

# Informe

**Etapas: III**

**Producto: 4.3**

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

## **Guía técnica divulgativa para el uso de modelos de comportamiento del fuego para los tipos de combustibles forestales de México<sup>1</sup>**

Enrique J. Jardel Peláez<sup>1\*</sup>,

Shatya D. Quintero Gradilla<sup>1</sup>, Alma J. Lomelí Jiménez<sup>2</sup>, José Daniel Graf Pérez<sup>1</sup>, Juan Manuel Rodríguez Gómez<sup>1</sup> y Diego Pérez Salicrup<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario Costa Sur,  
Universidad de Guadalajara

Av. Independencia Nacional 151, Autlán de Navarro, Jalisco, México C.P. 48900

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Morelia, Michoacán, México C.P. 58190.

\*Autor para correspondencia: jardelpelaez@gmail.com

Octubre de 2018

---

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

## Contenido

1.	Introducción .....	1
2.	Conceptos básicos .....	1
2.1	Combustibles: la materia prima de los incendios forestales .....	1
2.2	Combustibles y el ambiente del fuego .....	4
2.3	El fuego y los combustibles en los ecosistemas forestales .....	5
2.4	Los combustibles forestales y los regímenes de incendios .....	6
2.5	Los cuatro conmutadores de los incendios .....	7
2.6	La influencia del clima en los combustibles y los incendios .....	9
2.7	La variación temporal de los combustibles forestales .....	11
2.8	Combustibles y manejo del fuego .....	13
3.	Tipos de combustibles forestales de México y modelos de comportamiento del fuego .....	14
4.	Descripción de los tipos de combustible y los modelos de comportamiento del fuego .....	18
5.	Literatura citada .....	43

## Índice de figuras

Figura 1.	Se muestran los componentes y la definición de una cama de combustibles. ....	2
Figura 2.	Estructura de las camas de combustibles superficiales que sirven de entrada para los modelos de estandarizados de comportamiento del fuego superficial de (Scott y Burgan 2005). Se muestran ejemplos de los distintos grupos o tipos de combustibles GR (pastizales), GS (pastizales con arbustos), SH5 (matorrales), TU (mantillo y sotobosque bajo dosel), TL (mantillo bajo dosel) y SB (residuos leñosos). Los componentes de las camas de combustibles son combustibles muertos de 1 hora (1-H), 10 horas (10-H) y 100 horas (100-H) y combustibles vivos herbáceos (VH) y leñosos (VL). A cada modelo corresponde una cama idealizada que representa una clase de comportamiento del fuego característica. ....	4
Figura 3.	El “triángulo del ambiente del fuego”. El comportamiento del fuego en los incendios forestales, caracterizado básicamente por la intensidad del frente del incendio y su velocidad de propagación, está determinado por las propiedades físicas del combustible disponible, el estado del tiempo atmosférico y la topografía. Estos son los factores utilizados en los modelos de simulación del comportamiento del fuego (Rothermel 1972, Albin 1976, Burgan y Rothermel 1984). ....	5
Figura 4.	El modelo conceptual de los “cuatro conmutadores de los incendios” explica cuáles son las condiciones necesarias para que un incendio pueda encenderse y propagarse. Estos conmutadores deben “conectarse” en orden para que ocurra un incendio y puede verse que las primeras dos condiciones son la existencia de combustible suficiente y que este esté lo suficientemente seco (disponible). La tercera condición influye también en el estado de los combustibles. Si las primeras tres condiciones no se cumplen, el fuego no se inicia o no se propaga, aunque ocurran igniciones. Figura tomada de: Scott <i>et al.</i> 2014. <i>Fire on Earth</i> , John Wiley & Sons (reproducción permitida para fines educativos); la fuente original es Bradstock (2010). ....	8
Figura 5.	Influencia del clima en el combustible potencial y disponible y en el estado de los combustibles, condiciones que influyen en los regímenes de incendios y en el comportamiento del fuego. ....	9
Figura 6.	Variación de la cantidad de biomasa (carga de combustibles) de plantas (línea roja) y del mantillo del suelo (hojarasca y material leñoso caído fino; línea negra) en distintos tipos de vegetación a través de un gradiente de humedad y duración de la sequía estacional anual. Esto da lugar a distintas condiciones del combustible potencial y disponible que influyen en el potencial de incendios: (1) El combustible es abundante y continuo y se encuentra seco parte del año; el fuego puede propagarse. (2) El combustible es muy abundante y continuo, pero se encuentra húmedo todo el tiempo; los incendios sólo se presentan ocasionalmente en condiciones anormalmente secas. (3) El combustible está seco la mayor parte del tiempo, pero es escaso y discontinuo; los incendios sólo ocurren ocasionalmente, después de años anormalmente húmedos en los que aumenta la carga de combustibles. ....	10
Figura 7.	Hipótesis de la productividad intermedia y los incendios forestales. La mayor actividad de incendios a escala global o continental ocurre en condiciones intermedias del gradiente de humedad-productividad, donde hay suficiente combustible disponible para mantener la propagación del fuego. Basado en Bradstock (2010), Holz <i>et al.</i> 2012 y Pausas y Ribeiro (2013), con modificaciones. ....	11
Figura 8.	A través de los procesos de regeneración post disturbios ecológicos y durante la sucesión, la vegetación (y las camas de combustibles) pasan por distintas etapas en las que varía temporalmente su composición y estructura. El fuego es parte de ciclos de acumulación de energía potencial y materiales en la	

biomasa durante la sucesión ecológica y de liberación de energía cinética y redistribución de materiales durante los incendios en los ecosistemas forestales. La acumulación de biomasa combustible es resultado de la productividad primaria neta (PPN) de los ecosistemas y los incendios son un proceso de descomposición física de la materia orgánica que moviliza y redistribuye el carbono y los nutrientes..... 12

Figura 9. Las fotografías (arriba) muestran ejemplos de camas de combustibles correspondientes a los tipos PS1, PS2 y PS3; entre paréntesis se indican los modelos de Scott y Burgan aplicables a estas camas. Abajo se muestra la estructura de las camas de combustibles utilizadas como entrada de datos para los modelos de pastos (GR) y pastos-arbustos (GS) de Scott y Burgan. .... 21

Figura 10. Las gráficas muestran los resultados de la simulación de velocidad de propagación y longitud de las llamas para los modelos de los tres grupos de pastizales. El escenario de humedad de los combustibles en todos los casos (excepto GR5 (H)) fue de 6, 7 y 8% para combustibles muertos de 1, 10 y 100 horas y de 60 y 90% para combustibles vivos herbáceos y leñosos, respectivamente. En el tipo Ps2 obsérvese la diferencia en el comportamiento del fuego para el modelo GR5 en este escenario y GR5 (H) en condiciones de mayor humedad (9, 10, 11, 90 y 120 % para combustibles de 1, 10 y 100 horas y vivos herbáceos y leñosos, respectivamente)..... 22

Figura 11. Las fotos de la izquierda y centro muestran izotales (matorral rosetófilo) y la derecha un matorral crasicale. .... 24

Figura 12. Comportamiento del fuego simulado bajo distintas velocidades del viento (con una inclinación de la pendiente de 10%) para los modelos GS1, GS2, SH1, SH2 y GR4, aplicables a camas de combustibles de matorrales de zonas cálidas semiáridas (cama genérica SWS). A la izquierda, velocidad de propagación; a la derecha, longitud de las llamas. Se utilizó un escenario “seco” de la humedad de combustibles (ver cuadro 2). Los modelos GS1, SH2 y SH1 pueden utilizarse en condiciones de bajas cargas de combustibles; cuando la carga de pastos aumenta después de años con precipitación anual mayor al promedio, pueden probarse los modelos GS2 o GR4..... 25

Figura 13. Matorrales xerófilos de zonas áridas (cama genérica DES). A la izquierda matorral de gobernadora; centro matorral crasicale; derecha, matorral halófito (chamizal). La discontinuidad de la cubierta vegetal y las cargas de biomasa muy bajas, limitan la propagación del fuego y los incendios son raros en estas camas de combustibles. Sin embargo, después de años con precipitación superior a la media (anomalías de lluvia), puede aumentar la continuidad de la cobertura de pastos y hierbas, creando condiciones para la propagación de incendios..... 25

Figura 14. Tipos de camas de combustibles características de los tipos AR1 y AR2, su estructura y comportamiento del fuego simulado en BehavePlus 5.0 con un escenario muy seco de humedad de los combustibles (ver cuadro 2). .... 28

Figura 15. Tipos de camas de combustibles características del tipo MS1, mostrando su estructura y comportamiento del fuego simulado en BehavePlus 5.0 con un escenario muy seco de humedad de los combustibles..... 29

Figura 16. Tipos de camas de combustibles características del tipo MS2, mostrando su estructura y comportamiento del fuego simulado en BehavePlus 5.0 con un escenario “húmedo” de de humedad de los combustibles..... 30

Figura 17. A la derecha bosque de pino-encino cálido-subhúmedo, que muestra las características fisonómicas de este tipo de vegetación. A la izquierda, condición sabanoide en un área afectada por incendios recurrentes. Este es el tipo de condiciones de variabilidad que se pueden encontrar dentro de una misma clase en un mapa a escalas como 1:250,000. En condiciones como las de la foto de la izquierda puede aplicarse un modelo TU3; en las condiciones de la foto de la derecha se aplica un modelo de pastizal con cargas bajas como GR2. .... 31

Figura 18. Ejemplos de camas de combustibles en selva baja caducifolia (tipo Pa1, cama genérica TDD). Nótese el contraste en la superficie del suelo entre la foto de la derecha, donde el suelo está cubierto por combustibles muertos y la foto del centro, donde el combustible superficial es muy escaso y discontinuo. La foto de la derecha muestra una selva secundaria en la temporada lluviosa, con combustible superficial formado por pastos bajos (< 0.1 m). .... 32

Figura 19. 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 (3, 4 y 5% para combustibles de 1, 10 y 100 horas; 30 y 60% para combustibles vivos y leñosos, respectivamente). .... 32

Figura 20. 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). .....	33
Figura 21. Tipos de camas de combustibles características del tipo MA1. ....	34
Figura 22. Tipos de camas de combustibles características del tipo MA2. ....	35
Figura 23. Camas de combustibles características del tipo MS3. ....	36
Figura 24. Camas de combustibles características del tipo MA4. ....	38
Figura 25. Camas de combustibles características del tipo MA5. ....	39
Figura 26. Tipos de camas de combustibles de humedales y a la derecha condiciones no inflamables de desierto, sin cobertura vegetal significativa.....	40
Figura 27. Esquema de la clasificación de tipos de combustibles, indicando los modelos de comportamiento del fuego (panel de la derecha) que pueden aplicarse a cada tipo en función de la carga de combustibles.....	41
Figura 28. La figura muestra la relación entre varios productos cartográficos que han sido elaborados para su aplicación como herramientas para el manejo del fuego; el mapa de tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego es uno de estos productos. El mapa de unidades del paisaje, que integra información de los tipos de vegetación y las condiciones bioclimáticas, es la información básica para los demás productos y tiene también otras aplicaciones para la elaboración de mapas de productividad forestal (la productividad primaria de las plantas es al mismo la fuente de la biomasa aprovechada como madera y de la biomasa combustible) y de mapas de hábitat para planificar la conservación de la diversidad biológica. El mapa de unidades de paisaje fue también la base para el mapa de camas de combustibles, tipos de combustibles superficiales y régimen potencial de incendios. El mapa de camas de combustibles, a través de la aplicación del FCCS (Sistema de Clasificación de Características de Combustibles), sirvió para generar los tres mapas de potenciales de incendios; fue también la base para elaborar el mapa de tipos de combustibles superficiales y usarlo para la selección de los modelos de comportamiento del fuego y su uso en la simulación en el sistema Behave para predecir la probable velocidad de propagación y longitud de la llama en el frente de incendios superficiales. El mapa de regímenes potenciales de incendios (RPI) sirve de referencia para evaluar la condición actual de los regímenes de incendios. El conjunto interrelacionado de mapas sirve como herramienta para la planificación del manejo del fuego a escala nacional o regional. ....	42

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Estratos y componentes de las camas de combustibles forestales y su papel en la propagación del fuego y las fases de la combustión. Adapatdo de Ottmar <i>et al.</i> (2007) y Noss (2018). ....	3
Cuadro 2. 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) <sup>1</sup> , de acuerdo con el mapa nacional de camas de combustibles (Jardel <i>et al.</i> 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. ....	16

## 1. Introducción

El proyecto “Caracterización y Clasificación de Combustibles para Generar y Validar Modelos de Combustibles Forestales para México”, financiado por el Fondo Sectorial CONAFOR-CONACYT, tiene el propósito de desarrollar herramientas técnicas, basadas en principios y criterios ecológicos, que sirvan para fortalecer las estrategias y acciones de protección contra incendios forestales y manejo del fuego en México. La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) ha planteado la necesidad de contar con herramientas de apoyo para el manejo del fuego, tales como la disponibilidad de modelos de combustibles para predecir y evaluar el probable comportamiento del fuego en incendios forestales y quemas prescritas.

El propósito de este trabajo es servir como una guía para el uso del mapa de tipos de combustibles forestales y modelos estandarizados de comportamiento del fuego, que fue elaborado para la República Mexicana. Se presentan conceptos básicos sobre los modelos de comportamiento del fuego y se discute la aplicación de los modelos estandarizados, desarrollados originalmente para los Estados Unidos (Rothermel 1972, Anderson 1982, Scott y Burgan 2005), en el caso de México.

Esta guía está estructurada de la siguiente manera: primero, se presentan conceptos básicos sobre camas, tipos y modelos de combustibles, potenciales de incendios y comportamiento del fuego; segundo, se presenta la propuesta de tipos de combustibles de México y la aplicación a estos de los 40 modelos estandarizados de comportamiento del fuego de Scott y Burgan (2005), describiendo los tipos de combustibles, su relación con los mapas nacionales de camas genéricas de combustibles y potenciales de incendios y los criterios para la aplicación de los modelos estandarizados de comportamiento del fuego.

## 2. Conceptos básicos

### 2.1 Combustibles: la materia prima de los incendios forestales

El fuego es un fenómeno físico en el cual se libera, en forma de luz y calor, la energía química almacenada en materiales orgánicos, como resultado de reacciones de oxidación iniciadas y mantenidas por la elevación de la temperatura al punto de ignición. Los combustibles son la base del “triángulo del fuego”, el conjunto de tres factores indispensables para que el fuego se produzca, que incluye además al calor y al oxígeno (Arnaldos *et al.* 2004).

Los combustibles forestales son toda la materia orgánica que se encuentra en los bosques, selvas, matorrales y pastizales, que es susceptible de encenderse y mantener un proceso de combustión, alimentando la propagación de los incendios. Los combustibles forestales incluyen la biomasa de plantas vivas y muertas y el mantillo del suelo (Chandler *et al.* 1983, Pyne *et al.* 1996, Arnaldos *et al.* 2004).

Los combustibles que encontramos en las áreas forestales se caracterizan por la distribución horizontal (sobre la superficie del terreno) y vertical (en los estratos o capas de la vegetación hasta el suelo) y por las propiedades físicas de tamaño, altura o profundidad, masa, densidad, relación superficie/volumen, contenido de calor, minerales y humedad de los componentes o partículas de combustibles. Estos componentes son los la hojarasca

fresca, fragmentada o en proceso de descomposición, el material leñoso caído que se divide en categorías de tamaño, desde ramillas hasta troncos, las plantas (hierbas, pastos, arbustos, árboles) vivas o muertas.

Un concepto básico para describir el complejo arreglo de los componentes de los combustibles forestales en un sitio determinado o en el paisaje geográfico, es el de *camas de combustibles*. Una cama de combustibles puede definirse como una unidad del paisaje relativamente homogénea, que representa un ambiente único de combustión que determina el comportamiento y efectos potenciales del fuego (Riccardi et al. 2007a). La figura 1 muestra los componentes de una cama de combustibles.

Estas unidades de paisaje definidas como camas de combustibles, se caracterizan por las propiedades físicas de sus componentes y por los atributos fisonómicos de la cubierta vegetal: forma de vida dominante (hierbas, pastos, arbustos o árboles que define las formaciones vegetales como herbazales, pastizales, matorrales o bosques), altura, estratificación vertical (por ejemplo dosel arbóreo, subdosel y sotobosque o estratos herbáceo y arbustivo en un bosque) y altura o profundidad de los estratos, el tipo de hojas de las plantas dominantes (acículas, hojas planas duras o suaves, suculentas, etc.) y su hábito fenológico (siempre verdes o perennifolias, subcaducifolias o caducifolias).

En general, las camas de combustibles se describen por características que influyen en el potencial de incendios y en el comportamiento del fuego (cuadro 1). En los mapas de camas de combustibles puede incluirse además información sobre las condiciones bioclimáticas y otros factores físico-geográficos que influyen en la variación de la vegetación y la acumulación potencial de combustible a escala del paisaje (MacKensie et al. 2007, Keane 2015, Jardel et al. 2017).

