

PROPUESTA PARA DETERMINAR ÍNDICES DE PELIGRO DE INCENDIO FORESTAL EN BOSQUES DE CLIMA TEMPLADO EN MÉXICO

G. E. Rojo-Martínez¹; J. Santillán-Pérez²; H. Ramírez-Maldonado²; B. Arteaga-Martínez²

¹Programa de Doctorado especialidad Forestal. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. C.P. 56230.

²Profesor-investigador. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México. C.P. 56230.

RESUMEN

En el presente estudio se seleccionó un modelo para poder determinar índices de peligro de incendio forestal en bosques de clima templado en México, estimando la velocidad de propagación. Se desarrolló un modelo estadístico de regresión lineal utilizando las variables temperatura y humedad de las probetas de *Pinus patula* y *Pinus montezumae* y se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.97. Para la clasificación del índice de peligro de incendio se tomaron los parámetros siguientes: velocidad de propagación, temperatura y humedad de probetas de *Pinus patula* y *Pinus montezumae*. La base de datos está constituida por información de un año de quemas controladas con las variables arriba mencionadas. Con los valores obtenidos se generó una tabla de rangos o grados de peligro y se definieron 5 grados de peligro de incendio (nulo, bajo, moderado, alto y extremo).

PALABRAS CLAVE: índice, peligro de incendio, *Pinus*.

PROPOSAL TO DETERMINE INDEXES OF FIRE RISK IN TEMPERATE FORESTS OF MEXICO

SUMMARY

In this study, a model was selected to determine indexes of fire risk in temperate forests in Mexico, by estimating the speed at which fires spread. A linear regression statistical model was developed using the variables of the temperature and moisture content of sample branches of *Pinus patula* and *Pinus montezumae*. A coefficient of determination of 0.97 was obtained. For the classification of the index of fire risk, the following parameters were used: speed of propagation, temperature and moisture content of *Pinus patula* and *Pinus montezumae*. The data base comprises information from a year of controlled burning with these variables. With these values, a table of ranges or degrees of risk was generated, and five degrees of fire risk were defined (null, low, moderate, high, and extreme).

KEY WORDS: index, fire risk, *Pinus*.

INTRODUCCIÓN

En su condición de recurso natural renovable, el bosque dispone de mecanismos para regenerarse y continuar prestando sus servicios a la sociedad humana mediante la satisfacción de sus demandas en productos, protección ambiental y recreo. En la actualidad, el incendio provocado por el hombre, destaca como agente principal de alteración de los ecosistemas forestales (Rodríguez, 1994).

El fuego en el bosque consume materia leñosa, produce residuos de la combustión que causan modificaciones del aire y del suelo, y genera calor que puede destruir la vida animal y vegetal, así como afectar a las condiciones biológicas del suelo. Además, tendrá efectos

sobre el microclima al alterar la vegetación. Todas las influencias de las masas arbóreas sobre los vientos, la temperatura, la humedad y el régimen hidrológico, quedarán alteradas (Santillán, 1993).

No hay que olvidar que el fuego es uno de los elementos constitutivos del medio natural. Se trata de uno más de los procesos de transmisión de energía que se dan en el universo. Sin embargo, presenta peculiaridades que lo hacen especialmente interesante para la especie humana. Por ejemplo, el fuego es un proceso fácilmente desencadenable. Además, las técnicas para manejarlo y darle la extensión conveniente no es complicada. Por ello, parece ser que el fuego es uno de los procedimientos más antiguos de obtener energía utilizados por el hombre.

Además, el fuego puede actuar sobre el medio sin intervención humana o con ella. Aún quedan zonas en el planeta en las que el fuego se manifiesta al margen del hombre. Zonas forestales de Norteamérica o de Siberia, poco explotadas todavía, en las que las tormentas van acompañadas frecuentemente por rayos, son ejemplo de esto. En cambio, zonas como Latinoamérica, con elevada presión humana sobre el bosque, muestran la otra faceta. El hombre, que utiliza el fuego en sus actividades, lo lleva hasta el bosque y es la causa de los efectos del fuego sobre el medio natural (Trabaud, 1980).

Se deduce de estas consideraciones que no es posible prescindir del fuego al estudiar el medio natural. Sin embargo, la acción humana puede modificar la intensidad de la acción del fuego sobre el medio. El resultado final no se puede calificar *a priori* como desfavorable, ya que el examen de esta cuestión desde el punto de vista ecológico ha de hacerse a mediano plazo y largo plazo (Magaña, 1983).

