

Teledetección y Sig en el Ámbito Forestal: Experiencias en Chile

Remote Sensing and Gis in Forestry: Experiences in Chile

Carlos Mena Frau¹

John Gajardo Valenzuela²

Yony Ormazábal Rojas³

Yohana Morales Hernández⁴

Rodrigo Montecinos Guajardo⁵

Resumen

La Teledetección espacial y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han constituido una verdadera revolución tecnológica y metodológica para efectuar la adquisición, manejo y análisis de la información geográfica sólo comparable con el efecto que provocó la invención del mapa. De hecho, estas nuevas tecnologías constituyen el eje vertebrado que sustenta los sistemas de consulta y análisis utilizados en las empresas forestales, soportando grandes volúmenes de información cartográfica relevante para el proceso de toma de decisiones. Por consiguiente, la integración de éstas disciplinas geomáticas generan y suministran información temática y espacial, de carácter primario o secundario, para efectuar una adecuada planificación de las actividades ha llevar a cabo durante toda la extensión del ciclo económico forestal, manifestadas en los horizontes de planificación estratégico, táctico y operacional.

En el presente artículo se sintetizan algunas experiencias desarrolladas en Chile y particularmente en la Facultad de Ciencias Forestales y el Centro de Geomática de la Universidad de Talca, en lo referido a la utilización de Teledetección y SIG en el ámbito forestal.

Palabras clave: teledetección; sistema de información geográfica; planificación florestal.

^{1,2,3,4 y 5} Centro de Geomática de la Universidad de Talca, Av. Lircay s/n, Casillas 721 - 747, Talca, Chile
e-mails:
¹ cmena@utalca.cl; ² jgajardo@utalca.cl; ³ yormazabal@utalca.cl; ⁴ ymorales@utalca.cl;
⁵ rmontecinos@utalca.cl

Abstract

The Remote Sensing and the Geographic Information Systems (GIS) have constituted a really technological and methodological revolution to make the acquisition, processing and analysis of geographic information only comparable with the effect that the invention of the map provoked. In fact, these new technologies constitute the vertebrate axle that sustains to the consultation and analysis systems utilized at the forest companies, storing big volumes of relevant cartographic information for the process of take of decisions.

Consequently, the integration of these geomatic disciplines generate and supply primary or secondary thematic and space information, in order to make an adequate planning of the activities that will take effect during the extension of the forest business cycle, manifested in the strategic, tactical and operational horizons of planning.

The present article synthesizes some experiences developed at Chile and particularly in the Faculty of Forest Sciences and the Geomatic Center of the University of Talca, referred to the utilization of Remote Sensing and GIS in forest activities.

Keywords: remote sensing; geographic information system; forestry planning.

Introducción

Dentro de la economía chilena, uno de los sectores más dinámicos es el forestal, el cual se constituye en un pilar fundamental de la estrategia de desarrollo nacional, contando además con un amplio reconocimiento internacional. En el último tiempo, este sector ha presentado un desarrollo sostenido, incorporando cada vez un mayor valor agregado a sus productos. Prueba de ello es que el Producto Interno Bruto (PIB) creció casi en 30% en los últimos 8 años, con una utilización de madera que aumentó de 23 a 32 millones de m³, manteniendo en promedio 130.000 empleos directos (INFOR, 2006). Considerando el gran impacto que tiene el sector sobre la economía nacional y el tiempo de maduración que se requiere para lograr un adecuado desarrollo de la masa forestal, resulta vital llevar un adecuado proceso de planificación de las actividades que se efectúan durante toda la extensión del ciclo económico forestal.