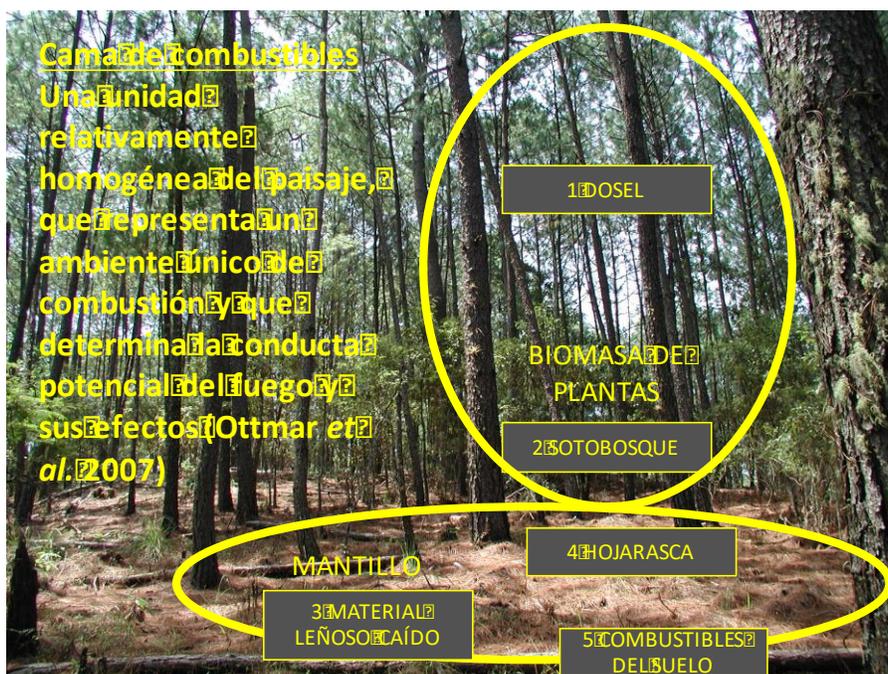


Figura 1. Se muestran los componentes y la definición de una cama de combustibles.

**Cuadro 1. Estratos y componentes de las camas de combustibles forestales y su papel en la propagación del fuego y las fases de la combustión. Adaptado de Ottmar *et al.* (2007) y Noss (2018).**

Estrato (capas de la cama de combustible)	Componentes (partículas y estructuras que forman la cama de combustibles)	Propagación del fuego y tipo de combustión		
		Con llama		Sin llama
		Superficial	De copa	Superficial y subterránea
Dosel	Copas y troncos de los árboles Árboles muertos en pie Combustibles de escalera		<b>X</b>	
Sotobosque	Arbustos (combustible leñoso vivo) Pastos y hierbas (combustible herbáceo vivo)	<b>X</b>	X	
Troncos caídos	Material leñoso caído grueso (> 7.5 cm o de 1000 horas)	X		<b>X</b>
Mantillo del suelo	Hojarasca, líquenes y musgos Material leñoso caído fino (< 7.5 cm; 1, 10 y 100 horas)	<b>X</b>		X
Suelo	Capa de fermentación (hojarasca en descomposición) Acumulaciones de materia orgánica en la base de árboles Turba			<b>X</b>

Las características o propiedades físicas de las camas de combustibles constituyen la base para alimentar los modelos o sistemas de simulación del comportamiento del fuego (Rothermel 1972, Scott y Burgan 2005, Heinsch y Andrews 2010) o de estimación del potencial de una cama para soportar un incendio superficial o de copa y aportar el combustible que alimenta las distintas fases de la combustión (Sandberg *et al.* 2001, 2007). La figura 2 muestra un ejemplo de la estructura de camas de combustibles (esto es, la distribución de la carga de combustibles en los distintos estratos o componentes), que sirve como datos de entrada para los modelos estandarizados de comportamiento del fuego superficial.

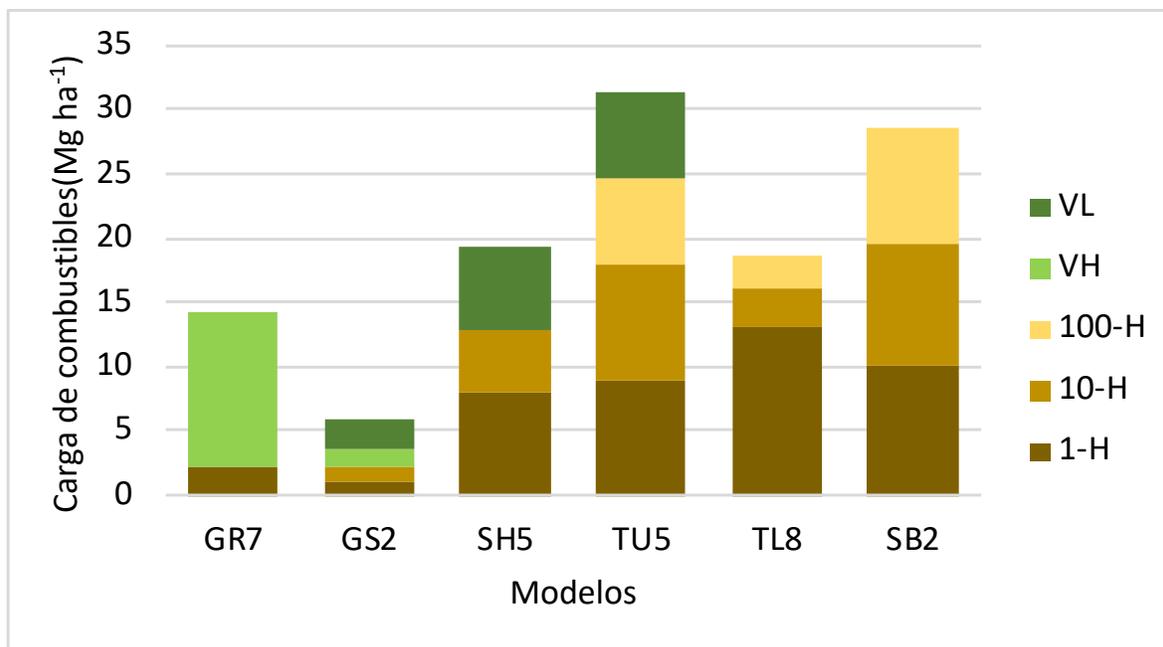


Figura 2. Estructura de las capas de combustibles superficiales que sirven de entrada para los modelos de estandarizados de comportamiento del fuego superficial de (Scott y Burgan 2005). Se muestran ejemplos de los distintos grupos o tipos de combustibles GR (pastizales), GS (pastizales con arbustos), SH5 (matorrales), TU (mantillo y sotobosque bajo dosel), TL (mantillo bajo dosel) y SB (residuos leñosos). Los componentes de las capas de combustibles son combustibles muertos de 1 hora (1-H), 10 horas (10-H) y 100 horas (100-H) y combustibles vivos herbáceos (VH) y leñosos (VL). A cada modelo corresponde una cama idealizada que representa una clase de comportamiento del fuego característica.

## 2.2 Combustibles y el ambiente del fuego

Las propiedades físicas de los combustibles (la inflamabilidad y combustibilidad de los distintos tipos de materiales orgánicos, la carga o cantidad de estos, la profundidad de las capas o estratos de material combustible, su densidad y arreglo espacial), interactuando con las condiciones del estado del tiempo atmosférico (temperatura, humedad, viento) y la topografía, constituyen el “triángulo del ambiente del fuego” (Figura 3) que determina el comportamiento del fuego (básicamente, su intensidad o fuerza física y la velocidad de su propagación) en los incendios forestales, en un tiempo y lugar determinados (Pyne *et al.* 1996).

A escala del paisaje, las condiciones del complejo de combustibles, determinadas por el estado de la vegetación e interactuando con el clima y la forma del relieve, constituyen el “triángulo de los regímenes de incendios”, esto es, el conjunto de factores que controlan la amplitud de la variación en la frecuencia, estacionalidad, intensidad, severidad, tamaño y patrón espacial de los incendios forestales a escalas temporales y espaciales extensas (Falk *et al.* 2007, McKenzie *et al.* 2011, Jardel *et al.* 2014).

## El triángulo del comportamiento del fuego



**Figura 3.** El “triángulo del ambiente del fuego”. El comportamiento del fuego en los incendios forestales, caracterizado básicamente por la intensidad del frente del incendio y su velocidad de propagación, está determinado por las propiedades físicas del combustible disponible, el estado del tiempo atmosférico y la topografía. Estos son los factores utilizados en los modelos de simulación del comportamiento del fuego (Rothermel 1972, Albini 1976, Burgan y Rothermel 1984).

Tomando lo anterior en cuenta, queda claro que el conocimiento acerca de los combustibles forestales es indispensable para evaluar y predecir el comportamiento del fuego durante los incendios forestales, sus efectos potenciales en los ecosistemas y la variabilidad espacial y temporal de los regímenes de incendios a escala del paisaje. 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 and Reeves 2012).

El conocimiento acerca de la variabilidad espacial y temporal de los combustibles forestales es útil no solo para planificar el manejo del fuego, evaluar y prevenir el riesgo y peligro de incendios, asignar y movilizar recursos para el combate de incendios, o para estudiar el papel del fuego en la dinámica de los ecosistemas, sino que también aporta elementos clave para comprender procesos como la dinámica del carbono y los ciclos biogeoquímicos (Sandberg *et al.* 2001, Keane y Reeves 2012), lo cual es especialmente importante en la actualidad, en el contexto del cambio climático global, para diseñar e implementar medidas de mitigación y adaptación.

### 2.3 El fuego y los combustibles en los ecosistemas forestales

Los combustibles forestales constituyen la “materia prima” que alimenta la combustión y la propagación de los incendios en los bosques, selvas, matorrales, pastizales y otros tipos de vegetación. Se trata fundamentalmente de los materiales orgánicos producidos por las

plantas presentes en los distintos estratos de la vegetación, como son hojas, tallos y ramas, árboles, arbustos y hierbas vivas o muertas y sus restos depositados en el mantillo del suelo, como la hojarasca y el material leñoso caído; incluyen también los materiales en descomposición en la capa orgánica del suelo. Al hablar de combustibles nos referimos a la biomasa producida por las plantas a través de la fotosíntesis, un proceso en el cual también se libera oxígeno, otro de los componentes del triángulo del fuego.

El fuego en el paisaje terrestre y a escala del ecosistema global, la biosfera, es también un fenómeno ecológico, resultado de interacciones entre la biota y su ambiente. Desde el momento en que las plantas evolucionaron de formas de vida acuáticas a terrestres y colonizaron la superficie de continentes e islas (proceso que comenzó en el periodo Silúrico, hace 440 millones de años), crearon un ambiente propicio para la propagación de incendios, al producir biomasa y formar camas de combustibles y al enriquecer la atmósfera con oxígeno como producto de la fotosíntesis (Pausas y Keeley 2009).

De esta manera las plantas verdes aportan dos de los componentes del triángulo del fuego: la biomasa (combustible) y el oxígeno (comburente); el tercer lado del triángulo, el calor que eleva la temperatura del combustible al punto de ignición lo aportó la caída de rayos, principalmente, y más tarde la actividad de los humanos que aprendieron a utilizar el fuego, entre otras cosas, como la herramienta más antigua de manipulación de la vegetación (Pausas y Keeley 2009). Los incendios de vegetación se convirtieron en un fenómeno característico de la biosfera terrestre y han estado presentes durante millones de años, influyendo en el flujo de energía, los ciclos biogeoquímicos, la dinámica de los ecosistemas, la distribución de los tipos de vegetación en el paisaje y la evolución de la biota (Bond y van Wilgen 1996, Bond *et al.* 2005, Bowman *et al.* 2009, Scott *et al.* 2014).

#### **2.4 Los combustibles forestales y los regímenes de incendios**

En un planeta con una atmósfera rica en oxígeno, fuentes de ignición como la caída de rayos y a partir aproximadamente del último millón de años con humanos o sus ancestros utilizando fuego, prácticamente cualquier porción de la superficie terrestre con cubierta vegetal, esto es, con biomasa combustible y con periodos del año en que este combustible está lo suficientemente seco, puede encenderse y soportar la propagación de incendios. Pero no cualquier área terrestre se quema con la misma frecuencia, en la misma época del año o con la misma intensidad (fuerza física de los incendios o energía liberada en las fases de la combustión); también son variables la severidad de los efectos del fuego (producto no sólo de la intensidad del fuego, sino de características de los ecosistemas como la estructura y composición de la vegetación) y el tamaño y patrón espacial de los incendios.

La variabilidad existente a escala del paisaje en cuanto a la cantidad de biomasa presente, relacionada con la influencia del clima y los suelos en la productividad primaria de las plantas y su capacidad de regeneración después de los incendios, la estructura y composición de la cubierta vegetal y su respuesta al fuego y su influencia en este, y la variación estacional del clima, dan lugar a la existencia de diversos *regímenes de incendios*.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Un régimen de incendios se caracteriza por la variación, a través de un largo periodo de tiempo, en la frecuencia con que ocurren incendios (o su inverso, el intervalo de retorno de incendios), la estación del año en que se presentan, su

Conocer y entender los regímenes de incendios es una cuestión fundamental para el manejo del fuego basado en principios ecológicos (Agee 1993, Scott *et al.* 2014). Debido a que las propiedades de los combustibles forestales son un factor determinante de la posibilidad de que los incendios puedan encenderse y propagarse, de la forma en que el fuego se comporta durante los incendios y de la variación de los regímenes de incendios a escala del paisaje, la caracterización, cuantificación y clasificación de los combustibles es uno de los aspectos clave para el entendimiento de la ecología del fuego y para el diseño de buenas prácticas de manejo del fuego.

## 2.5 Los cuatro conmutadores de los incendios

Para que un incendio forestal pueda encenderse y propagarse, se requieren ciertas condiciones. Una manera de entender esto es explicarlo como si estas condiciones fueran una serie de conmutadores (*switch* es la palabra equivalente en inglés, que se usa también coloquialmente en español) o controles de una máquina que se encienden o apagan. Los “cuatro conmutadores de los incendios” se ilustran en la figura 4 y son los siguientes (Bradstock 2010):

- 1) *Combustible potencial* (biomasa). Primero debe existir suficiente biomasa sobre el terreno para proveer el combustible. La cantidad de biomasa presente en una unidad de paisaje depende de las condiciones ambientales (como la temperatura) y los recursos disponibles para la productividad primaria de las plantas (en primer lugar, agua y en segundo, nutrientes del suelo), así como también depende de la influencia de eventos de perturbación naturales o antropogénicos e intervenciones de manejo que modifican la vegetación. El clima es el factor de primer orden que controla el potencial de acumulación de biomasa en una unidad de paisaje a largo plazo; la disponibilidad de nutrientes del suelo y la forma del relieve (que influye en la distribución del agua y los nutrientes en la superficie terrestre), son los controles de segundo orden, que también actúan a largo plazo; los controles de tercer orden son los eventos de perturbación o disturbios ecológicos que modifican la cantidad de biomasa (y la estructura y composición de la vegetación) a corto y mediano plazo (Jardel *et al.* 2009). El tiempo transcurrido desde el último incendio, así como la influencia de la lluvia o la sequía en el tiempo precedente a la estación de incendios (especialmente en zonas áridas o subhúmedas), influyen también en la cantidad de biomasa que constituye el combustible potencial de los incendios. Los bosques de zonas cálidas o templadas muy húmedas tienen un alto potencial de acumulación de biomasa; los de zonas húmedas tienen un potencial intermedio que se reduce cuando el clima es frío una parte del año, y en las zonas áridas el potencial de acumulación de biomasa es muy bajo.
- 2) *Combustible disponible* (biomasa seca). Para que la biomasa presente en una unidad del paisaje (combustible potencial) pueda encenderse y mantener la propagación de un incendio, al menos parte una parte debe estar lo suficientemente seca. A esta porción de biomasa que puede prenderse y quemarse, se le llama combustible disponible. Para que haya combustible disponible, debe de haber al menos un periodo seco en el año. Por ejemplo, en ambientes con humedad persistente, como

---

intensidad (fuerza física), su severidad (efectos) y su tamaño y patrón espacial. Para una discusión del concepto de regímenes de incendios y la caracterización y clasificación de estos para México, véase Jardel *et al.* (2014).

- las selvas tropicales lluviosas, el combustible potencial es abundante, pero rara vez está disponible y el fuego no se propaga; en un bosque de pino, donde también el combustible puede ser abundante, el fuego sólo se propaga cuando está disponible en la temporada de secas. Durante el periodo de sequía o estación de incendios, el contenido de humedad de los combustibles varía a corto plazo (entre días o a lo largo del día) bajo la influencia del tiempo atmosférico y los combustibles finos (hojas y ramillas) se secan más rápidamente que los gruesos (ramas y troncos).
- 3) *Estado del tiempo*. Dada la existencia de combustible disponible, la propagación del fuego depende de las condiciones atmosféricas, como la influencia de sistemas frontales que pueden traer más sequía o lluvia, calor o frío, los ciclos diurnos de variación del estado del tiempo y la influencia del viento, la humedad relativa y la temperatura durante un incendio, influyendo en su propagación.
  - 4) *Igniciones*. El cuarto conmutador es que ocurran igniciones producidas ya sea por la caída de rayos o humanos. Si bien el encendido del fuego es necesario para iniciar un incendio, la eficiencia de ignición y la propagación del incendio depende del estado de los combustibles y del estado del tiempo. Sin suficiente combustible ni condiciones de viento, humedad y temperatura favorables, el fuego no se propaga, aunque ocurran igniciones.

