## Datos

### Sitios de Estudio

Para que el estudio fuera lo más exhaustivo posible y representativo de todos los tipos de vegetación y modelos de combustible y actividades de tratamiento de combustible en los EE.UU., recolectamos el tratamiento de combustible y los costos de supresión de incendios forestales y los datos asociados en todas las regiones continentales nacionales forestales de EE.UU. excepto Alaska. Ecológicamente, y en términos de su régimen de fuego, Alaska es muy diferente de todas las regiones en los Estados Unidos continental lo que requeriría un esfuerzo de modelado por separado.

### Desarrollo de Base de Datos para los Costos de Supresión de Incendios Forestales

Se obtuvieron datos individuales de supresión de incendios forestales durante los años 2010 a 2014. Este archivo incluye datos sobre el tamaño de cada incendio, estructuras destruidas, y por supuesto el costo de la supresión. Sin embargo, hubo preocupaciones importantes con respecto a la exactitud de los datos de costos reportados, especialmente para los pequeños incendios. Se realizó un esfuerzo significativo para colaborar con los científicos del Servicio Forestal del USDA en la Estación de Investigación de las Montañas Rocosas para obtener datos más precisos sobre los costos de supresión de incendios forestales para grandes incendios forestales (incendios superiores a 300 acres). Por lo tanto, restringimos nuestro análisis a incendios de 300 acres o más. Este costo más preciso de los datos de supresión se obtuvo y se fusionó en los otros datos de supresión de incendios forestales que describen los incendios forestales para crear una base de datos maestro de supresión de incendios forestales donde la unidad de análisis es el incendio individual.

Los datos sobre la quema RX y el tratamiento mecánico de combustible se obtuvieron de los datos del área de tratamiento del Servicio Forestal del USDA FACTS. Los acres tratados por cada método se geolocalizaron y luego se fusionaron con los datos de costo de supresión de incendios forestales y los datos espaciales del SIG sobre el área de los tratamientos e incendios forestales (por ejemplo, pendiente, elevación, cubierta vegetal) para crear el conjunto de datos maestros utilizados para el análisis de regresión.

### Determinación de Regiones Geográficas de Análisis

Dado el número limitado de observaciones para cada una de las Regiones del Servicio Forestal del USDA, evaluamos la agrupación de los datos en regiones geográficas más grandes. Una elección natural para esto fueron los Centros de Coordinación de Área Geográfica (CCAG) interinstitucionales de los Estados Unidos utilizados por la organización de manejo de incendios del Servicio Forestal para tomar decisiones de

supresión de incendios, incluyendo logística y despacho. Se estimó un modelo nacional inicial de costos de supresión de incendios forestales que incluyó cada CCAG como variable de cambio de interceptación para permitir la evaluación de la similitud de los coeficientes de las regiones geográficas. Además, se realizó una ANOVA (Análisis de Varianza) en los CCAG individuales que mostraron que algunos CCAG tenían diferencias estadísticamente significativas en los costos de supresión de incendios forestales por acre entre sí, pero otros no. Sobre la base de estos dos análisis estadísticos, así como la geografía, los CCAG se pusieron en grupos de dos o tres. Específicamente, los CCAG del norte y del sur de California se convirtieron en un área de análisis de costos de supresión de incendios. También se combinaron los CCAG orientales y meridionales. Los dos CCAG de las Montañas Rocosas y los CCAG del suroeste se combinaron en un área de análisis de supresión de incendios forestales. Se combinaron los CCAG del noroeste y los CCAG de la Gran Cuenca. Así tenemos cuatro regiones de análisis de incendios forestales. Los detalles sobre el modelo nacional de costos de supresión de incendios forestales y la ANOVA están disponibles por el autor principal.

## **Estadísticas Descriptivas Seleccionadas**

La Tabla 1 presenta las principales estadísticas descriptivas sobre el número de incendios forestales, las estructuras destruidas y el porcentaje promedio de una zona de incendio forestal tratada con quema RX y tratamientos mecánicos de reducción de combustible. Como puede verse en la Tabla 1, sólo los porcentajes pequeños de áreas de incendios forestales han tenido tratamientos de combustible. Como puede verse comparando la media y la mediana, mucho menos de la mitad de las áreas tenían tratamientos de combustible de cualquier tipo.

