

Informe

Etapas: III
Producto: 4.1

Proyecto: "Caracterización y clasificación de combustibles para generar y validar modelos de combustibles forestales para México"
CONAFOR-CONACYT 2014- CO2-251694

Generación de modelos de comportamiento del fuego para los tipos de combustibles forestales de México¹

Enrique J. Jardel Peláez¹,
Shatya D. Quintero Gradilla¹, Alma J. Lomelí Jiménez², José Daniel Graf Pérez¹, Juan
Manuel Rodríguez Gómez¹

¹Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario Costa Sur,
Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, Autlán de Navarro, Jalisco,
México CP 48900

²Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional
Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Morelia, Michoacán, México
CP 58190.

*Autor para correspondencia: jardelpelaez@gmail.com

Octubre de 2018

¹ Este documento es una versión en proceso de revisión; no reproducir ni citar sin consentimiento escrito de los autores.

Índice

1. Introducción.....	1
2. Caracterización, clasificación y cartografía de los combustibles y los modelos de comportamiento del fuego	3
2.1 El mapa de camas de combustibles.....	3
2.2 Tipos de combustibles superficiales.....	3
2.3 Modelos de combustibles.....	4
2.4 Consideraciones sobre el uso de los modelos	7
3. Métodos.....	8
4. Resultados y discusión: tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego para México.....	11
5. Literatura citada.....	28

Índice de figuras

Figura 1. Estructura, profundidad y densidad aparente de las camas de combustibles.....	12
Figura 2. Ejemplos de la estructura de camas de combustibles.	13
Figura 3. Comparación de la estructura de camas de combustibles de pinares de alta montaña.....	16
Figura 4. Comportamiento del fuego simulado bajo distintas velocidades del viento.	18
Figura 5. Estructura de camas de combustibles superficiales de selva baja caducifolia.	18
Figura 6. Mapa de tipos de combustibles forestales y modelos estandarizados de comportamiento superficial del fuego en ecosistemas terrestres de México.....	24

Índice de cuadros

Cuadro 1. Parámetros de los combustibles superficiales utilizados en los modelos de comportamiento del fuego.....	5
Cuadro 2. Escenarios de contenido de humedad (%) de los combustibles utilizados en la simulación del comportamiento del fuego en el sistema <i>BehavePlus 5.0.</i>	7
Cuadro 3. Datos de los parámetros de entrada para la simulación del comportamiento del fuego en selva baja caducifolia.	18
Cuadro 4. Tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego para ecosistemas terrestres de México.	22

1. Introducción

La caracterización del complejo de combustibles forestales y su influencia en el comportamiento del fuego y los regímenes de incendios, ha sido identificada como un tema prioritario de la investigación aplicada al manejo del fuego en México (Jardel *et al.* 2010). El objetivo de este fue generar modelos de comportamiento del fuego aplicables a los tipos de combustibles forestales que existen en el territorio mexicano y elaborar un mapa de estos tipos de combustibles y su relación con los modelos.

El trabajo se basó en la revisión de los modelos estandarizados de comportamiento del fuego, desarrollados originalmente para los Estados Unidos (Rothermel 1972, Anderson 1982, Scott y Burgan 2005) y que han sido aplicados en otras partes del mundo. Estos modelos fueron comparados con las características particulares de las camas de combustibles de México, que fueron descritas y mapeadas en un trabajo anterior (Jardel *et al.* 2017). Las estructuras de las camas de combustibles (distribución de las cargas por componente de los combustibles vivos y muertos, y profundidad y densidad del estrato de combustibles superficiales) fueron contrastadas entre sí a partir de los datos que sirven de entrada a los modelos de comportamiento del fuego (reportados por Scott y Burgan 2005) y con los datos de camas de combustibles de México, derivados de estudios de campo. El comportamiento del fuego fue simulado en el módulo SURFACE del sistema *BehavePlus 5.0* (Heinsh y Andrews 2010). A partir de esto se generó una propuesta de clasificación de los tipos de combustibles de México y se estableció su relación con los 40 modelos de Scott y Burgan (2005), discutiendo su aplicación para el caso de México.

Los combustibles forestales (la biomasa de plantas vivas o muertas en los distintos estratos de la cubierta vegetal y el suelo), constituyen uno de los tres factores clave que determinan el comportamiento del fuego y los efectos de los incendios forestales, junto con el estado del tiempo atmosférico y las condiciones topográficas. De los tres factores del ambiente del fuego, el combustible forestal es el único que puede ser modificado a través de intervenciones de manejo. La caracterización de los combustibles forestales es fundamental para la evaluación de la inflamabilidad, peligro y efectos ambientales de los incendios, así como para el desarrollo de prácticas adecuadas de manejo del fuego.

La caracterización, cuantificación, clasificación y mapeo de los combustibles forestales es fundamental en la evaluación del potencial, peligro y riesgo de incendios, en el estudio de los efectos ecológicos y ambientales del fuego, y en el desarrollo de buenas prácticas de manejo del fuego (Sandberg *et al.* 2001, Keane y Reeves 2012). El mapeo de combustibles implica la dificultad de representar en mapas, a diferentes escalas, la variabilidad espacial y temporal del complejo de combustibles. En el caso de los combustibles superficiales, es particularmente difícil representarlos adecuadamente en el caso de los bosques y selvas, ya que la cubierta del dosel arbóreo limita la capacidad para observar las condiciones del sotobosque y el mantillo del suelo (hojarasca y material leñoso caído) aplicando técnicas de percepción remota (Keane y Reeves 2012).

En un trabajo previo (Jardel *et al.* 2017), se elaboró un mapa escala 1:250,000 de camas de combustibles basado en la caracterización de unidades del paisaje que representan formaciones vegetales (tipos de vegetación del mapa de uso del suelo de INEGI, Serie V) bajo distintas condiciones bioclimáticas (mapa de zonas bioclimáticas basado en el sistema

de Holdridge). Las características de las distintas clases fueron descritas tomando en cuenta la fisonomía de la vegetación, la influencia de los factores bioclimáticos (temperatura media anual y balance entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial anual), datos publicados de biomasa de plantas arriba del suelo y biomasa del mantillo (combustible potencial) y su relación con las propiedades de los combustibles forestales. Se obtuvieron así 26 clases que representan camas de combustibles genéricas (unidades del paisaje relativamente homogéneas, generalizadas a la escala del mapa, que representan condiciones del complejo de combustibles que determinan la conducta y efectos potenciales del fuego. Estas camas genéricas son la base para una clasificación jerárquica para el mapeo de combustibles a escalas de representación cartográfica más finas.

Las camas genéricas fueron utilizadas como punto de partida para elaborar una tipología de los combustibles que determinan el comportamiento superficial del fuego y que puedan relacionarse con los 13 modelos estandarizados de Rothermel (Anderson 1982) y los 40 modelos descritos por Scott y Burgan (2005).

El mapa de tipos de combustibles forestales y modelos estandarizados de comportamiento del fuego en ecosistemas terrestres de México, se basa en una caracterización de tipos de combustibles, derivada del mapa de camas de combustibles genéricas, las cuales son unidades del paisaje definidas por la cubierta vegetal actual y las condiciones bioclimáticas. Las características de la vegetación y las condiciones del clima que influyen en la productividad primaria neta de los ecosistemas, permiten inferir las propiedades potenciales de las camas de combustibles, asumiendo que no hay influencia de otros factores. Esta es una generalización útil para definir clases en un mapa a escala regional o nacional (1:250,000), pero no para definir las condiciones específicas de una localidad en un momento determinado. Las camas de combustibles genéricas son categorías generales; dentro de una unidad del paisaje asignada a una clase genérica, existe variación interna que debe ser tomada en cuenta.

La asignación de un modelo de combustibles específico a una unidad del paisaje, derivada de un mapa a escala 1:250,000, es una generalización aventurada. El complejo de combustibles varía espacialmente a una escala mucho más fina, bajo la influencia de las condiciones de sitio, los regímenes históricos de perturbación y factores de cambio antropogénicos. Por lo tanto, las clases del mapa que aquí se presenta, corresponden a tipos generales los combustibles que conducen la propagación de incendios superficiales y, para cada clase, se indican los modelos de Scott y Burgan (2005) que pueden ser aplicados, considerando la variabilidad existente dentro de cada clase, observada en estudios de campo.

En resumen, el mapa representa los *tipos de combustibles* que determinan la propagación superficial de incendios forestales; para cada tipo, se indican los *modelos estandarizados de comportamiento del fuego* de Scott y Burgan (2005) aplicables. La leyenda del mapa establece también la relación de los tipos de combustibles con la caracterización y clasificación del mapa de camas de combustibles elaborada para México (Jardel *et al.* 2017).

El mapa de modelos de combustibles sirve como una guía general para identificar las características generales de los tipos de combustibles superficiales a escala nacional o regional. Para una aplicación local, sirve de entrada al proceso de identificación y selección

de los modelos de combustibles que pueden ser utilizados para modelizar el comportamiento del fuego en condiciones específicas.

En la guía técnica divulgativa para la aplicación de los modelos estandarizados del comportamiento del fuego (producto 4.3 del proyecto), que acompaña a este trabajo, se presentan los conceptos básicos sobre camas, tipos y modelos de combustibles, potenciales de incendios y comportamiento del fuego. En segundo lugar, se revisan las características de las camas de combustibles que sirven de entrada a los modelos y su relación con el comportamiento esperado del fuego bajo condiciones de referencia estándar, siguiendo la propuesta de tipos de combustibles de México y explicando la aplicación a estos de los 40 modelos estandarizados de comportamiento del fuego de Scott y Burgan (2005).

2. Caracterización, clasificación y cartografía de los combustibles y los modelos de comportamiento del fuego

2.1 El mapa de camas de combustibles

Las camas de combustibles son unidades del paisaje relativamente homogéneas que representan un ambiente característico que determina el potencial de propagación del fuego (superficial o de copa) y el potencial de consumo de los combustibles en las distintas fases de la combustión y sus efectos (Riccardi *et al.* 2007).

Las unidades del paisaje del mapa de camas de combustibles fueron construidas combinando la vegetación actual (mapas 1:250,000 de la Serie V de INEGI, 2015) con un mapa de zonas bioclimáticas elaborado a partir de Atlas Climatológico de México (www.uniatmos.unam.mx). Las clases en el mapa representan *camas de combustibles genéricas* (generalizadas a escala 1:250,000), que pueden subdividirse en camas específicas a otras escalas de representación cartográfica más finas o a escala de sitio. Estas clases indican un tipo de vegetación (formación fisonómica) dentro de una zona bioclimática determinada. Las características fisonómicas de la vegetación actual son un subrogado de las propiedades de las camas de combustibles como son la forma de vida dominante, densidad, altura y estratificación vertical de la cubierta vegetal (que indican los estratos por donde puede propagarse el fuego y su profundidad) y fenología de hojas (dominancia relativa de elementos perennifolios o caducifolios) y tipos de hojas de los componentes dominantes (coníferas, latifoliadas, crasicaulas, rosetófilas, espinosas, etc.) que influyen en las propiedades del mantillo del suelo (estrato de hojarasca y material leñoso caído). La vegetación existente representa el tipo de *combustible actual*. Las zonas bioclimáticas representan los factores del clima (temperatura media anual, precipitación anual, evapotranspiración potencial anual y estacionalidad de la lluvia) que influyen en la productividad primaria neta de los ecosistemas y, por lo tanto, en el potencial de acumulación de biomasa (*combustible potencial*), así como en la estacionalidad de la temporada de incendios en la que hay combustible lo suficientemente seco para encenderse y mantener la propagación del fuego (*combustible disponible*).

