

# Simulación de las variaciones de la velocidad de propagación del fuego, durante una quema prescrita

Simulation of variations in the speed of fire propagation, during a prescribed burn

José Germán Flores Garnica\*

Campo experimental Centro-Altos de Jalisco. CIRPAC. Instituto nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Guadalajara, Jalisco, México.

\*Autor para correspondencia: flores.german@inifap.gob.mx

## Resumen

Las simulaciones del comportamiento del fuego, en general se basan en modelos estandarizados de combustibles forestales, que difícilmente pueden representar todas las variaciones posibles en los ecosistemas forestales, lo cual puede resultar en estimaciones desviadas del comportamiento del fuego. Debido a esto, en el presente trabajo se hace un análisis comparativo de simulaciones del comportamiento del fuego (ritmo de propagación [m/min]), durante el transcurso de una quema prescrita a favor de la pendiente, en un rodal forestal de pino-encino del estado de Chihuahua. Estas simulaciones variaron en relación a: a) modelos de combustibles; b) cargas de combustibles; y c) velocidad del viento. Los modelos probados fueron: 1) el que resultó de una regresión múltiple (considerando temperatura, humedad relativa y pendiente); 2) el modelo de combustibles M-8 y su variante M-8R (incluye los valores de las cargas de combustibles obtenidos en campo); y 3) el modelo de combustible M-9 y su variante M-9R (incluye los valores de las cargas de combustibles obtenidos en campo). Se generaron las ecuaciones de las tendencias definidas por la correlación entre la humedad relativa (%) y la velocidad de propagación del fuego (m/min). Aunque ningún modelo resultó estadísticamente significativo, el mejor ajuste se definió con la ecuación de la regresión:  $RP = 21.689e^{-0.037HR}$ , la cual puede usarse en forma práctica para una estimación aproximada del ritmo de propagación del fuego (RP). Se concluye que, en general, los modelos seleccionados no fueron apropiados para la simulación del comportamiento del fuego durante la quema prescrita a favor. Esto remarca la necesidad de generar modelos de combustibles específicos para la vegetación analizada y sus variaciones en densidad, estructura y composición.

**Palabras clave:** Comportamiento del fuego, modelos de combustibles, cargas de combustibles, humedad relativa.

## Abstract

Fire behavior simulations are generally based on standardized models of forest fuels, which can hardly represent all possible variations in forest ecosystems, which can result in biased estimates of fire behavior. Due to this, in the present work a comparative analysis of simulations of fire behavior (propagation rate [m/min]) is made, during the course of a prescribed burning in favor of the slope, in a pine-oak forest stand from the state of Chihuahua. These simulations varied in relation to: a) fuel models; b) fuel loads; and c) wind speed. The models tested were: 1) the one that resulted from a multiple regression (considering temperature, relative humidity and slope); 2) the fuel model M-8 and its variant M-8R (includes the values of fuel charges obtained in the field); and 3) the fuel model M-9 and its variant M-9R (includes the values of fuel charges obtained in the field). The equations of the trends defined by the correlation between the relative humidity (%) and the speed of fire propagation (m/min) were generated. Although neither model was found to be statistically significant, the best fit was defined with the regression equation:  $RP = 21.689e^{-0.037HR}$ , which can be used in a practical way for a rough estimation of the rate of fire spread (RP). It is concluded that, in general, the selected models were not appropriate for simulating fire behavior during prescribed burning. This highlights the need to generate specific fuel models for the analyzed vegetation and its variations in density, structure and composition.

**Keywords:** Fire behavior, fuel models, fuel loads, relative humidity.

## Introducción

El fenómeno de los incendios forestales es complejo, ya que su comportamiento es definido por una serie de factores, como combustibles, topografía, humedad, etc., cuyas combinaciones establecen un sinnúmero de posibilidades. Así mismo, este comportamiento define el grado de impacto del fuego en los diferentes elementos de los ecosistemas forestales (Johnson y Miyanishi, 2001). De acuerdo con esto, el entendimiento del comportamiento del fuego es esencial para establecer estrategias adecuadas de prevención y combate de incendios forestales (Stratton, 2006). Más aún, esto se podrá reforzar si se tienen la posibilidad de conocer previamente cual sería el comportamiento del fuego, en sus varias facetas, como velocidad de propagación, altura de llama, longitud de llama, etc.

Actualmente se cuenta con una amplia gama de sistemas de simulación del comportamiento del fuego, como por ejemplo Farsite (Finney, 2004), BehavePlus (Andrews, 2014), Prometheus (Tymstra, 2010), FlamMap (Finney, 2006), que se han desarrollado principalmente con base al modelaje de la relación del comportamiento del fuego con factores ambientales, como pendiente, viento, combustibles, etc. (Andrews, 2018; Ascoli *et al.*, 2015; Castillo y Garfias, 2010). Además, se tienen sistemas más complejos que definen el comportamiento del fuego con base al estudio de la descomposición química del material combustible debido al calor (pirólisis), la dinámica de fluidos, la combustión, la transferencia de calor, entre otros. No obstante, la mayoría de los sistemas de simulación que se han generado se basan en las teorías desarrolladas por Rothermel (1972), derivadas del modelo desarrollado por Frandsen (1971), el cual se basa en el principio de conservación de la energía de una unidad de volumen de combustible, ubicada delante de un incendio que se propaga en una cama homogénea de combustibles (Karounu *et al.*, 2014).

