

Un modelo de programación dinámica para apoyar la planificación estratégica del manejo del fuego en Chile¹

Patricio Pedernera A., Miguel Castillo S., Guillermo Julio A.²

Abstract

Los incendios forestales en Chile son un problema muy importante que afecta tanto al medioambiente como a las actividades forestales. Aunque nuestro país presenta un alto nivel de desarrollo en cuanto a las operaciones de presupresión y combate, en los últimos 15 años, la eficacia de nuestros sistemas de protección (medida a través del tamaño promedio de los incendios) se ha mantenido constante, pero los presupuestos destinados a la protección han ido creciendo sostenidamente, en particular en el sector privado. El sector público por su parte, se ha visto enfrentado a difíciles momentos, donde la asignación de presupuestos se ha visto dificultada por otras prioridades nacionales, y por la gran dificultad para fundamentar solicitudes de recursos, sin elementos técnicos de soporte. Como una forma de resolver este problema se desarrolló un modelo de programación matemática, que representa el primer paso hacia un esquema de planificación basado en el análisis económico de las operaciones de manejo del fuego. El modelo permite determinar el tamaño óptimo de la fuerza de combate terrestre necesaria a nivel regional, para otorgar una adecuada atención a los problemas de incendios que se puedan presentar dentro de la zona de responsabilidad de los programas de protección del sector público. El modelo considera el análisis de cobertura de las unidades de combate terrestre, mediante un esquema de costos de acceso, donde un móvil se desplaza sobre una superficie que ofrece fricción al desplazamiento. La superficie de fricción se construye sobre la base de la red caminera regional y la velocidad media de desplazamiento por tipo de camino. Se considera además, como centros de oferta de protección, una serie de localizaciones para las unidades de combate terrestre. Posteriormente, se resuelve un modelo de programación dinámica que evalúa las diferentes combinaciones posibles de localizaciones sobre la base de la cobertura que cada localización logra aportar al sistema, maximizando la superficie bajo cobertura del sistema de protección. El modelo desarrollado, es aplicado a la situación del Programa de Protección contra Incendios Forestales que opera la Corporación Nacional Forestal en la VIII región de Chile.

¹ Una versión abreviada de este documento fue presentada como poster en el II International Symposium on Fire Economics, Planning and Policy: A global vision. 19 al 22 de Abril de 2004, Córdoba, España

² Académicos, Departamento Manejo de Recursos Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Casilla 9206, Santiago, Chile

Introducción

Durante los últimos 15 años, en Chile la ocurrencia de incendios forestales se ha mantenido relativamente constante, pese a los múltiples esfuerzos que se han desplegado para mejorar la eficiencia de las operaciones de combate. Aunque estos esfuerzos han estado permanentemente orientados hacia el mejoramiento de los equipos y el uso de material aéreo, poco o nada se ha hecho en cuanto a la revisión de los diseños y estrategias de protección que deben dirigir el accionar del manejo del fuego tanto en el sector público como el privado.

Al respecto, cabe mencionar que los presupuestos destinados a la protección contra incendios forestales se han visto permanentemente incrementados, sin un efecto real de disminución de incendios ni de disminución en la superficie afectada. Esto es de especial importancia, en particular en el sector privado, donde el nivel de gastos en protección equivale aproximadamente a 1.5 veces la inversión del Estado en este tema.

Por su parte, el sector público debe competir por recursos con otras prioridades nacionales, de modo que los responsables de los sistemas de protección deben hacer grandes esfuerzos para justificar las solicitudes de recursos ante las autoridades nacionales.

El propósito de este trabajo, es proporcionar una herramienta metodológica que facilite la planificación estratégica del manejo del fuego en el sector público, por medio de la definición del tamaño adecuado de la fuerza de combate requerida a nivel regional, de modo que se maximice el número de incendios posibles de atender, en la zona de operaciones del programa de manejo del fuego de la Corporación Nacional Forestal Región del Bio Bio.

Material y Método

El presente trabajo se desarrolla en la VIII región de Chile, la que posee un importante proporción del patrimonio de las grandes empresas forestales, y a la vez representa la región con la mayor proporción de incendios forestales respecto del total nacional de los últimos cinco años.

Para el desarrollo del trabajo, se cuenta con la información digital sobre incendios forestales, red caminera regional y las coordenadas de 34 localizaciones que la región utiliza en las operaciones del programa de protección. Esta información fue proporcionada en medio magnético por la Corporación Nacional Forestal para el desarrollo del trabajo.

El tratamiento de los datos se realizó utilizando el software estadístico SPSS v.11, los sistemas de información geográfica Arcinfo, Arcview e Idrisi y software desarrollado para aplicaciones al manejo del fuego por parte del Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile.

El método de trabajo consideró la ejecución de tres análisis independientes y sucesivos: Determinar el tiempo de arribo máximo permisible en la región, calcular las áreas de cobertura para el tiempo máximo permisible calculado en la etapa anterior, y finalmente correr un modelo optimizante que permita identificar y seleccionar la combinación de localizaciones que maximiza el número de incendios posibles de atender en la región. La descripción de cada una de estas etapas, se presenta en las siguientes páginas.