2.2 Tipos de combustibles superficiales

El mapa de camas de combustibles fue utilizado para definir clases de tipos de combustibles que determinan el comportamiento del fuego en su propagación superficial (velocidad de propagación y longitud de las llamas en el frente de los incendios). La

caracterización de las propiedades físicas de los combustibles superficiales es la base de los datos que se utilizan como entrada para los modelos estandarizados de comportamiento del fuego, que sirven para simular dicho comportamiento en sistemas de modelos de simulación como *BehavePlus* (Heinsch y Andrews 2010). En la caracterización original de los tipos de camas de combustibles básicas o genéricas, utilizadas para generar los 13 modelos de comportamiento del fuego (Rothermel 1972, Anderson 1982), se identificaron cuatro grupos que corresponden al estrato superficial que conduce la propagación del fuego: pastos, matorral, mantillo bajo arbolado y residuos de árboles derribados por operaciones de corta o eventos meteorológicos extremos. Posteriormente en la generación de los 40 modelos de Scott y Burgan (2005), se incluyeron dos grupos adicionales que son mixtos: pastos y arbustos combinados y mantillo y sotobosque bajo arbolado; añadieron además una categoría para condiciones en las que no ocurren incendios forestales, para dar consistencia a la elaboración de mapas de modelos de combustibles.

2.3 Modelos de combustibles

Los modelos de combustibles describen el probable comportamiento del fuego modelizado a partir observaciones empíricas (los modelos conceptuales de las primeras versiones de predicción de patrones de conducta de los incendios), de ecuaciones (modelos matemáticos como las ecuaciones de Rothermel) o programas de cómputo (modelos o sistemas de simulación, como *Behave*), a partir de un conjunto de atributos o propiedades físicas de diferentes tipos de camas de combustibles, que se usan como entradas de información para la predicción del probable comportamiento superficial del fuego en incendios forestales. Para cada modelo de combustibles se espera un comportamiento del fuego característico (velocidad de propagación y longitud de las llamas en el frente de incendios superficiales), bajo determinadas condiciones de humedad de los combustibles, velocidad del viento a la altura media de las llamas e inclinación de la pendiente. Aunque coloquialmente se habla de “modelos de combustibles”, se trata en realidad de modelos de comportamiento del fuego que usan como base de información las propiedades de los combustibles forestales.

Los modelos estandarizados de comportamiento del fuego más comúnmente utilizados (Anderson 1982, Scott y Burgan 2005) se basan en las ecuaciones (modelos matemáticos) desarrollados por Rothermel (1972). Básicamente constituyen tipos estándar de camas de combustibles para los que se espera un comportamiento del fuego característico. Las camas de combustibles son caracterizadas por: (a) la carga de combustibles superficiales (masa por unidad de superficie) clasificados en combustibles muertos por categoría de tamaño o tiempo de retardación (1 hora, < 0.6 cm; 10 horas 6-2.5 cm; 100 horas 2.5-7.6 cm) y combustibles muertos (herbáceos y leñosos); (b) la relación área de la superficie/volumen (m^2/m^3) de las partículas de 1-h y de combustibles vivos herbáceos o leñosos; la profundidad de la cama de combustibles (m); la humedad de extinción de los combustibles muertos (%), y el contenido de calor (kJ/kg) de los combustibles vivos y muertos. Estas son las entradas para el sistema de simulación *Behave*, en el cual pueden utilizarse los modelos preestablecidos (los 13 de Rothermel y los 40 de Scott y Burgan) o bien se pueden introducir datos a partir de la información de camas de combustibles específicas. En la simulación pueden utilizarse distintos escenarios de humedad de los combustibles, velocidad del viento e inclinación de la pendiente (Heinsch y Andrews 2010). En el cuadro 1 se describen de manera resumida los parámetros de entrada para la simulación del comportamiento del fuego a partir de las camas de combustibles, ya sean las utilizadas de manera estándar para los modelos de Rothermel o de Scott y Burgan o personalizadas.

Cuadro 1. Parámetros de los combustibles superficiales utilizados en los modelos de comportamiento del fuego (Scott y Burgan 2005, Heinsch y Andrews (2010).

Parámetros (unidades de medición)	Descripción
Identificador del modelo.	Código (1 a 13 en los modelos de Rothermel, o el acrónimo de los modelos de Scott y Burgan: GR, GS, SH, TU, TL, SB) y número de modelo; para camas de combustibles personalizadas el usuario define el código y número de identificación.
Tipo de modelo.	El tipo de modelo de combustible puede ser estático (S) o dinámico (D) para los modelos de combustibles personalizados y estándar. Los modelos de combustibles dinámicos tienen un componente de combustible herbáceo vivo, una porción del cuál es transferido a la carga de combustible muerto dependiendo del contenido de humedad del combustible herbáceo vivo; entre más bajo sea el contenido de humedad, mayor será la transferencia en la carga.
Carga de combustibles de 1 hora ($Mg\ ha^{-1}$).	Peso del combustible muerto de < 0.64 cm de diámetro por unidad de área; incluye acículas, hojas, herbáceas secas y tallos finos de plantas. Este valor no incluye la carga de combustible herbáceo muerto que es transferido del combustible vivo en los modelos dinámicos. Este es un parámetro importante para el modelo de propagación del fuego de Rothermel (1972).
Carga de combustibles de 10 horas ($Mg\ ha^{-1}$).	Peso del combustible muerto de 0.64 a 2.54 cm de diámetro por unidad de área. Incluye principalmente material leñoso caído como restos de ramas secas.
Carga de combustibles de 100 horas ($Mg\ ha^{-1}$).	Peso del combustible muerto de 2.54 a 7.62 cm de diámetro por unidad de área. Incluye principalmente material leñoso caído como restos de ramas secas. Los combustibles más grandes que esta categoría (por ejemplo el combustible de 1000 horas) no contribuyen a la propagación superficial del fuego de acuerdo con el modelo de propagación superficial del fuego de Rothermel (1972).
Carga de combustible herbáceo vivo ($Mg\ ha^{-1}$).	Peso del combustible herbáceo vivo por unidad de área. Son pastos y hierbas vivos, anuales o perennes.
Carga del combustible leñoso vivo ($Mg\ ha^{-1}$).	Peso del combustible leñoso vivo por unidad de área. Incluye el follaje y los tallos muy finos de arbustos vivos, que son perennes y frecuentemente tienen una relación área-volumen que va de 3,281 a 6,562 m^2/m^3 .
SAVR - Relación área/volumen (m^2/m^3) de las partículas de combustible de: - Combustible muerto de 1 hora. - Combustible herbáceo vivo. - Combustible leñoso vivo.	La SAVR es el área de la superficie de las partículas de combustibles (m^2) dividida entre su volumen. Las partículas gruesas, como los troncos, tienen una SAVR menor que las partículas finas como las acículas o las hojas de pastos. La SAVR caracteriza indirectamente la geometría de las partículas de combustibles y su efecto en la combustión, así como su respuesta a las fluctuaciones de temperatura y humedad ambiente. Las partículas finas se secan o humedecen más rápidamente y se encienden más fácilmente que las partículas gruesas. Los valores de SAVR utilizados en los modelos de Scott y Burgan para pastos finos y hojas de latifoliadas son en promedio de 8,202 $m^{-2} m^{-3}$ y para pastos gruesos y acículas varían de 1,640 a 4,921 $m^{-2} m^{-3}$. Para los combustibles leñosos se utiliza una SAVR de 3,281 a 6,562 $m^{-2} m^{-3}$.

Cuadro 1. Parámetros de los combustibles superficiales (continuación).

Parámetros (unidades de medición)	Descripción
Profundidad de la cama de combustibles (m).	Es la profundidad o altura del combustible superficial; no incluye la capa de fermentación. Un valor único de la profundidad de la capa de combustible debe ser usado para cada modelo de combustible. Si las camas varían grandemente, se tiene la opción de usar dos modelos de combustibles para describir un área determinada. El modelo de propagación del fuego de Rothermel es muy sensible a esta variable y la asume como una profundidad uniforme. Por lo anterior, se debe estimar un valor característico para un área en particular.
Contenido de humedad de extinción del combustible muerto (%)	Es el contenido de humedad característico del combustible muerto arriba del cual no se consigue una predicción estable de propagación del fuego. La humedad de extinción del combustible muerto asignada a una modelo define el promedio ponderado de contenido de humedad al cual el fuego no se propaga en el modelo de Rothermel. Este parámetro se asocia al clima; para climas secos tiende a ser menor, mientras que en climas húmedos tienden a tener humedades de extinción más altas. Los nombres de los modelos de Scott y Burgan incluyen la referencia a la humedad del clima en el cual el modelo se encuentra.
Contenido de calor del combustible (kJ kg^{-1}) para: - Combustible muerto y - Combustible vivo.	Es la cantidad de energía contenida en una unidad de combustible muerto, expresada en kilojoules por kilogramo. Para los modelos estándar se de comportamiento superficial del fuego el contenido de calor se consideró uniformemente con un valor de $18,622 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Una cuestión importante que debe tenerse en mente al utilizar los modelos es que estos representan las condiciones probables de comportamiento del fuego en los incendios forestales partiendo de las propiedades de diferentes tipos de combustibles que se encuentran sobre la superficie. Esto quiere decir que son las características de la hojarasca, el material leñoso caído, los pastos y los arbustos los que determinan la velocidad de propagación y la intensidad del frente de los incendios, modelizado a partir de las ecuaciones de Rothermel bajo distintos escenarios de condiciones ambientales como el estado del tiempo (que influye en la humedad de los combustibles y en el efecto del viento) y la topografía. El cuadro 2 muestra distintos escenarios de la humedad de combustibles utilizados en la simulación del comportamiento del fuego.

Los modelos no deben confundirse con tipos de vegetación; cuando se habla de modelos de pastizales o de matorrales, esto se refiere al estrato que conduce la propagación del fuego. En el caso de los modelos que se aplican a condiciones en las que el combustible superficial está bajo el dosel arbóreo, la influencia de este se manifiesta principalmente en el aporte de hojarasca y material leñoso caído al mantillo, las condiciones de cobertura que tienen efecto sobre la densidad del sotobosque y el efecto de la masa arbórea sobre la velocidad del viento.

Cuadro 2. Escenarios de contenido de humedad (%) de los combustibles utilizados en la simulación del comportamiento del fuego en el sistema *BehavePlus 5.0*. Basado en Scott y Burgan (2005; cuadros 3 y 4, pág. 8).

