

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES



DIRECCION ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

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

TESIS



DEPARTAMENTO
DE
SERVICIOS ESCOLARES

QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

GUSTAVO ENRIQUE ROJO MARTÍNEZ



Chapingo, México 1998

B.6 858401

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

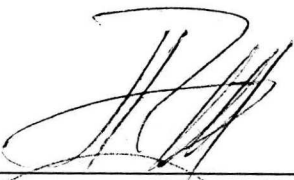
Tesis realizada por **Gustavo Enrique Rojo Martínez** bajo la dirección del comité
asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener
el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

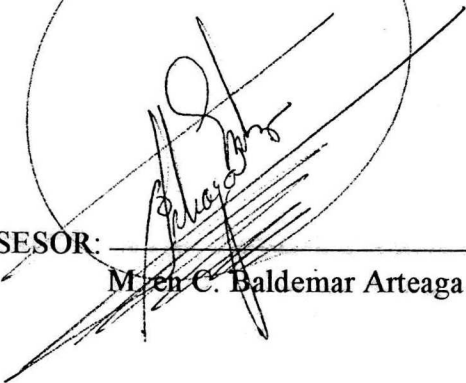
DIRECTOR:


M. en C. Javier Santillán Pérez

ASESOR:


Dr. Hugo Ramírez Maldonado

ASESOR:


M. en C. Baldemar Arteaga Martínez

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

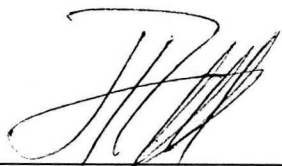
El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de Gustavo Enrique Rojo Martínez autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales estuvo constituido por:

PRESIDENTE:



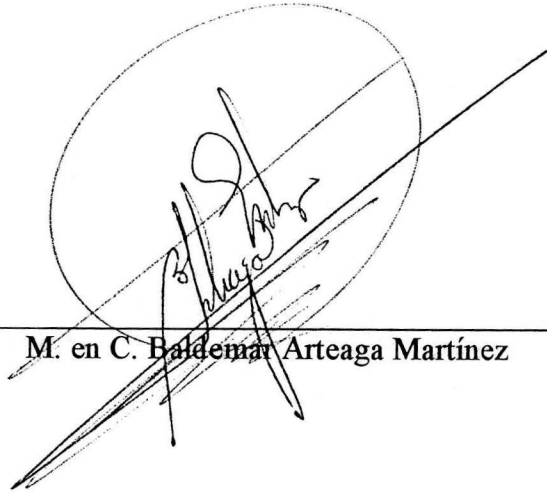
M. en C. Javier Santillán Pérez

ASESOR:



Dr. Hugo Ramírez Maldonado

ASESOR:



M. en C. Baldemar Arteaga Martínez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las siguientes instituciones y personas que hicieron posible la realización de este trabajo:

Al pueblo de México que por medio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), me apoyaron económicamente para la realización de mis estudios de Maestría en Ciencias.

A la Universidad Autónoma Chapingo, en particular al Departamento de Bosques, por la confianza y apoyo recibidos para efectuar el programa de estudios.

Al Comité Asesor que dirigió la realización de este estudio, integrado por los siguientes profesores: M.C. Javier Santillán Pérez (Director), Dr. Hugo Ramírez Maldonado (Asesor) y M. C. Baldemar Arteaga Martínez (Asesor), todos ellos mis profesores, quienes mas han contribuido a mi formación profesional, además por su amistad, colaboración y disposición de tiempo dedicado a la revisión de esta investigación.

A todos y cada uno de los profesores del Departamento de Bosques, porque directa o indirectamente contribuyeron con mi formación académica y personal, especialmente al Dr. Hugo Ramírez Maldonado, M.C. Francisco Romahn de la Vega, Dra. Amparo Borja de la Rosa , Dr. Carlos Rodríguez Franco, M.C. Jorge Torres y Dr. Miguel Angel Musálem Santiago.

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico con cariño a mi familia

Mis abuelos

Alberto Rojo Cañas
Francisco Martínez Gómez
Margarita Popoca

Siempre vivirán en mi corazón

Mis padres

Liborio Rojo Olascoaga
Margarita Martínez Popoca

Nunca podré pagar lo que han hecho por mí.....los amo y recuerdo siempre

Mis hermanos

Ricardo, Olivia, Fernando, Guillermo y Alejandro

Gracias por su confianza y apoyo

A Rosa Martínez Ruiz..... “La lucha entre el río y la piedra, no la gana el río por ser mas fuerte, sino por ser mas constante” lo logramos

CONTENIDO

	<i>Página</i>
Agradecimientos.....	i
Dedicatorias.....	ii
Contenido.....	i ii
Índice de figuras.....	V
Índice de Cuadros.....	Vi
Índice de Cuadros del Apéndice.....	IX
Resumen.....	X
Introducción.....	1
2. Revisión de literatura.....	4
2.1. Definición de peligro e índice de peligro de incendio forestal.....	4
2.2. Algunos índices de peligro de incendio forestal en el mundo.....	6
2.2.1. Índice de peligro de incendio forestal en Norteamérica	10
2.2.1.1. Metodología.....	12
2.2.2. Índice de peligro de incendio forestal en Canadá.....	17
2.2.2.1. Métodos de cálculo.....	19
2.2.3. Índice de peligro de incendio forestal en España.....	21
2.2.3.1. Métodos de cálculo.....	21
2.2.4. Índice de peligro de incendio forestal en Francia.....	25
2.2.4.1. Métodos de cálculo.....	26
2.2.5. Índice de peligro de incendio forestal en la República de Corea.....	27
2.2.6. Índice de peligro de incendio ex-Unión Soviética.....	28
2.2.6.1. Índice de Nesterov.....	29
2.2.6.2. Índice higrotérmico.....	31
2.2.6.3. Índice logarítmico de peligro de incendio.....	31
2.3. Índices de peligro de incendio propuestos en México.....	32
2.3.1. Determinación del índice de peligro de incendios forestales para Tlahuapan, Puebla.....	32
2.3.2. Índice de peligro de incendio para el Estado de México.....	33
2.3.3. Índice de riesgo de incendio en la Sierra de Tatalpa, Estado de de Jalisco.....	36
2.3.4. Índice potencial de peligro de incendios en Topia, Durango.....	36
2.3.5. Sistema para determinar indicadores de peligro de incendio forestal propuesto por Santillán en 1993.....	38
2.3.6. Propuesta de metodología para obtener un sistema de predicción de peligro de incendio forestal para la República Mexicana.....	38
3. Materiales y Métodos.....	40
3.1. Área de estudio.....	40
3.2. Metodología.....	40
3.2.1. Área experimental.....	40
3.2.2. Recopilación de datos.....	41
3.2.3. Procesamientos de datos.....	41
3.2.4. Procedimiento de selección de variables para estimar el mejor modelo.....	42
3.2.5. Escala de peligro de incendio.....	45

4. Resultados y Discusión.....	46
4.1. Determinación de las mejores ecuaciones de regresión.....	46
4.2. Ecuaciones donde se utiliza la variable de humedad de la probeta de <i>Pinus patula</i>	46
4.3. Ecuaciones donde se utiliza la variable de humedad de la probeta de <i>Pinus montezumae</i>	49
4.4. Construcción de los índices para determinar el grado de peligro de incendio..	51
4.5. Métodos de cálculo.....	54
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	56
6. Literatura citada.....	57
7. Apéndice.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Página
1. Estructura de peligro de incendio adaptado de Countryman (1966).....	5
2. Estructura básica de un índice de peligro de incendio (Santillán, 1993).....	8
3. La relación entre la humedad relativa y el peligro de incendio (Shank, 1935)..	10
4. Un medidor del peligro de incendio igual a los que utilizaban en los Estados Unidos en el año de 1953 (Show y Clarke, 1953).....	12
5. Estructura básica para la evaluación del grado de incendio forestal en los Estados Unidos (Deeming, 1978).....	14
6. Estructura del peligro de incendios forestales Canadiense (Van Wagner, 1974).....	18
7. Estructura básica para la evaluación del grado de peligro de incendio forestal en España (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 982).....	22
8. Índice de ocurrencia de incendios forestales para el Estado de México (Marín, 1984).....	35
9. Frecuencia de índices de riesgo de incendio forestales en ocho conjuntos prediales de la Sierra de Tatalpa (Martínez <i>et al.</i> , 1990).....	37
10. Nomograma para determinar el grado de peligro de incendio utilizando la Humedad de la probeta de <i>Pinus patula</i>	52
11. Nomograma para determinar el grado de peligro de incendio utilizando la Humedad de la probeta de <i>Pinus montezumae</i>	53
12 Relación entre velocidad de propagación (VP) y temperatura (T).....	69

13 Relación entre la velocidad de propagación (VP) y la humedad de la probeta(HP).....	71
14. Relación entre la velocidad de propagación (VP) y la temperatura (T).....	74
15. Relación entre la velocidad de propagación (VP) y la humedad de la probeta(HP).....	75

ÍNDICE DE CUADROS

Número	Página
1. Escala de índice de peligro de incendio forestal de los Estados Unidos.....	15
2. Escala de índice de peligro de incendio forestal de Canadá.....	20
3. Escala de índice de peligro de incendio forestal para España.....	23
4. Escala de índice de peligro de incendio forestal para Francia.....	26
5. Valor del índice de peligro de incendio forestal francés.....	27
6. Estadísticas de los incendios forestales en la República de Corea (1987-1991)	28
7. Índice de peligro de incendio forestal para la República de Corea.....	28
8. Restricciones del índice de Nesterov según la precipitación.....	30
9. Índice de peligro de incendio forestal para la ex-Unión Soviética.....	30
10. Índice de peligro de incendio forestal para Tlahuapan, Puebla.....	33
11. Índice de peligro de incendio forestal según Zapata (1990).....	37
12. Índice de peligro de incendio propuesto por Santillán (1993).....	38
13. Índice de peligro de incendio forestal para la República Mexicana.....	39
14. Análisis de varianza de los modelos con 1,2 y 3 variables usando los factores simples y la humedad de la probeta de <i>Pinus patula</i>	47
15. Análisis de varianza de los modelos con 1,2 y 3 variables usando los factores al cuadrado.....	47
16. Análisis de varianza de los modelos con 1,2 y 3 variables usando los factores como logaritmos decimales.....	48
17. Ecuaciones de los modelos de regresión <i>Pinus patula</i>	48
18. Análisis de varianza de los modelos con 1,2 y 3 variables usando los factores simples y la humedad de la probeta de <i>Pinus montezumae</i>	49
19. Análisis de varianza de los modelos con 1,2 y 3 variables usando los factores al cuadrado.....	50
20. Análisis de varianza de los modelos con 1,2 y 3 variables usando los factores como logaritmos decimales.....	50
21. Ecuaciones de los modelos de regresión <i>Pinus montezumae</i>	51

22. Escala de índice de peligro de incendio forestal.....	54
---	----

ÍNDICE DE CUADROS DEL APÉNDICE

Número	Página
1. Humedad del combustible fino (etapa seca herbácea).....	62
2. Humedad del combustible (transición etapa herbácea).....	63
3. Humedad del combustible fino (verde etapa herbácea).....	64
4. Construcción del índice.....	65
5. Ajuste de la humedad del combustible.....	66
6. Extensión del índice.....	66
7. Corridas en SAS para <i>Pinus patula</i> usando los factores simples.....	67
8. Corridas en SAS para <i>Pinus montezumae</i> usando los factores simples.....	72

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 desarrollo 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, temperaturas 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*.

ABSTRACT

In the present study was selected a model to determine fire danger indices forest in climate forests tempered in Mexico, estimating the spread speed. It is development a statistic model of linear regression using the variable temperature and dampness of the sticks and *Pinus patula* and *Pinus montezumae* and was obtained a coefficient of determination of 0.97. For the classification of the index of fire danger were taken the following parameters: spread speed, temperatures and sticks dampness of *Pinus patula* y *Pinus montezumae*. The data base is constituted by information of a year of you burn controlled with the considered variables. With the obtained values was generated a ranges table or degrees of danger and were defined 5 degrees of fire danger (void, under, moderate, high and extreme).

Key words: index, fire danger, *Pinus*

1. 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, excluyendo las catástrofes naturales, el incendio destaca como agente principal de alteración de los ecosistemas forestales.

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 atenuadas o anuladas.

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 manejarlos y darles 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.

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 para largo plazo.

Habrán casos en que el incendio repercuta 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.

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, llegándose a veces a resultados indeseables. El fuego, al desarrollarse de modo artificial, altera el medio hasta niveles nocivos para el hombre.

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.

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 a prevenirlos 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.

La elaboración de indicadores de peligro de incendio, es una de las labores preventivas más importantes que deben implementarse 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.

Por lo cual en diferentes partes del mundo se han desarrollado técnicas para la elaboración de índices de peligro de incendio. estas han permitido prever las épocas más probables de incendios, así como determinar los lugares que presenten mayor peligro de incendio. 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 ninguno adecuado. Por lo cual el presente trabajo es una propuesta para determinar índices de peligro de incendio forestal en bosques de clima templado de México.

1.1. OBJETIVOS

- 1.- Desarrollar diferentes ecuaciones de índice de peligro de incendio para los bosques de clima templado de México.
- 2.- Determinar las relaciones existentes entre algunos factores meteorológicos; el contenido de humedad de la madera (*Pinus montezumae* y *P. patula*) y la facilidad de inicio y propagación del fuego.
- 3.- Proponer rangos de peligro de incendio que correspondan a los estados de alerta.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Definición de peligro de incendio e índice de peligro de incendio forestal.

El peligro de incendio se puede definir como el resultado de la acción de varios factores (permanentes y variables) que combinándose permiten que las probabilidades de que un incendio se inicie, propague, produzca daño, así como la dificultad que representa para controlarlo (esto derivado del estado del combustible y de las causas de ignición). Dentro de los factores más o menos permanentes estarían el tipo de vegetación, constitución físico-química de los combustibles y la topografía, y entre los factores variables estarían los meteorológicos como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, entre otros (Cheney, 1955; Countryman, 1966; Soares, 1972; Magaña, 1985). Se puede decir que el peligro de incendio es un dato ligado al espacio, ya que en él intervienen factores locales y puede ser, por ello, reflejado en mapas (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1982).

De manera sencilla el peligro de incendio se podría definir como una situación donde se combinan un conjunto de factores que permiten que se presente un incendio en un área determinada, considerado por una serie de componentes y determinantes de peligro de incendio que se presentan en la Figura 1.

El índice de peligro de incendio forestal es un número que refleja de manera anticipada la probabilidad de que se produzca un incendio forestal en un lugar y en un momento determinado, y su posibilidad de propagación de acuerdo con las condiciones atmosféricas del día o de una serie de días (Vélez, 1968; Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1982).

