

APLICACIONES DE LOS SIG EN LA LUCHA CONTRA LOS INCENDIOS FORESTALES

Miguel Castillo S., Patricio Pedernera A., Guillermo Julio A.
Laboratorio de Incendios Forestales
Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Chile
Casilla 9206, Santiago.

1. ANTECEDENTES

La lucha contra los incendios forestales constituye un tema de preocupación constante por parte de empresas e instituciones ligadas al sector forestal chileno, dado que los efectos y daños ocasionados por estos siniestros se manifiestan anualmente en cerca de 40 millones de dólares en pérdidas directas, sin considerar los perjuicios ambientales y sociales.

Sin embargo, estas pérdidas pueden presentar importantes fluctuaciones si repasamos las cifras de los últimos 5 años. En la temporada 1998/1999, grandes incendios asolaron la Octava Región de Chile generando además de cuantiosos daños, un profundo interés de la prensa nacional, la ciudadanía y las autoridades por este tema. A nivel nacional, un total de 101 mil 691 hectáreas fueron arrasadas – de ellas 36 mil 499 de plantaciones y 14 mil 399 hectáreas de bosque nativo– en 6 mil 830 incendios, mientras que para la temporada 2001/2002, la ocurrencia y propagación de incendios forestales provocó pérdidas directas estimadas por sobre los 80 millones de dólares, sin incluir los gastos de operación de los equipos terrestres y aéreos de combate al fuego. Esta última temporada castigó severamente a las regiones Séptima a Décima, siendo la Octava Región del BioBío la más afectada con más de 110.000 hectáreas quemadas.

Tomando en cuenta este escenario, se hace imprescindible el potenciar las campañas de prevención, con énfasis en la educación y difusión. El tema de los incendios sin embargo, permanecerá siempre presente y será de constante preocupación no sólo por el patrimonio ambiental involucrado sino por las grandes inversiones privadas que existen en el área de la producción. Por tal motivo, las empresas forestales invierten importantes sumas de dinero destinadas a los programas de protección, con énfasis en la dotación de recursos para la lucha contra los incendios forestales.

El combate es una actividad inevitable, de alto costo y de enormes riesgos tanto para el personal humano como por las decisiones que eventualmente puedan tomarse para enfrentar esta tarea. Es por ello que esta actividad necesariamente debe contar con un alto nivel de organización tanto de recursos, como de personal humano. Cada uno de los entes que participan dentro del esquema organizacional de un programa de protección tienen la necesidad de emplear información procedente de distintas fuentes en forma eficaz y oportuna. Para enfrentar esta realidad, los organismos chilenos encargados de la protección contra los incendios forestales y el mundo académico, han sumado fuerzas por incorporar en forma creciente nuevas herramientas tecnológicas para enfrentar complejas decisiones como lo son abordar en la mejor forma posible los efectos derivados de la propagación del fuego.

La preocupación mostrada por parte del Estado chileno se manifiesta formalmente a partir de 1967 cuando se aprueba el Plan Nacional contra Incendios Forestales por parte del Ministerio de Agricultura. En forma paralela y creciente, el mundo académico y científico comienza a acumular antecedentes y generar los conocimientos necesarios para abordar este problema. El suceso que gatilló el avance tecnológico en esta materia fue el desarrollo en Chile del Proyecto FONDEF FI-13 denominado *Diseño e Implementación de un Sistema de Prognosis y Gestión para el Control de Incendios Forestales*, el cual estuvo orientado a la creación de instrumentos modernos de gestión para elevar el nivel de eficiencia del Manejo del Fuego en Chile. La tarea central de dicho proyecto fue el desarrollo del Sistema KITRAL, el cual fue dotado con mecanismos de avanzada

tecnología y confiabilidad para la evaluación permanente de la ocurrencia de incendios forestales, y para la emisión de información útil en la toma de decisiones para la ejecución de Programas de Manejo del Fuego, tanto de la Corporación Nacional Forestal como de Empresas Forestales. Como se comentará más adelante, el desarrollo y culminación de este proyecto en 1996 proporcionó las bases para una variada gama de aplicaciones en el área de la toma de decisiones donde evidentemente los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han jugado un importante rol.

2. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) COMO HERRAMIENTAS DE APOYO

El campo de aplicación de los Sistemas de Información Geográfica es amplio. Su rol como herramienta para la toma de decisiones abarca actualmente prácticamente todas las disciplinas del conocimiento. Por ejemplo, podemos encontrar aplicaciones en el ámbito de la prevención de desastres naturales, modelos de cambio climático, procesos de contaminación ambiental, y en una diversidad de disciplinas profesionales tales como agricultura, pesca, minería, forestal, urbanismo y otras.

El mundo cambia constantemente, y por supuesto las necesidades de obtener, procesar y generar información van de la mano de satisfacer los requerimientos, económicos, ambientales y sociales de este cambiante mundo, y por lo tanto, las tomas de decisiones requieren cada vez de mayores antecedentes técnicos en los cuales los SIG juegan un rol preponderante.

Los SIG datan desde los años 70 aproximadamente, mientras que en Chile los primeros programas comerciales aparecieron a fines de la década de los 80. Los métodos de captura, procesamiento y análisis de información eran de extremada complejidad dado que los medios informáticos presentes en esos años llevaba a que muy pocos usuarios pudiesen operar estas aplicaciones bajo sistemas operativos especializados como Unix y variantes, y el MS-DOS de Microsoft. Posteriormente a comienzo de los años 90 aparece en forma tímida pero creciente el sistema operativo Windows; comenzaron a llegar nuevos softwares SIG tales como IDRISI bajo MS-DOS pero también con la capacidad de operar desde interfaz Windows. ARC/INFO y Arc/View en sus primeras versiones destinadas más bien a sistemas operativos distribuidos. El grado de experticia para el manejo de estos programas era bastante importante dada la gran cantidad de comandos que presentaba cada una de estas aplicaciones y bajo interfaces gráficas poco amigables a los usuarios. Con la aparición de Windows 95 y la llegada al mercado chileno de programas manejadores de bases de datos relacionales se dio inicio a una etapa creciente y constante de desarrollo de aplicaciones bajo sistemas operativos gráficos.