Componente	Escenarios de humedad			
	Muy seco	Seco	Húmedo	Muy húmedo
Combustibles muertos	Muy baja	Baja	Moderada	Alta
1 – hora	3	6	9	12
10 – horas	4	7	10	13
100 – horas	5	8	11	14
Combustibles vivos	Curado	Curado 2/3	Curado 1/3	No curado
Herbáceos	30	60	90	120
Leñosos	60	90	120	150
Aplicación a los tipos de combustibles por zona bioclimática ^(*) .	Zonas áridas, semiáridas y cálidas subhúmedas	Zonas templadas húmedas o subhúmedas	Zonas templado-frías o semifrías húmedas	Zonas cálidas o templadas muy húmedas

(*) Temperatura media anual por zona térmica: cálidas > 19°C; templado-cálidas 11-19°C; templado-frías 7-11°C; semifrías 3-7°C. Zonas de humedad (cociente evapotranspiración potencial anual/precipitación anual): muy húmedas <0.5; húmedas 0.5-1.0; subhúmedas 1.0-2.0; semiáridas 2.0-4.0; áridas >4.0.

2.4 Consideraciones sobre el uso de los modelos

Debe de tomarse en cuenta que los modelos son representaciones idealizadas del comportamiento del frente del fuego en incendios superficiales, bajo ciertos supuestos: (a) el frente del incendio avanza con velocidad uniforme a favor de la pendiente, (b) el modelo es aplicable solamente a la fase de combustión con llamas y no considera las fases de combustión con brasas o rescoldos; (c) los combustibles son continuos y uniformes; (d) el modelo es aplicable sólo al fuego superficial; (e) el modelo no considera la formación de focos secundarios causados por la dispersión de pavesas; (f) no se consideran efectos de turbulencias y perturbaciones originadas por el propio incendio; (g) los resultados se refieren sólo a lo que acontece en el frente del incendio; (h) los combustibles finos son los responsables del avance del fuego; (i) el modelo no considera los combustibles mayores a 7.5 cm (más de 100 horas de retardo) (Vélez 2000).

Los modelos en general (y los modelos de comportamiento del fuego en particular), sirven como herramientas para estudiar o explicar un fenómeno de una realidad que es más compleja, resaltando ciertas propiedades a partir de ciertas consideraciones o supuestos que siempre deben tomarse en cuenta. Los modelos predictivos nos dan una idea de cómo puede ocurrir o comportarse el fenómeno de interés (en nuestro caso, el comportamiento del fuego superficial); la capacidad predictiva de los modelos siempre tiene limitaciones y un componente de incertidumbre. Los modelos sirven como una herramienta que nos ayuda prever el probable comportamiento de un fenómeno, pero siempre con un componente de incertidumbre. Por lo tanto, los modelos deben considerarse como hipótesis que deben ser probadas contrastándolas con lo que realmente ocurre a través de la observación y la experimentación. Los modelos no son la realidad, son representaciones de esta, y no substituyen a la observación y la experiencia directa.

Además de estas consideraciones, para el uso del mapa de tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego, es importante tomar en cuenta que las unidades del paisaje o clases en el mapa son generalizaciones que corresponden a la escala de representación

cartográfica (esto es, al tamaño de lo que el mapa nos muestra). Las clases o categorías del mapa están generalizadas a la escala correspondiente y por lo tanto un mapa a escala 1:250,000 o incluso a escalas más grandes (más cercanas al terreno) no representan la variabilidad que podemos observar en un sitio a escala 1:1, esto es, a escala real. Los mapas son también modelos: el mapa no es el territorio sino una representación de este.

La utilidad del mapa que se presenta es identificar categorías generales de tipos de combustibles existentes en el territorio nacional para fines de planificación del manejo del fuego a nivel de grandes regiones. El mapa sirve también, junto con esta guía, como una ayuda para elaborar mapas a escala más fina o para seleccionar los posibles modelos de combustibles aplicables bajo ciertas condiciones específicas. Por esta razón, las categorías del mapa son tipos de combustibles correspondientes a ciertas camas de combustibles genéricas, que describen sus características generales y, para cada tipo, se indican los modelos de combustibles que pueden ser aplicables, tomando en cuenta la variación de las camas de combustibles en el terreno. No hay un solo modelo aplicable a una clase del mapa, sino varios modelos posibles, dependiendo de factores como las diferentes clases de estructura que existen en un tipo de vegetación como resultado de distintas etapas de la sucesión, tiempo desde el último incendio y la influencia de otras perturbaciones naturales o de origen humano, incluyendo intervenciones de manejo.

3. Métodos

La diversidad del paisaje mexicano hace que la caracterización y clasificación de camas de combustibles sea una tarea complicada. Además de esto, en muchos casos se carece de suficientes datos de inventarios de combustibles y de información sobre el comportamiento del fuego. A esto se añade que los modelos de combustibles de Rothermel y de Scott y Burgan fueron desarrollados para el territorio de los Estados Unidos y en México existen condiciones diferentes en varias camas de combustibles. Sin embargo, fue posible hacer una tipología de camas de combustibles partiendo de los modelos disponibles. El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- a) Para caracterizar los *tipos de combustibles* y los *modelos de comportamiento superficial del fuego* que les corresponden,² se utilizaron como base los mapas de camas de combustibles y potencial de incendios superficiales elaborados previamente (Jardel *et al.* 2017). El mapa de camas de combustibles está basado en unidades del paisaje que representan los tipos de vegetación actual de México bajo distintas condiciones bioclimáticas. *Estas camas están generalizadas a la escala 1:250,000 del mapa.* En el trabajo citado se describieron las características de 26 *camas genéricas*³ a partir de las características fisonómicas de la vegetación, el

² “Tipo de combustible” se refiere a las diferentes clases de camas de combustibles superficiales que se usan como entrada de datos para los parámetros utilizados en la simulación del comportamiento del fuego con el modelo de Rothermel en programas como *BehavePlus*. Scott y Burgan (2005) describen estos tipos de combustibles como GR (pastizales), GS (pastizales y arbustos), SH (matorrales), TU (sotobosque y mantillo bajo dosel), TL (mantillo bajo dosel) y SB (residuos leñosos); estos tipos se subdividen en subtipos (por ejemplo, GR se divide en GR1, GR2, GR3, etc.) que corresponden a los “modelos” estandarizados de comportamiento del fuego. Cada tipo representa una condición a la cual corresponde un comportamiento del fuego esperado.

³ Una “cama de combustibles genérica” corresponde a las clases del mapa escala 1:250,000. Estas clases se consideran relativamente homogéneas a la escala del mapa, pero se subdividen en “camas específicas” que

potencial de acumulación de biomasa asociado a las condiciones bioclimáticas y la revisión de estudios publicados y datos de campo en los que se reportan datos de cargas de combustibles superficiales. Para cada cama genérica se estimaron los potenciales de incendios, siguiendo el enfoque conceptual del Sistema de Clasificación de Características de Combustibles (FCCS por sus siglas en inglés; Ottmar *et al.* 2007, Riccardi *et al.* 2007, Prichard *et al.* 2013); estos potenciales son los siguientes: (1) potencial de propagación de incendios superficiales, (2) potencial de propagación de incendios de copa, y (3) potencial de consumo de combustibles.

- b) Dentro de cada cama genérica existe variación interna, esto es, se encuentran diferentes camas específicas (ver nota 4) debido a la influencia de regímenes de perturbación naturales o antropogénicos, intervenciones de manejo de los recursos naturales y otros factores de cambio que modifican el estado de la vegetación y las camas de combustibles. Como parte del proyecto se elaboró un catálogo de combustibles (Jardel *et al.* 2018), en el que se presentan para cada cama genérica ejemplos de camas específicas para las que se contó con datos cuantitativos de campo. Con estos datos se alimentó la base de información para poder aplicar el FCCS y determinar los potenciales de incendios correspondientes a estas camas. El FCCS hace además una cruza (*crosswalk*) con los modelos de Rothermel y de Scott y Burgan y sugiere los modelos aplicables. Así, se obtuvo una lista de los modelos de combustibles aplicables a las camas específicas dentro de cada cama genérica utilizando FCCS. Esta fue una primera vía para la determinación de los modelos aplicables a cada cama genérica.
- c) Las características de las distintas camas de combustibles genéricas (las del mapa de Jardel *et al.* 2017) y específicas (las del catálogo de combustibles de Jardel *et al.* 2018)⁴ fueron revisadas y comparadas con los tipos de combustibles definidos inicialmente por Rothermel (1972; véase también Anderson 1982) y modificados por Scott y Burgan (2005). Estos tipos de combustibles corresponden a camas de combustibles idealizadas que describen las propiedades físicas de los estratos que conducen la propagación del fuego superficial. Estas propiedades corresponden a los parámetros utilizados para simular el comportamiento del fuego con el modelo de Rothermel y se muestran en el cuadro 1. Cada tipo de combustibles aporta los datos que sirven de entrada para los modelos estandarizados de comportamiento del fuego (Scott y Burgan 2005), con los cuales se pueden hacer simulaciones bajo distintos escenarios de humedad de los combustibles (Cuadro 2), velocidad del viento e inclinación de la pendiente (Heinsch y Andrews (2010). Para cada cama genérica se identificó el modelo o los modelos de Scott y Burgan que se consideraron aplicables.
- d) Para cada tipo de combustibles se elaboraron gráficos de la estructura de las camas de combustibles superficiales con los valores de los parámetros de carga de combustibles vivos y muertos y de profundidad de las camas, utilizados como

representan su variabilidad interna cuando se elaboran mapas a escalas más finas (más cercanas al terreno). La caracterización y clasificación de camas de combustibles es jerárquica y cada nivel de la clasificación corresponde a una escala de representación cartográfica específica.

⁴ Se incluyeron en el catálogo camas de combustibles descritas en distintos trabajos (Alvarado *et al.* 2008, Michel 2010, Chávez *et al.* 2015, Graf-Pérez 2018).

entrada de los 40 modelos de Scott y Burgan (2005; cuadro 7, pág. 18). Se elaboró también el mismo tipo de gráficos de estructura (distribución de las cargas de combustibles entre los distintos componentes de combustible superficial) para las camas específicas para las que se contó con datos de campo. Los gráficos de estructuras (Figura 8) fueron comparados, primero visualmente y luego haciendo una clasificación multivariada (análisis de conglomerados; ver apéndice). Con esto se pudieron establecer cuales son las características similares entre las camas que definen los tipos de combustibles de Scott y Burgan y las camas de combustible de México para las que se cuenta con datos.

- e) A partir de esta comparación, se hicieron simulaciones del comportamiento del fuego en *BehavePlus 5.0* (Heinsch y Andrews 2010), utilizando distintos escenarios de humedad de los combustibles (cuadro 2), velocidad del viento ($0-30 \text{ km hr}^{-1}$) e inclinación de la pendiente ($0-60\%$). Los escenarios de humedad de los combustibles se seleccionaron en función de las condiciones bioclimáticas de las camas de combustibles genéricas, considerando las condiciones de estado del tiempo más comunes que se observan en la estación de incendios (temporada seca del año). Finalmente se compararon los resultados de la simulación, asignando a cada una de las camas específicas el modelo de combustibles que produjo resultados más cercanos. Estos resultados se presentan en la descripción y discusión de cada categoría de tipos de combustibles utilizada en el mapa.
- f) Los modelos asignados a las camas genéricas a partir de los datos de estructura y la simulación del comportamiento del fuego con datos cuantitativos de ejemplos de camas específicas, se comparó también con los resultados de correr las mismas camas en el FCCS y obtener los modelos de combustibles que sugiere este programa.
- g) A partir de esta tipología de combustibles y los modelos asignados a las camas genéricas y específicas, se compararon los resultados con información obtenida previamente sobre comportamiento del fuego obtenida de los talleres con expertos, observaciones directas en incendios y quemas, y revisión de la literatura. Esto permitió evaluar si los modelos seleccionados y el tipo de comportamiento del fuego que les corresponde es coherente con observaciones empíricas.
- h) Por último, se reclasificó el mapa de camas de combustibles con los resultados obtenidos. Las clases del mapa representan tipos de combustibles que determinan la propagación superficial del fuego en los incendios forestales y se indican los modelos de combustibles de Scott y Burgan que pueden aplicarse en cada caso; así mismo, para cada tipo de combustibles del mapa se indican las clases correspondiente del mapa de camas de combustibles (Jardel *et al.* 2018).
- i) El mapa de tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego se complementa con la descripción de cada tipo, la discusión de la aplicación de los modelos y una guía para seleccionar los modelos apropiados, la cual se presenta en la siguiente sección de este trabajo.