También vale la pena señalar que el tamaño de la muestra es insuficiente para estimar una regresión sobre las estructuras y casas perdidas en los incendios forestales con y sin tratamiento para los CCAG oriental y meridional. Específicamente, sólo hubo ocho estructuras perdidas en total en dos de los 173 incendios forestales en los CCAG oriental y meridional.

**Tabla 1. Porcentaje de Áreas de Incendios Forestales Tratadas y Estructuras y Casas Destruídas**

| <b>Grupo CCAG<br/>Incendio</b> | <b>Porcentaje Tratado</b> |                 | <b>Número Destruído</b> |              | <b>Muestra<br/>n</b> |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------------|--------------|----------------------|
|                                | <b>Fuego</b>              | <b>Mecánico</b> | <b>Estructuras</b>      | <b>Casas</b> |                      |
| Grupo 1 Este-Su                |                           |                 |                         |              |                      |
| Media                          | 15                        | 0.5             | 6                       | 2            | 173                  |
| Mediana                        | 0                         | 0               |                         |              |                      |
| Grupo 2 Rocosa-SO              |                           |                 |                         |              |                      |
| Media                          | 8.8                       | 0.4             | 36                      | 20           | 390                  |
| Mediana                        | 0                         | 0               |                         |              |                      |
| Grupo 3 NO-GC                  |                           |                 |                         |              |                      |
| Media                          | 7.3                       | 0.5             | 35                      | 9            | 223                  |
| Mediana                        | 0                         | 0               |                         |              |                      |
| Grupo 4 California             |                           |                 |                         |              |                      |
| Media                          | 1                         | 0.13            | 27                      | 19           | 115                  |
| Mediana                        | 0                         | 0               |                         |              |                      |

Este-Su son los CCAG del este y sur; Rocoso-SO son los CCAG de las Montañas Rocosas y suroeste. NO-GC son los CCAG del noroeste y de la Gran Cuenca. California son los CCAG del norte y sur de California.

## Resultados

### Resultados Estadísticos del Costo de la Supresión de Incendios Forestales por Grupos CCAG

En la Tabla 2 se presentan los resultados de regresión para el Grupo # 1 (CCAG del este y del sur)

**Tabla 2. Costos de Supresión para el Grupo # 1 CCAG (CCAG del este y del sur).**

| Variable                        | Estimado | Error Est. | Valor t | Probabilidad |
|---------------------------------|----------|------------|---------|--------------|
| Intercepto                      | 2.6553   | 1.1021     | 2.409   | 0.1712*      |
| Acres_Mec                       | -0.1913  | 0.6397     | -0.299  | 0.7653       |
| Acres_RX                        | -0.0004  | 0.0004     | -1.227  | 0.2216       |
| lnIFacres                       | 0.9930   | 0.1358     | 7.312   | 1.17e-11***  |
| IFUY                            | 0.8679   | 0.3539     | 2.452   | 0.01526*     |
| Elevación                       | -0.0015  | 0.0006     | -2.439  | 0.01058*     |
| Pendiente                       | 0.1215   | 0.0264     | 4.603   | 8.40e-06***  |
| % de carga de combustible bajo  | -0.0008  | 0.0333     | -0.023  | 0.982        |
| % de carga de combustible mixto | -0.0650  | 0.0498     | -1.305  | 0.1939       |
| IntF_pie                        | 0.0848   | 0.0308     | 2.753   | 0.00658**    |
| Densidad de Corona              | 0.1784   | 0.0835     | 2.136   | 0.0342*      |
| Intervalo de Retorno de Fuego   | 0.0810   | 0.0442     | 1.833   | 0.0687.      |
| IFUY*Elevación                  | 0.0001   | 0.0001     | 0.125   | 0.9007       |
| R <sup>2</sup>                  | 0.4920   |            |         |              |

\*\*\* significativo al nivel del 99.99%; \*\* significativo al nivel del 99.9%; \* Significativo al nivel del 99%; + Significativo al nivel del 95%; . Significativo al nivel del 90%

La mayoría de los signos de los coeficientes de las variables tienen sentido: los incendios forestales que afectan a IFUY, bosques de mayor densidad de corona, pendientes más pronunciadas y altos niveles de intensidad de fuego tienen costos de supresión mayores que el promedio. En general, el poder explicativo del modelo es razonablemente bueno (49,2%) para los datos de sección transversal a través de un alcance geográfico amplio.

