

DISEÑO Y VALIDACION DE UN SIMULADOR DE INCENDIOS FORESTALES EN CHILE

Design and validation of a Fire Spread Simulator in Chile

Patricio Pedernera, Miguel Castillo, Guillermo Julio
Departamento Manejo de Recursos Forestales
Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Chile
Casilla 9206 Santiago, Chile

SUMMARY

Annually, in Chile the occurrence and propagation of forest fires causes losses near to 50 million dollars, with no regard to the ecological and social damages, which is estimated to be over 420 millions. To face this problem, the Project FONDEF FI-13, with the participation of the University of Chile, INTEC - Chile and the Chilean Forestry Institute as executing institutions, developed the KITRAL system which is able to assist in decision making process with the purpose of improve the efficiency in the handling of forest fires on the base of the analysis of the conditions that affect the occurrence, propagation and damages caused by fires.

The system has shown to be reliable, based on a validation analysis for the predictions of the module of simulation of forest fires, which has taking into account field work, in the program of Forest Fire Management of the National Forest Service (CONAF) .

In this respect, the system brought about very accurate predictions compared with real forest fires records. In particular, the most significant differences are found in fires of less than 0,5 ha. In forest fires greater than 5 ha the level of similitude ranged from 85 and 94%, which represents a high level of accuracy. These results showed the outstanding utility of this tool for the assesment of the impact future coming events, and to assist in decision making processes in fire fighting.

RESUMEN

Anualmente, en Chile la ocurrencia y propagación de incendios forestales ocasionan pérdidas cercanas a los 50 millones de dólares, sin contar los perjuicios ecológicos y sociales los cuales se estiman que sobrepasarían los 420 millones. Para enfrentar esta problemática, el Proyecto FONDEF FI-13, con la participación de la Universidad de Chile, INTEC - Chile y el Instituto Forestal como instituciones ejecutoras, elaboró el sistema KITRAL con el propósito de elevar la eficiencia en el manejo del fuego sobre la base del análisis de las condiciones que afectan la ocurrencia, propagación y daños que provocan los incendios forestales.

Desde la operación oficial del sistema, su confiabilidad ha quedado demostrada mediante un estudio estadístico de validación para los pronósticos otorgados por el simulador de incendios forestales, tomando como fuente en información las experiencias realizadas en terreno. En tal sentido, el simulador del sistema entregó reportes e información muy fiable, una vez comparada con los incendios que realmente se produjeron.

En particular, las diferencias más importantes se producen en incendios de un tamaño inferior a 0,5 hectáreas; a su vez, para incendios de tamaño superior a 5 hectáreas, los niveles de similitud fluctuaron entre 85 y 94 %, lo que representa un alto grado de exactitud. Estos resultados dejan de manifiesto la enorme utilidad de esta herramienta para la evaluación de los efectos mismos que puedan generarse a futuro, de la operación de dispositivos para la evaluación y la elección de opciones como soporte en la toma de decisiones para el combate.

1. INTRODUCCION

La simulación de un incendio forestal es un tema de gran importancia en las decisiones de presupresión y combate, dada la necesidad de disponer de pronósticos confiables sobre la conflictividad que eventualmente pueda alcanzar el fuego en el transcurso de su propagación y, consecuentemente, sobre el esfuerzo que se requerirá desplegar para lograr un efectivo y oportuno control.

Por tal razón, en algunos países desarrollados, especialmente en América del Norte, se han llevado a efecto importantes esfuerzos tendientes a la construcción de simuladores de incendios. Los ejemplos más conocidos corresponden al Sistema BEHAVE y Farsite, elaborado por el Servicio Forestal de Estados Unidos, y el Sistema FBP (FIRE Behavior Prediction) construido por el Servicio Forestal de Canadá.

Tanto el BEHAVE como el FBP fueron construidos sobre la base de los resultados de innumerables trabajos de investigación. En ellos se ha verificado un proceso evolutivo de muchos años, que respaldan su funcionamiento como sistemas. Este hecho, altamente positivo por una lado, representa un serio obstáculo para países como Chile, que no disponen de la información básica suficiente para la correcta transferencia de los sistemas a su realidad presente, y menos aún, la capacidad de ajustarlos adecuadamente a sus propias condiciones ambientales e infraestructura (Julio, 1994).