4. Resultados y discusión: Tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego para México

La estructura de las camas de combustibles que sirven de entrada a los modelos estandarizados de comportamiento del fuego de Scott y Burgan (2005), que se muestra en la figura 1, sirvió de referencia para caracterizar los tipos de combustibles forestales de México. En la figura las camas están ordenadas de acuerdo con los tipos GR (pastizales), GS (pastizales con arbustos), SH (matorrales), TU (mantillo y sotobosque), TL (mantillo) y SB (residuos leñosos) de los autores citados y se presentan los 40 modelos de combustibles. Los gráficos abajo muestran la profundidad y la densidad (la carga total de combustibles dividida entre la profundidad) de las camas, y los resultados de la simulación del comportamiento del fuego (velocidad de propagación y longitud de las llamas) a una velocidad del viento de 5 km hr^{-1} en pendientes con 10% de inclinación.

Puede apreciarse que las camas utilizadas en los modelos varían marcadamente en cuanto a carga total y estructura (Figura 1). En el grupo GS la mayor parte de la carga, que varía de muy bajas en GR1 a muy altas en GR9, se concentra en los combustibles vivos herbáceos (VH). En el grupo GS predominan los combustibles vivos con una mezcla de los herbáceos y arbustivos; las cargas totales son bajas, excepto en GS4. En el grupo SH el componente más importante es el combustible vivo leñoso y se observa un aumento del componente de combustible muerto de 1-hora y 10-horas. En el grupo TU, aumenta la carga de combustibles muertos de 100-horas y se reduce proporcionalmente la carga de combustible vivo leñoso. En las camas de los grupos TL y SB, prácticamente desaparece el componente de combustibles vivos.

El patrón general es que la profundidad de las camas de combustibles, un factor que influye significativamente en el comportamiento del fuego, es mayor en los tipos GSR, GS y SH que corresponden a formaciones de pastizales y matorrales, y es menor en los grupos TU y TL que corresponden a camas de combustibles superficiales bajo dosel arbóreo. La densidad aparente de las camas se comporta a la inversa y es mayor en las camas de combustibles bajo dosel, donde el principal componente es el mantillo (hojarasca y material leñoso caído).

Este patrón se relaciona con el comportamiento del fuego; los incendios son más intensos (llamas más altas) y se desplazan más rápidamente en las camas con menor densidad. En las camas más densas el fuego se propaga más lentamente y con llamas más bajas.

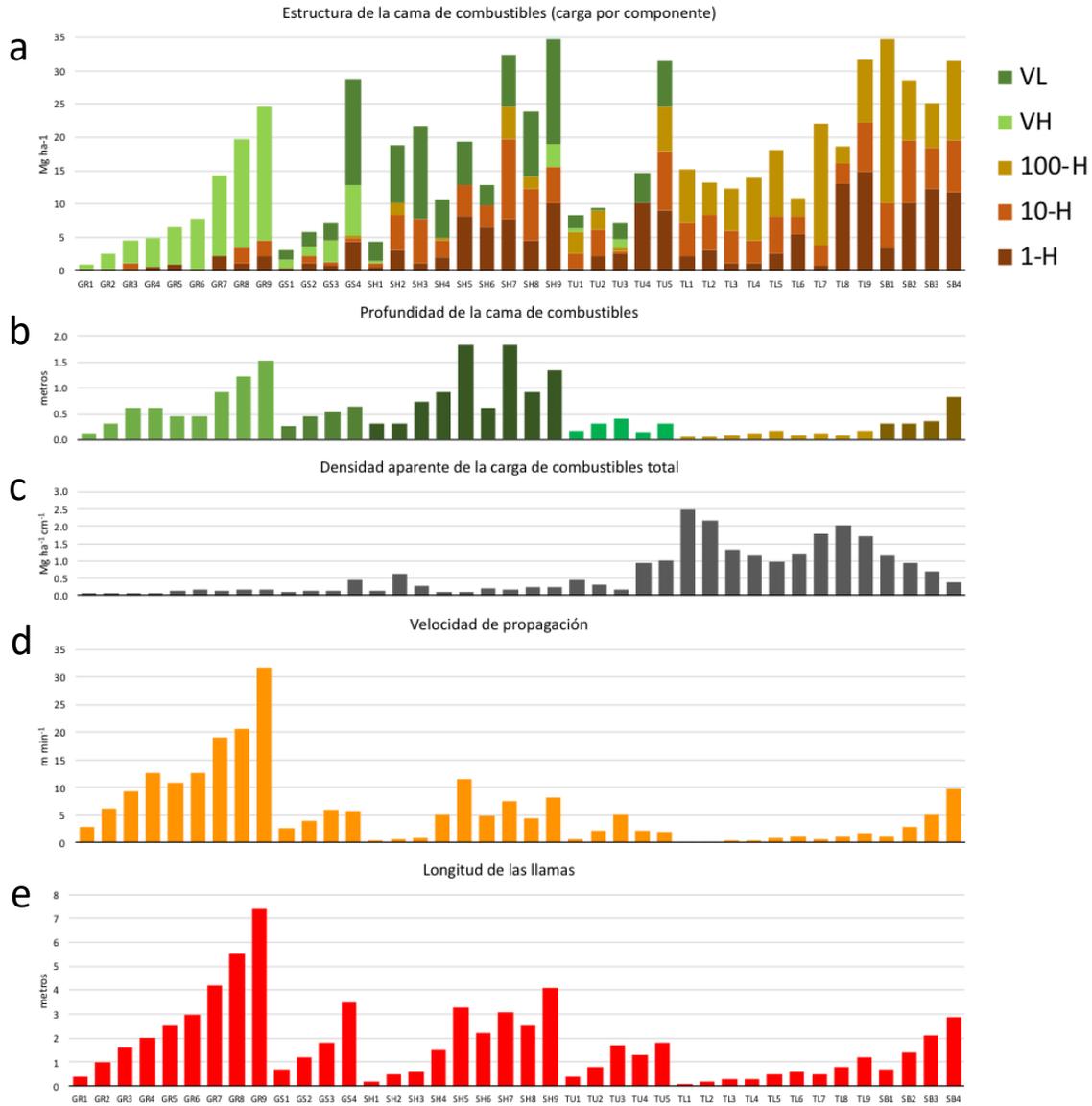


Figura 1. Estructura (a), profundidad (b) y densidad aparente (c) de las camas de combustibles que sirven de entrada a los 40 modelos estandarizados de comportamiento del fuego de Scott y Burgan (2005) y velocidad de propagación (d) y longitud de las llamas (e) simulada en BehavePlus 5.0 para cada modelo, utilizando un escenario “seco” de humedad de los combustibles (porcentaje de humedad: 1-hora, 6%; 10-horas, 7%; 100-horas, 8%; combustibles vivos herbáceos VH, 60%, y combustibles vivos leñosos VL, 90%), con vientos de 5 km hr⁻¹ en pendiente con 10% de inclinación.

Este tipo de patrones sirvió para analizar la información disponible sobre los tipos de combustibles de México, observando tanto las similitudes como las diferencias existentes con las camas que sirven como base de los datos de entrada para los modelos y en la simulación del comportamiento del fuego entre los modelos y ejemplos de camas de combustibles de México (Figura 2).

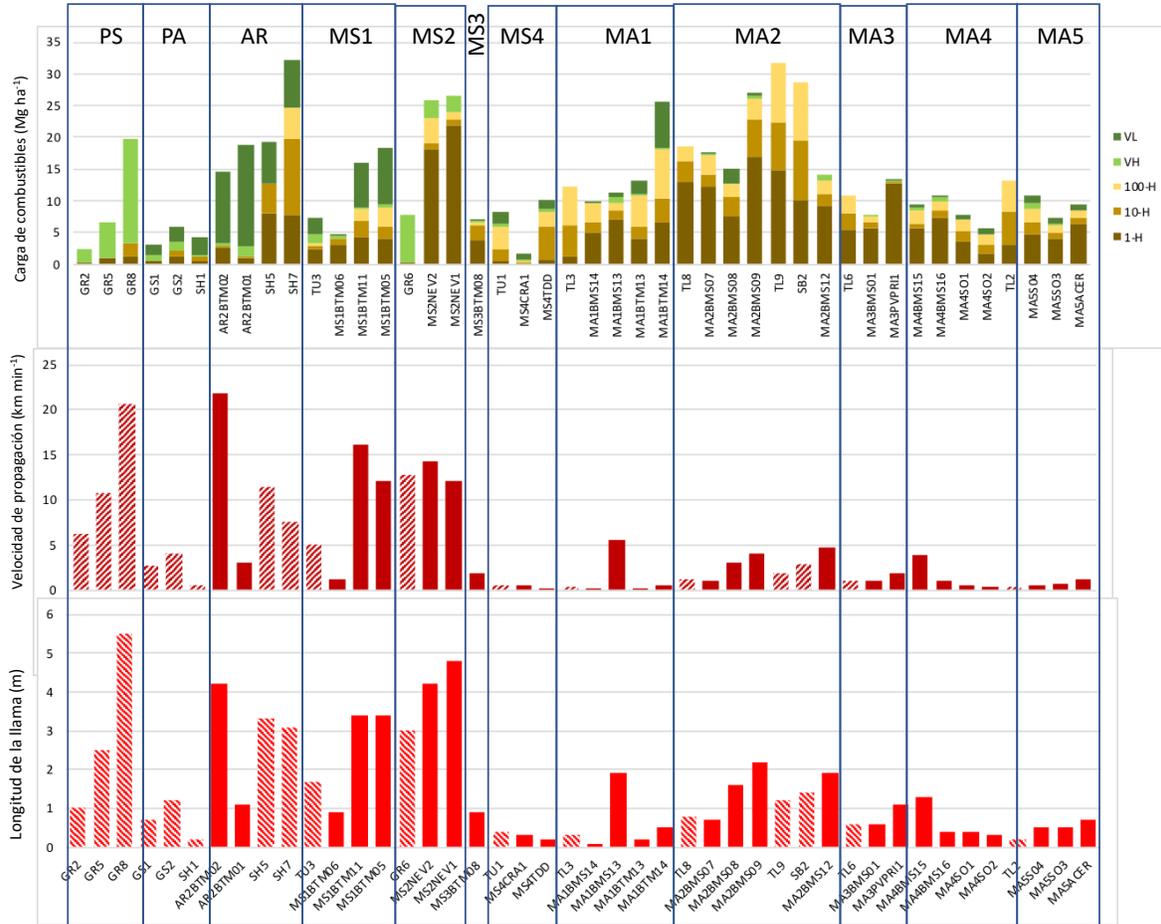


Figura 2. Ejemplos de la estructura de camas de combustibles (arriba) y del comportamiento del fuego en estas (simulado en *BehavePlus 5.0*), por tipo de combustibles (acrónimos en la parte superior) mostrando la velocidad de propagación (en medio) y longitud de las llamas (abajo). Las barras achuradas en las dos gráficas inferiores corresponden a los modelos de Scott y Burgan (2005) como referencia; las barras con relleno sólido son ejemplos de camas de combustibles con inventarios cuantitativos de campo. El escenario de fue: vientos de 5 km hr^{-1} en pendiente con 10% de inclinación.