Una de las limitantes prácticas para la implementación del modelo de Rothermel es que se requiere evaluar una serie de características de los combustibles que influyen en su combustión (carga, densidad aparente, relación área/volumen, contenido de calor, etc.), por lo que sería necesario contar con

una gran base de datos que contemplen las posibles combinaciones de los valores de estas características (Andrews, 2018; Finney *et al.*, 2013). Alternativamente, se definió el concepto de “modelos de combustibles”, dentro del cual las características de los combustibles se mantienen constantes. De esta forma, un modelo de combustibles es una descripción estandarizada (conjunto de valores numéricos) de las propiedades de los combustibles forestales (Karouni *et al.*, 2014); Inicialmente Rothermel (1972) definió 11 modelos de combustible, posteriormente Albini (1976) agrega dos modelos más, y los 13 modelos resultantes se ubican en cuatro grupos: 1) Ecosistema dominado por pastos; 2) Chaparrales y arbustos; 3) Residuos forestales; 4) Residuos de aprovechamiento forestal. No obstante, debido a que estos modelos no cubren todas las condiciones posibles, se definieron otros 40 modelos (Scott y Burgan, 2005).

Los modelos de combustibles son usados para la predicción del comportamiento del fuego, para lo cual, en forma práctica, se selecciona el modelo que mejor se ajuste al ecosistema forestal de interés. No obstante, se pueden tener variaciones de la distribución de las cargas de combustibles, dentro de una zona clasificada como cierto modelo de combustibles (Flores y Omi, 2003). Estas variaciones definen, a su vez, cambios espaciales en el comportamiento del fuego por lo que, si no se consideran estos cambios, las simulaciones generalizadas (basadas en un modelos de combustibles) podrán sobrestimar, o subestimar, el comportamiento del fuego. Debido a esto, se plantea la hipótesis de que en una zona clasificada con un determinado modelos de combustibles, el comportamiento del fuego no es homogéneo. Para probar esto, en el presente trabajo tiene como objetivo hacer un análisis comparativo de simulaciones del comportamiento del fuego, durante una quema prescrita en relación a variaciones de: a) modelos de combustibles; b) cargas de combustibles; c) humedad de combustibles; y d) velocidad del viento. La información generada permitirá argumentar la necesidad de generar modelos de combustibles específicos para los ecosistemas forestales de México.

## Materiales y Métodos

### Área d estudio

El trabajo se llevó a cabo en un rodal forestal de pino-encino, del estado de Chihuahua, ubicado en el paraje “El Vallecito”, del predio “El Largo y Anexos”, cuyas coordenadas son: latitud 19° 06’ 55” y longitud 108° 10’ 25.3” (Flores *et al.*, 2010). El clima que prevalece es el semifrío subhúmedo con lluvias en verano, donde los principales tipos de suelo que predominan son regosol y feozem. El análisis comparativo de este trabajo se llevó a cabo con información del comportamiento del fuego obtenida a través de la implementación de una quema prescrita realizada dicho rodal, donde predomina el *Pinus durangensis* y el género *Quercus*, con alturas promedio de 8.5 y 6.3 respectivamente. El diámetro normal promedio fue de 16.61 cm y 12.6 cm, para *P. durangensis* y *Quercus spp*, respectivamente. Mientras que la altura de copa promedio es de 4.40 m2 para *P. durangensis* y de 16.61 para *Quercus spp*.

### Modelos de combustibles

Con base a las evaluaciones en campo, en este trabajo se analizaron modelos de combustibles seleccionados como adecuados a las condiciones del rodal, considerando cambios temporales de la humedad de combustibles (%) y de la velocidad del viento (km/hr). Así mismo, con los modelos seleccionados se probaron dos arreglos de cargas de combustibles (t/ha): a) estándares del modelo y b) valores reales de campo. Los resultados del comportamiento del fuego, en relación a la velocidad de propagación (m/min), se analizaron y compararon para definir el mejor ajuste. Para llevar a cabo las simulaciones del comportamiento del fuego, primeramente se seleccionaron de los modelos de combustibles propuestos por Anderson (1982) los que gráficamente coinciden con las condiciones forestales del área de trabajo, para esto se identificó cuál es que conductor primario del fuego (pasto, pasto-arbustos, arbustos, madera muerta, madera en el sotobosque etc.) y las clases de tamaño de combustibles representadas. El uso de fotografías, para designar modelos de combustibles ha sido ampliamente aplicado, lo cual ha derivado en el concepto de fotoseries, que constan de catálogos de fotografías para visualmente clasificar

una zona forestal en los modelos de combustibles pertinentes (Labenski et al, 2022; Flores et al, 2010; Scholl y Waldrop, 1999). De esta forma se usaron los siguientes modelos (Figura 1): M-2= Bosque; M-8= Residuos de bosque cerrado; M-9= Residuos de arbolado de madera dura. Estos modelos se probaron con las cargas de combustibles (t/ha) estándares (Cuadro 1). Los resultados se compararon con los obtenidos con los mismos modelos pero basados con las cargas obtenidas en campo, donde los combustibles de 1 hora, se consideraron los siguientes elementos (National Wildfire Coordinating Group, 2022): ramillas entre 0 y 0.6 cm, hojarasca, zacates y herbáceas.

Cuadro 1. Cargas (t/ha) por tipo de combustibles, en relación a los correspondientes modelos de combustibles de Anderson (1982).

