

NÚMERO 358

JUAN M. TORRES ROJO, OCTAVIO S. MAGAÑA TORRES Y G. ALFREDO
RAMÍREZ FUENTES

Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo

MARZO 2006



www.cide.edu

• Las colecciones de **Documentos de Trabajo** del CIDE representan un medio para difundir los avances de la labor de investigación, y para permitir que los autores reciban comentarios antes de su publicación definitiva. Se agradecerá que los comentarios se hagan llegar directamente al (los) autor(es).

• D.R. © 2006. Centro de Investigación y Docencia Económicas, carretera México-Toluca 3655 (km. 16.5), Lomas de Santa Fe, 01210, México, D.F.
Tel. 5727•9800 exts. 2202, 2203, 2417
Fax: 5727•9885 y 5292•1304.
Correo electrónico: publicaciones@cide.edu
www.cide.edu

• Producción a cargo del (los) autor(es), por lo que tanto el contenido así como el estilo y la redacción son su responsabilidad.

.....
Agradecimientos.

Se agradece a UCMEXUS por el apoyo brindado para que el primer autor pudiera realizar su año sabático en la Universidad de California en Berkeley, donde se recopiló la mayor parte de bibliografía.

Resumen

El documento describe un índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. El índice se basa en el principio de que los incendios forestales siguen un comportamiento crítico auto-organizado. Este comportamiento implica que bajo una amplia variedad de circunstancias, los incendios forestales mantienen una relación exponencial sobre varias órdenes de magnitud entre la frecuencia de ocurrencia con el área quemada. El documento describe el principio de un comportamiento crítico auto-organizado de los incendios forestales. Posteriormente, con base en los registros de superficie y número de incendios forestales por entidad federativa en el periodo 1970-2005, se comprueba empíricamente que el número total de incendios forestales ocurridos cada año en cada entidad federativa que afectan una área total determinada, guarda una relación exponencial con la área quemada. Este comportamiento se usa para definir un índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. Los resultados muestran que los incendios ocurridos en cada entidad federativa exhiben distribuciones de frecuencia-tamaño que se aproximan a una distribución de potencia. Finalmente, se estiman índices de peligro para cada estado y se proporciona adicionalmente una medida de peligro en términos relativos. Se describen algunas aplicaciones de los índices de peligro derivados.

Palabras clave: Índice de peligro, comportamiento crítico auto-organizado, fractales, distribución frecuencia-tamaño.

Abstract

A long term forest fire danger index is described. Such an index is based on the principle that forest fires follow a self organized critical behavior. This behavior implies that under a wide variety of circumstances, forest fires exhibit a power-law dependence of occurrence frequency on burn area over many orders of magnitude. The paper describes the principle of a self organized critical behavior of forest fires. Then after, based on the records of burned area and number of forest fires occurred every year in each state in Mexico within the period 1970-2005 an empirical proof that the total number of forest fires occurred every year in every state covering a defined area maintain a power law relationship with the burned area is performed. This behavior is used to define a long term forest fire danger index. Results show that forest fires in each state indeed follow a frequency-size

distribution that exhibit a power-law dependence. Finally, the danger indexes are estimated for each state providing additionally a measure of fire danger in relative terms. Some uses of the fire danger index in public administration are described.

Key words: Danger Index, self organized critical behavior, fractals, frequency-size distributions.

Introducción

Después del cambio de uso del suelo los incendios forestales representan la segunda causa más importante de pérdida de superficie forestal en México. Las estadísticas gubernamentales registran en promedio 6,774 eventos por año (periodo 1970-2005), mismos que en aproximadamente 60% de los casos suceden en áreas con cobertura arbórea. La pérdida de vegetación forestal ocasionada por incendios origina varias distorsiones tanto a nivel local como global. Dentro de estas distorsiones se encuentran el incremento de la erosión, lo que a su vez agrava los problemas de inundaciones y contribuye al azolve prematuro de reservas de agua. También se pueden señalar el aumento de la sedimentación (Benavides y MacDonald, 2005) y la reducción de la productividad de algunos terrenos destinados a la producción primaria (Mills y Meldad 1987), así como problemas de salud y pérdida de activos en las localidades aledañas (Fried *et al.*, 1999; Frankenberg *et al.*, 2004), solo por señalar algunas de ellas. No puede omitirse que estos problemas van acompañados de la pérdida de la mayoría de bienes y servicios derivados del bosque tales como calidad de agua, habitats de fauna, las propias flora y fauna silvestres, productos no maderables, y obviamente todo el conjunto de servicios ambientales (González, 1993).

Dado que las pérdidas originadas por los incendios forestales se ven reflejadas no sólo en la pérdida de capital natural sino también en la pérdida de activos y vidas humanas (Fried *et al.*, 1999) los gobiernos gastan un presupuesto elevado en labores de prevención y combate de incendios. En México el gobierno federal ha gastado en los últimos 4 años un promedio anual de 300 Millones de pesos (base 2005) en labores de prevención y combate de incendios forestales. En Estados Unidos de Norteamérica el Servicio Forestal gasta anualmente más de 5.5 mil millones de dólares en actividades de extinción de incendios para proteger los Bosques Nacionales y otras tierras adyacentes públicas y privadas (Bell *et al.*, 1995; Truesdale, 1995) y hay una serie de iniciativas privadas para realizar aún más inversiones en la prevención de estos siniestros (Fried *et al.*, 1999, Winter y Fried, 2001). De aquí que la definición de un índice de riesgo o peligro de incendio es vital para identificar prioridades y estrategias de prevención y combate de estos siniestros.

