

Diseño de índices de riesgo de incendios forestales para Chile

Design of forest fire risk indices for Chile

C.D.O.: 453

GUILLERMO JULIO

Instituto de Manejo Forestal
Universidad Austral de Chile, Casilla 853, Valdivia

SUMMARY

A forest fire risk system is proposed, based on a study of the factors that influence the probability of occurrence. Information concerning meteorology, population, vegetation and topography was gathered in order to analyze their relation with the occurrence of about 20.000 forest fires during a four-year period (1985-88).

The most efficient functions for estimating fire risks were the multiple linear regressions with five independent variables (temperature, relative humidity, wind speed, drought and seasonality) and the occurrence probability as a dependent variable.

A very high confiability level was obtained by the indices. However, is necessary to validate the indices in two or three years, starting with data recorded in 1989.

RESUMEN

Se propone un sistema de índices de riesgo, construido en base a los factores que afectan a la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en Chile.

Para tal propósito se recolectaron antecedentes meteorológicos, poblacionales, vegetacionales y topográficos, a fin analizar su grado de asociación con alrededor de 20.000 incendios forestales registrados en cuatro temporadas (1985-88).

Las funciones obtenidas más eficientes resultaron ser regresiones lineales múltiples con cinco variables independientes (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, sequía y estacionalidad) y, como variable dependiente, la probabilidad de ocurrencia.

Las pruebas estadísticas otorgaron un muy alto nivel de confiabilidad a los índices; no obstante, se estima necesario que en un plazo de dos o tres años sean nuevamente validados con los antecedentes que en la materia se generaron a contar de 1989.

1. INTRODUCCION

La estimación de la probabilidad de ocurrencia o riesgo de incendios forestales, como componente de un sistema de evaluación del grado de peligro, constituye un aspecto de gran importancia en el manejo del fuego (Van Wagner, 1974).

Actividades como la prevención y el combate, deben apoyarse en un indicador de tal naturaleza, porque permite orientar la aplicación de medidas tendientes a evitar la iniciación de focos de fuego y, además, para disponer oportunamente de los recursos necesarios para el control de esos mismos focos, ante la eventualidad que definitivamente se produzcan (Brown y Davis, 1973).

Turner *et al.* (1961) comprobaron la estrecha relación existente entre las condiciones meteorológicas y la ocurrencia, cuando a pedido de la World Meteorological Organization estudiaron los siste-

mas de evaluación del grado de peligro en 17 países. La conclusión fue muy clara: en todas las regiones de la tierra el estado atmosférico afecta decisivamente la iniciación y propagación de los incendios forestales.

La actividad humana también afecta a la probabilidad de ocurrencia. Los estudios desarrollados por el Servicio Forestal de los Estados Unidos así lo confirmaron, y es la razón por la cual este factor fue incorporado al National Fire Danger Rating System, que se implantó en ese país (Deeming *et al.*, 1972).

En Chile se han llevado a cabo diversos esfuerzos por diseñar índices para la evaluación del grado de peligro de incendios forestales. Al respecto cabe destacar los trabajos efectuados por Julio (1968), Urzúa (1969), Ferreira (1970), Dieterich (1973) y Paredes (citado por Julio, 1979). Sin embargo, en todos los casos la solución propuesta no fue totalmente satisfactoria.

Por tal razón, en el Programa Nacional de Investigaciones para el Manejo del Fuego, que impulsado bajo la acción conjunta de la Corporación Nacional Forestal, empresas Forestales y Universidades, se consideró conveniente abordar este tema. En tal sentido se definió como una línea de estudio el diseño de un sistema nacional de evaluación del grado de peligro, conformado por cuatro indicadores básicos: Riesgo, Propagación, Combustión y Severidad (Julio, 1987).

La presente publicación se refiere a los resultados obtenidos en el estudio realizado para la elaboración del primero de los indicadores ya señalados, y que conducen a la proposición de un índice global de riesgo, válido para todo el país, y de índices específicos para las zonas que en mayor grado estén siendo afectadas por los incendios forestales.

2. MATERIAL Y METODOS

2.1 Reseña Preliminar. El área de estudio comprendió la totalidad de la superficie del territorio nacional existente entre las Regiones V y X, inclusive, a excepción de la Provincia Palena; esto es, alrededor de 20.5 millones de há, en la cual se concentra aproximadamente el 96% de la ocurrencia de incendios forestales.

El estudio se llevó a efecto entre julio de 1988 y agosto de 1989, incluyendo la ejecución de las etapas que se indican a continuación, de acuerdo a su desarrollo cronológico:

- a) Definición de Zonas de Riesgo en el área de estudio, en base a antecedentes generales sobre clima, topografía, vegetación, densidad poblacional y ocurrencia histórica.
- b) Recolección detallada de antecedentes sobre incendios forestales y clasificación por zonas de riesgo.
- c) Recolección de antecedentes meteorológicos diarios en estaciones existentes en cada una de las zonas de riesgo.
- d) Evaluación del efecto de la sequía y la estacionalidad, y diseño de las respectivas funciones.
- e) Definición de variables y evaluación del peso de las mismas en el riesgo de incendios forestales.
- f) Diseño de los índices de riesgo.
- g) Validación de los índices de riesgo.

2.2. Recolección de Antecedentes. La información utilizada en el estudio fue obtenida de las siguientes fuentes:

- a) Clima. Correspondieron a valores promedios de variables climáticas en Chile para un período de 30 años, publicados por Almeida y Sáez (1958).
- b) Meteorología. Registros meteorológicos diarios de cuatro temporadas (1985-88) en 33 estaciones, distribuidas en toda el área de estudio y pertenecientes a la Fuerza Aérea de Chile, Armada de Chile, Corporación Nacional Forestal, Universidades Austral y Concepción, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y las empresas Forestal Arauco Ltda., Forestal Celco S. A. y Forestal Mininco S.A.
- c) Ocurrencia de Incendios Forestales. Fichas de Incendios Forestales registradas en el Sistema Estadístico de Manejo del Fuego de la Corporación Nacional Forestal, correspondientes al período 1985-88.
- d) Vegetación. Cartas vegetacionales de Chile elaboradas por Quintanilla (1974).
- e) Topografía. Antecedentes generales publicados en el Atlas Geográfico de Chile (Instituto Geográfico Militar, 1988).
- f) Densidad Poblacional. Valores de la comunas del área de estudio elaborados por el Instituto Nacional de Estadísticas (Instituto Geográfico Militar, 1988).