Modelo	1-hr	10-hr	100-hr	Vivos
2	4.94	2.47	1.24	1.24
8	3.71	2.47	6.18	0.00
9	7.17	0.99	0.49	0.00
Campo	28.10	2.46	4.57	1.24*

\* Valor estándar correspondiente al Modelo 2.

### Humedad de combustibles

Para la simulación de comportamiento del fuego se requirió conocer el contenido de humedad de los combustibles forestales. En referencia a los combustibles de 1-hora y 10-horas, se usó información humedad relativa y contenido de humedad reportada por Flores y Gómez (2011), con la cual se generaron los siguientes modelos (Figura 2) para estimar el contenido de humedad (CH):

$CH_{1-hr} = (0.1334 * HR) + 1.3129$ ; ;  $CH_{10-hr} = (0.1755 * HR) + 1.1135$  con coeficientes de determinación (R2) de 0.955 y 0.9653 respectivamente. Derivado de esto, para la estimación del contenido de humedad de combustibles de 100-hrs, se usó la siguiente ecuación:  $CH_{100-hr} = (CH_{10-hr} / CH_{1-hr}) * CH_{10-hr}$ .

Estos modelos consideran solo una fracción de RH, debido a que se considera el contenido de humedad de los combustibles en un momento dado. Sin embargo, para que los combustibles lleguen a su punto de equilibrio total se requiere que trascorra el tiempo de retardo que corresponde al tamaño de cada combustible (p.e. 1-hora, 10-horas) En cuanto a los combustibles vivos, asumió un contenido de humedad del 80%.

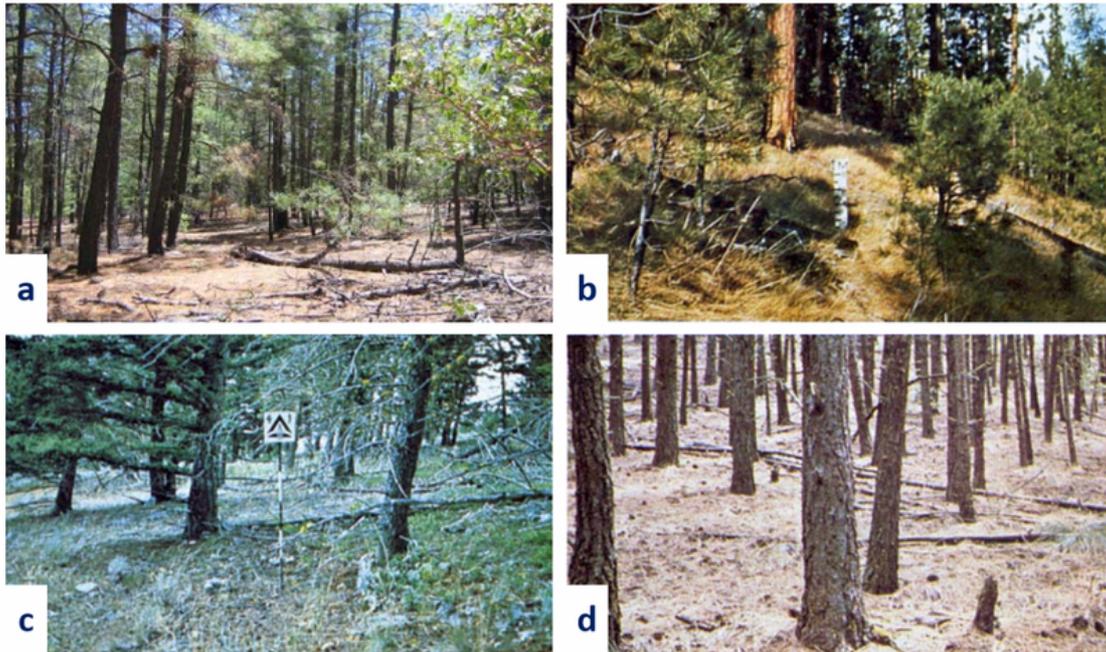


Figura 1. Condiciones forestales de los modelos de combustibles más similares al área de trabajo (a): b) Modelo 2; c) Modelo 8; y d) Modelo 9 (Modificado de Anderson, 1982).

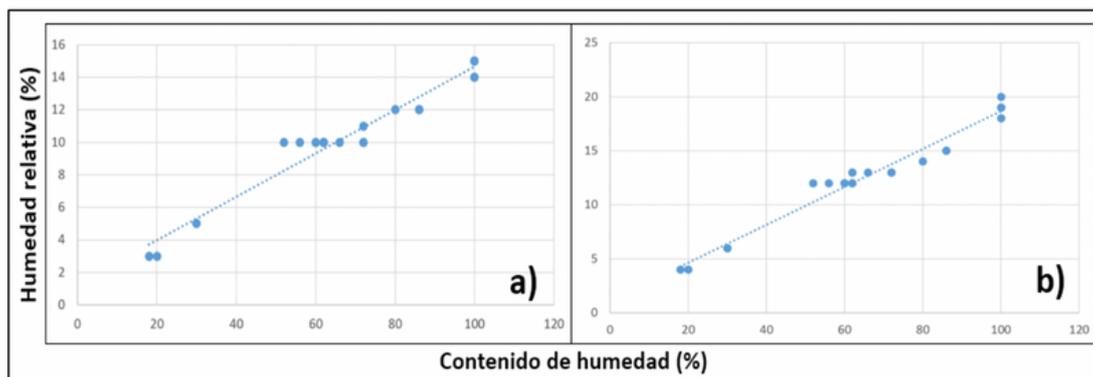


Figura 2. Tendencia de la relación de humedad relativa y contenido de humedad de combustibles forestales: a) combustibles de 1-hora; b) combustibles de 10 horas.