Por tal razón, se planteó la conveniencia de desarrollar, como una alternativa a los sistemas mencionados, un mecanismo propio de simulación de incendios para Chile, que siendo simple en cuanto a la información requerida y a la capacidad necesarias para hacerlo funcionar, haga factible su aplicación, observando un suficiente nivel de confiabilidad (Julio et. al., 1995)

DISEÑO CONCEPTUAL DEL SIMULADOR DE INCENDIOS FORESTALES

Con la simulación de un incendio, es decir, con la representación anticipada de las características que adquirirá en periodos posteriores a su iniciación o a partir de un momento dado de su desarrollo, es posible obtener una enorme cantidad de antecedentes útiles, tales como su velocidad y modelo de propagación, cantidad de energía liberada, longitud de las llamas, efectos de la radiación vertical, extensión del perímetro y esfuerzo requerido para el control, por mencionar los más relevantes.

El aspecto clave en la simulación del comportamiento del fuego, es la determinación de la velocidad y modelo de propagación, por cuanto a partir de estas dos variables, y siendo conocidas las condiciones ambientales prevalecientes en el terreno afectado, es posible estimar el efecto de los otros componentes presentes en la expansión del incendio.

Son innumerables las variables que influyen en el modelo de propagación de un incendio forestal, o en la forma que va adquiriendo un foco en el plano horizontal, a medida que transcurre el tiempo desde su inicio. No obstante, la experiencia indica que la velocidad de propagación del fuego depende esencialmente de cuatro factores del comportamiento del fuego: Tipo de Vegetación (Modelo de Combustible), Contenido de Humedad de la Vegetación, Pendiente del Terreno y Velocidad del Viento (Brown y Davis, 1973; Albini, 1976).

Diversas investigaciones han demostrado que, tanto el modelo de combustible como el contenido de humedad de la vegetación, si bien afectan a la velocidad de propagación del fuego, no influyen en el modelo de propagación. Es decir, para diferentes niveles de valores o condición de los factores antes mencionados, se producirán también diferentes tamaños del incendio, pero siempre mantendrá la figura geométrica que generará el foco en el terreno, si los otros factores (pendiente y viento) se mantienen constantes. Por otra parte, las variaciones del modelo de combustible y el contenido de humedad no se presentan en superficies pequeñas.

En cambio, con la inclinación del terreno y la intensidad del viento, la situación es diferente. Las relaciones de estos factores con la velocidad de avance del fuego no son lineales, de modo que las variaciones en sus niveles afectarán al modelo de propagación del incendio, aunque se mantengan constantes el modelo de combustible y el contenido de humedad de la vegetación. También, las fluctuaciones en el viento (dirección e intensidad) y en la pendiente (grado de inclinación y exposición), son muy altas, incluso en extensiones pequeñas, y además se pueden observar cambios significativos en sus efectos según el rumbo de la propagación.

Propagación Lineal del Fuego

A partir de los antecedentes anteriormente expuestos, y con la comprobación experimental en diversos proyectos de investigación realizados en Chile, se ha podido establecer que, en términos simples, la velocidad de propagación lineal de un incendio en cualquiera de sus rumbos de avance, partiendo desde su punto de origen, puede estar dada por la siguiente expresión (Julio, 1994):

$$VP = (F_{MC})(F_{CH})(F_P + F_V)$$

Donde:

V_P Velocidad de propagación Lineal del fuego en un rumbo determinado, y para el tramo en el cual los componentes del comportamiento del fuego se mantengan constantes

F_{MC} Factor de propagación por efecto del modelo de combustible, obtenido por tabla.

F_{CH} Factor de propagación por efecto del contenido de humedad de la vegetación fina y muy fina (grosor o diámetro inferior a 2,5 centímetros), obtenido por fórmula o tabla.

F_P Factor de propagación por efecto de la pendiente del terreno, en el sentido de avance del fuego en el rumbo correspondiente, obtenido por fórmula o tabla.

F_V Factor de propagación por efecto de la velocidad del viento en el sentido de avance del fuego en el rumbo correspondiente, obtenido por fórmula o tabla.

Mediante esta fórmula, es posible calcular la velocidad de propagación lineal en una dirección dada sobre la base de un esquema de estimación de tiempos (costos) de acceso, que afectará al avance del fuego según las facilidades o dificultades que deriven de la condición de los factores vegetación, contenido de humedad, viento y pendiente, presentes en su tramo de recorrido.

Sin embargo, a los valores que entrega esta función, es necesario incorporar los efectos de barreras tales como caminos, cortafuegos u otros espacios sin vegetación, presentes en alguna parte del tramo. El tiempo requerido por el fuego para sobrepasar alguna barrera, o bien para detener la propagación, dependerá esencialmente del monto de energía calórica que esté emitiendo el frente de avance, y de la extensión (anchura) que posea este elemento dentro del respectivo tramo.