Habrán casos en que el incendio repercute favorablemente, por ejemplo, destruyendo una masa forestal enferma, plagada o sobremadura. Los fuegos repetidos terminan por degradar el suelo, dando paso a una vegetación regresiva, apareciendo variaciones importantes en el microclima. Lo más probable es que este proceso no conduzca a resultados positivos para el hombre si se mantiene durante un plazo suficiente para hacerse irreversible (Nelson, 1964).

La acción del fuego sobre los bosques es tan antigua como el mundo, de manera que los mosaicos de vegetación que existen son el resultado del equilibrio ecológico con el medio, uno de cuyos elementos es el fuego. Sin embargo, la intervención del hombre, cuya intensidad crece de modo parabólico con la densidad de población y con el progreso técnico, hace que el equilibrio se modifique, llegando a veces a resultados indeseables. El fuego, al desarrollarse de modo artificial, altera el medio hasta niveles nocivos para el hombre (Brown, 1973).

En nuestro país resultan anualmente afectadas miles de hectáreas, produciéndose de 5,000 a 10,000 incendios forestales por año. Como ejemplo podemos mencionar que en el año de 1996 se tuvieron 9,256 incendios con una superficie siniestrada de 248,765 hectáreas. (SEMARNAP, 1996).

La tarea de combatir incendios es de lo más costoso y al mismo tiempo fatigoso para la vida humana, razón por la cual se han estudiado las condiciones y factores que intervienen en su inicio y desarrollo con el fin de prevenirlos y por ende evitarlos.

La tendencia moderna para combatir los incendios forestales está encaminada más a prevenirlos más que a suprimirlos. Dentro de esta nueva filosofía, las políticas van

encaminadas a reducir la probabilidad de que se presenten, esto es, orientadas a reducir el número de incendios en determinadas regiones del país (Santillán, 1993).

La elaboración de indicadores de peligro de incendio, es una de las labores preventivas más importantes que deben instrumentarse con el propósito de alertar al personal de combate de incendios y al público en general sobre las condiciones en que es conveniente evitar o extremar los cuidados en el uso del fuego (Zapata, 1990).

Así es como en diferentes partes del mundo se han desarrollado técnicas para la elaboración de índices de peligro de incendio, éstas han permitido prever las épocas más probables de incendios, así como determinar los lugares que presenten mayor incidencia. Es por ello la importancia de elaborar un sistema que permita determinar un índice de peligro de incendio forestal sencillo y fácil de determinar. A pesar de que en el mundo ya existen sistemas adecuados, en México no se tiene uno específico para las condiciones del país que esté determinado. Por lo que el presente trabajo es una propuesta para determinar índices de peligro de incendio forestal en bosques de clima templado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en el área de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicada a los 19° 29' latitud norte y 98° 53' longitud oeste a una altura sobre el nivel del mar de 2250 m; el clima en el área se clasifica como Cb (Wo) templado con lluvias en verano y una temperatura media anual de 15.2 °C con una precipitación de 636.5 mm anuales (García, 1987).

Metodología

Área experimental

El área de quema fue una parcela de 2 x 3 metros con pendiente plana y protegida contra el viento. La cama de combustible fue de pasto. Se realizaron quemas semanales durante 4 meses lo que da un total de 19 quemas. Estas quemas se realizaron a las 13:00 hr en el periodo de enero a mayo de 1996.

Antes y durante la quema se hicieron mediciones que se describen enseguida y las variables que se midieron fueron las siguientes:

1. Porcentaje de humedad de la probeta.- tablilla de madera de pino (3 tablillas de *Pinus montezumae* y 3 tablillas de *Pinus patula*) de 2 x 2 cm de ancho y grueso de 15 cm de

- largo, la medición se realizó en escala nominal en gramos.
2. Temperatura ambiente.- la medición se realizó en escala nominal en grados centígrados.
 3. Humedad relativa.- Es la relación de la cantidad actual de vapor de agua en un volumen de aire y la cantidad que podría mantenerse, si fuera saturado a la misma temperatura, la medición se realizó en escala nominal en porcentaje.
 4. Velocidad de propagación del fuego.- Es la velocidad con que se extiende el fuego, (la medición se realizó en escala nominal en m/min).

Recopilación de datos

Antes de la quema se colocó al final de la parcela experimental una estaca de 35 cm para usarse como punto de referencia para medir la velocidad de propagación del fuego.