Los tipos de combustibles son: pastizales (PS), pastizales con arbustos (PA), matorrales (AR), mantillo con sotobosque bajo dosel (MS) y mantillo bajo dosel (MA); estos últimos están divididos en subgrupos que se discuten en el texto.

Para las camas de combustibles de pastizales y pastizales con arbustos (PS y PA en la figura 2), solo se contó con información general sobre biomasa (reportada en Jardel *et al.* 2017; ver referencias en este trabajo). Los tipos de pastizales de México se dividieron en tres grupos, correspondientes a las camas genéricas SAV (sabanas y pastizales de zonas cálidas húmedas), ZAC (zacatonales de alta montaña) y GSA (pastizales de zonas semiáridas), a los que fueron asignados los modelos de Scott y Burgan en forma empírica: (1) pastizales altos y sabanas de zonas cálidas húmedas, donde pueden aplicarse los modelos GR3, GR5, GR6, GR8 y GR9, dependiendo de la carga de combustibles y de la profundidad de las camas; (2) pastizales bajos, densos, de pastos amacollados, característicos de las zonas templadas y semifrías húmedas de montaña (zacatonales),

donde se consideraron adecuados los modelos GR3 y GR5 para cargas bajas, GR6 para cargas moderadas en áreas con presencia de elementos arbóreos dispersos y GR1 para pastos ralos o dispersos sobre materiales volcánicos; (3) pastizales bajos de zonas semiáridas, donde pueden aplicarse los modelos GR1 (en áreas sobrepastoreadas o muy secas), GR2 para cargas bajas, GR4 para cargas moderadas y excepcionalmente GR7 para cargas altas. Se consideró que los modelos de pastizales pueden ser aplicados en México, en tanto se cuenta con información más precisa.

Las camas de combustibles de matorrales xerófilos, sobre las cuales la información cuantitativa es limitada, exceptuando el caso de los chaparrales, fueron distribuidas en dos grupos, uno de pastizales con arbustos y otro de matorrales densos. Para el primer grupo se tomaron como referencia los modelos GS de Scott y Burgan, considerando no sólo la mezcla de pastos y arbustos en la vegetación, sino principalmente la influencia que puede tener el combustible vivo herbáceo en los regímenes de incendios en los matorrales rosetófilos y crasicales de zonas semiáridas y los matorrales micrófilos (junto a los cuales se agruparon los matorrales sarcocales y sarcocrasicales) de zonas áridas.

En zonas semiáridas y cálidas de la región intertropical, donde la razón de evapotranspiración potencial (*Retp*, cociente evapotranspiración potencial/precipitación anual) varía de 2 a 4, la productividad primaria es baja y se acumula poca biomasa, lo cual limita la propagación del fuego y los incendios son infrecuentes (Jardel *et al.* 2014). Sin embargo, después de años con anomalías de lluvia (precipitación mayor al promedio anual), aumenta la cobertura, densidad y carga de pastos creando condiciones que pueden soportar incendios que llegan a ser intensos. De condiciones de pastos dispersos y arbustos bajos en las que se pueden aplicar los modelos SHI (arbustos dispersos con cargas bajas), con el aumento de los pastos debido a la lluvia las camas de combustibles cambian y pueden aplicarse modelos como GS1, GS2 o incluso GR4, que es un modelo de pastizales. La presencia de arbustos altos como los izotes o yucas (*Yucca* spp.), que presentan abundantes hojas secas sobre los tallos, pueden formar antorchas y producir pavesas, creando focos secundarios y acelerando la propagación del fuego. Estas camas se asignaron al tipo de combustibles PA1, pastizal-matorral de zonas semiáridas.

En el caso de los matorrales de zonas desérticas o áridas (cama genérica DES), donde la *Retp* es mayor a 4, las bajas cargas y la discontinuidad de los combustibles no permiten la propagación del fuego, pero pueden ocurrir incendios ocasionalmente, en periodos precedidos por eventos de lluvia en los que aumenta la cobertura vegetal, especialmente de pastos. En este tipo de cama de combustibles, que fue denominada PA2, pastizal-matorral de zonas áridas, cuando aumenta la cobertura de pastos pueden probarse los modelos GS1 (pastos y arbustos con cargas bajas) o GR1 (pastos ralos) y compararlos con el modelo SH1 de arbustos con cargas bajas.

Para las formaciones arbustivas densas de zonas semiáridas templadas, como los chaparrales y los matorrales submontanos, se cuenta con más información. En la costa suroeste de los Estados Unidos y en los países de la cuenca del Mediterráneo, así como en Australia y Sudáfrica, se han hecho numerosas y notables contribuciones al estudio de la ecología del fuego de los matorrales de zonas de clima mediterráneo, caracterizado por un régimen de lluvias en la época fría del año y veranos secos con altas temperaturas. Estos matorrales mediterráneos se encuentran entre los ecosistemas con mayor propensión a incendiarse y con un régimen de incendios intensos y severos. Para una amplia revisión al

respecto véase Keeley *et al.* (2012). En México los matorrales mediterráneos se concentran en el noroeste de la Península de Baja California y comparativamente han sido menos estudiados. Para este trabajo tomamos como referencia de las camas de combustibles la fotoseries del suroeste de Estados Unidos (Ottmar *et al.* 2000) y el FCCS. Para los matorrales submontanos, sólo se cuenta con datos de dos camas de combustibles de la Sierra Madre Oriental (Alvarado *et al.* 2008) y se carece de estudios sobre el comportamiento del fuego. Para otros matorrales similares de otras partes del país no se encontró suficiente información. Es necesario disponer de estudios sobre el comportamiento del fuego en estas camas de combustibles en México, para contar con mejor información y corroborar el supuesto de que los modelos disponibles representan bien el comportamiento del fuego para las condiciones del país.

En los matorrales densos el fuego se propaga principalmente sobre la copa de los arbustos vivos o muertos; el mantillo producido por la caída de ramas y hojas de los arbustos, así como las hierbas y pastos pueden contribuir a la propagación del fuego, pero en menor grado. La cobertura de pastos es menor al 50%. El efecto del contenido de humedad de los combustibles vivos tiene influencia significativa en el comportamiento del fuego.

En las camas de combustibles de matorrales se aplican los modelos 4, 5, 6 y 7 de Rothermel (Anderson 1982) y los tipos de modelos SH de Scott y Burgan (2005). En el presente trabajo definimos un tipo de combustibles AR para las formaciones arbustivas densas, divididas en dos clases: arbustos altos (AR1), que corresponden a los chaparrales (cama genérica CHA), y arbustos medianos a bajos (AR2) en la que se incluyeron los matorrales submontanos (cama genérica STS).

Los modelos de matorral pueden aplicarse también a formaciones vegetales constituidas por renuevo de árboles (bosques en la fase sucesional de establecimiento o plantaciones forestales densas donde los árboles son menores a 2-3 m y las copas están cerca del suelo), donde el fuego se propaga por el estrato arbustivo o de renuevo (Vélez 2000). Así mismo pueden incluirse las formaciones arbustivas densas bajo dosel arbóreo, en las que también el fuego se propaga por los arbustos. En el mapa de tipos de combustibles, debido a la escala (1:250,000), las áreas con renuevo arbóreo aparecen mapeadas en los tipos de combustibles correspondientes a los bosques.

Los modelos de Scott y Burgan (2005) representan una variedad de condiciones de los combustibles y el comportamiento del fuego que pueden aplicarse para la mayor parte de los bosques de coníferas y algunos bosques de latifoliadas de México, pero tomando en cuenta ciertas limitaciones y particularidades que se consideran a continuación.

Partiendo de la comparación entre las camas de combustibles de México y los 40 modelos de Scott y Burgan (2005), definimos dos grandes tipos de combustibles para bosques, subdivididos en 9 tipos menores (Figura 2). Los dos grupos mayores, corresponden a los tipos TU y TL que denominamos respectivamente MS, mantillo con sotobosque y MA, mantillo, por el estrato en el cual se propaga el fuego superficial. No incluimos un grupo específico para los combustibles de áreas con acumulaciones de material leñoso caído (SB de Scott y Burgan), que es una condición creada por eventos de perturbación que causan la caída de árboles en manchones o áreas grandes, como pueden ser huracanes o tormentas e intervenciones de corta de madera. Esta es una condición que varía temporalmente y que sólo se puede mapear para sitios específicos. Los modelos del tipo SB pueden aplicarse a

cualquiera de las clases del mapa que corresponden a camas de combustibles en las cuales hay cubierta arbórea y se incluyen en cualquiera de los dos grupos MS y MA.

El grupo MA se dividió en cuatro tipos: MS1, mantillo de coníferas y sotobosque denso arbustivo, de zonas templadas subhúmedas, una condición que se comparte con bosques del suroeste de los Estados Unidos; MS2, mantillo de pinos y sotobosque denso de pastos, de zonas templado-frías húmedas, que corresponde a los pinares de alta montaña de México; MS3, mantillo de pinos y sotobosque ralo de pastos, de zonas subhúmedas y MS4, mantillo y sotobosque ralo de pastos y arbustos, de zonas cálidas subhúmedas a semiáridas, en el que se incluyeron las selvas bajas estacionalmente secas y los matorrales espinosos (matorral tamaulipeco).

El tipo MS2 presenta condiciones particulares de altas cargas de mantillo de pinos de acículas largas combinadas con una cubierta densa de pastos en el sotobosque, con características estructurales intermedias entre las de un modelo TL y un pastizal. Modelos como GR5 y GR6 predicen un comportamiento del fuego muy parecido al de camas de bosques de pino de alta montaña con un sotobosque denso de pastos, mientras que otras camas del mismo tipo de vegetación, pero con pastos ralos y cargas moderadas en el mantillo, generan un comportamiento del fuego parecido al de modelos TL3 o TL8 (Figura 3). Se decidió definir este tipo de combustible como TU por la influencia del sotobosque de pastos.