### Procesos de simulación

Tasa de propagación. El análisis comparativo de las diferentes simulaciones del comportamiento del fuego se enfocó en la estimación de la velocidad de propagación (m/min) y la longitud de llama (m), cuyas simulaciones se hicieron con el sistema FUEGO (Flores, 2019; Flores *et al.*, 2007). Donde la simulación de la propagación de incendios superficiales se estimó con base al siguiente algoritmo (1) (Andrews, 2018):

$$ROS = \frac{RI * PFR * (1 + WC + SF)}{BD * EQIG * QIG} \quad (1)$$

Dónde: **ROS**= Tasa de propagación (Rate of Spread (chains/hr)); **RI**= Intensidad de reacción (Reaction

Intensity); **PFR**= Relación de flujo de propagación (Propagation Flux Ratio); **WC**= Coeficiente del viento (Wind coefficient); **SF**= Factor por pendiente (Slope factor); Factor de pendiente y/o viento (Wind-Slope Factor); **BD**= Densidad aparente (Bulk Density (lbs/cu ft)); **EQIG**= Número de calentamiento efectivo (Effective Heating Number); **QIG**= Calor de pre-encendido (Heat of Preignition (BTU/lb)). Estos valores son determinísticos.

Las simulaciones se hicieron a favor de la pendiente. Finalmente, se generó una serie de gráficas que ilustran la tendencia del comportamiento del fuego bajo los diferentes modelos y condiciones ambientales. Estas simulaciones se hicieron bajo dos perspectivas: a) con los valores de cargas de combustibles estándares que corresponden a cada uno de los modelos de combustibles (M-2, M-8 y M-9);

y b) con los mismos modelos, pero sustituyendo las cargas de combustibles estándares por las cargas evaluadas en campo (M-2R, M-8R Y M-9R).

**Regresión múltiple.** Como alternativa para la estimación de la velocidad de propagación de fuego, se usó la ecuación propuesta por Flores *et al.* (2010), donde el parámetro ambiental que mayor correlación manifestó en relación al comportamiento del fuego fue la humedad relativa, mientras que la correlación de la velocidad del viento fue menor (2):

$$VP = 12.2259 - 0.1116HR - 0.278T - 0.162V \quad (2)$$

Dónde: **VP** = Velocidad de propagación del fuego (m/min); **HR**= Humedad relativa (%); **T**= Temperatura (C°); **V**= Velocidad del viento (km/hr)

### Condiciones ambientales

Las estimaciones de la velocidad de propagación del fuego se hicieron durante el tiempo en el que transcurrió la quema prescrita, donde hubo variaciones en las condiciones ambientales. El Cuadro 2 resume estas condiciones ambientales, así como los contenidos de humedad de los combustibles, bajo las cuales se realizaron las simulaciones del comportamiento del fuego. Los modelos implementados consideran que existe un cambio fraccional (en relación al punto de equilibrio) en su contenido de humedad en referencia a la humedad relativa. Es importante considerar esto, ya que el contenido de humedad de

los combustibles no varía al mismo ritmo que las variaciones de la humedad relativa, sobre todo en los combustibles mayores a 1 hora. Sin embargo, es relevante considerar que para mantener un comportamiento del fuego bajo control, se debe tomar en cuenta variaciones inmediatas del contenido de humedad de los combustibles, lo cual implica un modelaje dinámico. Alternativamente, las simulaciones podrían hacerse considerando una humedad constante en los combustibles, sin embargo, este escenario no permitiría apreciar variaciones del comportamiento del fuego en relación a los cambios de humedad relativa.

## Resultados y Discusión

### Comportamiento promedio

Tomando como base el comportamiento del fuego evaluado directamente en campo, y los modelos seleccionados, las estimaciones en las simulaciones presentan resultados muy variables (Figura 3), que va desde una subestimación del 7% (M-8R), hasta una sobrestimación 139.5% (M-2R). Donde sobresalen los casos de las estimaciones del modelo M-2 y de la ecuación de regresión, las cuales, en promedio, fueron muy similares al comportamiento del fuego de campo (2.26 m/min), 2.608 y 2.236 respectivamente.

### Simulación comparativa

Las comparaciones de las cargas de combustibles obtenidas en campo, con las tendencias de las

Cuadro 2. Variación de las condiciones ambientales y contenido de humedad (%) de combustibles durante la quema prescrita (adaptado de Flores *et al.*, 2010).

Hora	T	HR	VV	P	1hr	10hr	100hr	Vivos
07:15	4	87	2	15	12.92	16.38	20.77	80
07:33	6	87	1	15	12.92	16.38	20.77	80
07:38	7	58	2	15	9.05	11.29	14.09	80
07:55	8	60	2	15	9.32	11.64	14.55	80
08:17	8	60	1	15	9.32	11.64	14.55	80
08:20	8	53	5	15	8.38	10.42	12.94	80
08:48	10	61	5	15	9.45	11.82	14.78	80
08:55	15	57	2	15	8.92	11.12	13.86	80

T= Temperatura (C°); HR= Humedad relativa (%); VV= Velocidad del viento (km/hr); P= Pendiente (%).