La determinación del contenido de humedad de las probetas de madera se hizo para cada una de las tablillas antes de las quemaduras. Las probetas se secaron en una estufa de aire forzado a 105 °C. Al final del secado se pesaron para obtener su peso seco. El contenido de humedad se calculó a partir de la ecuación 1.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100 \quad (1)$$

La medición del estado del tiempo se realizó in situ. Se midió la temperatura ambiente, humedad relativa y la velocidad de propagación del fuego. El valor para la variable precipitación, se tomó de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo.

La ignición de la parcela experimental se hizo estableciendo una línea de fuego a lo ancho de la parcela con una antorcha de goteo. Al iniciar la línea de fuego se puso en marcha un cronómetro que fue detenido al llegar al frente de la estaca a los 3 m. Con esta lectura se obtuvo el promedio de velocidad en m/min.

Concentrada toda la información se procedió a su codificación y grabación de los datos en un archivo para su análisis.

Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizó con el paquete de cómputo ® SAS Institute Inc. (Statistical Analysis System) 1992.

En el presente trabajo se utilizó la siguiente nomenclatura: HP, representan la humedad de las probetas;

T, representa la temperatura ambiente; HR, representan la humedad relativa y VP, representan la velocidad de propagación.

La selección de las mejores variables se hizo con base en los coeficientes de correlación (R^2).

Procedimiento de selección de variables para estimar el mejor modelo

La estimación de una regresión con una sola variable independiente es muchas veces inapropiada puesto que no se ajusta al modelo y pueden existir otras variables que combinadas proporcionen mayor información acerca de la variable independiente.

A diferencia del Proc GLM de SAS, en el cual no se realiza ninguna selección de las variables, y el modelo estimado tendrá siempre todas las variables propuestas, sean éstas significativas o no, el procedimiento Stepwise de SAS provee cinco métodos para la selección de variables. Forward, Backward, Stepwise, Max R^2 y Min R^2 . (Martínez y Castillo, 1987).

Forward. Se le conoce también como regresión progresiva o selección hacia adelante, y básicamente consiste en lo siguiente:

El procedimiento inicia sin ninguna variable en el modelo. Para cada una de las variables independientes Forward calcula un valor de F que refleja la contribución de la variable al modelo si ésta fuera incluida. El valor de la probabilidad de F se compara con el nivel de significancia especificado. Si ninguna de las F calculadas son significativas a nivel especificado, el proceso se detiene. Por el contrario, si existen F significativas, Forward introduce en el modelo aquella variable que tiene el mayor valor de F. Posteriormente se calcula las F de las variables que quedaron fuera del modelo y el proceso se repite. Así se van agregando variables al modelo, una por una, hasta que entre las variables restantes no haya ninguna con una F significativa, situación en que el proceso se detiene (Martínez y Castillo, 1987; Rebolledo, 1996).

Backward. Se le conoce también como regresión de eliminación hacia atrás y en esta técnica se ajusta primero un modelo que incluye todas las variables independientes. Entonces las variables se omiten una a una hasta que todas las restantes producen una F parcial significativa. En cada paso, la variable que muestra la contribución al modelo más pequeño es la que se omite. El proceso se detiene cuando todas las variables que quedan en el modelo son significativas (Martínez y Castillo, 1987; Rebolledo, 1996).

Stepwise. Este procedimiento es una modificación del método de selección hacia adelante. Las variables se

añaden una a una al modelo, después de que una variable se incluye, el procedimiento examina a todas las variables ya incluidas en el modelo, si alguna de ellas da una F parcial no significativa, al nivel de significancia preestablecido, se elimina automáticamente del modelo. El proceso termina cuando ninguna de las variables restantes reúne las condiciones para ser incluida en el modelo (Martínez y Castillo, 1987; Rebolledo, 1996).

Max R^2 . Esta técnica localiza el mejor modelo de una variable, y así sucesivamente. Primero encuentra el modelo de una variables que produce la R^2 . Se incluye enseguida otra variable, aquella que produce el mayor incremento en la R^2 . Cuando se obtiene el modelo con dos variables, cada una de las variables en el modelo se compara con cada variable aún no contenida en el modelo. Por cada comparación, el procedimiento determina si la omisión de la variable del modelo y su substitución con una de las variables excluidas, incrementa el valor de R^2 . Después que se han realizado todas las posibles comparaciones se opta por el modelo que da lugar al valor mayor de R^2 . Con este nuevo modelo se realizan comparaciones, continuando con el proceso hasta que el procedimiento ya no encuentra un cambio de modelo que pueda aumentar el valor de R^2 . El modelo de 2 variables seleccionado en la forma descrita, puede considerarse como el mejor modelo de 2 variables que puede elegirse con esta técnica. A continuación se añade una tercera variable al modelo, procediendo con el mismo criterio para la inclusión de una segunda variable. El proceso de comparación y cambio se repite, hasta que se descubre el mejor modelo de 3 variables, y así sucesivamente hasta n variables (Martínez y Castillo, 1987; Rebolledo, 1996).

