

Sistema de Apoyo a la Gestión de Incendios Forestales:

FÓRMULA PARTICIPATIVA Y EFICIENTE

La iniciativa tiene tres ejes: capacitación en tecnologías de la información (GPS y SIG), creación de una plataforma computacional que vía WEB haga disponible a los usuarios la información geográfica y la implementación de un modelo matemático para optimizar la posición “stand by” de las brigadas.

Por Pedro Real Hermosilla¹, Katia Sáez Carrillo², Roberto Riquelme Sepúlveda³

La Región del Bío Bío concentra el 35,6% de los incendios forestales que ocurren en Chile, que con una media de 2.580 incendios dañan una superficie de 14.036 ha, que representa el 27 % del total nacional afectado. La mayor parte de los incendios son provocados por el hombre, por negligencia, descuido o de manera intencional. La pérdida económica por temporada es del orden de U.S. \$ 50 millones. Además de los daños directos a la flora y fauna la pérdida de la cubierta vegetal ocasiona aluviones y desertificación. También se generan daños sociales, con viviendas destruidas, desaparición de fuentes de trabajo y lo más significativo, pérdida de vidas humanas. Desde el punto de vista del daño ambiental el promedio de las emisiones de MP3 para los últimos 25 años ha sido de 10.249 toneladas promedio por año.

Para abordar este problema, CONAF Región de Bío-Bío estableció una serie de acciones que permiten abordar la problemática de incendios desde una perspectiva participativa, multidisciplinaria y con la incorporación de experiencia y tecnología para el desarrollo de sus actividades. Por otra parte, la importancia que el Gobierno Regional le asigna a la protección contra incendios forestales le ha llevado en



¹Ingeniero Forestal, Ph. D. Director de Proyecto, Sistemas de Información Territorial y Percepción Remota
²Licenciado en Matemática, Magister en estadística, Doctor en Ingeniería Eléctrica, Área de análisis de datos.
³Licenciado en Matemáticas, Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Área de Modelamiento y Simulación.

los últimos 24 meses a financiar el desarrollo de un proyecto para apoyar la gestión de los recursos empleados en el combate de los incendios forestales.

La protección contra incendios forestales involucra una serie de procesos, tanto en el ámbito de la prevención como del combate, los que necesariamente deben sincronizarse y sus componentes críticos evaluarse y mejorarse permanentemente. El ataque inicial, corresponde a los esfuerzos de control que efectúan quienes llegan al incendio en primera instancia. El arribo debe producirse en un tiempo mínimo para realizar acciones enérgicas, eficientes y seguras, para que el fuego sea controlado en sus inicios por los primeros recursos despatchados. Los recursos destinados al primer ataque, deben ubicarse en lugares estratégicos producto de una optimización que considere las relaciones que existen entre los diferentes factores que definen el Riesgo y Peligro de ocurrencia de Incendios Forestales.

Para la efectividad del control, detectar y controlar los focos en sus inicios, es fundamental, por lo que debe mantenerse una adecuada dotación y distribución de recursos, mas allá de la localización específica del campamento, se requiere que las brigadas, en días de mayor probabilidad de ocurrencia, se posicionen en espera o "stand by" en zonas de mayor riesgo cuando existen condiciones de peligro de incendios, asegurando un rápido control de los focos que pudieran generarse.