2.3 Delimitación de Zonas de Riesgo. Las Zonas de Riesgo fueron definidas como sectores homogéneos en relación a la ocurrencia de incendios forestales, considerando los efectos del clima, vegetación, topografía y actividad humana. Concretamente, las variables utilizadas en la delimitación fueron:

- Pluviometría media en otoño (mm).
- Pluviometría media en primavera (mm).
- Pluviometría media en verano (mm).
- Temperatura media en enero (°C).
- Temperatura máxima media en enero (°C).
- Nubosidad media anual (%)
- Número de meses secos en el año.
- Humedad relativa media en enero (%).
- Densidad de incendios forestales (incend. / año / 10.000 há).
- Densidad poblacional (habitantes / Km²).

- Distribución general de la vegetación.
- Distribución general de la topografía.

Además, debe señalarse que fue empleada como unidad territorial de referencia a la Carta Regular IGM, que corresponde también a la Carta Par de Letras del sistema Cartográfico GEOREF, usada por la Corporación Nacional Forestal y Empresas Forestales. Cada una de estas unidades (en total alcanzaron la cantidad de 343) en promedio encierra una superficie aproximada de 61.000 ha.

El procedimiento aplicado consistió, en primera instancia, en determinar un rango de puntajes normalizados para las variables climáticas, densidad de incendios y densidad poblacional en base a la fluctuación de valores de cada una de ellas y según el peso que representan en la probabilidad de ocurrencia. Todo ello de acuerdo al método propuesto por Julio *et al.* (1981).

En segundo término se calcularon los puntajes normalizados promedios ponderados para cada variable y por unidad territorial. Esto significó, en base a la sumatoria de los valores de todas las variables, obtener un puntaje final por cada unidad territorial, lo que permitió, en base a una escala de rangos establecidos, la delimitación preliminar de las zonas de riesgo.

Finalmente, esta delimitación se confrontó con los antecedentes vegetacionales y topográficos recolectados, a fin de identificar definitivamente a las zonas de riesgo, de acuerdo al principio de homogeneidad señalado con anterioridad.

2.4. Ocurrencia de Incendios Forestales. En el estudio detallado de la ocurrencia se analizaron 19.645 fichas, correspondientes a la totalidad de incendios forestales registrados en el período 1984-85 a 1987-88. En cada ficha se recolectaron los siguientes antecedentes:

- Localización exacta del incendio.
- Fecha y hora de inicio del incendio.
- Causa del incendio.

No obstante, se debió descartar a los datos de hora de inicio y causa del incendio, por la baja confiabilidad que ellos poseían.

Posteriormente, esta información se clasificó por zona de riesgo y los incendios registrados fueron ordenados cronológicamente, de manera de determinar la ocurrencia diaria y promedios mensuales en el transcurso de todo el período bajo análisis.

2.5. Información Meteorológica. En cada una de las 33 estaciones meteorológicas consideradas en el estudio se recolectaron los siguientes datos diarios, correspondientes a las 14:00 horas y para el período 1985-88.

- Temperatura del aire (°C).
- Humedad relativa del aire (%).
- Precipitación (mm).
- Velocidad del viento (nudos).

Originalmente se había considerado recolectar también antecedentes sobre nubosidad, radiación solar y evaporación; sin embargo, fue necesario descartarlos debido a que no todas las estaciones meteorológicas poseían datos completos o confiables.

2.6. Evaluación de la Sequía. Su propósito fue disponer de un indicador de la condición de la vegetación, en cuanto a su contenido de humedad y a la consecuente susceptibilidad a la ignición o inicio de incendios forestales. Autores tales como Lindemuth (1961), Peet (1965), Julio (1968) y Ferreira (1970) señalan que la evaluación de la sequía, en ausencia de información confiable sobre la variación del contenido de humedad de la vegetación, puede obtenerse en base al estudio de las precipitaciones en relación a la posterior ocurrencia de incendios forestales.

De hecho, algunos índices del grado de peligro, como es el caso de la fórmula de Nesterov, empleada por muchos años en Polonia y la Unión Soviética, incluyen como variable a la cantidad de días sin lluvias (Nesterov, 1939), (Turner *et al.*, 1961).

Para el presente caso, la determinación del factor sequía se basó en el estudio de 94 precipitaciones de variadas intensidades y registradas en diferentes sectores del área de estudio, entre los meses noviembre y abril, en el período 1985-88.

Cada una de las precipitaciones indicadas se relacionó con la ocurrencia de incendios forestales en los días siguientes del respectivo sector. Con este conjunto de relaciones se pretendió obtener una función que asociara la cantidad de agua caída con la condición de la vegetación (susceptibilidad a la ignición) en los días posteriores.

2.7. Evaluación de la Estacionalidad. Diversos autores han expresado la conveniencia de utilizar a este factor como un componente importante en el diseño de indicadores del grado de peligro de incendios forestales (Turner *et al.* 1961; Mc Arthur, 1966; Brown y Davis, 1973; King y Furman, 1976).

La estacionalidad podría definirse como los períodos o lapsos, en una temporada, en los cuales la ocurrencia tiende a presentar una intensidad determinada, debido al efecto conjunto de factores tales como condición climática, estado general de la vegetación y el tipo o nivel de actividad humana (Brown y Davis, 1973).

En el presente caso se consideraron dos variables para definir a la estacionalidad: en primer lugar, el riesgo representado por las actividades humanas en el transcurso de la temporada (flujo de veraneantes y turistas, operaciones agrícolas y forestales, etc). En segundo término, la condición esperada de la vegetación como consecuencia de su estado fisiológico (niveles de circulación de savia según la estación) y al margen del efecto de las precipitaciones de verano.