Los índices de peligro se pueden dividir de manera general en dos grandes grupos: índices de inflamabilidad e índices de propagación. Los primeros miden especialmente

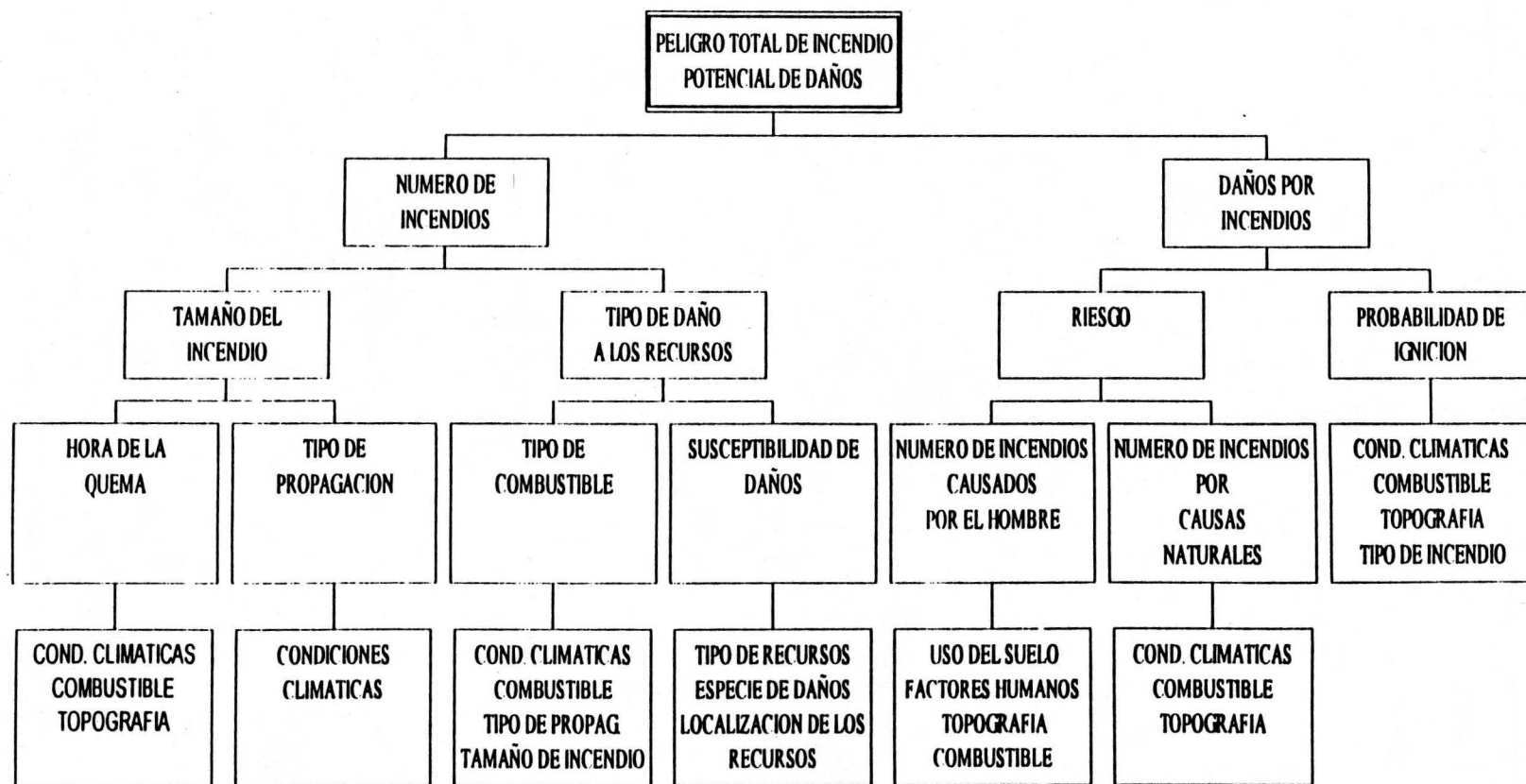


Figura 1. Estructura de peligro de incendio adaptado de Countryman (1966).

la probabilidad que se presente o inicie un incendio, es decir, las condiciones favorables para la combustión. Los segundos involucran además otras variables que influyen en el comportamiento del fuego después de iniciado (Soares, 1972).

El índice de peligro mas útil sería aquél que pudiera predecir el instante y el lugar preciso en que a futuro acontecerá cada incendio forestal, incluso la causa. Por el momento los conocimientos matemáticos y estadísticos de la humanidad no permiten predecir esos eventos con esa precisión. No obstante, existen importantes avances en el desarrollo de índices de peligro de incendios forestales en el mundo (Rodríguez, 1994).

2.2. Algunos Índices de peligro de incendio forestal en el mundo.

Los estudios para el establecimiento de los índices de peligro de incendio tuvieron inicio en algunos países a comienzos del presente siglo. Normalmente se utilizaban procedimientos empíricos, tales como la estimación de la velocidad del viento, en relación con el movimiento de las ramas o el movimiento del humo proveniente de materiales combustibles, así como en base en la humedad de los residuos leñosos. Estos conocimientos son válidos para las personas que conocen las condiciones de su región, pero en situaciones de gran variabilidad es muy difícil precisar el grado de inflamabilidad de un área en particular (Lindenmuth y Nelson, 1951).

A principio de siglo, se tenían claros los diferentes elementos que constituyen el concepto de índices de peligro de incendio y la importancia de poderlos medir, pero en aquella época no se tenían los medios para hacerlo e integrarlos (Brown y Davis, 1973).

El uso de boletines de pronósticos de incendios durante los últimos 20 años, representa un adelanto de gran importancia en la lucha contra el fuego. Actualmente constituye una ventaja importante y estos constituyen actualmente un medio adoptado en diversos países y merece ser aplicado en todas partes donde exista o se proyecte

establecer una organización de defensa contra el fuego de los recursos naturales (Show y Clarke, 1953).

De la misma forma que en algunos países se formulan boletines de prevención meteorológica para la investigación y para la aviación, se elaboran otros especiales sobre incendios potenciales que pudieran presentarse en un momento dado.

Los factores que intervienen en la definición del grado de peligro son muy numerosos, básicamente se puede hablar de 4 grupos: los factores atmosféricos, el tipo y cantidad de combustible, los factores causales y los topográficos. Para analizar su influencia individual o de conjunto se utilizan sistemas con valores estadísticos de un cierto número de años, a partir de los cuales pueden generarse ecuaciones o modelos probabilísticos y/o tablas que relacionan algunos de los factores (Santillán, 1993).

De manera general, cada uno de estos grupos se ha asociado a uno o varios conceptos que los identifican (Santillán, 1993):

1). Frecuencia de incendios:

- Índice de riesgo
- Índice de ocurrencia
- Índice de frecuencia

2). Combustibles:

- Índice de ignición
- Índice de propagación o dispersión
- Índice de inflamabilidad

3). Agentes causales:

- Índice de riesgo
- Índice de causalidad

4). Factores atmosféricos:

- Índice meteorológico
- Índice de sequía

En la elaboración de índices de peligro, la tendencia ha sido la de utilizar más los factores meteorológicos, debido a que son los que determinan si una fuente de calor tiene o no éxito en encender un combustible, cualquiera que éste sea (Santillán, 1993).

De manera esquemática, la estructura básica de un índice de peligro de incendio es como se muestra en la Figura 2.

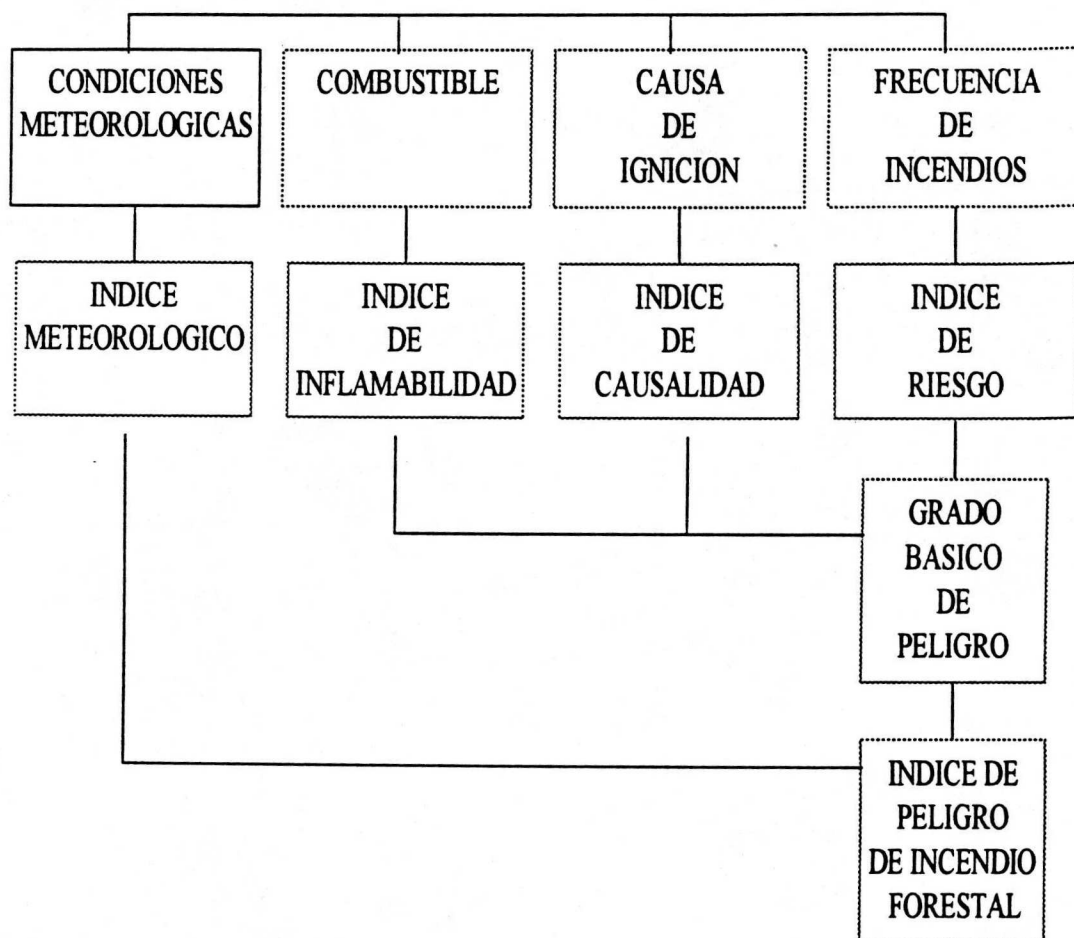


Figura 2. Estructura básica de un índice de peligro de incendio (Santillán, 1993).

El cálculo de los índices de peligro de incendio en el mundo, se basa en factores meteorológicos, existiendo múltiples variaciones en los sistemas de cálculo utilizados en los diferentes países, difiriendo a su vez por el grado de importancia o peso atribuido a los diferentes factores. Inclusive dentro de un mismo país existen varios sistemas diferentes, ya sea por las diversas regiones que forman el país o por el uso que se le da a los diferentes sistemas.

Las características más importantes usadas en los diferentes índices de peligro de incendio forestal usadas en el mundo se observan los siguientes rasgos (Magaña y Romahn, 1987):

1. El estado de la vegetación determina la inflamabilidad y la propagación del fuego, los factores meteorológicos influyen en mayor proporción en ese estado.
2. Disparidad en la amplitud de escalas, sin embargo, todos los sistemas utilizan la subdivisión en grados o clases de peligro para que sean más significativos.
3. Los factores meteorológicos considerados principalmente son: la precipitación, la humedad atmosférica y la velocidad del viento, aunque también se analizan la temperatura, la dirección del viento y la humedad del suelo.
4. Los aparatos de medición utilizados más comúnmente son: pluviómetro, psicrómetro y anemómetro, entre otros.
5. La aplicación de los índices está dirigida al conocimiento y divulgación del peligro, la regulación del uso del fuego en el bosque, la intensificación de las medidas preventivas, y la alerta de los medios de extinción.

2.2.1. Índice de peligro de incendio forestal en Norteamérica.

Las investigaciones sobre la influencia de los factores meteorológicos sobre el comportamiento de los incendios forestales se inicio por primera vez en los Estados Unidos de Norteamérica a principios de siglo XX (Martínez *et al.*, 1990). Basándose en la acumulación de la humedad relativa, fue desarrollado en forma sistemática por primera vez, un método para evaluar el peligro de incendio, identificándose de esta forma los períodos de peligro en forma general, teniendo únicamente la desventaja de que no era sensitiva a los cambios que ocurrían día a día (Figura 3).

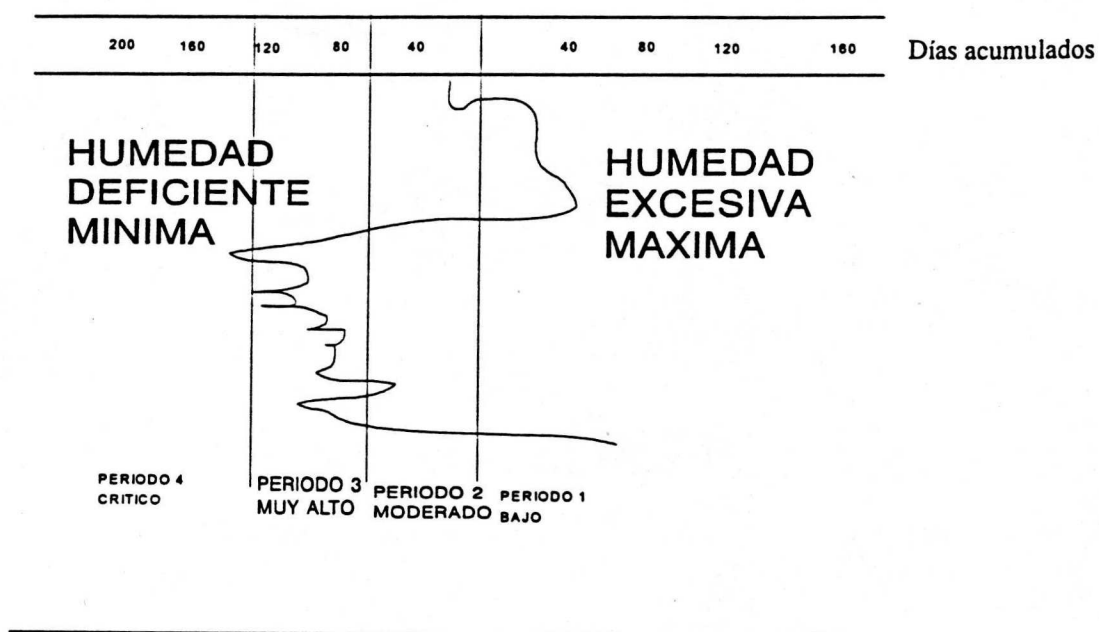


Figura 3. La relación entre la humedad relativa y el peligro de incendio (Shank, 1935).

Utilizándose por primera vez una escala para determinar el grado de peligro de incendio (Escala de Gisborne), se tomaron en cuenta 5 factores los cuales al medirlos y combinarlos daban un índice de peligro que determinaba la facilidad de combustión del material vegetal. Los cuales de acuerdo a Gisborne (1928, 1933) y Folweiler y Brown, (1946) fueron:

1. La estación del año, ya fuera que la vegetación inflamable estuviera verde o en un estado de transición.
2. La humedad del material combustible, determinándola para combustibles ligeros por medio de la humedad relativa del aire y para combustibles pesados mediante cilindros de albura de pino de 4.5 pulgadas de largo y ½ pulgada de diámetro.
3. Velocidad del viento.
4. El rango de visibilidad.
5. La actividad de los agentes que inician los incendios, principalmente los rayos.

Lo cual lo llevó a realizar un medidor de peligro de incendio que proporcionaba un índice numérico de peligro de incendio y debido al éxito se empezaron a desarrollar diferentes sistemas de medición, dependiendo de las características de cada región. En el año de 1953 se utilizaban en Estados Unidos los llamados medidores de peligro de incendio. Estos sistemas median 6 características principalmente que fueron: humedad del combustible, humedad relativa, velocidad del viento, estado herbáceo, riesgo y visibilidad (Figura 4).

Estos sistemas se utilizaron hasta el año de 1962 y todos como anteriormente se mencionó se basaban en la medición de la humedad del combustible y la velocidad del viento, no se tenía ningún sistema concordante en la evaluación de esos elementos o en el peso dado a ellos en las diferentes regiones de Estados Unidos. Por lo cual se decidió desarrollar un sistema nacional basado en la medición de los mismos factores, combinados del mismo modo, para originar un índice único. Lo cual originó el Sistema Nacional de Evaluación del Peligro de Incendios (The National Fire Danger Rating System) (Deeming *et al.*, 1972, 1975, 1978, 1988; Soares, 1972; Haines *et al.*, 1983).

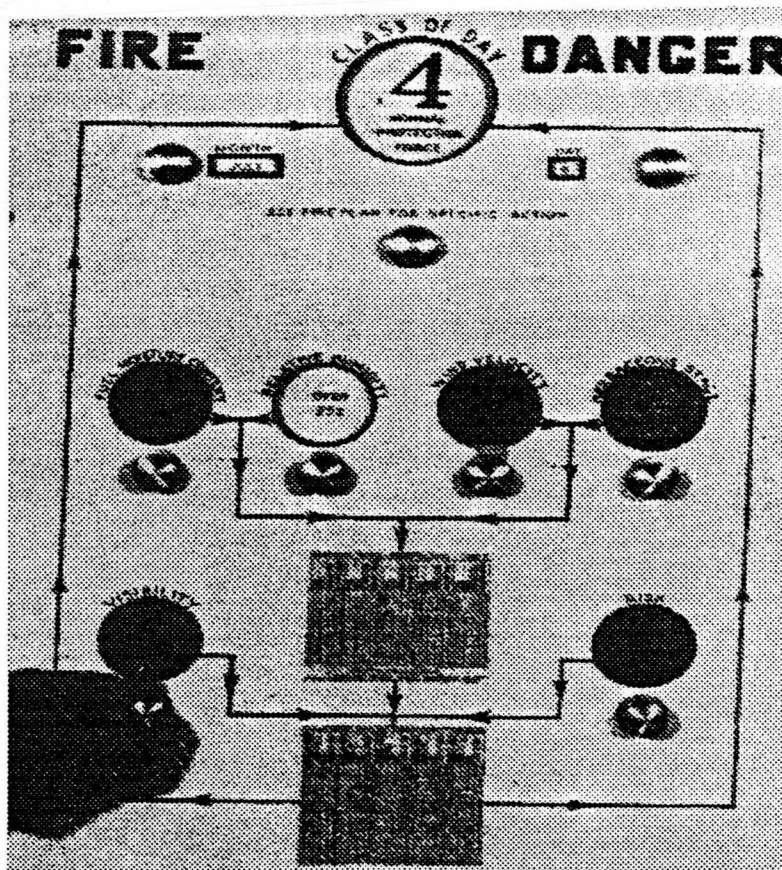


Figura 4. Un medidor del peligro de incendio igual a los que utilizaban en los Estados Unidos en el año de 1953 (Show y Clarke, 1953).