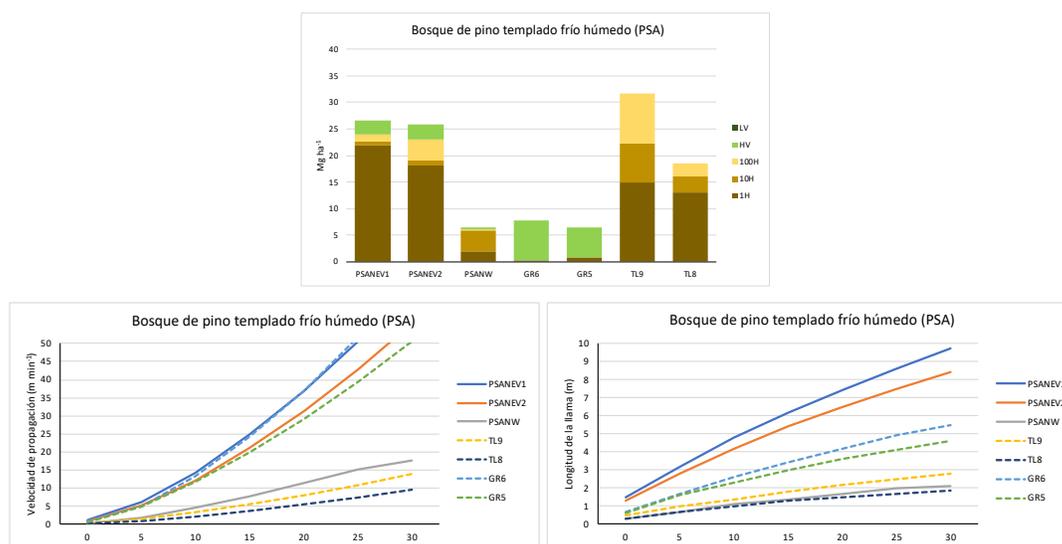


Figura 3. Comparación de la estructura de camas de combustibles de pinares de alta montaña (cama genérica PSA) con modelos del tipo GR (pastizales) y TL (mantillo bajo dosel). La simulación se hizo con un escenario de humedad de los combustibles alta (escenario “húmedo”, ver cuadro 2).

A la cama genérica de bosques de pino-encino de zonas cálidas subhúmedas (PWS), se le asignó el tipo MS3, que corresponde a una condición similar a la del MS1, pero con cargas de combustibles más bajas, con un sotobosque de arbustos bajos y pastos ralos. Se sugieren en este caso los modelos TU1 para cargas bajas y TU2 o TU3 para cargas moderadas; con cargas altas puede aplicarse el modelo TU5. Esta categoría MS3 debe considerarse como provisional, debido a la falta de información de inventarios de combustibles. Los únicos

sitios para los cuales se contó con información dentro de la cama de combustibles PWS, eran áreas perturbadas por incendios recurrentes, que correspondían a formaciones sabanoides (pastizales con árboles dispersos), donde es más conveniente aplicar modelos de pastizales.

En el tipo MS4 se incluyeron a las selvas bajas caducifolias y al matorral tamaulipeco (camas genéricas TDD y STH), que no están adecuadamente representadas por los modelos de combustibles. Aunque hay varios estudios publicados sobre la ecología de la vegetación e inventarios de biomasa en ambos tipos de vegetación, las evaluaciones cuantitativas de combustibles son escasas. Sólo se contó con datos para un estudio de combustibles en la cuenca del Río Ayuquila-Armería, Jalisco (Nieves 2014).

Las características generales de este tipo de combustibles son la presencia de elementos leñosos predominantemente caducifolios, de 2 a 15 m de altura, con un estrato herbáceo bajo (<0.3 m) y ralo, con arbustos bajos dispersos. La carga de combustibles muertos es muy baja (entre 5 y 10 Mg ha⁻¹ o menor), debido a que las altas tasas de descomposición del mantillo durante la temporada lluviosa y cálida limitan la acumulación de hojarasca y material leñoso caído fino. El combustible vivo herbáceo y los arbustos bajos se encuentran generalmente dispersos. Los elementos leñosos altos conservan humedad y se encuentran en su mayor parte sin hojas durante la estación de incendios.

Aunque el ambiente es seco durante la estación de incendios (invierno-primavera), el fuego difícilmente se propaga por la escasez y discontinuidad de los combustibles superficiales; cuando se hacen quemas de desmonte, es necesario hacer primero la tumba y roza de la vegetación y dejarla secar por varias semanas antes de poder quemar (en estos casos se producen incendios intensos). La situación cambia después de años con precipitaciones por arriba de la media que producen un aumento de la biomasa de combustibles superficiales (condición similar al tipo de combustibles PS1); en estos casos, hemos observado en el campo que el fuego llega a propagarse con velocidad baja a moderada y longitud de las llamas baja a moderada. Otro factor que modifica los combustibles superficiales y el comportamiento del fuego es la invasión de pastos en selvas o matorrales degradados; incendios recurrentes pueden crear una condición sabanoide.

El modelo de combustibles de Scott y Burgan que más se acerca al comportamiento del fuego observado en las camas genéricas TDD y STH es el TU1. La velocidad de propagación es lenta y la longitud de las llamas baja. En casos en los que aumenta la densidad del estrato herbáceo-arbustivo bajo, pueden probarse los modelos GS1, GR1 o SH1. En la figura 4 se compara el comportamiento del fuego predicho por estos modelos con el de modelos construidos utilizando datos de campo de los combustibles superficiales en selva baja caducifolia. La estructura de las camas de combustibles se muestra en la figura 5 y los datos de los parámetros utilizados en la simulación en el cuadro 3).

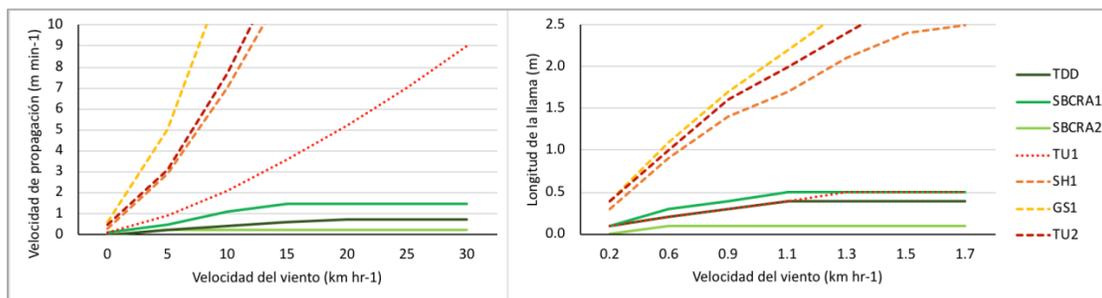


Figura 4. Comportamiento del fuego simulado bajo distintas velocidades del viento (con una inclinación de la pendiente de 10%) para camas de combustibles de selva baja caducifolia (cama genérica TDD), comparado con los modelos TU1, TU2, SH1 y GS1 de Scott y Burgan. A la izquierda, velocidad de propagación; a la derecha, longitud de las llamas. Se utilizó un escenario “seco” de la humedad de combustibles (Cuadro 2).

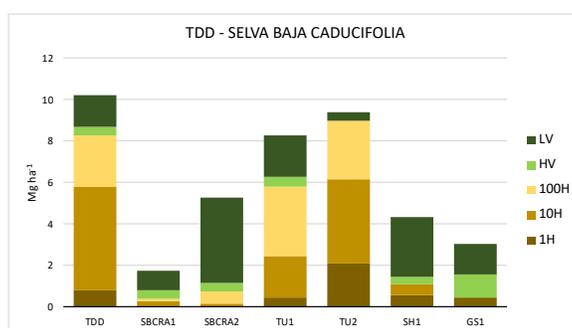


Figura 5. Estructura de camas de combustibles superficiales de selva baja caducifolia (TDD condiciones promedio, SBCRA1 selva no alterada, SBCRA2 selva degradada) comparada con la de las entradas de los modelos TU1, TU2, SH1 y GS1 de Scott y Burgan).

Cuadro 3. Datos de los parámetros de entrada para la simulación del comportamiento del fuego en selva baja caducifolia (cama genérica TDD); los datos corresponden a una cama elaborada a partir de las condiciones promedio observadas en selvas bajas caducifolias de la costa de Jalisco (TDDP) y de la cuenca media del Río Ayuquila-Armería (SBCRA1, selva primaria y SBCRA2, selva degradada), comparados con los datos del modelo TU1 de Scott y Burgan.

Parámetros de entrada del modelo	Camas de combustibles			
	TDDP	SBCRA1	SBCRA2	TU1
Tipo de modelo	Dinámico	Dinámico	Dinámico	Dinámico
Carga de combustibles				
1 hora	0.83	0.002	0.009	0.45
10 horas	4.98	0.31	0.16	2.02
100 horas	2.49	0.12	0.60	3.36
Combustible vivo herbáceo	0.4	0.4	0.397	0.45
Combustible vivo leñoso	1.5	0.92	4.103	2.02
SA/V (m ³ /m ³) combustible de 1 hora	6562	6562	6562	6562
SA/V (m ³ /m ³) combustible vivo herbáceo	5906	5906	5906	5906
SA/V (m ³ /m ³) combustible vivo leñoso	5249	5249	5249	5249
Profundidad de la cama de combustibles (m)	0.05	0.05	0.20	0.18
Humedad de extinción del combustible muerto (%)	20	20	20	20
Contenido de calor del combustible muerto (kJ kg ⁻¹)	18622	18622	18622	18622
Contenido de calor del combustible vivo (kJ kg ⁻¹)	18622	18622	18622	18622

El grupo de mantillo bajo dosel (MA) se dividió en cinco tipos de combustibles que incluyen: MA1, mantillo compacto de coníferas de acículas cortas, de zonas templadas húmedas; MA2, mantillo acolchado de coníferas de acículas largas, de zonas húmedas; MA3, mantillo acolchado de latifoliadas esclerófilas de zonas subhúmedas a húmedas; MA4, mantillo de latifoliadas de zonas húmedas estacionalmente secas y MA5, mantillo de latifoliadas de zonas muy húmedas.

Para los grupos MA1 (bosques de coníferas de zonas templadas húmedas, cama genérica CON) y MA2 (bosques de pino de zonas húmedas, cama genérica PTH), se encuentran condiciones análogas en los Estados Unidos y pueden aplicarse los modelos del grupo TL, que producen resultados similares a los de las simulaciones realizadas con datos de camas de combustibles de México.

En el caso de los modelos de combustibles de bosques en los que dominan latifoliadas esclerófilas (bosques de encino), también pueden aplicarse los modelos desarrollados para bosques caducifolios templados de los Estados Unidos, aunque existen ciertas diferencias que pueden influir en el comportamiento del fuego, pero que no han sido analizadas. Una de estas es la diferencia en el tamaño y grosor de hojas y su SAV; en el tipo MA3, cuando ocurren periodos largos sin incendios, llegan a formarse capas de mantillo profundo, suelto y muy inflamable.

En el tipo MA4, se incluyeron las camas genéricas QTH, bosques de encino de zonas templadas húmedas y TSM, selvas medianas subcaducifolias de zonas cálidas húmedas estacionalmente secas. En la figura 2 se comparan estas camas de combustibles (MA4BMS son camas de bosques de encino y MA4SO1 y MA4SO2 son de selva mediana subcaducifolia). Desde el punto de vista de las características de estas camas de combustibles, presentan similitudes a pesar de su marcada diferencia en composición florística y en las condiciones climáticas en que se desarrollan, en lo que se refiere a la temperatura. En ambos casos se forman capas de hojarasca relativamente compactas de hojas esclerófilas de tamaño mediano, las cargas de combustibles superficiales del mantillo suelen ser moderadas, los arbustos y hierbas en el sotobosque se encuentran dispersos y se mantienen verdes (no contribuyen a la propagación del fuego y pueden tener efectos retardantes). Durante incendios se ha observado que el fuego se propaga lentamente y con llamas bajas. En términos generales, el comportamiento del fuego observado y simulado es similar y pueden aplicarse los modelos TL2 y TL6, o también TU2. Otra similitud es que, a pesar de la diferencia en la temperatura media anual, la estacionalidad de la lluvia es similar y las condiciones de humedad se mantienen gran parte del año, disminuyendo la probabilidad de incendios, que son infrecuentes.