En la implementación computacional, el inicio del incendio se define en un punto o píxel, desde el cual el simulador proyecta la propagación en 8 direcciones diferentes, hacia los píxeles inmediatamente vecinos. En cada uno de los 8 tramos respectivos, la velocidad de propagación se calcula empleando la fórmula ya descrita. Luego, en cada uno de éstos píxeles, una vez que van siendo alcanzados por el fuego, se procede al cálculo de la propagación en las direcciones de los nuevos píxeles vecinos que no hayan sido alcanzados por el fuego.

Modelo de Expansión del Fuego

De acuerdo a lo señalado anteriormente, es posible calcular la velocidad de propagación lineal para tramos orientados en diferentes rumbos o direcciones a partir de la posición de origen del foco, o en cualquier parte del perímetro o frente de avance. Esto permite determinar, en cada uno de los tramos, el tiempo de acceso requerido para recorrer diferentes longitudes en momentos futuros, y luego sobre la base de esta información, es posible construir curvas de isotiempo de propagación, las que representarán el perímetro que alcanzará el incendio en diferentes instantes de tiempo que se hayan definido, y por lo tanto es posible simular la expansión del fuego.

Es necesario señalar que en cada rumbo o dirección de avance del fuego, los tiempos de acceso pueden ser distintos, por que los factores de propagación pueden variar, incluso a veces con diferencias significativas, salvo en la situación hipotética de un incendio que se desarrolla en terreno plano, sin presencia de viento, sobre un combustible homogéneo y condiciones ambientales constantes. En este último caso, el modelo de propagación del incendio tenderá a ser circular, con tiempos de acceso iguales para las mismas distancias recorridas en los diferentes rumbos.

El modelo de expansión del fuego, podrá ser correctamente simulado, sólo si la información que alimenta al simulador es confiable. Esto implica, disponer para cada caso de la topografía del sector a evaluar, a través de un modelo digital de elevaciones, la identificación y caracterización de los combustibles presentes en el sector, la dirección y velocidad del viento (con el apoyo de un simulador de campos de viento), la información del momento sobre temperatura y humedad del aire (empleada para determinar la condición de sequía de la vegetación), y la presencia de barreras que afectan a la propagación del fuego.

Factores de propagación

Corresponden a la expresión cuantitativa del efecto de cualquiera de las variables del comportamiento del fuego en la velocidad de propagación lineal del incendio. Su cálculo está dado por la relación existente entre la velocidad real del fuego a un nivel de magnitud conocida de la variable respectiva, con aquel otro nivel referencial, en el cual no se produce efecto alguno en la tasa de avance del fuego.

Por ejemplo, si un incendio se está propagando por un terreno plano, el factor de propagación por efecto de la pendiente equivale a 1 (porque no se generan efectos de aceleración o desaceleración). Pero, si en un punto dado, y en un rumbo determinado, la pendiente se presenta con una inclinación de 10%, el fuego comenzará a propagarse a una velocidad 1,25 veces mayor a la observada en el tramo plano, lo que conduce a establecer que el factor de propagación de la pendiente indicada es por lo tanto de 1,25.

En el diseño del simulador de incendios forestales que se presenta en este documento, los factores considerados para la propagación lineal del fuego se describen en los siguientes puntos, con la indicación del origen y desarrollo de las funciones que corresponden a cada caso.

Modelos de combustible

La velocidad de propagación observa variaciones significativas dependiendo de las características del tipo vegetal que está siendo afectado por un incendio. En ello influyen las propiedades físicas de los materiales combustibles (cantidad, continuidad, distribución, porosidad, y tamaño o grosor de las partículas presentes), la calidad de los mismos (constituyentes químicos, densidad y poder calorífico) y su condición (en relación al contenido de humedad de los tejidos vegetales).

Sobre la base de diversos trabajos de investigación, Julio (1987 a, 1987 b, 1995) confeccionó una tabla de factores de propagación, expresados en metros por segundo de velocidad de avance, para incendios superficiales que se desarrollan consumiendo la vegetación en 31 modelos de combustibles identificados para Chile, los que son clasificados en cinco grandes grupos:

Tabla de Modelos de Combustible

Los valores señalados para el Factor de propagación, corresponden a situaciones normalizadas, consistentes en terrenos planos, ausencia de viento, cobertura vegetal continua y homogénea y, con un contenido de humedad de 15% para las partículas finas y muertas.