3. INCORPORACIÓN DE LOS SIG AL MUNDO ACADÉMICO Y CIENTÍFICO

En forma paralela a este creciente desarrollo en materia informática, el mundo académico y científico estuvo fuertemente interesado en incorporar estas herramientas para el desarrollo de estudios y proyectos de investigación. En este ámbito, a partir de 1993 la Universidad de Chile, y en particular el Departamento de Manejo de Recursos Forestales, incursionó por vez primera en el empleo masivo de herramientas SIG para la resolución de problemas relacionados con la ocurrencia y propagación de los incendios forestales, elaborándose un conjunto de aplicaciones informáticas basadas en la captura, manejo y procesamiento de información espacial representada en estructuras de datos, conocidas en terminología SIG como vectoriales y rasters, para la obtención de información estratégica de apoyo a la toma de decisiones. Aquí destacan las capacidades de los SIG para representar en pantalla procesos de simulación de incendios forestales, análisis de visibilidad de torres de observación, estudios de ocurrencia y causalidad de incendios forestales, y modelos de localización de recursos para el combate de siniestros.

4. ROL DE LOS SIG EN LA LUCHA CONTRA LOS INCENDIOS FORESTALES

4.1 Antecedentes

Dada la gran complejidad de los fenómenos que están involucrados en la protección de los recursos forestales (tanto físicos como humanos) y la experticia de quienes están encargados de atacar el problema, ha sido necesario maximizar los esfuerzos en la búsqueda de herramientas y soluciones a problemas de extremada complejidad, que con el apoyo de los SIG, se facilita considerablemente estas tareas. Por tal motivo, en los últimos 7 años se ha pretendido incorporar todos los resultados disponibles de investigaciones efectuadas en el área, especialmente en las materias relativas a los módulos de simulación de incendios y planificación del uso de recursos disponibles para el desarrollo de una variada gama de aplicaciones, todas basadas en programas informáticos comerciales y otros de creación propia. Destacan aquí los esfuerzos realizados por el sector privado en el desarrollo de aplicaciones informáticas orientadas a apoyar las labores de detección y despacho del recursos al combate, respaldadas por una completa cartografía digital; y el mundo académico, en particular el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile, con el desarrollo del Sistema KINTRAL, cuyo principal propósito fue el apoyar los mecanismos de gestión en los programas de manejo del fuego, los que tradicionalmente han sido programados con énfasis en la efectividad más que en la eficiencia en los procedimientos adoptados por las centrales de operación para el control de incendios forestales.

Dado que la ocurrencia y propagación de los incendios presenta una connotación territorial que en casos extremos constituyen fenómenos multivariados de extremada complejidad, se da la necesidad de integrar los elementos geográficos (o niveles de información) en una base de datos espacial para su gestión adecuada. Surge aquí una de las primera aplicaciones formales de los SIG. La información disponible para alimentar el sistema necesariamente debe pasar por una representación gráfica de los resultados, basada en algoritmos y estructuras de datos acordes con el nivel de detalle, capacidades de almacenamiento y rapidez en los cálculos complejos. Surge aquí una segunda aplicación elemental: la representación espacial de los datos en sus dos formas más conocidas: en términos de líneas para el caso de caminos, hidrografía y límites, y en matrices o rejillas regulares denominadas rasters, para la representación de superficies continuas.

El empleo de programas informáticos comerciales y otros de elaboración propia como el mencionado Sistema KINTRAL, han contribuido a la solución de problemas complejos tales como la asignación de recursos para el combate de incendios dentro de un área de protección, la construcción de índices de prognosis basados en variables meteorológicas, la simulación de incendios forestales, la construcción de coberturas digitales de Prioridades de Protección, el cálculo de índices de evaluación del grado de peligro, diseño de sistemas de torres de detección de incendios forestales, y estudios espaciales de ocurrencia y causalidad de incendios forestales.

4.2 Simulación de incendios forestales

La propagación del fuego en zonas rurales es en sí, el fenómeno que condiciona todos mecanismos y decisiones que deben ser adaptados para combatir su avance. Es por ello que resulta imprescindible desarrollar modelos de prognosis para determinar los eventuales daños que se puedan producir y los recursos necesarios para el combate. En décadas anteriores, los métodos ocupados para el cálculo del avance del fuego se basaban en la proyección de líneas sobre cartas topográficas de acuerdo a ecuaciones de avance que consideraban, entre otros factores, la velocidad del viento, pendiente y tipo de vegetación combustible afectada; junto con el apoyo de calculadoras para estimar los daños producto de la propagación del fuego. Con el desarrollo de programas administradores de bases de datos y sistemas de información geográficos, fue posible ejecutar estas mismas tareas a un menor tiempo, con mayor precisión, y con una gama de posibilidades de efectuar múltiples análisis a partir de un conjunto de datos de entrada. Es así que los SIG han tenido un fuerte uso en el área ambiental, que en el caso del mencionado Sistema KINTRAL, permite modelar las condiciones futuras sobre la base del cálculo de la velocidad de propagación lineal del fuego, representado en un simulador de expansión de focos. El SIG en este caso, efectúa los cálculos extrayendo los valores temáticos de cada uno de

los niveles de información (atributos de los modelos de combustibles, pendiente, vientos, condiciones meteorológicas, infraestructuras), y los incorpora al simulador, el cual se encarga de localizar en una matriz raster los puntos de la zona inicialmente quemada, donde mediante un proceso de cálculo de curvas de isotiempo, se va ampliando la zona de acceso del fuego a los diferentes puntos de la superficie en estudio. El esquema se repite hasta completar la zona de interés (conocido por el SIG como área de simulación).

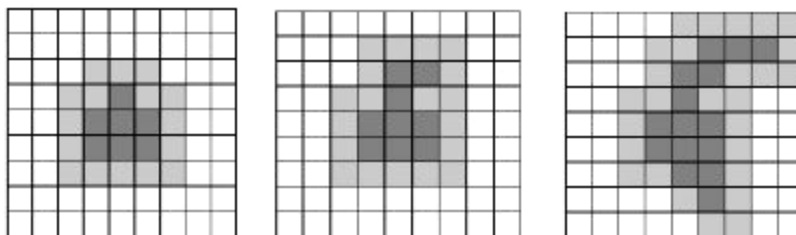


Figura 1. Proceso de simulación de expansión de un incendio.

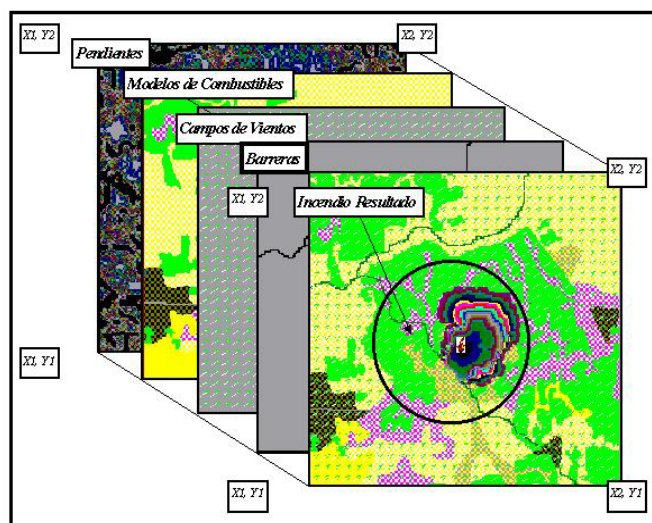


Figura 2. Sobreposición de niveles de información en el SIG para la generación del modelo de expansión.