Otra característica similar entre las camas QTH y TSM es que bajo la hojarasca superficial se forma una capa de hojarasca en descomposición y se encuentran suelos con una capa superficial de humus que llega a ser abundante y profundo, especialmente cuando se desarrollan sobre sustrato de roca caliza. Estas capas orgánicas se mantienen húmedas la mayor parte del tiempo, pero cuando se secan pueden sostener la propagación de fuego subterráneo. Se ha observado también que en años con anomalías de sequía los incendios pueden llegar a producir efectos severos, especialmente cuando el suelo orgánico llega a quemarse. Sin duda estas camas de combustibles requieren de una investigación más detallada.

La asignación de los modelos de combustibles en el caso de bosques tropicales muy húmedos y lluviosos es problemática, porque presentan diferencias importantes con los bosques de zonas de latitudes templadas. El clima es más cálido, no hay un periodo invernal en el que se reduzca el crecimiento de las plantas y la descomposición, y la materia orgánica se descompone rápidamente. En consecuencia, el mantillo del suelo es delgado y las cargas de combustibles tienden a ser bajas, además de que la humedad es persistente. Los arbustos pueden ser abundantes, pero se mantienen verdes y no contribuyen a la propagación del fuego. Los incendios son raros o muy infrecuentes, asociados a anomalías de sequía, cuando llega a haber combustible disponible. Para este tipo de combustibles MA5, en el que se incluyeron las selvas altas y medianas perennifolias y los bosques mesófilos de montaña (camas genéricas TEW, TEM y CFO), puede probarse el uso de los modelos TL2 y TL6 o bien TU2, con un escenario de “muy húmedo” (cuadro 2) para la humedad de los combustibles en condiciones normales del estado del tiempo en los climas lluviosos.

Los modelos SB (para residuos leñosos de caída de árboles en áreas abiertas) y otros modelos como TL4 (troncos pequeños caídos), TL5 (altas cargas de material leñoso caído y hojarasca), TL7 (troncos grandes caídos), pueden aplicarse cuando se presentan las condiciones específicas de cada uno en los bosques. En el caso de las selvas que corresponden a los tipos de combustibles MA4 y MA5, que se encuentran cerca de las costas, el efecto de huracanes puede ser un factor crítico en la modificación del complejo de combustibles.

Se agregó un grupo de combustibles para el caso de los humedales (HU), que en los mapas 1:250,000 de camas de combustibles y de tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego se considera como una sola clase por razones de escala. Sin embargo, este grupo puede subdividirse en dos tipos diferentes, para los pantanos herbáceos (HU1, popales, tulares, carrizales y pastizales inundables) y para los manglares (HU2). En un tercer grupo podrían incluirse los tasistales. Aunque las condiciones de inundación limitan la propagación del fuego, los humedales pueden incendiarse. El fuego es parte de la dinámica de los pantanos herbáceos, especialmente cuando hay periodos de desecación o bien cuando el fuego se propaga desde áreas vecinas y se encienden las hojas pasando el fuego por la parte de las plantas que emerge del agua. En el caso de los manglares, en las orillas cuando baja el nivel del agua, o cuando se interrumpe el flujo del hidrológico al cegarse canales o esteros, el suelo orgánico llega a secarse y pueden ocurrir incendios en la capa de hojarasca y material orgánico. Estas camas de combustibles no han sido suficientemente estudiadas en México.

Para la leyenda del mapa de tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego, se incluyeron otras clases que corresponden a coberturas no forestales y que Scott y Burgan (2005) incluyen dentro del grupo NB: áreas no inflamables de desiertos arenosos o terrenos rocosos sin vegetación aparente áreas agrícolas y pastizales inducidos, centros de población y cuerpos de agua, con el fin de lograr una representación cartográfica completa del territorio nacional. En el futuro será importante incluir una clasificación de los tipos de combustibles de áreas agrícolas, debido al uso del fuego en estas y al hecho de que los incendios forestales se inician como quemas agrícolas.

El resultado final de la caracterización de tipos de combustibles de México y su relación con los modelos estandarizados de comportamiento del fuego de Scott y Burgan (2005), se muestran en el cuadro 4; en la figura 6 se presenta el mapa de tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego a pequeña escala, con fines de ilustración (el mapa en formato grande se presenta como producto 4.2 de este informe en formato digital y en versión para impresión).

En el cuadro 4 los tipos de combustibles (columna 1) corresponden a las clases en la leyenda del mapa 1:250,000 (Figura 6); están agrupados de manera compatible con los tipos de modelos de Scott y Burgan (2005). En la segunda columna del cuadro 4 se muestran las clases correspondientes del mapa de camas genéricas de combustibles forestales de México (Jardel *et al.* 2017); en un mismo tipo de combustibles se incluyó una o más camas genéricas, dependiendo de sus características. En la tercera columna se incluyó el valor del potencial de propagación de incendios superficiales determinado para cada cama genérica siguiendo el enfoque conceptual del FCCS (Jardel *et al.* 2017); los valores varían de 0 (potencial nulo), 1 (potencial muy bajo) a 9 (potencial muy alto). Por último, la cuarta columna del cuadro 4 indica los modelos de comportamiento del fuego de Scott y Burgan (2005) aplicables para cada tipo de combustibles; primero se indica el modelo general que mejor describe las condiciones generales de cada tipo de combustibles y las camas genéricas correspondientes y luego se incluyen entre paréntesis otros modelos aplicables, dependiendo de las condiciones de variación interna de cada clase.

El mapa debe considerarse como una primera aproximación a la cartografía de tipos y modelos de combustible, que debe ser aún revisada, verificada en campo, complementada con los resultados de nuevos datos de inventarios de combustibles y evaluada en la práctica, como parte de un proceso de mejoramiento y refinamiento sucesivo. En la guía técnica divulgativa (producto 4.3), se hace una descripción más amplia de cada tipo y subtipo de combustibles y se discuten los criterios para la aplicación de los modelos estandarizados de comportamiento del fuego, así como sus limitaciones en cada caso.

Cuadro 4. Leyenda del mapa de tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego para ecosistemas terrestres de México. Para cada tipo de combustibles se indican las camas genéricas y el potencial de propagación de incendios superficiales (PPSI)¹, de acuerdo con el mapa nacional de camas de combustibles (Jardel *et al.* 2018). La última columna indica los modelos estandarizados de comportamiento del fuego de Scott y Burgan (2005) aplicables; el primer modelo es el que describe las condiciones más comunes y entre paréntesis se indican otros modelos que se pueden aplicar en función de la variabilidad existente dentro de cada clase del mapa.

Tipo de combustibles	Camas genéricas	PPSI	Modelos de combustibles de Scott y Bugan (2005) aplicables
1. PS – Pastizal – el fuego se propaga por el estrato herbáceo dominado por pastos.			
GR			
1.1. PS1 - Pastizales altos de zonas cálido-húmedas.	SAV	9	GR8 (GR3, GR5, GR6, GR9)
1.2. PS2 - Pastizales bajos de zonas templado-húmedas.	ZAC	8	GR5 (GR3, GR6; GR1)
1.3. PS3 - Pastizales bajos de zonas semiáridas.	GSA	7	GR2 (GR1, GR4, GR7; GS1, GS2)
2. Pa – Pastizal-matorral – el fuego se propaga por el estrato de pastos y arbustos combinados.			
GS			
2.1. PA1 - Pastizal-matorral de zonas semiáridas.	SWS	3 (7) ²	GS1 (GS2, SH1, SH2, GR4)
2.2. PA2 - Pastizal-matorral de zonas áridas.	DES	1 (3) ²	NB9 -> GS1 (GR1, SH1)
3. AR – Matorrales – el fuego se propaga por el estrato arbustivo.			
SH			
3.1. AR1 - Matorrales altos de zonas semiáridas.	CHA	9	SH5 (SH1, SH2, SH6, SH7)
3.2. AR2 - Matorrales bajos de zonas semiáridas.	STS	6	SH2 (GS3, SH1, SH2, SH5, SH7)
4. MS – Mantillo y sotobosque bajo dosel arbóreo			
TU			
4.1. MS1 – Mantillo de coníferas y sotobosque denso arbustivo, de zonas templadas subhúmedas.	PTS, JUN	6	TU3 (TU5, SH8)
4.2. MS2 – Mantillo de pinos y sotobosque denso de pastos, de zonas templado-frías húmedas.	PSA	5	TU3 (GR5, GR6, TL8, TL9)
4.3. MS3 – Mantillo de pinos y sotobosque ralo de pastos, de zonas subhúmedas.	PWS	3 (5)	TU1 (TU2, TU3, TL1, TL3, SH2)
4.3. MS4 - Mantillo y sotobosque ralo de pastos y arbustos, de zonas cálidas subhúmedas a semiáridas.	TDD, STH	1 (3) ²	TU1
5. MA – Mantillo bajo dosel arbóreo			
TL			
5.1. MA1 - Mantillo compacto de coníferas de acículas cortas, de zonas templadas húmedas.	CON	4	TL3 (TL8, TU3)
5.2. MA2 - Mantillo acolchado de coníferas de acículas largas, de zonas húmedas.	PTH, PWH	5	TL8 (TL9, TU3, TU5, TU1)
5.3. MA3 - Mantillo acolchado de latifoliadas esclerófilas de zonas subhúmedas a húmedas.	QTS, QWH, QWS	5	TL9 (TL6, TL2, TU2, TU3, GR4)

5.4. MA4 - Mantillo de latifoliadas de zonas húmedas estacionalmente secas.	QTH, TSM	3	TL6 (TL2, TU2)
5.5. MA5 - Mantillo de latifoliadas de zonas muy húmedas.	TEW, TEM,CFO	2 (4) ³	TL2 (TU2, TL6)
6. HU – Combustibles de humedales y riberas.	WET	n.d.	(GR*, TL*)⁴
7. NI – No inflamable	PAD	0	NB9
8. Coberturas no forestales	OTH		
8.1. AGR - Agricultura	AGR	n.d.	NB3 ⁵
8.2. AGU – Cuerpos de agua	AGU	0	NB8
8.3. URB – Centros de población urbanos	URB	0	NB1

Notas:

⁽¹⁾ Potencial de propagación de incendios superficiales, de acuerdo con el Sistema de Clasificación de Características de Combustibles (FCCS; Ottmar *et al.* 2007): 0 no se aplica, 1-9 de muy bajo a muy alto.

⁽²⁾ El potencial de incendios y los modelos de combustibles aplicables cambian bajo la influencia de la variación interanual de la precipitación en zonas áridas, semiáridas o subhúmedas; después de años lluviosos la carga de combustibles aumenta y con esto el potencial de incendios superficiales.