Determinación del tiempo de arribo

Para la determinación de los tiempos de arribo, se procedió a extraer de la base de datos del sistema estadístico de manejo del fuego de la Corporación Nacional Forestal, los incendios ocurridos en la región del Bío Bío, entre las temporadas 1992/93 y 2001/02 con una superficie afectada igual o menor que 100 hectáreas. De esta manera, la base de datos quedó conformada por 24.328 incendios que fueron sometidos a un proceso de verificación con el propósito de eliminar inconsistencias. En este proceso, se detectaron 4.419 incendios con algún problema los que fueron descartados del análisis, lo que en definitiva permitió obtener una base de datos de trabajo con 19.909 incendios correctamente caracterizados.

Por otra parte, cabe mencionar que dentro de los 19.909 incendios incluidos en la base de datos, se encuentra una cantidad de incendios cuya diferencia entre la fecha y hora de la detección; y la fecha y hora del primer ataque es de 1, 2, 3 ó 4 minutos (1.515 registros), valores que a nuestro juicio no son suficientemente confiables. Sin embargo, y ante la ausencia de otros antecedentes, se optó por incluirlos dentro del análisis, dado que muchos de ellos en la realidad pueden haber correspondido a incendios satélites, o a incendios que se iniciaron muy cerca del lugar donde ya se encontraba trabajando una o varias unidades de combate.

Para cada incendio en la base de datos se calculó la diferencia existente entre la fecha y hora de detección, y la fecha y hora del primer ataque, con el propósito de contar con un estimador del tiempo de arribo a cada incendio. Para este cálculo, se considero que el tiempo de arribo, corresponde al tiempo transcurrido entre la detección y el inicio del primer ataque, ante la ausencia de un campo en la base de datos que registrara el tiempo de arribo efectivo a cada incendio.

Esta consideración, se basa en que el despacho de una o varias unidades de combate sólo es efectivo una vez que se ha recibido el aviso de detección, de modo que la contabilización del tiempo empleado en el viaje de los recursos desde sus bases o posiciones de stand by hasta el lugar del incendio, sólo tiene sentido desde el instante en que la unidad es despachada, acción que sólo se ejecuta una vez que se ha recibido el aviso y confirmación de incendios desde alguno de los mecanismos de detección utilizado en la zona de operaciones del programa de protección.

Posteriormente, el tiempo de arribo calculado para cada incendio, fue transformado a horas y minutos respectivamente, con el propósito de facilitar los cálculos posteriores. La base de datos de trabajo fue procesada utilizando el software estadístico SPSS, para obtener los respectivos estadígrafos descriptivos.

Con el propósito de estudiar la existencia de alguna relación directa entre la superficie afectada y el tiempo de arribo, se elaboró un gráfico de dispersión de ambas variables, considerando el tiempo de arribo como variable independiente y la superficie afectada como variable dependiente. Este gráfico permitió determinar los niveles de agrupación de los incendios, para delimitar de mejor manera los valores máximos a considerar, para las variables tiempo de arribo y superficie afectada.

Finalmente, se construyo una tabla de frecuencias, en función de los valores promedios de tiempo de arribo y superficie afectada, con el propósito de determinar el tiempo de arribo mínimo permisible que se emplearía en las etapas posteriores de este estudio.

Cálculo de cobertura y determinación del número óptimo de unidades de combate terrestre

Uno de los aspectos más importantes para el éxito de la protección contra incendios forestales, tiene que ver con la determinación de la cobertura de cada una de las unidades operativas dispuestas por el programa de protección contra incendios forestales, dentro de su zona de operaciones o de responsabilidad.

En el caso de las torres de detección, por ejemplo, el área de cobertura es fácilmente determinado, por cuanto la cobertura de la torre este determinada por las zonas de interés de protección que son vistas en forma directa desde el punto de observación. Esta superficie se puede calcular mediante el uso de modelos digitales de elevaciones, y herramientas para el cálculo de visibilidades que hoy día se encuentran incluidas en la mayoría de los softwares de Sistemas de Información Geográfica.

En el caso de los recursos terrestres, se presenta una particular dificultad, dado que el área de cobertura de estos recursos, depende básicamente del tiempo que los recursos emplean para su desplazamiento desde sus bases o posiciones de stand by, hasta el lugar donde está ocurriendo el incendio hacia el cual han sido asignados. Este desplazamiento depende de varios factores (tipo de móvil, condiciones de tránsito, accesibilidad a la red caminera, y otros) que definen en definitiva el tiempo que los recursos de combate emplean para llegar al lugar del incendio.

En este estudio, se emplearon 34 localizaciones de recursos terrestres actualmente en uso por parte de la Corporación Nacional Forestal, Región del Bio Bio, con el propósito de determinar el nivel actual de cobertura en la región y proponer localizaciones que en definitiva contribuyan a maximizar los incendios que el sistema de protección regional pueda atender.