La predicción de la ocurrencia de incendios ha sido una meta importante de investigación en los últimos años. Como resultado se han derivado varios métodos de predicción de su ocurrencia cuyo propósito final es la definición de índices de riesgo o peligro de incendio —varios ejemplos se encuentran en Turner *et al.*, (1961) y McArthur (1977)—. Estos métodos usan variables meteorológicas como velocidad del viento, precipitación, temperatura, humedad o combinaciones de éstas, mezcladas con modelos de disponibilidad

de combustibles (composición y nivel de humedad) y ocasionalmente algunas variables de comportamiento histórico para estimar la ocurrencia de un evento. Las evaluaciones del desempeño de estos índices muestran por un lado sus deficiencias cuando se tratan de adaptar a condiciones meteorológicas diferentes y por otro lado la necesidad de integrar variables socioeconómicas e institucionales en su diseño, variables sumamente importantes en la determinación del peligro de incendios (Viegas *et al.*, 1999; Andrews *et al.*, 2003).

Existe una amplia diversidad de índices de riesgo o peligro de incendio, los cuales en muchas ocasiones no son incluso comparables y frecuentemente consideran conceptos variados y confusos. Tal variación pone de manifiesto la variedad de objetivos que influyen en el diseño de los distintos índices existentes. Las aplicaciones reportadas son muchas y variadas. Blanchi *et al.* (2002) tan solo estimaron 50 diferentes aplicaciones a nivel mundial sin contar la integración de estas herramientas a sistemas expertos o sistemas de apoyo a la toma de decisiones (Bonazountas *et al.*, 2005) usados por operadores. En años recientes estos índices se han modificado para emplear imágenes de satélite y ofrecer estimaciones en tiempo real creando lo que se conoce como "Índices de potencial de incendio" (Burgan *et al.*, 1998; Sebastián-López *et al.* 2000).

Los índices de riesgo se pueden clasificar de varias formas. Sin duda la más simple se basa en el tipo de información usada y la clase de predicción que realiza. Esta clasificación considera dos tipos; los índices de corto plazo y largo plazo. Los primeros hacen estimaciones diarias del riesgo de incendios para propósitos tácticos y operativos, mientras que los segundos evalúan riesgos a varias escalas para fines estratégicos.

Los índices de peligro de incendio de largo plazo son indicadores de condiciones estables que favorecen la ocurrencia de un incendio. En la práctica este tipo de índices se usa para determinar áreas con alto riesgo de incendio causado por las condiciones intrínsecas de la zona. Regularmente este tipo de índices se usan para determinar áreas donde se debería reforzar la prevención y combate de incendios por medio de inversión en infraestructura o prioridad en la asignación de presupuesto para prevención. Existen varias estrategias para generar este tipo de índices. Un primer enfoque consiste en seleccionar variables relacionadas con la ocurrencia de incendios a través de la revisión de datos históricos, ocasionalmente integrando información espacial con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica o SIG (*e.g.* Chuvieco y Congalton 1989, Jain *et al.* 1996). Para integrar estas variables usualmente se recurre a la opinión de expertos, mismos a los que se les pide clasificar estas variables en grupos y asignar a cada variable un peso de acuerdo a su potencial contribución al riesgo de incendio del área estudiada. Esta metodología frecuentemente se acompaña con técnicas de decisión multicriterio (*e.g.* Alcazar *et al.*, 1998) para tratar

de remover parte de la subjetividad en la selección e integración de variables. Una segunda estrategia para el cálculo de índices de largo plazo involucra el uso de métodos estadísticos y de programación matemática que van desde regresión múltiple con modelos lineales (Castro y Chuvieco 1998), modelos probabilísticos (Loftsgaarden y Andrews 1992, Chou 1992, Vega-García *et al.* 1995) hasta redes neuronales (Vega-García *et al.* 1996, Chuvieco *et al.* 1999). Ocasionalmente esta estrategia se acompaña de información socioeconómica, fundamentalmente de mecanismos de toma de decisiones para producir índices útiles en el manejo de incendios locales (*e.g.* Tabara *et al.*, 2003).

El presente documento introduce un índice de riesgo o peligro de incendio de largo plazo. El índice se basa en el descubrimiento de Bak *et al.* (1990) y después ampliado por Clar *et al.*, (1996) de que los incendios forestales siguen un comportamiento crítico auto-organizado. Este comportamiento implica que bajo una amplia variedad de circunstancias, los incendios forestales mantienen una relación exponencial con el área quemada sobre varias órdenes de magnitud. Este artículo utiliza dicha relación para derivar un indicador de riesgo que emplea información de largo plazo e identifica regiones con alta peligrosidad de incendio. La aplicación del índice es estratégica, dado que permite identificar las áreas que requieren un mayor apoyo en las labores de prevención y combate de incendios forestales.