La importancia del uso del R^2 radica en que a medida que se agregan variables explicativas al modelo, la velocidad de crecimiento de R^2 permite ver cuan útiles son las variables adicionales en el perfeccionamiento de la explicación de la variable dependiente.

Min R^2 . Este método es similar al anterior, aquí, sin embargo, cuando se realiza un cambio de modelo, se ejecuta de hecho el cambio que da lugar al menor incremento en el valor de la R^2 .

Mediante las diferentes técnicas mencionadas anteriormente se seleccionaron los mejores modelos de una, dos, tres y cuatro variables. Los modelos probados por el método stepwise para determinar la relación entre las variables y la ocurrencia de incendio fueron:

Tomando las variables simples:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + e_i \quad (2)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + e_i \quad (3)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + e_i \quad (4)$$

Con las variables al cuadrado:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1^2 + e_i \quad (5)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1^2 + \beta_2 X_2^2 + e_i \quad (6)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1^2 + \beta_2 X_2^2 + \beta_3 X_3^2 + e_i \quad (7)$$

Tomando los logaritmos de las variables y en el cual se usó el modelo general:

$$Y_i = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} X_3^{\beta_3} + e_i \quad (8)$$

el cual fue linealizado bajo la transformación logaritmo decimal, quedando los modelos de la forma siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \log X_1 + e_i \quad (9)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \log X_1 + \beta_2 \log X_2 + e_i \quad (10)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \log X_1 + \beta_2 \log X_2 + \beta_3 \log X_3 + e_i \quad (11)$$

donde:

Y_i = es el valor predicho por el modelo;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ y β_3 son coeficientes de regresión;

X_1, X_2, X_3 y X_4 son las variables seleccionadas por presentar influencia en la ocurrencia de incendio; y

e_i son elementos aleatorios de error, no correlacionados, con media 0 y varianza constante σ^2 .

Escala de peligro de incendio

Basándose en los análisis efectuados, finalmente se estructuró una escala de peligro de incendio, basada en la amplitud de valores de la ecuación considerada más eficiente entre todas las probadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación de las mejores ecuaciones de regresión

Uno de los objetivos de este trabajo fue determinar los modelos matemáticos para estimar la velocidad de propagación como indicador de peligro de incendio, tomándose los factores de humedad relativa, temperatura y humedad de las probetas de madera de pino (*Pinus patula* y *Pinus montezumae*).

Para la determinación de estas ecuaciones de regresión se aplicaron los procedimientos forward, backward, stepwise y max R^2 para los modelos con una, dos y tres variables, que tenían los máximos coeficientes de determinación.

Los análisis de varianza resultantes para las variables meteorológicas simples, se encuentran en el Cuadro 1; las mismas variables pero elevadas al cuadrado, en el Cuadro 2 y usando logaritmos en el Cuadro 3. Los factores que componen a cada modelo, así como su coeficiente de regresión se encuentran en los Cuadros 1, 2 y 3.

Una vez obtenidos los mejores modelos para las variables simples, variables al cuadrado y logarítmicas, se procedió a decidir cuál era el superior para todos ellos. La determinación de cual de los modelos era el mejor, se hizo con base en las pruebas de F, los coeficientes de determinación y la simplicidad que estos presentaran.

Ecuaciones donde se utiliza la variable de humedad de la probeta de *Pinus patula*.

Al comparar las F calculadas de las 9 regresiones, no se pudo definir si alguna era mejor que las demás ya que todas son significativas al 95 % (Cuadro 1, 2 y 3).

Al evaluar con base en el coeficiente de determinación se encontró que 4 regresiones que tienen los más grandes valores son: (3) con 0.9807, (8) con 0.9868 y la (9) 0.9854. Se puede decir que la mejor ecuación es la (8) por presentar el valor máximo de R^2 , pero falta tomar en cuenta la sencillez de la ecuación y es el caso de la ecuación (1) que obteniendo solamente la humedad de la probeta de *Pinus patula* tenemos un valor de r^2 de 0.9046 (Cuadro 4).