La alta competitividad que existe en la actualidad, tanto a nivel nacional como internacional, demanda una alta disponibilidad de herramientas tecnológicas adecuadas para optimizar tiempos y recursos en el marco de una gestión sectorial eficiente. En este escenario, la utilización de la Teledetección, entendida como una disciplina esencial para la obtención de información base para los procesos de cuantificación, monitoreo, planificación

y simulación de los recursos forestales y ambientales, permite registrar los distintos estados y cambios a través del tiempo de una determinada zona o territorio en conjunto. Estas ventajas han hecho que los sensores remotos, y especialmente la fotografía aérea en el caso de Chile, se hayan convertido en una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el ámbito forestal. La aparición de imágenes satelitales, han reforzado y ampliado esta concepción al ofrecer información no registrada por los métodos convencionales que multiplica la posibilidad de disponer de información valiosísima para establecer los esquemas de manejo y gestión de los recursos más apropiados para cada territorio en estudio.

El proceso de planificación forestal incluye diversas actividades que se pueden agrupar en: recopilación de información, análisis, toma de decisiones y confección del programa. Éstas tienen que llevarse a cabo antes de realizar cualquier acción sobre el recurso forestal y su finalidad es mejorar la productividad, calidad de los productos, seguridad en el trabajo y minimizar los impactos al medio ambiente. Es así que el proceso se fundamenta en la utilización de una gran cantidad de información que debe ser almacenada, gestionada, modelada, analizada, simulada y visualizada de manera dinámica y flexible; aspectos muy importantes puesto que su propósito final es obtener información primaria o secundaria que sea relevante, confiable, oportuna y precisa para llevar a cabo un adecuado proceso de toma de decisiones. En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) a través de sus múltiples herramientas y aplicaciones, permiten gestionar, analizar y generar toda la información relevante para una adecuada planificación de actividades relacionadas con el sector forestal, considerando los diversos horizontes y la gran cantidad de variables que actúan en el proceso.

Por consiguiente, la integración Teledetección y SIG constituyen una herramienta idónea para la planificación de actividades desarrolladas durante el manejo y aprovechamiento forestal, ya que en conjunto permiten generar y analizar información considerando las componentes espaciales, temáticas y temporales de la información, entregando una visión real, precisa y completa del territorio en intervención. Considerando estos aspectos, algunas de las actividades forestales que pueden ser planificadas mediante la utilización de esta integración son: inventarios, mensura, cosecha y aprovechamiento, caminos y accesibilidad, análisis multitemporales, modelos de capacidad de acogida, determinación de zonas de productividad, sanidad, redes de transporte, estudios hidrológicos, prevención, evaluación y control de incendios, entre otras.

El presente artículo tiene por objetivo exponer las experiencias desarrolladas en Chile en torno a la utilización de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta para efectuar tareas relacionadas con la planificación de actividades forestales desarrolladas en el transcurso del ciclo económico forestal. En una primera instancia se reportan los trabajos e investigaciones realizadas en Chile por diversos autores ligados a la Teledetección y SIG, y posteriormente, se presentan algunos

de los estudios elaborados por los autores, como parte del trabajo docente y de investigación desarrollado en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Talca y el Centro de Geomática de la misma casa de estudios.

Cuerpo

Teledetección en el ámbito forestal: Experiencias en Chile

A partir de la década del setenta el uso de fotografía encontró múltiples aplicaciones en el ámbito forestal chileno, particularmente en actividades de planificación, catastro y cosecha. El crecimiento de la capacidad productiva forestal junto con la experticia alcanzada por los profesionales y técnicos relacionados con la cartografía de zonas de manejo a partir de fotografías aéreas, explican la generalizada creación de departamentos de cartografía al interior de cada una de las empresas e instituciones de gran tamaño dedicadas a la actividad forestal. Posteriormente, al iniciarse los años ochenta, comienzan a aparecer las primeras experiencias con sensores remotos satelitales con el fin de aprovechar los variados beneficios de los datos digitales registrados en las imágenes capturadas por sensores espaciales, abriendo un campo nuevo de aplicaciones en el ámbito forestal que propician un mejor manejo y planificación de los recursos al orientar de mejor manera las decisiones adoptadas al respecto.