Contenido de humedad para la vegetación fina

La velocidad de propagación mantiene una relación inversa y no lineal con el contenido de humedad de las partículas finas y muertas que posee la vegetación que está siendo afectada por un incendio forestal. Por tal razón, el factor de propagación respectivo fue definido por medio de la siguiente función:

$$F_{CH} = \frac{389,1624 - 14,3X + 0,02X^2}{3,559 + 1,6615X + 2,6239X^2}$$

Los antecedentes empleados en el diseño de esta fórmula, provienen del Servicio Forestal de Estados Unidos (1960, 1969) y de investigaciones desarrolladas por Brumm (1970) y Julio (1992). La tabla de factores de propagación resultante para diferentes niveles de contenido de humedad de la vegetación fina, se presenta en el cuadro 3.

Por otra parte, el contenido de humedad de la vegetación fina y muerta, las que equivalen materiales de tiempos de reatadación de 1 y 10 horas respectivamente (partículas de grosores iguales o inferiores a 2,5 centímetros) depende esencialmente del efecto de la temperatura y humedad relativa existente en el ambiente en el que se encuentran. Al respecto, se elaboró una fórmula que permitiera el cálculo del contenido de humedad directamente con los valores observados en estaciones meteorológicas, para lo cual se consideró los resultados de los trabajos de Simmard (1968),

Brumm (1970), Fosberg y Deeming (1971), Deeming et al. (1974), Fosberg (1977), Cheney (1978), Rothermel (1983), Bahamondez (1983), Van Wagner (1987), Vega y Casal (1988) y Flores (1990).

$$CH = -2,97374 + 0,262RH - 0,00982T$$

Pendiente

Para esta variable, el valor del factor de propagación fue estimado sobre la base de los antecedentes publicados por el Servicio Forestal de Estados Unidos (1960 y 1969), de estudios efectuados por Brumm (1970) y de los datos recolectados en alrededor de 150 incendios reales y experimentales efectuados por las Universidades de Chile y Austral, en diversos proyectos de investigación efectuados entre 1975 y 1995. La función diseñada a base de los antecedentes indicados es:

$$Y = 1 + 0,023322X + 0,00013585 X^2$$

Viento

Los modelos de propagación por efecto de la intensidad del viento fueron obtenidos de los trabajos desarrollados por Anderson (1983), lo que permitió calcular la velocidad efectiva del viento para rumbos diferentes a la dirección de éste factor meteorológico, así como también los factores de propagación correspondientes.

Efecto general de la Velocidad del Viento en la Velocidad Lineal de Propagación del Fuego

A partir de los modelos de expansión de incendios para diferentes niveles de intensidad del viento determinados por Anderson (1983), bajo el supuesto de una condición de terreno plano y con la presencia de combustibles homogéneos, fue posible derivar la función básica para el factor de propagación del viento en el rumbo 0°/360°. Es decir, el incremento de la velocidad de propagación lineal del fuego en un tramo de idéntico rumbo al de la dirección del viento, para diferentes niveles de intensidad de esta variable meteorológica. Esta función, corresponde a:

$$Y = 1,00 + 0,51218X - 0,007151X^2$$

Debe señalarse que ésta fórmula sólo es aplicable en un rango de velocidad de viento de 0 a 65 km/hora, por que para niveles mayores de intensidad no se contó con información confiable para incorporarla en la construcción de la función. Por tal razón, provisoriamente se ha optado por mantener constante el valor de esta factor de propagación en los niveles de mayor velocidad del viento.

Velocidad efectiva del viento

La velocidad efectiva del viento, puede ser definida como la equivalente o generada en una dirección diferente a la correspondiente dirección original o real de este factor (es decir, la que está siendo proporcionada directamente desde una estación meteorológica o un simulador de campos de viento), en relación al efecto que se provoca en la propagación del fuego en el rumbo que se desea estimar.

En la estimación de la velocidad efectiva, a la dirección original del viento se le debe imputar una orientación de 0°/360° (norte realtivo) y, al rumbo diferente la correspondiente al ángulo que se forma con respecto a la primera. Por ejemplo, si una estación meteorológica indica la presencia de un viento en dirección 60° en un determinado punto, y se desea estimar la velocidad efectiva en los 85°, el primer rumbo pasa a ser considerado 0°, y el otro, en 25° (que equivale a la diferencia entre 60 y 85°).

De esta forma, empleando los modelos de propagación por efecto del viento determinados por Anderson (1983), se definieron las funciones de las velocidades efectivas para rumbos diferentes al original. La fórmula general corresponde a la de una parábola de mínimos cuadrados, que se expresa como $Y = a + bx + cx^2$, donde x representa la velocidad original o real del viento (en el rumbo 0/360° y expresada en Km/hora), e y, el rumbo (expresado en grados sexagesimales) al cual se desea calcular la velocidad efectiva.