El documento se ha dividido de la siguiente manera: la primera sección muestra brevemente el principio del comportamiento crítico auto organizado para incendios forestales y deriva el índice de riesgo propuesto; la segunda sección muestra la aplicación del índice para la serie histórica de datos de incendios forestales (1970-2005) de todo México y por entidad federativa con una estimación de índices de riesgo a nivel nacional; finalmente la última sección presenta algunos resultados relevantes.

Metodología. Bases teóricas sobre el comportamiento crítico auto organizado

En varias disciplinas incluyendo la física, biología y economía, se reconoce que las distribuciones de frecuencia-tamaño representan poderosas herramientas para caracterizar procesos complejos. En años recientes, se ha reconocido que las distribuciones frecuencia-tamaño de fenómenos naturales complejos como terremotos, avalanchas e incendios forestales también siguen un comportamiento simple y muy bien definido. En algunos casos el resultado es una distribución normal, mientras que en otros es una distribución fractal (Clar *et al.*, 1996).

Para probar este comportamiento, Bak *et al.*, (1990) propusieron un modelo de simulación de incendios. El modelo consiste de una cuadrícula de sitios. En cada intervalo de tiempo se intenta establecer un árbol en un sitio (cuadro) seleccionado de manera aleatoria. Si el sitio está desocupado, el

árbol se establece. De igual forma dentro de la simulación se define una frecuencia de ignición, f_s que no es más que el inverso del número de intentos por establecer un árbol en la cuadrícula antes de que un “cerillo” (inicio de incendio) se inicie en un sitio aleatoriamente seleccionado. Si $f_s = 1/100$ se considera que han habido 99 intentos por establecer (plantar) un árbol (algunos exitosos otros no) antes de que el cerillo sea lanzado en la cuadrícula en el centésimo intento. Si el cerillo se lanza en un sitio (cuadro) sin árbol no pasa nada, sin embargo, si el cerillo es lanzado en un sitio con árbol, el incendio se inicia consumiendo todos los árboles adyacentes (no diagonalmente). Varios autores han hecho modificaciones a este modelo básico (Christensen *et al.*, 1993; Drossel y Schwabl, 1993; Henley, 1993; Johansen, 1994; Clar *et al.*, 1996), sin embargo, los resultados muestran que el comportamiento general de los incendios es el mismo y similar a lo que se conoce con comportamiento crítico auto organizado.

En simulaciones con intervalos de tiempo largos, el número de incendios es aproximadamente igual al número de árboles plantados, sin embargo, el número de árboles en la cuadrícula es variable. Por otro lado, la distribución de frecuencia-área del incendio resulta ser una medida estadística del comportamiento del sistema, mismo que se considera de comportamiento crítico auto organizado debido a que continuamente se plantan árboles y se mantiene un estado estable. Una medida del estado del sistema es la fracción de sitios ocupados por árboles. Esta fracción fluctúa alrededor de un valor en equilibrio (Malamud *et al.*, 1998).

Dado un tamaño de cuadrícula de N_q cuadros y una frecuencia de ignición f_s se puede correr una simulación por N_s intervalos de tiempo. Durante este periodo se puede registrar el número de incendios N_F de área A_F donde este último valor corresponde al número de árboles que se queman en un incendio. Simulaciones con diferentes parámetros y periodos han mostrado que el número de incendios de área A_F (*i.e.* N_F/N_s) por intervalo de tiempo, es una función de A_F de la forma:

$$\frac{N_F}{N_s} \sim A^{-\beta} \quad (1)$$

Donde β varía entre 1.0 y 1.2. Malamud *et al.*, (1998) y posteriormente Malamud y Turcotte (1999) probaron este comportamiento para series históricas de incendios en Alaska, el Oeste de Estados Unidos y Australia. Ellos encontraron que el parámetro β varía entre 1.3 y 1.5, lo que significa que los incendios más pequeños son los que mayormente contribuyen al área total quemada por todos los incendios. La diferencia entre el modelo teórico y el

resultado empírico fue atribuida a particularidades del modelo teórico, sin embargo se considera que hay una concordancia razonable entre ambos modelos. Esta relación tan estrecha entre ambos modelos y el hecho de que las series históricas se ajustan a la tendencia es más sorprendente si se considera que el inicio y propagación de incendios no sólo depende de las condiciones físicas del terreno sino que entran en juego diferentes condiciones sociales y económicas, así como intentos de prevención y control de estos siniestros, mismos que también varían con el paso del tiempo. Lo anterior muestra que el comportamiento es insensible al tiempo y a las condiciones en que se presenta el siniestro, en otras palabras el comportamiento es robusto, característico de un comportamiento crítico auto-organizado (Malamud y Turcotte, 1999).