El que todas las regresiones hayan tenido una F significativa indica que cualquiera de las ecuaciones encontradas puede servir para la predicción de la velocidad de propagación de un incendio, pero la R^2 nos señala cual modelo es más eficiente en dicha predicción.

CUADRO 1. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores simples y la humedad de la probeta de *Pinus patula*

Fuente de variación	Variable	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f calculada	Prob>f	R ²
Regresión 1	Hp	1	11.97571308	11.97571308	151.81	0.0001*	0.9046
Error		16	1.26218137	0.07888634			
Total		17	13.23789444				
Regresión 2	Hp T	2	12.97067318	6.48533659	364.04	0.0001*	0.9798
Error		15	0.26722126	0.01781475			
Total		17	13.23789444				
Regresión 3	Hp T Hr	3	12.9825257	4.32750839	237.25	0.0001*	0.9807
		14	0.25536927	0.01824066			
		17	13.23789444				

Alpha=0.05%

* estadísticamente significativo.

CUADRO 2. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores al cuadrado

Fuente de variación	Variable	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Prob>f	R ²
Regresión 4	Hp	1	9.84791746	9.84791746	46.48	0.0001*	0.7439
Error		16	3.38997698	0.21187356			
Total		17	13.23789444				
Regresión 5	Hp T	2	12.93093676	6.46546838	315.95	0.0001*	0.9768
Error		15	0.30695769	0.02046385			
Total		17	13.23789444				
Regresión 6	Hp T Hr	3	12.94123649	4.31374550	203.58	0.0001*	0.9775
Error		14	0.29665795	0.02118985			
Total		17	13.23789444				

Alpha=0.05%

* estadísticamente significativo

CUADRO 3. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores como logaritmos decimales

Fuente de variación	Variable	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f calculada	Prob>f	R2
Regresión 7	Hp	1	1.09200745	1.09200745	408.38	0.0001*	0.9622
Error		16	0.04278381	0.00267399			
Total		17	1.13479126				
Regresión 8	Hp T	2	1.11823135	0.55911568	506.45	0.0001*	0.9854
Error		15	0.01655991	0.00110399			
Total		17	1.13479126				
Regresión 9	Hp T Hr	3	1.11823211	0.37274404	315.14	0.0001*	0.9854
Error		14	0.01655915	0.00118280			
Total		17	1.13479126				

Alpha= 0.05 %

* estadísticamente significativo

CUADRO 4. Ecuaciones de los modelos de regresión *Pinus patula*

Regresión	Ecuación
1	VP = 1.926119661 + 0.508415504 HP
2	VP = -3.930986631+ 0.181864120 HP + 0.282334532 T
3	VP = -3.294981932 +0.160323275 HP + 0.242610560 T + 0.019562962 HR
4	VP = 2.877150223 + 0.054337309 HP ²
5	VP = -1.023151376 + 0.010325036 HP ² + 0.007389581 T ²
6	VP = -7.164411306 + 0.007058478 HP ² + 0.0065882228 T ² + 0.0004704731 HR ²
7	log (VP) = 0.7195907462 + 0.4940339679 log (HP)
8	log (VP) = -4.704433605 + 1.795627178 log (HP) + 1.795627178 log (T)
9	log (VP) = -4.729317206 + 0.198873400 log (HP) + 1.806095243 log (T) - 0.002794751 log (HR)

El conocimiento de otros modelos de regresión cobra importancia cuando, por ejemplo, se tuvieran en cierta región el instrumento que registrara la humedad relativa y se tendría un poco más de precisión en la probabilidad de propagación de un incendio.

- **Ecuación de regresión.**

De esta manera se escogió como mejor modelo la ecuación (2) por presentar una R² con valores altos, por ser un modelo menos complejo con dos variables sin transformación y los datos de temperatura y humedad de la probeta son fáciles de medir en cualquier lugar del bosque y no se requieren equipos muy especializados.

La ecuación 2 presenta la siguiente expresión:

$$VP = -3.930986631 + 0.181864120 HP + 0.282334532 T \quad (12)$$

Donde:

VP = Velocidad de propagación;

HP = Es la humedad de una probeta de madera de *Pinus patula*; y

T = Es la temperatura ambiente

Ecuaciones donde se utiliza la variable de humedad de la probeta de *Pinus montezumae*

Al comparar las f calculadas de las 9 regresiones no se pudo definir si alguna era mejor a las demás ya que todas son significativas al 95 % (Cuadro 5, 6 y 7).