2.2.1.1. Metodología.

Para determinar el índice de peligro de incendio (The National Fire Danger Rating System) es necesario conocer: la ubicación de la estación y su altitud, el modelo de combustibles, riesgo de rayos, las temperaturas de los termómetros seco y húmedo, la precipitación diaria, así como su cantidad, duración y hora de inicio y término de esta, la velocidad del viento, sobre el tiempo (claro, nuboso, ventoso, etc.) , el estado de la vegetación inferior y el contenido de humedad del combustible muerto, toda la información con tiempo de retardo de 10 horas. El estado de la vegetación inferior puede presentarse en tres niveles: seca, verde e intermedia. Se considera seca cuando el 75 % o más esta muerta, en transición cuando el 25 al 75 % esta verde y verde cuando menos del 25 % esta muerta. Todas estas observaciones se realizan a las 13 horas del día.

La estructura fundamental para obtener dicho índice podemos observarla en la Figura 5 (Deeming *et al.*, 1972; Soares, 1972). La cual nos proporciona 3 tipos de índices que nos representa la conducta del incendio los cuales son evaluados del 1 al 100. Estos son definidos como siguen (Magaña, 1983):

1. Índice de ocurrencia. Es un número relacionado con la incidencia potencial de incendio dentro de un área evaluada.
2. Índice de quema. Es un número relacionado con la cantidad potencial de esfuerzo que se necesita para controlar un incendio en un tipo particular de combustible dentro de un área.
3. Índice de resistencia de incendio. Es un número relacionado con la cantidad total de esfuerzo requerido para contener todos los incendios probables que ocurren dentro de una área durante un período específico.

Para determinar el índice existen las siguientes tablas fundamentales (Anexo 1):

- Cuadros 1, 2 y 3 del Apéndice. Humedad del combustible fino para tres estados de vegetación inferior (seca, verde y transición). Las tablas psicrométricas que nos dan la humedad del combustible fino, según su estado. Cada una acompañada de una tabla que permite obtener un factor de sequía a partir de unidades del combustible fino. Son tablas de dos entradas: una columna que encuentra las diferencias de temperatura entre el termómetro seco y el húmedo y la segunda el porcentaje de humedad del combustible (Deeming *et al.*, 1972, 1975, 1978; Soares, 1972).

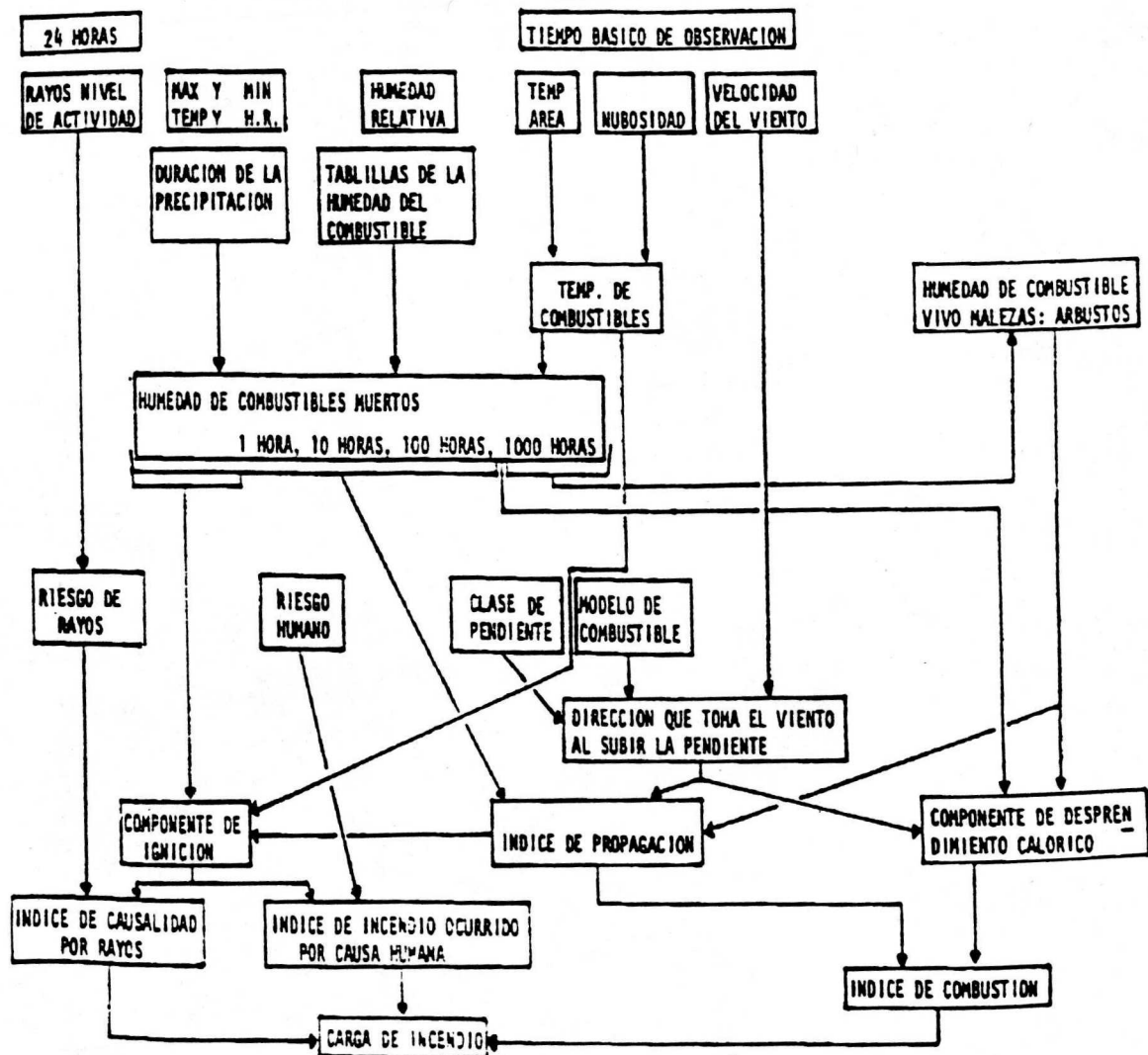


Figura 5. Estructura básica para la evaluación del grado de peligro de incendio forestal en los Estados Unidos (Deeming, 1978).

- Cuadro 4 del Apéndice. De índice acumulado corregido. De acuerdo con la curva ascendente o descendente y el índice del día anterior, se corrige el índice acumulativo y se toma el factor de sequía (número que se toma del lado inferior izquierdo de los Cuadros 1, 2 y 3 del Apéndice, obteniéndose el índice de peligro acumulado).
- Cuadro 5 del Apéndice. Unidades corregidas de combustible. Con el índice acumulado se corrige la humedad del combustible fino, dada de los Cuadros 1,2 y 3 del Apéndice (Deeming *et al.*, 1972, 1975, 1978; Soares, 1972).
- Cuadro 6 del Apéndice. Índice de propagación. La humedad corregida del combustible y la velocidad del viento que lee un índice definitivo (Deeming *et al.* 1972, 1975, 1978; Soares, 1972).

Se tienen nueve modelos de combustible, cada uno representa una amplia agrupación de tipos de combustibles con características comunes.

Para interpretar los índices de peligro de incendio determinados, al obtener los valores, estos se representan en 5 clases o grados de peligro (Cuadro 1).

Cuadro 1. Escala de índice de peligro de incendio forestal de los Estados Unidos.

Clase	Intervalos	Grado de peligro	Color correspondiente
1	0-4	Bajo	Verde
2	5-9	Moderado	Azul
3	10-19	Alto	Amarillo
4	20-39	Muy alto	Naranja
5	Más de 40	Extremo	Rojo

Fuente : (Deeming *et al.*, 1972, 1975, 1978; Soares, 1972).

Los comportamientos del fuego que se esperarían de acuerdo con las clases anteriores serían los siguientes (Deeming *et al.*, 1972, 1975, 1978; Soares, 1972):

- Clase 1 (Bajo). Los combustibles no se queman por aplicación de pequeñas fuentes de fuego, pero una fuente de calor mas intensa, como un rayo, podría comenzar pequeños incendios en residuos de madera caída. El fuego en pastos secos puede quemarse libremente unas cuantas horas y los incendios forestales si se presentan se propagan muy lentamente y estos se pueden controlar relativamente fácil.
- Clase 2 (Moderado). Los incendios pueden comenzar por causas accidentales, pero la mayoría a través de rayos. Los incendios en pastos secos se queman intensamente y se propagan muy fácilmente en días de mucho viento. Los incendios forestales se propagan muy lentamente. Estos requieren altas concentraciones de combustible. Los incendios generalmente no se tornan serios y se pueden controlar muy fácilmente.
- Clase 3 (Alto). Todos los combustibles finos se queman muy fácilmente y los incendios pueden comenzar rápidamente, pudiendo ser muchas las causas, desde una fogata que se puede escapar y comenzar el incendio rápidamente. Estos incendios se propagan rápidamente. Los incendios pueden tornarse serios y su control difícil. Por lo cual estos deben controlarse lo mas rápido posible.
- Clase 4 (Muy alto). Los incendios comienzan fácilmente provocado por cualquier chispa e inmediatamente se inicia y se propaga (aumenta de intensidad rápidamente). Se pueden quemar combustibles finos, medianos y pesados. Se recomienda atacarlo inmediatamente. Si es posible a los pocos minutos de haber iniciado.
- Clase 5 (Extremo). Los incendios inician rápidamente, y se propagan furiosamente. Todos los incendios son potencialmente serios. El ataque si es posible debe realizarse inmediatamente, estos se propagan en dirección de combustibles

pesados. En bosques de coníferas estos incendios son muy difíciles de manejar cuando permanecen condiciones extremas de quema.

2.2.2. Índice de peligro de incendio forestal en Canadá.

Los estudios para el establecimiento del Índice de Peligro de Incendio Forestal fueron iniciados en 1929, en la provincia de Ontario. En 1939 se utilizaban los índices en tres provincias y en los parques nacionales de la región occidental del Canadá. Las investigaciones continuaron por varios años hasta tener el sistema actual que se utiliza en Canadá (Canadian Forest Fire Weather Index), publicado en 1970 (Van Wagner, 1974; Soares, 1972; Turner y Lawson, 1978).

Los cálculos del índice de peligro se basan en el estado de la vegetación y su inflamabilidad, que a su vez dependen de los factores meteorológicos. De acuerdo a las condiciones climáticas, la vegetación estará en condiciones de incendiarse o no, y su potencial que tenga de propagación. Los estudios realizados para establecer el índice de peligro de incendio, primeramente usan la correlación entre la cantidad de humedad del combustible vegetal y en segundo lugar pero no menos importante, los factores climatológicos; por otra parte, se analiza el comportamiento de los incendios forestales reales y experimentales a la vez (Figura 6) (Soares, 1972).

Para determinar como se desecan los combustibles vegetales se experimenta de manera sistemática su humedad por medio de pesar el combustible y su desecación posterior en estufas, y a la vez se mide la humedad atmosférica. Los trabajos se han realizados en todo tipo de combustibles vegetales y los mas importantes son los que están más próximos al suelo, tales como hojas secas, ramillas caídas, matorrales, humus, turba, etc. Además se estableció una correlación entre la humedad atmosférica, lluvia y viento, según la estación del año (Soares, 1972).

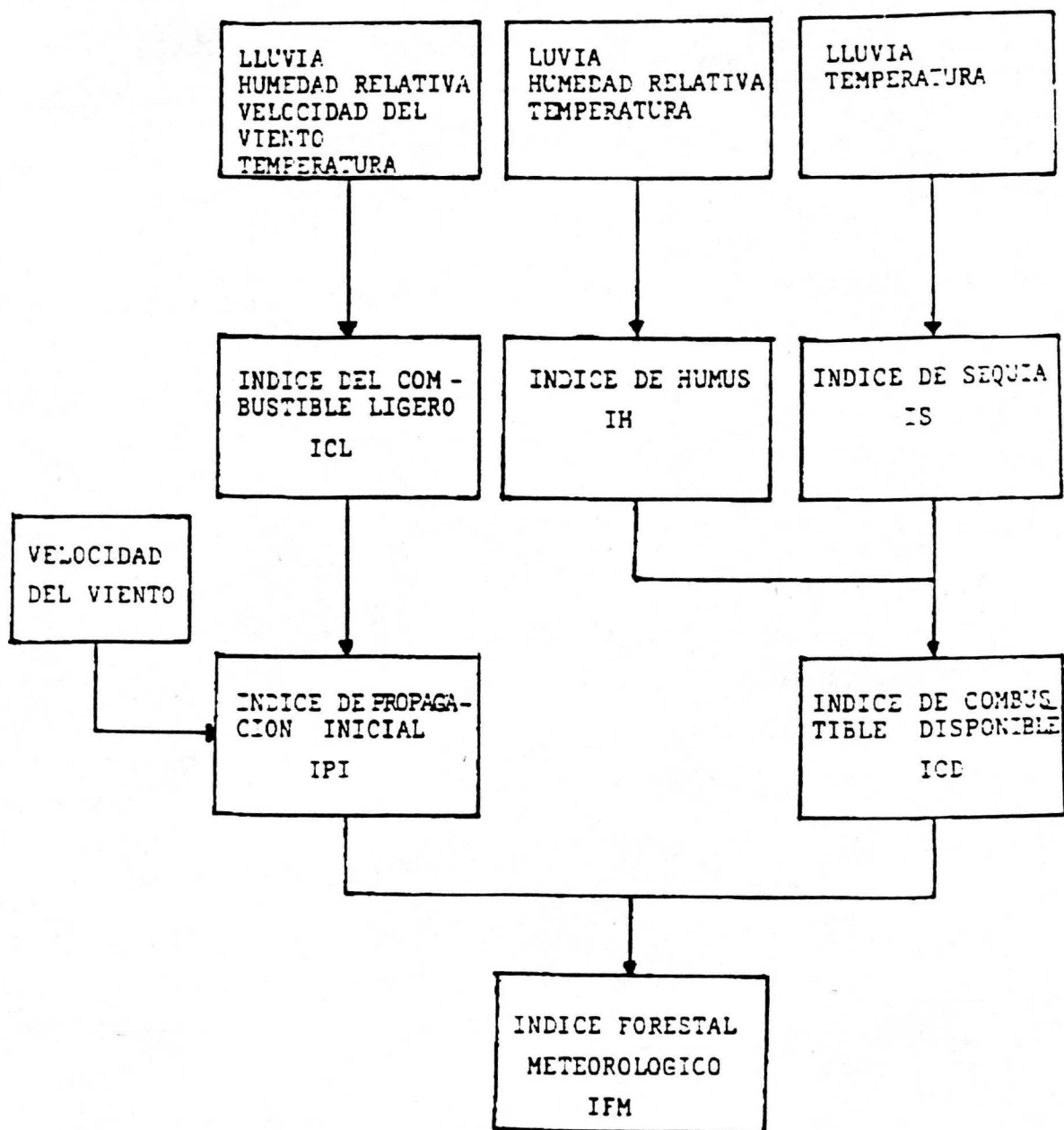


Figura 6. Estructura del peligro de incendios forestales Canadiense (Van Wagner. 1974).

La escala de peligro de incendio forestal se encuentra en un rango de 0 a 25, los cuales están asociados a una palabra como podemos ver en el Cuadro 2.

2.2.2.1. Métodos de cálculo.

Los datos que se consideran para la elaboración de los índices son las lecturas del estado atmosférico, que se toman cada día a las 12:00 y las cuales según Soares (1972), Alexander *et al.*, (1989) y Alexander y Grant (1993) son:

1. Temperatura
2. Humedad relativa
3. Velocidad del viento
4. Precipitación (las 24 horas anteriores)

Para la determinación del índice, existen las siguientes tablas fundamentales (Soares, 1972):

1. Tabla 1. Índice de sequía.
2. Tabla 2. Lluvia caída (de acuerdo a la cantidad de lluvia caída se corrige el índice inicial de peligro, transformado en una palabra clave).
3. Tabla 3. Unidades relativas y velocidad del viento (estos dos factores determinan la clave final).
4. Tabla 4. Índice de peligro o letra clave final (diferenciado por la estación del año).