### Los cuatro conmutadores de los incendios (Bradstock 2010)

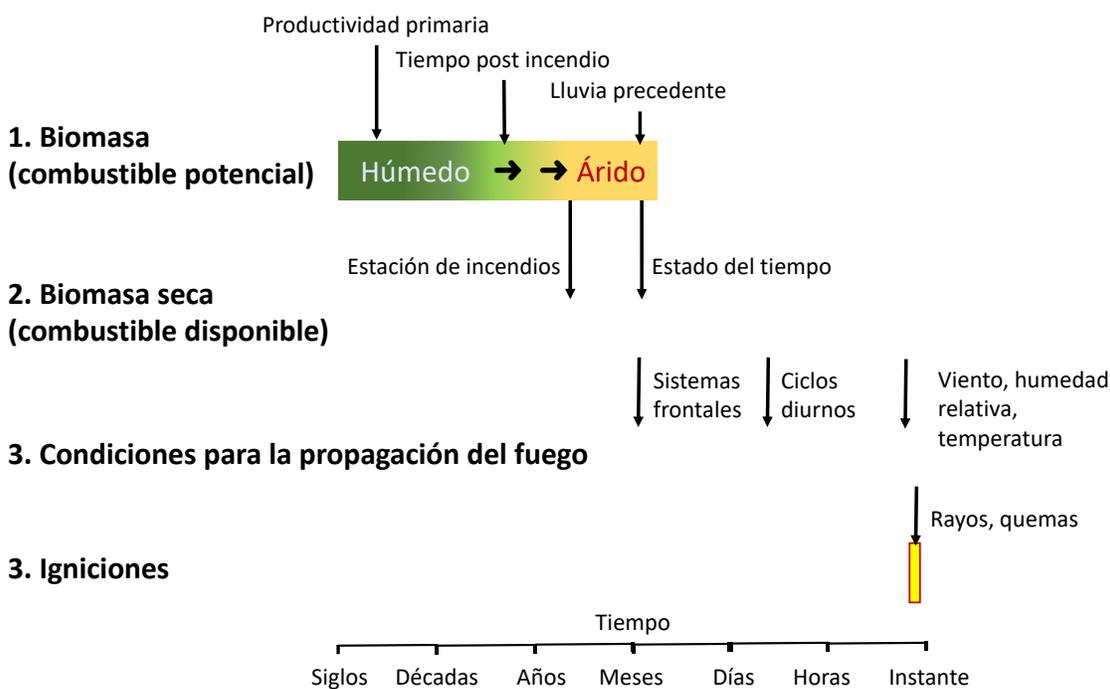


Figura 4. El modelo conceptual de los “cuatro conmutadores de los incendios” explica cuáles son las condiciones necesarias para que un incendio pueda encenderse y propagarse. Estos conmutadores deben “conectarse” en orden para que ocurra un incendio y puede verse que las primeras dos condiciones son la existencia de combustible suficiente y que este esté lo suficientemente seco (disponible). La tercera condición influye también en el estado de los combustibles. Si las primeras tres condiciones no se cumplen, el fuego no se inicia o no se propaga, aunque ocurran igniciones. Figura tomada de: Scott *et al.* 2014. *Fire on Earth*, John Wiley & Sons (reproducción permitida para fines educativos); la fuente original es Bradstock (2010).

## 2.6 La influencia del clima en los combustibles y los incendios

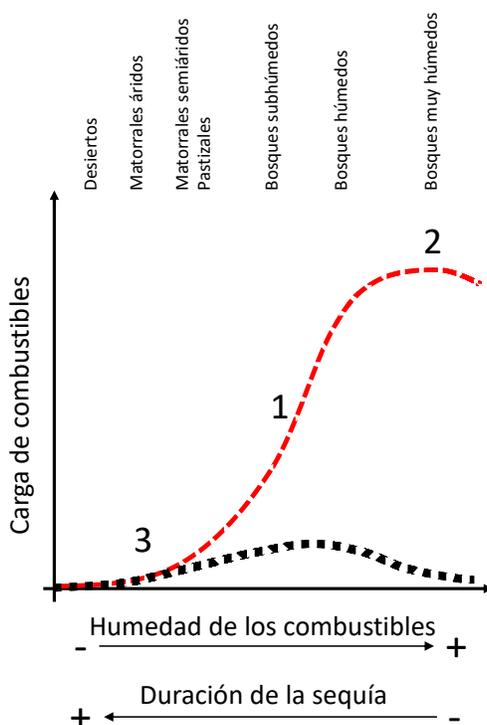
El clima a largo plazo que caracteriza un lugar, su variación cíclica o interanual y el estado del tiempo en el corto plazo, influyen de varias maneras en las condiciones en las que pueden ocurrir incendios y propagarse (Gedalof 2011) y en el combustible potencial y el combustible disponible (Figura 5).



**Figura 5. Influencia del clima en el combustible potencial y disponible y en el estado de los combustibles, condiciones que influyen en los regímenes de incendios y en el comportamiento del fuego.**

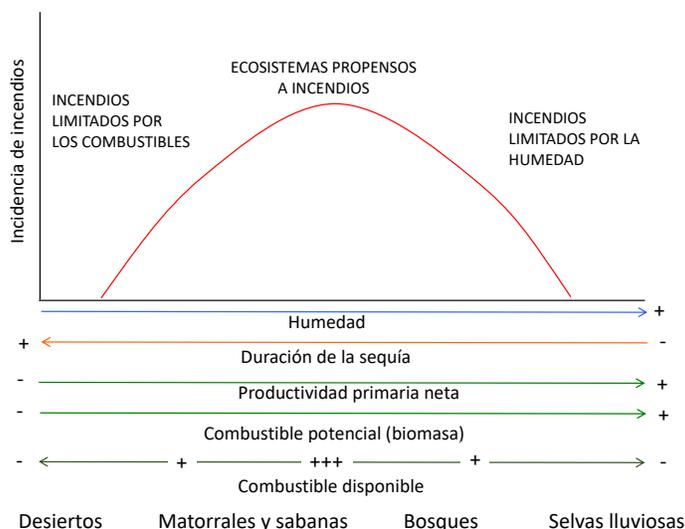
Factores como la entrada de energía a los ecosistemas en forma de luz y la temperatura que influye en los procesos fisiológicos de los organismos, son determinantes para la productividad primaria, así como la disponibilidad de agua (resultado del balance entre su entrada en precipitación y su salida en la evapotranspiración). La cantidad de biomasa (combustible potencial) que puede acumularse en una unidad del paisaje, depende de la productividad de las plantas (la tasa de producción de biomasa por unidad de tiempo y espacio) menos la respiración (el consumo de la materia orgánica como fuente de energía por las mismas plantas y los organismos heterótrofos, principalmente los descomponedores), cuyo balance determina la productividad primaria neta de un ecosistema (Perry *et al.* 2008). El clima influye en ambos factores (productividad y respiración-descomposición). La estacionalidad de la sequía determina la disponibilidad de combustible y el estado del tiempo influye en la variación a corto plazo de la humedad de los combustibles. Todos estos factores son importantes en la variación de los regímenes de incendios y el comportamiento del fuego.

La biomasa de plantas arriba del suelo y en el mantillo del suelo, esto es, los combustibles forestales, varían en relación con el clima (Figura 6). Los textos de ecología nos presentan múltiples ejemplos de cómo varían los tipos de vegetación en relación con el clima en cuanto a su biomasa, productividad y composición y estructura (véase por ejemplo Perry *et al.* 2008). Esto es una cuestión muy importante para la caracterización y clasificación del complejo de combustibles forestales, la determinación de su potencial de incendios y las inferencias acerca de los regímenes potenciales de incendios (Jardel *et al.* 2014, 2017).



**Figura 6. Variación de la cantidad de biomasa (carga de combustibles) de plantas (línea roja) y del mantillo del suelo (hojarasca y material leñoso caído fino; línea negra) en distintos tipos de vegetación a través de un gradiente de humedad y duración de la sequía estacional anual. Esto da lugar a distintas condiciones del combustible potencial y disponible que influyen en el potencial de incendios: (1) El combustible es abundante y continuo y se encuentra seco parte del año; el fuego puede propagarse. (2) El combustible es muy abundante y continuo, pero se encuentra húmedo todo el tiempo; los incendios sólo se presentan ocasionalmente en condiciones anormalmente secas. (3) El combustible está seco la mayor parte del tiempo, pero es escaso y discontinuo; los incendios sólo ocurren ocasionalmente, después de años anormalmente húmedos en los que aumenta la carga de combustibles.**

La variación en el combustible potencial y el combustible disponible asociada a la productividad primaria neta de los ecosistemas y la humedad de los combustibles, dos factores determinados por el clima, implica que es en condiciones donde coincide la presencia de suficiente combustible que está seco parte del año, donde ocurre la mayor actividad de incendios. A esto se le ha llamado “hipótesis de la productividad intermedia” (Bradstock 2010, Murphy *et al.* 2011, Holz *et al.* 2012, Pausas y Ribeiro 2013), la cual predice que en zonas donde la productividad primaria es muy alta o muy baja, los incendios son raros e infrecuentes, mientras que en condiciones intermedias son frecuentes; la mayor actividad de incendios ocurre en medio del gradiente de humedad-productividad, siguiendo una curva en forma de joroba (Figura 7). Donde la productividad es muy alta y hay abundante combustible potencial (zonas de clima constantemente húmedo), la propagación de incendios está limitada por la humedad; donde la productividad es baja (zonas de clima árido) los incendios están limitados por la falta de suficiente combustible continuo. Es en condiciones de productividad intermedia (climas húmedos o subhúmedos, estacionalmente secos), donde ocurre la mayor actividad de incendios.

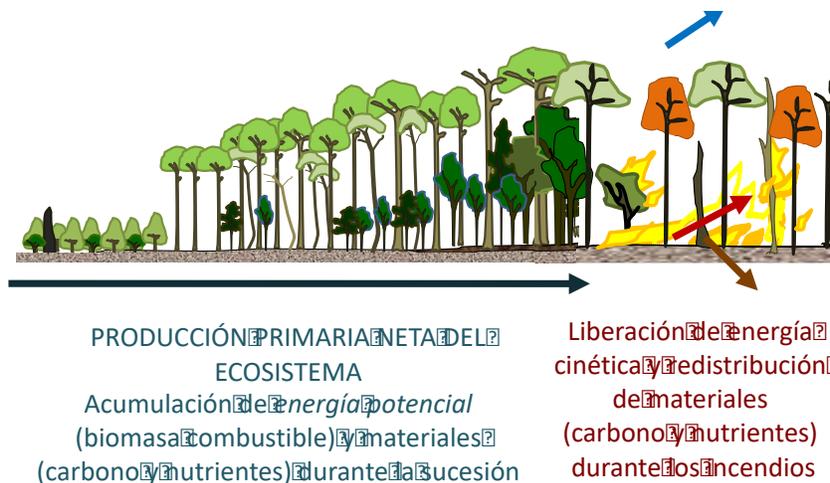


**Figura 7. Hipótesis de la productividad intermedia y los incendios forestales. La mayor actividad de incendios a escala global o continental ocurre en condiciones intermedias del gradiente de humedad-productividad, donde hay suficiente combustible disponible para mantener la propagación del fuego. Basado en Bradstock (2010), Holz *et al.* 2012 y Pausas y Ribeiro (2013), con modificaciones.**

Las condiciones climáticas zonales y sus patrones de estado del tiempo característicos son un buen predictor del potencial de incendios a escala global (Moritz *et al.* 2012, Pauas y Ribeiro 2013), pero la vegetación (la fuente del material combustible) no es un agente pasivo y hay interacciones complejas entre el clima, las comunidades de plantas y los regímenes de incendios (Scott *et al.* 2014). Por estas razones, la elaboración de mapas de unidades de paisaje construidas a partir de la cruza de mapas de la vegetación actual con mapas de zonas bioclimáticas ha sido la base para elaborar a partir de ellos nuevos mapas, que expresan espacialmente la variación en las camas de combustibles y su potencial de incendios (Jardel *et al.* 2017), los tipos de combustibles superficiales y su relación con modelos de comportamiento esperado de incendios superficiales (este trabajo), así como el régimen potencial de incendios (Jardel *et al.* 2014).

## 2.7 La variación temporal de los combustibles forestales

El cambio en la vegetación debido al fuego o a otros disturbios ecológicos naturales o antropogénicos, influye en el complejo de combustibles y, por lo tanto, en el comportamiento del fuego. Dentro de un mismo tipo de vegetación que se encuentra en determinada zona climática, existe variabilidad en su composición y estructura, debido a la influencia de disturbios como incendios o eventos meteorológicos extremos o a intervenciones de corta de madera, apacentamiento de ganado o desmontes agrícolas. Podemos encontrar distintas clases de estructura que corresponden, por ejemplo, a distintas etapas de la sucesión, como se ilustra en la figura 8.



**Figura 8.** A través de los procesos de regeneración post disturbios ecológicos y durante la sucesión, la vegetación (y las capas de combustibles) pasan por distintas etapas en las que varía temporalmente su composición y estructura. El fuego es parte de ciclos de acumulación de energía potencial y materiales en la biomasa durante la sucesión ecológica y de liberación de energía cinética y redistribución de materiales durante los incendios en los ecosistemas forestales. La acumulación de biomasa combustible es resultado de la productividad primaria neta (PPN) de los ecosistemas y los incendios son un proceso de descomposición física de la materia orgánica que moviliza y redistribuye el carbono y los nutrientes.

La sucesión puede considerarse también como un proceso de acumulación de biomasa y de cambio en la carga y la estructura de las capas de combustibles (Figura 8). Durante el proceso de desarrollo sucesional de la vegetación sobre un área abierta (un sustrato de formación reciente en el caso de la sucesión primaria o un claro abierto por un evento de perturbación en el caso de la sucesión secundaria), se van acumulando energía potencial en los enlaces químicos de la materia orgánica que forma la biomasa. Se acumulan también materiales como carbono y nutrientes. Parte de la energía contenida en la biomasa es utilizada por los organismos en la respiración para mantener su metabolismo.

A través de la sucesión se acumula energía potencial y cuando ocurren incendios forestales, esta se libera como energía cinética (McKenzie *et al.* 2011). Ocurre también una redistribución de los materiales que se volatilizan en la atmósfera o se depositan en el suelo. El fuego forma así parte de los flujos de energía y los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas, y es un proceso de descomposición física de la materia orgánica importante en el reciclaje de los materiales y la movilización de nutrientes, especialmente en ecosistemas donde hay una gran cantidad de biomasa refractaria a la descomposición biológica, como es el caso de los bosques, matorrales y pastizales.

Al caracterizar y clasificar los tipos de combustibles forestales presentes en el paisaje de un país, región o localidad es necesario tomar en cuenta la variación existente de clases de estructura de la vegetación. Cuando se elaboran mapas a escalas finas, cercanas al terreno (por ejemplo, entre 1:5,000 y 1:25,000) es posible representar para un mismo tipo de vegetación la variación en clases de estructura, considerando atributos como la altura y la espesura de la vegetación y su composición florística. Sin embargo, en mapas a escalas donde se cubren grandes superficies, pero los atributos del paisaje son más pequeños (por ejemplo 1:250,000), es necesario hacer generalizaciones y debe considerarse que una

unidad de paisaje o clase del mapa es homogénea sólo en términos relativos y que tiene variabilidad interna.

## 2.8 Combustibles y manejo del fuego

Los combustibles forestales son considerados como el factor ambiental más importante en el manejo del fuego. La ignición del fuego, su propagación e intensidad, dependen de los combustibles más que de cualquier otro factor y es el combustible el que genera el comportamiento del fuego al cual se enfrentan los combatientes de incendios (Brown y Davis 1974).

Los combustibles son también el único factor del ambiente del fuego que los humanos podemos modificar o controlar (hasta cierto punto) al realizar intervenciones de manejo. La manipulación del complejo de combustibles a través de quemas prescritas, tratamientos mecánicos e intervenciones silvícolas es un elemento central en las prácticas de prevención física de incendios y de manejo del fuego para la conservación de hábitats y biodiversidad, así como para la producción forestal y agropecuaria (Pyne *et al.* 1996, Vélez 2000, Agee y Skinner 2005).

Por las razones antes expuestas, la generación de información sobre los combustibles forestales y su utilización para elaborar modelos para evaluar, estimar o predecir el probable comportamiento del fuego y sus efectos, ha sido un tema central en la investigación aplicada al manejo del fuego (Sandberg *et al.* 2001, Keane y Reeves 2012, Keane 2015). Una preocupación central en la ciencia de los incendios forestales ha sido el desarrollo de herramientas para poder predecir el probable comportamiento del fuego, especialmente para fines de prevención física y combate de incendios. Conocer las condiciones del complejo de combustibles y evaluar que se espera del comportamiento de un incendio en estas, es no sólo esencial para considerar su posible resistencia al control y asignar recursos al combate del fuego, sino también para hacer previsiones respecto a la seguridad de los combatientes.

Una de las herramientas más utilizadas al respecto ha sido el sistema de predicción del comportamiento del fuego en incendios superficiales a partir de los “modelos de combustibles”, desarrollado originalmente por Rothermel (1972). Se trata de un conjunto de 13 tipos idealizados de camas de combustibles, caracterizados por un conjunto de variables que sirven de entrada al cómputo de las ecuaciones (modelos matemáticos) desarrollado por Rothermel y que a su vez producen modelos estandarizados de comportamiento del fuego. Los 13 modelos iniciales (Anderson 1982) se han ampliado a 40 (Scott y Burgan 2005) y se han desarrollado programas como *Behave* (Heinsch y Andrews 2010) que permiten simular el comportamiento del fuego bajo distintos escenarios de condiciones ambientales. Los modelos estandarizados de comportamiento del fuego o “modelos de combustibles” se han utilizado tanto para la planeación del combate de incendios como para la aplicación de quemas prescritas y otras prácticas de manejo de combustibles.

Los modelos de combustibles de Rothermel y de Scott y Burgan se refieren al comportamiento del fuego en incendios superficiales; a pesar de su utilidad, no aportan información suficiente para atender otras necesidades del manejo del fuego. La información

sobre combustibles ha sido utilizada para atender otras de estas necesidades, como tratar de modelar y simular el comportamiento de incendios de copa (van Wagner 1977, 1993, Scott y Reinhardt 2001, Sandberg *et al.* 2007) e implementar sistemas de predicción del comportamiento del fuego. Otros aspectos del estudio de los combustibles tienen que ver con la evaluación de los efectos de los incendios en casos como la mortalidad de árboles y cambios en la cobertura vegetal, el consumo de los combustibles y las estimaciones de emisiones de humos, bióxido de carbono y otros gases con efecto de invernadero. Sandberg *et al.* (2000) presentan una revisión de las aplicaciones del estudio de los combustibles para el manejo del fuego y otras aplicaciones.