Una de las primeras experiencias realizadas en esta temática fue el proyecto “Teledetección para Manejo Forestal Dinámico (Temford)”, en donde CONAF (1983) desarrolló una metodología de clasificación tanto para el bosque nativo en la V y VI regiones como para plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, basándose en un análisis multitemporal, utilizando imágenes Landsat MSS y TM. La metodología empleada en la clasificación temática consistió en el análisis de composiciones en falso color de subescenas del área de estudio, generadas a través de procesamiento digital. Los resultados muestran que el sistema Landsat permite adquirir la mayor parte de la información de relevancia que requiere el sector forestal, compatible con los requerimientos usuales para estudios a nivel regional de los recursos y fenómenos asociados, a un costo por hectárea notablemente bajo. Alfaro (1992) se concentró en determinar el nivel de confiabilidad de los resultados de las clasificaciones de carácter visual entregadas por la metodología de análisis derivadas del proyecto Temford, logrando comprobar que las imágenes MSS presentan una menor definición de límites de unidades vegetacionales. Sin embargo, permiten la generación de imágenes con mejor contraste, a diferencia de las imágenes TM cuyo alto contraste tiende a saturar la escena. De esta forma, Alfaro concluye que es factible aplicar una metodología de clasificación analógica de imágenes de satélite MSS con fines operativos, generando una cartografía a escala de semi detalle (1:50.000) para áreas

extensas con un nivel de confiabilidad adecuado, conforme a los requerimientos de información del sector silvoagropecuario a nivel regional.

Hasta el año 1996, la utilización de imágenes satelitales en el sector forestal a nivel nacional se basó casi exclusivamente en la interpretación visual tradicional, sin embargo, en el último tiempo se ha podido vislumbrar el real valor de las imágenes satelitales al ofrecer información que puede ser analizada en forma matemática y estadística, gracias a que no se trata de una fotografía convencional, sino de un producto digital, procesable mediante métodos de análisis asistidos por computador. Es así como en el año 1997 la Corporación Nacional Forestal (CONAF) dio a conocer el “Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile”, realizado en conjunto con la Comisión Nacional de Medioambiente (CONAMA) y las Universidades Austral, Católica de Chile y Católica de Temuco. Mediante este estudio, se pudo recopilar información detallada y hasta ese momento desconocida sobre el uso de los suelos en el territorio nacional. Desde 1999 a la fecha, la Teledetección espacial, a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales, está siendo utilizada como herramienta de actualización de este catastro, como parte del proyecto “Establecimiento de un sistema de seguimiento y monitoreo del estado de conservación de las formaciones vegetales naturales” (CONAF y CONAMA, 2002).

Segura y Trincado (2003), desarrollaron y evaluaron una metodología para generar cartografía digital de uso del suelo de la Reserva Nacional Valdivia a partir de imágenes del sensor Landsat TM, confeccionando un grupo de cinco índices de vegetación para la obtención de distintas combinaciones de bandas. Sus conclusiones apuntan a que dadas las condiciones del bosque en la zona de estudio, es necesario utilizar las seis bandas reflectivas del sensor TM junto con índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), de manera de aumentar la probabilidad de que un tipo de cobertura vegetal sea reconocido correctamente. Por su parte, el proyecto del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) “Desarrollo de una metodología para la detección fitosanitarios forestales, utilizando técnicas de percepción remota satelital y radiometría in situ”, desarrollado durante los años 1996 y 2000, permitió detectar y evaluar problemas fitosanitarios forestales actuales y potenciales mediante técnicas de espectrometría fotónica, aprovechando las características de reflexión de la vegetación en los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo cercano (300 a 1.100 μm). En otro ámbito y atendiendo al alto valor del recurso forestal y al efecto negativo que tiene el fenómeno de incendios, desde el año 2005 se desarrolla el proyecto “Redes inalámbricas de sensores para la detección de incendios forestales y monitoreo de variables de estado de combustibles para el recurso forestal de la Región de Valparaíso”, cofinanciado por la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), el Instituto de Investigación Forestal (INFOR) y otras instituciones asociadas, con el objetivo de Monitorear el estado de combustibles forestales y detectar focos de incendios en tiempo real en zonas de riesgo potencial de incendios forestales,

utilizando redes inalámbricas de sensores localizados a nivel del suelo y sotobosque e imágenes satelitales para el estrato dominante, integrados a un sistema de software y hardware específicos, utilizando para esto tecnología de punta en sistemas de comunicación y Teledetección satelital.

