

El fuego tiene un papel relevante en la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas terrestres, pero cuando se propaga sin control en selvas, bosques o vegetación de zonas áridas o semiáridas, contribuye directamente en el incremento de bióxido de carbono en la atmósfera y en la deforestación, con sus consecuencias como la erosión de los suelos o el cambio en la estructura y composición de los bosques. Los incendios forestales son sumamente

copa o corona, poco frecuentes en México, en los cuales el fuego consume completamente a los árboles y se propaga tanto de copa en copa como superficialmente. Cabe señalar que la presencia de este tipo de incendio, peligroso y difícil de controlar, se incrementa bajo condiciones extremas de sequía como las experimentadas en 1998.

Desde la década de los años sesentas, los distintos enfoques de los estudios sobre los incendios foresta-

rollado modelos de simulación para entender el comportamiento del fuego y tratar de responder preguntas como ¿cuándo se producirá?, ¿dónde se producirá?, ¿cómo se desarrollará? La construcción de modelos para evaluar situaciones reales de vulnerabilidad y riesgo requiere considerar, además de los elementos necesarios para la combustión, la historia ambiental del lugar y el tipo de manejo al que están sometidos los bosques, por esto la componente so-

Incendios forestales

variables, sin embargo, se han distinguido tres tipos que implican diferentes grados de daño en los ecosistemas: los superficiales, donde el fuego consume los combustibles que se encuentran sobre el suelo como hierbas, zacates, leñas, hojarascas, sin quemar todo el cuerpo de los árboles; los subterráneos, el fuego quema el mantillo y raíces bajo la superficie del suelo o la materia orgánica acumulada en las fracturas de grandes afloramientos de roca —malpaís—; y por último, los incendios de

les en México básicamente contemplan tres aspectos: los efectos del fuego en los ecosistemas forestales, las actividades de prevención y combate divididas en las operativas y en el desarrollo de índices de comportamiento y riesgo de incendios, y el uso del fuego como herramienta silvícola y pastoril. Actualmente, el manejo del fuego, que comprende al menos los dos últimos aspectos, implica indagar sobre las interrelaciones entre los combustibles, el ambiente y el fuego. En este marco, se han desa-

cial resulta ser muy importante. En estos estudios, se analiza el régimen de incendios o las frecuencias de los siniestros, incluyendo la extensión dañada en eventos anteriores. Se incorporan todas las variables biofísicas que influyen en estos fenómenos —combustibles, meteorológicas y de relieve. También la vulnerabilidad socioambiental, áreas que sufrieron mayores cambios de cobertura y uso del suelo, sobre todo aquéllas donde se amplió el uso agrícola, se observó mayor perturbación en el bosque

por extracción de madera, se abrieron o ampliaron áreas para la inducción de pastos y en zonas con mayor presencia de caminos y brechas, a partir de lo cual emerge otro aspecto importante, la accesibilidad y manejo del recurso.

Algunas características de los incendios forestales hacen que sea especialmente difícil su prevención. Si podemos precisar los elementos que intervienen para que se genere un incendio, eventualmente podremos predecirlo y controlarlo con más fundamentos. En esta dirección, se han definido tres elementos necesarios para la combustión: el oxígeno, el combustible y el calor. Relacionado con éstos, existen otros tres elementos que permiten entender el probable comportamiento del fuego desde un punto de vista espacial: la topografía, la cantidad y calidad de combustible, y el tiempo atmosférico.

El combustible es toda biomasa que potencialmente puede arder al ser expuesta a una fuente de calor. Las propiedades químicas que se distinguen están relacionadas con su contenido de calor y con los elementos que emiten a la atmósfera con la combustión. En los incendios forestales estos componentes se atribuyen a la amplia diversidad de material vegetal inflamable que se encuentra en los ecosistemas. La adecuada caracterización de estos combustibles vegetales, de su distribución espacial y de su humedad, así como del tiempo atmosférico imperante en el momento de la combustión son factores críticos o fundamentales para evaluar y predecir un incendio forestal. Asimismo, estos elementos son importantes para modelar su comportamiento sobre el terreno, en cuanto al rango de in-

tensidad del fuego, la tasa de dispersión y la duración encontrada en un ecosistema particular.