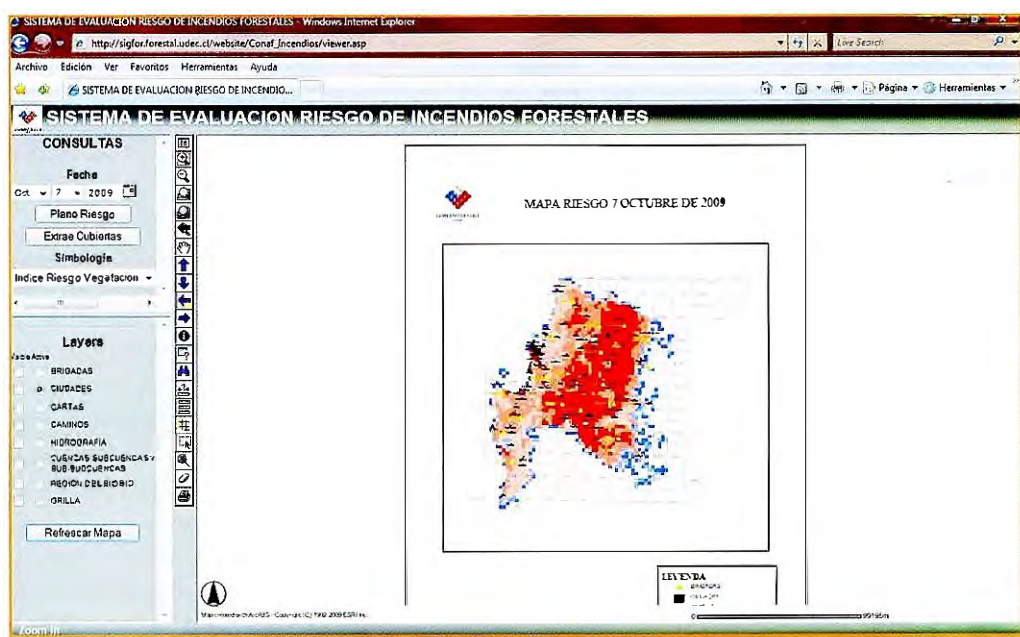
El Sistema de Apoyo a la Gestión de Incendios Forestales (SAGIF) es un proyecto que se ejecuta con la Universidad de Concepción, a través de la Facultad de Ciencias Forestales con su Centro de Sistemas de Información Geográfica, y el Departamento de Ingeniería Matemática de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. El proyecto tiene tres ejes: capacitación en tecnologías de la información (GPS y SIG), creación de una plataforma computacional que vía WEB haga disponible a los usuarios la información geográfica y la implementación de un modelo matemático para optimizar la posición "stand by" de las brigadas.

La tecnología GPS se ha introducido con éxito mediante un programa de capacitación dirigido a jefes de brigadas de la región. El objetivo del entrenamiento fue impulsar un cambio en la escala espacial de geo-posicionamiento de los incendios, para cambiar la precisión actual de registro de 2 km, a uno con error promedio de 15 m, este progreso redundará en estadísticas es-

paciales de mayor calidad mejorando la posibilidad de desarrollar modelos matemático estadísticos en análisis de ocurrencia.

La Plataforma de Sistemas de Información Geográfico está constituido por un sistema de consulta de la información espacial basado en un servidor ARCIMS con un sitio WEB de consulta espacial. Este sitio permitirá a los usuarios consultar la información actualizada tanto de los datos climáticos como de posición de las brigadas de incendios de acuerdo a información entregada por el modelo optimizador. La Figura 1 muestra el sistema en su versión prototipo.