Uso de los SIG en la planificación forestal: panorama nacional

La utilización de los SIG en el ámbito forestal se remonta a la segunda mitad de la década de los ochenta. La implementación de la tecnología comenzó con el software ArcInfo mediante el cual fue posible generar información digital a partir de la digitalización vía tableta de la cartografía base nacional (cartas analógicas 1:50.000 principalmente), desde donde se extrajeron variables como: curvas de nivel, cursos de agua y red caminera principal. Para la generación de la cartografía temática de usos del suelo, actualización de caminos y rodalización se utilizó un Sketchmaster o cámara clara, instrumento que transfiere la información de una fotografía aérea color no-métrica a un mapa base, el cual posteriormente era digitalizado e integrado a la base de datos cartográfica patrimonial. En los años siguientes, junto con los crecientes avances tecnológicos, las empresas forestales fueron adquiriendo nuevos softwares y hardwares, permitiéndoles mejorar y agilizar los procesos relacionados con la gestión y aprovechamiento de la información. En este sentido, el salto cualitativo más importante en cuanto a la mejora tecnológica corresponde a la implementación de restituidores digitales para la generación de cartografía temática y el desarrollo de software adecuados a las necesidades de información y gestión de cada empresa en particular (Mena, 2005). Entre las variadas aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica en actividades de planificación forestal en nuestro país, se pueden mencionar:

-inventarios forestales: los SIG pueden ser considerados como una adecuada herramienta para la planificación y análisis de los inventarios forestales efectuados al recurso (Bell, 1999). De hecho, la utilización de los SIG en la planificación de inventarios forestales ha sido muy recurrente puesto que el diseño físico del inventario, definido en términos de la asignación de unidades muestrales se efectúa en forma automatizada determinando el tipo de muestreo a efectuar (aleatorio simple, estratificado o sistemático). Un ejemplo de ello es el trabajo de Corvalán y Hernández (1999), quienes estimaron el diámetro a la altura del pecho (DAP) a partir de información obtenida del procesamiento digital de fotografías aéreas color escaneadas, escala 1:5.000 y mediante el cual se construyó un modelo de regresión lineal simple que predice el DAP;

-cosecha forestal: la cosecha de bosques debe ser muy bien planificada puesto que es una de las actividades del ciclo económico forestal que genera una mayor cantidad de impactos ambientales en conjunto con la construcción de caminos. En este sentido los

SIG juegan un papel preponderante dentro de la planificación táctica y estratégica, puesto que actualmente las operaciones de cosecha demandan gran cantidad de información, presentándose en forma alfanumérica (inventarios, productos, equipos, manejo, permisos, restricciones legales y ambientales) y en forma gráfica (curvas de nivel, caminos, pendientes, áreas de protección, límites, cursos de agua, entre otros). Esta información es altamente dinámica, puesto que una vez que se cosecha el bosque, las coberturas e información vinculadas van cambiando. En este contexto Sapunar et al. (1999) idearon un sistema cartográfico de apoyo a la planificación de cosecha basado en los softwares comerciales ArcView, FoxPro y Excel. El funcionamiento del sistema comienza con la definición de los predios a cosechar por temporada, por lo cual es importante efectuar la planificación de caminos y canchas a construir definiendo en forma integrada las áreas a cosechar con los diferentes equipos disponibles;