Los combustibles forestales

Por su condición, los combustibles pueden dividirse en vivos y muertos. Los primeros son hierbas, arbustos y árboles, o plantas que se encuentran por debajo de su dosel; la velocidad de propagación del fuego sobre plantas vivas depende de su humedad, con lo que pueden retardarla. Los segundos son los troncos, las ramas y las hojas que normalmente se encuentran sobre el suelo, su cantidad y posición generalmente determina su inflamabilidad y qué tan fácil puede iniciarse y dispersarse el fuego.

La condición, el tamaño, la cantidad, el arreglo y el contenido de humedad de los combustibles, son componentes indispensables para saber como se queman. Entre los combustibles se incluye el mantillo, cuya presencia y función ecológica es muy importante —contribuye poco con la biomasa total del combustible pero puede consumirse rápidamente por el fuego en períodos secos—, y la hojarasca que generalmente es muy inflamable porque en períodos secos su humedad desciende rápidamente, muchos incendios superficiales comienzan por este combustible. Otros componentes del suelo son los diferentes tipos de leños, típicos combustibles lentos, que se clasifican por su grosor; por su parte, la inflamabilidad de los frutos —conos o bellotas— y de las semillas depende de sus contenidos de resinas.

El peso seco total, llamado biomasa de combustible por unidad de área o superficie, determina la cantidad de combustible. Cuanto mayor

sea la acumulación de combustible en una zona, mayor cantidad de calor podrá desprenderse y el incendio podrá ser más intenso. Así, los combustibles pueden ser caracterizarse por su carga; es decir, el peso de biomasa por unidad de superficie del terreno. En principio, se pensaría que los distintos tipos de vegetación presentan distintas cargas y tipos de combustibles. En general, la vegetación en zonas lluviosas, mucha vegetación herbácea, arbustiva y trepadoras, tiene más biomasa y, por lo tanto, mayor carga.

La acumulación de combustibles, y el posible incendio resultante, depende de la cantidad de material depositado. También influyen otras propiedades, como la compactación y la continuidad vertical y horizontal sobre el terreno de los materiales. Para ser usada como variable en la evaluación del comportamiento potencial del fuego, la cantidad de combustible debe expresarse por clases de tamaño de los componentes vivos y muertos.

La humedad de los combustibles

Los combustibles vivos absorben agua del suelo por sus raíces y la transpiran por unas cavidades llamadas estomas, para mantener sus células vivas y con un elevado contenido de humedad, que es la cantidad de agua generalmente expresada en el peso del combustible con respecto a su peso anhidro —seco. Cuando un combustible puede arder por su bajo contenido de humedad se dice que está disponible para la combustión. Los combustibles muertos tienen propiedad higroscópica, su contenido de humedad está determinado por la humedad del ambiente.



Esta propiedad es decisiva para la inflamabilidad. En el caso de los combustibles vivos el contenido de humedad varía durante el período vegetativo, el máximo que pueden alcanzar es hasta 300 % de su materia seca y el mínimo, 50 %. En los combustibles muertos, la variación está ligada a los cambios de humedad ambiental y a la rapidez con la que el combustible se equilibra con el ambiente, la cual depende directamente de la relación entre superficie y volumen de los materiales. Cuanto mayor sea la superficie en relación con el volumen de la partícula, más rápidamente será absorbido el calor y su temperatura se elevará. Así, los valores altos en la relación superficie-volumen tendrá un tamaño de combustible pequeño y mayor facilidad de arder que los valores bajos.

Los combustibles de diámetro pequeño, como hojarasca, hierbas secas, ramillas secas, etcétera, repre-

sentan una alta cantidad del combustible disponible. Por ello, también se les llama combustibles rápidos. Los de mayor diámetro conservan más tiempo la humedad y su contribución al combustible disponible es más retardada, son los combustibles lentos. En 1971, el estadounidense Fosberg clasificó el grosor de los materiales según el tiempo que tardan en alcanzar el equilibrio con la humedad ambiental, esta caracterización resultó ser muy provechosa para entender y modelar los incendios.