El simulador ha sido sometido a prueba en situaciones reales, evidenciándose 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, se ha determinado que las mayores diferencias en las estimaciones se concentran en rangos de superficie inferiores a 5 hectáreas. A su vez, 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. Por métodos estadísticos multivariados y utilizando herramientas SIG, se ha determinado 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, tales como el frente principal de avance o cabeza del incendio, como así también, en la longitud y ancho total del contorno de propagación.

La estimación de la propagación del fuego no solo permite entregar antecedentes para la toma de decisiones en combate, sino que también otorga valiosa información relacionada con la cronología histórica de eventos, útil para efectuar evaluaciones ex-post de los siniestros, dado que un hecho de tal naturaleza, por la gravedad que representa, requiere ser profundamente

analizado por las implicancias económicas, sociales y ambientales que derivan. Indudablemente, las empresas forestales afectadas necesitan conocer exactamente cómo ocurrió el problema, y en qué forma y en qué oportunidad fueron dañados sus predios. Sin embargo, después de los incendios, el análisis visual de los terrenos quemados no identifica con claridad los patrones de la propagación del fuego, y la información registrada en las centrales de operaciones no es suficiente para determinar con una completa precisión la ruta de los incendios en la medida que arrasaban las plantaciones forestales.

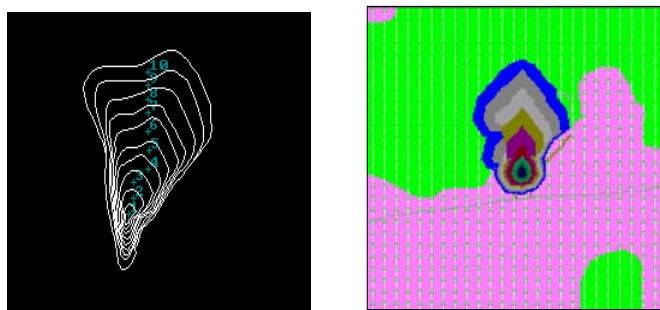
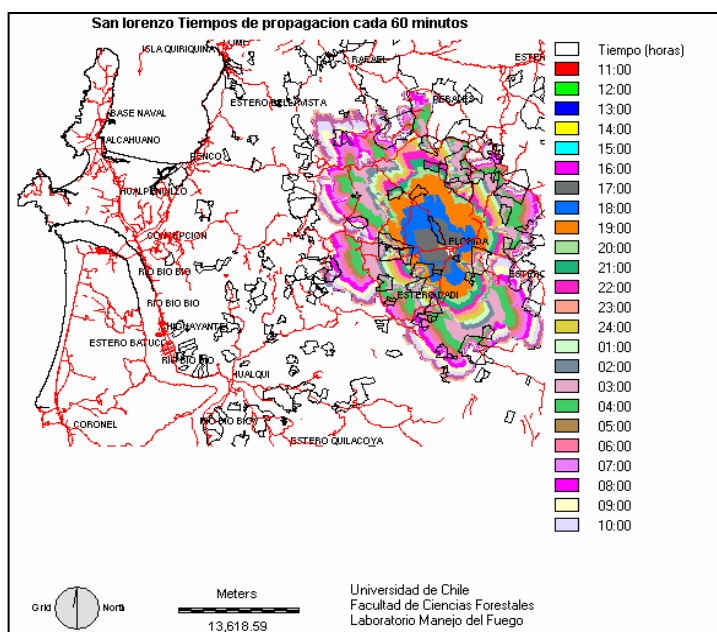


Figura 3. Ejemplo de una simulación sobre datos reales. Izquierda: modelo de propagación real (digitalizado). Derecha: Expansión simulada por el Sistema KINTRAL. Nivel de confiabilidad superior a 75%.

En este ámbito, el Laboratorio de Incendios Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile, ha efectuado estudios sobre propagaciones múltiples y de gran magnitud, utilizando el simulador de incendios del Sistema KINTRAL, junto con un procesamiento posterior de los datos mediante softwares SIG comerciales como ARC/INFO e IDRISI, con el fin de recrear en forma cronológica la propagación del fuego. Un análisis de caso al respecto lo constituyó un estudio realizado para una empresa forestal chilena cuyo patrimonio se vio seriamente afectado por incendios múltiples y de gran magnitud ocurridos durante la temporada de incendios de 1999.

A partir de los datos entregados por las simulaciones fue posible reconstruir una situación que se presentó en la zona de Concepción durante los días 07 y 08 de Febrero de 1999, obteniéndose antecedentes sobre los tiempos de llegada de distintos siniestros a los predios, las superficies afectadas, y el modelo de propagación final, entre los antecedentes más relevantes, que fueron de utilidad para tomar decisiones sobre las pérdidas estimadas y los seguros comprometidos en el patrimonio afectado.

Figura 4. Propagación del fuego para un caso real, expresado en un período de tiempo de 24 horas.