Para el modelamiento de los desplazamientos y cálculo de cobertura, se utilizó un enfoque de tiempos de acceso donde un móvil se desplaza sobre una superficie que ofrece fricción al desplazamiento (Eastman, 2000; ESRI, 1993).

Dicha superficie fue construida sobre la base de la red caminera regional, cuya fricción al desplazamiento fue asignada en función de la velocidad media de desplazamiento según tipo de camino y carpeta de rodado de acuerdo con las especificaciones del manual de carreteras del ministerio de obras públicas (MOP, 2000), las que se presentan en la *Tabla 1*.

Tipo de camino	Velocidad de diseño (km/hr)	Velocidad utilizada (Km/Hr)
Urbano	60	40
Autopista	115	70
Autorruta	95	70
Carreteras primarias	95	60
Caminos colectores	80	40
Caminos locales	70	30

Tabla 1—Velocidad de desplazamiento utilizada en el estudio (km/hr).

La fricción o resistencia al desplazamiento fue asignada a cada arco de la red caminera, dividiendo la longitud del arco por la velocidad a la que el móvil puede atravesarlo, de acuerdo a lo señalado en la (tabla 1).

El desplazamiento a través de los arcos de la red caminera, fue modelado utilizando el módulo network del SIG Arcinfo (ESRI, 1992), empleando un modelo de oferta y demanda a través de un sistema de distribución, para identificar los

sectores que pueden ser alcanzados desde cada una de las posiciones de stand by para el tiempo máximo de arribo determinado en el estudio.

Los movimientos fuera de la red caminera, fueron modelados utilizando el software SIG Idrisi (Eastman, 2000), de modo que se debió utilizar las herramientas de conversión incluidas en el software, para realizar el cambio desde el modelo de datos vectorial (Arcinfo) al modelo de datos raster (Idrisi). El proceso de conversión, permitió la obtención de 34 archivos raster, uno por cada uno de los puntos considerados en la evaluación a una resolución de 25 metros.

El cálculo de los tiempos de acceso, fuera de la red de caminos, fue realizado por medio de una rutina de cálculo de costos de acceso, a partir de los alcances máximos calculados para cada localización mediante Arcinfo. Para esto, se empleó el módulo de análisis de costos de Idrisi, que utiliza un algoritmo que genera una superficie de costos donde la distancia se mide como el mínimo costo (tiempo, esfuerzo o gastos) de desplazamiento sobre la superficie de fricción (Eastman, 2000).

Finalmente, las áreas de cobertura para cada una de las 34 localizaciones, fueron obtenidas mediante procesos de reclasificación sobre las respectivas superficies de costos generadas, para un tiempo igual al tiempo de arribo determinado anteriormente.

Para determinar el número adecuado de localizaciones que deben ser parte del sistema de protección terrestre en la región del Bio Bio, se desarrolló un modelo de programación dinámica, que permite maximizar la cobertura de los incendios en la región. El modelo, permite evaluar todas las posibles combinaciones de localizaciones, posibilitando la selección de la combinación de 1, 2, 3,...,34 puntos que maximizan la cobertura conjunta del sistema.

La función recursiva desarrollada para este caso es la siguiente:

$$C_n = \text{Max} \{ C_i + C_{n-1} \}$$

Donde

C_n es el número de incendios cubierto por una combinación de n localizaciones

Dada la fuerte connotación espacial que tiene el problema bajo estudio, el modelo fue implementado para ser resuelto en un ambiente de SIG, utilizando para ello el módulo GRID del software SIG Arcinfo. El modelo fue programado en una interfaz de cálculo automático empleando el lenguaje de programación AML de Arcinfo de manera que en cada iteración, se obtiene la combinación que maximiza la cobertura total del sistema.

Resultados

Determinación del tiempo de arribo

El análisis estadístico descriptivo de la base de datos de trabajo, se presenta a continuación, en la *Tabla 2*

Variable	Superficie afectada (ha)	Tiempo de arribo (min)
Observaciones	19,909	19,909
Máximo	100.00	5,125
Mínimo	0.01	1.00
Promedio	1.51	33.52
Varianza	40.46	8,459.57

Tabla 2--Estadística descriptiva de la base de datos de trabajo

En relación con la Tabla 2, se puede observar que en el caso de la superficie afectada, se presenta una gran variabilidad con valores extremos del orden de 100 m² y de un máximo de 100 ha, de acuerdo a las condiciones del estudio. El valor promedio observado para este caso (1.51 ha) es bastante pequeño, lo que es consecuente con la varianza observada para la población. Sin embargo, en el caso de los tiempos de arribo, se observa una altísima variabilidad en las observaciones, lo que queda evidenciado por la altísima varianza calculada para la población; lo mismo se observa respecto de los valores extremos, donde la diferencia entre máximos y mínimos es de 5,124 minutos (85.4 horas).