Con base en lo anterior, los científicos denominaron tiempo de retardo —*timelag*, en inglés— al lapso en que un combustible muerto tarda en perder —cuando el ambiente tiene menor contenido de humedad— o en ganar —cuando es mayor el del ambiente—, dos tercios de la diferencia entre su contenido inicial de humedad y el del ambiente. Conforme el combustible es más grande perderá

o ganará humedad más lentamente, tendrá un mayor tiempo de retardo.

Por el contrario, si el contenido de humedad es muy elevado no puede producirse la combustión, es lo que se denomina humedad de extinción, la que impide la combustión. En muchos combustibles muertos esta humedad varía entre 25 y 40%, mientras que en los vivos la variación puede ubicarse entre 120 y 160 %. Durante la época de sequía el último valor puede descender hasta 50 u 80 %.

Actualmente, el Sistema Nacional de Peligro de Incendios en los Estados Unidos (NFDRS por sus siglas en inglés) y otros sistemas de predicción de incendios, miden el contenido de humedad de los combustibles para evaluar el peligro, la intensidad y comportamiento de los incendios. Utilizan medidores de humedad de combustibles estandarizados que responden a los cambios del clima para combustibles



muertos de diez horas de tiempo de retardo. Estos medidores están compuestos de cuatro trozos de madera descortezada de *Pinus ponderosa*, con un peso estándar de 100 gramos y un diámetro de 1.2 centímetros y 50 centímetros de largo.

La lluvia, la humedad relativa y la temperatura tienen gran influencia sobre los combustibles finos menores de 0.6 centímetros —hojas y acículas—, su rango de humedad es de entre 10 y 20 %, cuando están por debajo del 6 o 7 % se queman, lo cual resulta dañino para las raíces de las plantas e incluso para el suelo. La velocidad de respuesta de los combustibles finos ante cambios de humedad depende de las características de la capa comprendida entre el mantillo y la hojarasca, incluyendo las ramillas que se encuentran sobre la superficie, es lo que los ingenieros forestales definen como la cama de combustibles, cuya profundidad está supeditada a su composición —si son acículas de pino u

hojas de latifoliadas— y al grado de compactación de las hojas. Así, diferentes tipos de combustibles pueden alcanzar distintos contenidos de humedad bajo las mismas condiciones ambientales.

El tamaño y el volumen de los combustibles se relacionan con el hecho de que puedan arder menos o más fácilmente, o con qué tan rápido podrá avanzar la llama o flama. Por otra parte, cuando los combustibles son continuos horizontalmente, el fuego se propaga mejor que cuando existen espacios sin vegetación.

En 1974 Brown y en 1979 McRea y otros, desarrollaron procedimientos muy concretos para hacer inventarios de combustibles sobre la superficie del suelo, tanto vivos como muertos. En estos documentos se describe como realizar el trabajo de campo y estimar la cantidad de material leñoso y la de *litter* u hojarasca sobre el suelo, o cómo evaluar la cantidad de vegetación herbácea, arbustiva y de árboles en pie. Diver-

sos métodos involucran el conteo y la medición de los diámetros de los leños sobre el piso a lo largo de transectos —recorrido lineal a través de un área para tomar datos en algunos de sus puntos— que parten del centro de dos círculos anidados. Allí, se inventarían árboles de distinto diámetro y se obtiene la cantidad de *litter* y de vegetación herbácea en cuadros tomando la altura y el diámetro basal de hierbas y arbustos.

Topografía

Las variaciones en la inclinación de la ladera, la orientación, la elevación y la configuración de la tierra o la microtopografía, pueden causar cambios dramáticos en la conducta del fuego y en su progreso sobre el terreno. La topografía es el parámetro más constante de los tres componentes que permiten entender el probable comportamiento del fuego, y tiene gran influencia sobre los otros dos, los combustibles y el tiempo atmosférico. Generalmente, modifica los patrones del tiempo atmosférico produciendo condiciones que cambian el contenido de humedad de los combustibles.

La orientación o cara de exposición de la ladera afecta la conducta del fuego por medio de las variaciones en la cantidad de radiación solar y viento que reciben. En general, las orientaciones sur y suroeste en el hemisferio norte son más favorables para que se inicie y se disperse un incendio, porque reciben más insolación y, por ende, hay menor contenido de humedad y altas temperaturas para los combustibles. La intensidad de la radiación solar es mayor cuando la ladera es perpendicular al ángulo de incidencia del Sol.