⁽³⁾ El potencial de incendios y los modelos de combustibles aplicables cambian bajo la influencia de la variación interanual de la precipitación en zonas muy húmedas; los incendios sólo se propagan cuando ocurren anomalías de sequía y hay combustible disponible. El potencial de propagación superficial en el FCCS está estimado en condiciones de referencia secas.

⁽⁴⁾ Los incendios pueden ocurrir en humedales cuando hay condiciones de desecación por estacionalidad del flujo hidrológico o factores de cambio naturales antropogénicos

⁽⁵⁾ El mapa no considera los combustibles de áreas agrícolas, que son importantes en la dinámica de incendios a escala del paisaje, porque muchos incendios se originan como quemas agrícolas.

Tipos de combustibles forestales y modelos estandarizados de comportamiento superficial del fuego en ecosistemas terrestres de México.

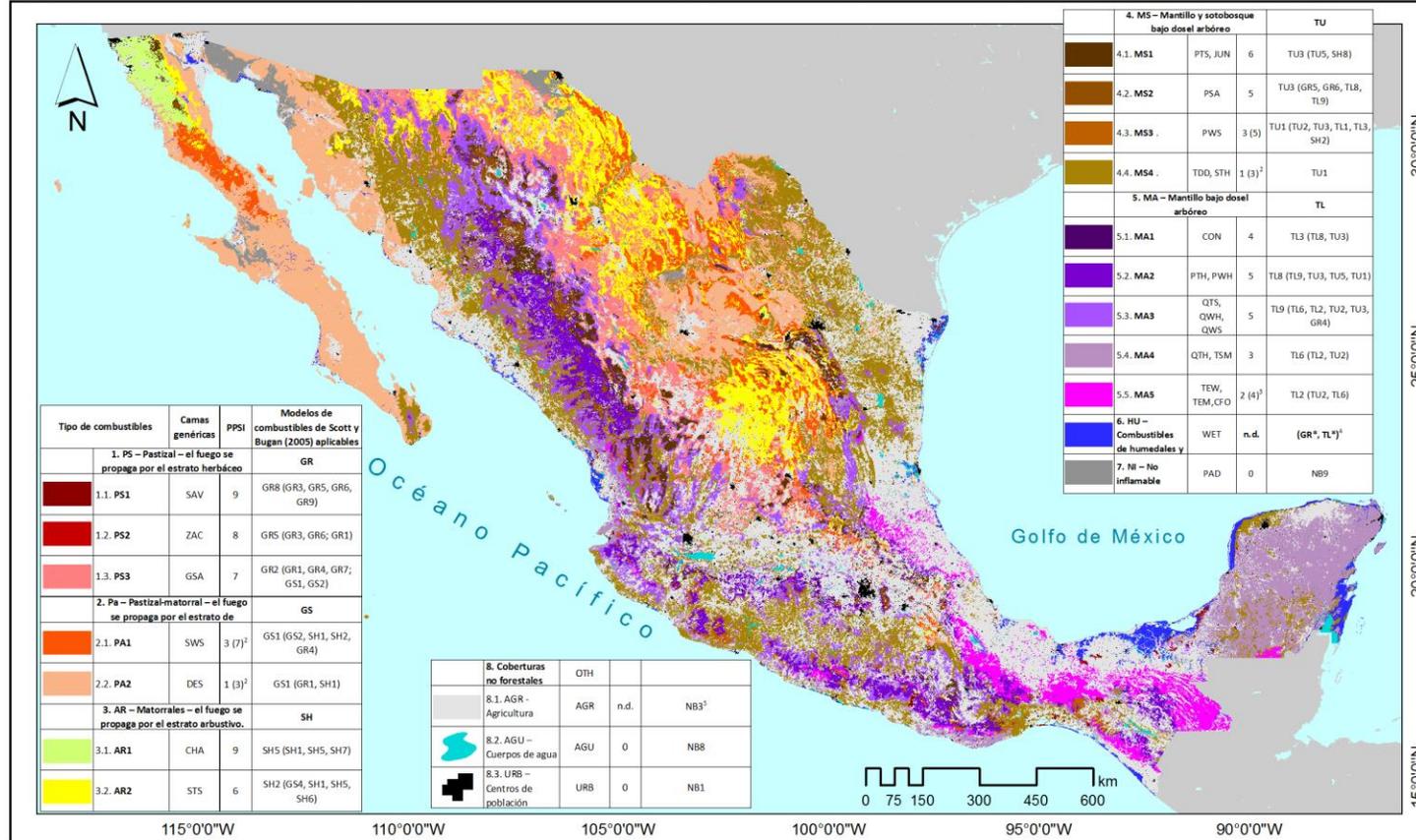


Figura 6. Mapa de tipos de combustibles forestales y modelos estandarizados de comportamiento superficial del fuego en ecosistemas terrestres de México.

TIPOS DE COMBUSTIBLES DE MÉXICO Y LOS GRUPOS DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO DEL FUEGO

1. PASTOS PS (GR)



PS1. Pastos altos de zonas cálidas húmedas (GR8)



PS2. Pastos bajos de zonas templadas o semifrías húmedas (GR5)



PS3. Pastos bajos de zonas semiáridas (GR2)

2. PASTOS Y ARBUSTOS PA (GS)



PA2. Pastizal matorral de zonas semiáridas (GS2)



PA3. Pastizal-matorral de zonas áridas (NB9-GS1)

3. ARBUSTOS AR (SH)



AR1. Arbustos altos (>2 m) de zonas semiáridas (SH5)



AR2. Arbustos bajos (< 2 m) de zonas semiáridas (SH2)

4. MANTILLO-SOTOBOSQUE MS (TU)



MS1. Pastos y arbustos bajos, bajo dosel de árboles caducifolios (TU3)



MS2. Pastos y arbustos bajos con elementos rosetófilos (GR5/TL9)



MS4. Mantillo y sotobosque ralo de zonas cálidas subhúmedas (TU1)

5. MANTILLO MA (TL)



MA1. Mantillo compacto de coníferas de acículas cortas (TL3)



MA2. Mantillo acolchado de coníferas de acículas largas (TL8)



MA2. Mantillo acolchado de latifoliadas esclerófilas (TL6)



MA4. Mantillo compacto de latifoliadas esclerófilas (TL6)



MA5. Mantillo compacto de latifoliadas membranosas (TL2)

5. Literatura citada

- Alvarado-Celestino, E., J.E. Morfín-Ríos, E.J. Jardel-Pelaéz, R.E. Vihnanek, D.K. Wright, J.M. Michel-Fuentes, C.S. Wright, R.D. Ottmar, D.V. Sandberg, y A. Nájera-Díaz. 2008. Fotoseries para la cuantificación de combustibles forestales de México: bosques montanos subtropicales de la Sierra Madre del Sur y bosques templados y matorral submontano del norte de la Sierra Madre Oriental. Universidad de Washington. Publicación especial No. 1, Seattle WA, EUA.
- Anderson, H.E. 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behaviour. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-122.
- Chávez-Durán, A.A., Flores-Garnica, J.G., Luna-Luna, M., Centeno-Erguera R.C., Alarcón-Bustamante, M.P. 2014. Caracterización y clasificación de camas de combustibles prioritarias en México para planificar el manejo del fuego. Informe Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Flores-Nieves, M.J., Morfín-Ríos J.E., Aguilar-Pérez, V.M., Rodríguez-Vázquez G.M., Patiño-Conde, P., Vázquez-López, J.M, Jardel-Peláez, E.J. 2014. Catálogo de camas de combustibles forestales y biomasa de la Selva Baja Caducifolia de la Cuenca del Río Ayuquila, Jalisco. Informe Técnico. Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara
- Graf-Pérez, J.D. 2018. Variación del complejo de combustibles y potencial de incendio en un gradiente bioclimático en bosques de Jalisco. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara.
- Heinsch F.A., P.L. Andrews. 2010. BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Design and features. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-249. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 111 p.
- Jardel-Peláez, E.J., Quintero-Gradilla, S.D. Lomelí-Jiménez, A.J., Alvarado, E., Pérez-Salicrup, D., Rodríguez-Gómez, J.M., Morfín-Ríos, J.E., Michel-Fuentes J.M., Castillo- Navarro, M.F., Graf-Pérez D., Herrera-Palacios- I., Aguirre-López G. 2018. Catálogo de camas de combustibles forestales para México y potencial de incendios asociado. Informe Técnico. CONAFOR-CONACyT 2014- CO2-251694.
- Jardel-Peláez, E.J., Alvarado E., Quintero-Gradilla S.D., Rodríguez-Gómez J.M., Pérez-Salicrup D., Michel-Fuentes J.M., Morfín-Ríos J.E., y Castillo-Navarro M.F. 2017 (en prensa) Fuel beds and fire potential in mexican terrestrial ecosystems. Fire Ecology.
- Jardel-Peláez, E.J., D. Pérez-Salicrup, E. Alvarado and J.E. Morfín-Ríos. 2014. Principios y criterios para el manejo del fuego en ecosistemas forestales: guía de campo. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 96 Pp
- Jardel-Peláez, E.J., J.M. Frausto-Leyva, D. Pérez-Salicrup, E. Alvarado, J.E. Morfín-Ríos, R. Landa y P. Llamas-Casillas. 2010. Prioridades de Investigación en Manejo del Fuego en México. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. México D.F., México.

- Keane, R. E., and Reeves, M. 2012. Use of expert knowledge to develop fuel maps for wildland fire management. In: A.H. Perera *et al.* (eds.). *Expert Knowledge and Its Application in Landscape Ecology*. Springer, New York, USA. DOI 10.1007/978-1-4614-1034-8_11.
- Keeley, J. E., Bond, W. J., Bradstock, P. A., Pausas, J. G., Rundel, P. W. 2012. *Fire in Mediterranean Ecosystem: Ecology, evolution and management*. Cambridge University Press. 515 p.
- Michel-Fuentes, J.M. 2010. *Caracterización y clasificación de combustibles forestales para el manejo del fuego en áreas protegidas de México*. Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara, México
- Ottmar, R.D., D.V. Sandberg, C.L. Riccardi and S.J. Prichard. 2007. An overview of the Fuel Characteristic Classification System – quantifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning. *Canadian Journal of Forestry Research* 37: 2383-2393.
- Prichard, S. J., D. V. Sandberg, R. D. Ottmar, E. Eberhardt, A. Andreu, P. Eagle, and K. Swedin, 2013. *Fuel Characteristic Classification System version 3.0. Technical Documentation*. USDA Forest Service General Tech. Rep. PNW-GTR-887.
- Riccardi, C.L., R.D. Ottmar, D.V. Sanberg, A. Andreu, E. Elman, K. Kopper and J. Long. 2007. The fuelbed: a key element of the Fuel Characteristic Classification System. *Canadian Journal of Forestry Research* 37: 2394-2412.
- Rothermel, R.C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildlands fuels. *USDA For. Serv. Res. Pap.* INT-115.
- Sandberg, D.V., R.D. Ottmar, and G.H. Cushon. 2001. Characterizing fuels in the 21st century. *International Journal of Wildland Fire*. 10: 381-387. DOI: 10.1071/WF01036
- Scott, J. E., Burgan, R.E. 2005. *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153.
- Vélez. R. 2000. *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. McGraw Hill. 1320 p.