En términos de nuestras pruebas de hipótesis, ni el tratamiento Acres Mec ni el tratamiento Acres RX son estadísticamente diferentes de cero. Es decir, las hectáreas de la zona de incendios forestales tratadas con tratamientos mecánicos o combustibles no parecen tener un efecto sistemático sobre los costos de supresión de incendios forestales.

La Tabla 3 presenta los resultados de regresión para el modelo para el Grupo 2 (CCAG de las Montañas Rocosas y suroeste).

**Tabla 3. Costos de Supresión para el Grupo 2 de los CCAG (CCAG de las Montañas Rocosas y suroeste).**

| Variable                        | Estimación | Error Est. | Valor t | Probabilidad |
|---------------------------------|------------|------------|---------|--------------|
| Intercepto                      | 5.0260     | 0.6357     | 7.905   | 2.93e-14 *** |
| Acres_Mec                       | 0.5056     | 0.4550     | 1.111   | 0.267156     |
| Acres_RX                        | 0.0000     | 0.0002     | 0.214   | 0.830862     |
| lnIFacres                       | 0.5318     | 0.0760     | 6.997   | 1.18e-11 *** |
| IFUY                            | 2.3740     | 0.9269     | 2.562   | 0.010806 *   |
| Elevación                       | 0.0010     | 0.0002     | 3.923   | 0.000104 *** |
| Pendiente                       | 0.0518     | 0.0159     | 3.264   | 0.001197 **  |
| % de carga de combustible bajo  | 0.0094     | 0.0189     | 0.499   | 0.617967     |
| % de carga de combustible mixto | 0.0302     | 0.0317     | 0.952   | 0.341547     |
| IntF_pie                        | 0.1638     | 0.0229     | 7.141   | 4.74e-12 *** |
| Densidad de Corona              | -0.0221    | 0.0306     | -0.724  | 0.46943      |
| Intervalo de Retorno de Fuego   | -0.0585    | 0.0240     | -2.440  | 0.015150 *   |
| IFUY*Elevación                  | -0.0007    | 0.0005     | -1.488  | 0.137542     |
| R <sup>2</sup>                  | 0.425      |            |         |              |

\*\*\* significativo al nivel del 99.99%; \*\* significativo al nivel del 99.9%; \* Significativo al nivel del 99%; + Significativo al nivel del 95%; . Significativo al nivel del 90%

La mayoría de los signos de los coeficientes de las variables de la Tabla 3 tienen sentido: los incendios forestales que involucran WUIY, pendientes más pronunciadas, elevación más alta y mayor nivel de Intensidad de Fuego dan como resultado costos de supresión de incendios forestales superiores al promedio. La explicación del modelo es bastante alta (42,5%) para los datos de sección transversal a través de un alcance geográfico tan amplio.

En términos de nuestras pruebas de hipótesis, los tratamientos Acres Mec y Acres RX no son estadísticamente diferentes de cero. Es decir, los acres de la zona de incendios forestales tratados con tratamientos mecánicos o combustibles no parecen tener un efecto sistemático sobre los costos de supresión de incendios forestales.

La Tabla 4 presenta los resultados de la regresión para el modelo del Grupo 3 (CCAG del noroeste y la Gran Cuenca).