Según la época del año, la hora del día y la latitud, el combustible estará más seco. De igual forma, el enfriamiento en las noches, así como la presencia y velocidad de los vientos, pueden empujar el fuego ladera arriba o hacia abajo. Generalmente, esto incrementa la tasa de dispersión del fuego. Además, el relieve influye en el comportamiento inmediato del fuego; por ejemplo, los fondos de barrancos con mucha pendiente y las laderas muy próximas tienen las condiciones adecuadas para una rápida propagación.

Para realizar la simulación del comportamiento del fuego, la caracterización de los combustibles y la determinación de su distribución espacial son factores críticos. No obstante, la última representa uno de los retos más difíciles a los que se han enfrentado los científicos dedicados al estudio de los incendios forestales. Según señalaron en 1986 Brown y Bevins, la distribución espacial de los combustibles forestales sigue un patrón preferentemente discontinuo.

El tiempo atmosférico

El clima, a pesar de que tiene una gran influencia en la conducta del fuego, es incontrolable y difícil de predecir, lo contrario de los casos de los combustibles y la topografía. La temperatura y la dirección y velocidad del viento, son los que modulan el inicio y la propagación del incendio. La radiación solar y la temperatura y velocidad del aire, actúan coordinadamente en el proceso de evaluación de la humedad relativa, la cual decrece rápidamente con el incremento de la radiación solar; esto puede reducir el calor necesario

para la ignición y la combustión. Finalmente, la temperatura, la humedad relativa y consecuentemente la conducta del fuego puede cambiar rápidamente con el viento, cobertura de nubes y movimientos de masas de aire. Si se incrementa el viento, crece el aprovisionamiento de oxígeno y aumenta la combustión y la transferencia de calor hacia áreas y combustibles no quemados.

Mientras que el tiempo representa una medición en cierto momento de las variables atmosféricas, el clima es una relación estadística de aquél y, para cierto lapso de tiempo, toma los valores de las variables consideradas.

En gran medida, el éxito de una predicción del comportamiento del fuego depende de la habilidad y precisión con la que se determine el tiempo atmosférico. Los cambios y efectos del tiempo suelen ser tan abruptos que amerita el registro diario en horas precisas. Durante un año, los cambios en el clima determinan gran parte de la estación de incendio.

Los parámetros descritos, además de su importancia para estimar el comportamiento del fuego, permiten planificar las acciones preventivas y, en caso de incendio, organizar acciones eficaces para su extinción. Por ello, se han realizado diversos intentos para sintetizar y sistematizar la información precedente y relacionarla coherentemente por medio de modelos.

Los programas que evalúan el comportamiento de los incendios son recopilaciones de ecuaciones matemáticas derivadas de principios físicos básicos o de datos experimentales. La computadora se usa para resolver sistemas de ecuaciones que de otra forma, serían difíciles o

tediosas. Los programas más sencillos resuelven ecuaciones simples, mientras los que incluyen modelos más complejos están compuestos de centenares o miles de ecuaciones.

Suele distinguirse dos grupos de modelos, los deterministas y los estadísticos. Los primeros están basados en la interpretación física de la propagación del fuego y los mecanismos de expansión de un incendio forestal se representan con fórmulas matemáticas. Los estadísticos establecen correlaciones entre descriptores de los factores obtenidos en fuegos experimentales y en incendios naturales. Éstos, se emplean para la elaboración de mapas de riesgos de incendios.

Algunos países desarrollaron sus propios modelos, como los Estados Unidos, Australia y Canadá, basados en fuegos experimentales y en datos de incendios. Las grandes extensiones de matorral en Australia permiten realizar fuegos experimentales de gran extensión y, para ese continente, se han elaborado ecuaciones de predicción para diversos tipos de vegetación. La probabilidad de extinción de acuerdo con la velocidad del viento, la humedad del combustible y la biomasa solamente se ha determinado para algunos tipos de matorrales. Buena parte de estos programas pueden obtenerse gratuitamente en la página de la red <http://fire.org>.