- planificación de caminos forestales y transporte: el trazado de la red de accesibilidad debe considerar la zonificación por riesgo potencial a la erosión, remoción o deslizamiento, evitando la construcción en zonas de alta o muy alta fragilidad (GAYOSO y ALARCÓN, 1999). En este contexto, Vergara y Gayoso (2004) analizaron el impacto ambiental generado por los caminos y la influencia que ejercen los centros poblados sobre los bosques nativos de la Provincia de Valdivia. En concordancia con otros estudios, se observó que el mayor impacto sobre el bosque se produce hasta una distancia de 3 kilómetros desde el borde del camino, llegando a ser deforestado desde un punto de vista histórico desde un 22% y hasta un 51% de la superficie original. Otra aplicación en las redes de accesibilidad forestal y su incidencia en el transporte fue realizada por Letelier (2003), quien diseñó e implementó una herramienta en entorno SIG, aplicando algoritmos de solución a problemas de localización óptima de canchas de acopio de madera;

- protección forestal: el sistema Kitral se basa en el uso de la tecnología SIG y tiene como finalidad establecer mecanismos de evaluación permanente de la ocurrencia de incendios forestales, junto con la generación de información útil para la gestión de organizaciones encargadas de dirigir y ejecutar programas de manejo del fuego. Incluye la caracterización actualizada de variables físicas y ambientales que afectan a la ocurrencia, dirigida a estimar la probabilidad de iniciación de incendios forestales, expansión y conflictividad de potenciales focos, daños que pueden generarse y definición de dispositivos de alerta. El motor de funcionamiento de este sistema lo constituye un SIG, el cual permite mantener consistencia en la información que maneja los diferentes módulos del sistema (JULIO et al., 1998). Adicionalmente, Tapia (1999) elaboró un sistema que permite modelar escenarios, incluyendo variables de alta dinámica tales como quemas, faenas o eventos sociales. Además, entrega indicadores sencillos para la toma de decisiones, expresados en conceptos de baja, media o alta intensidad;

- soluciones integrales para consulta y planificación forestal: La creciente necesidad de información confiable y oportuna para la toma de decisiones, así como la implementación de software de gestión de información, han coincidido en la búsqueda de una interfaz sencilla de consulta. En este contexto Real et al. (1999) desarrollaron un sistema de reporte gráfico y alfanumérico para la base de datos nacional del Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales de Chile. Se trata de una herramienta mediante la cual los usuarios acceden a información cartográfica y alfanumérica del catastro y modelada en el monitoreo. Otra experiencia relacionada la exponen Goffard y González (1999), quienes presentan los resultados de la implementación del Sistema de Información Patrimonial (SIP) del grupo Arauco. El sistema está compuesto por cuatro módulos: CartoSIP (desarrollado en Avenue de ArcView y soporta los procesos que requieren de edición gráfica); ExploraSIP (desarrollado en Delphi y MapObjects y se utiliza como módulo general de consulta y mantención de información tabular); InvenSIP (desarrollado en Visual FoxPro y PowerStation Fortran y soporta el procesamiento de inventarios forestales); GemSIP (desarrollado en Delphi, MapObjects y Avenue de ArcView y soporta la generación de mapas). El sistema ha dado muy buenos resultados, puesto que involucra tres conceptos importantes: dato único, oportuno y confiable.

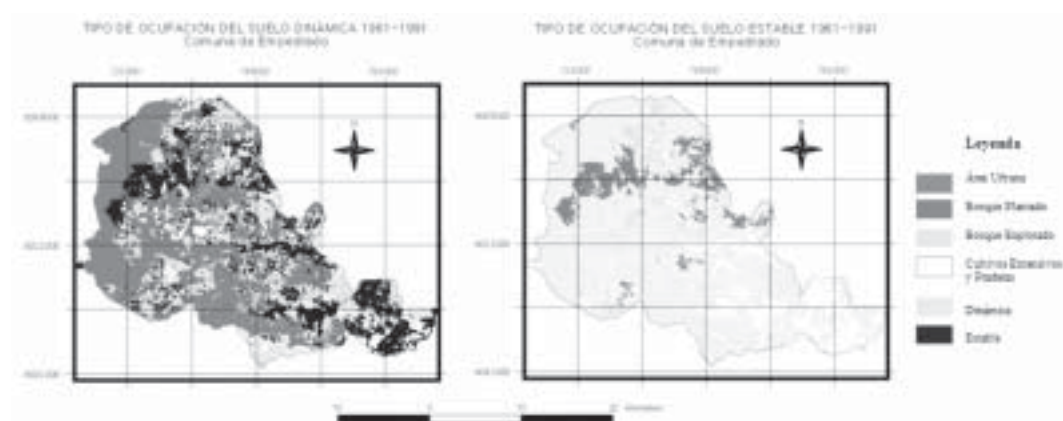
Geomática para la actividad forestal: Experiencia en la Universidad de Talca