Índice de peligrosidad de incendio de largo plazo

La relación en (1) corresponde a una línea recta en espacio logarítmico, misma que para una unidad geográfica en particular se puede expresar como:

$$\log(N_{A_F}) = \alpha - \beta \log(A_F) \quad (2)$$

Donde N_{A_F} es el número de incendios de área A_F en la unidad geográfica de estudio, mientras que α y β son parámetros del modelo. Observe que los resultados del comportamiento crítico auto-organizado de los incendios forestales muestran que diferentes áreas geográficas tendrán diferentes valores de α , pero que el parámetro β converge en un valor entre 1.3 y 1.5. Valores de α mayores estarán asociados con áreas geográficas de mayor peligrosidad de incendios, de aquí que la variación en α puede usarse para derivar un índice de peligrosidad de incendios.

Para derivar este índice se asume que es posible definir una línea de referencia (distribución de referencia) de la forma:

$$\log(NR_{A_F}) = \alpha' - \beta \log(AR_F) \quad (3)$$

Donde NR_{A_F} es el número relativo de incendios con un área afectada de referencia, AR_F , con una pendiente, β , similar a las demás áreas geográficas y un intercepto, α' , diferente. Dado que α en (2) es variable de unidad geográfica a unidad geográfica se sustituye en (3), con lo que se obtiene el siguiente número relativo de incendios de un área de referencia específica, NR_{A_F} , para la unidad geográfica estudiada:

$$NR_{A_F} = N_{A_F} \left(\frac{AR_F}{A_F} \right)^{-\beta} \quad (4)$$

Este número relativo de incendios forestales con un área afectada, AR_F , es comparable entre unidades geográficas si AR_F es un valor constante, por lo que puede servir como indicador de la frecuencia de incendios en una unidad geográfica. El valor de NR_{A_F} puede normalizarse entre 0-1 para una región en particular y considerando los diferentes valores derivados de las distintas unidades geográficas que integran la región bajo estudio.

Aplicación para México

Con base en la serie histórica de incendios forestales en México durante el periodo 1970-2005 se realizaron dos estimaciones. La primera se usó para verificar el comportamiento crítico auto organizado de la ocurrencia de incendios forestales en México. Con esta estimación se pudo comprobar que el área total incendiada cada año por entidad federativa sigue un comportamiento crítico auto organizado. La segunda estimación consistió en calcular los índices de peligrosidad de incendios forestales por entidad federativa.

La verificación del comportamiento crítico auto organizado de los incendios forestales en México se realizó a nivel país. Para ello se considero que el país es la región de análisis y que cada unidad geográfica de esta región estaría representada por las entidades federativas. Lo anterior obligó a asumir que el área afectada por incendio está compuesta por la superficie total afectada por incendios forestales reportada en un año para cada entidad federativa. Los datos se obtuvieron de los reportes anuales de la institución gubernamental encargada de la prevención y combate de incendios forestales.¹

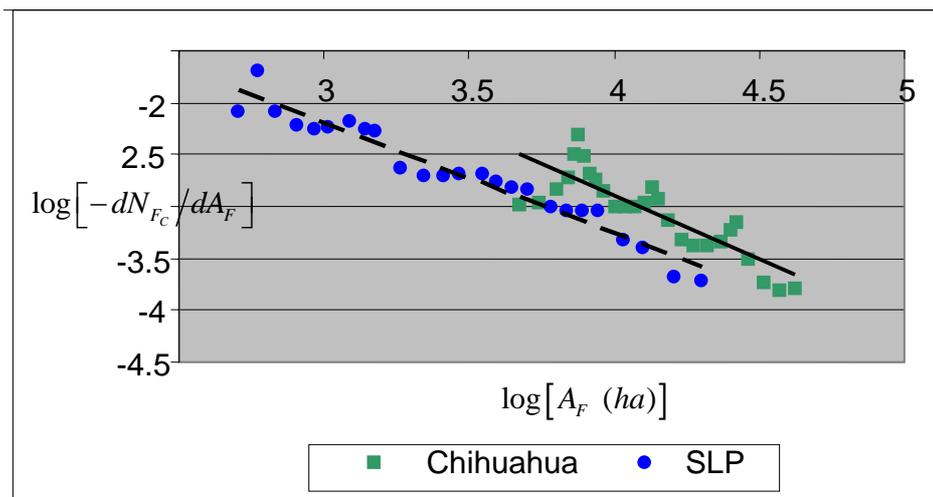
A fin de estimar la distribución fractal de incendios de tamaño A_F y comparar el resultado empírico con el resultado teórico definido en (1), se siguió el procedimiento recomendado por Malamud *et al.*, (1998). Este consiste en definir una función no acumulada del número de incendios forestales de área A_F a partir de una función acumulada. Posteriormente, la

¹ En 1970 la institución encargada era la Subsecretaría Forestal dentro de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Posteriormente en 1993 la tarea corrió a cargo de la Dirección Forestal dentro de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Finalmente en el año 2001 la tarea fue transferida a la Comisión Nacional Forestal.

estimación de la distribución no acumulada se hizo función de las áreas A_F para lograr la relación en (1).