El índice de incendio forestal consiste en seis componentes principales: tres primarios, dos intermedios, y finalmente uno que representa la intensidad de un incendio en un tipo de combustible modelo (Figura 6). Los tres componentes primarios son subíndices que siguen diariamente el contenido de humedad de tres clases de combustibles forestales a diferentes grados de secado. Los dos componentes intermedios son subíndices que representan la velocidad de propagación y la cantidad disponible de combustible (Magaña, 1983).

Cuadro 2. Escala de índice de peligro de incendio forestal para Canadá.

CLASE	GRADO DE PELIGRO	INDICE DE PELIGRO	DESCRIPCION
1	MUY BAJO	0	Libre en general de fuegos causados por el hombre. Los rayos pueden provocar incendios, pero los incendios de esta manera, aunque no se pueden apagar, no llegan a propagarse.
2	BAJO	1 - 4	Los incendios se propagan lentamente desde los montones de residuos de las cortas, de los campamentos y de otros posibles focos de fuego, pero son controlables muy fácilmente.
3	MODERADO	5 - 8	Los incendios se inician a menudo a causa del arrojamiento de cerillos y tienden a propagarse rápidamente según va aumentando su tamaño. Si la actuación es rápida no es difícil sofocarlos.
4	ALTO	9 - 12	Los fuegos se inician rápidamente a causa de cerillos encendidos o pueden producirse también a causa de rescoldos vivos o colillas de cigarrillos. La velocidad de propagación del fuego es rápida y es difícil dominarlos.
5	EXTREMO	13 - 16	El fuego puede ser causado por pequeñas chispas, que arden con intensidad y producen rápidamente nuevos incendios. A esta situación se le llama con frecuencia explosiva.

Fuente: Show y Clarke, 1953; Garrido, 1990.

2.2.3. Índice de peligro de incendio forestal en España.

En el año de 1956, se introdujo en España un sistema basado en el método Canadiense, que partiendo de datos de lluvia, humedad relativa y viento, proporcionaba mediante tablas un Índice de Peligro que indicaba si era necesario un foco calórico grande o pequeño para iniciar un incendio, así como la facilidad de propagación del mismo (Garrido, 1990).

Después se modificó este sistema para considerar el efecto de la sequía prolongada y de los vientos especialmente desecantes, y posteriormente se empezó a utilizar en comparación con el sistema anterior, uno desarrollado en Australia, que proporcionaba un Índice de Ignición y un Índice de Propagación (Figura 7).

El primero expresaba el estado de los combustibles y el segundo daba una estimación de la velocidad de la propagación. La escala de peligro de incendio forestal se encuentra en un rango de 0 a 13 o más y los cuales están asociados a un calificativo como podemos ver en el Cuadro 3.

2.2.3.1 Métodos de cálculo.

Para poder estimar el Índice de Peligro es necesario contar con los siguientes datos (los cuales se deben medir a las 12:00 del día) (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1982):

1. Lluvia caída. Es la lluvia total en las últimas veinticuatro horas anteriores al momento de hacer la medición, expresada en milímetros, aproximando la cifra de las décimas).
2. Humedad relativa del aire.
3. Duración de la sequía. Es el número de días consecutivos anteriores en los cuales la lluvia ha sido inferior a 1.3 mm.

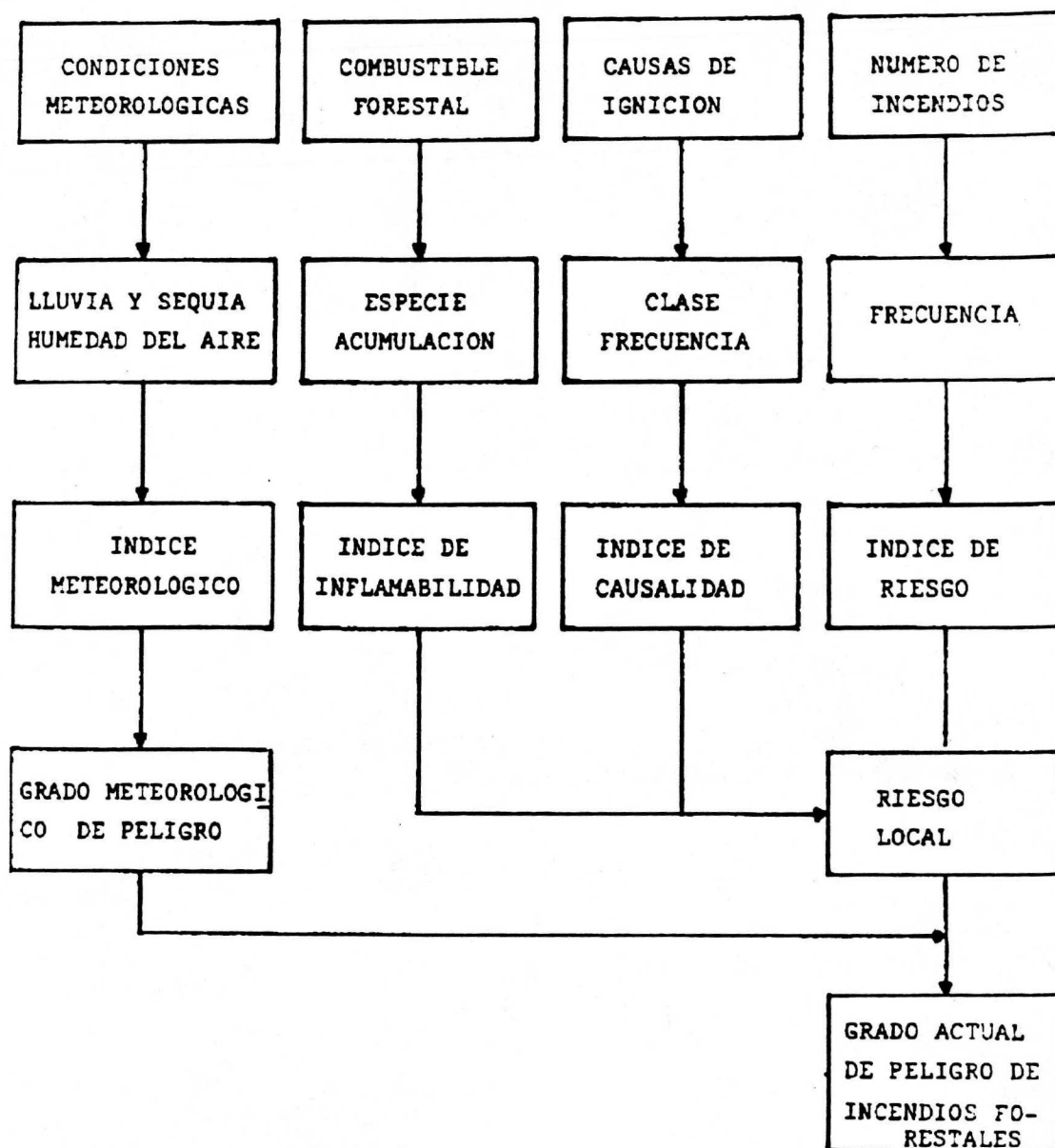


Figura 7. Estructura básica para la evaluación del grado de peligro de incendio forestal en España (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1982).

Cuadro 3. Escala de índice de peligro de incendio forestal para España.

INDICE	GRADO DE PELIGRO	SIGNIFICADO
0	Nulo	Generalmente no existe riesgo de incendios. Pueden ser originados por el rayo, pero su propagación es prácticamente nula.
1 - 4	Bajo	Los incendios pueden originarse por hogueras u otras fuentes caloríficas de alguna importancia. Se propaga lentamente y son de fácil extinción.
5 - 8	Moderado	Los incendios pueden originarse por cerillos y tienden a propagarse. No existen dificultades en su extinción si se actúa con rapidez.
9 - 12	Alto	Los incendios se inician a menudo por cerillos, brasas o puntas de cigarrillos. se propagan rápidamente y son de difícil extinción.
13 ó más	Extremo	Los incendios pueden producirse por pequeñas chispas que arden con intensidad propagando el fuego con gran violencia, su extinción es extraordinariamente difícil.

Fuente: Soares, 1972; Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1982.

4. Velocidad del viento. Es la velocidad en el momento de hacer las observaciones, expresada en kilómetros por hora.
5. Dirección del viento. Es el punto de la rosa de los vientos del cual procede el mismo en el momento de hacer las observaciones.

Para poder iniciar los cálculos cuando no se tiene datos anteriores, se puede partir de un índice de sequía igual a 3 y tomamos un índice de peligro igual a 8. Los índices calculados tendrán plena validez después de una semana de observaciones y cálculos (Soares, 1972).

El sistema propuesto comprende además de las tablas del método canadiense, una tabla de sequía prolongada y otra de vientos desfavorables (Soares, 1972; Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1982):

1. Tabla 1. Índice de sequía

Partiendo del índice inicial de sequía se determina el índice de sequía de hoy por la lluvia caída. para ello en la primera columna “ índice inicial de sequía”, se localiza el índice de sequía de ayer o el último calculado. En la misma línea y en la correspondiente columna de “altura de lluvia en milímetros” se determina el índice de sequía de hoy, que se registra en la gráfica de peligro.

2. Tabla 2. Lluvia caída

Constituye una primera corrección del índice de peligro. Partiendo del índice de peligro se determina la “ primera letra clave por la lluvia caída”. Para ello en la primera columna, “índice inicial de peligro”, se localiza el índice de peligro de ayer o el último calculado. En la misma línea y en la columna correspondiente de “altura de lluvia en milímetros se obtiene “la primera clave”.

3. Tabla 3. Humedad relativa y viento

Constituye la segunda corrección del índice de peligro. Partiendo de la “primera letra clave”, se determina la “ letra clave final” por la humedad relativa y el viento.

Para ello en la primera columna, “primera letra clave”, se busca la determinada en la tabla número 2 en la misma línea, y en la columna que se expresa conjuntamente la humedad y el viento, se encuentra la “ letra clave final”.

4. Tabla 4. Peligro de incendio

Constituye la tercera corrección del índice de peligro. Entrando en la tabla correspondiente al período del año en que se está con la letra clave final y el índice de sequía, se determina el índice de peligro del día.

5. Tabla 5. Sequía prolongada

Constituye una nueva corrección, dada la insuficiencia del índice de sequía canadiense. Proporciona un sumando que es preciso añadir al índice obtenido en la tabla número 4.

6. Tabla 6. Vientos desfavorables

En cada provincia se determina la dirección o direcciones de viento desfavorables que, por su sequedad o cualquier otra característica, aumenten el peligro de incendio (por ejemplo: viento sur en Santander, viento poniente en Valencia, etc.). Cuando soplen vientos de la dirección desfavorable prefijada, se obtendrá en esta tabla el sumando corrector correspondiente a la velocidad del viento. Se anotará a continuación en la gráfica, cuando deje de soplar el viento desfavorable se suprimirá el sumando corrector. Al obtenerse el índice corregido, éste se considera como definitivo.

2.2.4. Índice de peligro de incendio forestal en Francia.

El índice de peligro francés está localizado principalmente en Provenza y Córcega. En donde se ha desarrollado un sistema sencillo que permite establecer las llamadas alertas meteorológicas, que ponen en marcha a la sección forestal (Reifsnyder, 1977).

Este índice de peligro esta basado también en los factores climatológicos principalmente en el factor de sequía (donde se define como el déficit de agua del suelo) y el viento (que se toma principalmente su velocidad) (Reifsnyder, 1977).

La escala de peligro de incendio forestal se encuentra en un rango de 0 a 3 o más y los cuales están asociados a una palabra como podemos ver en el cuadro 4.

Cuadro 4. Escala de índice de peligro de incendio forestal para Francia.

ÍNDICE	PELIGRO	ALERTA
0	Muy moderado	no
1	Moderado	Sencilla
2	Elevado	Grave
3	Muy elevado	muy grave

Fuente: Reifsnyder (1977).

2.2.4.1. Métodos de cálculo.

Para calcular el índice de peligro de incendio, se utiliza una sola tabla (Cuadro 5) que relaciona la sequía con la velocidad del viento.

Para poder estimar el índice de peligro es necesario contar con los siguientes datos (Reifsnyder, 1977):

1. Sequía.

Es el déficit de agua en el suelo. Con ello se espera haber elegido un parámetro que siga diariamente la variación de la sequedad cuando no llueve, igual que cuando hay precipitaciones. También mide hasta que punto influyen en la sequía las lluvias torrenciales, pero fugaces, de los veranos mediterráneos. Este se calcula indirectamente a través de la humedad del suelo.

2. Viento.

Se toma en cuenta la velocidad principalmente y además su dirección, puesto que en estas regiones predominan los vientos secos.

Cuadro 5. Valor del índice de peligro de incendio forestal Francés.

	V	I	E	N	T	O
SEQUÍA	Menos de		De		Más de	
	20 Km/h		20 - 40 Km/h		40 Km/h	
Nula	0		0		0	
Bastante fuerte	1		1		2	
Fuerte	1		2		3	
Muy fuerte	1		2		3	

Fuente: Reifsnnyder (1977).

Otro índice de peligro de incendio en Francia lo desarrolló Trabaud en 1980, basado en una planta denominada *Brachypodium ramosum*. Este método consiste en coleccionar dos muestras de los extremos de las plantas, pesarlas y llevarlas a un laboratorio, que debe ubicarse a menos de un kilómetro del lugar donde se realizó la colecta. Las muestras se secan en una estufa a 80⁰ C y se pesan nuevamente. De esta manera se obtiene el contenido de agua de la planta y con ello se puede conocer la posibilidad de que ocurran incendios en ese día. Por ejemplo, cuando el contenido de agua de *Brachypodium ramosum* es superior a un 32 %, el número de incendios es reducido (Trabaud, 1980).

2.2.5. Índice de peligro de incendio forestal en la República de Corea.

En el año de 1991, se introdujo en la República de Corea un sistema basado en el análisis de las estadísticas de los incendios forestales que se presentaron en el período de 1987 a 1991 (Cuadro 6) tomando en cuenta el área donde se presentaron y el área dañada sirve para determinar el índice de peligro. Todo esto relacionado con las condiciones meteorológicas que se presentan.

Cuadro 6. Estadísticas de los incendios forestales en la República de Corea .

AÑO	NÚMERO DE INCENDIOS	ÁREA PERTURBADA ha	ÁREA DAÑADA (m ²)
1987	87	191	243
1988	270	878	3,383
1989	294	1 652	3,024
1990	71	175	323
1991	139	429	1,740

Fuente: Si, 1995.

La escala de peligro de incendio forestal se encuentra según las condiciones climáticas y las cuales están asociadas a una palabra como podemos ver en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Índice de peligro de incendio forestal para la República de Corea.

ALERTA	CONDICIONES CLIMÁTICAS
Alto	Humedad relativa: < 40 % Velocidad del viento: > 5 m/seg.
Medio	Humedad relativa : 41- 60 % Velocidad del viento: < 3 m/seg.
Bajo	Humedad relativa: > 60 % Velocidad del viento: < 3 m/seg.

Fuente: Si, 1995.

2.2.6. Índice de peligro de incendio forestal en la ex - Unión Soviética.

En la ex - Unión Soviética se tiene una gran evolución de los índices de peligro de incendio forestal y estos se encuentran muy divulgados, pero una característica que tienen en común los índices que se utilizan, es que estos están mas preocupados en

desarrollar el cálculo en términos de inflamabilidad que de propagación, como ocurre en otros países. Por este motivo en este país no usan para su cálculo directamente la velocidad del viento, ellos manejan los factores meteorológicos como datos accesorios (Soares, 1972).

Estos son algunos de los índices que se utilizan:

2.2.6.1. Índice de Nesterov.

El índice de Nesterov también conocido como de inflamabilidad, determina el grado de peligro de incendio a través de la sumatoria de los días que presentan peligro, basado en el déficit de saturación de cada día. La ecuación del índice es (Soares, 1972; Artybashev, 1986):

$$G = \sum_{i=1}^w (t_i - d_i)t_i \text{-----}(1)$$

donde:

G = es el índice de ignición.

w= es en número de días desde la última lluvia superior a 3 mm .

d = es la temperatura de punto de rocío °C (saturación del aire en milibares) y

t = es la temperatura del aire.

Estos datos deberán tomarse a las 13:00 hr. En los días en que se presenten lluvias el índice se tiene que corregir (Cuadro 8), puesto que las lluvias reducen el grado de inflamabilidad de la vegetación (Soares, 1972).

Cuadro 8. Restricciones del índice de Nesterov según la precipitación.

PRECIPITACIÓN	MODIFICACIONES EN EL CALCULO
mm	
0 - 2	Ninguna. Considerar que no llovió y continuar el cálculo normalmente.
2 - 5	Restar el 25% del valor calculado de P y sumar (d*t) del día: $G=0.75G$ de ayer + (d*t) de hoy.
5 - 8	Restar el 50% del valor calculado de G y sumar (d*t) del día: $G=0.5G$ de ayer + (d*t) de hoy.
8 -10	Abandonar la suma anterior de G y comenzar de nuevo el cálculo, es decir $G=(d*t)$ de hoy.
más de 10	Interrumpir el cálculo y comenzar en el día siguiente o cuando cese la lluvia, según las reglas del caso anterior.