La segunda de las variables se acostumbra evaluarla por medio de tablillas u otros instrumentos que estiman el contenido de humedad de la vegetación, o bien, a través de funciones que relacionan el clima con la susceptibilidad de los tejidos vegetales a la ignición (Simmond, 1968). En Chile, preliminarmente se han hecho estudios al respecto, pero los resultados no son aún suficientes para resolver con exactitud este requerimiento (Bahamondes, 1983).

Para la determinación del factor estacionalidad se aplicó más bien un procedimiento cualitativo o lógico, porque no se disponía de la información necesaria para elaborar una función basada en criterios cuantitativos.

En concreto, se consideraron diferentes opciones de coeficientes para los distintos meses de la temporada y por zonas de riesgo, los que posteriormente fueron probados a través de correlaciones con los respectivos promedios de la ocurrencia para la totalidad del período de estudio. Definitivamente, los más altos niveles de significación entre las opciones comparadas determinaron los factores de estacionalidad a aplicar en la confección de los índices de riesgo.

2.8. *Diseño de los índices de Riesgo.* Tanto para la confección del índice general como para los índices específicos se desarrolló el mismo procedimiento, que consistió en los pasos que se describen secuencialmente a continuación:

a) Definición de las variables independientes de los índices y determinación del peso de cada una de ellas, en cuanto al efecto que poseen sobre la ocurrencia.

b) Selección de diferentes modelos de funciones que

relacionaran las variables independientes definidas con la ocurrencia.

c) Prueba de los modelos seleccionados, a través de correlaciones de series de datos diarios (incluyendo las 4 temporadas del estudio) que estimaran el grado de asociación entre la ocurrencia y las diferentes combinaciones de variables independientes.

d) Elección de los índices, de acuerdo a la comparación de los niveles de significación de los coeficientes de correlación obtenidos en cada una de las opciones de modelos seleccionados.

e) Validación de los índices seleccionados, empleando bases de datos que contenían los antecedentes de 160 días, escogidos en forma sistemática y al azar (5 días por mes y para cada una de las temporadas del período de estudio).

En la construcción de las bases de datos y el procesamiento estadístico de la información se emplearon los programas computacionales Lotus 1-2-3 y Number Crunch Statistical System.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. *Zonas de Riesgo.* La aplicación del procedimiento descrito en el Capítulo Material y Métodos condujo a la definición de 15 zonas de riesgo para el total del área de estudio, con la localización y límites que se exponen en la Fig. 1.

Se comprobó que los valores más altos del riesgo se presentan, en general, en las zonas ubicadas al norte del área de estudio, y que en la medida que se avanza hacia el sur, estos valores disminuyen progresivamente.

Por otra parte, se distinguieron tres franjas en el sentido norte-sur (Cordillera de la Costa, Valle Central y Precordillera y Cordillera Andina), entre las cuales se apreciaron diferencias significativas en cuanto a la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

En general, el riesgo es mayor en algunas zonas costeras (1, 7 y 10) y en la mayoría de las situadas en el valle central (2, 8, 11 y 14). En cambio, es notablemente bajo en toda la cordillera andina, lo que es explicable por la baja densidad poblacional, escasa vegetación y condiciones climáticas más desfavorables para la iniciación de incendios fores-