Factores de propagación para diferentes niveles de velocidad original y distintos rumbos

Con los antecedentes expuestos previamente, fue posible calcular los factores de propagación por efecto de la velocidad del viento para rumbos diferentes al de su dirección original. También se mantiene para este caso la función general $Y = a + bx + cx^2$. La fórmula a aplicar debe corresponder a la del nivel de velocidad del viento en su dirección original, considerando como X al rumbo para el que se desea calcular su factor de propagación, e Y el valor del respectivo factor de propagación. Debe indicarse que el coeficiente de posición "a" debe asignarse el valor resultante de la aplicación señalada en 3.4.1 (efecto general de la v...) que corresponde a la función básica del factor de propagación.

En la tabla 6 se presenta la tabla de valores resultantes de la aplicación de la función recién indicada, que expresa los valores de los factores de propagación según diferentes niveles de intensidad del viento y diferentes rumbos de la propagación lineal.

Barreras en la propagación del fuego

La presencia de barreras en la zona de avance de un incendio indudablemente afectará a su modelo de propagación, razón por la cual constituyen elementos que ineludiblemente deben ser considerados en el diseño de un simulador de expansión de focos de incendios. Esta apreciación condujo a la necesidad de construir una función que pudiese representar en forma confiable la clase de efecto que podría originarse a consecuencia de este tipo de elemento.

Como barreras en la propagación lineal del fuego, se consideraron todos aquellos espacios desprovistos de vegetación que alteran la continuidad de los combustibles, tales como caminos, cortafuegos, cursos de agua, roqueríos, etc., los cuales pueden detener la expansión del foco en un determinado rumbo, o bien afectar su velocidad de avance. Esto depende del nivel de intensidad calórica del frente del incendio al llegar a la barrera, y del ancho de la franja incombustible.

En el diseño de la función, se combinaron dos fuentes de información: Por una parte, se utilizó la función desarrollada por Barrows (1971), referida a la cantidad de calor recibido en un punto determinado a consecuencia de la energía radiante horizontal emitida por un frente de fuego de intensidad calórica lineal conocida y situado a una distancia determinada. Por otro lado, se emplearon los archivos de diversos proyectos de investigación de las Universidades de Chile y Austral de Chile, referidos a los tiempos requeridos por la propagación superficial del fuego para saltar barreras de diversas magnitudes.

Lo anterior condujo a la preparación de funciones alternativas para representar el problema en solución, optándose finalmente por la siguiente expresión:

$$Q_f = \left[\left(\frac{0,303Q_0}{d^2} \right) (T^{0,5} - 0,0325T) \right]^{1,08}$$

Es necesario aclarar que la función descrita sólo está referida a la transferencia de calor superficial, es decir, no considera la propagación o iniciación de focos por emisiones de materiales incandescentes, producto de una columna de convección de alto dinamismo o por la presencia de vientos de altura intensos. Por otra parte, sobre la base de observaciones experimentales, se consideró que la ignición se produce cuando el punto de vegetación receptor de la radiación logra acumular un monto de calor equivalente a 100 kilocalorías. Es decir, si el calor acumulado no alcanza el monto señalado, cualquiera que sea el tiempo transcurrido, no se produce el encendido, y el incendio superficial se detiene definitivamente al llegar a la barrera.

2. VALIDACION DEL SIMULADOR DE INCENDIOS

La comprobación de la confiabilidad del simulador de incendios del Sistema KITRAL, descrito en las páginas anteriores, se llevó a efecto con la recolección de antecedentes en la VIII Región de Chile en dos etapas. La primera, en el transcurso de la temporada de verano 1994-1995, abarcando una zona de 570.000 hectáreas, y posteriormente, en la temporada 1996-1997, en la misma zona anterior pero ampliada a 1.470.000 hectáreas, en la oportunidad que esta herramienta fue incorporada a la gestión del Programa Regional de Manejo del Fuego de la Corporación Nacional Forestal (CONAF).

Metodología

El proceso y los resultados de la validación, publicados por Castillo (1997), se basó en la comparación de las variables del comportamiento del fuego entre incendios reales, cuyos valores fueron medidos en el terreno durante su propagación, con los parámetros de los mismos focos simulados por el Sistema Kitral con la información inicial de los respectivos reportes de detección recibidos en la central de operaciones de CONAF.