Entender como los patrones de actividad de incendios y el comportamiento potencial del fuego son configurados por la variabilidad del complejo de combustibles, bajo la influencia del clima y el estado del tiempo a través de los paisajes, es también una necesidad urgente en el contexto del cambio ambiental global (Krawchuck *et al.* 2009, Holz *et al.* 2012). En este caso, la información sobre los combustibles y la elaboración de modelos predictivos son necesarios para estimar factores de consumo y emisiones.

Otras herramientas, como el Sistema de Clasificación de Características de Combustibles (FCCS por sus siglas en inglés), han sido desarrolladas para estimar los potenciales de propagación de incendios superficiales y de copa, así como de consumo de los combustibles en las distintas fases de la combustión, a partir de datos de inventario de camas de combustibles (Ottmar *et al.* 2007, Riccardi *et al.* 2007, Prichard *et al.* 2013). Sin combustibles no puede haber fuego y en las áreas forestales los combustibles están formados por la biomasa de plantas; esto tiene implicaciones importantes en la ecología y manejo del fuego, porque los combustibles son componentes de los ecosistemas forestales que cumplen funciones clave: son almacenes de carbono, nutrientes y agua, así como estructuras que forman parte del hábitat de la vida silvestre y protegen el suelo, al mismo tiempo que son un factor determinante en los regímenes de incendios.

De aquí la importancia de conocer las características de los combustibles forestales, como varían a través del tiempo y el espacio, sus funciones ecológicas y su influencia en el comportamiento del fuego y los regímenes de incendios, para aplicar este conocimiento a otros aspectos del manejo de los ecosistemas y recursos naturales y la conservación de la naturaleza.

### **3. Tipos de combustibles forestales de México y modelos de comportamiento del fuego**

El mapa de tipos de combustibles forestales de México y modelos de comportamiento del fuego (producto 4.2 de este proyecto) fue elaborado relacionando información de las características y variabilidad de las camas de combustibles del país con los 40 modelos estandarizados de comportamiento del fuego en incendios superficiales de Scott y Bugan (2005). Los procedimientos seguidos para elaborar el mapa se describen en el producto 4.1 de este proyecto. Esta es una primera aproximación, a escala nacional, a la elaboración de modelos de combustibles aplicables para las complejas condiciones del paisaje de las tierras forestales de México.

El concepto “forestal” se aplica aquí en sentido amplio para todos los tipos de vegetación que se desarrollan de manera natural o espontánea en los terrenos no dedicados a cultivo agrícola o centros de población. De hecho, este es el sentido original del término forestal, aplicado para las tierras silvestres o “montes”, aunque actualmente suele asociarse solo con los bosques y selvas.

Las *camas de combustibles* son unidades del terreno o el paisaje, relativamente homogéneas, que constituyen el ambiente en el cual el fuego se propaga. Pueden ser caracterizadas mediante inventarios en parcelas de muestreo, utilizadas para describir rodales o definidas como unidades del paisaje en mapas a diferentes escalas. Para los modelos de comportamiento del fuego, se utilizan como datos de entrada las propiedades de camas de combustibles. Cada uno de los modelos (los 13 de Rothermel y los 40 de Scott y Burgan, por ejemplo) usan como datos de entrada camas de combustibles idealizadas que corresponden a un tipo de comportamiento del fuego característico.

Los *tipos de combustibles* corresponden a esas camas idealizadas y se usan para caracterizar un comportamiento del fuego determinado, con ciertas características de velocidad de propagación e intensidad. Los sistemas de simulación del comportamiento del fuego, como *BehavePlus 5.0* (Heinsch y Andrews 2010) pueden alimentarse con los tipos predeterminados de combustibles que corresponden a los modelos de Rothermel o de Scott y Burgan o bien con datos de campo de inventarios de camas de combustibles que son introducidas en el sistema de manera personalizada. El mapa de tipos de combustibles de México se basa en clases o categorías de tipos de combustibles relacionados con los modelos de comportamiento del fuego.

Los *modelos de comportamiento del fuego* sirven como patrones de referencia o estándares para caracterizar formas de propagación e intensidad del frente de incendios superficiales, con el fin de predecir el probable comportamiento del fuego que puede esperarse en un tipo de combustibles de referencia o en una cama de combustibles específica.

En esta guía se describen los principales tipos de combustibles de México y para cada uno se indican los modelos de comportamiento del fuego aplicables, esto es, los que mejor caracterizan la forma en que el fuego puede propagarse con cierta velocidad o longitud de las llamas en el frente de incendios superficiales.

Para el uso del mapa y de esta guía, debe tenerse presente que los incendios forestales tienen un comportamiento complejo, sujeto a la influencia de múltiples factores ambientales y que los modelos son solamente una ayuda para tratar de predecir como se puede comportar un incendio, asumiendo ciertos supuestos en los que se basan los modelos y los sistemas de simulación. Los modelos son una herramienta muy útil para ayudar a hacer previsiones, pero no un sustituto de la información y la experiencia. El mapa y esta guía constituyen una primera versión, sujeta a revisión y prueba.

El mapa de tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego tiene una utilidad a escala nacional o regional, para fines de planificación y evaluación de programas de protección contra incendios forestales y manejo del fuego. Este es el fin con el que fue elaborado. La información del mapa, expresada cartográficamente a 1:250,000, al igual que cualquier otro mapa, representa las condiciones generales de unidades grandes del territorio

y no representa las condiciones específicas de un sitio que observamos a escala 1:1, esto es, en su tamaño real.

A escala de unidades de manejo, como predios forestales extensos o áreas protegidas, el mapa nacional puede servir como base para elaborar mapas de combustibles a escalas más finas, con mayor detalle, que requieren de información específica y actualizada. A escala local, el mapa sólo describe las condiciones esperadas en el contexto regional; puede servir de entrada, junto con la guía, para identificar camas de combustibles con características parecidas a las que se describen. Debe tomarse en cuenta la variabilidad de las camas de combustible en el tiempo y el espacio. Para aplicar esta guía, se recomienda utilizar paralelamente la de Scott y Burgan (2005), y estar familiarizado con el conocimiento de las bases teóricas y prácticas de la evaluación del comportamiento del fuego.

Para casos específicos (por ejemplo, para la planificación de una quema prescrita o para programar acciones de manejo de combustibles), es importante seleccionar el tipo de combustibles que mejor describe las condiciones locales. Es conveniente utilizar datos cuantitativos locales para hacer simulaciones del comportamiento del fuego en el sistema *Behave*, y se recomienda probar más de un modelo y distintos escenarios de humedad de los combustibles, velocidad del viento e inclinación de la pendiente. Siempre hay que tomar en cuenta la variabilidad espaciotemporal de las camas y la complejidad del comportamiento del fuego. En el cuadro 2 se presentan los tipos de modelos de combustible y los modelos de comportamiento del fuego que pueden ser aplicados a estos. A continuación, se describe cada tipo y se discuten los modelos aplicables.

**Cuadro 2. 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)<sup>1</sup>, 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 Burgan (2005) aplicables
<b>1. PS – Pastizal – el fuego se propaga por el estrato herbáceo dominado por pastos.</b>			<b>GR</b>
1.1. <b>PS1</b> - Pastizales altos de zonas cálido-húmedas.	SAV	9	GR8 (GR3, GR5, GR6, GR9)
1.2. <b>PS2</b> - Pastizales bajos de zonas templado-húmedas.	ZAC	8	GR5 (GR3, GR6; GR1)
1.3. <b>PS3</b> - Pastizales bajos de zonas semiáridas.	GSA	7	GR2 (GR1, GR4, GR7; GS1, GS2)
<b>2. Pa – Pastizal-matorral – el fuego se propaga por el estrato de pastos y arbustos combinados.</b>			<b>GS</b>
2.1. <b>PA1</b> - Pastizal-matorral de zonas semiáridas.	SWS	3 (7) <sup>2</sup>	GS1 (GS2, SH1, SH2, GR4)
2.2. <b>PA2</b> - Pastizal-matorral de zonas áridas.	DES	1 (3) <sup>2</sup>	GS1 (GR1, SH1)
<b>3. AR – Matorrales – el fuego se propaga por el estrato arbustivo.</b>			<b>SH</b>
3.1. <b>AR1</b> - Matorrales altos de zonas semiáridas.	CHA	9	SH5 (SH1, SH2, SH6, SH7)
3.2. <b>AR2</b> - Matorrales bajos de zonas semiáridas.	STS	6	SH2 (GS3, SH1, SH2, SH5, SH7)
<b>4. MS – Mantillo y sotobosque bajo dosel arbóreo</b>			<b>TU</b>
4.1. <b>MS1</b> – Mantillo de coníferas y sotobosque	PTS, JUN	6	TU3 (TU5, SH8)

denso arbustivo, de zonas templadas subhúmedas.

4.2. <b>MS2</b> – Mantillo de pinos y sotobosque denso de pastos, de zonas templado-frías húmedas.	PSA	5	TU3 (GR5, GR6, TL8, TL9)
4.3. <b>MS3</b> – Mantillo de pinos y sotobosque ralo de pastos, de zonas subhúmedas.	PWS	3 (5)	TU1 (TU2, TU3, TL1, TL3, SH2)
4.3. <b>MS4</b> - Mantillo y sotobosque ralo de pastos y arbustos, de zonas cálidas subhúmedas a semiáridas.	TDD, STH	1 (3) <sup>2</sup>	TU1
<b>5. MA – Mantillo bajo dosel arbóreo</b>			<b>TL</b>
5.1. <b>MA1</b> - Mantillo compacto de coníferas de acículas cortas, de zonas templadas húmedas.	CON	4	TL3 (TL8, TU3)
5.2. <b>MA2</b> - Mantillo acolchado de coníferas de acículas largas, de zonas húmedas.	PTH, PWH	5	TL8 (TL9, TU3, TU5, TU1)
5.3. <b>MA3</b> - Mantillo acolchado de latifoliadas esclerófilas de zonas subhúmedas a húmedas.	QTS, QWH, QWS	5	TL9 (TL6, TL2, TU2, TU3, GR4)
5.4. <b>MA4</b> - Mantillo de latifoliadas de zonas húmedas estacionalmente secas.	QTH, TSM	3	TL6 (TL2, TU2)
5.5. <b>MA5</b> - Mantillo de latifoliadas de zonas muy húmedas.	TEW, TEM,CFO	2 (4) <sup>3</sup>	TL2 (TU2, TL6)
<b>6. HU – Combustibles de humedales y riberas.</b>	WET	<b>n.d.</b>	<b>(GR*, TL*)<sup>4</sup></b>
<b>7. NI – No inflamable</b>	PAD	0	NB9
<b>8. Coberturas no forestales</b>	OTH		
8.1. AGR - Agricultura	AGR	n.d.	NB3 <sup>5</sup>
8.2. AGU – Cuerpos de agua	AGU	0	NB8
8.3. URB – Centros de población urbanos	URB	0	NB1

Notas:

<sup>(1)</sup> 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.

<sup>(2)</sup> 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.

<sup>(3)</sup> 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.

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

<sup>(5)</sup> 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.

## 4. Descripción de los tipos de combustible y los modelos de comportamiento del fuego

Los tipos básicos de combustibles superficiales que determinan el comportamiento de los incendios superficiales y los grupos de modelos que representan dicha conducta del fuego, son los siguientes:

### TIPOS BÁSICOS DE COMBUSTIBLES SUPERFICIALES

**PS PASTIZALES.** El fuego se propaga por el estrato de pastos. Puede haber elementos leñosos dispersos (< 50% de cobertura).



MODELOS

GR

**PA PASTIZALES Y ARBUSTOS.** El fuego se propaga por el estrato de pastos y arbustos. El aumento de la biomasa de pastos favorece la propagación del fuego.



GS

**AR MATORRALES.** El fuego se propaga por el estrato arbustivo. Puede haber influencia del mantillo y pastos (estos cubren <50% del área).



SH

**MS MANTILLO Y SOTOBOSQUE BAJO DOSEL.** El fuego se propaga por el mantillo (combustibles muertos en el piso del bosque) y por el sotobosque (arbustos y pastos), bajo el dosel arbóreo.



TU

**MA MANTILLO BAJO DOSEL.** El fuego se propaga por el mantillo (combustibles muertos -hojarasca y material leñoso caído- en el piso del bosque). Puede haber hierbas y arbustos, pero no contribuyen significativamente a la propagación del fuego o pueden tener un efecto retardante si se mantienen verdes.



TL

A continuación se describen los tipos de combustibles y se discuten los modelos que pueden aplicarse para simular su comportamiento del fuego, presentando ejemplos de camas de combustibles de México.

**1. Pastizales (PS)** – El combustible que conduce la propagación del fuego está formado por pastos. Puede haber presencia de otro tipo de hierbas y elementos leñosos (arbustos o árboles) dispersos (<30% de cobertura), pero estos no influyen significativamente en el comportamiento del fuego. La carga de mantillo y material leñoso caído es muy baja y no influye en el comportamiento del fuego. Este tipo de cama de combustibles corresponde a los modelos 1, 2 y 3 de Rothermel (Anderson 1982) y “GR” de Scott y Burgan (2005). Dentro de las clases del mapa pueden encontrarse sitios que corresponden al tipo de modelos “GS” cuando hay una mezcla de arbustos significativa, pero menor a 50% de la cobertura; esto es resultado de factores de cambio como la supresión de incendios y el sobrepastoreo.

El comportamiento del fuego puede variar de una velocidad de propagación lenta y llamas cortas a una velocidad muy rápida, con llamas largas, o incluso puede ser extremo, dependiendo del tipo, altura, densidad, cobertura y carga de pastos. Todos los modelos GR son dinámicos, lo que significa que los combustibles herbáceos vivos pueden cambiar a muertos en función del contenido de humedad (Scott y Burgan 2005). La humedad de los combustibles vivos herbáceos y la profundidad o altura de la cama de combustibles influyen significativamente en la velocidad de propagación y la longitud de las llamas.

La altura, cobertura, densidad y carga de combustible pueden variar significativamente entre zonas bioclimáticas, en función del grado de aridez o humedad; puede variar también entre años, especialmente en zonas semiáridas, donde las anomalías de lluvia (precipitación anual mayor al promedio) pueden aumentar la carga de pastos. El efecto de heladas puede aumentar la cantidad de combustible muerto. El apacentamiento de ganado puede ser significativo, reduciendo la altura de los pastos y la carga de combustibles.

Los modelos del grupo GR pueden aplicarse tanto a pastizales naturales, zacatonales y sabanas, como a pastizales inducidos y cultivados e, incluso, en el caso de rastrojos de cultivos de gramíneas, terrenos en barbecho cubiertos por pastos y plantaciones de caña de azúcar. Para el caso de México se diferenciaron tres tipos de camas de combustibles de pastizales a las que se aplican los modelos del grupo GR (Figura 9): (a) pastizales altos de zonas cálido-húmedas (cama genérica SAV); (b) pastizales bajos de zonas templadas o semifrías húmedas (zacatonales, cama genérica ZAC) y (c) pastizales bajos de zonas semiáridas o áridas (cama genérica GSA).

**1.1. Pastizales altos de zonas cálido-húmedas (PS1).** Pastizales densos y altos (> 0.6 m), formados por pastos gruesos. Cargas altas de combustible herbáceo vivo (hasta 10-20 Mg ha<sup>-1</sup> o más). El contenido de humedad de extinción de los combustibles muertos es de 30-40%. Los modelos de referencia son el 3 de Rothermel y el GR8 de Scott y Burgan; dependiendo de la profundidad de las camas y cargas de combustibles pueden utilizarse los modelos GR3 para cargas bajas (alrededor de 5 Mg ha<sup>-1</sup>, altura <0.6 m), GR5 (altura 0.3 a 0.6 m, carga de 5-6 Mg ha<sup>-1</sup>), GR6 (5-10 Mg ha<sup>-1</sup>, pastos relativamente delgados, altura < 0.6 m, en formaciones sabanoides o bajo dosel de bosque abierto) o GR9 cuando las cargas son elevadas (> 20 Mg ha<sup>-1</sup>) y los pastos son muy altos (alrededor de 1.5 m o más). En condiciones ambientales secas puede probarse el modelo GR7 (pastos delgados, con altura alrededor de 0.6-0.9 m, contenido de humedad de extinción 15%). La velocidad de

propagación del fuego varía de rápida a muy rápida y la longitud de las llamas es de alta a muy alta.

Cuando hay mezcla de elementos leñosos, pero su cobertura es menor a 50% y continúan dominando los pastos, se pueden aplicar los modelos GS3 (cargas moderadas, 5-7 Mg ha<sup>-1</sup>, profundidad de la cama <0.6 m) o GS4 (cargas altas, >20 Mg ha<sup>-1</sup>, profundidad de la cama >0.6 m). En pastizales inducidos o cultivados o rastrojos pueden utilizarse algunos de los modelos de este grupo; el modelo GR9 puede aplicarse (con cautela) a plantaciones de caña de azúcar.

### **1.2. Pastizales bajos o zacatonales de zonas semifrías o templado-húmedas (PS2).**

Pastizales densos, con alturas de 0.3 a 0.6 m, de pastos amacollados, generalmente delgados, que crecen en partes altas de las montañas. Es la condición típica de los zacatonales de alta montaña (cama genérica ZAC), pero también se aplica a otros pastizales y claros en regeneración (dominados por pastos) que forman parte del paisaje de los bosques templados. Pueden aplicarse los modelos 2 y 3 de Rothermel (el primero cuando hay elementos leñosos como renuevo o árboles dispersos, generalmente pinos), pero estos no representan adecuadamente el comportamiento del fuego; el modelo GR5 de Scott y Buggan es más apropiado; GR3 puede aplicarse con cargas más bajas y GR6 cuando hay elementos arbóreos dispersos o incluso bajo dosel abierto de bosque de pinos. La velocidad de propagación puede ser de moderada a rápida y la longitud de las llamas moderada a alta, dependiendo del estado del tiempo y la topografía.