Al evaluar en base en el coeficiente de determinación se encontró que 5 regresiones tienen los más grandes valores y son: (2) con 0.9726, (3) con 0.9736, (6) con 0.9767, (8) con 0.9755 y la (9) 0.9756. Se puede decir que la mejor ecuación es la (6) por presentar el valor máximo de R², pero falta tomar en cuenta la sencillez de la ecuación y es el caso de la ecuación (1) que obteniendo solamente la humedad de la probeta de *Pinus montezumae* tenemos un valor de R² de 0.7559 (Cuadro 5).

CUADRO 5. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores simples y la humedad de la probeta de *Pinus montezumae*

Fuente de variación	Variable	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f calculada	Prob>f	R2
Regresión 1	Hp	1	9.61049275	9.61049275	42.39	0.0001*	0.7259
Error		16	3.62740169	0.22671261			
Total		17	13.23789444				
Regresión 2	Hp T	2	12.87561206	6.43780603	266.55	0.0001*	0.9726
Error		15	0.36228238	0.02415216			
Total		17	13.23789444				
Regresión 3	Hp T Hr	3	12.88954763	4.29651588	172.68	0.0001*	0.9736
Error		14	0.34834682	0.02488192			
Total		17	13.23789444				

Alpha=0.05%

* estadísticamente significativo

CUADRO 6. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores al cuadrado

Fuente de variación	Variable	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f calculada	Prob>f	R2
Regresión 4	Hp	1	7.84273419	7.84273419	23.26	0.0002*	0.5924
Error		16	5.39516026	0.33719752			
Total		17	13.23789444				
Regresión 5	Hp T	2	12.91801887	6.45900943	302.88	0.0001*	0.9758
Error		15	0.31987558	0.02132504			
Total		17	13.23789444				
Regresión 6	Hp T Hr	3	12.92975326	4.30991775	195.82	0.0001*	0.9767
Error		14	0.30814119	0.02201008			
Total		17	13.23789444				

Alpha=0.05%

* estadísticamente significativo

CUADRO 7. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores como logaritmos decimales.

Fuente de variación	Variable	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f calculada	Prob>f	R2
Regresión 7	Hp	1	1.03408407	1.03408407	164.29	0.0001	0.9112
Error		16	0.10070719	0.00629420			
Total		17	1.13479126				
Regresión 8	Hp T	2	1.10704906	0.55352453	299.29	0.0001*	0.9755
Error		15	0.02774220	0.00184948			
Total		17	1.13479126				
Regresión 9	Hp T Hr	3	1.10720368	0.36906789	187.29	0.0001*	0.9756
Error		14	0.02758758	0.00197054			
Total		17	1.13479126				

Alpha= 0.05 %

* estadísticamente significativo

CUADRO 8. Ecuaciones de los modelos de regresión

Regresión	Ecuación
1	$VP = 2.971076356 + 0.381050378 \text{ HP}$
2	$VP = -5.145649256 + 0.082784911 \text{ HP} + 0.350613924 \text{ T}$
3	$VP = -4.327554654 + 0.063901678 \text{ HP} + 0.298475839 \text{ T} + 0.023527313 \text{ HR}$
4	$VP = 3.249348610 + 0.056395098 \text{ HP}^2$
5	$VP = -1.174595300 + 0.009270767 \text{ HP}^2 + 0.007769825 \text{ T}^2$
6	$VP = -0.7834518559 + 0.0054135679 \text{ HP}^2 + 0.0067384180 \text{ T}^2 + 0.0005462349 \text{ HR}^2$
7	$\log (VP) = 1.283157623 + 0.194082345 \log (\text{HP})$
8	$\log (VP) = -8.203661412 - 0.001846214 \log (\text{HP}) + 2.956944898 \log (\text{T})$
9	$\log (VP) = -8.452022258 - 0.000441151 \log (\text{HP}) + 3.072365243 \log (\text{T}) - 0.040128448 \log (\text{HR})$

De las regresiones que tuvieron una *f* significativa nos indica que cualquiera de ellas puede servir para la predicción de la velocidad de propagación de un incendio, pero la R² nos señala cual modelo es más eficiente en dicha predicción.

El conocimiento de otros modelos de regresión cobra importancia cuando, por ejemplo, se tuvieran en cierta región el instrumento que registrara la humedad relativa con lo cual se tendría más precisión acerca de la probabilidad de propagación de un incendio.