Partiendo de los reportes anuales de área total incendiada por entidad federativa, el procedimiento se inició al definir una distribución acumulada, donde N_{F_c} es el número de incendios forestales con áreas mayores a A_F en cada entidad. La distribución no acumulada se define como el negativo de la derivada (*i.e.* pendiente) de la distribución acumulada con respecto al área A_F . Este valor es negativo debido a que la distribución acumulada se suma del valor más grande al valor más pequeño. La derivada dN_{F_c}/dA_F es la pendiente de mejor ajuste para un número especificado de puntos adyacentes de la distribución acumulada y en esencia es la estimación del número de incendios forestales de área A_F (N_{A_F}). Malamud *et al.* (1998), recomiendan ajustar cinco puntos adyacentes de la distribución acumulada a través del método de cuadrados mínimos ordinarios en un espacio lineal. El negativo de la pendiente $-dN_{F_c}/dA_F$ se grafica como una función del promedio de los cinco valores adyacentes de A_F . Finalmente, estas duplas de valores se vuelven a ajustar por el procedimiento de cuadrados mínimos ordinarios usando el modelo en (2). La Figura 1 muestra una distribución de valores de $-dN_{F_c}/dA_F$ y A_F para dos entidades federativas. En ella se puede apreciar la clara tendencia lineal y sobre todo, la similitud de la pendiente de ambas tendencias.

FIGURA 1. TENDENCIA DE VALORES DE $-dN_{F_c}/dA_F$ Y A_F



Para la estimación del número relativo de incendios forestales con un área afectada AR_F (NR_{A_F}) se inició por definir el área de referencia. Dado que el objetivo principal del AR_F es comparar las unidades geográficas entre sí, se consideró que el mejor estimador sería el promedio de área afectada (total anual) en todas las entidades del país en el periodo 1970-2005. Posteriormente, se procedió a estimar el valor de β que se usaría como referencia para comparar a todas las entidades federativas. Para ello se procedió a usar toda la base de datos y realizar la estimación de la función no acumulada a nivel nacional siguiendo la metodología arriba señalada.

Resultados

Las distribuciones fractales mostraron un ajuste relativamente bueno para cada entidad y en la mayoría de los casos el estimador de β resultó estar muy cercano al valor teórico (1.0 - 1.2). En todos los casos sin excepción el ajuste proporcionó estimadores de α y β altamente significativos con aceptable bondad de ajuste para cada entidad federativa. El Cuadro 1 muestra los estimadores de α y β , así como el estimador de bondad de ajuste (R cuadrada) para cada entidad federativa.

Los casos de estimadores de β relativamente bajos (menores a 1.0) están asociados a entidades que presentan varios registros con años sin incendios o bien con incendios muy pequeños. Por el contrario, los estimadores altos de β están asociados a entidades con registros de grandes superficies afectadas por este tipo de siniestros. En ambos casos esos valores atípicos dan por resultado un apalancamiento de la tendencia general.

CUADRO 1. AJUSTES DE LA DISTRIBUCIÓN NO ACUMULADA DE NÚMERO DE INCENDIOS FORESTALES DE TAMAÑO A_F PARA CADA ENTIDAD FEDERATIVA E ÍNDICES DE PELIGROSIDAD.

Entidad federativa	Pendiente (β)	Intercepto (α)	R cuadrada	NR_{A_F}	Peligrosidad Relativa (%)
Aguascalientes	-1.004	0.914	0.664	0.00060	21
Baja California	-0.966	0.812	0.732	0.00138	47
Baja California Sur	-1.004	0.914	0.664	0.00039	13
Campeche	-0.889	0.370	0.743	0.00052	18
Coahuila	-1.238	1.826	0.849	0.00121	42
Colima	-1.134	1.325	0.845	0.00070	24
Chiapas	-1.467	3.066	0.713	0.00209	72
Chihuahua	-1.223	1.989	0.719	0.00204	70
Distrito Federal	-1.329	2.508	0.160	0.00258	89
Durango	-1.168	1.815	0.664	0.00237	81
Guanajuato	-1.056	1.094	0.646	0.00076	26
Guerrero	-1.193	1.845	0.617	0.00183	63
Hidalgo	-1.203	1.597	0.658	0.00083	28
Jalisco	-1.368	2.755	0.476	0.00291	100
México	-1.140	1.748	0.521	0.00243	83
Michoacán	-1.681	3.904	0.543	0.00240	83
Morelos	-1.066	1.386	0.395	0.00138	47
Nayarit	-1.356	2.414	0.808	0.00161	55
Nuevo León	-1.158	1.257	0.909	0.00060	20
Oaxaca	-1.355	2.390	0.780	0.00143	49
Puebla	-1.305	2.212	0.437	0.00157	54
Querétaro	-1.261	1.491	0.935	0.00042	14
Quintana Roo	-1.210	1.377	0.905	0.00054	19
San Luis Potosí	-1.064	0.998	0.947	0.00074	26
Sinaloa	-1.173	1.661	0.549	0.00129	44
Sonora	-1.122	1.462	0.435	0.00143	49
Tabasco	-1.118	1.034	0.744	0.00043	15
Tamaulipas	-1.062	1.083	0.833	0.00092	32
Tlaxcala	-1.269	1.903	0.723	0.00102	35
Veracruz	-1.311	1.928	0.786	0.00080	27
Yucatán	-1.218	1.375	0.911	0.00044	15
Zacatecas	-1.125	1.341	0.855	0.00100	35
Promedio	-1.195	1.681	0.693	0.00127	44
Máximo	-0.889	3.904	0.947	0.00291	100