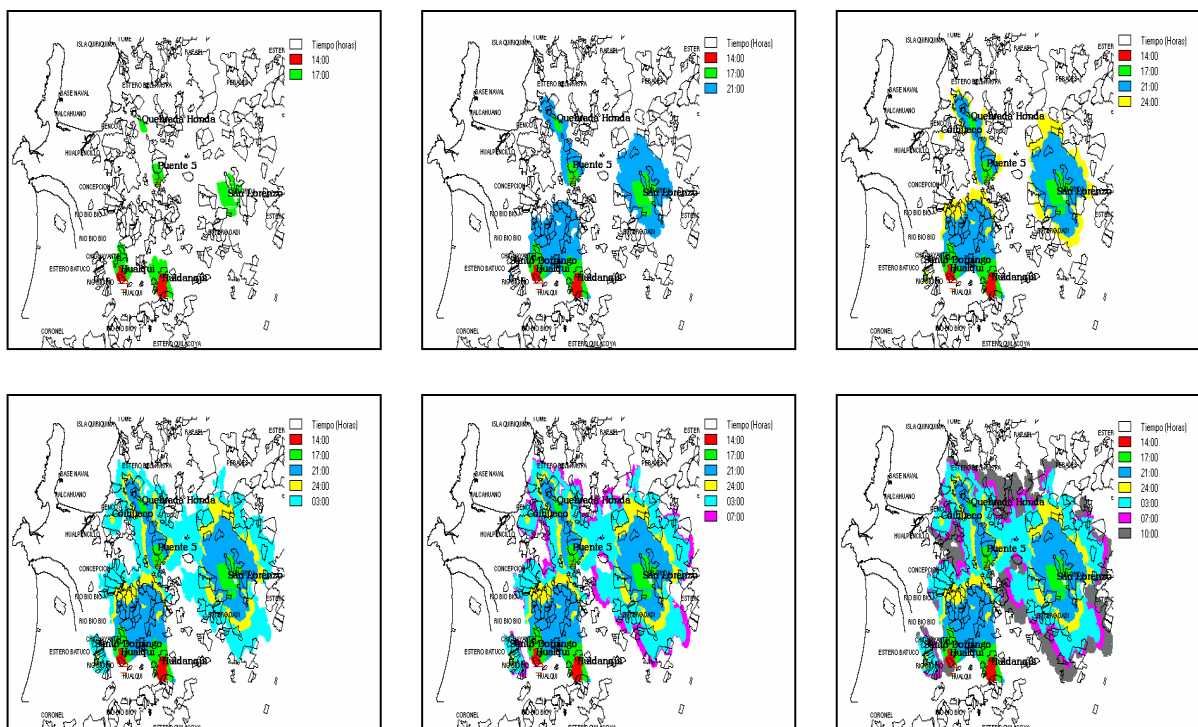


Figura 5. Avance de focos múltiples para un tiempo de simulación de 24 horas.

4.3 Determinación de Prioridades de Protección

Con el objeto de apoyar la evaluación del comportamiento espacial del problema de los incendios forestales y sustentar la planificación de las operaciones de prevención y combate, se ha adoptado una modalidad que puede orientar a las decisiones de asignación de recursos disponibles para el manejo del fuego, y que particularmente ha dado buenos resultados en Chile. Esta es una técnica conocida como “Determinación de Prioridades de Protección”. El método, desarrollado por Julio en 1973, permite evaluar la distribución espacial de los problemas originados por la ocurrencia y propagación de los incendios forestales, y provee los mecanismos necesarios para clasificar los diferentes sectores de la zona bajo protección, de acuerdo al riesgo, el peligro y el daño potencial presentes, y del grado de interés que exista para la ejecución de operaciones de manejo del fuego.

El método ha estado sujeto a cambios desde la fecha de su creación, sin embargo estos han estado más bien orientados en las formas de recolectar, procesar e interpretar la información requerida. Sus conceptos básicos no han variado, porque la experiencia obtenida con su aplicación ha demostrado su consistencia y viabilidad. Incluso, el diseño del método permite la utilización de tecnologías modernas para el manejo de los datos, como es el caso de los Sistemas de Información Geográfica.

Operacionalmente, el método consiste en la asignación de valores o puntajes a un conjunto de variables y factores que se consideran, representados por capas o niveles de información digital, y agrupados en tres estudios o análisis básicos: Riesgo, Peligro y Daño Potencial, cuyos resultados se integran en el SIG permitiendo desarrollar la clasificación de todos los sectores de la zona bajo protección, de acuerdo a su importancia relativa, dada por su peso o prioridad. La distribución de valores para cada uno de estos análisis permite finalmente la determinación de un Mapa de Prioridades de Protección. Esta asignación es flexible, es decir, puede variar o adaptarse de acuerdo a las características de la ocurrencia de incendios, como también según de los intereses que orienten a la organización encargada de proteger el patrimonio forestal.

Este análisis es tradicionalmente efectuado por dos caminos. El primero, mediante el Módulo de Cálculo de Prioridades de Protección del Sistema KITRAL, el cual emite un plano de prioridades, en el que se clasifica a cada una de las unidades de superficies de la zona bajo protección en tres niveles o categorías. La principal ventaja del Sistema, es que permite entregar como subproductos los resultados separados de los análisis de riesgo, peligro y daño potencial, y de esa manera es posible también apoyar la toma de decisiones en aspectos específicos de la planificación del manejo del fuego.

Un ejemplo de esto último puede estar dado por el análisis de riesgo, que permite conocer entre otros aspectos, la distribución de la ocurrencia histórica y potencial de incendios forestales, tanto espacial como cronológicamente, con la identificación de los agentes causales. Estos antecedentes sin lugar a dudas permiten sustentar correctamente la planificación de la prevención basada en la educación y difusión.

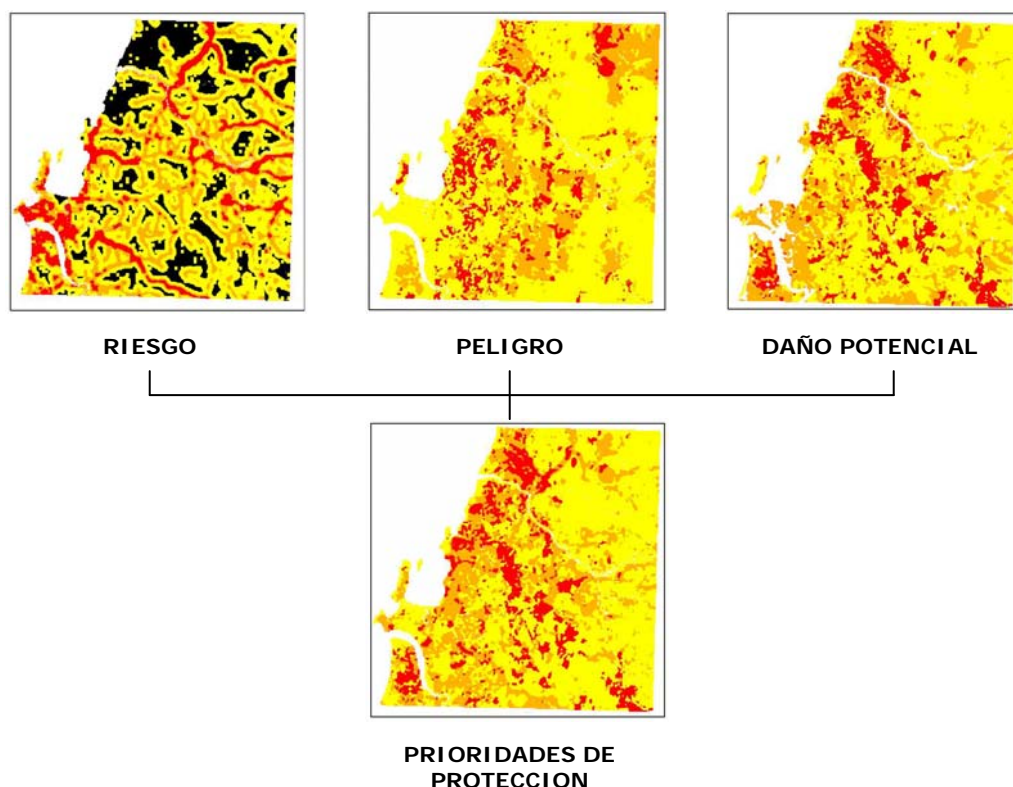


Figura 6. Análisis de Riesgo, Peligro y Daño Potencial para el cálculo de Prioridades de Protección.