Cuando el zacatonal es discontinuo, por ejemplo, cuando crece sobre arena o escoria volcánica en cimas de montaña, la propagación del fuego está limitada y puede aplicarse el modelo GR1. Cuando el zacatonal crece sobre suelos con una capa orgánica superficial gruesa, como es el caso de los andosoles, si llegan a presentarse condiciones muy secas (años con anomalías de sequía), pueden presentarse incendios subterráneos.

**1.3. Pastizales bajos de zonas semiáridas o áridas (PS3).** Este tipo de cama de combustibles corresponde a los pastizales naturales o praderas que se encuentran en climas templados semiáridos. Los pastos son delgados y bajos (<0.6 m) y su densidad y la carga de combustibles varían con la cantidad de lluvia en años precedentes a la temporada de incendios; las anomalías de sequía o de lluvia (precipitación anual menor o mayor al promedio) tienen una importancia significativa en la variación interanual de los combustibles. El efecto del apacentamiento de ganado es también significativo. Los modelos de referencia son el 1 de Rothermel y GR2 o GR4 de Scott y Buggan, en pastizales densos, no alterados, con cargas de combustible herbáceo vivo alrededor de 1.5-2.0 Mg ha<sup>-1</sup> o más alta. La humedad de extinción es baja (15%), la velocidad de propagación es rápida a muy rápida y la longitud de las llamas es alta a muy alta.

En pastizales ralos o sobre pastoreados, puede aplicarse el modelo GR1; la velocidad de propagación es lenta y las llamas son bajas. GR7 puede aplicarse cuando los pastos son altos (>0.9 m), muy densos y con cargas altas; el comportamiento del fuego puede ser extremo. Los modelos GS1 y GS2 son aplicables cuando hay una densidad de arbustos relativamente alta (pero menor al 50% de cobertura); la velocidad de propagación es moderada a rápida y la altura de la llama moderada.



Ps1. Pastos altos de zonas cálidas húmedas (GR6)

Ps2. Pastos bajos de zonas templadas o semifrías húmedas (GR5)

Ps3. Pastos bajos de zonas semiáridas (GR4)

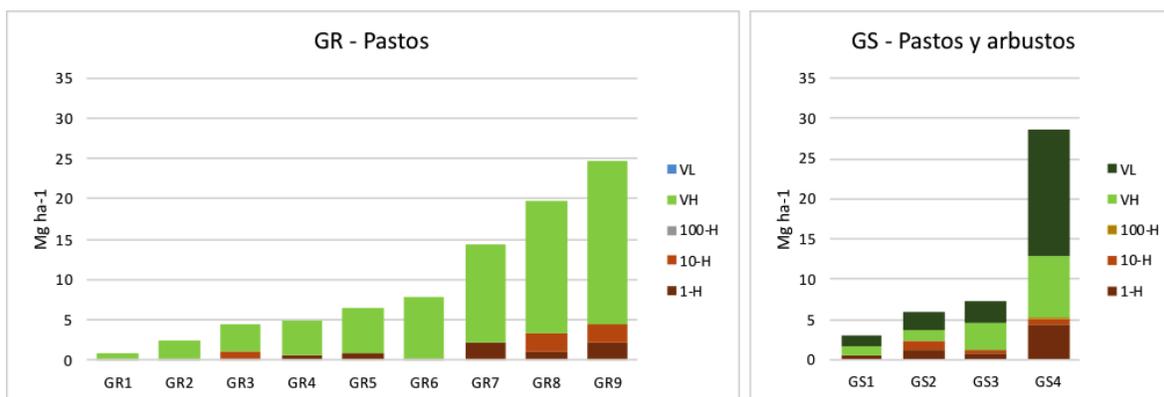
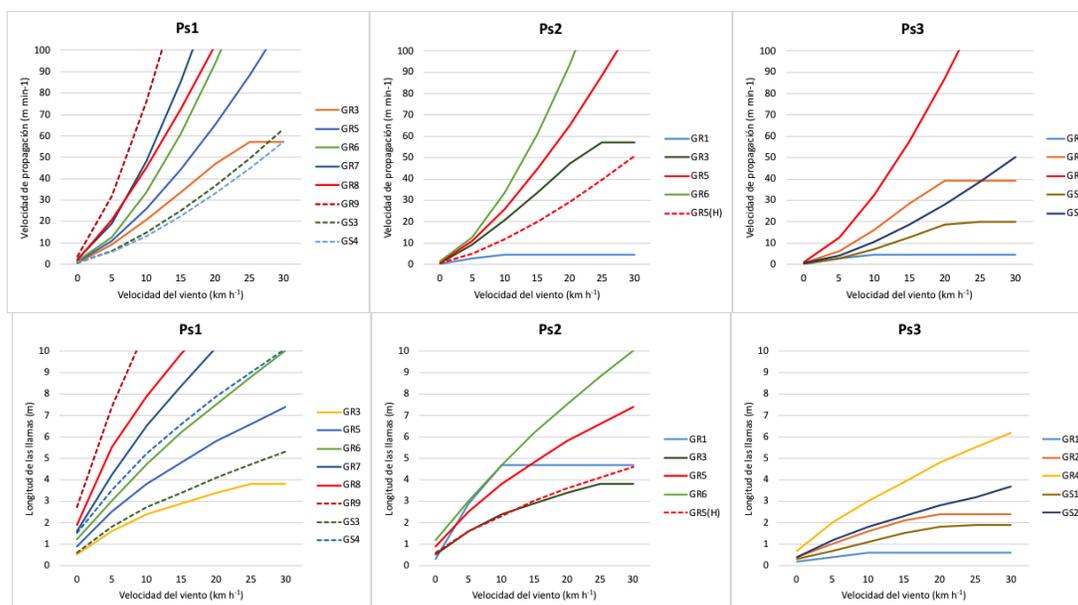


Figura 9. Las fotografías (arriba) muestran ejemplos de camas de combustibles correspondientes a los tipos PS1, PS2 y PS3; entre paréntesis se indican los modelos de Scott y Burgan aplicables a estas camas. Abajo se muestra la estructura de las camas de combustibles utilizadas como entrada de datos para los modelos de pastos (GR) y pastos-arbustos (GS) de Scott y Burgan.



**Figura 10.** Las gráficas muestran los resultados de la simulación de velocidad de propagación y longitud de las llamas para los modelos de los tres grupos de pastizales. El escenario de humedad de los combustibles en todos los casos (excepto GR5 (H)) fue de 6, 7 y 8% para combustibles muertos de 1, 10 y 100 horas y de 60 y 90% para combustibles vivos herbáceos y leñosos, respectivamente. En el tipo Ps2 obsérvese la diferencia en el comportamiento del fuego para el modelo GR5 en este escenario y GR5 (H) en condiciones de mayor humedad (9, 10, 11, 90 y 120 % para combustibles de 1, 10 y 100 horas y vivos herbáceos y leñosos, respectivamente).

**2. Pastizal-matorral (PA).** El fuego se propaga por un estrato de combustibles formado por pastos y arbustos combinados. Los modelos del tipo GS de Scott y Burgan (2005) se seleccionaron para camas genéricas de combustibles de zonas áridas como las SWS y DES (Jardel *et al.* 2017), que corresponden a los matorrales rosetófilos, crasicaulos y micrófilos, por la importancia que juegan los pastos en el comportamiento del fuego en estas. Los pastos, generalmente bajos y ralos, son un componente de estos tipos de vegetación, que puede variar significativamente en densidad, biomasa y altura bajo la influencia interanual de la lluvia, produciendo a su vez variabilidad en el potencial de incendios superficiales.

En la caracterización de regímenes potenciales de incendios (Jardel *et al.* 2014), se señala que en los tipos de vegetación de zonas semiáridas (cama SWS) o áridas (DES) mencionados, los incendios son infrecuentes en el primer caso y raros en el segundo. Los incendios ocurren en condiciones en que aumenta la biomasa de pastos después de años precedentes con anomalías de lluvia, esto es, con una precipitación anual mayor al promedio. La propagación del fuego ocurre sobre camas de combustibles en las que hay mezcla de pastos con los arbustos y el mantillo es delgado y con cargas muy bajas; puede haber elementos arbustivos altos (plantas rosetófilas o cactáceas). Este tipo de camas de combustibles corresponde a ecosistemas de zonas cálidas semiáridas o subhúmedas, donde la carga y continuidad de los combustibles limitan la propagación del fuego.

La vegetación corresponde a formaciones de matorrales xerófilos de zonas tropicales o subtropicales y a selvas tropicales estacionalmente secas (selva baja caducifolia y selva baja caducifolia). Los modelos de combustibles disponibles no representan adecuadamente el

comportamiento del fuego en las selvas secas (un tipo de vegetación que no se encuentra en los Estados Unidos, donde fueron desarrollados los modelos). En el caso de los matorrales xerófilos los incendios son infrecuentes o raros; modelos como el SH1 y el GS1 representan aproximadamente el comportamiento del fuego en estos ambientes.

**2.1. Pastizal-matorral de zonas semiáridas (PA1).** En los matorrales rosetófilos y crasicuales de zonas semiáridas (con un cociente evapotranspiración potencial anual/precipitación anual de 2.0 a 4.0), el combustible superficial está formado por pastos bajos (<0.3 m), generalmente ralos y arbustos de altura baja a mediana (0.3-0.9 m), con cobertura discontinua. Un componente característico de la vegetación es la presencia de plantas rosetófilas altas, como los izotes o yucas (*Yucca* spp.), así como cactáceas columnares; estos elementos se encuentran dispersos o formando un estrato superior de la vegetación que es abierto (Figura 11). Este tipo de camas de combustibles corresponde a la cama genérica SWS, matorrales de zonas cálidas semiáridas.

Para este tipo de camas de combustibles se consideraron aplicables modelos de pastos y arbustos combinados (GS), por la influencia que tiene la variabilidad interanual de la cobertura y densidad de pastos. Puede aplicarse el modelo 5 de Rothermel, en el cual se encuentran arbustos densos que se mantienen verdes y el fuego se propaga por el pasto y la hojarasca de los arbustos, pero con limitaciones. El modelo GS1 de Scott y Burgan es aplicable y pueden probarse también los modelos SH1 o SH2 cuando los pastos son muy escasos; dichos modelos predicen una velocidad de propagación lenta y longitud de llamas baja. Las cactáceas y los elementos rosetófilos bajos (agaves) que almacenan humedad, pueden tener un efecto retardante en el fuego.

Sin embargo, debe tomarse en cuenta el efecto de la variabilidad interanual de la precipitación sobre los combustibles, lo cual es un aspecto clave en los regímenes de incendios de zonas áridas y semiáridas. La densidad de pastos puede aumentar significativamente después de anomalías de lluvia, influyendo significativamente en el comportamiento del fuego. En la cama genérica SWS se espera un régimen de incendios infrecuentes, que ocurren en la estación seca después de años precedentes en los que la precipitación ha sido mayor al promedio. Cuando la carga y densidad de pastos aumenta significativamente, pueden aplicarse los modelos GS2 (velocidad de propagación rápida, longitud de las llamas moderada) o GR4 (velocidad de propagación rápida con llamas altas).

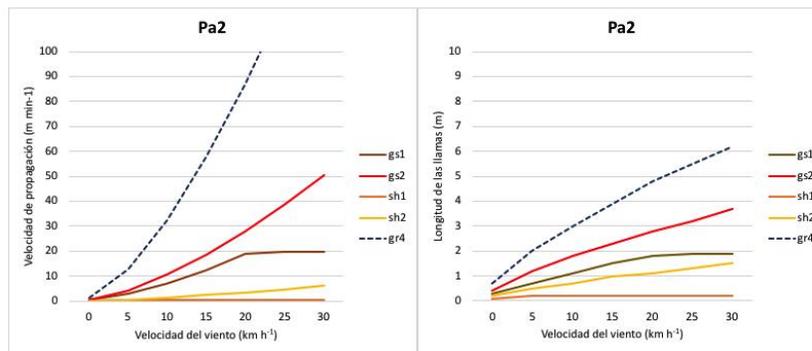
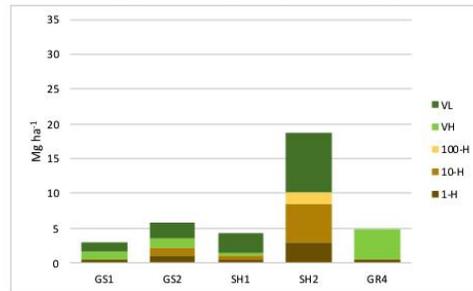
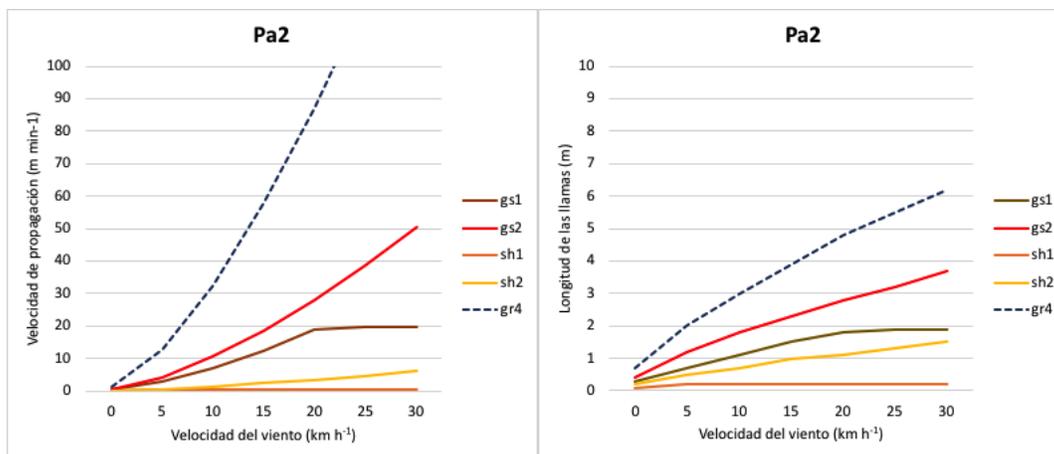


Figura 11. Las fotos de la izquierda y centro muestran izotales (matorral rosetófilo) y la derecha un matorral crasicaule.

Un aspecto para considerar en áreas donde las yucas o izotes están presentes es que estas plantas que alcanzan 1.5 a 5.0 m de altura y tienen abundantes hojas secas pegadas al tallo (Figura 12) y se encienden formando antorchas que producen pavesas y focos secundarios. Lo mismo ocurre con otras rosetófilas como los sotoles, que cuando están secos o muertos se encienden y pueden ser transportados por el viento a distancia. En condiciones de vientos fuertes, que se presentan comúnmente en los terrenos relativamente llanos donde se encuentra este tipo de combustibles, la velocidad de propagación y la longitud de las llamas pueden pasar de moderadas a muy altas o incluso puede haber comportamiento del fuego extremo. La dinámica de los incendios en este tipo de combustibles ha sido poco estudiada y el uso de los modelos sugeridos debe tomarse con precaución.



**Figura 12.** Comportamiento del fuego simulado bajo distintas velocidades del viento (con una inclinación de la pendiente de 10%) para los modelos GS1, GS2, SH1, SH2 y GR4, aplicables a camas de combustibles de matorrales de zonas cálidas semiáridas (cama genérica SWS). A la izquierda, velocidad de propagación; a la derecha, longitud de las llamas. Se utilizó un escenario “seco” de la humedad de combustibles (ver cuadro 2). Los modelos GS1, SH2 y SH1 pueden utilizarse en condiciones de bajas cargas de combustibles; cuando la carga de pastos aumenta después de años con precipitación anual mayor al promedio, pueden probarse los modelos GS2 o GR4.

**2.2. Pastizal-matorral de zonas áridas (Pa3).** En zonas áridas donde la evapotranspiración potencial anual es entre cuatro y ocho veces mayor que la precipitación anual, la productividad primaria es muy baja y la biomasa de plantas es escasa y dispersa (Figura 13), lo cual limita la propagación del fuego; los incendios son raros u ocasionales (Jardel *et al.* 2014). Puede aplicarse la categoría NB9 de Scott y Burgan para áreas con suelo desnudo que no se queman. Sin embargo, los incendios pueden ocurrir después de años o periodos precedentes de lluvia que favorecen el establecimiento de pastos y hierbas que llegan a formar una cubierta con suficiente carga y continuidad para alimentar el fuego. En este caso el fuego se propaga por los pastos, hierbas secas y arbustos, que son generalmente bajos (<0.3 m); la velocidad de propagación es muy lenta y la longitud de las llamas muy baja. Los modelos aplicables pueden ser GS1 (pastos con arbustos, cargas bajas), GR1 (pastos bajos y dispersos) o SH1 (arbustos dispersos con cargas bajas de combustible).



**Figura 13.** Matorrales xerófilos de zonas áridas (cama genérica DES). A la izquierda matorral de gobernadora; centro matorral crasicale; derecha, matorral halófito (chamizal). La discontinuidad de la cubierta vegetal y las cargas de biomasa muy bajas, limitan la propagación del fuego y los incendios son raros en estas camas de combustibles. Sin embargo, después de años con precipitación superior a la media (anomalías de lluvia), puede aumentar la continuidad de la cobertura de pastos y hierbas, creando condiciones para la propagación de incendios.

**3. Matorrales (AR).** Este tipo de combustibles superficiales está formado por formaciones arbustivas densas de zonas semiáridas. 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 este trabajo los tipos de combustibles AR se refieren a 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).