Mínimo	-1.681	0.370	0.160	0.00039	13
--------	--------	-------	-------	---------	----

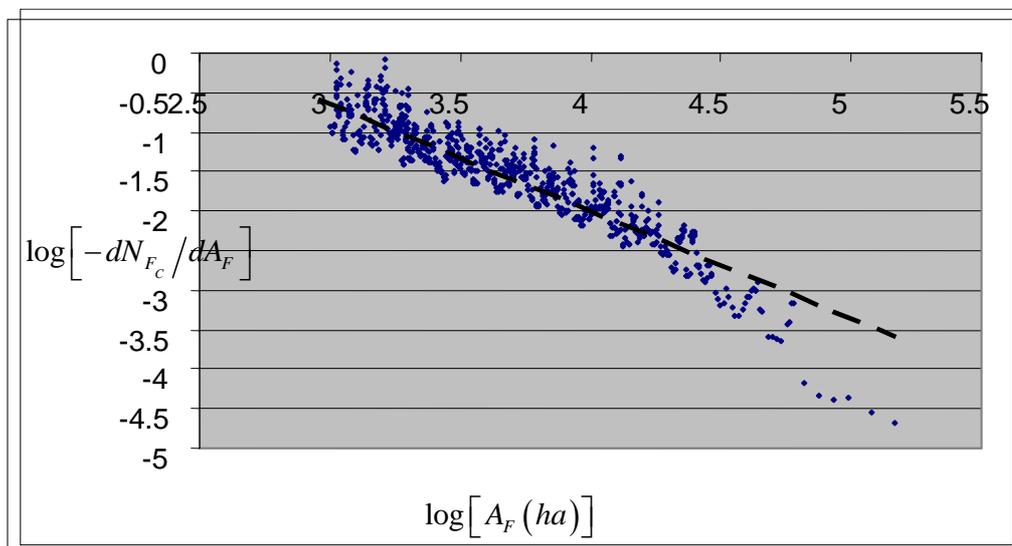
Los ajustes muestran entidades con estimadores altos de α , mismos que están ligados a aquellos estados que tradicionalmente han sido señalados como de alto riesgo de ocurrencia de incendios forestales, tales como Chiapas, Distrito Federal, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Oaxaca y Puebla. Cabe señalar que la alta peligrosidad en estas entidades está relacionada no solamente a las condiciones del medio físico que son apropiadas para la ocurrencia de estos siniestros, sino también a la fuerte incidencia del factor humano que es sin duda el principal causante de los incendios en estas entidades. Lo anterior pone de manifiesto una de las ventajas de los índices de largo plazo, ya que consideran no solo los factores ambientales sino también los económico-sociales, culturales y de manejo del recurso.

Estos resultados también muestran que entidades con extensa superficie arbolada y tradicionalmente fuerte actividad forestal maderable como es el caso de Chihuahua y Durango muestran estimadores de α dentro de un rango promedio. En estas entidades una combinación de factores como la menor presión demográfica y la mayor actividad forestal maderable dan por resultado una menor peligrosidad en la incidencia de estos siniestros a pesar de ser regiones con temperaturas extremas y condiciones ambientales propicias para su presencia.

Para la estimación del índice de riesgo a través del número relativo de incendios forestales con un área afectada AR_F (NR_{A_F}) se calculó el promedio de áreas afectadas (total anual) en todas las entidades del país durante el periodo 1970-2005. El promedio es de 6,765 ha y el valor de área afectada de referencia se aproximó a $AR_F=7,000$ ha. Por su parte la estimación de la pendiente, β , de referencia se realizó incluyendo los datos de todas las entidades federativas en el periodo 1970-2005. La Figura 2 muestra la tendencia de las combinaciones de $-dN_{F_c}/dA_F$ y A_F para todas las entidades federativas graficadas en escala logarítmica.

FIGURA 2. TENDENCIA DE VALORES DE $-dN_{F_c}/dA_F$ Y A_F PARA TODO EL PAÍS EN EL PERIODO

1970-2005



Incidentalmente, la tendencia es muy similar a las reportadas por Malamud *et al.* (1998) para series de datos con una aceptable cantidad de registros. Resulta particularmente interesante que en estas distribuciones se aprecia una amplia variación en incendios de tamaño pequeño y muy pocos datos para incendios de superficies mayores. Los estimadores obtenidos por cuadrados mínimos, así como los indicadores de bondad de ajuste se muestran en el Cuadro 2. En estos resultados resalta la alta significancia estadística de los estimadores y la calidad del ajuste, aunque esto último es difícil de comparar dado que los trabajos previos no muestran los indicadores de bondad de ajuste. Finalmente, es importante señalar que el estimador de β toma un valor muy aproximado al intervalo reportado (1.3-1.5).