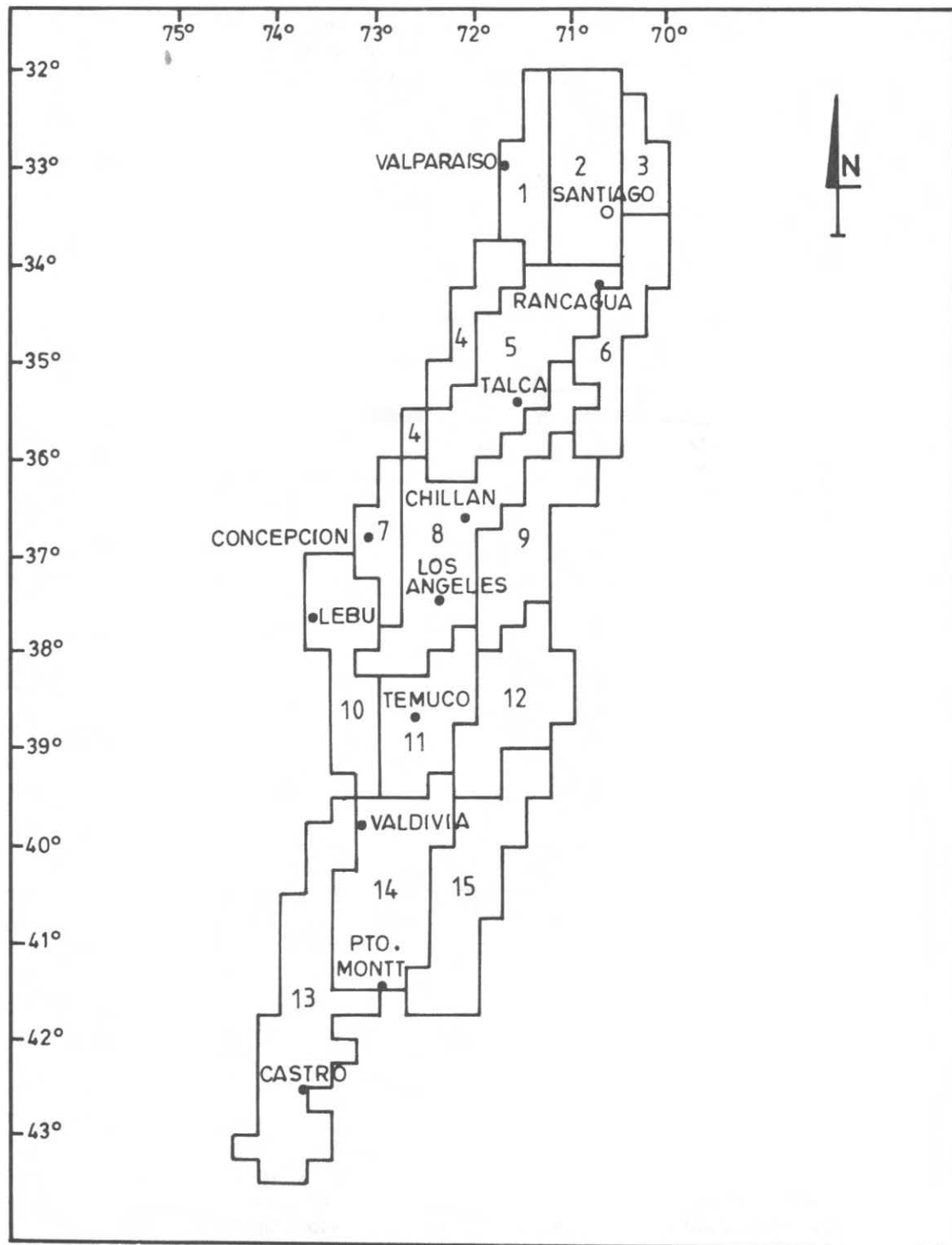


Fig. 1. Ubicación y límites de las Zonas de Riesgo.
Location and borders of the Risk Zones.

3.2. *Análisis de la Ocurrencia de Incendios Forestales.* El procesamiento de la información recolectada sobre incendios forestales permitió evaluar el comportamiento de la ocurrencia, tanto espacial como cronológicamente, para el total del área de estudio y para cada una de las zonas de riesgo. Los antecedentes expuestos en los cuadros 1 y 2, y en la Fig. 2 permiten fundamentar los siguientes comentarios:

CUADRO 1

Ocurrencia de incendios forestales en el área de estudio y por zonas de riesgo.
Período 1985-1988.

Occurrence and risk zones of forest fires. 1985-88 period.

Zonas de riesgo	Superficie total (há)	Total de incendios	Densidad de incendios (Nº/año/10.000 há)	Promedio incendios/día/temp.
1	676.490	4.619	17.07	6,35
2	1.440.210	2.312	4.01	3.18
3	488.000	4	0.02	0.01
4	721.630	328	1.14	0.45
5	2.013.000	1.615	2.01	2.22
6	1.115.000	197	0.44	0.27
7	578.280	2.454	10.61	3.38
8	2.257.000	3.132	3.47	4.31
9	1.282.000	98	0.19	0.14
10	1.201.700	1.565	3.26	2.15
11	1.159.000	1.251	2.70	1.73
12	1.403.000	155	0.28	0.21
13	2.440.610	723	0.74	1.00
14	1.891.000	1.120	1.48	1.52
15	1.769.000	72	0.10	0.10
Total	20.435.920	19.645	2.40	27.02

- a) Se comprueban diferencias notables entre las zonas de riesgo al comparar la ocurrencia total registrada en el período 1984-85 a 1987-88. Los valores fluctúan entre 4 y 4.619 incendios forestales (zonas 3 y 1, respectivamente).
- b) Lo anterior también se refleja en la densidad de incendios, donde las zonas de riesgo 1 y 7 presentan valores muy altos (17.07 y 10.61 registros por cada temporada y por superficies de 10.000 há) y otras 6 muestran una tasa demasiado baja (menor a 1).
- c) En cuanto a la distribución de la ocurrencia en la temporada, se observa que las zonas del norte se caracterizan por una concentración más pronunciada de incendios forestales en los primeros meses. En cambio, en las zonas del sur ello se desplaza hacia febrero y marzo. La explicación podría estar dada por el efecto de las quemadas controladas, que en el sur se aplican de preferencia entre fines de verano y comienzos de otoño, y que corresponden a una de las principales causas de incendios forestales en Chile.
- d) Finalmente, en relación a la cantidad de incendios que se inician diariamente, también se observan diferencias importantes entre las zonas de riesgo. En 10 casos la mayor proporción de días de la temporada son aquellos sin ocurrencia, lo que se antepone a la situación de otras zonas, en donde los días con 2 o más incendios corresponde a la

% DIAS EN LA TEMPORADA

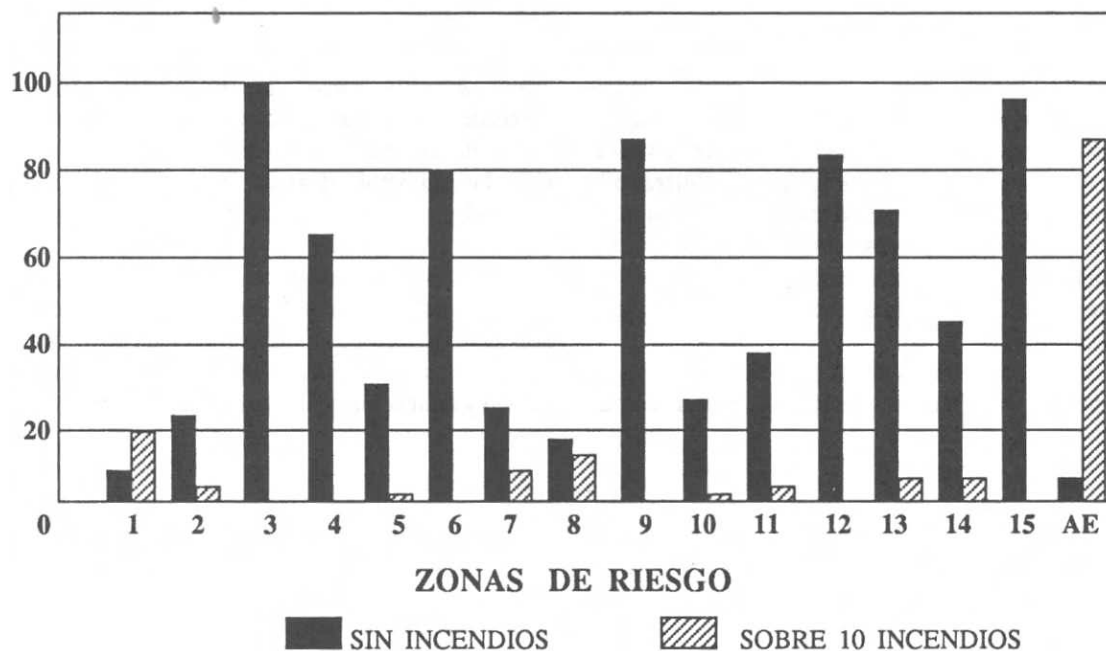


Fig. 2. Días sin ocurrencia y con más de 10 incendios en el transcurso de la temporada. Período 1985-88.