**3.1. Matorrales densos y altos de zonas semiáridas (AR1).** El fuego se propaga por el estrato de arbustos altos (>2 m) y densos, que llegan a presentar cargas altas de combustibles (hasta 20-35 Mg ha<sup>-1</sup>). Este tipo de combustibles corresponde principalmente a los chaparrales (cama genérica CHA), que se encuentran en zonas de clima mediterráneo en las que la estación de incendios es el verano (la época más cálida del año) y las lluvias ocurren durante la estación más fría (finales de otoño e invierno). En México se encuentran también chaparrales en zonas semiáridas en altitudes donde se presentan bajas temperaturas y heladas en una parte del año (clima templado semiárido) y en condiciones topográficas o tipos de suelos con fuerte drenaje que reducen la disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantas leñosas. La vegetación es arbustiva, densa y el combustible muerto se acumula, llegando a ser abundante entre la cubierta arbustiva (arbustos muertos en pie y ramas muertas). La carga de mantillo varía de muy baja a moderada, según el estado de desarrollo de la vegetación, y la de pastos es generalmente baja.

La acumulación de combustible muerto en la cobertura arbustiva, la altura del estrato arbustivo y su continuidad horizontal y vertical, y la presencia de arbustos altamente inflamables, crean condiciones para incendios con velocidades de propagación rápidas y llamas altas. El comportamiento del fuego llega a ser extremo. La humedad del combustible vivo puede tener efectos significativos en el comportamiento del fuego. El contenido de humedad de extinción de los combustibles muertos es de 15%.

El modelo de combustibles de Rothermel típico es el 4; de manera general puede aplicarse los modelos SH5 y SH7 de Scott y Burgan, pero se pueden aplicar también otros modelos, debido a la variación espaciotemporal en la altura, densidad y biomasa de la vegetación en distintas etapas de la sucesión o con distinto tiempo transcurrido desde el último incendio:

- a) SH2 para matorrales bajos (<0.3 m), sin cubierta de pasto significativa, con cargas bajas a moderadas de combustibles. La propagación del fuego es lenta y las llamas bajas.
- b) SH5 para matorrales densos de altura media (1.2-1.8 m), con carga alta de combustibles. La propagación del fuego es muy rápida y las llamas muy altas.

c) SH7 para matorrales densos y altos (alrededor de 2 m), con cargas muy altas de combustibles. La propagación del fuego es rápida y las llamas altas; puede haber comportamiento extremo del fuego.

Con condiciones de vientos fuertes se producen pavesas e incluso se transportan a distancia arbustos muertos encendidos, creando focos secundarios. Cuando el chaparral es degradado, aumenta la densidad de pastos.

**3.2. Matorrales bajos de zonas semiáridas (AR2).** Los arbustos son menores a 2 m y densos. La altura de los arbustos y la carga de combustibles ( $10-15 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) son más bajas que en el tipo AR1; es posible que la humedad del combustible se mantenga más alta, pero esto no ha sido estudiado. La carga de mantillo es muy baja y la de pastos es generalmente baja, pero influyen en el comportamiento del fuego. La velocidad de propagación y longitud de las llamas varían de bajas a moderadas, pero pueden llegar a ser altas. Se requiere de vientos moderados para propagar el fuego.

Este tipo de combustibles corresponde a la cama genérica STS, matorrales de zonas templadas semiáridas (matorral submontano). Puede aplicarse el modelo 6 de Rothermel o los modelos SH1, SH2, y SH5 de Scott y Burgan, dependiendo de la altura y carga de combustibles. La estructura de la cama de combustibles utilizada como entrada para el modelo GS3 es parecida a la de los matorrales submontanos reportada en Alvarado *et al.* (2008) y puede aplicarse si la densidad de pastos es alta; el fuego se propaga por los arbustos pero con influencia de los pastos y la hojarasca.



Ar1. Arbustos altos (>2 m) de zonas semiáridas (SH5)



Ar2. Arbustos bajos (< 2 m) de zonas semiáridas (SH2)

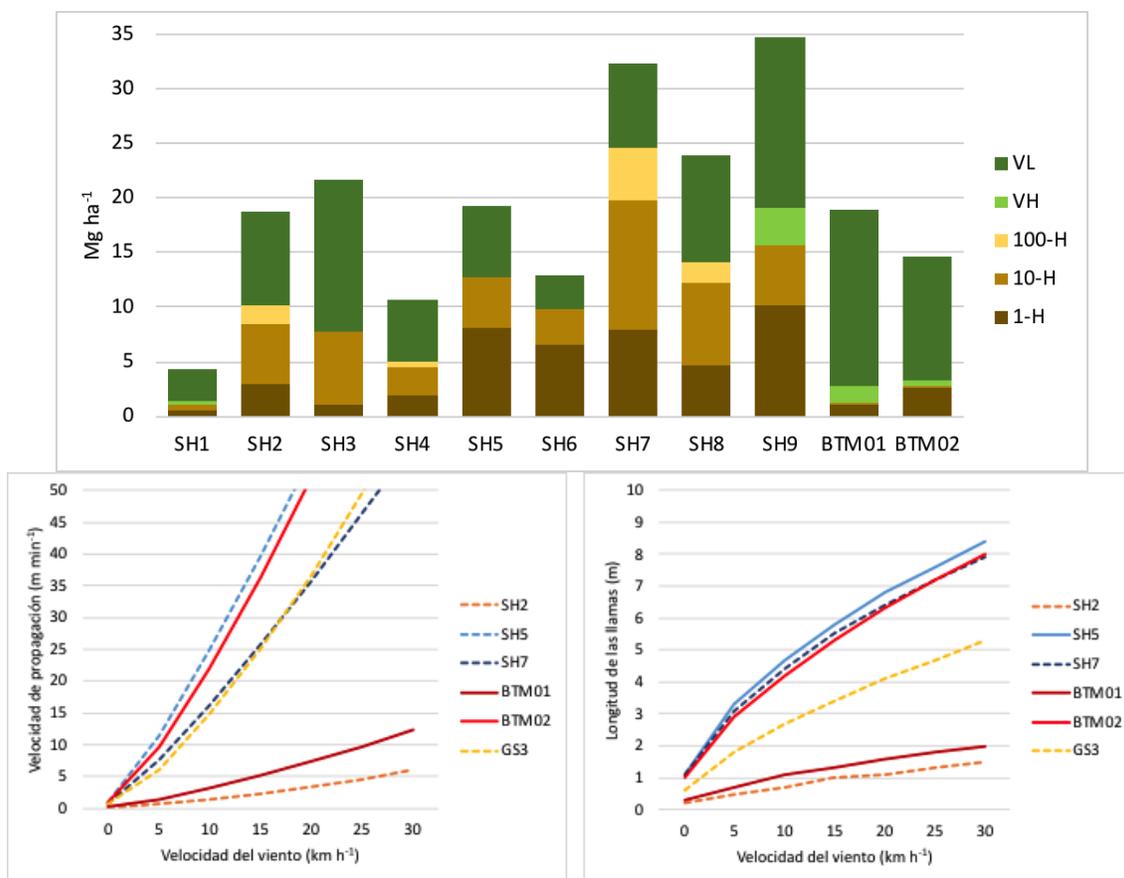


Figura 14. Tipos de camas de combustibles características de los tipos AR1 y AR2, su estructura y comportamiento del fuego simulado en BehavePlus 5.0 con un escenario muy seco de humedad de los combustibles (ver cuadro 2).

**4. Mantillo y sotobosque bajo dosel arbóreo (MS).** El fuego se propaga sobre el mantillo y el sotobosque combinados, bajo dosel arbóreo denso o abierto. El dosel arbóreo determina las propiedades del mantillo y su cobertura influye tanto en la densidad y profundidad (altura) del sotobosque como en la velocidad del viento; su efecto en la propagación del fuego es indirecto. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la continuidad vertical de los combustibles (el contacto o traslape del sotobosque con la base de las copas de los árboles) o la propagación del fuego por el estrato herbáceo-arbustivo con llamas relativamente altas, puede generar antorchamientos o incluso incendios de copa. Este tipo de combustibles corresponde a los modelos TU de Scott y Burgan (2005).

**4.1. Mantillo de coníferas y sotobosque denso arbustivo, de zonas templadas subhúmedas (MS1).** Mantillo relativamente delgado de coníferas de acículas cortas o escumófilas, que pueden formar una capa compacta, con sotobosque de arbustos y pastos. El sotobosque arbustivo llega a ser denso y alto; pueden encontrarse arbustos rosetófilos altos como Yucca y arbustos altamente inflamables como la manzanita (*Arctostaphylos*). La velocidad de propagación y la longitud de las llamas son de moderadas a altas. La continuidad vertical del combustible puede producir antorchamiento e incendios de copa. En este tipo de combustibles se incluyó la cama genérica PTS, de bosques de pino, pino encino y pino-enebro (*Juniperus*), que se encuentran en ambientes templados subhúmedos

o semiáridos. Puede aplicarse el modelo TU3 para cargas moderadas de hojarasca con un componente de pastos y arbustos, que predice un comportamiento del fuego con propagación rápida y longitud de llamas moderada; TU5 puede usarse en bosques densos con cargas altas de mantillo y con un sotobosque arbustivo. En el caso de camas de combustible con alta carga y densidad de arbustos, los modelos de matorrales densos como SH8 y SH9 pueden ser más adecuados (Figura 15).

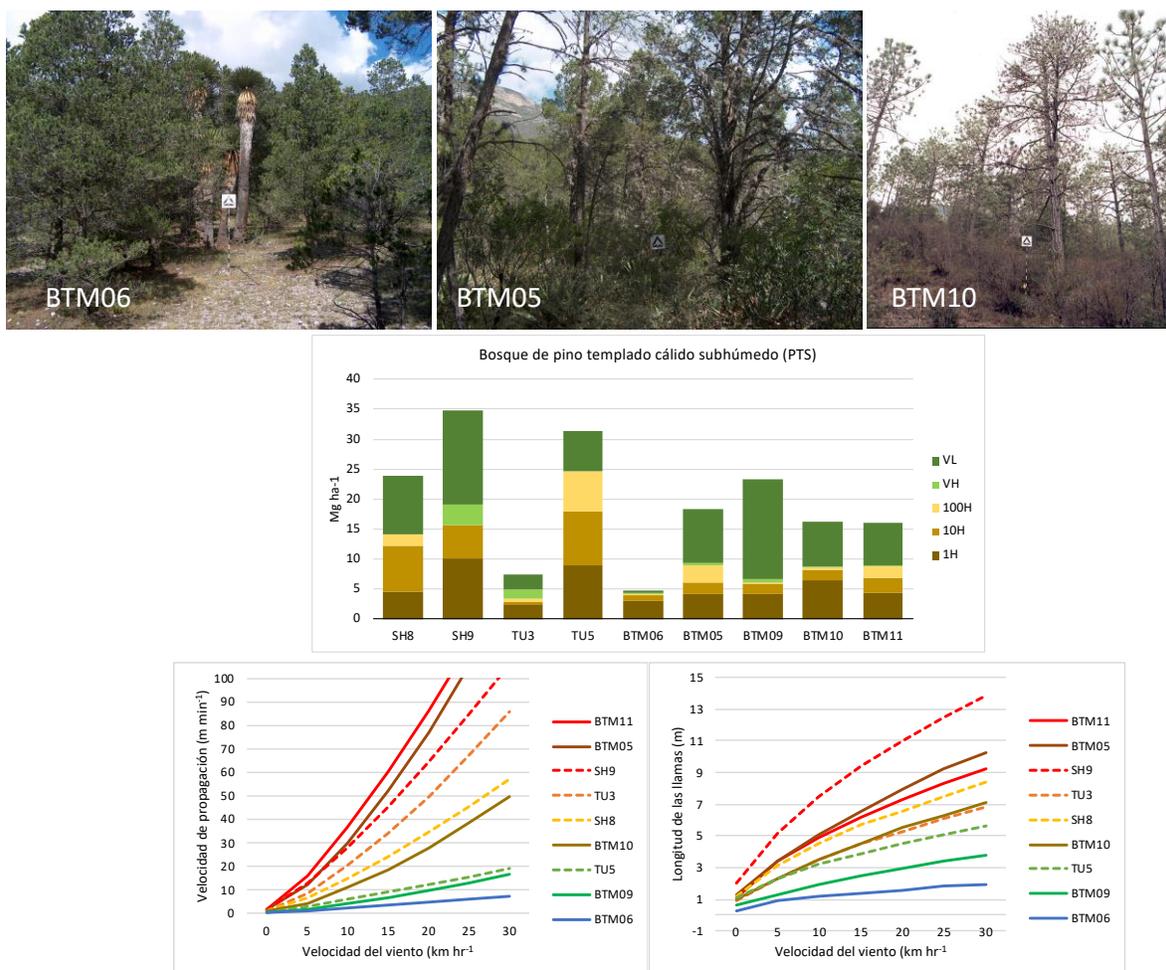


Figura 15. Tipos de camas de combustibles características del tipo MS1, mostrando su estructura y comportamiento del fuego simulado en BehavePlus 5.0 con un escenario muy seco de humedad de los combustibles.

**4.2. Mantillo de pinos y sotobosque denso de pastos, de zonas templado-frías húmedas (MS2).** Mantillo de coníferas de acículas largas, con cargas moderadas a altas y cubierta continua de pastos amacollados; corresponde a los pinares de alta montaña de México (cama genérica PSA). 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 (Cuadro 2).

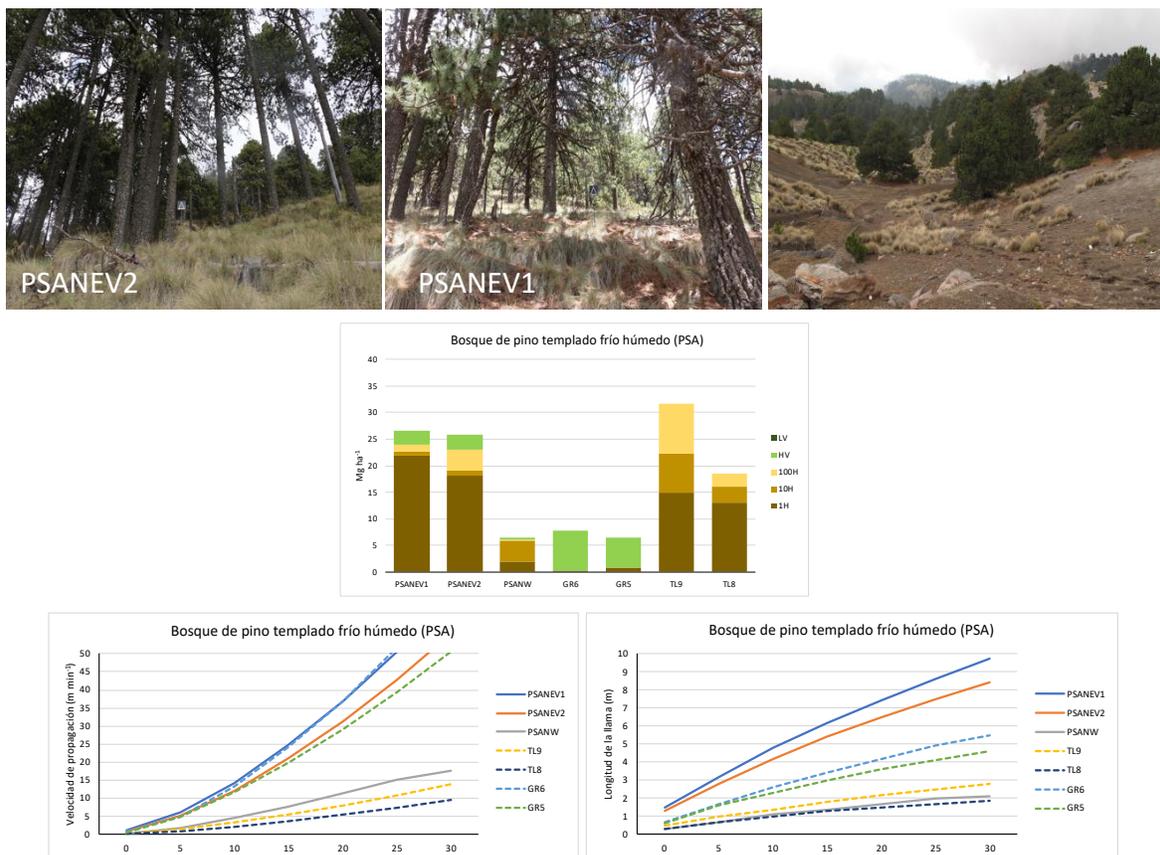


Figura 16. Tipos de camas de combustibles características del tipo MS2, mostrando su estructura y comportamiento del fuego simulado en BehavePlus 5.0 con un escenario “húmedo” de de humedad de los combustibles.

**4.3. Mantillo de pinos y sotobosque ralo de pastos, de zonas cálidas subhúmedas (MS3).** Mantillo suelto o acolchado de coníferas de acículas largas, con mezcla de latifoliadas esclerófilas, con sotobosque de pastos; puede haber arbustos presentes. 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. Sí la presencia de pastos es continua, probar también modelos de pastizales de zonas secas como GR2 para cargas bajas o GR5 o GR6 para cargas moderadas. Esta categoría MS3 debe considerarse como provisional, debido a la falta de información de inventarios de combustibles.



Figura 17. A la derecha bosque de pino-encino cálido-subhúmedo, que muestra las características fisonómicas de este tipo de vegetación. A la derecha, condición sabanoide en un área afectada por incendios recurrentes. Este es el tipo de condiciones de variabilidad que se pueden encontrar dentro de una misma clase en un mapa a escalas como 1:250,000. En condiciones como las de la foto de la izquierda puede aplicarse un modelo TU3; en las condiciones de la foto de la derecha se aplica un modelo de pastizal con cargas bajas como GR2.