CUADRO 2. AJUSTE DE $-dN_{F_c}/dA_F$ VS A_F PARA TODO EL PAÍS EN EL PERIODO 1970-2005

Parámetro	Estimador	Error Est	Estadístico-t	Prob.
α	3.366642	0.072200	46.62928	0.0000
β	-1.291237	0.019456	-66.36705	0.0000
R-cuadrada	0.846452	Media Var. Dependiente		-1.386397
R- cuadrada ajustada	0.846260	Desv. Est. Dependiente	Est. Var.	0.660789
Sum. Cuad. Regresión	0.259094	Estadístico F		4404.585
Sum. Cuad. Residuales	53.63646	Prob(Estadístico-F)		0.000000

Con base en este ajuste y el valor de β obtenido se estimó tanto el número relativo de incendios forestales de área igual a 7,000 ha, como el índice de riesgo normalizado. Ambos se muestran en el Cuadro 1.

El número relativo de incendios forestales de área igual a 7,000 ha (NR_{A_F}) se obtuvo sustituyendo el tamaño promedio de los incendios (*i.e.* el promedio de superficie anual siniestrada por estado) en la ecuación (2), con lo que se obtuvo un estimador de N_{A_F} . Finalmente, estos valores se sustituyeron en (4) para calcular NR_{A_F} . Observe que este indicador brinda una comparación diferente entre unidades geográficas a la obtenida únicamente con el intercepto α . Esto es debido a que en la estimación de N_{A_F} se incluye la posible variación derivada de una diferencia en las pendientes de cada unidad geográfica. Así por ejemplo, entidades como Morelos y Yucatán con valores de α muy similares, presentan valores de NR_{A_F} con una mayor diferencia. Observe cómo a pesar de tener incendios de aproximadamente el mismo orden de magnitud (α similar), distingue la mayor probabilidad que tiene Morelos de acumular una superficie siniestrada más grande en un año.

Para estimar el indicador de peligrosidad relativa se realizó una normalización que consistió en determinar el valor de NR_{A_F} más alto y obtener la proporción relativa para cada entidad. Este indicador es de más fácil lectura ya que en una escala 0-1 muestra aquellas unidades geográficas con mayor peligro de tener una superficie siniestrada igual o mayor al promedio nacional. El índice tiene una excelente aplicación en la distribución del gasto para la prevención y combate de incendios ya que muestra por unidad de superficie qué tan riesgosa es una entidad con respecto a la que se usa como referencia (en el ejemplo es Jalisco). De esta forma, y asumiendo una relación directa entre gasto (en prevención y combate) y riesgo de incendio, por cada peso que se gasta en prevención y combate de incendios y por unidad de superficie en Jalisco, se debe gastar 70 centavos en Chihuahua o 15 centavos en Yucatán. De aquí que conociendo la superficie arbolada que se desea proteger en cada unidad geográfica resulta mucho más fácil asignar presupuesto.

Conclusiones

El estudio ha mostrado que el área total incendiada por año en cada entidad federativa sigue un comportamiento crítico auto organizado. Esto permite identificar un patrón de la superficie afectada por año en cada entidad federativa, en el cual la distribución frecuencia-tamaño se aproxima a una distribución de potencia con coeficientes entre 0.8-1.6, valores razonablemente cercanos a los reportados en la bibliografía. Por su parte, el coeficiente de la distribución de potencia a nivel nacional resultó muy aproximado al valor esperado (1.3). Estos resultados comprueban que a pesar de que existen muchos factores sociales, económicos, ambientales, de concentración de combustible, características de los bosques y clima que inciden en la iniciación y propagación de incendios forestales, es remarcable que las distribuciones frecuencia-área sean tan similares.

Por su parte el indicador derivado de estas distribuciones permite identificar el riesgo de largo plazo de diferentes áreas geográficas. Este indicador es perfectamente comparable, está definido en un intervalo 0-1 y puede referirse a una unidad de superficie forestal. Lo anterior lo convierte en un indicador útil para asignar presupuesto, priorizar actividades de prevención y control o definir el beneficio-costos de las acciones de control de incendios.

Bibliografía

Alcázar J., V-García C, Grauet, Peman J, Fernandez A. (1998), "Human risk and fire danger estimation through multicriteria analysis evaluation methods for forest fire prevention in Barcelona", Spain, en *Forest Fires: Ecology and Control "III International Conference on Forest Fire Research"*, Luso, 16-29 November 1998, (Eds X. Viegas), University of Coimbra: ADAI, pp. 2379-2387.

Andrews, P.L, D. O. Loftsgaarden and L.S. Bradshaw, (2003), "Evaluation of fire danger rating indexes using logistic regression and percentile analysis", *International Journal of Wildland Fire*, 12(2):213 - 226

Bak, P., Chen, K., and Tang, C. (1990), *A forest-fire model and some thoughts on turbulence*, Phys. Lett. A 147, 297-300.

Bell, E.F., D. A. Cleaves, Harry Croft, S. Husari, E. Schuster and D. Truesdales, (1995), *Fire economics assessment report*. Albany, CA. Pacific Southwest Res. Stn. USDA For. Serv. 67 p.

Benavides S., J.D. and L.H. MacDonald, (2005), "Measurement and prediction of post-fire erosion at the hillslope scale", Colorado Front Range. *International Journal of Wildland Fire*, 14(4): 457-474.

Blanchi R., Jappiot M., Alexandrian D. (2002), *Forest fire risk assessment and cartography - A methodological approach*. 4th International Conference on Forest Fire Research - 16-20 November 2002, Coimbra, Portugal.