**Tabla 4. Costos de Supresión para el Grupo # 3 del GACC (GACC de noroeste y la Gran Cuenca).**

| <b>Variable</b>                 | <b>Estimación</b> | <b>Error Est.</b> | <b>Valor-t</b> | <b>Probabilidad</b> |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| Intercepto                      | 8.9760            | 0.8400            | 10.686         | 2e-16 ***           |
| Acres_Mec                       | -0.1818           | 0.5090            | -0.357         | 0.7213              |
| Acres_RX                        | 0.0001            | 0.0003            | 0.247          | 0.8054              |
| lnIFacres                       | 0.5529            | 0.0904            | 6.114          | 4.74e-09 ***        |
| IFUY                            | -0.1205           | 0.7861            | -0.153         | 0.8783              |
| Elevación                       | 0.0001            | 0.0002            | 0.358          | 0.721               |
| Pendiente                       | 0.0065            | 0.0174            | 0.371          | 0.7109              |
| % de carga de combustible bajo  | 0.0215            | 0.0327            | 0.657          | 0.5118              |
| % de carga de combustible mixto | 0.0229            | 0.0364            | 0.63           | 0.5294              |
| IntF_pie                        | 0.0262            | 0.0313            | 0.837          | 0.4035              |
| Densidad de Corona              | 0.0630            | 0.0268            | 2.351          | 0.0197 *            |
| Intervalo de Retorno de Fuego   | -0.0597           | 0.0272            | -2.198         | 0.0291 *            |
| IFUY*Elevation                  | 0.0005            | 0.0005            | 1.15           | 0.2513              |
| R <sup>2</sup>                  | 0.26              |                   |                |                     |

\*\*\* significativo al nivel del 99.99%; \*\* significativo al nivel del 99.9%; \* Significativo al nivel del 99%; + Significativo al nivel del 95%;

El rendimiento de este modelo es relativamente bajo con el tamaño de los incendios forestales, mayor densidad de la corona y mayor intervalo de retorno al fuego, resultando en costos de supresión de incendios forestales superiores al promedio. El poder explicativo del modelo del Pacífico noroeste y la Gran Cuenca es del 25%.

En términos de nuestras pruebas de hipótesis, ni Acres Mec ni Acres RX son estadísticamente diferentes de cero. Es decir, las hectáreas de la zona de incendios forestales tratados con tratamientos mecánicos o combustibles no parecen tener un efecto sistemático en los costos de supresión de incendios.

La Tabla 5 presenta los resultados de regresión para el modelo del Grupo 4 en el norte y el sur de California.

**Tabla 5. Costos de Supresión para el Grupo 4 del GACC (GACC del norte y del sur de California).**

| <b>Variable</b>                 | <b>Estimación</b> | <b>Error Est.</b> | <b>Valor t</b> | <b>Probabilidad</b> |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| Intercepto                      | 9.6310            | 1.0980            | 8.772          | 4.21e-14 ***        |
| Acres_Mec                       | -4.2690           | 2.1490            | -1.987         | 0.04963 *           |
| Acres_RX                        | 0.0000            | 0.0001            | -0.326         | 0.74547             |
| lnIFacres                       | 0.5859            | 0.1096            | 5.344          | 5.56e-07 ***        |
| IFUY                            | -0.9208           | 0.8329            | -1.106         | 0.27148             |
| Elevación                       | -0.0003           | 0.0004            | -0.805         | 0.42269             |
| Pendiente                       | 0.0257            | 0.0229            | 1.121          | 0.26488             |
| % de carga de combustible bajo  | 0.0302            | 0.0289            | 1.044          | 0.29918             |
| % de carga de combustible mixto | 0.0907            | 0.0490            | 1.85           | 0.06725 .           |
| IntF_pie                        | 0.0652            | 0.0350            | 1.864          | 0.06526 .           |
| Densidad de Corona              | 0.0122            | 0.0341            | 0.358          | 0.72117             |
| Intervalo de Retorno de Fuego   | -0.1130           | 0.0414            | -2.731         | 0.00745 **          |
| IFUY*Elevación                  | 0.0006            | 0.0008            | 0.822          | 0.41309             |
| R <sup>2</sup>                  | 0.49              |                   |                |                     |

\*\*\* significativo al nivel del 99.99%; \*\* significativo al nivel del 99.9%; \* Significativo al nivel del 99%; + Significativo al nivel del 95%; . Significativo al nivel del 10% R<sup>2</sup> = 49.0%

La regresión de California funciona razonablemente bien en términos de signos y nivel significativo. En particular, los signos de los coeficientes de las variables tienen sentido: un alto porcentaje de carga de combustibles mixtos, un nivel de intensidad de fuego más alto y un intervalo largo de retorno de fuego da como resultado costos de supresión de incendios forestales superiores al promedio. Creemos que IFUY es insignificante porque hay poca variación, ya que la mayoría de los incendios forestales en California tienen un área de IFUY dentro de ellos. El poder explicativo del modelo es razonablemente bueno al 49%.