Days without fires, days with more than ten fires during the season.
1985-88 period.

CUADRO 2

Distribución de la ocurrencia en el transcurso de una temporada promedio. Período 1985-88.

Distribution of the occurrence during an average season.
1985-88 period.

Zona de riesgo	Ocurrencia por períodos mensuales (%)						Fuera de tempor.
	Nov.	Dic.	Enero	Febr.	Marzo	Abril	
1	8.19	27.72	29.72	16.96	10.45	6.60	0.32
2	8.02	26.56	27.87	19.63	12.21	5.54	0.17
3	-	25.00	50.00	-	-	25.00	-
4	5.17	17.02	22.49	20.67	20.06	13.07	1.52
5	2.86	15.78	30.68	25.53	17.20	7.70	0.25
6	0.51	12.63	17.68	21.72	18.18	29.29	-
7	3.20	14.65	28.15	29.50	22.53	1.97	-
8	2.47	12.65	27.49	30.70	24.15	2.41	0.13
9	-	11.34	25.77	20.62	42.27	-	-
10	5.46	15.21	28.37	26.38	21.76	2.63	0.19
11	0.09	12.38	29.49	34.03	22.36	1.63	-
12	1.94	18.06	32.90	25.16	16.13	5.81	-
13	1.23	7.64	40.52	42.16	8.32	-	0.14
14	2.55	13.98	36.59	29.55	15.83	-	1.50
15	1.39	5.66	36.11	34.72	20.83	1.39	0.10
Total	4.63	18.42	29.29	25.96	17.10	4.33	0.27

mayor frecuencia. El extremo se constata en la zona 1, en la cual alrededor de 20% de los días presentan 10 o más registros.

La baja ocurrencia, y la respectiva densidad de incendios forestales en algunas zonas de riesgo, particularmente las ubicadas en la franja oriental del área de estudio, en la precordillera y cordillera andina (3, 6, 9, 12 y 15), condujo a la decisión de descartarlas de los procesos estadísticos posteriores, debido a la insuficiencia de datos para sostener las pruebas y funciones matemáticas que se requería desarrollar.

Para el caso de las zonas de recién señaladas, se concluye en la recomendación de aplicar directa-

mente el índice general de riesgo, para la estimación de la probabilidad diaria de ocurrencia de incendios forestales.

3.3. *Análisis Meteorológico.* En la recolección de antecedentes meteorológicos se constató la inexistencia de información completa o confiable para todas las zonas ubicadas en la franja oriental del área de estudio, confirmándose la decisión de descartarlas de la investigación.

Un resumen de los antecedentes meteorológicos se presenta en el cuadro 3. No se incluyen los datos sobre precipitaciones, porque fueron transformados en términos de sequía, en base a un factor cuyo diseño y aplicación se describe más adelante.

CUADRO 3

Valores meteorológicos promedios, máximos y mínimos a mediodía (14 horas).
Período 1985-88.

Average, maximum and minimum meteorological values at midday (14 hours).
1985-88 period.

Zona de riesgo	Temperatura (°C.)			Humedad relativa (%)			Velocidad viento (nudos)		
	Prom.	Máx.	Min.	Prom.	Máx.	Min.	Prom.	Máx.	Min.
1	20.8	31.0	12.2	57	98	12	8.7	20	0
2	26.7	33.7	12.0	43	91	18	9.6	19	0
4	21.1	30.4	12.4	71	100	36	5.6	17	0
5	22.2	35.8	11.2	59	98	30	3.1	27	0
7	20.2	28.9	13.0	57	98	17	12.9	32	0
8	24.9	34.0	11.1	41	100	11	6.2	20	0
10	19.9	29.0	14.0	62	100	29	8.8	25	0
11	21.9	32.0	12.0	48	96	21	7.7	20	0
13	18.2	35.2	9.8	66	96	22	10.2	34	0
14	20.2	29.4	12.3	58	99	30	5.9	40	0
Total	21.6	35.8	9.8	56	100	11	7.9	40	0

3.4. *Factor Sequía.* En cada una de las 94 lluvias seleccionadas para la determinación del factor sequía, se relacionó el monto de agua caída con la cantidad de días transcurridos hasta la ocurrencia del tercer incendio, en el respectivo sector afectado.

La razón de considerar el tercer incendio y no el primero, se basó esencialmente en un criterio de seguridad. Esto, como una manera de eliminar el efecto de las quemas controladas que, por lo general, se ejecutan aprovechando condiciones desfavora-

bles de tiempo atmosférico, normalmente en un breve lapso después del término de la lluvia (día siguiente o subsiguiente).

Además, las pruebas estadísticas efectuadas revelaron un alto grado de asociación entre el monto de agua caída y el número de días transcurridos antes de la iniciación del tercer incendio (correlación con un nivel de significación de 0.0015). En cambio, las correlaciones con el primer y segundo incendio presentaron una significación claramente inferior.

La función calculada es la siguiente:

$$Y = 70 - 12.35545X + 0.52528X^2$$

En donde: Y = Representa al factor sequía o precipitación acumulada, en mm.
X = Número de días transcurridos desde el término de la lluvia.

La función recién expuesta permitió la confección del cuadro 4, en el cual se exponen los valores del factor sequía en los días posteriores a la lluvia, de

acuerdo al monto de agua caída. De esta manera, el cálculo posterior del índice de riesgo se simplifica considerablemente.

En la función construida se establecen como límites máximo y mínimo de precipitación acumulada a los valores de 70 y 0.5 mm, respectivamente. Esto significa que, en toda lluvia superior a 70 mm, cualquiera que sea su monto, al día siguiente de su término el factor deberá registrarse como de 70 mm, para seguir descendiendo en los días posteriores según los valores indicados en el cuadro 4, y bajo el supuesto que no habrá precipitaciones.