Durante los últimos diez años, la Universidad de Talca a través de la Facultad de Ciencias Forestales y el Centro de Geomática, ha llevado a cabo un sinnúmero de investigaciones en donde se aplica la Geomática y sus múltiples disciplinas al estudio de los fenómenos y procesos relacionados con la actividad forestal, tanto en conservación como en producción de recursos, algunos de los cuales se reseñan a continuación. Cabe señalar que un número importante de las investigaciones contaron con la valiosa cooperación del Servicio Aerofotogramétrico (SAF) de la Fuerza Aérea de Chile (FACH).

Análisis del proceso de forestación artificial en la comuna de Empedrado, VII Región del Maule: el estudio corresponde a la tesis doctoral del autor Mena (1996), que se centra en el acelerado proceso de forestación que experimentó la Comuna de Empedrado, VII Región del Maule, en los últimos 30 años, empleando técnicas de análisis multitemporal. El objetivo central fue establecer la evolución de la ocupación del suelo de la comuna de Empedrado entre dos momentos puntuales, 1961 y 1991, tramo que representa el lapso temporal más interesante en cuanto al impulso forestal experimentado en el área de estudio (figura 1). Con esta finalidad se llevó a cabo una valoración cualitativa y cuantitativa de los impactos producidos por el fuerte aumento de las plantaciones forestales en el ámbito físico y humano, lo cual permitió además el planteamiento de posibles soluciones

a la gestión territorial de la zona de estudio. En conjunto con lo anteriormente expuesto, se desarrolló una metodología basada en técnicas de evaluación multicriterio y herramientas SIG ráster, que permitiera identificar los sitios más idóneos, desde un punto de vista operativo y analítico, para acoger mejor determinadas ocupaciones del suelo. Los resultados demostraron que la Teledetección brinda información rápida y actualizada de la evolución de los fenómenos medio ambientales. Por su parte, el análisis digital y la generación de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), facilita el desarrollo de este tipo de estudios al suministrar mapas de pendiente y orientación con operaciones y procesos sencillos. Por último, los SIG son capaces de integrar las diversas variables temáticas del componente espacial, permitiendo generar modelos territoriales y con ello, prever consecuencias de determinadas decisiones de planificación.

Figura 1. Tipo de ocupación del suelo dinámica/estable, período 1961-1991, comuna de Empedrado



Aplicaciones de la fotointerpretación en tres temas del ámbito forestal y su integración a los SIG: el objetivo general desarrollado en este estudio consiste en aportar al mejor uso de la fotointerpretación en el ámbito forestal y su integración en una base de datos digital contenida en un SIG. La metodología consistió en aplicar técnicas fotointerpretativas en producción y actualización cartográfica, inventarios forestales y ubicación de torres de vigilancia forestal. En este aspecto el estudio evidenció que en la actualidad el uso de la fotointerpretación no debe ser excluyente de los SIG y por el contrario deben ser complementarios, de manera tal de obtener información territorial que sea óptima para efectuar una adecuada planificación de las faenas forestales.