Los estratos de información contenidos en las bases de datos del Sistema, tales como sectores de riesgo, calidad de los combustibles, daños potenciales, topografía, accesibilidad, infraestructura de apoyo, entre otros elementos, establecen el fundamento básico para la planificación espacial del manejo del fuego. Con ello, se posibilita la correcta identificación y delimitación de sectores prioritarios de protección, lo que a su vez permitirá sustentar la formulación de planes fundamentales, como es el caso de la prevención (por la capacidad de despliegue de información sobre localización, oportunidad y causa de los incendios), o bien, en la optimización de localizaciones, rutas y coberturas de los recursos disponibles para la presupresión y combate.

Un segundo camino de cálculo, es mediante el procesamiento de las coberturas mediante programas SIG comerciales, especialmente diseñados para trabajar con coberturas de tipo raster, como es el caso de IDRISI y ARC/INFO Ws módulo GRID. Ambos sistemas han sido

tradicionalmente utilizados por el Laboratorio de Incendios Forestales para complementar los análisis entregados por el Sistema KITRAL.

4.4 Cálculo de Índices de Riesgo

En el caso del índice de riesgo, cuyo propósito es estimar la probabilidad de ocurrencia de incendios en tiempo real y que, por lo tanto, está destinado a apoyar la programación diaria de recursos para la presupresión y combate, como así también a la calificación de incendios en las decisiones de despacho, posee un esquema de cálculo basado en variables meteorológicas del momento (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento), complementada con factores ambientales acumulativos (estacionalidad y sequía), los cuales también logran ser modelados mediante un SIG.

En Chile se diseñó en 1989 el Índice de Riesgo (Julio, 1991), basado en una fórmula general denominada Índice, el cual define la probabilidad de inicio de incendios forestales en diferentes sectores del territorio comprendido entre las Regiones V y X, inclusive. Los resultados de la fórmula se califican en cinco categorías de riesgo, que van desde nulo a extremo. A su vez, este índice general de ocurrencia puede ser reemplazado por 15 Índices Específicos, que representan en forma más precisa al mismo número de Zonas de Riesgo en que fue clasificado el territorio evaluado. Estos índices específicos poseen una fórmula con la misma estructura y variables del índice general, variando solamente los coeficientes. El cálculo de estos índices se realiza mediante la extracción de valores para cada una de las capas, generándose un plano raster reclasificado en cinco categorías.

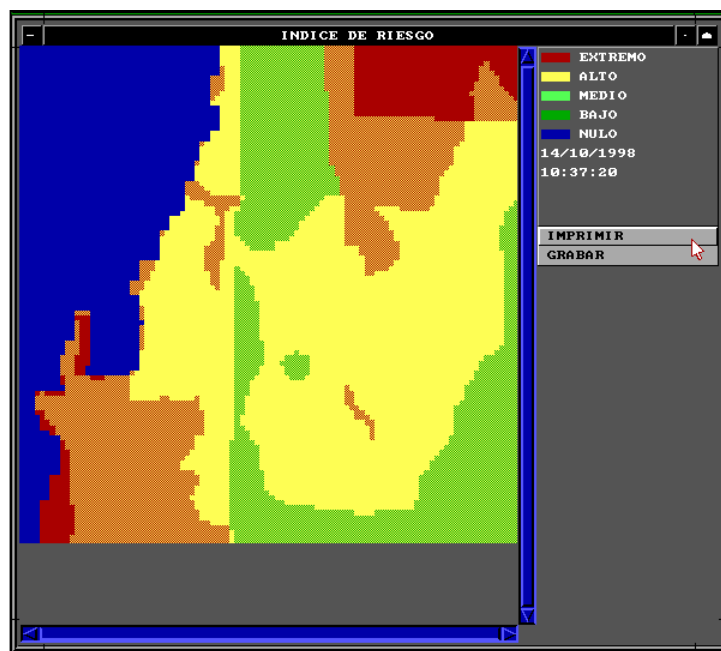


Figura 7. Mapa de Índice de Riesgo del Sistema KITRAL

4.5 Análisis de visibilidades y diseño de sistemas de torres de detección de incendios forestales

La detección oportuna de los incendios forestales iniciados es una actividad de gran importancia dado que la dificultad o esfuerzo de control se incrementa términos exponenciales en relación al tiempo transcurrido desde el momento de origen del incendio. La Corporación Nacional Forestal y empresas forestales disponen de sus sistemas de torres de detección distribuidos en las áreas destinadas a protección. La labor de estos dispositivos naturalmente está complementada con

otros sistemas de detección tales como patrullajes terrestres, puestos de observación secundarios y patrullaje aéreo, entre los más importantes.

En todo sistema de detección, lo que se busca es maximizar la cobertura efectiva al interior de los predios o sectores bajo protección, con un número razonable de puntos – para el caso de los observadores terrestres fijos – por lo cual, se genera la necesidad de elaborar herramientas para abordar en forma más eficiente el diseño e implementación de sistemas de detección utilizando tecnologías computacionales como los Sistemas de Información Geográfica.

Estudios realizados por Pedernera (1997) han permitido encontrar combinaciones de puntos con el propósito de maximizar cobertura efectiva al mínimo costo de operación, basado en técnicas de programación lineal entera y procesamiento de datos empleando herramientas SIG. En general lo que se realiza en este caso es analizar el aporte en superficie visible sobre un modelo digital de terreno y plantaciones forestales tomando como base un esquema de oferta y demanda de protección. Los puntos candidatos a considerar en el análisis – que representan las torres de observación – son incorporados al modelo con el propósito de seleccionar un subconjunto que satisfice las restricciones de demanda, a un mínimo costo. Este proceso es realizado mediante un análisis de visibilidad punto a punto sobre la cobertura raster, para obtener finalmente coberturas digitales que representan los aportes en superficie tanto brutas como efectivas – es decir, al interior de los predios – y considerando en forma complementaria un análisis de prioridades de protección.