CUADRO 4

Valores del factor sequía en los días siguientes al término de una lluvia.

Drought factor values following days of rain

Monto de agua caída (mm)	Factor de sequía en los días siguientes (mm)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
>70	70.0	58.2	47.4	37.7	28.9	21.4	14.8	9.3	4.8	1.3	0.5
70.0-58.3	58.2	47.4	37.7	28.9	21.4	14.8	9.3	4.8	1.3	0.5	0.5
58.2-47.5	47.4	37.7	28.9	21.4	14.8	9.3	4.8	1.3	0.5	0.5	0.5
47.4-37.8	37.7	28.9	21.4	14.8	9.3	4.8	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5
37.7-29.0	28.9	21.4	14.8	9.3	4.8	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
28.9-21.5	21.4	14.8	9.3	4.8	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
21.4-14.9	14.8	9.3	4.8	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
14.8-9.4	9.3	4.8	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9.3-4.9	4.8	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4.8-1.4	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
1.3-0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Por otro lado, una vez que la precipitación acumulada alcanza el valor mínimo, cualquiera que sea el número de días posteriores sin lluvias, el factor deberá mantenerse con el valor de 0.5 para el cálculo del índice de riesgo.

También debe señalarse que el término de un período de sequía se produce con una precipitación superior a 0.5 mm, y que el factor a aplicar en el día

de la lluvia corresponderá exactamente al monto de agua caída. Ahora, si continúa lloviendo en el día siguiente, el factor se calculará sumando los milímetros registrados en este último con el valor que entregue la tabla de acuerdo a la precipitación acumulada al día anterior. Un ejemplo del proceso de cálculo se expone en el cuadro 5.

CUADRO 5

Ejemplo en el cálculo del factor sequía.

Example to calculate drought factor

Día	Precipitación del día (mm)	Factor sequía (mm)		
12.02.88	0	0.5		
13.02.88	15.8	15.8		
14.02.88	7.1	21.9	=	7.1 +14.8
15.02.88	0	21.4		
16.02.88	72.1	86.9	=	72.1 +14.8
17.02.88	0	70.0		
18.02.88	0	58.2		

3.5. *Factor Estacionalidad.* La evaluación de las diferentes opciones de coeficientes para representar la estacionalidad en la operación del índice de riesgo, efectuada a través de correlaciones, determinó que lo más adecuado era el empleo de una escala de 1 a 3 (nivel de significación de 0.001)

De acuerdo al análisis efectuado sobre la estacionalidad, el factor corresponde a un valor en el rango 1 a 3 de la escala, que se aplica para períodos de 15 días en el transcurso de toda la temporada, y que varía por zona de riesgo.

CUADRO 6

Valores del factor estacionalidad según zonas de riesgo y para diferentes períodos en el transcurso de la temporada de ocurrencia.

Factor values for risk zones and periods during the occurrence season.

Período	Factor de estacionalidad									
	Zonas de riesgo									
	1	2	4	5	7	8	10	11	13	14
Noviembre										
1 - 15	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
16 - 30	2.5	1.2	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Diciembre										
1 - 15	3.0	1.5	1.0	1.0	2.0	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0
16 - 31	3.0	2.0	1.0	1.2	2.5	1.2	1.5	1.2	1.0	1.0
Enero										
1 - 15	3.0	2.0	1.0	1.5	3.0	1.5	1.5	1.5	1.2	1.0
16 - 31	3.0	1.5	1.0	1.5	3.0	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2
Febrero										
1 - 15	3.0	1.5	1.2	1.5	3.0	2.0	2.0	1.5	1.2	1.5
16 - 29	3.0	1.5	1.2	1.5	3.0	2.0	1.5	1.5	1.2	1.5
Marzo										
1 - 15	2.5	1.5	1.2	1.2	3.0	1.5	1.5	1.5	1.0	1.5
16 - 31	2.5	1.5	1.2	1.2	2.5	1.5	1.2	1.0	1.0	1.2
Abril										
1 - 15	2.0	1.2	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
16 - 30	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Cabe observar que en el cuadro 6 no están incluidas las zonas de riesgo ubicadas en la franja oriental del área de estudio, debido a que se descartaron por la falta de información. No obstante, a fin de permitir la operación del índice de riesgo en cada una de ellas, podría asignárseles el factor de estacionalidad de la respectiva zona vecina, ubicada en el valle central.

3.6. *Índice General de Riesgo.* Se pretendió obtener una función que fuera aplicable a toda el área de estudio, sin considerar los efectos de regionalidad presentes en cada una de las zonas de riesgo. Este último aspecto afecta al resultado que se obtenga solamente en la información que se emplee en la operación del índice, que debe corresponder a la generada en la respectiva zona a evaluar.

Tal como se explicó en el punto 2.8, se analizaron y evaluaron diversos modelos matemáticos y variadas fórmulas que se utilizan usualmente para relacionar la incidencia de las diferentes variables en la probabilidad de inicio de incendios forestales. Incluso, se probaron indicadores que operan en otros países, entre los cuales cabe destacar el Factor de Riesgo (Angstrom, 1942), el índice Franssila (Franssila, 1958), el Factor de Humedad Efectiva (Daigo, 1961) y el índice de la Costa Azul (Orieux, 1974).

Las pruebas estadísticas efectuadas demostraron que la función que representaba con una mayor confiabilidad al riesgo de incendios forestales en Chile correspondía a una regresión lineal múltiple, con cinco variables independientes (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, factor sequía y factor estacionalidad). La fórmula respectiva es:

$$Y = 17.6653 + 1.1692X_1 - 0.4387X_2 + 0.3473X_3 + 18.6882X_4 - 0.2664X_5$$

En donde:

"Y" expresa, en una escala de 0 a 100, la probabilidad diaria de ocurrencia de incendios forestales.

"X₁" representa a la temperatura del aire, en grados Celsius.

"X₂" es la humedad relativa del aire, en tanto por ciento.

"X₃" corresponde la velocidad del viento, en nudos.