Fuente: Magaña, 1983.

La escala de peligro de incendio forestal se encuentra según el valor de G y está asociado a una palabra como podemos ver en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Índice de peligro de incendio forestal para la ex Unión Soviética.

VALOR DE G	Grado de peligro
< de 300	Ninguno
300 - 500	Poco
500 - 1000	Medio
1000- 4000	Grande
> de 4000	Peligrosísimo

Fuente: Magaña, 1983; Artybashev, 1986.

2.2.6.2. Índice Higrotérmico.

En 1968 fue elaborado por Carkina el Índice Higrotérmico de peligro de incendios, en el cual se planteaba la siguiente fórmula (Soares, 1972):

$$K = n \left(\frac{c}{t} \right) \text{-----} (2)$$

donde :

K = Índice Higrotérmico de peligro;

n = Porcentaje de días sin lluvia en el mes;

c = Precipitación total en el mes; y

t = Suma de temperaturas diarias del mes.

Los valores de K se correlacionan con el número de incendios, formándose una curva hiperbólica que se dividió en 5 clases de peligro, variando de menos de 5 a mayores de 30.1 (Santillán, 1993).

2.2.6.3. Índice logarítmico de peligro de incendio.

En 1970 el ruso Helicyn desarrollo un índice logarítmico en el cual se plantea la siguiente fórmula:

$$\sum \log (t - r) \text{-----} (3)$$

donde:

t = es la temperatura en grados centígrados; y

r = es el punto de rocío.

Los datos se toman a las 13:00 hr cada vez que la lluvia de ese día fue igual o superior a 2.5 mm. Este índice mostró ser mejor que el de Nesterov, puesto que él toma en consideración el número de días del período sin precipitación. El índice de Nesterov, por otro lado, no procede de este modo y no da crédito al hecho de que el combustible se seca más rápidamente durante varios días fríos y secos, que durante pocos días calientes y secos.

2.3. Índices de peligro de incendio propuestos en México.

2.3.1. Determinación del índice de peligro de incendios forestales para Tlahuapan, Puebla.

En este trabajo se desarrolla un índice relacionado con la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el Municipio de Tlahuapan, Puebla. Con base en las condiciones climáticas locales, se identificaron los factores meteorológicos que ejercen mayor influencia en la ocurrencia de incendios. Las correlaciones de cinco variables climáticas y la ocurrencia de incendios dieron la pauta para encontrar, por medio de regresiones, los modelos matemáticos de predicción. Considerando los factores meteorológicos: temperatura del aire, temperatura máxima, precipitación, evaporación, velocidad de los vientos y la acumulación de ellos, en días previos a la ocurrencia de incendio, fueron establecidos doce ecuaciones de predicción. Con base en la prueba de F, el coeficiente de determinación (R^2) y la sencillez, se consideró que la ecuación de regresión más adecuada para detectar el peligro de incendio fue:

$$Y = -0.0016863(P3O) + 0.02362004(E7) + 0.01278057(V15) - 0.7409428 \text{-----}(4)$$

en donde:

Y = es el índice de peligro;

P3O = la precipitación acumulada en 30 días;

E7 = la evaporación para 7 días; y

V15 = el viento de 15 días.

La base de datos está constituida por información de 11 años de las variables mencionadas arriba en los días en que se presentaron incendios forestales.

Con los valores obtenidos para Y se generó una tabla de rangos o grados de peligro de incendio que aparecen en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Índice de peligro de incendio forestal para Tlahuapan, Puebla.

Valor del índice	Grado de peligro
Menos de 0.05	nulo
0.06 - 0.15	bajo
0.16 - 0.35	medio
0.36 - 0.55	alto
Más de 0.56	extremo

Fuente: Magaña, 1983.

2.3.2. Índice de peligro de incendio para el Estado de México.

En el Estado de México Marín y Borja (1984) elaboraron por municipio, los índices que denominaron de ocurrencia (Figura. 8), que se obtiene en función de la presencia de incendios, su frecuencia y su densidad. La fórmula básica es (Marín y Borja 1984):

$$N = \frac{\text{Número total de incendios}}{\text{Años considerados}} \text{-----}(5)$$

Que nos indica el número promedio o frecuencia de incendios para cada municipio, dividiendo el número total de ocurrencia entre los años considerados.

$$SA = \frac{\text{Superficie total afectada}}{\text{Años considerados}} \text{-----}(6)$$

Donde se determina la superficie promedio afectada para cada municipio.

$$P = \frac{\text{Superficie afectada}}{\text{Superficie total forestal}} \times 100 \text{-----}(7)$$

En el cual se conoce el porcentaje de superficie forestal afectada, relacionado la superficie forestal afectada con la superficie total forestal de cada municipio.

$$D = \frac{\text{Número de incendios}}{\text{Superficie total forestal}} \times 100 \text{-----}(8)$$

Esto se calcula para obtener la densidad de incendios en función a la superficie total forestal existente en cada municipio.

$$IO = P \times D \text{-----}(10)$$

que determina un parámetro que relaciona los valores calculados con anterioridad (P y D) y que determinarán con mayor precisión aquellos municipios en los que los incendios afectan con mayor rigor sus áreas forestales, a este parámetro se le denominó índice de ocurrencia de incendios (Figura 8). Donde; N es el número promedio por municipio, SA la superficie promedio afectada por municipio, P el porcentaje de superficie forestal afectada, D un índice de densidad y IO el índice de ocurrencia.

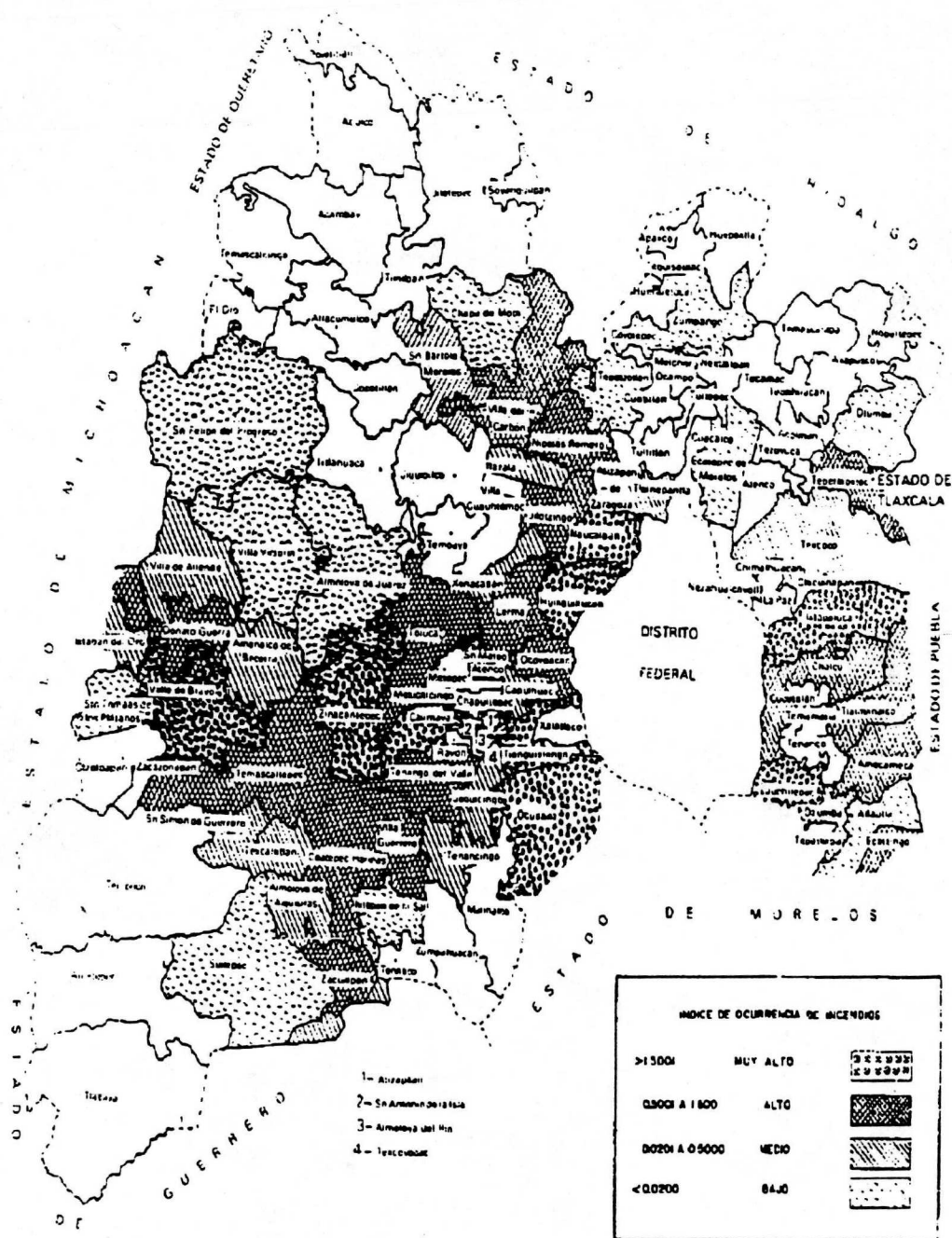


Figura 8. Índice de ocurrencia de incendios forestales para el Estado de México (Marín, 1984).

2.3.3. Índice de riesgo de incendio en la sierra de Tatalpa, Estado de Jalisco.

En esta investigación se realizó una clasificación y ubicación de áreas de acuerdo a su riesgo de incendio. En la región de la sierra de Tatalpa, Jalisco donde se trabajo en la toma de datos en 1988 y el procesamiento de la información en 1989, en 49 predios (agrupados en 8 conjuntos prediales), comprendidos en 8,068 hectáreas. En el cual se muestrearon 2 900 sitios. Para la clasificación del riesgo de incendio se tomaron los parámetros siguientes: Hojarasca, topografía, material combustible, vegetación, aprovechamiento, actividades agropecuarias y climatología (Martínez *et al.*, 1990).

De acuerdo a la información, se definieron tres índices de riesgo de incendio (bajo, medio y alto). Se identificaron los sitios de acuerdo a su índice de riesgo de incendio, con lo que se obtuvo la superficie y la ubicación de las áreas. Los resultados señalan que el 39 % correspondió a un índice bajo, el 38.4% a un índice medio y el 21.8% a un índice alto (Figura 9) (Martínez *et al.*, 1990).

2.3.4. Índice potencial de peligro de incendio en Topia, Durango.

En esta investigación se estudió la relación existente entre la cantidad de combustible presente en el área de "Topia" en el Estado de Durango, y el efecto de la intensidad del daño en la vegetación causado por los incendios forestales. En el cual se consideraron cinco niveles de combustible, de acuerdo a su distribución en el área de estudio. Las cuales fueron correlacionados con los daños de incendios ocurridos de abril a mayo de 1989 (Zapata, 1990).

Para ello se seleccionaron áreas de cada nivel contiguas a las áreas dañadas. Las cuales fueron uniformes en cuanto a altura sobre el nivel del mar, pendiente, exposición y asociación vegetal (Zapata, 1990).

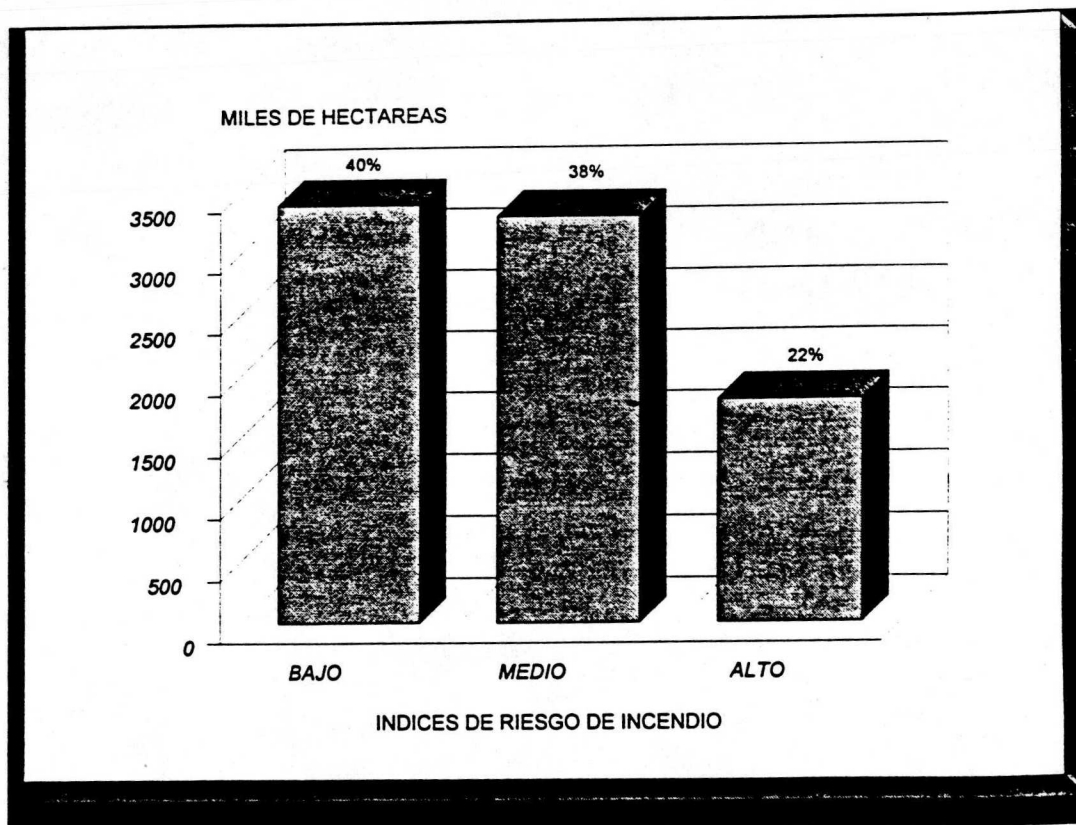


Figura 9. Frecuencia de índices de riesgo de incendio en ocho conjuntos prediales de la sierra de Tatalpa (Martínez *et al.*, 1990).

Se obtuvieron cinco índices de peligro potencial de incendios con los valores siguientes:

Cuadro 11. Índices de peligro de incendio forestal según Zapata (1990).

Índice de peligro	Cantidad de material combustible	Grado de peligro
Clase I	0 - 21 ton.	Bajo
Clase II	22 - 35 ton.	Moderado
Clase III	36 - 49 ton.	Alto
Clase IV	50 - 63	Muy Alto
Clase V	64 o más	Extremo

Fuente: Zapata, 1990.

2.3.5. Sistema para determinar indicadores de peligro de incendio forestal propuesto por Santillán en 1993.

En este sistema se propone un índice de peligro de incendio fundamentando principalmente en la información dasonómica y del sitio, que se obtiene de los inventarios del Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI). Dicho índice parte de cuatro valores, denominados grados de combustibilidad, que contempla profundidad de la capa orgánica, cobertura de vegetación baja, cobertura de arbustos y tipo de vegetación; Topográfico que incluye pendiente y exposición; de Causalidad conformado por uso del suelo y densidad de población y Meteorológico incluye período del año y número de días sin lluvia. Los tres primeros grados constituyen el grado espacial de peligro, y el último el grado meteorológico de peligro. Entre ambos se determina el grado de peligro de incendio forestal, mediante el uso de intervalos de valores en cada rubro (profundidad de la capa orgánica, cobertura de la vegetación, etc.), generalmente entre 0 a 5 (0 a 10 variables meteorológicas) mediante sumas de los valores consignados se obtiene finalmente el grado de peligro (Cuadro 12).

Cuadro 12. Índice de peligro de incendio propuesto por Santillán en 1993.

Grado de peligro	Color asociado	Estado de alerta
9 - 30	Verde	Bajo
31 - 45	Amarillo	Medio
46 - 60	Rojo	Alto

Fuente: Santillán, 1993.

2.3.6. Propuesta de metodología para obtener un sistema de predicción de peligro de incendio forestal para la República Mexicana.

Este trabajo se realizó basándose en el análisis de la revisión bibliográfica de los diferentes sistemas de predicción de peligro de incendios forestales, que se utilizan en diversos países, se compararon y eligieron los factores que se registran con mayor

frecuencia; ponderándolos de acuerdo con la frecuencia e importancia que representan dichos factores, en los incendios forestales en nuestro país (Garrido, 1990).