Bonazountas, M., D Kallidromitou, P.A. Kassomenos, and N. Passas, (2005), *Forest Fire Risk Analysis. Human and Ecological Risk Assessment*, 11: 617-626, 2005.

Burgan RE, Klaver RW, Klaver JM (1998), "Fuel models and fire potential from satellite and surface observation", *International Journal of Wildland Fire*. 8: 159-170.

Castro R, Chuvieco E. (1998), "Modeling forest danger from GIS", *Geocarto International*, 13:15- 23.

Chou Y.H. (1992), "Management of wild fires with a geographical information system", *International Journal of Geographic Information Systems*, 6:123-140.

Christensen, K., Flyvbjerg, H., and Olami, Z. (1993), *Self-organized critical forest-fire model: Meanfield theory and simulation results in 1 to 6 dimensions*. Phys. Rev. Lett., 71:2737-2740.

Chuvieco E, Congalton RG (1989), *Application of Remote sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping. Remote Sensing of Environment*, 29:147- 159.

Chuvieco E, F.J. Salas, L. Carvacho, F. Rodriguez-Silva (1999), "Integrated fire risk mapping", en *Remote Sensing of Large Wildfires*, (Eds E. Chuvieco) pp. 65-84. (New York: Springer-Verlag).

Clar, S., Drossel, B., and Schwabl, F.: (1996), *Forest fires and other examples of self-organized criticality*, J. Phys. Cond. Mat., 8:6803-6824.

Drossel, B. and Schwabl, F.: (1993), *Forest-fire model with immune trees*, Physica A, 199:183-197.

Frankenberg, E., D. McKee, and D. Thomas (2004), *Health Consequences of Forest Fires in Indonesia*, working paper, UCLA.

Fried, J.S., G. J. Winter, and J. K. Gillies, (1999), "Assessing the Benefits of Reducing Fire Risk in the Wildland-Urban Interface: A Contingent Valuation Approach", *International Journal of Wildland Fire* 9 (1): 9-20

González C., A. (1993), "The economic impact of fire on forest resources", *Wildfire*, 1:16-21

Henley, C. L.: 1993, Statics of a "self-organized" percolation model, *Phys. Rev. Lett.*, 71:2741-2744.

Jain A, Ravan SA, Singh RK, Das KK, Roy PS (1996) "Forest fire risk modelling using remote sensing and geographic information system", *Research Communications, Current Science*, 10: 928-933.

Johansen, A.: (1994), "Spatio-temporal self-organization in a model of disease spreading", *Physica D*, 78:186-193.

Loftsgaarden D.O., and P.L Andrews (1992), "Constructing and Testing Logistic Regression Models for binary data: Applications to the National Fire Danger Rating System", *General Technical Report INT-286*, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

Malamud B. D. and D.L. Turcotte (1999), "Self-Organized Criticality Applied to Natural Hazards", *Natural Hazards*, 20: 93-116.

Malamud B. D., G. Morein and D.L. Turcotte (1998), "Forest Fires: An Example of Self-Organized Critical Behavior", *Science*, 281:1840-1842

McArthur A.G. (1977), *Fire danger rating systems. FAO/UNESCO technical consultation on forest fires in the Mediterranean region*. FO:FFM/77/3-1, France

Mills W.L. and R.S. Meldad (1987), "Measuring wildfire impacts: Methods and case study", *Northern J. of Applied Forestry*, 11(3):143-147.

Sebastian-Lopez, A., San-Miguel-Ayanz, J., Libertà, G. (2000), An integrated forest fire risk index for Europe, 20th EARSeL SYMPOSIUM, Remote Sensing in the 21st Century: A decade of Trans-European Remote Sensing Cooperation, 14-16 June, Dresden, Germany

Tabara D, D. Sauri and R. Cerdan (2003), "Forest fire risk management and public participation in changing socioenvironmental conditions: A case study in a Mediterranean region", *Risk analysis*, 22(2):249-260.

Truesdale, D. (1995), *Fire suppression costs on large fires: A review of the 1994 fire season*. Washington, D.C. USDA For. Serv. 60 p.

Turner J.A, J.W. Lillywhite and Z. Pieslak (1961), *Forecasting for forest fire services*, World Meteorological Organization technical note No. 42, WMO No-110.

Vega-García C, B.S. Lee, P.M. Woodard, S.J. Titus, (1996), Applying neural network technology to human caused wildfire occurrence prediction. *AI Applications*, 10:9-18.

Vega-García C, P.M. Woodard, S.J. Titus, W.L. Adamowicz, B.S. Lee. (1995), "A Logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest fires", *International Journal of Wildland Fire*, 5:101-111.

Viegas, D.X., G. Bovio, A. Ferreira, A. Nosenzo, and B. Sol (1999), "Comparative study of various methods of fire danger en southern Europe", *International Journal of Wildland Fire*, 9(4):235-246

Winter G.J. and J.S. Fried (2001), "Estimating Contingent Values for Protection from Wildland Fire Using a Two-Stage Decision Framework", *Forest Science*, 47(3): 349-360