Comparación del tratamiento visual y el tratamiento digital de fotografías aéreas en la cartografía forestal: en esta investigación se aplican y comparan los tratamientos visual y digital de fotografías aéreas verticales de escala media, con el fin de obtener una base de datos cartográfica, en formato digital, utilizando SIG. La zona de estudio

correspondió al Predio El Picazo (figura 2), ubicado en la comuna de San Clemente, en la Precordillera Andina de la VII Región. Los términos en que se comparan dichos tratamientos son: costos del proceso, tiempo de ejecución, precisión de la cartografía resultante y compatibilidad en la conexión con los SIG. Los resultados arrojan parámetros cualitativos y cuantitativos que indican que la metodología más apropiada para tratar la información geográfica y colocarla a disposición del usuario es el tratamiento digital.

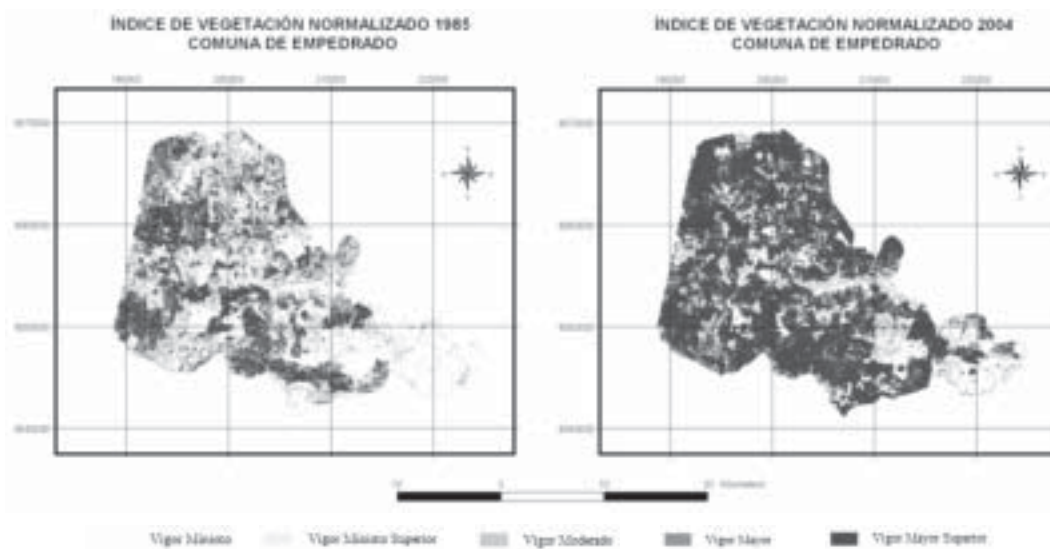
Figura 2. Base de datos del predio El Picazo, sustentada en el SIG ArcView



Dinámica de la cobertura vegetal de la comuna de Empedrado entre los años 1985-2004, mediante técnicas de Teledetección Ambiental: el estudio llevado a cabo en