De esta manera se escogió como mejor modelo la regresión 2) por presentar una R² con valores altos, por ser un modelo menos complejo con dos variables sin transformación y los datos de temperatura y humedad de la probeta son fáciles de medir en cualquier lugar del bosque y no se requieren equipos muy especializados.

La ecuación (2) presenta la siguiente expresión:

$$VP = -5.145649256 + 0.082784911 \text{ HP} + 0.350613924 \text{ T} \quad (13)$$

Donde:

VP = Velocidad de propagación;

Donde:

VP = Velocidad de propagación;

HP = Es la humedad de una probeta de madera de *Pinus patula*; y

T = Es la temperatura ambiente

Construcción de los índices para determinar el grado de peligro de incendio

Basándose en la revisión de literatura y en la analogía con otras escalas de peligro de incendio en el mundo, se decidió utilizar una escala con cinco grados de peligro tomándose en cuenta los valores máximos y mínimos de las variables evaluadas (Figura 1 y 2).

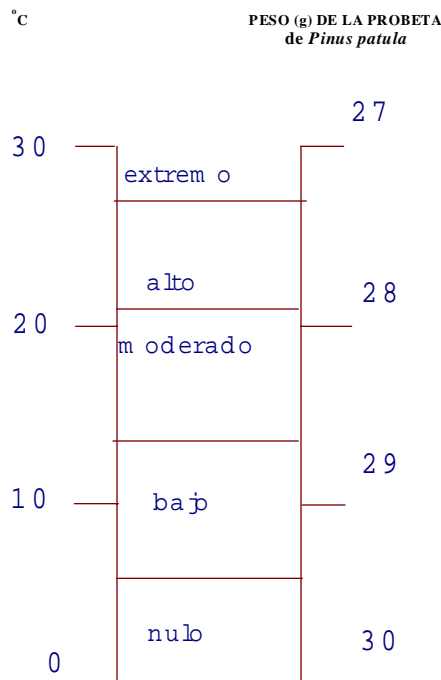


Figura 1. Nomograma para determinar el grado de peligro de incendio utilizando la humedad de la probeta de *Pinus patula*.

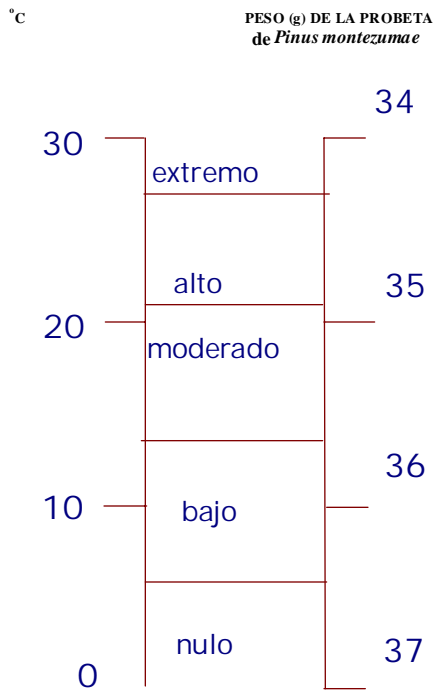


Figura 2. Nomograma para determinar el grado de peligro de incendio utilizando la humedad de la probeta de *Pinus montezumae*.

Las escalas de peligro propuesto establecen ciertos límites entre los valores posibles de la regresión 2 que definen el grado de peligro del día.

- Usando la humedad de la probeta de *Pinus patula* y *P. montezumae*

CUADRO 9. Escala de índice de peligro de incendio forestal

Clase	Grado de peligro	Índice de peligro	Color asociado
I	Nulo	Menos de 1.0	Verde
II	Bajo	1.0 - 6.5	Azul
III	Moderado	6.6 - 7.5	Amarillo
IV	Alto	7.6 - 8.5	Naranja
V	Extremo	Mas de 8.5	Rojo

Los comportamientos del fuego que se esperarían de acuerdo con las clases anteriores serian los siguientes:

Clase I (Nulo). Generalmente no existe peligro de incendios. Pueden ser originados por el rayo, pero su propagación es prácticamente nula.

Clase II (Bajo). Los incendios pueden originarse por hogueras u otras fuentes caloríficas de alguna importancia. Se propaga lentamente y son de fácil extinción.