En la comparación se contempló una información completa y confiable de 10 incendios, que permitieron evaluar los resultados en 16 variables específicas del comportamiento del fuego. Además se contó con información de otros 4 incendios, seleccionados en un conjunto de 127, que permitió complementar el análisis de validación. El análisis estadístico utilizado en la comparación de las 16 variables específicas consideró métodos paramétricos (Comparación de Medias Pareadas) y no paramétricos (Coeficiente de Correlación de Rangos de Spearman, y Prueba de Rangos y Signos del Wilcoxon). Por su parte, en la evaluación de los resultados generales, destinado a evaluar la similitud en el tamaño y forma de los modelos de propagación, se emplearon análisis de conjunto multivariados (Método de los Componentes Principales y Técnica de Asignación de Rangos y Puntajes).

Resultados

Los antecedentes generales de los dos conjuntos de incendios utilizados: Grupo 1, que incluye 10 casos y que permitieron la comparación detallada del comportamiento del fuego entre los valores reales y simulados, el Grupo 2, con información complementaria de 47 casos para la evaluación general de los resultados, se señala a continuación.

ASPECTO	GRUPO 1	GRUPO 2	TOTAL
Número de Incendios	10	47	57
Superficie Promedio de Incendios Reales (ha)	2,26	37,95	31,69
Superficie Promedio de Incendios Simulados (ha)	1,18	41,84	34,71
Superficie Mínima de Incendios Reales (ha)	0,60	0,01	0,01
Superficie Mínima de Incendios Simulados (ha)	0,66	0,01	0,01
Superficie Máxima de Incendios Reales (ha)	,76	500	500
Superficie Máxima de Incendios Simulados (ha)	1,75	566	566

CUADRO 1.- Comparación de superficies entre incendios reales y simulados por el Sistema KITRAL

En el primer grupo de 10 incendios, los resultados de la comparación entre los valores reales y simulados de las 16 variables específicas analizadas, fueron coincidentes en todas las técnicas estadísticas utilizadas. A continuación se indican las variables y la aceptación o rechazo de la hipótesis de similitud. La aceptación se consideró suficiente a un nivel de significancia de 5%.

VARIABLE ESPECIFICA	SIMILITUD
Incremento de Superficie	SI
Incremento de Perímetro	SI
Superficie Quemada	NO
Perímetro de la Superficie Quemada	NO
Distancia entre el Origen y la Cabeza de los Incendios	SI
Distancia entre el Origen y la Cola de los Incendios	SI
Distancia Quemada desde el Origen en el Rumbo Norte	NO
Distancia Quemada desde el Origen en el Rumbo Sur	SI
Distancia Quemada desde el Origen en el Rumbo Este	SI
Distancia Quemada desde el Origen en el Rumbo Oeste	NI
Distancia Quemada desde el Origen en el Rumbo Noroeste	SI
Distancia Quemada desde el Origen en el Rumbo Noreste	SI
Distancia Quemada desde el Origen en el Rumbo Suroeste	SI
Distancia Quemada desde el Origen en el Rumbo Sureste	SI
Relación Largo / Ancho del Modelo del Incendio	SI
Orientación de la Cabeza del Incendio	SI

CUADRO 2.- Resultados de las comparación en términos de la hipótesis de similitud

Como se puede observar, en 12 de las 16 variables específicas se comprueba estadísticamente una similitud entre los valores reales y simulados. Sin embargo, dos de las variables con rechazo de la hipótesis de similitud corresponden a parámetros importantes en la evaluación los incendios forestales: Superficie y Perímetro.

La explicación de lo anterior podría estar dada en que todos los incendios evaluados poseían una mínima o baja superficie, tal como se puede observar en el Cuadro 3. Esta condición conduce a un mayor nivel de riesgo al error en la simulación, debido al nivel de precisión de la información contenida en las bases de datos geográficos. Por ejemplo, un factor relevante en el comportamiento del fuego, es el caso de la pendiente del terreno, cuyos antecedentes derivados de la construcción del modelo digital del terreno, están basados en cotas altitudinales cada 25 metros, no considerando en muchos casos las variaciones topográficas del terreno menores a este rango. Por otra parte, la cartografía vegetal elaborada, y que permitió la delimitación espacial de los modelos de combustibles, se basó en la interpretación de fotografías aéreas a escalas que fluctuaron entre 1:20.000 y 1:100.000, y con puntos de control en el terreno separados por una distancia aproximada de 8,3 km (un punto por cada 7.000 hectáreas). Es indudable que si la información del terreno se hubiese recolectado con una mayor intensidad de muestreo, la precisión en la simulación de superficies pequeñas también habría sido más alta.