**4.4. Mantillo y sotobosque ralo de pastos y arbustos, de zonas cálidas subhúmedas a semiáridas (MS4).** Este tipo de combustibles corresponde a las condiciones que se observan en las selvas bajas caducifolias, selvas bajas espinosas, matorral subtropical o matorral espinoso tamaulipeco, que se agruparon en las camas genéricas TDD (selvas bajas) y STH (matorrales altos de zonas cálido-húmedas). Sus características generales 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. La carga de combustibles muertos es muy baja (entre 5 y 10 Mg ha<sup>-1</sup> 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 (Figura 18).

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; en estos casos, el fuego llega a propagarse con velocidad baja a moderada y longitud de las llamas 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.



Figura 18. Ejemplos de camas de combustibles en selva baja caducifolia (tipo Pa1, cama genérica TDD). Nótese el contraste en la superficie del suelo entre la foto de la derecha, donde el suelo está cubierto por combustibles muertos y la foto del centro, donde el combustible superficial es muy escaso y discontinuo. La foto de la derecha muestra una selva secundaria en la temporada lluviosa, con combustible superficial formado por pastos bajos (< 0.1 m).

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 20 y los datos de los parámetros utilizados en la simulación en el cuadro 1.

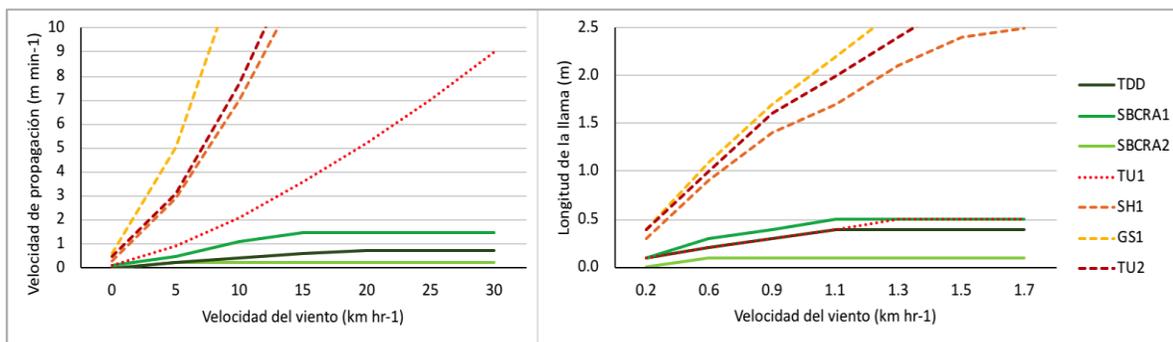


Figura 19. Comportamiento del fuego simulado bajo distintas velocidades del viento (con una inclinación de la pendiente de 10%) para camas de combustibles de selva baja caducifolia (cama genérica TDD), comparado con los modelos TU1, TU2, SH1 y GS1 de Scott y Burgan. A la izquierda, velocidad de propagación; a la derecha, longitud de las llamas. Se utilizó un escenario “seco” de la humedad de combustibles (3, 4 y 5% para combustibles de 1, 10 y 100 horas; 30 y 60% para combustibles vivos y leñosos, respectivamente).

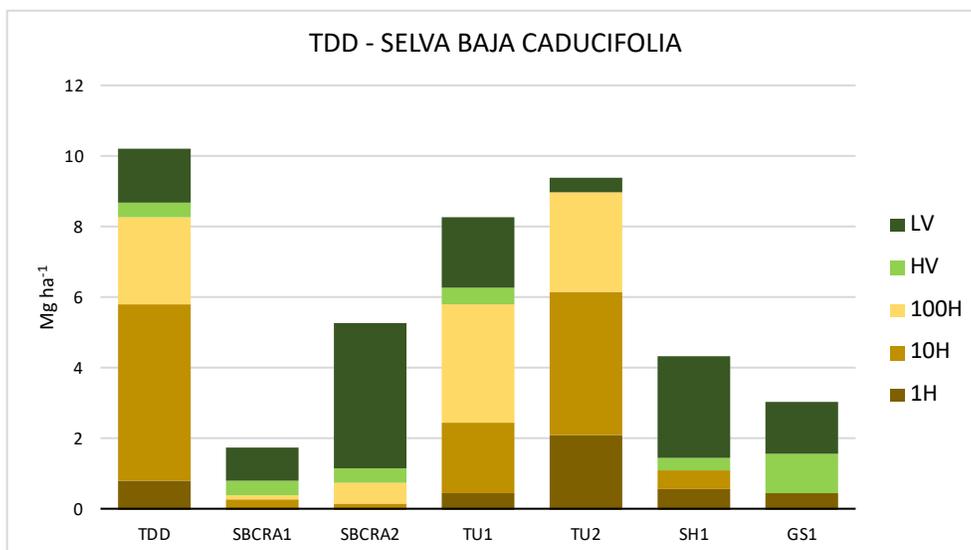


Figura 20. Estructura de camas de combustibles superficiales de selva baja caducifolia (TDD condiciones promedio, SBCRA1 selva no alterada, SBCRA2 selva degradada) comparada con la de las entradas de los modelos TU1, TU2, SH1 y GS1 de Scott y Burgan).

**5. Mantillo bajo dosel arbóreo (MA).** El fuego se propaga sobre el mantillo bajo el dosel arbóreo; pueden haber pastos y arbustos, pero el mantillo es el componente principal que determina el comportamiento del fuego. Los modelos afines del grupo TL de Scott y Burgan predicen velocidades de propagación lenta y llamas que varían de bajas a moderadas en el frente de los incendios. Sin embargo, después del paso del frente de llamas, la combustión sin llamas (brasas y rescoldos) puede generar calor intenso y emisión de humo por períodos prolongados, con efectos severos cuando hay acumulaciones altas de combustibles del suelo y material leñoso caído.

El grupo de mantillo bajo dosel (MA) se divide 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.

**5.1. Mantillo compacto de coníferas de acículas cortas, de zonas templadas húmedas (MA1).** Este tipo de combustibles corresponde a la cama genérica CON de bosques de oyamel y bosques mixtos de coníferas de zonas templadas húmedas. Los componentes dominantes en el estrato arbóreo (oyameles, pinabets, cipreses de géneros como *Abies*, *Pseudotsuga*, *Picea* o *Cupressus*), producen acículas cortas u hojas escumófilas pequeñas, inflamables por el contenido de resina, que forman un mantillo compacto y denso. Puede haber mezcla de acículas largas de pinos y hojas de latifoliadas esclerófilas de encinos. El mantillo suele ser delgado y compacto; es muy inflamable, pero se mantiene húmedo la mayor parte del año. Cuando hay condiciones secas, el fuego se propaga lentamente con llamas bajas. Generalmente el sotobosque es ralo y bajo, pero cuando aumenta la densidad de arbustos o árboles en etapa de regeneración y estos llegan a encenderse, aumentan la velocidad de propagación y la intensidad de los incendios. Dada la

estructura de las copas de las coníferas, pueden iniciarse incendios de copa. Para la simulación del comportamiento del fuego pueden utilizarse modelos como TL3 para cargas bajas y TL8 para cargas moderadas de combustible; TU3 cuando hay sotobosque arbustivo denso.

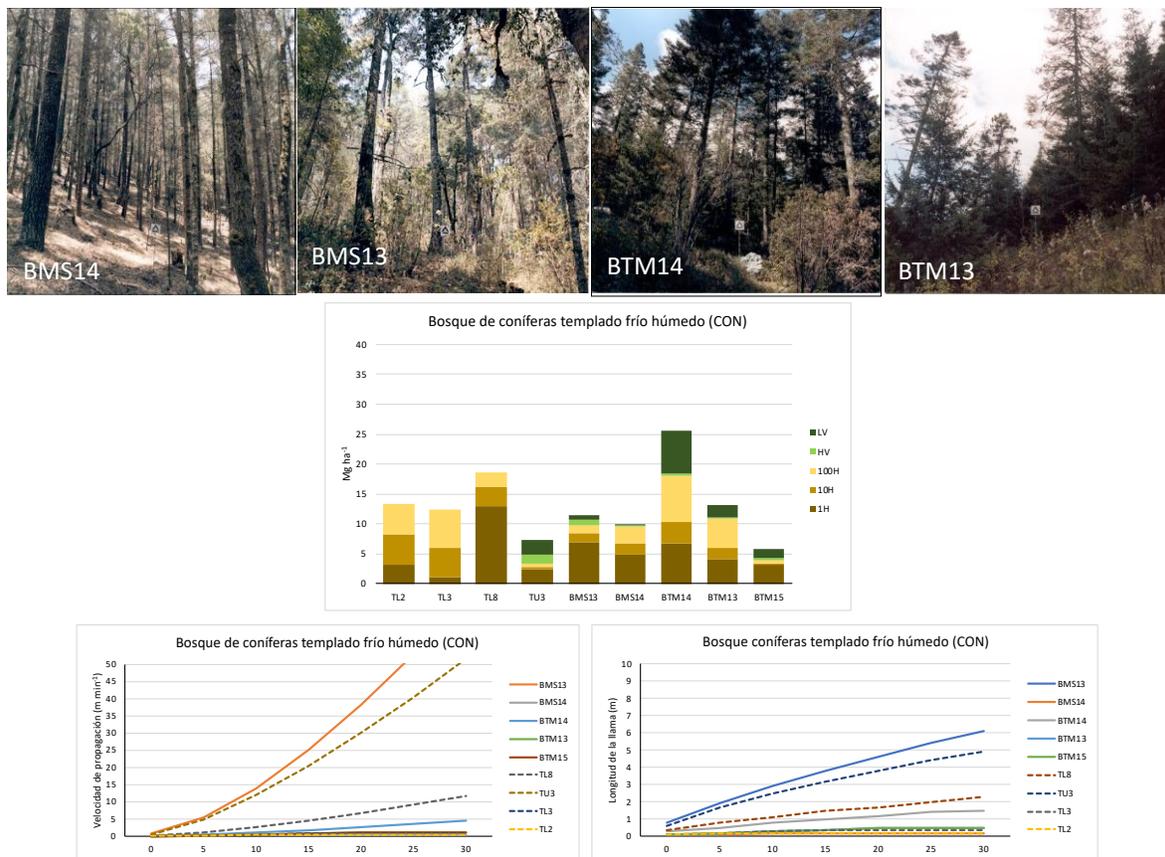


Figura 21. Tipos de camas de combustibles características del tipo MA1.

## 5.2. Mantillo acolchado de coníferas de acículas largas, de zonas húmedas (MA2).

Este tipo de combustibles se caracteriza por un mantillo acolchado de coníferas de acículas largas; puede haber hojas esclerófilas de latifoliadas como los encinos. Sus características son típicas de los modelos TL, elaborados para bosques de pino similares que se encuentran en los Estados Unidos. Se incluyeron en este tipo los bosques de pino de zonas templado-cálidas húmedas (PTH) y también los bosques de pino de zonas cálido-húmedas (PWH). Dadas las condiciones del clima en la región intertropical, en los bosques de pino de zonas húmedas de México, no ocurre un período invernal lo suficientemente frío para limitar la productividad primaria y se producen grandes acumulaciones de hojarasca cuando se alargan los intervalos entre incendios.

La propagación del fuego es generalmente lenta y con llamas bajas, pero con cargas altas de hojarasca la velocidad puede pasar a ser moderada y la intensidad relativamente alta. Pueden aplicarse los modelos TL1 para cargas bajas después de incendios recientes, TL3 para cargas moderadas, TL8 (que puede considerarse la condición intermedia típica) y TL9 o incluso SB2 para cargas muy altas de hojarasca.

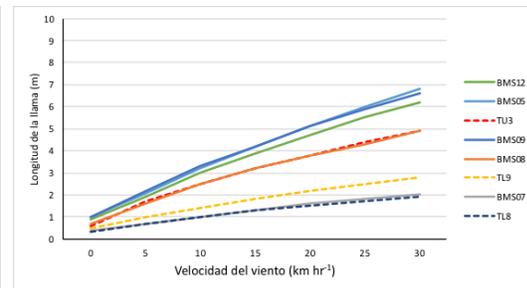
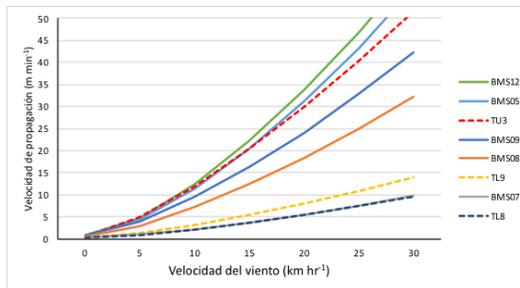
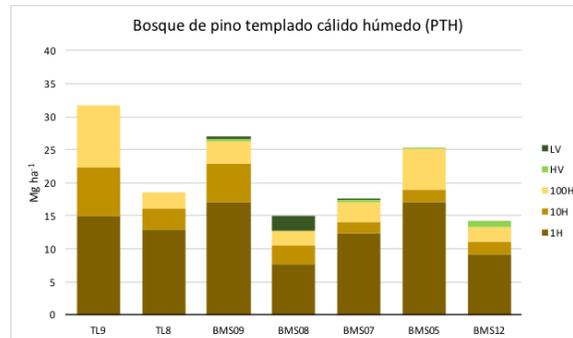


Figura 22. Tipos de camas de combustibles características del tipo MA2.

En áreas con caída de troncos que se acumulan sobre el mantillo, a causa de la mortalidad de árboles por competencia (auto-aclareo) en rodales en fase de crecimiento o por ataque de insectos parásitos, pueden aplicarse los modelos TL4 (troncos delgados), TL5 (altas cargas de hojarasca y material leñoso grueso) o TL7 (troncos grandes) dependiendo del tamaño y cantidad de material leñoso caído grueso. Para residuos de corta en áreas de aprovechamiento forestal, aplicar los modelos SB.

En el tipo de combustibles MS2, cuando hay acumulaciones altas de mantillo (lo que se produce tras periodos largos de supresión de fuego) o material leñoso caído por efectos de plagas o acumulación de residuos de corta, la intensidad del frente de los incendios llega a producir antorchamientos y en pendientes fuertes, bajo la influencia del viento, puede haber propagación del fuego en las copas de los árboles. Pero otro factor que puede producir efectos severos de los incendios en camas de combustibles con cargas altas, es el tiempo de residencia y la intensidad del calor de la combustión sin llama (brasas y rescoldos). Las condiciones templado-cálidas TL8 (TL9, TU3, TU5, TU1) PTH, PWH; CARGAS.

### 5.3. Mantillo acolchado de latifoliadas esclerófilas de zonas subhúmedas a húmedas (MA3).

En los bosques con dominancia de encinos (camas genéricas (QWH, QWS y QTS) se produce abundante hojarasca que forma un mantillo suelto o acolchado de latifoliadas esclerófilas. Las profundidades del mantillo y las cargas de hojarasca llegan a ser muy altas después de periodos largos de supresión de incendios. El comportamiento del fuego en este tipo de combustibles es parecido al del grupo MA2, pero la velocidad de propagación puede ser más rápida. La hojarasca de encinos, cuando se enciende genera fácilmente pavesas y bajo la influencia del viento el fuego puede propagarse muy rápido.

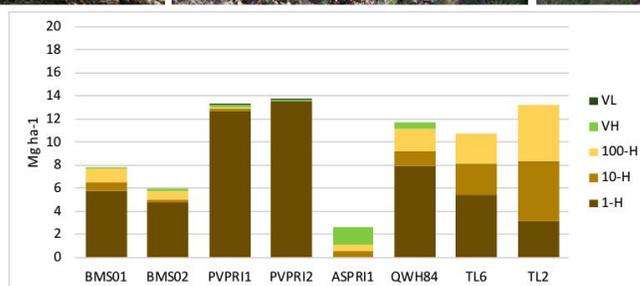


Figura 23. Camas de combustibles características del tipo MS3.

Los modelos aplicables al tipo MA3 son TL2 para cargas bajas y TL6 para cargas moderadas de hojarasca. El efecto de incendios recurrentes puede producir condiciones de bosques abiertos con sotobosque de pastos o condiciones sabanoides, en las que deben probarse modelos de mantillo sotobosque (como TU3) o de pastizales (GR).

### 5.4. Mantillo de latifoliadas de zonas húmedas estacionalmente secas (MA4).

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 24, 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.

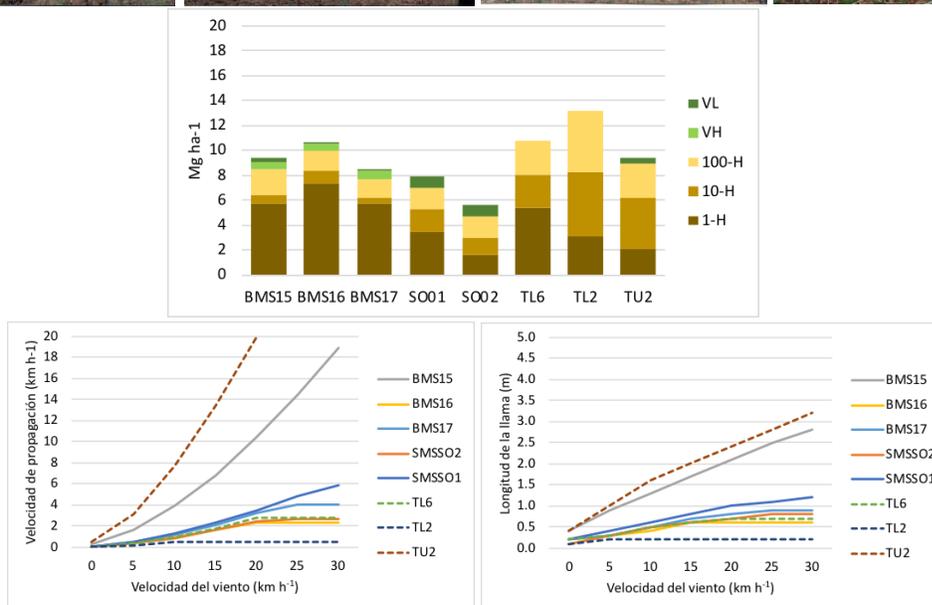


Figura 24. Camas de combustibles características del tipo MA4.