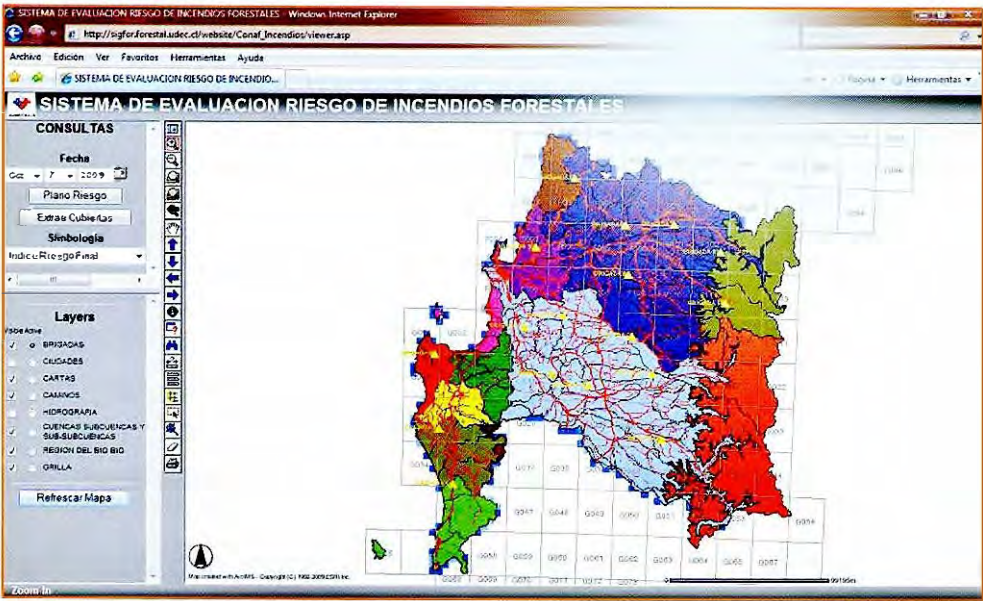
Figura 1. Pantalla inicial del sistema en versión prototipo



En la sección "Layers" el usuario podrá encender o apagar un determinado layer o tema. En la sección "Consultas", el usuario podrá acceder a los distintos planos que genera el sistema en forma histórica, seleccionando la fecha que se desea consultar. De la misma forma, con la opción "Extrae Cubiertas", se podrá extraer la información gráfica histórica en formato shape. Los planos generados tendrán formato PDF como el que se muestra en Figura 2. Estos planos pueden ser guardados en el equipo del usuario para visualizarlos distribuirlos o imprimirlos, permitiéndose además, cambiar la simbología de los distintos índices que se generarán.

Junto a las capas temáticas básicas de red caminera, hidrografía, ciudades y pueblos, cubierta vegetal, división administrativa, entre otros, la aplicación SIG procesará capas temáticas directamente relacionadas con los incendios forestales las que serán espacialmente combinadas para enviarse al módulo de optimización.

Figura 2. Plano generado por el sistema en formato PDF



Zonas Prioritarias de Protección:

La determinación de prioridades de protección integra diversas condiciones ambientales que se distribuyen heterogéneamente en la extensión territorial a proteger. La definición de Zonas Prioritarias de Protección, considera de acuerdo con Julio (1992) tres conceptos cada uno con diversas categorías: *i*) el **Riesgo**, *ii*) el **Peligro** y *iii*) el **Daño** Potencial. Estos criterios han sido utilizados en la región del Bío Bío por CONAF, (Pedernera, 2004). En el estudio se separó del riesgo la ocurrencia histórica y del peligro el factor climático ya que ambos fueron incluidos en un modelo predictivo o índice de riesgo, adicionando un cuarto concepto a los mencionados.

Velocidad de Desplazamiento de móviles

Un insumo necesario para la optimización matemática es la velocidad de desplazamiento desde la posición stand by de una brigada a la localización de un incendio forestal. Este desplazamiento se realiza en móviles que transportan combatientes e implementos de supresión. La captura de información de la velocidad de desplazamiento por tipo de camino y/o carpeta de rodados, se realizó mediante el uso GPS en modo cinemática. Los equipos GPS con precisión de 2 a 5 m en post-proceso, fueron instalados en los vehículos utilizados por CONAF. Durante el periodo de evaluación, se registraron datos de desplazamiento diario a incendios forestales en 62 rutas. La información capturada fue integrada a la Red Caminera y sometidos a un análisis gráfico exploratorio y de depuración.

Los cruces de camino en las rutas definieron arcos y las velocidades se calcularon como promedios en cada uno, obteniéndose por ARCO la Velocidad Media, Velocidad Mínima y Velocidad Máxima. Posteriormente con el tipo de carpeta de rodado asociada a los caminos se calculó el promedio de velocidad según tipo de carpeta que se entrega en la Tabla 1.