Sin lugar a dudas que en superficies mayores, esos errores de precisión tienden a compensarse, como pudo comprobarse en el análisis comparativo de las superficies resultantes agregando los 47 incendios del Grupo 2, que en promedio poseían una superficie significativamente mayor a la del Grupo 1.

Rango de Superficie (ha)	Número de Incendios	Superficie Promedio (ha)		Número de Casos con Similitud(*)	Promedio de Similitud (%)
		Real	Simulada		
0,01 – 0,50	15	0,22	1,84	6	36,67
0,51 – 2,00	26	0,99	3,03	17	58,65
2,01 – 5,00	5	2,23	2,80	4	77,00
5,01 – 20,00	4	7,28	8,74	4	85,00
20,01 – 60,00	3	3,33	40,55	3	86,67
Mayor a 60,00	4	404,75	431,17	4	93,75

CUADRO 3.- Similitud de superficies por rangos. (*) Considera la cantidad de pares comparados que superaron el 50% de similitud.

Se puede apreciar que la similitud en la superficie entre incendios reales y simulados aumenta notoriamente con el incremento del tamaño de la muestra en comparación. De la información del cuadro anterior, puede concluirse la alta confiabilidad del simulador, particularmente en el caso de incendios superiores a 2 hectáreas, en donde, considerando los datos de los cuatro rangos de mayor superficie, la similitud promedio es de alrededor de 85%, lo que junto a la velocidad de procesamiento que posee (proyección de 12 horas futuras en tres minutos), representa un muy buen estándar, dada la complejidad del tema y la elevada cantidad de variables, con sus respectivas funciones que concurren en el proceso.

Supuestamente, el mayor error en la simulación de incendios pequeños se estaría originando por la resolución de los datos en relación con la precisión de la información que se recibe de terreno, y no a problemas en el diseño del sistema. Sin embargo, se observó en los resultados de la simulación una leve tendencia a sobreestimar las superficies, lo que implica la conveniencia de mantener un programa permanente de perfeccionamiento del sistema, que incluya la revisión y mejora constante de la calidad de la información utilizada, como así también en la interpretación de las variables y diseño de las funciones empleadas.

4. CONCLUSIONES

- ☑ Comparaciones a nivel individual demostraron que en el 93% de los casos, no se evidencia la existencia de diferencias estadísticamente significativas, lo cual fue corroborado por los resultados de las pruebas no paramétricas y por los altos porcentajes de similitud obtenidos del análisis de conjunto.
- ☑ El método multivariado de las Componentes Principales permitió establecer el comportamiento estadístico de las variables en la expresión del tamaño y forma del incendio. El tratamiento de las variables en su conjunto, permitió obtener una interpretación global de las respuestas del simulador frente a incendios reales, verificándose la alta similitud en los resultados respecto al análisis individual para cada variable.
- ☑ En términos globales las respuestas proporcionadas por el simulador de expansión de incendios otorgaron un alto nivel de confiabilidad, especialmente en siniestros de gran magnitud. Este resultado era esperable de obtener, si se considera que, en incendios forestales de estas características, las diferencias observadas entre las variables tienden a compensarse.
- ☑ En términos específicos, las mayores diferencias en las estimaciones se concentran en rangos de superficie inferiores a 5 hectáreas, principalmente por el nivel de resolución que otorga la información digital del KITRAL, basado en interpolaciones para niveles de representación menores a 25 metros, y por la baja magnitud que presentan las variables resultado en incendios pequeños.
- ☑ Lo anterior queda claramente reflejado al analizar 57 incendios, tomando, entre otras, como principal variable de comparación, la superficie quemada (SQ). En este punto, se estableció que, en incendios de magnitud superior a 5 hectáreas reales afectadas, se obtienen porcentajes de similitud que aumentan a medida que la superficie real afectada es mayor, alcanzando un máximo cercano al 94% para incendios de tamaño superiores a 60 hectáreas.
- ☑ Del análisis multivariado, se desprende que las variaciones en el tamaño y forma de un siniestro, van asociadas a cambios en la expresión de las variables que caracterizan el modelo de propagación. Es así, que, a medida que el tamaño del siniestro aumenta, las variables más incidentes en la expresión de esta característica corresponden a los incrementos y valores totales de perímetro y superficie, mientras que la forma, queda mejor representada en las variables de distancias con orientación noreste y la correspondiente al frente principal de avance o cabeza del incendio, como así también, en la longitud y ancho total del contorno de propagación.