### 5.5. Mantillo de latifoliadas de zonas muy húmedas (MA5).

Mantillo compacto de latifoliadas membranosas, que se mantiene húmedo todo el año. El fuego sólo se propaga en años con anomalías de sequía. Incluye a las camas genéricas de bosques mesófilos de montaña (CFO) y selvas altas perennifolias lluviosas (TEW) o muy húmedas (TEM). 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.

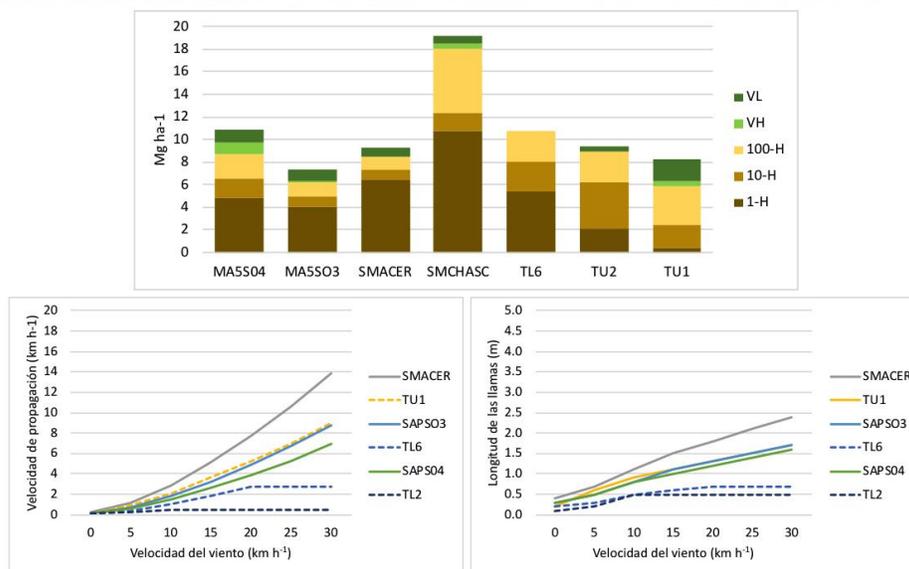


Figura 25. Camas de combustibles características del tipo MA5.

**6. Combustibles de humedales y riberas.** En el mapa nacional de modelos y tipos de combustibles (y anteriormente en el mapa de camas de combustibles), se agregaron provisionalmente los tipos correspondientes a los humedales. Aunque las condiciones de inundación limitan la propagación del fuego, los humedales pueden incendiarse. 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.

**6.1. Pantanos herbáceos (HU1).** 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. El combustible está formado por plantas herbáceas y es similar al de pastizales, pero en los pantanos cuando están secos la carga de combustibles muertos es generalmente muy alta y los incendios se propagan muy rápidamente con intensidades muy altas. Cuando hay acumulaciones de turba, puede haber incendios subterráneos. Pueden aplicarse los modelos de pastizales de zonas húmedas, como GR8 y GR9. 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. Los incendios de acumulación de materia orgánica en terrenos pantanosos, turberas y suelos orgánicos (del orden de los histosoles) (Cuadro 1).

## 6.2. Pantanos de árboles o arbustos con suelos orgánicos (HU2).

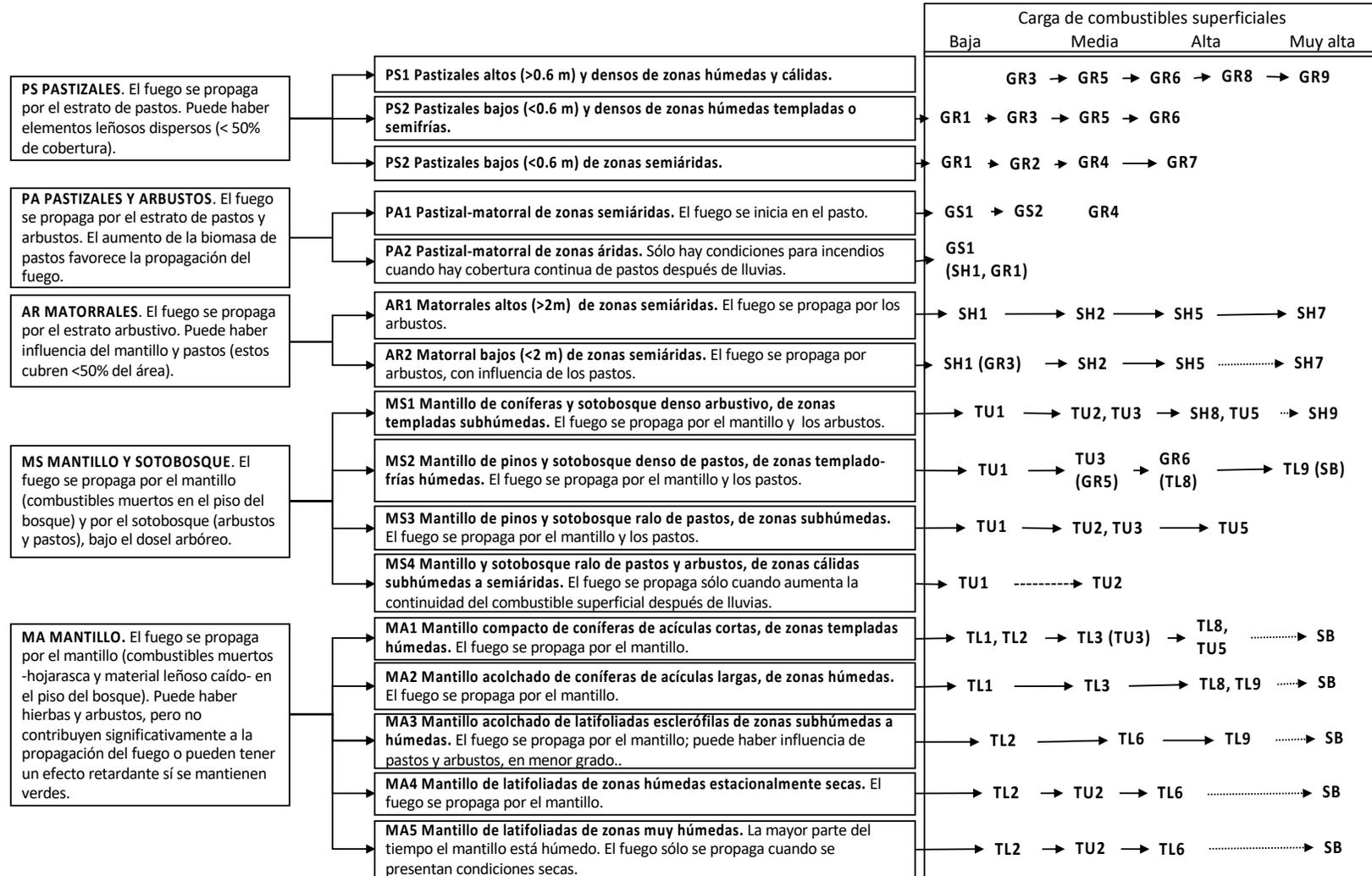
En el caso de los manglares, en las orillas de estos con tierra firme cuando baja el nivel del agua, o cuando se interrumpe el flujo del hidrológico al cegarse canales o esteros, el manglar llega a secarse y hay mortalidad de árboles lo que aumenta el combustible disponible. Sí el suelo orgánico llega a secarse, pueden ocurrir incendios en la capa de hojarasca y material orgánico. Los incendios de acumulación de materia orgánica en terrenos pantanosos, turberas y suelos orgánicos (del orden de los histosoles), corresponden propiamente a incendios subterráneos.



Figura 26. Tipos de camas de combustibles de humedales y a la derecha condiciones no inflamables de desierto, sin cobertura vegetal significativa.

7. **No inflamable (NI).** Condiciones del territorio en las cuales no hay combustible o la vegetación es muy escasa y dispersa y no existe continuidad de la biomasa que pueda mantener la propagación del fuego. Corresponde a la cama genérica PAD de desiertos arenosos y áreas sin vegetación aparente.

La figura 27 presenta un esquema general de los tipos de combustibles y los modelos de combustibles de Scott y Burgan que pueden aplicarse en condiciones de distintas cargas de biomasa en los componentes vivos y muertos.

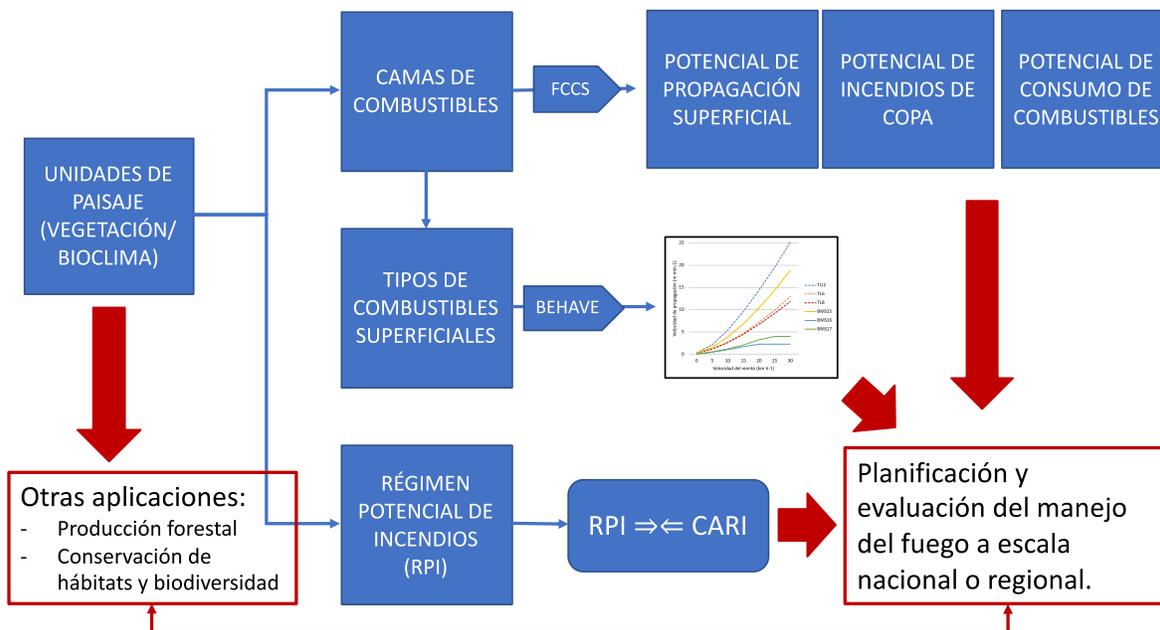


**Figura 27. Esquema de la clasificación de tipos de combustibles, indicando los modelos de comportamiento del fuego (panel de la derecha) que pueden aplicarse a cada tipo en función de la carga de combustibles.**

Información básica:  
factores del paisaje  
geográfico que  
influyen en el  
ambiente del fuego

Caracterización y  
clasificación del complejo  
de combustibles y  
régimen de incendios

Inferencias sobre:  
- Potenciales de incendios  
- Comportamiento del fuego  
- Condición actual del régimen  
de incendios (CARI)



**Figura 28.** La figura muestra la relación entre varios productos cartográficos que han sido elaborados para su aplicación como herramientas para el manejo del fuego; el mapa de tipos de combustibles y modelos de comportamiento del fuego es uno de estos productos. El mapa de unidades del paisaje, que integra información de los tipos de vegetación y las condiciones bioclimáticas, es la información básica para los demás productos y tiene también otras aplicaciones para la elaboración de mapas de productividad forestal (la productividad primaria de las plantas es al mismo la fuente de la biomasa aprovechada como madera y de la biomasa combustible) y de mapas de hábitat para planificar la conservación de la diversidad biológica. El mapa de unidades de paisaje fue también la base para el mapa de camadas de combustibles, tipos de combustibles superficiales y régimen potencial de incendios. El mapa de camadas de combustibles, a través de la aplicación del FCCS (Sistema de Clasificación de Características de Combustibles), sirvió para generar los tres mapas de potenciales de incendios; fue también la base para elaborar el mapa de tipos de combustibles superficiales y usarlo para la selección de los modelos de comportamiento del fuego y su uso en la simulación en el sistema Behave para predecir la probable velocidad de propagación y longitud de la llama en el frente de incendios superficiales. El mapa de regímenes potenciales de incendios (RPI) sirve de referencia para evaluar la condición actual de los regímenes de incendios. El conjunto interrelacionado de mapas sirve como herramienta para la planificación del manejo del fuego a escala nacional o regional.

## 5. Literatura citada

- Agee, J.K. 1993. Fire ecology of Pacific Northwest forests. Island Press, Washington, DC.
- Albini, F. A. 1976. Estimating wildfire behavior and effects. USDA For. Serv. Res. Note Int-30.
- 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.
- Arnaldos V.J., X. Navalón N., E., E. Pastor F., E. Planas C., L. Zárata L. 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Ediciones Mundi-Prensa, España. 414 p.
- Bond W.J., Woodwrd F.I, Midgley G.F. (2005). The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytologist* 165: 525-538.
- Bond, W.J. y van Wilgen, B.W. 1996. Fire and plants. Population and Community Biology Series 14. London, Chapman and Hall
- Bradstock, R.A. 2010. A biogeographic model of fire regimes in Australia: current and future implications. *Global Ecology and Biogeography* 19: 145-158
- Bowman, D.M.J.S., B.P. Murphy, M.M. Boer, R.A. Bradstock, G.J. Cary, M.A. Cochrane, C.M. D'Antonio, R.S., DeFries, J.C. Doyle, S.P. Harrison, F.H. Jhonston, J.E. Keeley, M.A. Krawchuk, C.A. Kull, J.B. Marton, M.A. Moritz, Prentice, C.I. Roos, A.C. Scott, T.W. Swetnam, G.R. van der Werf, y S.J. Pyne. 2009. Fire in the earth system. *Science* 24(324): 481-484.
- Burgan, Robert E. y Rothermel, Richard C. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system-FUEL subsystem. General Technical Report INT-167. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1984. 126 p
- Falk DA, Miller C, McKenzie D, and Black AE. 2007. Cross-scale analysis of fire regimes. *Ecosystems* 10: 809-23.
- Gedalof, Z. 2011. Climate and Spatial Patterns of Wildfire in North America. En: McKenzie, D., C. Miller y D. Falk (Eds.). *The Landscape Ecology of Fire*. Springer. Dordrecht, Netherlands, p. 89-116
- 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.
- Holz, A., T. kitzberger, J. Paritsis, and T. T. Veblen. 2012. Ecological and climatic controls of modern wildfire activity patterns across southwestern South America. *Ecosphere* 3: 103. DOI: 10.1890/ES12-00234.1
- Jardel-Pelaéz, 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., J.E Morfín-Ríos, F. Castillo-Navarro y J.G Flores-Garnica. 2009. Regímenes de incendios en ecosistemas forestales de México. En: J.G. Flores-Garnica (Ed.). Impacto ambiental de incendios forestales. Mundi-Prensa/ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias/ Colegio de Postgraduados. México D.F. 73-100
- 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.
- Keane, R. E. 2015. Wildland fuel fundamentals and applications. Springer. New York, USA.
- 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.
- McKenzie D, Raymond CL, Kellogg L-KB, Norheim RA, Andreu A, Bayard AC, Kopper KE, Elman E (2007) Mapping fuels at multiple scales: landscape application of the Fuel Characteristic Classification System. Canadian Journal of Forest Research 37, 2421–2437. doi:10.1139/X07-056
- McKenzie, D., y M. C. Kennedy. 2011. Scaling laws and complexity in fire regimes. Chapter 2 in D. McKenzie, C. Miller, and D. A. Falk, editors. 2011. The landscape ecology of fire. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Moritz, M.A., M.A. Parisien, E. Batllori, M.A. Krawchuck, J. Van Dorn, D.J. Ganz and K. Hayhoe. 2012. Climate change and disruption to global fire activity. Ecosphere 3: 1-22
- Murphy, B.P., G.J. Williamson and D.M.J.S. Bowman. 2011. Fire regimes: moving from fuzzy concept to geographic entity. New Phytologist 192: 316-318
- 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.
- Pausas, J.G., y E. Ribeiro. 2013. The global fire-productivity relationship. Global Ecology and Biogeography 22: 728-736. DOI: 10.1111/geb.12043
- Pausas, J.G., Keeley, J.E. 2009. A burning story: the role of fire in the history of life. Bioscience 59, 593-601.
- Perry DA, Oren R, Hart SC. 2008. Forest Ecosystems (2nd edn). Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD.
- Pyne, S.J., Andrews, P.L., Laven, R.D. 1996. Introduction to wildland fire. J. Wiley and Sons, New York, NY.
- 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, S.L., D.M. Bowman, W.J. Bond, S.J. Pyne, y M.E. Alexander. 2014. Fire on Earth. An introduction. Wiley Blackwell. Chichester, Reino Unido
- 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



- Riccardi, C.L., R.D. Ottmar, D.V. Sanberg, A. Andreu, E. Elman, K. Kopper and J. Long.  
2007a. The fuelbed: a key element of the Fuel Characteristic Classification System.  
Canadian Journal of Forestry Research 37: 2394-2412.
- Riccardi C.L., S.J. Prichard, D.V. Sandberg A.G. Andreu, E. Elman, K. Kopper, J. Long.  
2007b. The Fuelbed: a key element of the Fuel Characteristic Classification System.  
Canadian Journal of Forest Resarch. 37(12): 2394-2412.
- Rothermel, R.C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildlands fuels.  
USDA For. Serv. Res. Pap. INT-115.