Probabilidad de Ocurrencia (O)

Para modelar el índice de riesgo se utilizó modelos de regresión logística, ya que la variable respuesta toma valores 0 si no hay incendio o 1 si hay uno o más. El objetivo es predecir la probabilidad de ocurrencia de incendio, e identificar las variables predictoras útiles para tal predicción. Como predictoras se consideran variables temporales y meteorológicas. Se contó con información histórica de ocurrencia de incendios de la temporada 1998 a la temporada 2007, considerándose en principio los meses de octubre a abril del año siguiente.

En cuanto a la base meteorológica tiene registros diarios que incluyen valores mínimo y máximo de temperatura, humedad relativa, precipitación acumulada diaria, velocidad del viento y su dirección, esta última variable es entregada por pocas estaciones. Las variables temporada, mes, día de la semana, días festivos (1 de noviembre, 8, 25 de diciembre, 1 de enero, Viernes Santo, San Sebastián) también fueron considerados en el modelo. A fin de capturar la variabilidad espacial la modelación se realizó a nivel de Sub-sub-Cuenca.

Se Define una variable respuesta N_{mt} como:

$$N_{m,t} = \begin{cases} 1, & \text{si hay un incendio en la microcuenca } m \text{ en el tiempo } t. \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

La probabilidad, $p_{m,t}$, de ocurrencia de fuego en m en el tiempo t se define por el modelo logístico:

Donde $U_{m,t}$ es la colección de valores de las variables predictoras en la microcuenca m -ésima en el tiempo t ; $\theta_{m,t}$ es una función lineal (en los parámetros), ha ser estimada, de las variables predictoras.

Tabla 1. Velocidad en móviles de CONAF por tipo de camino

Tipo de Camino	Velocidad (km/h)		
	Mínima	Media	Máxima
Arcilla	55,15	64,03	78,20
Asfalto	55,68	72,45	86,50
Hormigón	46,15	57,50	69,25
Ripio	47,74	57,57	68,05

Se obtuvieron diversos modelos. A diferencia de los presentados por Velásquez (2006) y Hernández et al (2005), éstos incorporan la variable precipitación acumulada del día anterior junto a las variables: humedad mínima y mes. La temperatura máxima es una variable significativa, sin embargo la inclusión del mes mejora el modelo y ella pasa a ser no significativa.

El modelo siguiente presentó parámetros significativos al 95% y una calidad de ajuste adecuada.

Donde:

Hum_min: la humedad mínima del día,

mes: el mes en el cual se desea hacer la estimación,

LL_ant: lluvia del día anterior,

Se tiene:

$$\logit(p1) = \alpha_0 + \text{mes}_i + \alpha_1 \text{Hum_min} + \alpha_2 \text{LL_ant}$$

Los parámetros estimados y el test de Wald permitieron constatar que todos los coeficientes son significativos.

Riesgo (R): Se adoptaron elementos del riesgo propuestos por Pedernera, 2004, cambiando la forma en que se establecen valores específicos de cada factor. En oposición a una definición arbitraria de las distancias a caminos, centros poblados y centros urbanos, se utilizó información histórica de ocurrencia de incendios forestales, para determinar distancias críticas a estos elementos. Analizando la frecuencia de incendios en distancias cortas de las localizaciones de incendios al elemento temático correspondiente, se determinó la magnitud de la zona buffer a utilizar en cada caso.