Con el propósito de explorar la existencia de alguna relación entre los tiempos de arribo y la superficie afectada, se procedió a elaborar un Figura que relaciona ambas variables, sin un mayor procesamiento de la información. El gráfico elaborado, se muestra a continuación en la Figura 1.

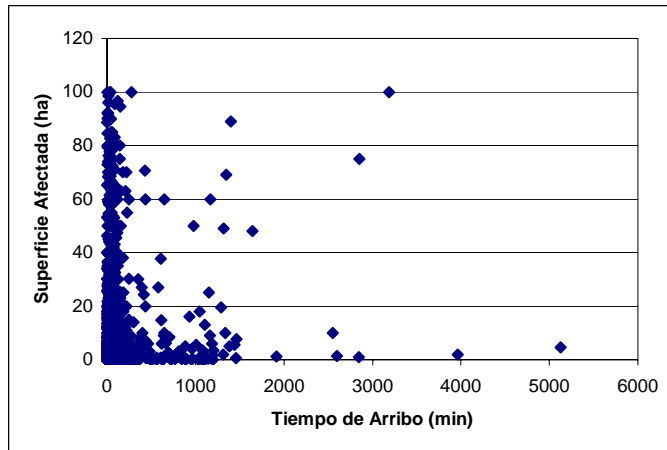


Figura 1--Tiempos de Arribo (min) vs Superficie Afectada (ha)

En la *Figura 1*, se puede apreciar claramente la agrupación de incendios hacia categorías inferiores a 1.000 minutos (16,6 horas) de tiempo de arribo; por otra parte, se observa además una alta variabilidad en cuanto a las superficies afectadas para una misma categoría de tiempo.

Para explorar un poco más en detalle, la existencia de alguna relación entre los datos, se construyó el mismo gráfico, pero limitando el rango de despliegue de los tiempos de arribo, a valores inferiores a 100 minutos (1,6 horas), que se presenta en la *Figura 2*.

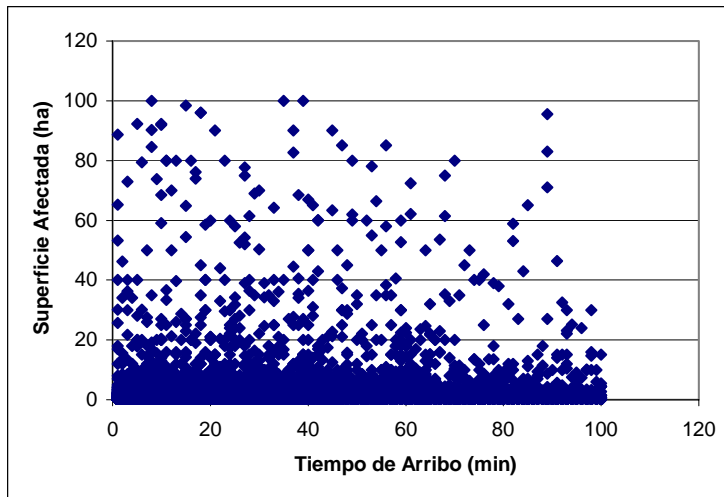


Figura 2--Tiempos de Arribo (min) vs Superficie Afectada (ha) para un tiempo límite de 100 minutos

Nuevamente, se observa el mismo efecto señalado anteriormente, es decir, para cada nivel de tiempo de arribo, se aprecia una alta dispersión de superficies afectadas, no siendo posible determinar alguna relación directa entre ambas variables. Este hecho se hace evidente al explorar cada categoría de tiempo de arribo en la base de datos, donde para cada nivel, se encuentra una gran cantidad de valores diferentes de superficie afectada.

Por otra parte, es evidente, al observar la figura de mayor detalle (*Figura 2*) que una alta proporción de los incendios, se agrupa hacia niveles inferiores a 20 ha de superficie afectada, con una altísima dispersión en los valores de los tiempos de arribo.

Conocido este valor de superficie afectada, que fue considerado como límite para mejorar el nivel de detalle, se procedió a elaborar un cuadro de frecuencias para cada categoría de superficie. Las categorías consideradas fueron definidas con el propósito de facilitar el análisis de los datos, en función del valor límite de detalle determinado precedentemente. De esta manera, los incendios fueron agrupados en 32 categorías, donde las 20 primeras corresponden a clases de una hectárea cada una, las categorías siguientes (12) se definieron con rangos variables, hasta llegar a las 100 hectáreas definidas como límite para el estudio.

Para cada una de ellas, se calculó la cantidad de incendios, el promedio, y los valores máximos y mínimos, para las variables superficie afectada y tiempo de arribo respectivamente. Además, se incluyó los estadísticos descriptivos usuales para cada

una de las variables consideradas. La *Tabla 3*, muestra los resultados de este proceso.