En términos de nuestras pruebas de hipótesis, el nivel estadístico significativo y el signo negativo en Acres Mec indica que cuanto más acres de un área de incendio forestal tratados con reducción mecánica de combustible, menor será el costo de la supresión de incendios en California. Sin embargo, Acres RX no es estadísticamente diferente de cero. Es decir, los acres de la zona de incendios forestales tratados con un tratamiento de combustible de fuego parecen no tener un efecto sistemático sobre los costos de supresión de incendios forestales.

De los cuatro grupos CCAG, sólo uno de los tratamientos de combustible tuvo un efecto negativo estadísticamente significativo sobre los costos de supresión de incendios forestales (CCAG del norte y sur de California). Como se señaló anteriormente en nuestra discusión de hipótesis, es posible que la falta de significación estadística de las variables de tratamiento de combustible puede deberse a efectos opuestos: en algunos

incendios forestales, el tratamiento de combustible redujo los costos de supresión, pero en otros incendios, los tratamientos con combustible permitieron a los bomberos entrar en áreas que de otra manera no serían seguras, aumentando así los costos de supresión de incendios forestales. Rideout et al. (2008) señalan que este resultado es teóricamente posible bajo circunstancias plausibles. Además, como señalaron Thompson y Anderson (2015), puede haber simplemente pocos tratamientos de combustible en áreas con incendios forestales para detectar cualquier efecto de los tratamientos de combustible sobre los costos de supresión de incendios forestales. Esa falta significativa de la quema prescrita (Acres\_RX) y la reducción mecánica del combustible (Acres\_Mec) de manera casi uniforme en todas las regiones CCAG excepto una es consistente con las conclusiones de Yoder y Ervin (2012). Nuestros resultados también son consistentes con el hallazgo general de Gude et al. (2014) del Programa de Comunidades Firewise que al reducir los combustibles vegetativos alrededor de los hogares no redujo los costos de supresión de incendios forestales.

## **Resultados por Efecto del Tratamiento de Combustible en los Daños a la Propiedad**

Nuestra segunda prueba de hipótesis es que los tratamientos de reducción de combustible, como la quema RX y la reducción mecánica de combustible al aumentar la productividad marginal de un determinado gasto de supresión de incendios, reducirían el número de hogares y otras estructuras dañadas por incendios forestales (Rideout et al. 2008). Este es el hallazgo de Bostwick et al. (2011) por un incendio (Wallow Fire) en el suroeste de Estados Unidos. Es obvio que es necesario realizar pruebas con múltiples incendios en múltiples regiones geográficas para determinar si este es el resultado habitual o no.

Como se mostró anteriormente en la Tabla 1, el número relativamente bajo de estructuras (por ejemplo, casas, graneros, edificios fuera de sitio) dañadas en relación con el gran número de incendios sugiere que un modelo de datos de recuento podría ser la técnica estadística apropiada para estimar el efecto del tratamiento de combustible en los daños a la propiedad. Un recuento de datos es muy adecuado para manejar pequeños números enteros, incluyendo ceros mejor que la regresión MCO. Adoptamos un modelo bastante parsimonioso para probar el efecto del número de acres del incendio forestal tratado con reducción mecánica de combustible (Acres\_Mec) y el número de acres tratados con tratamiento de combustible de incendio prescrito (Acres\_RX). Otras variables incluidas son el tamaño del incendio (lnIFacres) y si el incendio ocurrió en un área de la IFU. Debido al hecho de que el Grupo CCAG # 1 solo tuvo 2 hogares perdidos y 6 estructuras destruidas de 173 incendios forestales, se determinó que no era posible estimar una regresión del modelo de datos de recuento para el Grupo 1 del CCAG. Los resultados en la Tabla 6 a través de los tres grupos CCAG con datos