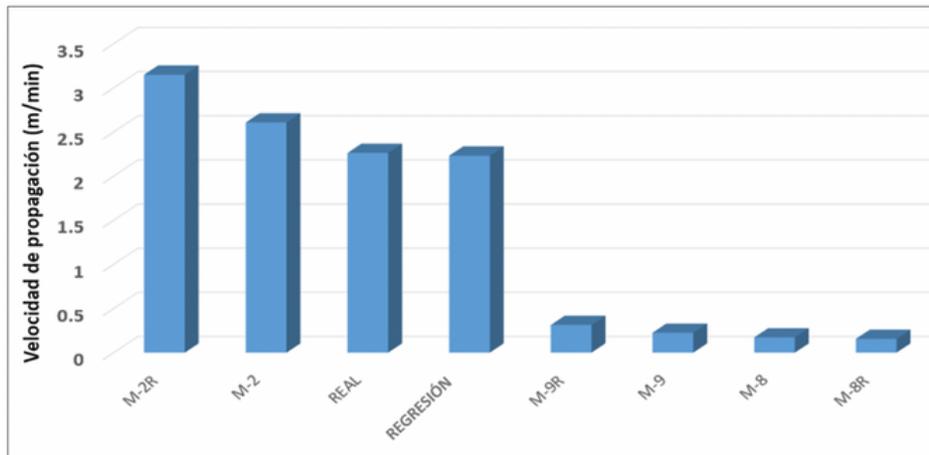


Figura 3. Variaciones de la estimación promedio del comportamiento del fuego, en una quema prescrita a favor de la pendiente: REAL= Medido en campo; REGRESIÓN = Basado en Flores et al. (2010); M-2, M-8 y M-9= Basados en Anderson (1982); M-2R, M-8R y M-9R= Modelos de combustibles con cargas de combustibles estimadas en el área de estudio.

las simulaciones del comportamiento del fuego, de cada uno de los modelos, se presentan en la Figura 4. Como se aprecia en la Figura 4a, los modelos comparados resultaron en una alta variación en relación a las estimaciones de la velocidad de propagación del fuego. Sin embargo, se distinguen dos grupos, el primero se conforma por los modelos M-8 y M-9, los cuales subestiman considerablemente el comportamiento del fuego. Al sustituir las cargas de combustibles en cada uno de estos modelos (M-8R y M-9R), por las cargas evaluadas en campo, no se apreció un mejor ajuste al comportamiento del fuego real (Figuras 4b y 4c).

Por otra parte, el modelo M-2 y el derivado de la regresión (FORMULA) se aproximan más a la velocidad del fuego registrada en campo (Figura 5). Sin embargo, el modelo M-2 subestima la propagación del fuego en valores reales altos y, por el contrario, sobrestima cuando los valores reales son menores. Este comportamiento no se mejoró cuando se sustituyeron las cargas de combustibles por los valores reales (Figura 4d), ya que incluso se sobreestimo aún más en los valores reales bajos.

El comportamiento del fuego es mayormente influenciado por la humedad relativa, debido a que define el contenido de humedad de los combustibles,

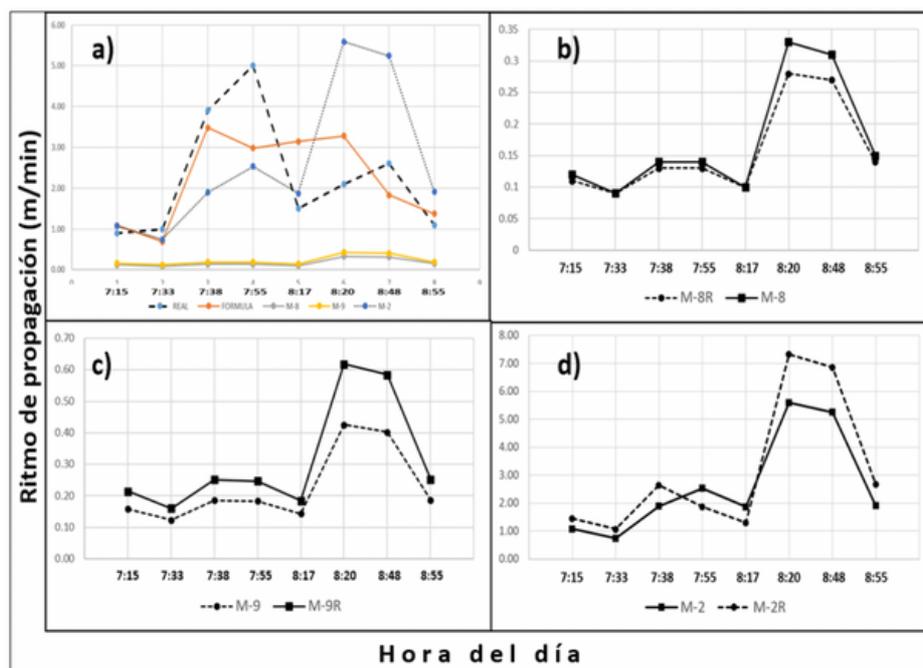


Figura 4. Tendencia del ritmo de propagación del fuego, en relación a las opciones de estimación: a) Todos los modelos; b) Modelo 8; c) Modelo 9; d) Modelo 2.

lo cual es importante desde la perspectiva de los modelos dinámicos. Sin embargo, las tendencias de correlación no están bien definidas para ninguno de los modelos probados (Figura 6). No obstante, es claro el agrupamiento en dos grupos, donde en el primero los valores altos de humedad relativa resultan en valores bajos de la velocidad de propagación del fuego. Por otra parte el otro grupo de valores indica que a valores bajos de humedad relativa se tiene una mayor velocidad de propagación. Lo anterior implica que se podrían definir mejores tendencias si se contara con más datos, sin embargo, los resultados permiten establecer un contexto general de la tendencia esperada.