En Europa se han aplicado estos modelos —estadounidense, canadiense y australiano— con éxitos y fracasos; también sus equipos de investigación construyeron sus propios modelos, como el FIREFOC y FEOT que son simuladores de desarrollo dentro del proyecto europeo MEFISA (Mediterranean Expert Fire Interactive Simulator Aid).

Manejo y prevención del fuego

El control y uso del fuego demanda múltiples prácticas de instituciones y personal especializado y capacitado en diferentes aspectos. Sin embargo, la causa común es hacer del incendio forestal un manejo del fuego, y que las instituciones compartan las tareas de organizar esas prácticas para que se transformen en programas de manejo del fuego.

Por supuesto, una de las estrategias para la prevención de incendios es detectarlos a tiempo. Existen distintos métodos para ello, desde el patrullaje sistemático y el reporte de civiles que cooperan de manera voluntaria, hasta la localización que

realizan los pilotos, sea de vuelos comerciales o del servicio militar. También se usa el reconocimiento de puntos de calor por medio de sensores remotos.

Sin embargo, con base en la información reseñada, lo que se propo-



ne es el manejo de los combustibles. Por ejemplo, a través de la reducción de los combustibles disponibles, programas que puede ser generales o específicos para ciertos sitios, también pueden regularse en el tiempo, es decir, ser periódicos o bien aleatorios. Es cierto que los programas de reducción de combustibles dependen de estudios que indiquen los mecanismos y períodos de su acumulación, así como si es producto de la actividad humana o natural. Pero en una época donde la vulnerabilidad y los riesgos asociados a estos fenómenos crecen continuamente, un adecuado manejo de los combustibles permitirá reducir, en buena medida, su peligrosidad.✿

María de Lourdes Villers Ruiz

Centro de Ciencias de la Atmósfera,
Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agee, J. K. 1993. *Fire ecology of pacific northwest forests*. Island Press, Washington.
- Biswell, H. 1999. *Prescribed burning in California Wildlands Vegetation Management*. University of California Press, Los Angeles California.

Brown, J. K. 2000. "Ecological principles, shifting fire regimes and management considerations", en *Wildland Fire in Ecosystems. Effects of fire on flora*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. RM.

McRae, D. J., M.E. Alexander y B. J. Stocks., 1979. *Measurement and description of fuels and fire behavior on prescribed burns: a handbook*. Report O-X-287, Canadian Forestry Service, Department of the Environment, Sault Ste. Marie, Ontario.

Porrero Rodríguez, M. A. 2001. *Incendios forestales. Investigación de causas*. Mundi Prensa, Madrid.

Pyne, S. J., P. L. Andrews y R. D. Laven. 1996. *Introduction to wildland fire*. John Wiley and Sons Inc.

Rodríguez Trejo, D. A. 1994. *La lucha contra el fuego. Guía para la prevención, presupresión y supresión de incendios forestales*. Universidad Autónoma Chapingo, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México.

Vélez Muñoz, R. (Coord) 2000. *La defensa contra los incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. Mc Graw Hill, España.

IMÁGENES

Leonor Solís. *Serie sepia*. 2005.

Palabras clave: Combustibles vegetales, incendios forestales, modelos de incendios.

Key words: Fuels, wildfire, wildfire models.

Resumen: Se describen los principales elementos que intervienen para que se genere un incendio forestal –combustibles, variables meteorológicas y de relieve– y se analizan los requisitos para integrarlos en modelos para evaluar situaciones reales de vulnerabilidad y riesgo de incendios forestales.

Abstract: We describe the main elements that produce wildfires –fuels, meteorological variables and topography– and we study the requirements in order to integrate them into the models so that we can examine the real levels of vulnerability and risks of wildfires.

María de Lourdes Villers Ruiz es investigadora del Departamento de Meteorología General del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, es bióloga de la Facultad de Ciencias, UNAM. Realizó estudios de Maestría en Biología en la misma Facultad y el Doctorado en Geografía y Ordenamiento: Opción Rural en la Universidad de Paris I en Francia, donde fue Becaria de CONACYT. Sus Proyectos de investigación se refieren a: incendios forestales, variabilidad y cambio climático, captura de carbono, uso y manejo de los ecosistemas forestales templados del país.

Recepción: 11 de mayo de 2005.