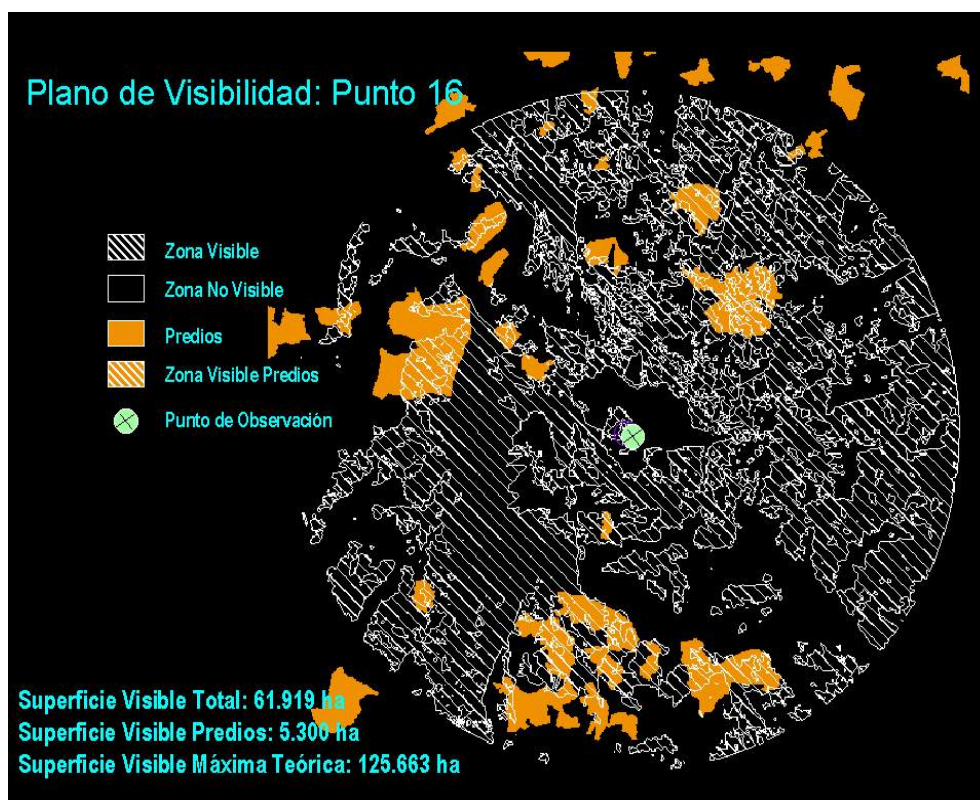


Figura 8. Plano de visibilidad a partir de un punto

Un esquema que tradicionalmente se ha utilizado para el diseño eficiente de un sistema de detección de torres en Chile, y empleando las capacidades de los SIG, se basa en una secuencia de pasos hasta lograr como resultado una combinación óptima de puntos que satisfaga las demandas de visibilidad. Este esquema se inicia con la preparación de la cartografía. Las curvas de nivel son utilizadas para generar un modelo digital de terreno, el cual permite conocer las

zonas visibles y no visibles a partir de un conjunto inicial de puntos (torres). Se necesita además realizar un análisis de Prioridades de Protección para la zona de interés y definir en el SIG las unidades de superficie de referencia (píxeles o celdillas GEOREF). El paso siguiente es la localización de puntos opcionales para la localización de torres, incluyendo por supuesto, posiciones de torres ya existentes, para posteriormente realizar los análisis de visibilidad para cada uno de ellos. El mapa raster de Prioridades de Protección puede ser empleado en este caso para calcular visibilidades ponderadas de acuerdo a las zonas de prioridad, realizándose este análisis para cada localización opcional de torres de observación. Dado que en la determinación de regiones visibles para cada punto pueden presentarse zonas de intersección, se determina la visibilidad ponderada conjunta para cada una de las combinaciones posibles de torres. Por último, se define el número y localización de torres, identificando el punto a partir de cual no se produce un incremento significativo de la visibilidad ponderada conjunta al aumentar el número de torres.

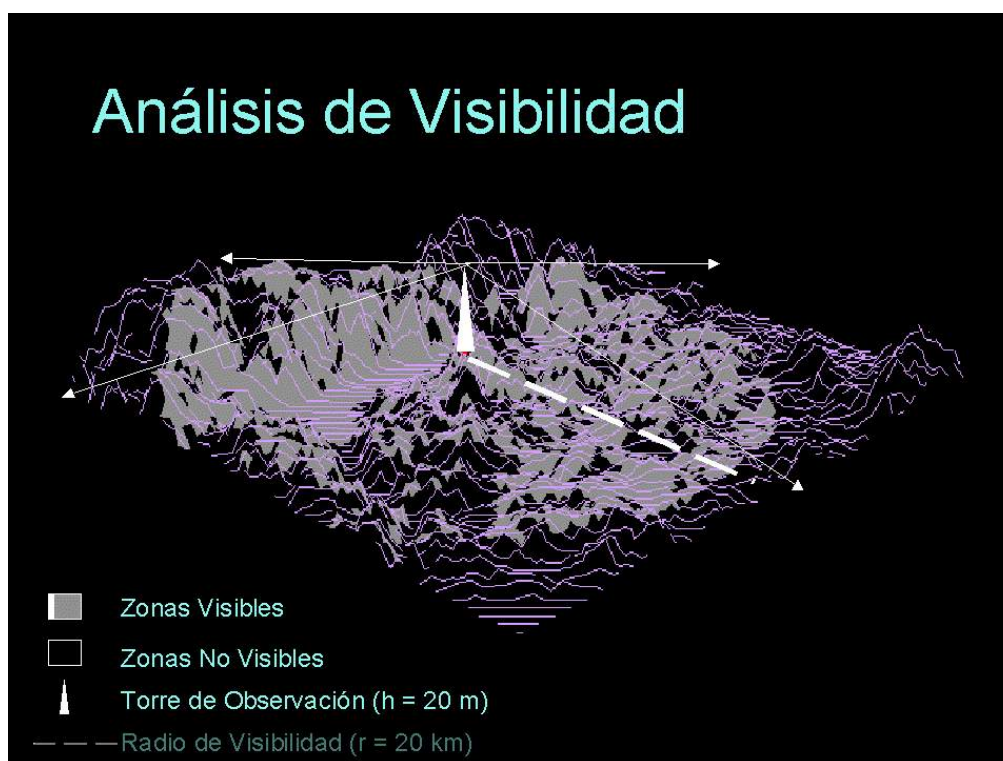


Figura 9. Plano de visibilidad a partir de un punto. Vista 3D en ARC/INFO

4.6 Estudios espaciales de ocurrencia y causalidad de incendios forestales

La ocurrencia y distribución espacial de los incendios forestales en Chile, es claramente una expresión territorial del comportamiento humano. Nuestra realidad indica que prácticamente el 99% de la totalidad de los siniestros tienen un origen antrópico, a diferencia de países con altas tasas de ocurrencia como Estados Unidos o Canadá donde las principales causas corresponden a fenómenos naturales (tormentas eléctricas y rayos principalmente).