Los modelos que se ajustan a las tendencias se presentan en el Cuadro 3, donde se indica que el mejor ajuste se define, en todos los casos, con modelos exponenciales. Donde los mejores ajustes resultaron con el modelo de correlación múltiple (FORMULA) y el modelo M-2. Estos modelos se pueden usar para orientar estimar, en forma práctica,

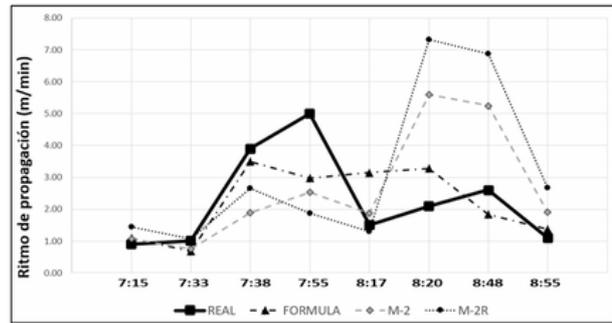


Figura 5. Modelos que mejor se ajustaron al comportamiento del fuego real (medido en campo).

la velocidad del fuego con base a la humedad relativa. Es decir, la definición de la regresión a las curvas obtenida para cada modelo, permite sustituir el valor de la humedad relativa, en las ecuaciones resultantes, para estimar la velocidad de propagación del fuego (Karouni *et al.*, 2014).

Con los resultados generados se buscaría poder predecir no solo el comportamiento potencial del fuego, sino eventualmente también sus efectos, lo cual es posible con base al uso de modelos matemáticos. Sin embargo, es importante considerar

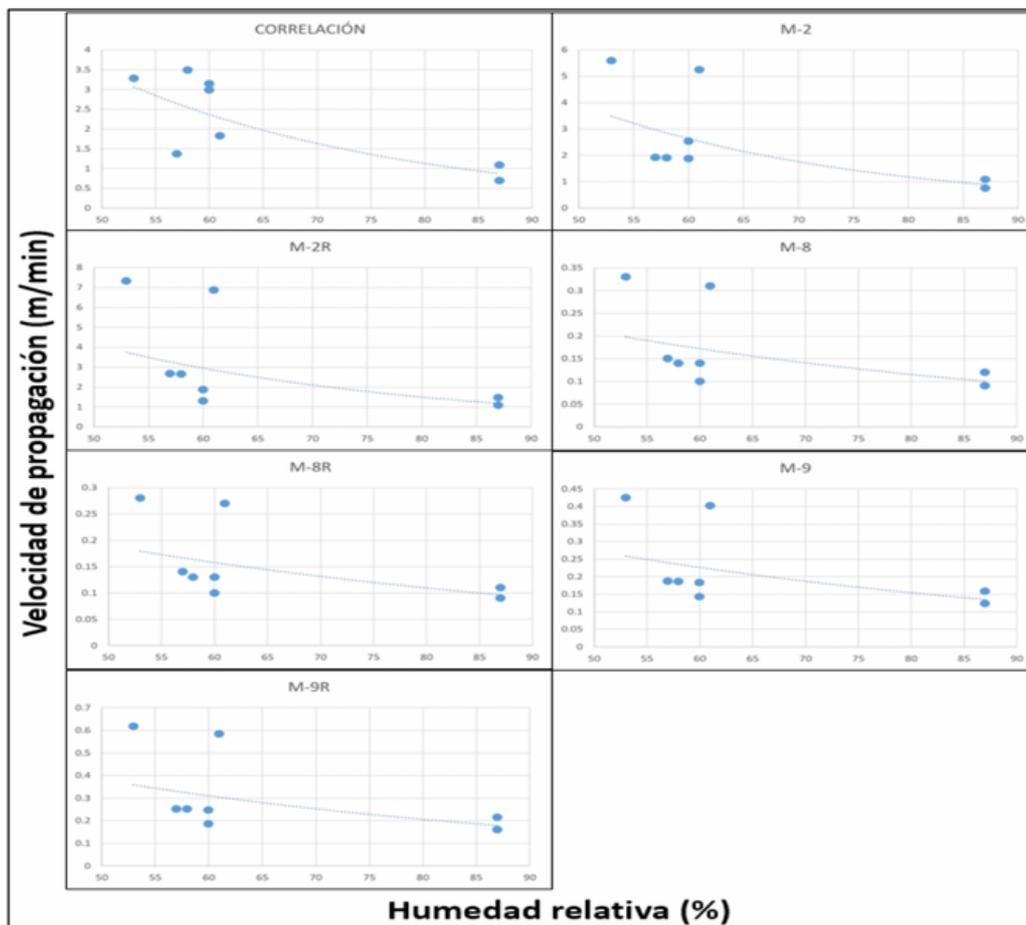


Figura 6. Tendencias de correlación entre la humedad relativa y la velocidad de propagación del fuego, correspondientes a los modelos probados.

Cuadro 3. Modelos que definen la tendencia que más se aproximan al valor real del ritmo de propagación del fuego (RP), basados en su correlación con la humedad relativa (HR).