5. BIBLIOGRAFIA

- ALBINI, F. 1976. Estimating Wildfire Behavior and Effects. USDA Forest Service. Gen.Techn.Rep. INT-30, Ogden. 92p.
- ANDERSON, H.E. 1983. Predicting Wind-Driven Wild Land Fire Size and Shape. USDA Forest Service, RES. Pap. INT-305, Ogden.
- BAHAMONDEZ, P. 1983. Modelo de Tablillas Indicadoras en la Evaluación del Grado de Peligro de Incendios Forestales. Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral, Valdivia, Chile. 55 p.
- BALL, G.; GUERTIN, P.; VASCONCELOS, M. 1990. FIREMAP: A Dynamic Modeling System. Int. Conf. Forest Fire Research. Coimbra. 12p.
- BARROWS, 1971. Intermediate Fire Behavior. USDA Forest Service. Intermountain Region-Course Reference. 59 p.
- BROWN, A.; DAVIS, K. 1973. Forest Fire. Control and Use. Second Edition, Mc.Graw-Hill, N.York. 686p.
- BRUMM, E. 1970. Clasificación Preliminar de Combustibles forestales a base del tiempo de ignición y velocidad de propagación del fuego. Tesis Ing. Forestal. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 66 p.
- CANADIAN FORESTRY SERVICE. 1992. Development and structure of the canadian forest fire Behavior prediction system. Forestry Canada Fire Danger Group. Information report ST-X-3, Ottawa. 63 p.
- CHENEY, N.P. 1978. Guidelines for Fire Management of Forested Watersheds based on asutralian experience. FAO conservation guide. 37 p.

- DEEMING, J.E.; LANCASTER, J.W.; FOSBERG, M.A.; FURMAN, R.W.; SCHROEDER, M.J. 1974. National Fire Danger Rating System. USDA Forest Service. Res. Pap. RM-84.
- FLORES, J. 1990. Variabilidad estacional y diaria del contenido de humedad en tipos vegetales del sector costero de la VII Región. Tesis Ing. Forestal, Universidad de Chile, Santiago. 111 p.
- FOSBERG, M.A. 1977. Forecasting the 10 hour timelag Fuel Moisture. USDA Forest Service. Res. Pap. RM-187.
- FOSBERG, M.A.; DEEMING, J.E. 1971. Derivation of the 1-and 10 hour Timelag Fuel Moisture Calculation for the NFDRS. USDA Forest Service. Res. Note
- JULIO, G. 1987b. Clasificación preliminar de Modelos de Combustibles Forestales. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral, Informe Convenio 140, Valdivia, Chile, 97 p.
- JULIO, G. 1987a. Análisis de Técnicas de Quema en la eliminación de desechos de explotación de pino insigne. Universidad Austral, Informe Convenio 129, Valdivia, Chile. 72 p.
- JULIO, G. 1992. Estudio de las propiedades físicas de combustibles forestales. Actas IX jornadas de manejo del Fuego, Consejo técnico de manejo del fuego, Concepción, Chile. Pp.86-105.
- JULIO, G. 1994. Apuntes del curso: Control de Incendios Forestales. Universidad de Chile. Depto. Manejo Recursos Forestales. 329p.
- JULIO, G.; PEDERNERA, P.; CASTILLO, E. 1995. Diseño Funcional del Simulador de Incendios Forestales. Actas del Taller Internacional Prognosis y Gestión en el Control de Incendios Forestales. Proyecto FONDEF FI-13. Pp. 182-204. Santiago, Chile.
- ROTHERMEL, R. 1983. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires. USDA Forest Service. Gen. Techn. Rep. INT-143, Ogden. 161p.
- SIEGEL, S. 1956. Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences. New York: McGraw-Hill. 127p.
- SIMMARD, A.J. 1968, The Moisture content of Forest Fuel-I. A Review of the Basic Concepts. Canadian Forestry Service. Forest Fire Res. FF-X-4. 47 p.
- USDA FORESTRY SERVICE. 1969. Fireline Notebook. USDA Forest Service, Region Five. 150 p.
- VAN WAGNER, C. 1969. A simple fire growth model. For. Chron. 45(2): 103-104.
- VAN WAGNER, C. 1987. Development and structure of the Canadian Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service. For. Tech. Rep. 35. 37 p.
- VEGA, J.A.; CASAL, M. 1988. Contraste de Estimadores de Humedad de combustible forestal fino muerto en Montes arbolados de Galicia. Actas Semianrio sobre métodos y equipos para la prevención de incendios forestales. ICONA/OIT/CEE/ONU, Valencia. Pp. 94-97.