Rango superficie (ha)	Número de incendios	Perc.	Superficie Afectada (ha)			Tiempo (min.)		
			Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo
0 a 1	15,580	78.26	0.96	0.17	0.01	1,460.00	25.92	1.00
1 a 2	1,772	8.90	1.98	1.29	1.00	2,845.00	45.67	1.00
2 a 3	767	3.85	2.95	2.29	2.00	3,965.00	52.90	1.00
3 a 4	411	2.06	3.91	3.26	3.00	1,201.00	57.52	1.00
4 a 5	266	1.34	4.91	4.24	4.00	5,125.00	79.03	1.00
5 a 6	183	0.92	5.80	5.18	5.00	1,440.00	76.03	1.00
6 a 7	132	0.66	6.95	6.23	6.00	1,186.00	72.92	1.00
7 a 8	86	0.43	7.90	7.14	7.00	1,461.00	77.81	5.00
8 a 9	93	0.47	8.80	8.16	8.00	708.00	56.47	1.00
9 a 10	37	0.19	9.90	9.12	9.00	1,161.00	102.35	4.00
10 a 11	79	0.40	10.80	10.07	10.00	2,553.00	111.65	4.00
11 a 12	17	0.09	11.80	11.19	11.00	222.00	63.88	8.00
12 a 13	39	0.20	12.90	12.11	12.00	208.00	39.18	1.00
13 a 14	15	0.08	13.55	13.21	13.00	1,108.00	127.67	2.00
14 a 15	22	0.11	14.75	14.24	14.00	616.00	90.18	7.00
15 a 16	40	0.20	15.90	15.12	15.00	251.00	51.25	2.00
16 a 17	11	0.06	16.90	16.19	16.00	931.00	113.55	1.00
17 a 18	11	0.06	17.97	17.31	17.00	130.00	45.82	4.00
18 a 19	23	0.12	18.20	18.01	18.00	1,050.00	105.30	1.00
19 a 20	3	0.02	19.60	19.27	19.00	1,288.00	437.67	8.00
20 a 25	76	0.38	24.75	21.16	20.00	432.00	60.95	3.00
25 a 30	42	0.21	29.60	26.23	25.00	1,150.00	92.64	1.00
30 a 35	33	0.17	34.30	31.35	30.00	355.00	57.48	1.00
35 a 40	29	0.15	39.65	36.50	35.00	607.00	75.48	3.00
40 a 45	21	0.11	44.50	40.85	40.00	104.00	41.10	1.00
45 a 50	9	0.05	49.00	46.40	45.00	1,642.00	379.11	2.00
50 a 60	29	0.15	59.10	52.71	50.00	980.00	90.79	1.00
60 a 70	31	0.16	69.00	62.88	60.00	1,351.00	171.84	1.00
70 a 80	18	0.09	79.50	73.68	70.00	2,852.00	235.61	3.00
80 a 90	16	0.08	89.00	82.37	80.00	1,403.00	130.25	1.00
90 a 100	13	0.07	98.50	93.37	90.00	153.00	42.23	5.00
Más de 100	5	0.03	100.00	100.00	100.00	3,186.00	709.00	8.00
Suma	19,909	100	923.33	861.31	835.01	43,124.00	3,919.25	85.00
Promedio	622.16		28.85	26.92	26.09	1347.63	122.48	2.66
Máximo	15,580	0.78	100.00	100.00	100.00	5125.00	709.00	8.00
Mínimo	3.00	0.03	0.96	0.17	0.01	104.00	25.92	1.00
Varianza	7,561,608.91		869.26	783.63	740.52	1,377,479.92	19,681.00	5.46
Desviación	2749.84		29.48	27.99	27.21	1173.66	140.29	2.34

Tabla 3--Agrupación y ordenamiento de datos en 32 categorías de Superficie Afectada

De la lectura de la *Tabla 3*, se desprende que alrededor del 90% de los incendios presentan una superficie afectada inferior a las 5 ha, con tiempos de arribo inferiores

a 60 minutos (una hora). Por otra parte, casi el 80% del total de incendios se concentra en la categoría uno (menos de una hectárea de superficie afectada) y el valor promedio del tiempo de arribo para esa categoría es del orden de 26 minutos (25,92 min.).

Es evidente, la existencia de una altísima variabilidad respecto de los tiempos de arribo, efecto que se produce debido a la dispersión que presenta la superficie afectada para el mismo minuto de tiempo de arribo, lo que hace pensar en la no existencia de una relación directa entre ambas variables. Esto se puede asegurar, dado que la superficie final afectada de un incendio forestal depende de otros factores (combustibles, condiciones ambientales, topografía, acciones de combate) que condicionan el comportamiento del fuego, y por ende el modelo de propagación y la superficie afectada final que el incendio adquiere.

Sin embargo, resolver el problema del tiempo de arribo, se construyó un gráfico que muestra la superficie afectada y los tiempos de arribo para cada una de las 32 categorías de tamaño de incendios definidos en este análisis.

Los datos fueron ordenados por categoría de tamaño y se graficó la superficie afectada y los tiempos de arribo en forma independiente, y con la misma escala de valores en el eje Y, para observar el comportamiento conjunto de ambas variables simultáneamente. El resultado de este proceso, se presenta a continuación, en la *Figura 3*.