En la formulación de estrategias y acciones para el manejo del fuego, es de importancia fundamental contar con información confiable sobre la naturaleza del problema que representan los incendios forestales, particularmente en lo que respecta a las condiciones que favorecen a la ocurrencia de ellos, los agentes responsables de la causalidad; y la factibilidad y eficacia de las medidas de control que eventualmente puedan aplicarse.

En ese contexto, es de gran importancia el estudio de la causalidad, dada la inevitable necesidad de disponer de antecedentes suficientes para fundamentar el diseño e implementación de programas de prevención, destinados a evitar o reducir el problema. No obstante, la investigación efectuada en Chile en torno al problema, se ha enfocado preferentemente hacia a la distribución de la ocurrencia, sin otorgarse un suficiente prioridad al análisis del origen de los incendios.

Al respecto, se estima que en la actualidad están dadas las condiciones para analizar con una mayor profundidad el comportamiento de la causalidad de los incendios forestales, ya que se dispone de registros confiables y completos sobre la ocurrencia de los incendios para todo el país, por lo menos en los últimos 17 años. Por otra parte, con el apoyo de medios y tecnologías modernas como los SIG, es posible procesar eficientemente enormes volúmenes de antecedentes disponibles.

Tradicionalmente el enfoque metodológico basado en los SIG, apunta a la identificación y delimitación de Zonas de Ocurrencia, entendiéndose como tales a aquellas áreas geográficas en donde se observan elevadas tasas densidad de incendios forestales. Una vez cumplido ese paso, es posible efectuar un análisis de la composición, distribución y evolución de la causalidad, siendo posible expresar estos resultados en forma espacial mediante coberturas digitales. Estos estudios son de especial relevancia ya que permiten aportar valiosos antecedentes para formular y ejecutar Programas de Prevención, identificando en mejor forma aquellos sectores en donde el problema de los incendios forestales ha alcanzado los niveles de mayor gravedad.

Metodológicamente, el estudio de la ocurrencia aplicando los SIG, parte del traspaso de las bases de datos de ocurrencia a unidades de referencia conocidas (sistema coordinado) para la generación de la Cartografía de Ocurrencia. Este paso se realiza mediante un programa diseñado especialmente para este propósito, el cual permite el traspaso de un sistema de ubicación denominado por la Corporación Nacional Forestal como GEOREF, a un sistema de coordenadas UTM, de modo de generar una cobertura digital de puntos (vector) la cual posteriormente es traspasada mediante el SIG a un formato raster. Dada las capacidades del modelo de datos raster de efectuar análisis de frecuencias, clasificaciones y filtros, es que se opta por este modelo de datos para representar la ocurrencia de los incendios en forma de distribución acumulada por temporadas, por causas y por Zonas de Ocurrencia.

En el análisis espacial de los incendios forestales dentro de una región, es necesario identificar aquellas zonas donde el problema es especialmente grave, lo que no siempre es posible determinar a través de un simple estudio estadístico. Por tal razón, se aplica un Análisis de Vecindad (utilizando el módulo GRID de ARC/INFO o IDRISI), el cual permite suavizar diferencias muy altas en la magnitud de los valores de ocurrencia que eventualmente puedan registrarse en unidades vecinas. De esta forma es posible delimitar claramente aquellas zonas donde la concentración de los incendios es significativa.

Este proceso está implementado en los SIG, en la forma de un filtro espacial de media, que asigna a cada unidad de análisis un valor calculado considerando el valor promedio de sus ocho vecinos.

Este análisis permite generar Zonas de Ocurrencia, de acuerdo a una escala de clasificación (por ejemplo, número de incendios por cada 100 hectáreas en 15 temporadas), y la delimitación de las zonas más críticas, las cuales pueden a su vez ser caracterizada de acuerdo a las principales causas que los originan, que en el caso de Chile, corresponden a los catalogados como "Peatones" con un 27,8% para el quinquenio 1998-2000, e "Intencionales" con un 28,5% para el mismo período (Julio, 2001).

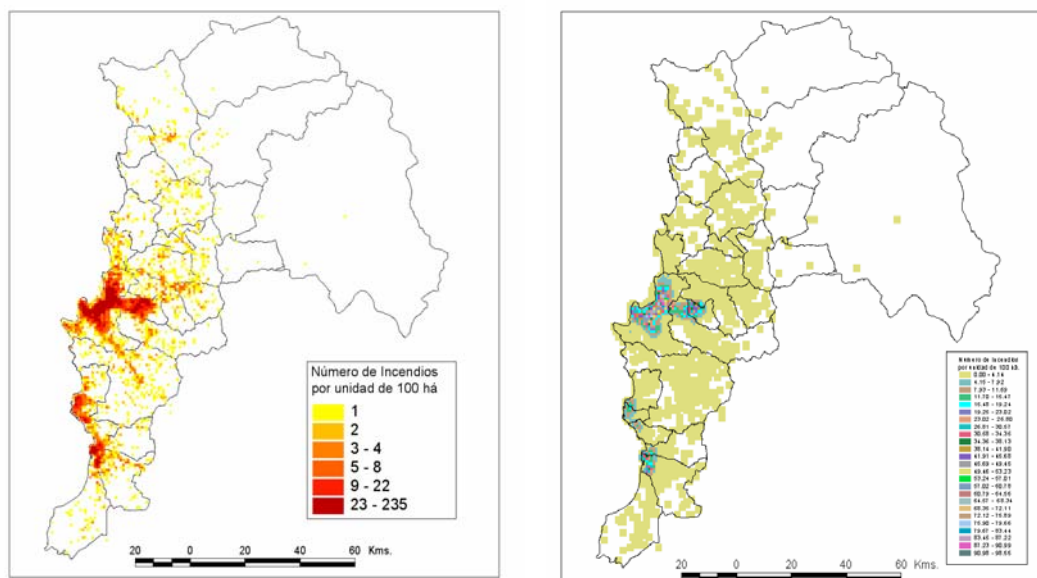


Figura 10. Izquierda: Distribución espacial de la ocurrencia de incendios forestales en la V Región de Chile. Derecha: distribución de la ocurrencia de acuerdo a un análisis de vecindad.