suficientes sobre las estructuras quemadas, muestran que los incendios forestales más grandes y los incendios forestales en la IFU dan lugar a más estructuras perdidas. En términos de nuestra hipótesis, cuanto mayor sea el área del incendio forestal tratada con quema prescrita, menor será el número de estructuras destruidas. Específicamente, en los tres CCAG el coeficiente de Acres\_RX es negativo y estadísticamente significativo, indicando que al incrementar Acres\_RX, el número de estructuras destruidas disminuye (todas fueron significativas al nivel de 99%). Los resultados fueron más diversos para la reducción mecánica de combustible. En el Grupo 2 de CCAG (las Montañas Rocosas y suroeste), Acres Mec fue positivo y significativo al nivel del 95%. En el noroeste y la Gran Cuenca (Grupo CCAG # 3) Acres\_Mec fue negativo, pero no significativo a niveles convencionales.

**Tabla 6. Resultados de Regresión de Datos de Conteo para el Número de Estructuras Destruídas en Incendios Forestales**

**Tabla 6a. Grupo CCAG # 2 (CCAG Montañas Rocosas y suroeste).**

|            | <b>Coeficientes<br/>Estimados</b> | <b>Error Est.</b> | <b>Valor-t</b> | <b>Probabilidad</b> |
|------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| Intercepto | -8.364                            | 0.5040            | -16.594        | < 2e-16 ***         |
| lnIFacres  | 0.8113                            | 0.0506            | 16.032         | < 2e-16 ***         |
| IFU        | 1.483                             | 0.1577            | 9.406          | < 2e-16 ***         |
| acres_RX   | -2.494e-04                        | 8.795e-05         | -2.835         | 0.0046 **           |
| acres_Mec  | 0.5697                            | 0.2949            | 1.932          | 0.0533 .            |

Código de significancia: 0.0001\*\*\*; 0.001\*\*; 0.05 .

**Tabla 6b. Grupo CCAG # 3 (CCAG del noroeste y la Gran Cuenca).**

|            | <b>Coeficientes<br/>Estimados</b> | <b>Error Est.</b> | <b>Valor-t</b> | <b>Probabilidad</b> |
|------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| Intercepto | -6.8109                           | 0.4335            | -15.713        | < 2e-16 ***         |
| lnIFacres  | 0.7159                            | 0.0426            | 16.814         | < 2e-16 ***         |
| IFU        | 1.4699                            | 0.1372            | 10.711         | < 2e-16 ***         |
| acres_RX   | -0.0013                           | 0.0004            | -3.472         | 0.0005 ***          |
| acres_Mec  | -0.4496                           | 0.4387            | -1.025         | 0.3055              |

Código de significancia: 0.0001\*\*\*

**Tabla 6c. Grupo GACC # 4 (GACC del norte y sur de California).**

|            | <b>Coefficientes</b> |                   |                |                     |
|------------|----------------------|-------------------|----------------|---------------------|
|            | <b>Estimados</b>     | <b>Error Est.</b> | <b>Valor-t</b> | <b>Probabilidad</b> |
| Intercepto | -4.8659              | 0.2750            | -17.694        | < 2e-16 ***         |
| lnIFacres  | 0.6749               | 0.0297            | 22.739         | < 2e-16 ***         |
| IFU        | 0.7749               | 0.1089            | 7.108          | 1.18e-12 ***        |
| acres_RX   | -0.0291              | 0.0038            | -7.737         | 1.01e-14 ***        |
| acres_Mec  | 4.8093               | 1.3655            | 3.522          | 0.0004 ***          |

Código de significancia: 0.0001 \*\*\*

## Conclusión

En general, encontramos que los tratamientos de combustible rara vez tuvieron un efecto significativo en la reducción de los costos de supresión de incendios forestales. Como se observa en la literatura (en particular Thompson y Anderson, 2015), puede ser que para que los tratamientos de combustible tengan un efecto significativo en los costos de supresión de incendios forestales, debe haber un esfuerzo más sustancial en la quema prescrita y la reducción mecánica de combustible que es el caso actual.