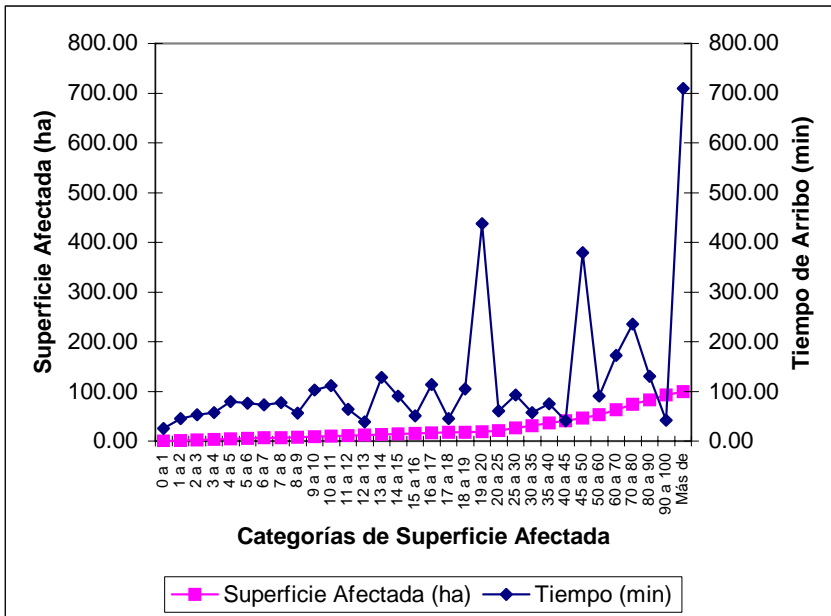


Figura 3--Distribución de la Superficie Afectada Promedio y el Tiempo de Arribo Promedio para 32 categorías de tamaño de incendios forestales

En la *Figura 3*, se puede observar claramente la tendencia exponencial que muestra la superficie afectada, en términos de que mientras más tiempo se demora en iniciar el primer ataque, la superficie afectada final es mayor. La tendencia en este caso, corresponde a una curva de tipo cuadrático o exponencial, lo que hace

consistente el análisis con lo expresado por Julio³ (1999), en el sentido que la dificultad de control de un incendio (y por consecuencia la superficie afectada) aumenta en términos exponenciales respecto del tiempo que se demora en iniciar el control.

Otro aspecto interesante, tiene que ver con la forma en la que se presenta la evolución del tiempo de arribo, la que presenta oscilaciones sin un comportamiento definido. Es notorio, en todo caso que a medida que aumenta el tiempo de arribo a los incendios, también aumenta la superficie afectada. En este caso, no se puede encontrar una línea de tendencia clara, dada la alta variabilidad que se observa en los datos.

Dada la forma de las curvas, y los valores de frecuencia calculados para cada categoría de tamaño de incendios (*Tabla 3*), se puede concluir que el tiempo de arribo “óptimo” se encuentra en la primera categoría de tamaño (0 a 1 hectáreas afectadas) donde en promedio las unidades de combate demoran 26 minutos en iniciar el primer ataque. Coincidentemente, esta categoría agrupa además la mayor proporción (78.26 por ciento) de los incendios registrados en la base de datos (*Tabla 3*).

Cálculo de coberturas y determinación del número óptimo de unidades de combate terrestre

La aplicación de los algoritmos de cálculo de rutas y costos de acceso en el ambiente SIG, permitió la generación de los 34 mapas de cobertura para las localizaciones incluidas en el análisis. La Figura 4 muestra un ejemplo del resultado del cálculo obtenido utilizando el SIG Idrisi

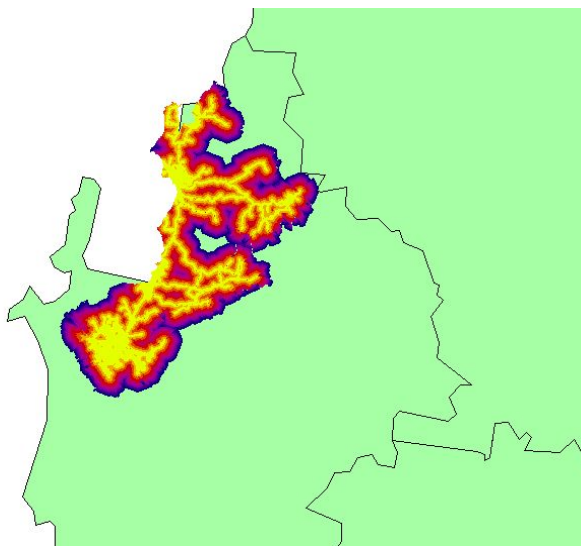


Figura 4—Costos de acceso para la localización de la brigada 301. Las bandas de color representan el tiempo (minutos) en que un móvil puede alcanzar un píxel, hasta un máximo de 26 minutos.