Se han señalado un esquema que comprende los mismos factores del sistema español, pero la forma de obtención del valor de los índices, se hacen en forma simple otorgándole valores de 1 a 5 y separando 3, 4 ó 5 categorías, según el caso (Cuadro 13).

Cuadro 13. Índice de peligro de incendio forestal para la República Mexicana.

Rangos	Grado de Peligrosidad
4 - 20	Bajo
21 - 40	Medio
41 - 60	Alto
61 - 80	Muy alto
81 - 100	Extremo

Fuente: Garrido, 1990.

Alvarado en 1986 realizó quemas experimentales en bosques de *Pinus montezumae*, en San Juan Tetla, Puebla, para estimar la velocidad de propagación del fuego utilizando el modelo propuesto por Rotermel en 1972, se concluyó que dicho modelo estimó eficazmente el comportamiento del fuego en función del combustible, topografía y tiempo atmosférico, aunque este trabajo es el primero que se realiza en México sobre el tema de comportamiento del fuego no se relaciona directamente en la elaboración de índices de peligro.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. 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).

3.2. Metodología

3.2.1. Área experimental

El área de quema fue de 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 hr. Se realizaron 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 *Pinus patula*) de 2 x 2 cm de ancho y grueso por 15 cm de largo, la medición se realizó en escala nominal en g.
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 %.
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).

3.2.2. Recopilación de datos.

Momentos antes de quemar 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 realizó para cada una de las tablillas antes de las quemas. 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 apartir de la ecuación 10.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100 \text{-----}(10)$$

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 de 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.

3.2.3. Procesamiento de datos.

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

En el presente trabajo se utilizó la siguiente nomenclatura: HP, representa la humedad de las probetas; T, representa la temperatura ambiente; HR, representa la humedad relativa y VP, representa la velocidad de propagación.

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

3.2.4. 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 .

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 al 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 variables restantes producen una F parciales significativas. En cada paso, la variable que muestra la contribución al modelo más pequeña 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 (Snedecor y Cochran, 1975).

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:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + e_i \text{ ----- (1)}$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + e_i \text{ ----- (2)}$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + e_i \text{ ----- (3)}$$

Con las variables al cuadrado:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1^2 + e_i \text{-----} (14)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1^2 + \beta_2 X_2^2 + e_i \text{-----} (15)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1^2 + \beta_2 X_2^2 + \beta_3 X_3^2 + e_i \text{-----} (16)$$

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

$$Y_i = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} X_3^{\beta_3} + e_i \text{-----} (17)$$

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

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \log X_1 + e_i \text{-----} (18)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \log X_1 + \beta_2 \log X_2 + e_i \text{-----} (19)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \log X_1 + \beta_2 \log X_2 + \beta_3 \log X_3 + e_i \text{-----} (20)$$

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 , y X_3 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 .

3.2.5. 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.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. 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 *P. 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 14; las mismas variables pero elevadas al cuadrado, en el Cuadro 15 y usando logaritmos en el Cuadro 16. Los factores que componen a cada modelo, así como su coeficiente de regresión se encuentran en los Cuadros 14, 15 y 16.

Una vez obtenidos los mejores modelos para las variables simples, variables al cuadrado y logarítmicas, se procedió a decidir cual era el superior para todos ellos. La determinación de cual de los modelos era el mejor, se hizo basándose en las pruebas de f , los coeficientes de determinación y la simplicidad que éstos presentarán.

4.2. 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 14, 15 y 16).

Al evaluar en base al 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 17).

El que todas las regresiones hallan 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 14. 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	de 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	0.001*	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 15. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores al cuadrado.

Fuente de variación	de 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 16. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores como logaritmos decimales.

Fuente de variación	de Variable	G.L	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f calculada	Prob>f	r ²
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 17. 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 = -.7164411306 + 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 mas 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:

$$VP = -3.930986631 + 0.181864120 HP + 0.282334532 T \text{-----}(21)$$

Donde:

VP = Velocidad de propagación;

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

T = Es la temperatura ambiente.

4.3. 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 18, 19 y 20).

Cuadro 18. 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	de Variable	G.L	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f calculada	Prob> f	r^2
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

Al evaluar en base en el coeficiente de determinación se encontró que 5 regresiones tienen los valores mas altos 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 pude decir que la mejor ecuación es la (6) 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 montezumae* tenemos un valor de r^2 de 0.7259 (Cuadro 18).

Cuadro 19. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores al cuadrado.

Fuente de variación	de Variable	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f calculada	Prob>f	r ²
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 20. Análisis de varianza de los modelos con 1, 2 y 3 variables usando los factores como logaritmos decimales.

Fuente de variación	de Variable	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f calculada	Prob>f	r ²
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

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 registraran la humedad relativa con lo cual se tendría mas precisión la probabilidad de propagación de un incendio.

Cuadro 21. Ecuaciones de los modelos de regresión *Pinus montezumae*.

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

De esta manera se escogió como mejor modelo la ecuación (2) por presentar una r^2 de .9726, 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:

$$VP = -5.145649256 + 0.082784911 HP + 0.350613924 T \text{-----}(22)$$

Donde:

VP = Velocidad de propagación;

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

T = Es la temperatura ambiente.

4.4. 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 9 y 10).

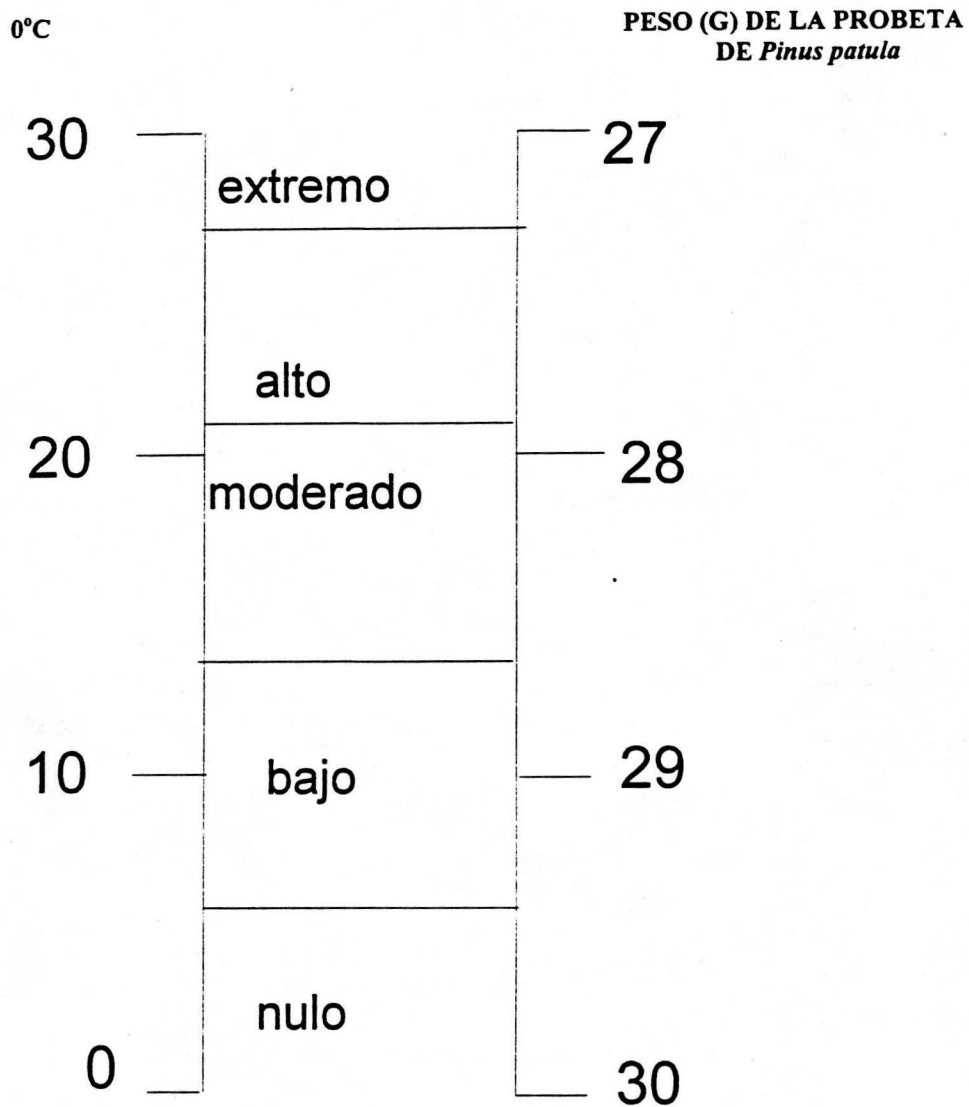


Figura 10. Nomograma para determinar el grado de peligro de incendio utilizando la humedad de la probeta de *Pinus patula*.

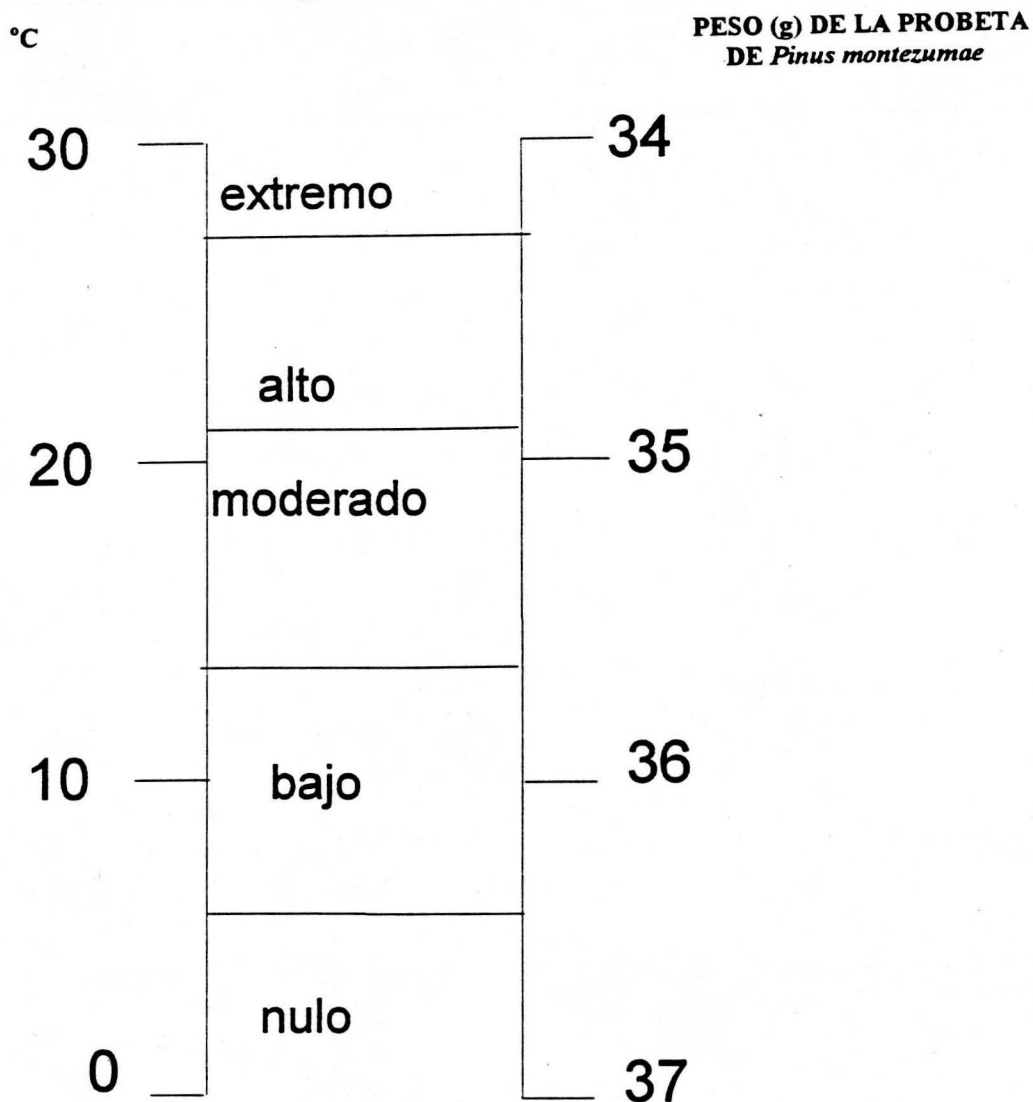


Figura 11. Nomograma para determinar el grado de peligro de incendio utilizando la humedad de la probeta de *Pinus montezumae*..

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

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

Cuadro 22. 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 serían los siguientes:

Clase I (Nulo). Generalmente no existe riesgo 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 cerillos 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.

4.4. 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 *P. montezumae*, que se toman 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:

$$Y = -3.930986631 + 0.181864120 \text{ HP} + 0.282334532 \text{ T}$$

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

$$Y = -3.930986631 + 4.910330754 + 8.47003596$$

$$Y = 9.4705$$

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

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 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 mas 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 este de lugares que tengan estaciones meteorológicas para la toma de datos. Puesto que cualquier persona pude realizarlo y tener alertas en ese mismo instante.**

6. LITERATURA CITADA

- ALVARADO, C.E. 1986. **Comportamiento del fuego en rodales poco perturbados de *Pinus montezumae***. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados, Montecillos, México. 113 p.
- ALEXANDER, E. A., GRANT, P.H. 1993. **The Canadian fire danger ratings**. Wildfire News-notes 7(2): 1-5.
- ALEXANDER, E.M., GROOT, J.W., HIRSCH, G.K., LANOVILLE, A.R. 1989. **Use of poster for interpreting behavior and danger research**. Fire Management Notes 50(2): 41-43.
- ARTYBASHEV, E.S. 1986. **Forest fires and their control**. Russian Tranlations series 15. Lesnaya Promysh Lennost Publishers; A.A. Balkema, Rotterdam. 160 p.
- BROWN, A.A. and 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
- COUNTRYMAN, M. C. 1966. **Rating fire by the multiple basic index system**. Journal of forestry. 64 (89): 531-536.
- DEEMING, E.J., LANCASTER, W.J., FOSBERG, A.M., FURMAN, W.R, SCHROEDER, J. M. 1972. **National Fire-Danger System**. USDA. Forest Service Research Paper RM-84. 53 p.
- DEEMING, E.J. and BROWN, K.J. 1975. **Fuel Models in the National Fire-Danger Rating System**. Journal of Forestry 73(6) : 348-350.
- DEEMING, E.J., BURGAN, E.J., COHEN, D.J. 1978. **The National Fire-Danger Rating System**. USDA. Forest Service. 69 p.
- DEEMING, E.J. 1988. **Fire-Danger Rating : the next 20 years**. Fire Management Notes 49(4): 3-8.

- FOLWEILER, D.A. and BROWN, A.A. 1946. **Fire in the forests of the United States.** John S. Swift. St. Luis Missouri. 189 p.
- 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.
- GISBORNE, H.T. 1928. **Measuring forest fire danger in Northern Idaho.** U.S.D.A. Misc. Publ. No. 29. 25 p.
- GISBORNE, H.T. 1933. **The wood cylinder method of measuring forest inflammability.** Journal of Forestry 31: 672-679.
- HAINES, A. D., MAIN, A.W., FROST, S.J., SIMARD, J.A. 1983. **Fire - Danger rating and occurrence in the Northeastern United states.** Forest Science 29 (4) : 679-696.
- IICA. 1985. **Redacción de referencias bibliográficas; normas oficiales del IICA.** 3a. Edición. Documentación e Información Agrícola No. 14. 57 p.
- LINDENMUTH, W.A. and NELSON, M.R. 1951. **Forest fire danger measurement in the United States.** Unasylva 5(4):19-51.
- 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.
- MAGAÑA, T.S.O. y ROMAHN, V.F.C. 1987. **Determinación del índice de peligro de incendios forestales para Tlahuapan, Puebla.** Ciencia Forestal. 12 (61):58-67.
- MAGAÑA, T.S.O. 1985. **Índices de peligro de incendios forestales.** Bol. Div. Inst. Invent. For. No.70. México. 15 p.

- MARÍN, CH. J. 1984. **Los incendios forestales en el Estado de México.** Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Bosques. 188 p.
- MARÍN, C.J. y BORJA, L.G. 1984. **Los incendios forestales en el Estado de México.** Revista Chapingo IX(43-44).
- MARTÍNEZ, G.A. Y CASTILLO, M.A. 1987. **Teoría de la regresión con aplicaciones agronómicas.** Colegio de Posgraduados. Montecillos, México 418 p.
- MARTÍNEZ, M.A., FLORES, G.F., BENAVIDES, S.J. 1990. **Índices de riesgo de incendio en la Sierra de Tapalpa, Estado de México.** Ciencia Forestal 15 (67):4-34.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN. 1982. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. 1982. **El Índice meteorológico de peligro de incendios forestales.** Mimeografiado. Madrid, España. 44 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. A. D. 1996. **Incendios forestales.** Universidad Autónoma Chapingo – Muni-Prensa. México, D.F. pp. 463-474.
- RODRÍGUEZ, T.A.D. 1994. **24 000 años de incendios forestales en México.** México y sus Bosques XXII(2-3): 16-26 p.
- REIFSNYDER, W. E. 1977. **A fire danger rating system for the Mediterranean Region.** FAO-UNESCO. Technical Consultation on Forest Fires, France. 73 p.
- 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.