Alternativamente, como señala Rideout et al. (2008) los tratamientos de combustible pueden aumentar la eficacia de los esfuerzos de supresión de incendios forestales, lo que conduce a la reducción de los daños de los recursos y la propiedad. En el caso de daños a la propiedad, la hipótesis de Rideout et al. (2008) parece confirmada. En nuestros datos, las áreas con quemas prescritas tenían menos daños a la propiedad por incendios forestales. Esto puede sugerir enfatizar la reducción de combustible en las áreas de la IFU, ya que los beneficios primarios de tales proyectos de reducción de combustible es reducir los daños a la propiedad en lugar de reducir los costos de supresión de incendios forestales. Pero esta evidencia debe ser revisada después de que los datos sobre la temporada de incendios forestales de 2016 estén disponibles, ya que el 2016 tuvo un número sustancial de hogares perdidos en comparación con lo que está en nuestro conjunto de datos.

Por supuesto, todas las conclusiones de la investigación están sujetas a limitaciones, y la nuestra no es una excepción. Como se señaló en la sección de datos, nos centramos en incendios de 300 acres o mayores, como nos dijo el personal de manejo de incendios, que era la mejor calidad de datos disponibles sobre los costos de supresión de incendios y que los datos de costos de supresión de fuegos menores no eran confiables. Es posible que con datos sobre un rango más amplio de tamaños de incendios (por ejemplo, incendios de 50 acres y más) puede haber un efecto más de los tratamientos de combustible de pre-supresión en la reducción de los costos de supresión de incendios.

Además, los resultados actuales de la investigación también sugieren una nueva hipótesis. Específicamente, esos efectos potenciales de los tratamientos de combustible de pre-supresión pueden evitar que pequeños fuegos crezcan en más grandes y más caros para controlar los incendios. Desafortunadamente no tenemos datos para probar esta hipótesis, pero parece que esto puede ser una vía importante para futuras investigaciones, si la calidad de los datos de incendios pequeños se mejora en el futuro

## Referencias

- Bostwick, P., J. Menakis, T. Sexton.** 2011. How Fuel Treatments Saved Homes from the Wallow Fire. [http://www.fs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb5320347.pdf](http://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5320347.pdf)
- GAO (Government Accountability Office).** 2015. GAO-15-772 Wildland fire Management.
- Gebert, K.M., D.E. Calkin, J. Yoder.** 2007. Estimating suppression expenditures for individual large wildland fires. *Western Journal of Applied Forestry* 22(3): 188-196.
- Gude, P.H., K.L. Jones, R. Rasker, M.C. Greenwood.** 2013. Evidence for the effect of homes on wildfire suppression costs. *International Journal of Wildland Fire* 22(4): 537-548.
- Gude, P.R. Rasker, M. Essen, M. Delorey, M. Lawson.** 2014. An empirical investigation of the Effect of the Firewise Program on Wildfire Suppression Costs. *Headwaters Economics*, Bozeman MT.
- Hamilton, B.A.** 2015. 2014 Quadrennial Fire Review: Final Report. Fire & Aviation management, USDA Forest Service and Office of Wildland Fire, Department of Interior.
- Omi, P.N.** 2008. Evaluating tradeoffs between wildfires and fuel treatments. In González-Cabán, A. technical coordinator, *Proceedings of the second symposium on fire economics, policy and planning: a global view*, Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-208, Albany, CA: U.S. Dept. Agriculture, Pacific Southwest Research Station, 19-22 April 2004, Córdoba, Spain pp: 485-494.
- Rideout, D., Y. Wei, A. Kirsch, and S. Botti.** 2008. Toward a Unified Economic Theory of Fire Program Analysis with Strategies for Empirical Modeling. In *The Economics of Forest Disturbances*, edited by T Holmes, J. Prestemon and K. Abt. Springer.
- Scofield, A., B. Rashford, D. McLeod, R. Coupal, S. Lieske and S. Albeke.** 2015. Residential Development on Firefighting Costs in the Wildland Urban Interface. *Ruckelshaus Institute*, University of Wyoming, Laramie, WY.
- Thompson, M. and N. Anderson.** 2015. Modeling Fuel Treatment Impacts on Fire Suppression Cost Savings: A Review. *California Agriculture* 69(3): 164-170.
- Yoder, J. and P. Ervin.** 2012. County-level Effects of Fuel Treatments, WUI Growth, and Weather Changes on Wildfire Acres Burned Suppression Costs. *School of Economic Sciences*, Washington State University.