De la *Figura 4* se puede observar claramente la influencia de la red caminera en la superficie que la unidad de combate puede alcanzar en el tiempo de arribo máximo determinado en este estudio.

³ Julio Guillermo, Fundamentos de Manejo del Fuego, Manual Docente Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales Universidad de Chile.

Los 34 mapas de cobertura, fueron sometidos a un proceso de superposición raster, con la imagen correspondiente a la ocurrencia de incendios forestales de la región, con el propósito de obtener un estimador de la carga de trabajo potencial promedio histórica de cada unidad. El resultado de este proceso, se muestra en la Tabla 4.

Localización	Nº Incendios	Localización	Nº Incendios
1	590.4	18	170.2
2	499.8	19	372.8
3	666.0	20	264.4
4	845.8	21	385.4
5	792.8	22	276.2
6	787.8	23	290.6
7	806.6	24	442.4
8	803.2	25	250.2
9	822.0	26	445.4
10	845.8	27	255.0
11	268.2	28	882.2
12	205.6	29	1082.0
13	265.0	30	600.0
14	264.4	31	1081.0
15	287.8	32	109.2
16	329.6	33	107.4
17	290.6	34	104.4

Tabla 4—Número promedio de incendios (temporadas 1992/93 a 2001/02) bajo cobertura por cada una de las 34 localizaciones evaluadas.

Como se esperaba, en la aplicación de la superposición de las áreas de cobertura de las unidades de combate con la ocurrencia de incendios regional, se obtuvieron valores diferentes para cada una de las localizaciones. Destacan en este caso, la localización número 29, que es la que aporta mayor cantidad de incendios a la cobertura total del sistema. Esto no es de extrañar, dado que dicha localización se ubica en una zona donde históricamente se ha registrado la mayor cantidad de incendios en la región, razón por la que esta unidad es la que tiene la mayor carga de trabajo potencial de la región. Lo mismo ocurre con la localización 31, que se encuentra dentro de la misma zona de concentración de la ocurrencia de incendios.

Por otra parte, las localizaciones que menos aportes hacen individualmente al sistema son la 33 y la 34, las que podrían estar mal seleccionadas, y debiesen ser removidas del sistema.

Utilizando las herramientas de los SIG empleados en el estudio, se construyó un mapa de cobertura conjunta, para todas las localizaciones actualmente en uso por parte de la Corporación Nacional Forestal en la región del Bio Bio. Este mapa se presenta a continuación, en la Figura 5.

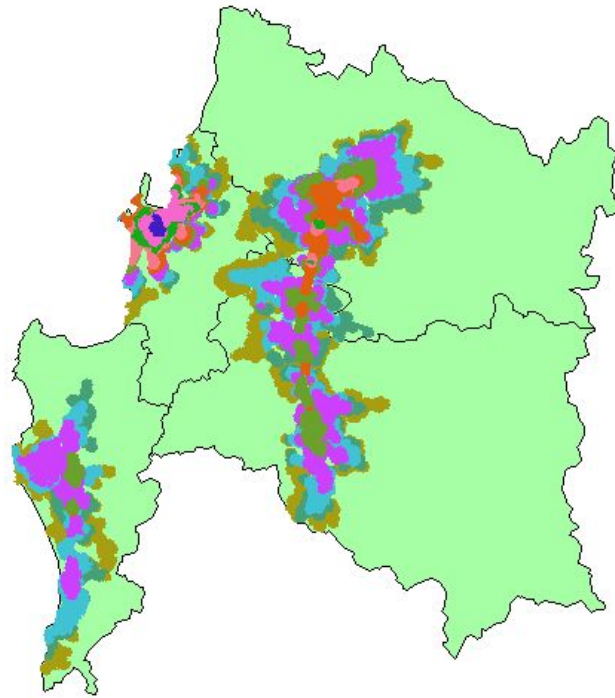


Figura 5—Cobertura actual de las unidades terrestres en la región del Bio Bio. Las bandas de color representan la cantidad de unidades que cubren los mismos puntos (azul 10 unidades, verde 1 unidad)

La cobertura actual del sistema de protección en la región, se ubica preferentemente en la zona cercana a la ciudad de Concepción, el valle central y la zona sur occidental de la región, sectores que tradicionalmente concentran la ocurrencia de incendios regional; otro aspecto interesante de mencionar, es la existencia de sectores que presentan un nivel de sobreprotección, en el sentido que son atendidos por hasta 10 unidades de combate diferentes al mismo tiempo.