- SHANK, H.M. 1935. **A measure of forest fire hazard in Central Idaho.** Journal of Forestry 33: 389-391
- SHOW, S.B. Y CLARKE, B. 1953. **La lucha contra incendios forestales.** FAO: Montes Roma 5: 131 p.
- SI, Y.L. 1995. **Forest fires: Backgroun, statistics, management and research.** International Forest Fire News. FAO. Roma, Italia. 13:16-17.
- SNEDECOR, W. G. Y COCHRAN, G.W. 1975. **Métodos estadísticos.** C.E.C.S.A. México D.F. 687 p.
- SOARES, V. R. 1972. **Indices de perigo de incêndio.** Revista floresta 3(3): 19-40 p.
- TRABAUD, L. 1980. **Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l'organisation, la structura 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.
- TURNER, J.A., LAWSON, B.D. 1978. **Weather in the Canadian forest fire danger rating system.** Canadian Forestry Service. Pacific Forest Research Centre. BC-x-177. Victoria, Canadá. 40 p.
- VAN WAGNER, C.E. 1974. **Structure of the Canadian forest fire weather index.** Canadian Forestry. Publication No. 1333. 43 p.
- VÉLEZ, R.M. 1968. **El índice de peligro de incendios forestales.** FAO: Montes 143: 419-447.
- 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.

7. APÉNDICE

Cuadro 1. Humedad del combustible fino (etapa seca herbácea).

Bulbo seco (°C)	TEMPERATURA DEL BULBO HUMEDO (GRADOS °F)									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	110	99	89	79	69	59	49	39	29	19
Porcentaje										
0	30	30	30	30	30	30	30 +	30 +	30	30 +
	+	+	+	+	+	+			+	
1	20	23	25	25	25	25	25	25	25	25
2	16	18	20	20	20	2	0	2	0	20
3	12	14	15	16	16	17	17	17	16	12
4	10	12	13	14	15	15	15	15	13	10
5	9	11	12	12	13	13	13	12	10	8
6	8	9.5	11	11	12	12	12	11	9	
7	7.5	9	9.5	10	10	10	9.5	7.5	7.5	
8	7	8.5	9	9.5	9.5	9.5	9.5	8.5		
9	6.5	8	8.5	9	9	9	9	7.5		
10	6	7.5	8	8.5	8.5	8.5	8	6		
11-12	5.5	6	7	7	7.5	7.5	6.5	6		
13-14	5	5.5	6	6	6	6	4			
15-16	4.5	5	5.5	5.5	5.5	5	4			
17-18	4	4.5	5	5	5	3				
19-20	4	4	4.5	4	4	2				
21-22	3.5	4	4	4	4	3				
23-24	3.5	3.5	3.5	3	2					
25-26	3	3	3.5	2		humedad de combustible		factor de corrección		
27-28	3	3	2.5	1.5						
29-30	2.5	2.5	2	1.5		16 ó más		0		
31-32	2.5	2.5	1.5			10.0 - 15.9		1		
33-34	2	2	1			7.0 - 9.9		2		
35-36	2	1.5	1			5.0 - 6.9		3		
37-38	1.5	1				4.0 - 4.9		4		
39-40	1	1				3.0 - 3.9		5		
41 ó más	1	1				2.9 ó menos		7		

Fuente: Deeming, 1972; Soares, 1972.

Cuadro 2. Humedad del combustible fino (Transición etapa herbácea).

Bulbo seco (°C)	TEMPERATURA DEL BULBO HÚMEDO (GRADOS °F)									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
(°C)	110	99	89	79	69	59	49	39	29	19
0	Porcentaje									
	30+	30+	30+	30+	30+	30 +	30 +	30 +	30 +	30 +
1	25	28	30	30	30	30	30	30	30	30
2	21	23	20	25	25	25	25	25	25	25
3	17	19	20	21	21	22	22	22	21	17
4	15	17	18	19	20	20	20	20	18	15
5	14	16	17	17	18	18	18	17	15	13
6	13	15	16	16	17	17	17	16	14	
7	13	14	15	15	15	15	15	15	13	
8	12	14	14	15	15	15	15	14		
9	12	13	14	14	14	14	14	13		
10	11	13	13	14	14	14	13	11		
11-12	11	11	12	12	13	13	12	11		
13-14	10	11	11	11	11	11	9			
15-16	9.5	10	11	11	11	10	9			
17-18	9	9.5	10	10	10	8				
19-20	9	9	9.5	9.5	9	7				
21-22	8.5	9	9	9	8					
23-24	8.5	8.5	8.5	8	7					
25-26	8	8	8	7.5	7	humedad de combustible				
27-28	8	8	7.5	6.5		factor de corrección				
29-30	7.5	7.5	7	6.5		21.0 ó mas				
31-32	7.5	7.5	6.5			15.0 - 20.9				
33-34	7	7	6			12.0 - 14.9				
35-36	7	6.5	6			10.0 - 11.9				
37-38	6.5	6				9.0 - 9.9				
39-40	6	6				8.0 - 8.9				
41 o más	6	6				7.9 ó menos				

Fuente: Deeming, 1972; Soares, 1972.

Cuadro 3. Humedad del combustible fino (verde etapa herbácea).

Cuadro 3. Humedad del combustible fino (verde etapa herbácea).

Bulbo seco (°C)	TEMPERATURA DEL BULBO HUMEDO (GRADOS °F)									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	a 110	a 99	a 89	a 79	a 69	a 59	a 49	a 39	to 29	a 19
Porcentaje										
0	30+	30+	30+	30+	30+	30 +	30 +	30 +	30 +	30 +
1	30+	30+	30+	30+	30+	30 +	30 +	30 +	30 +	30 +
2	26	28	30	30	30	30	30	30	30	30
3	22	25	25	26	26	27	27	27	26	20
4	20	22	23	24	25	25	25	25	23	20
5	19	21	22	22	23	23	23	22	20	18
6	18	20	21	21	22	22	22	21	19	
7	18	19	20	20	20	20	20	20	18	
8	17	19	19	20	20	20	20	19		
9	17	18	19	19	19	19	19	18		
10	16	18	18	19	19	19	18	16		
11-12	16	16	17	19	18	18	17	16		
13-14	15	16	16	16	16	16	14			
15-16	15	15	16	15	16	15	14			
17-18	14	15	15	13	15	13				
19-20	14	14	14	12	14	12				
21-22	13	13	12	12						
23-24	13	13	12							
25-26	12	12	11			humedad de combustible		factor de corrección		
27-28	12	12	11							
29-30	13	13	12			21.0 ó más		0		
31-32	13	13	12			15.0 - 20.9		1		
33-34	12	12	11			12.0 - 14.9		2		
35-36	12	12	11			10.0 - 11.9		3		
37-38	12	11				9.0 - 9.9		4		
39-40	11	11				8.0 - 8.9		5		
41 o más	11	11				7.9 ó menos		7		

Fuente: Deeming, 1972; Soares, 1972.

Cuadro 4. Construcción del Índice.

Índice del día anterior	TOTAL DE PRECIPITACIÓN EN 24 HORAS									
	0.11	0.21	0.31	0.51	0.71	0.91	1.21	1.81	2.21	2.81
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	0.20	0.30	0.50	0.70	0.90	1.20	1.20	2.20	2.80	
CORRECCION DEL INDICE										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 - 2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
3 - 5	3	3	3	2	2	1	0	0	0	0
6 - 9	6	6	5	4	3	2	1	0	0	0
10 - 15	10	10	8	6	5	4	2	1	0	0
16 - 20	16	14	12	9	7	5	3	2	1	0
21 - 25	21	18	15	12	9	6	3	2	1	0
26 - 30	26	22	18	14	10	8	4	2	1	0
31 - 35	31	26	21	16	12	9	5	3	1	0
36 - 40	35	30	23	18	14	10	5	3	1	0
41 - 45	40	34	26	20	15	11	6	3	2	0
46 - 50	44	37	29	22	16	12	6	3	2	0
51 - 60	50	42	32	24	18	13	7	4	2	0
61 - 70	58	48	37	26	19	14	8	4	2	0
71 - 80	67	54	40	29	21	15	9	4	2	0
81 - 90	76	58	43	31	23	16	9	4	2	1
91 - 100	80	64	46	33	24	17	9	5	3	1
101 - 120	92	69	50	35	25	18	10	5	3	1
121 - 150	160	76	54	37	27	19	10	5	3	1
151 - 200	126	86	58	39	28	20	11	5	3	1
201 - 250	140	95	65	42	29	21	11	6	4	1
251 - 300	155	105	70	45	30	22	12	6	4	1
301 - 400	185	115	75	48	32	23	12	6	4	1
401 +	230	135	80	50	35	24	13	7	4	1

Fuente: Deeming, 1972; Soares, 1972.

Cuadro 5. Ajuste de la humedad del combustible.

Cuadro 5. Ajuste de la humedad del combustible.															
Construcción del índice	PORCENTAJE DE HUMEDAD EN COMBUSTIBLE FINO														
	1	1.5	2	2.5	3.5	4.5	5.5	7.5	9.5	12	15	18	21	26+	
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
	3	4	5	7	9	11	14	17	20	25	30	35	40	45	
0 1- 5 6- 12 13 - 19 20 - 29 30 - 39	PORCENTAJE														
	11	11	12	12	13	14	16	17	19	22	24	27	30 +	30 +	
	10	11	11	12	13	14	15	17	19	21	24	27	30	30 +	
	9.5	10	10	11	12	13	14	16	18	20	23	26	29	30 +	
	8.5	9	9.5	10	11	12	13	15	17	19	22	25	28	30 +	
40 - 49	5.5	6	6.5	7	8	9	10	12	14	16	19	22	25	28	
50 - 69	4.5	5	5.5	7	7	8	9	11	13	15	18	21	24	27	
70 - 89	3.5	4	4.5	5	6	7	8	10	12	14	17	20	23	26	
90 - 99	3	3.5	4	5.5	5.5	6	7.5	9.5	11	14	16	19	23	26	
100 - 149	2	2.5	3	4	4.5	5.5	7	8.5	10	13	16	18	22	25	
150 - 199	2	2.5	3	3.5	4	5	6.5	8	10	13	15	18	22	25	
200 - 399	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	18	21	24	
400 +	1	1.5	2	3	3.5	4.5	6	7.5	9.5	12	15	17	21	24	

Fuente: Deeming, 1972; Soares, 1972.

Cuadro 6. Extensión del índice.

% de humedad del combustible	VELOCIDAD DEL VIENTO (MPH 20)															
	0-1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11-12	13-15	16-19	20-24	25-29	30 +
	INDICE															
30 +	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29-30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	4	5	6
27-28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	5	6	8	0
25-26	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4	6	7	8	9	11	13
23-24	1	2	3	3	4	4	5	6	7	8	10	8	11	13	15	17
21-22	2	3	4	5	6	7	8	8	10	11	13	11	15	17	20	22
20-29	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	17	15	19	22	25	29
17-18	6	8	9	10	11	12	13	15	16	18	21	18	24	28	32	36
15-16	8	10	11	12	14	15	17	19	20	22	26	22	30	34	39	44
14	9	11	12	14	16	18	20	21	22	23	26	30	34	39	44	51
13	10	12	14	16	18	20	21	23	25	26	28	33	37	43	48	56
12	11	13	15	17	19	21	23	25	27	26	31	36	41	47	53	62
11	12	15	17	19	21	23	25	27	29	31	34	39	44	51	58	68
10	13	16	18	20	22	25	27	29	31	33	37	42	48	53	63	73
9.5	14	17	19	21	23	26	28	30	33	35	38	44	50	58	66	76
9	14	17	20	22	24	27	29	32	34	36	40	46	52	60	68	79
8	15	18	21	23	25	28	30	33	36	38	42	47	54	63	71	83
8.5	15	19	22	24	26	29	31	34	37	39	43	49	56	65	74	86
7.5	16	19	22	25	28	30	33	35	38	40	45	51	58	67	76	89
7	17	20	23	25	28	31	34	37	39	42	46	53	60	69	79	93
6.5	17	21	24	26	29	32	38	38	40	43	48	54	62	72	82	96
6	18	22	25	27	30	33	39	39	42	45	50	56	64	74	85	99
5.5	18	22	25	28	31	35	41	41	44	47	51	58	66	77	88	100
5	19	23	26	29	32	36	39	42	46	48	53	60	69	79	91	100
4.5	20	24	27	30	33	37	40	43	47	50	55	62	71	82	94	100
4	21	24	28	31	34	38	41	45	48	51	57	64	73	84	97	100
3.5	21	25	29	31	32	35	39	42	46	49	53	58	66	75	100	100
3	22	26	30	33	36	40	43	47	50	54	60	66	77	89	100	100
2.5	23	27	31	34	38	42	45	49	52	56	62	70	80	92	100	100
2	24	28	32	35	39	43	46	50	54	58	64	72	82	94	100	100
1.5	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	65	74	84	97	100	100
1	25	29	33	37	41	45	49	53	57	61	67	76	86	100	100	100

Fuente : Nelson, 1964; Soares, 1972.

CORRIDAS EN SAS PARA *Pinus patula* USANDO LOS FACTORES SIMPLES

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: VP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	12.98252517	4.32750839	237.25	0.0001
Error	14	0.25536927	0.01824066		
Corrected Total	17	13.23789444			
	R-Square	C.V.	Root MSE	VP Mean	
	0.980709	3.730311	0.1350580	3.62055556	

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
T	1	12.71380371	12.71380371	697.00	0.0001
HR	1	0.11564248	0.11564248	6.34	0.0246
HP	1	0.15307899	0.15307899	8.39	0.0117

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
T	1	0.27600286	0.27600286	15.13	0.0016
HR	1	0.01185199	0.01185199	0.65	0.4337
HP	1	0.15307899	0.15307899	8.39	0.0117

Parameter	T for H0: Pr > T		Std Error of	
	Estimate	Parameter=0	Estimate	
INTERCEPT	-3.294981932	-2.94	0.0108	1.12109705
T	0.242610560	3.89	0.0016	0.06236964
HR	0.019562962	0.81	0.4337	0.02426941
HP	0.160323275	2.90	0.0117	0.05534254

Dependent Variable: VP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	12.97067318	6.48533659	364.04	0.0001
Error	15	0.26722126	0.01781475		
Corrected Total	17	13.23789444			
	R-Square	C.V.	Root MSE	VP Mean	
	0.979814	3.686504	0.1334719	3.62055556	

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
T	1	12.71380371	12.71380371	713.67	0.0001
HP	1	0.25686947	0.25686947	14.42	0.0018

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
T	1	0.99496010	0.99496010	55.85	0.0001
HP	1	0.25686947	0.25686947	14.42	0.0018

Parameter	T for H0: Pr > T		Std Error of		
	Estimate	Parameter=0	Estimate		
INTERCEPT	-3.930986631	-4.99	0.0002	0.78708565	
T	0.282334532	7.47	0.0001	0.03777905	
HP	0.181864120	3.80	0.0018	0.04789395	