"X₄" es el factor de estacionalidad, según tabla (cuadro 6).

"X₅" corresponde al factor sequía, según tabla (cuadro 4).

De acuerdo a un análisis de la distribución de los resultados del índice, aplicado para el total del área de estudio y las cuatro temporadas consideradas en las bases de datos, se establecieron 5 categorías de riesgo para calificar los puntajes que se obtengan.

CUADRO 7

Categorías de riesgo para el índice general.

Risk categories for the general index values.

Categorías de riesgo	Rango de valores del índice
Nulo	<25
Bajo	26 - 40
Medio	41 - 55
Alto	56 - 70
Extremo	>70

3.7. *Índices Específicos de Riesgo.* La estructura de los índices específicos (zonales) resultó ser la misma que se determinó para el índice general. Las pruebas estadísticas también confirmaron que la función más eficiente correspondía a una regresión lineal múltiple con cinco variables independientes.

Sin embargo, en dos zonas de riesgo (1 y 2), las correlaciones mostraron un mayor nivel de significación al eliminar el factor sequía, lo que es explicable debido al mínimo o nulo peso que esta variable posee sobre la probabilidad de ocurrencia, tal como se comprobó en las pruebas estadísticas correspondientes.

Definitivamente, las funciones obtenidas para cada una de las zonas de riesgo son las siguientes:

ZONA 1

$$Y = 39.9622 - 0.6125X_1 - 0.7252X_2 + 0.7459X_3 + 25.7198X_4$$

ZONA 2

$$Y = 25.4275 + 0.5078X_1 - 0.7560X_2 - 0.1832X_3 + 37.2736X_4$$

ZONA 4

$$Y = -9.3043 + 0.9383X_1 - 0.2115X_2 + 2.1037X_3 + 44.0028X_4 - 0.3465X_5$$

ZONA 5

$$Y = 39.8456 - 1.1176X_1 - 0.7189X_2 + 0.7822X_3 + 67.1255X_4 - 0.2532X_5$$

ZONA 7

$$Y = 4.8033 + 1.2043X_1 - 0.3817X_2 + 0.6190X_3 + 15.6893X_4 + 0.0146X_5$$

ZONA 8

$$Y = 7.2836 + 0.9017X_1 - 0.3331X_2 + 0.5320X_3 + 27.6157X_4 - 0.2319X_5$$

ZONA 10

$$Y = 33.9723 + 1.2879X_1 - 0.4123X_2 + 0.2870X_3 + 16.8209X_4 - 0.3631X_5$$

ZONA 11

$$Y = 15.9073 + 0.9086X_1 - 0.4893X_2 + 0.6895X_3 + 34.5690X_4 - 0.2848X_5$$

ZONA 13

$$Y = -63.8228 + 0.5824X_1 - 0.0893X_2 + 1.0241X_3 + 92.1609X_4 - 0.2522X_5$$

ZONA 14

$$Y = 34.0505 + 1.7960X_1 - 0.4050X_2 + 0.3271X_3 + 8.2711X_4 - 0.3829X_5$$

En donde:

Y = Probabilidad diaria de ocurrencia de incendios forestales, en una escala de 0 a 100.

X₁= Temperatura del aire, en grados Celsius.

X₂= Humedad relativa del aire, en tanto por ciento.

X₃= Velocidad del viento, en nudos.

X₄= Factor estacionalidad, según tabla (cuadro 6).

X₅= Factor sequía, según tabla (cuadro 4).

De acuerdo a lo expuesto con anterioridad, a las zonas de riesgo ubicadas en la franja oriental del área de estudio (3,6,9,12 y 15) correspondería aplicar la función calculada para el índice general de riesgo.

También, en base al estudio de la distribución de los resultados obtenidos con la aplicación de los índices específicos (en la prueba con los valores reales del período 1985-88), se establecieron cinco categorías de riesgo en todas las zonas. Estos límites se exponen en el cuadro 8.

CUADRO 8

Categorías de riesgo para los índices específicos.

Risk categories for specific index values.

Zonas de riesgo	Valores de índices				
	Categorías de riesgo				
	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Extremo
1	0 - 30	31 - 50	51 - 65	66 - 80	81 - 100
2	0 - 25	26 - 45	46 - 60	61 - 75	76 - 100
4	0 - 30	31 - 45	46 - 60	61 - 70	71 - 100
5	0 - 25	26 - 40	41 - 65	66 - 80	81 - 100
7	0 - 25	26 - 40	41 - 60	61 - 75	76 - 100
8	0 - 30	31 - 50	51 - 65	66 - 80	81 - 100
10	0 - 30	31 - 45	46 - 60	61 - 75	76 - 100
11	0 - 30	31 - 50	51 - 65	66 - 80	81 - 100
13	0 - 30	31 - 40	41 - 55	56 - 70	71 - 100
14	0 - 30	31 - 45	46 - 60	61 - 75	76 - 100

En el caso de las zonas de riesgo ubicadas en la franja oriental del área de estudio, que no están incluidas en el cuadro 8, de acuerdo al criterio ya expuesto anteriormente, cabría aplicar las categorías de riesgo definidas para el índice general presentadas en el cuadro 7.

4. COMENTARIOS FINALES SOBRE LOS INDICES PROPUESTOS

Como puede desprenderse de la lectura de las páginas precedentes, el diseño de los índices de riesgo se llevó a efecto en base a la recolección,

procesamiento y análisis de una cantidad considerable de información (alrededor de dos millones de datos).

Las pruebas estadísticas efectuadas otorgan una suficiente confiabilidad a las funciones obtenidas, de manera que se espera que los índices propuestos constituirán una valiosa herramienta para apoyar diversas decisiones en la planificación y programación del manejo del fuego en Chile.

No obstante, aún no será posible calificar como definitivos a los índices. Para ello se requerirá esperar, por lo menos, un período de dos a tres años para validar nuevamente sus resultados, probándolos con antecedentes de nuevas temporadas de ocurrencia de incendios forestales.