4.7 Asignación de recursos para el combate

Dado que los SIG presentan la capacidad de integrar distintos niveles de información, una aplicación útil desarrollada en Chile ha sido la determinación de la cantidad y tipo de recursos a asignar a uno o más eventos tomando en consideración el avance del fuego (representado digitalmente como un modelo de propagación raster), la dificultad de control y la pérdida que puede generarse (valores obtenidos de los análisis de Peligro y Daño Potencial, del Sistema de Prioridades de Protección) a partir de una sobreposición u overlay de capas, en la cual por un proceso de adición de atributos de las celdas (puntajes normalizados) es posible reclasificar los incendios en una escala de importancia, aspecto de relevancia para el control de situaciones coyunturales que están siendo reportadas a la central de operaciones.

En este aspecto, las bases de datos del sistema operan bajo una determinada resolución espacial (o tamaño de pixel), el cual conforma el nivel mínimo de información a procesar. El sistema otorga como producto final un listado de alternativas sobre la base de los cálculos anteriores, para que el operador del sistema pueda tener mayores antecedentes al momento de despachar recursos al combate.

5. COMENTARIOS FINALES

En Chile, el nivel de desarrollo tecnológico en materia de tecnologías de información es favorable, a la altura de los países desarrollados. No obstante ello, no es frecuente encontrar trabajos relacionados con aplicaciones de los SIG en el área de la protección contra los incendios forestales; más bien existen numerosos antecedentes post evaluación de los incendios, tales como imágenes satélite, registros de ocurrencia a nivel nacional y aplicaciones puntuales desarrolladas por empresas forestales para el apoyo al despacho de recursos al combate. Por otra parte, se menciona que se dispone de suficientes antecedentes sobre daños, vegetación a proteger, redes camineras, planos prediales, fotografías aéreas y localizaciones de fuentes de agua. Sin embargo, a pesar de toda esta disponibilidad de información, queda la duda si realmente está siendo eficientemente utilizada con el apoyo de tecnología de punta. Aquí la investigación juega un rol preponderante para tomar esa tecnología disponible y crear soluciones adaptadas a nuestra realidad país. Los esfuerzos han sido considerables por parte de CONAF y empresas forestales, sin embargo, ha sido la Universidad de Chile la institución – en conjunto

con el Instituto de Investigaciones Tecnológicas e Instituto Forestal - cuyo principal mérito en esta materia ha sabido utilizar en forma adecuada esta tecnología para generar investigación y reunir la experiencia de más de 30 años para la generación de sistemas automatizados tales como el Sistema KINTRAL, y herramientas anexas diseñadas para estudiar fenómenos de expresión territorial tales como la ocurrencia de incendios, análisis de localización de torres y simulación de incendios forestales, entre las más relevantes. En estas tareas, los SIG han desempeñado la base de los resultados.

La gama de programas comerciales existentes en el mercado de los SIG es variada. Nosotros como Laboratorio de Incendios Forestales hemos optado en un principio por programas altamente especializados como ARC/INFO bajo sistemas distribuidos para el procesamiento de grandes volúmenes de información, tales como la generación de extensos modelos digitales de terreno para modelar los planos de visibilidades, hasta programas más conocidos como TNT Mips, ARC/VIEW, e IDRISI; todos ellos, para la generación de resultados relacionados con estudios en el área de los incendios forestales.

Este nivel de desarrollo alcanzado en tecnologías de información ha permitido además apoyar en gran forma las labores en el campo de la docencia. Anualmente se imparte la asignatura de Manejo del Fuego tanto para alumnos de pregrado como de postgrado de la Carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad de Chile, con grandes reconocimientos a nivel latinoamericano. Por otra parte, el Laboratorio de Incendios forestales mantiene convenios de colaboración con el Servicio Forestal de Estados Unidos, y con la empresa canadiense Wildfire Fire Equipment Inc., permitiendo facilitar el intercambio de conocimientos entre países, lo cual indudablemente ha permitido potenciar el grado de desarrollo y la búsqueda de nuevas líneas de investigación, que, por lo que se mencionaba en párrafos anteriores, el tema de la protección contra los incendios forestales está lejos de estar agotado.

Se señalaba al principio que el ámbito de aplicaciones de los SIG es transversal pues abarca prácticamente todas las áreas del conocimiento, y aunque ya en 1967 la Universidad de Chile comenzara a investigar en el área del Control de Incendios Forestales, no fue hasta 1993 cuando esta tecnología fue incorporada formalmente en el Proyecto KINTRAL, producto de la formación del Consorcio Universidad de Chile – Instituto de Investigaciones Tecnológicas e Instituto Forestal.

Se han identificado grandes líneas de investigación, en las cuales el apoyo de herramientas tecnológicas de vanguardia son y serán siendo activamente requeridas para la resolución de problemas ligados a la Protección Contra Incendios Forestales. Destacan aquí contar con los SIG en el área de Comportamiento del Fuego para el apoyo en el diseño de Índices de Evaluación del Grado de Peligro, y en la Prevención para la Evaluación de Grupos Sociales de Riesgo, y la Calificación de Zonas de Riesgo y Peligro, todos, fenómenos con una clara expresión territorial. Existen otras líneas de investigación tales como en el área de Seguridad, Impacto Ambiental, Gestión en Protección y Operaciones de Combate. Sin embargo las áreas de Comportamiento del Fuego y Prevención, son las que presentan un mayor grado de aplicación de los SIG.

6. REFERENCIAS

- CASTILLO, M. (1998) Método de Validación para el Simulador de Incendios Forestales del Sistema KINTRAL. Tesis, U.de Chile, Santiago, 122 p.
- CONTRERAS, L. (2001) Diseño e Implementación de un Aplicación ARC/INFO para Determinar Prioridades de Protección en el Manejo del Fuego. Tesis, U.Chile, 135 p. Santiago.
- JULIO, G. (1990) Diseño de Índices de Riesgo de Incendios Forestales para Chile. Bosque 11(2): 59-72, U.Austral. Valdivia.
- JULIO, G. (1997) El Desarrollo Tecnológico del Manejo del Fuego en Chile. Actas IX Silvotecna, CORMA, Concepción, 20 p.
- JULIO, G. (1999) Fundamentos del Manejo del Fuego. U.Chile, Depto.Manejo de Recursos Forestales, Santiago, 312 p.
- PEDERNERA, P. (1995) Modelo de Optimización para el Diseño de Sistemas de Torres de Detección de Incendios Forestales. Tesis Ing.Forestal, Universidad de Chile, Santiago. 93p.

- PEDERNERA, P. (2000) Diseño e implementación de una aplicación computacional para conversión de coordenadas. (no publicado).
- PROYECTO FONDEF FI-13 (1995) KITRAL: Sistema de Prognosis y Gestión para el Control de Incendios Forestales. Actas Taller Internacional sobre Prognosis y Gestión en Incendios Forestales. Proyecto FONDEF FI-13, Santiago, pág. 242-253.