Modelo	Ecuación	R <sup>2</sup>	F	p-valor
Regresión	$RP = 21.689e^{-0.037HR}$	0.6822	4.47	0.079
M-2	$RP = 29.253e^{-0.04HR}$	0.6156	0.41	0.544
M-2R	$RP = 22.477e^{-0.034HR}$	0.3980	0.09	0.7781
M-8	$RP = 0.5697e^{-0.02HR}$	0.3160	0.12	0.7435
M-8R	$RP = 0.4705e^{-0.018HR}$	0.3322	0.12	0.7375
M-9	$RP = 0.7109e^{-0.019HR}$	0.3186	0.12	0.7383
M-9R	$RP = 1.0564e^{-0.02HR}$	0.3051	0.11	0.7491

que estos modelos requieren de información de varios factores, ya que los incendios forestales son fenómenos complejos involucrando esencialmente combustible (vegetación), topografía y clima (Fujioka *et al.*, 2009). No obstante, la utilidad práctica de estos modelos es que, si es posible conocer las condiciones en que el fuego tiene un comportamiento moderado, entonces se podría usar este fuego en forma controlada para conseguir objetivos específicos (Flores *et al.*, 2010). Además, como en todo proceso de simulación, se requiere establecer ciertas condiciones, por lo que los resultados que se presentan asumen que se tienen condiciones uniformes tanto en tiempo como en espacio (Andrews, 2014). Más aún, se debe considerarse la escala de las predicciones: 1) modelos empíricos, que están relacionados a observaciones de gran escala (Finney *et al.*, 2013); y 2) modelos físicos que consideran los procesos a una escala más puntual, donde contempla la propagación del fuego como resultado de la combustión del material combustible (Prichard *et al.*, 2013). Así mismo, debe tomarse en cuenta que el avance del fuego no se determina por las condiciones promedio de los combustibles, sino que avanza hacia donde se tiene una resistencia menor a la combustión, lo que implica que se propague donde se tienen los combustibles más finos y secos (Cruz y Fernández 2008; Catchpole *et al.*, 1989; Frandsen y Andrews 1979). Más aún, se debe estar consiente que cada incendio es diferente, incluso cuando ocurre en el mismo lugar, definiendo diferentes comportamientos del fuego, lo cual se debe a variaciones (en tiempo y espacio)

de las distintas variable ambientales bajo las que se desarrolla un incendio (Ruíz, 2009). De acuerdo con esto, es claro que los modelos de simulación proporcionan una explicación limitada (Finney *et al.*, 2013). Además de lo anterior, tienen limitaciones debido a que (Tricone y Anderson, 2018): a) la representación de los combustibles (modelos de combustibles) puede ser deficiente; b) se considera que los combustibles muertos se queman incluso en condiciones de humedad relativa alta; y c) los combustibles herbáceos se modelan como secos. Más aún, se pueden tener limitaciones específicas, como la cantidad de combustibles generada después de la ocurrencia de vientos fuertes, o cambios estacionales del contenido de humedad. De acuerdo con esto, el seleccionar un modelo de combustibles incorrecto, en los procesos de simulación, puede resultar en estimaciones imprecisas del comportamiento de fuego, por lo que, como se hizo en el presente trabajo, se puede seleccionar más de un modelo de combustible para una misma área (Tricone y Anderson, 2018). Dentro de esta perspectiva, también debe considerarse que algunos modelos de combustibles funcionan mejor en incendios forestales extremos, mientras que se requieren modelos específicos cuando se quiere predecir el comportamiento del fuego en quemas prescritas (Scott y Burgan, 2005).

La calibración, que se hizo en este trabajo, de las cargas de combustibles de algunos modelos, al usar las cargas registradas en campo, se basa en la determinación de una combinación de parámetros que permita el mejor ajuste posible entre la simulación y la realidad del comportamiento del

fuego, sin perder de vista que esta calibración define una aproximación de las características reales de los combustibles (Scott y Burgan 2005; Cruz y Fernandes 2008).

## Conclusiones

En general, los modelos seleccionados no fueron apropiados para la simulación del comportamiento del fuego, en las quemas prescritas realizadas (quema a favor), ya que la variación de la simulación de la propagación es considerable, principalmente en el caso del modelo M-2R, por lo que se sugiere probar otros modelos. En relación a la propagación del fuego, cuando la pendiente es fija, es clara la influencia de la velocidad del viento en la estimación de la velocidad de propagación del fuego. Aunque en forma gráfica (fotográfica), los modelos M-8 y M-9 podrían seleccionarse por su similitud a las condiciones forestales, es importante considerar el tipo de análisis que se hizo en este trabajo, antes de decidir su selección. Finalmente, se resalta la importancia de contar con información, como en la que se basó este trabajo, principalmente porque los modelos usados difieren de las condiciones de nuestros bosques. Lo que sugiere definir modelos de combustibles propios para las condiciones de la vegetación analizada, con base a los cuales puedan desarrollarse simulaciones del comportamiento del fuego que se ajusten mejor a la realidad. Sin embargo, la definición de un modelo de combustibles no es tan sencilla, ya que implica la evaluación de varios aspectos, tanto de campo como de laboratorio. Más aún, en México son pocos los estudios que reporten en forma integral la evaluación de combustibles y su relación con los modelos de combustibles correspondientes. Debido a esto aún se siguen usando modelos generados en condiciones, relativamente, similares a las del área de estudio.