Por otra parte, las variables sequía y estacionalidad fueron incluidas provisoriamente, puesto que en Chile no se dispone de antecedentes confiables sobre los efectos del contenido de humedad de la vegetación en la susceptibilidad a la ignición, como así tampoco se han realizado evaluaciones adecuadas de la incidencia del comportamiento o actividad humana en la ocurrencia.

Además, una proporción importante de la información meteorológica utilizada se recolectó de estaciones ubicadas en aeropuertos o en lugares que no reflejan fidedignamente las condiciones ambientales prevalecientes en los sitios donde generalmente se inician y propagan los incendios forestales. En la medida que estos antecedentes puedan ser reemplazados por otros más representativos, lógicamente se acrecentará la conveniencia de revisar las fórmulas de los índices.

En cuanto a los registros de incendios forestales, se considera que el sistema oficial que los administra aún no capta toda la información que se genera, particularmente la correspondiente a las zonas ubicadas en la precordillera y cordillera andina. Igualmente, se comprobó que antecedentes tales como la hora de inicio de los incendios y sus causas, que afectan a la exactitud de los índices, están incompletos o son de escasa confiabilidad.

En todo caso, no debe dejar de tenerse en cuenta que en estudios de la naturaleza del que ahora se presenta, siempre es conveniente revisar periódicamente sus resultados, por la dinámica misma de la ocurrencia y porque el desarrollo tecnológico permanentemente contribuye a mejorar la cantidad y calidad de la información disponible.

5. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, E., SAEZ, F. 1958. *Recopilación de datos climáti-*

- cos de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, 195 pp.
- ANGSTROM, A. 1942. "Riskema for Skogsbrand och deras beroende ar vader och klimat", *Sartryeck ur Svenka skogsguards Foreningens Tidskrift*, Häfte IV, Stockholm, 18 pp.
- BAHAMONDES, P. 1983. *Modelo de tablilla indicadora de evaluación del grado de peligro de incendios forestales*. Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 53 pp.
- BROWN, A. A., DAVIS, K. P. 1973. *Forestfire control and use*. Mc Graw Hill, N. York, 686 pp.
- DAIGO, D. 1961. "Forest fires in Japan", *Weather and climate* 28 (5): 218-225.
- DEEMING, J. E., LANCASTER, B. N., FOSBERG, M. A., FURMAN, R. P., SCHROEDER, M. J. 1972. *National fire danger rating system*. USDA For. Ser. Res. Pap. RM-84, Fort Collins, 165 pp.
- DIETERICH, J. 1973. *Informe sobre las condiciones climáticas (Índice de Peligro) en tres lugares, el número de incendios y superficies quemadas*. CONAF, Pub. Min., Santiago, 24 pp.
- FERREIRA, O. 1970. *Estudio de las variables climáticas como base para la elaboración de índices de grado de peligro en 2 zonas de Chile*. Tesis, Ing. Forestal, Univ. de Chile, Santiago, 59 pp.
- FRANSSILA, M. 1958. "The dependence of forest fire danger on meteorological Factors", *Acta Forestalia*, Helsinki, 12 pp.
- INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR. 1988. *Atlas geográfico de Chile para la educación*. IGM, Santiago, 138 pp.
- JULIO, G. 1968. *Estudio preliminar de variables climáticas como base para la preparación de índices de grado de peligro de incendios forestales en la Zona de Los Arenales*. Serv. Agríc. Gan., Pub. Min., Santiago, 28 pp.
- . 1979 "La evaluación del grado de peligro", *Actas del I Sem. Manejo del Fuego*. CONAF / U. Austral, Valdivia, 15 pp.
- . 1987. *Identificación de líneas y anteproyectos de investigación en manejo del fuego*. Inf. Conv. N° 116, Fac. Cs. For., Univ. Austral, Valdivia, 68 pp.
- . 1988. *Mecanismos de gestión para el manejo del fuego*. Pub. Doc. N° 28, Fac. Cs. For., Univ. Austral, Valdivia, 103 pp.
- JULIO, G., PAREDES, G., TROUME, A., GIROZ, G. 1981. *Proyecto integrado de protección contra incendios forestales para empresas de la VIII y IX Regiones*. Inf. Conv. N° 33, Fac. Cs. For., Univ. Austral, Valdivia, 185 pp.
- KING, J. A., FURMAN, R. W. 1976. *Fire danger rating network density*. USDA For. Ser., Res. Pap. RM-177, 4 pp.
- LINDENMUTH, A. W. 1961. "Development of the 2-index system of rating forest fire danger", *Journ. of For.* 59 (7): 504-508.
- MC ARTHUR, A. 1966. *Weather and grassland fire behavior*. Forest Res. Inst, Dept. Nat. Develop., Leaflet 100, Canberra. 23 pp.
- NESTEROV, V. G. 1939. *The nature of forest fires and how to deal with them*. The All Union Inst. Scien. Res. For. Mang. VNI IL/2h.
- ORIEUX, A. 1974. "Conditions meteorologiques et incendies en Région Méditerranéenne", *Rev. For. Franc.*, Num. Spec. Tomo I, 122:129, Paris.
- PEET, G. B. 1965. *A fire danger rating and controlled burning guide in W. Australia*. For. Dept. Bull. N° 74, Perth, 37 pp.
- QUINTANILLA, B. 1974. *La representación cartográfica preliminar de la vegetación chilena- Un Ensayo Fitogeográfico*. Universitaria, Univ. Católica de Valparaíso. 35 pp.

G. JULIO

- SIMMARD, A. J. 1968. *The moisture content of forest fuels I - A review of the basic concepts*. Forest Fire Research Institute, Ottawa, 47 pp.
- TURNER, J. A., LILLYWHITE, I. M., PIEZLAK, Z. 1961. *Forecasting for forest services*. World. Met. Org., Techn. Note 42, 55 pp.
- URZUA, J.D. 1968. "Determinación del valor destinado a protección contra incendios en plantaciones forestales", *Actas VI Jorn., A. CH. I. F. Los Angeles, Chile*, 78:87.
- VAN WAGNER, C.E. 1974. "Structure of the Canadian forest fire weather index", *Can. For. Serv., Ottawa*, 25 pp.