Peligro (P): Como variables específicas del Peligro se utilizó la Pendiente y la Exposición, en tanto que el Potencial de Propagación de los Combustibles y su Resistencia al Control se obtuvo mediante una adaptación o categorización de las clases del Uso Actual del suelo proporcionado por la cartografía del proyecto Catastro de la Formaciones Vegetales Nativas de Chile

Daño Potencial (D): Mediante un taller con actores del sistema de protección civil y combate de incendios se priorizaron desde el más al menos importante los siguientes factores: Daño a Infraestructura y Viviendas, SubSubCuencas proveedoras de agua, Sitios Prioritarios de Conservación de la Biodiversidad, Áreas de Desarrollo Indígena, Especies con Problemas de Conservación, Unidades del SNASPE, Límites patrimoniales grandes empresas y Valor comercial de la Vegetación, a cada uno de ellos se les asignó una fracción del puntaje correspondiente a este elemento de acuerdo a su ranking de importancia.

Los cuatro componentes se espacializan y representan en capas temáticas que pueden visualizarse en la aplicación WEB, con ellas y utilizando unidades territoriales de 4 x 4 km se produce

una capa final que resulta de aplicar a las celdas de la matriz un modelo lineal que suma sus. El modelo acumula las ponderaciones asignadas a los conceptos definidos en una expresión de la forma:

$$Y_{ij} = (O_{ij,1} + R_{ij,2} + P_{ij,3} + D_{ij,4}) * I$$

Donde:

Y_{ij} : Puntaje de la prioridad de protección fila i, columna j de la grilla.

$O_{ij,1}$: Valor en Celda i, j de la capa temática de probabilidad de Ocurrencia (1)

$R_{ij,2}$: Valor en Celda i, j de la capa temática de Riesgo (2)

$P_{ij,3}$: Valor en Celda i, j de la capa temática de Peligro (3)

$D_{ij,4}$: Valor en Celda i, j de la capa temática Daño potencial (4)

Para: **O, R, P, D:** $X_{ij} = \text{Suma}(C_i * F_i)$, C: valor de la categoría en la capa temática y F: superficie ocupada por cada categoría. **I:** Es 0 cuando O, R, P o D indiquen que el territorio bajo análisis no tiene prioridad de protección, 1 en otro caso.

Para una temporada los elementos de las capas R, P y D se consideran constantes, en tanto que la capa O puede actualizarse con frecuencia diaria produciendo mapas que pueden ser analizados visualmente en pantalla o enviarse al modelo optimizador que propone una localización Stand By para las brigadas. La solución del problema es devuelta a la aplicación SIG para su visualización y distribución.

Modelo matemático o posicionamiento óptimo

Conociendo las redes de caminos y la cartografía de riesgo, se requiere ubicar la posición de las brigadas de manera que al menos una de ellas llegue a lugares de alto riesgo en el menor tiempo posible. Ese tiempo crítico corresponde al tiempo máximo que transcurre entre el origen del incendio y el momento en que deja de ser controlable por brigadas terrestres. Aliste (2006) aborda el problema, pero en su caso posiciona helicópteros y no brigadas terrestres. Por otro lado, Echeverría (1995) aborda el problema para localizar brigadas terrestres, para considerar la restricción de la red caminera, superpone un cuadrículado sobre la red caminera de una región. Finalmente, Pedernera et al (2000) describen un modelo de Programación Dinámica para apoyar la planificación estratégica del manejo del fuego en Chile.

En nuestro caso se cuadrícula el área de la región del Bío Bío con celdas de 4 x 4 km, según tipo de camino se asocia un tiempo de desplazamiento entre celdas, con ello, estamos un paso adelante con respecto a las soluciones propuestas por la literatura, ya que no es necesario considerar la forma del grafo de las rutas. Teniendo estos datos, es necesario formatearlos



para poder ocupar el algoritmo de Dijkstra, es decir,

construimos una matriz $A=(a_{ij})$, donde a_{ij} indique el tiempo que demora desplazarse de la celda i a la celda j . En caso que no haya camino entre i y j , se asignará $a_{ij} = \infty$, aunque en la práctica el valor de infinito corresponde a un valor suficientemente grande con respecto a los tiempos utilizados. A su vez, se asignará $a_{ii} = 0$. De esta forma hemos construido la matriz A .