## Literatura citada

- Albin, F. A. (1976). *Estimating wildfire behavior and effects*. General Technical Report INT-30, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Anderson, H. E. (1982). *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. General Technical Report INT-122, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Andrews, P. L. (2014). Current status and future needs of the BehavePlus fire modeling system. *International Journal of Wildland Fire*, 23: 21-33. <http://dx.doi.org/10.1071/WF12167>
- Andrews, P. L. (2018). *The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 121 p.
- Ascoli, D., Vacchiano, G., Motta, R. y Bovio, G. (2015). Building Rothermel fire behaviour fuel models by Genetic Algorithm optimization. *Journal: International Journal of Wildland Fire, CSIRO: 1-19*. DOI: 10.1071/WF14097
- Castillo, S. y Garfias, S. (2010). Estudio del comportamiento del fuego mediante simulación de incendios forestales en Chile. *Geographicalia*, 58: 80-13.
- Cruz, M.G. y Fernandes, P.M. (2008). Development of fuel models for fire behaviour prediction in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stands. *International Journal of Wildland Fire*, 17: 194-204.
- Finney, M. A. (2004). *FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.
- Finney, M. A. (2006). An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities. In: Andrews, P. L., Butler, B. W. *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*. 28-30 March. Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 213-220.
- Finney, M.A., Cohen, J.D., McAllister, S.S. y Jolly, W.M. (2013). On the need for a theory of wildland fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 22: 25-36. <http://dx.doi.org/10.1071/WF11117>
- Flores G., J. G. (2019). Sistema de simulación puntual del comportamiento del fuego. En *Libro de Resúmenes del XIV Congreso Mexicano de Recursos Forestales. 6-9 noviembre, Durango, Durango*. p. 246.
- Flores J., Xelhuantzi, J. y Chávez, Á.A. (2010). Monitoreo del comportamiento del fuego en una quema controlada en un rodal de pino-encino. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16(1): 49-59.
- Flores G., J.G. y Omi, P.N. (2003). Mapping forest fuels for spatial fire behavior simulations using geomatic strategies. *Agrociencia*, 37: 65-72.
- Flores, J., Gómez, L. y Meléndez, M. (2007). El sistema de simulación FUEGO y su comparación con el monitoreo del comportamiento del fuego en quemas prescritas. *2da Reunión Nacional de Innovación Agrícola y Forestal*. 19-21 Septiembre. Universidad Autónoma de Guadalajara. Zapopan, Jalisco.
- Flores, J., Moreno, D. y Morfín, J.E. (2010). *Muestreo directo y foto series en la evaluación de combustibles forestales*. Folleto Técnico Núm. 4. Centro Experimental Centro-Altos de Jalisco. CIRPAC. INIFAP. 69 pp.
- Flores, J. y Gómez, L. (2011). Estimación práctica de la variabilidad de la humedad de combustibles bajo diferentes ecosistemas forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5): 45-57.
- Frandsen, W. H. (1971). Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combustion and Flame*, 16:9-16.
- Fujioka, F.M., Gill, A.M., Viegas, D.X. y Wotton, M. (2009). Fire danger and fire behavior modeling systems in Australia, Europe, and North America. *Developments in environmental science*, Volume 8. Editors: Bytnerowicz, A., Arbaugh M., Riebau, A., Andersen, C. Elsevier B.V. Pp. 471-497. DOI:10.1016/S1474-8177(08)00021-1
- Johnson, E. A. y K. Miyanishi. (Eds). (2001). *Forest Fires: Behavior and ecological effects*. Academic Press. 594 pp.

- Karounu, A., Daya, B., Bahlak, S. y Chauvet, P. (2014). A simplified mathematical model for fire spread predictions in wildland fires combining between the models of Anderson and Rothermel. *International Journal of Modeling and Optimization*, 4(3): 197-200.
- National Wildfire Coordinating Group. 2022. Glossary. <https://www.nwccg.gov/term/glossary/one-hour-timelag-fuels>. Fecha de consulta: 15 febrero, 2022.
- Prichard, S.J., Sandberg, D.V., Ottmar, R.D., Eberhardt, E., Andreu, A., Eagle, P. y Swedin, K. (2013). *Fuel characteristic classification system Version 3.0: Technical Documentation*. USDA Forest Service. General Technical Report PNW-GTR-887. 79 p.
- Rothermel, R.C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. USDA Forest Service Research Paper INT-115. 40 p.
- Ruíz G, A.D. (2009). Introducción al comportamiento del fuego. *Recursos Rurais*, 5: 15-19.
- Scott, J.H. y Burgan, R.E. (2005). *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 72 p.
- Stratton, R. (2006). *Guidance on spatial wildland fire analysis: models, tools, and techniques*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-183. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 15 p.
- Tricone F. y Anderson, T.R. (2018). *Guía para modelos de combustible de comportamiento de fuego en ecosistemas tropicales*. Sarteneja, Belize. 31 p.
- Tymstra, C.; Bryce, R.W.; Wotton, B.M.; Taylor, S.W. y Armitage, O.B. (2010). *Development and Structure of Prometheus: the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model*. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, Alberta. Inf. Rep. NOR-X-417. 88 p.
- Labenski, P., Ewald, M., Schmidlein, S. y Ewald, F. (2022). Classifying surface fuel types based on forest stand photographs and satellite time series using deep learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 109: 1-17.
- Scholl, E.R., Waldrop, T.A. (1999). *Photos for estimating fuel loadings before and after prescribed burning in upper coastal plain of the southeast*. General Technical Report SRS-26. Southern Research Station. USDA Forest Service. 25 pp.