La aplicación del modelo de programación dinámica, permitió resolver el problema de cobertura, determinando una combinación que permite en una primera etapa, mantener el mismo nivel de cobertura actual (en términos de superficie) con menos localizaciones incluidas en el sistema. La Tabla 5, muestra el resumen final de la aplicación del modelo desarrollado para este estudio. Dicha Tabla, muestra para cada combinación el máximo el numero de incendios promedio histórico bajo cobertura del sistema de protección.

n	Nº Incendios	n	Nº Incendios
1	1082.0	18	3714.4
2	1992.6	19	3720.4
3	1938.4	20	3725.2
4	2383.8	21	3729.6
5	2724.6	22	3733.4
6	3048.2	23	3735.6
7	3277.2	24	3736.4
8	3384.6	25	3737.0
9	3451.6	26	3737.6
10	3508.0	27	3738.0
11	3555.6	28	3738.0
12	3587.6	29	3738.0
13	3617.6	30	3738.0
14	3647.0	31	3738.0
15	3675.8	32	3738.0
16	3691.2	33	3738.0
17	3699.2	34	3738.0

Tabla 5—Número de incendios promedio histórico bajo cobertura por la mejor combinación de n localizaciones.

De los antecedentes expuestos en la tabla, se puede observar que en las primeras iteraciones, los aportes de cobertura sube rápidamente, para estabilizarse a partir de 27 localizaciones. Esta tendencia puede ser evidenciada más fácilmente, por medio del gráfico que se muestra en la Figura 6.

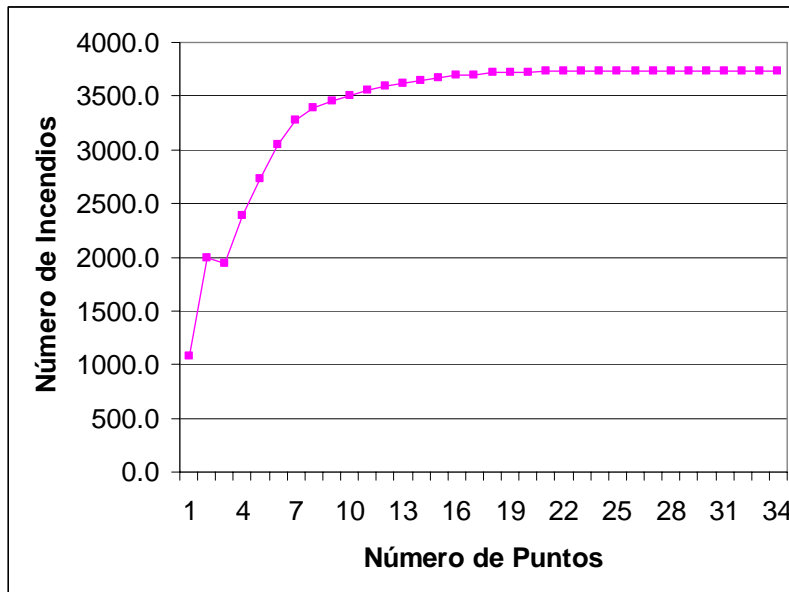


Figura 6—Evolución del número de incendios bajo cobertura, para las mejores combinaciones de localizaciones.

La figura muestra con claridad la tendencia a la estabilización en el nivel de cobertura a partir de la combinación de 26 localizaciones, entregando el máximo número de incendios posibles de atender por los medios dispuestos por la región para el combate de incendios forestales. Esta combinación, que maximiza la cobertura, corresponde a los puntos 29, 30, 4, 26, 6, 16, 13, 33, 27, 2, 25, 19, 17, 5, 15, 14, 18, 32, 28, 9, 24, 8, 21, 7, 20 y 22.

Conclusiones

El modelo desarrollado, permitió determinar el número óptimo de localizaciones que deben ser consideradas en la planificación estratégica de la protección contra incendios forestales en la región del Bio Bio.

Los procedimientos de cálculo de áreas de cobertura, demostraron ser eficientes para estimar la superficie de responsabilidad de cada una de las localizaciones consideradas. Sin embargo es especial importancia considerar que las velocidades de desplazamiento empleadas en este trabajo corresponden a la mejor estimación posible ante la ausencia de antecedentes fidedignos sobre las velocidades de desplazamiento de los móviles en diferentes condiciones de carpetas de rodado.

Por medio de los antecedentes elaborados en este trabajo, la Corporación Nacional Forestal dispone de una nueva herramienta para justificar la cantidad de unidades de combate que deben ser utilizadas en la región, para asegurar un nivel de protección adecuado.

Finalmente, es necesario continuar desarrollando estudios dentro de esta línea de trabajo, para llegar a la implementación de una herramienta de análisis económico del manejo del fuego en el sector público de nuestro país.

Referencias

- Eastman, Ronald, 2000. **Idrisi for Windows User's Manual**. Clark Labs. Massachusets, USA. 200 p.
- Esri. 1993. **Network Análisis. Arc/info User's Guide**. Environmental Systems Research Institute. Redlands. California. USA. 163 p.
- Esri. 1993. **Cell-based Modeling with GRID. Arc/info User's Guide**. Environmental Systems Research Institute. Redlands. California. USA. 277 p.
- Julio, Guillermo. 1999. **Fundamentos de Manejo del Fuego**. Manual Docente. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 300 p.
- MOP, 2000. **Manual de Carreteras vol 3**. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 300 p-