Dada esta matriz, podemos aplicar el algoritmo de Dijkstra, el cuál entregará el camino óptimo entre cada par de celdas, recurrimos a esto para corregir la matriz A , en caso que falten datos de distancias. Es decir, si no se tiene el tiempo necesario para recorrer de la celda i_0 a la celda i_1 , como vimos anteriormente, se asignará el valor de infinito. Pero bien podría haber un camino desde i_0 a alguna celda i_2 y otro camino de i_2 a i_1 , de esta forma podemos afirmar que hay un camino de i_0 a i_1 , con un tiempo correspondiente a la suma de los dos caminos anteriores. De este modo, se reemplaza el valor infinito por el tiempo mínimo para ir desde i_0 a i_1 .

Por otro lado, se define un vector $p=(p_j)$, donde p_j es la importancia de proteger la celda j . Estos datos serán una entrada al programa, que se cargarán de un archivo externo. Eventualmente podrían ser iguales a cero, si no es de interés protegerlo. Notar que para las celdas que no tienen camino, no es necesario asignarle un valor 0 al peso.

El tiempo crítico t_c determina el tiempo necesario para que una brigada llegue y pueda controlar el incendio. Definamos $X_j := \{i : a_{ij} \leq t_c\}$ como las celdas que son alcanzadas por una brigada ubicada en la celda j en menos del tiempo crítico, y

$$b_j = \sum_{i \in X_j} P_i$$

El beneficio al colocar una brigada en la celda j , es decir, la suma de los pesos de las celdas alcanzadas al ubicar una brigada en la celda j . Por último, será la posición de la k -ésima brigada.

Elegiremos la ubicación de la primera brigada como la celda cuyo beneficio b_j sea máximo, es decir, $X_1 = \arg \max$

$\{b_j : \forall j\}$. Y luego se actualizará el vector p , haciendo cero a todos los pesos de las celdas que hayan sido alcanzadas al ubicar la brigada en X_1 . Es decir $p_j = 0, \forall j \in X_1$. De esta forma, estamos indicando que nos interesa alcanzar los puntos ya cubiertos por la primera brigada.

Luego, del mismo modo, ubicaremos la siguiente brigada

para posteriormente anular los pesos que fueron alcanzados por ésta. Y así sucesivamente hasta ubicar las n brigadas

En resumen, el algoritmo queda como sigue:

Algoritmo:

Dados A, p, t_c, n el número de brigadas, y el mallado, hacer:

[Para cada celda j , encontrar el camino de tiempo mínimo hacia las otras celdas;

Para cada celda j , reemplazar estos tiempos valores en la matriz A ;

Para cada celda j , definir $X_j := \{i : a_{ij} \leq t_c\}$;

Para cada celda j , definir $b_j = \sum_{i \in X_j} P_i$;

Para cada brigada $k=1, \dots, n$, hacer:

[$X_k = \arg \max \{b_j : \forall j\}$;

$P_j = 0, \forall j \in X_k$

$b_j = \sum_{i \in X_j} P_i$;

Redefinir

] Mostrar la posición y el beneficio.
]

El sistema de apoyo a la gestión de Incendios Forestales, sin duda se constituirá en una importante herramienta de soporte a las decisiones de planificación, alerta y despacho de recursos de combate, pero además permitirá mejorar la gestión preventiva de los distintos actores que se relacionan con la protección forestal, al permitirles establecer planes de contingencia, patrullajes y variadas acciones preventivas en las áreas que se pronostiquen como de mayor probabilidad de ocurrencia. Por esta razón, se ha considerado que organizaciones como ONEMI, Carabineros y Bomberos entre otras, puedan acceder libremente, mediante Internet, al servidor que proveerá esta información diaria, con ello se fortalecerá el sistema de protección civil de la región del Bío-Bío y se mejorará el sistema de Protección Contra incendios forestales actualmente existente. ■