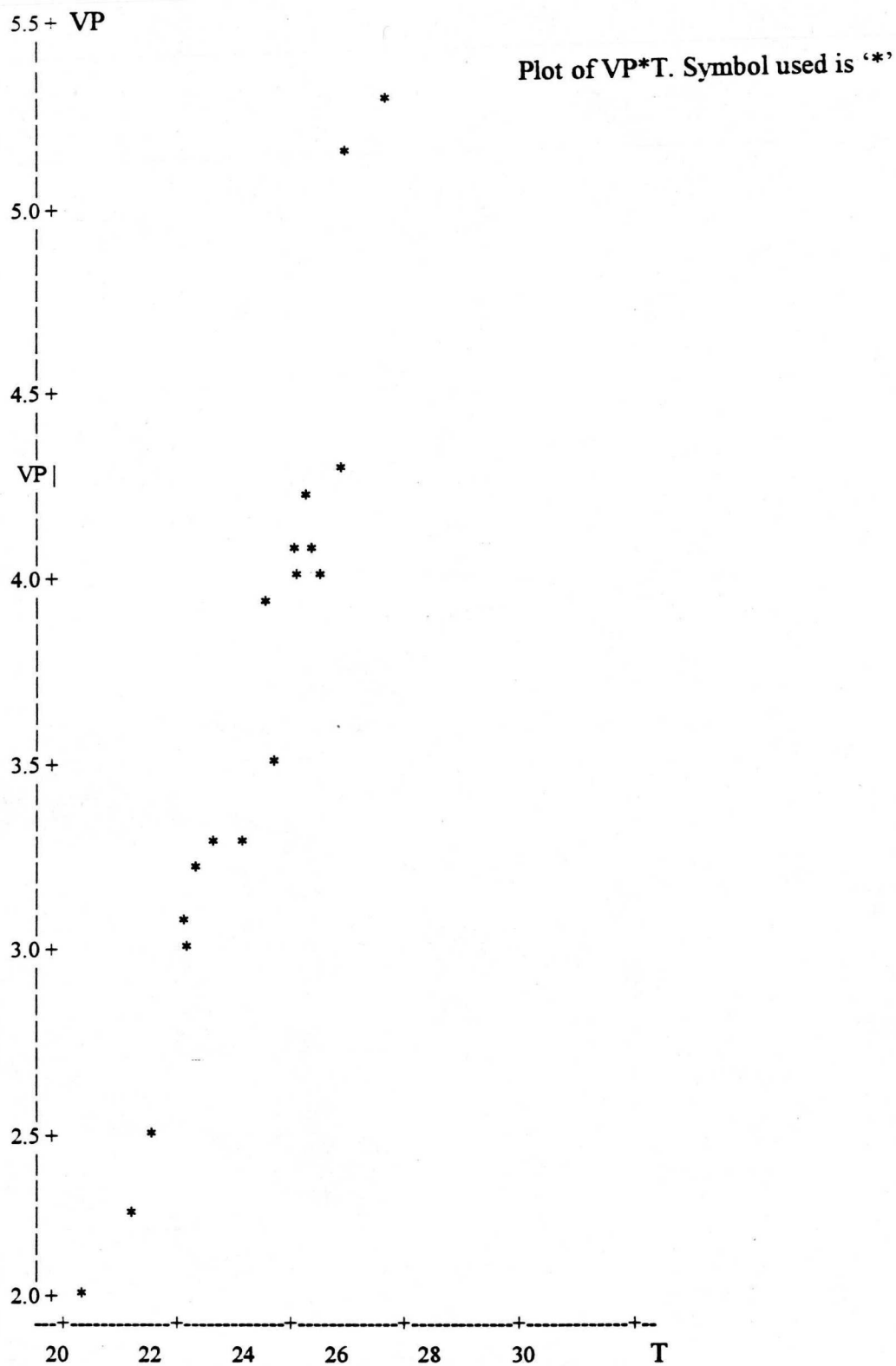


Figura 12. Relación entre velocidad de propagación (VP) y temperatura (T).

Dependent Variable: VP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	11.97571308	11.97571308	151.81	0.0001
Error	16	1.26218137	0.07888634		
Corrected Total	17	13.23789444			
		R-Square	C.V.	Root MSE	VP Mean
		0.904654	7.757569	0.2808671	3.62055556

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HP	1	11.97571308	11.97571308	151.81	0.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HP	1	11.97571308	11.97571308	151.81	0.0001

Parameter	T for H0: Estimate	Pr > T	Std Error of Estimate	Parameter=0
INTERCEPT	1.926119661	12.62	0.0001	0.15262749
HP	0.508415504	12.32	0.0001	0.04126378

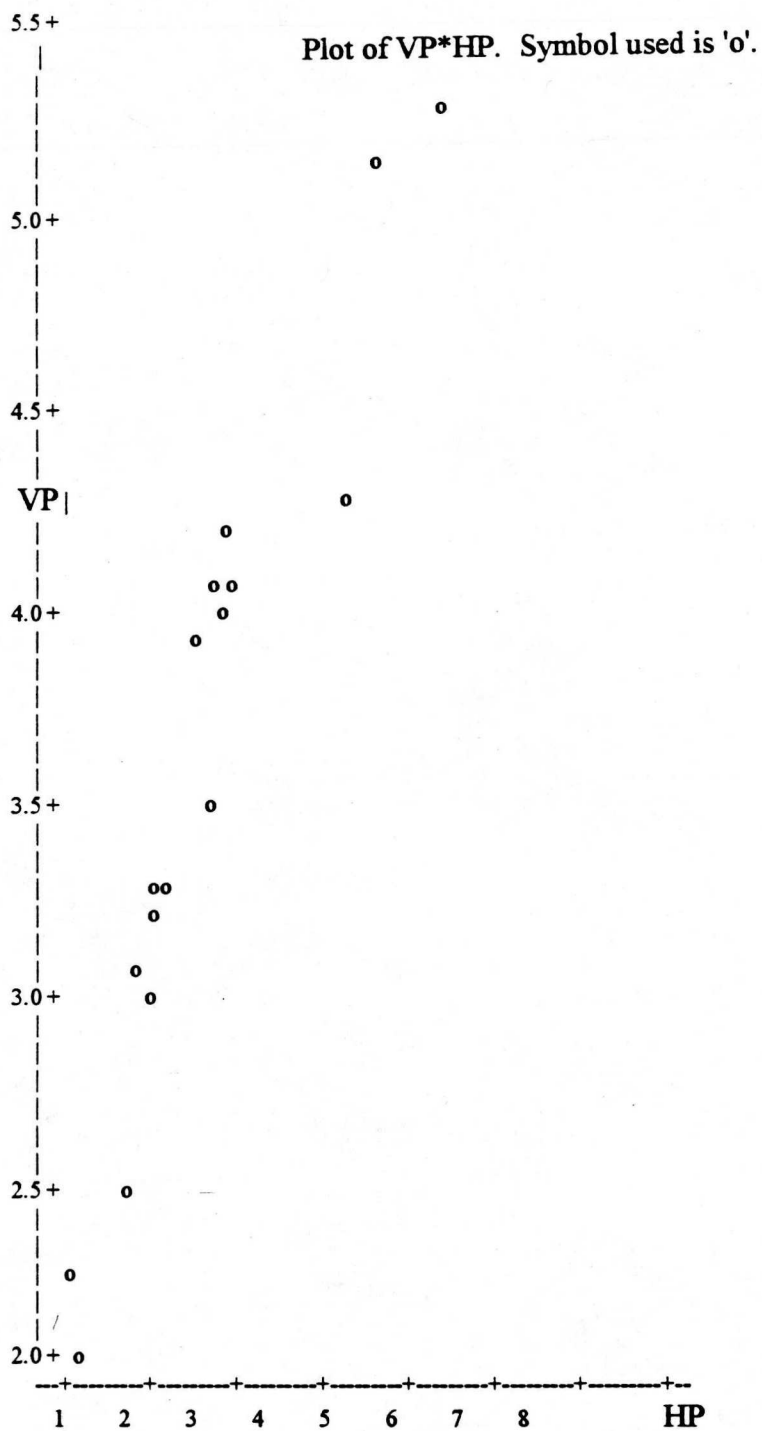


Figura 13. Relación entre la velocidad de propagación (VP) y la humedad de la probeta (HP).

CORRIDAS EN SAS PARA *Pinus montezumae* USANDO LOS FACTORES SIMPLES.

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: VP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	12.88954763	4.29651588	172.68	0.0001
Error	14	0.34834682	0.02488192		
Corrected Total	17	13.23789444			
	R-Square	C.V.	Root MSE	VP Mean	
	0.973686	4.356791	0.1577400	3.62055556	

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
T	1	12.71380371	12.71380371	510.97	0.0001
HR	1	0.11564248	0.11564248	4.65	0.0490
HP	1	0.06010144	0.06010144	2.42	0.1425

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
T	1	0.38281566	0.38281566	15.39	0.0015
HR	1	0.01393557	0.01393557	0.56	0.4666
HP	1	0.06010144	0.06010144	2.42	0.1425

Parameter	T for H0: Pr > T		Std Error of		
	Estimate	Parameter=0	Estimate		
INTERCEPT	-4.327554654	-3.32	0.0051	1.30365617	
T	0.298475839	3.92	0.0015	0.07609502	
HR	0.023527313	0.75	0.4666	0.03143779	
HP	0.063901678	1.55	0.1425	0.04111608	

Dependent Variable: VP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	12.87561206	6.43780603	266.55	0.0001
Error	15	0.36228238	0.02415216		
Corrected Total	17	13.23789444			
	R-Square	C.V.	Root MSE	VP Mean	
	0.972633	4.292425	0.1554096	3.62055556	

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
T	1	12.71380371	12.71380371	526.40	0.0001
HP	1	0.16180836	0.16180836	6.70	0.0206

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
T	1	3.26511931	3.26511931	135.19	0.0001
HP	1	0.16180836	0.16180836	6.70	0.0206

Parameter	Estimate	T for H0: Pr > T Parameter=0	Std Error of Estimate		
INTERCEPT	-5.145649256	-7.35	0.0001	0.69980483	
T	0.350613924	11.63	0.0001	0.03015488	
HP	0.082784911	2.59	0.0206	0.03198370	

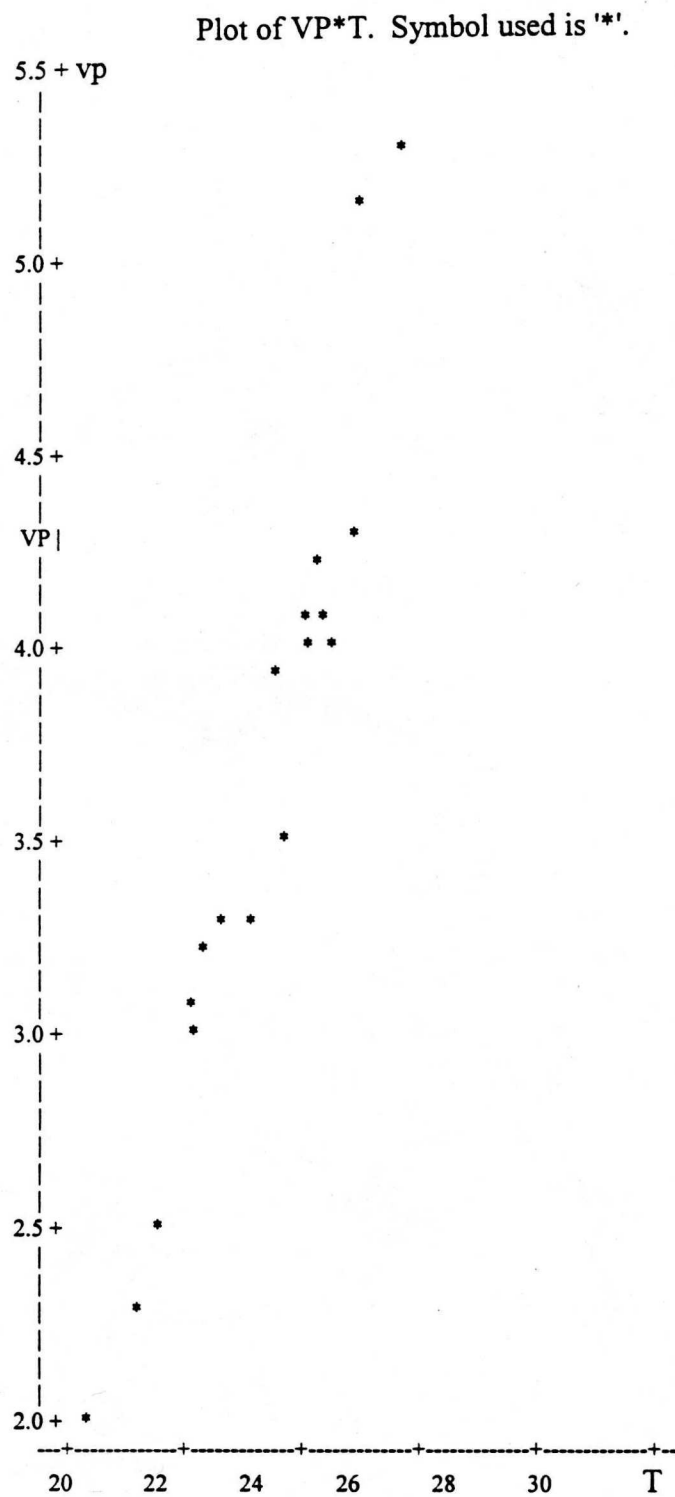


Figura 14. Relación entre la velocidad de propagación (VP) y la temperatura (T).

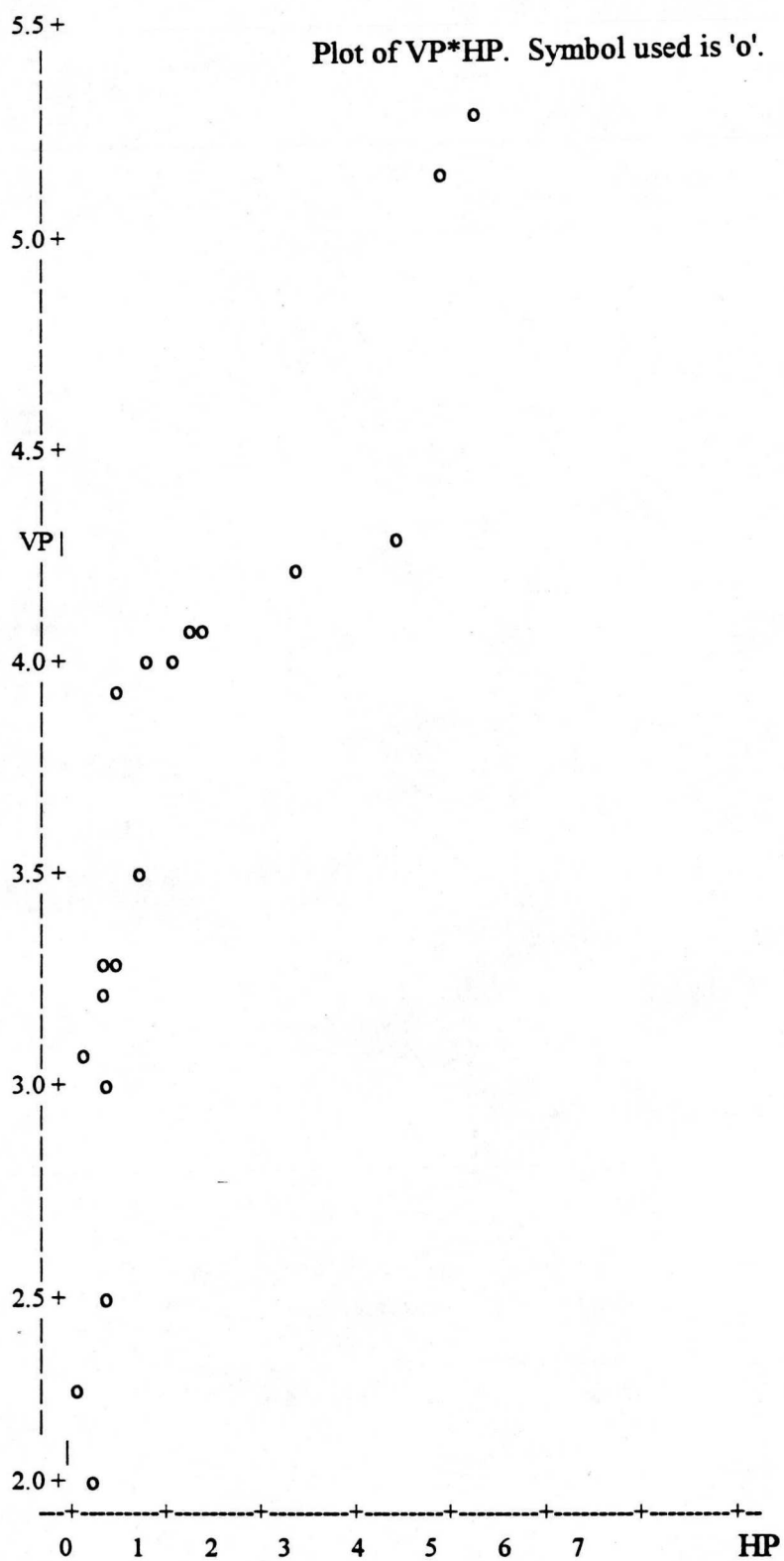


Figura 15. Relación entre la velocidad de propagación (VP) y la humedad de la probeta (HP).

Dependent Variable: VP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	9.61049275	9.61049275	42.39	0.0001
Error	16	3.62740169	0.22671261		
Corrected Total	17	13.23789444			

R-Square	C.V.	Root MSE	VP Mean
0.725983	13.15112	0.4761435	3.62055556

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HP	1	9.61049275	9.61049275	42.39	0.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HP	1	9.61049275	9.61049275	42.39	0.0001

Parameter	Estimate	T for H0: Parameter=0	Pr > T	Std Error of Estimate
INTERCEPT	2.971076356	19.79	0.0001	0.15015326
HP	0.381050378	6.51	0.0001	0.05852581