Clase III (Moderado). Los incendios pueden originarse por cerillas y tienden a propagarse. No existen dificultades en su extinción si se actúa con rapidez

Clase IV (Alto). Los incendios se inician a menudo por cerillos, brasas o puntas de cigarrillos. Se propagan rápidamente y son de difícil extinción.

Clase V (Extremo). Los incendios pueden producirse por pequeñas chispas que arden con intensidad propagando el fuego con gran violencia. su extinción es extraordinariamente difícil.

Métodos de cálculo

Los datos que se consideran para la elaboración de los índices son las lecturas de la temperatura y la humedad de la probeta (peso en g) de *Pinus patula* o *Pinus montezumae*, que se tomarían cada día a las 13:00 hr.

Tomemos un ejemplo hipotético en el cual humedad de la probeta de *Pinus patula* fue 27 g y una temperatura de 30° C con la ecuación de regresión (2) se tendría:

$$y = -3.930986631 + 0.181864120 HP + 0.282334532 T$$

$$y = -3.930986631 + 0.181864120 (27) + 0.282334532 (30)$$

$$y = -3.930986631 + 4.910330754 + 8.47003596$$

$$y = 9.4705$$

Este valor de 9.4705 nos indicaría un índice de propagación alto.

CONCLUSIONES

1. La metodología empleada en esta investigación para la elaboración de un índice de peligro de incendio, basándose en la temperatura, humedad relativa y humedad de probetas de madera de pino, es recomendable para la realización de estudios similares con diferentes tipos de probetas de madera en diferentes tipos de bosques.

2. Los factores meteorológicos así como la humedad de los combustibles tienen gran influencia sobre la propagación de un incendio forestal.

3. Se logró estimar eficazmente el comportamiento del fuego en función de las características del combustible, temperatura y humedad relativa.

4. La manera más fácil de predecir el comportamiento después de iniciado el fuego puede ser esta metodología y

debe ser extendida a otras regiones forestales del país a través de adaptaciones y/o el desarrollo de nuevas ecuaciones.

5. Se cuenta al fin con una metodología sencilla y fácil de realizar en cualquier parte del país no importando la distancia o que tan retirado se esté de lugares que tengan estaciones meteorológicas para la toma de datos, puesto que cualquier persona puede realizarlo y tener alertas en ese mismo instante.

LITERATURA CITADA

- BROWN, A. A.; DAVIS, P. K. 1973. Forest fire control. 2a. edición. Mc Graw-Hill. New York. 686 p.
- CHENEY, N. P. 1955. Predicting fire behaviour with fire danger tables. Australian Forestry 32 (2): 71-79.
- DEEMING, E. J. 1988. Fire-Danger Rating : the next 20 years. Fire Management Notes 49(4): 3-8.
- GARCÍA, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (para adaptarlos a las condiciones de la República Mexicana. 4ª. Edición. México D.F. 130 p.
- GARRIDO, R. G. 1990. Propuesta de metodología para obtener un sistema de predicción de peligro de incendio forestal para la República Mexicana. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Dirección General de Protección Forestal. México, D.F. 43 p.
- MAGAÑA, T. S. 1983. Determinación del índice de peligro de incendios forestales para Tlahuapan, Puebla. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Bosques. UACH. 70 p.
- MARTÍNEZ, G. A. Y CASTILLO, M.A. 1987. Teoría de la regresión con aplicaciones agronómicas. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 418 p.
- NELSON, R. M. 1964. The national fire danger rating system: derivation of spread index for eastern and southern states. U.S.D.A. For. Serv. Res. Pap. SE-13, 1964. 44 p.
- REBOLLEDO, R. H. H. 1992. SAS en microcomputadora. Universidad Autónoma de Chapingo. 93 p.
- RODRÍGUEZ, T. 1996. Incendios forestales. Universidad Autónoma Chapingo - Muni-Prensa. México, D.F. pp. 463-474.
- SANTILLÁN, P. J. 1993. Sistema para determinar indicadores de peligro de incendio forestal. Acuerdo de cooperación en materia forestal entre México y Finlandia. Informes Técnicos 14. México. 24 p.
- SEMARNAP. 1996. Incendios forestales. Dirección General Forestal. Folleto. México, D.F.
- TRABAUD, L. 1980. Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l'organisation, la structure et l'évolution de la végétation des zones de garrigues du baslanguedoc. Thèse docteur d'état. Université des sciences et techniques du languedoc. pp 45-68.
- ZAPATA, P. C. 1990. Determinación de indicadores de peligro potencial de incendios forestales con base en la cuantificación del material combustible. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de bosques. 76 p.