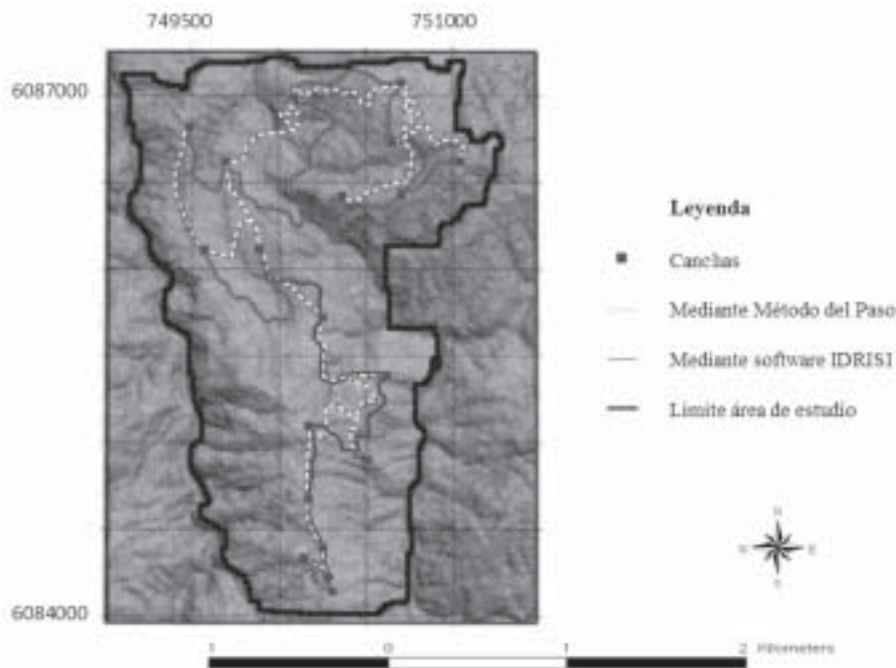
la comuna de Empedrado, involucró la evaluación temporal de la cobertura vegetal, mediante dos imágenes del sensor Landsat-5 de los años 1985 y 2004. El proceso consideró la corrección geométrica y clasificación supervisada de las imágenes para finalmente, obtener coberturas de uso del suelo e índices de vegetación normalizados (NDVI) para ambos años (figura 3). De la tabulación cruzada se obtuvo que los valores de vigor vegetal más altos corresponden a lugares en donde se encuentra la categoría de bosque plantado. Además, se pudo verificar una disminución en la superficie de bosque nativo junto con la superficie de cultivos y praderas, en favor de la superficie de plantaciones forestales artificiales.

Figura 3. Cobertura NDVI para cada año en estudio



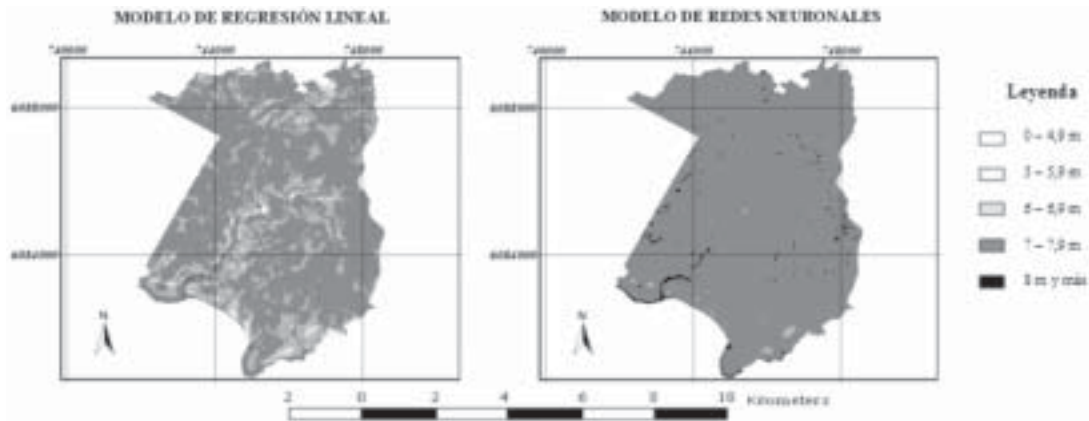
Diseño óptimo de caminos forestales mediante el uso de SIG: se compararon los resultados obtenidos de una planificación manual con el denominado “Método del Paso” y los obtenidos mediante un diseño automatizado utilizando el SIG IDRISI. Además, se realizó un diseño que incluyó aspectos ambientales como criterios de decisión, con la intención de demostrar las capacidades que poseen estas herramientas para trabajar con múltiples variables. Dentro del contexto de esta investigación, los resultados obtenidos indicaron que las dos metodologías permitieron diseñar caminos similares en cuanto a longitudes y volúmenes de tierra asociados a su construcción (figura 4).

Figura 4. Trazado de camino diseñado por método del paso y SIG IDRISI



Integración de los SIG y Evaluación Multicriterio (EMC) para la ubicación de canchas de acopio de madera en faenas forestales: en esta investigación se determinó mediante técnicas de Evaluación Multicriterio y SIG ráster, los sitios más idóneos que, desde un punto de vista operativo y analítico, pueden ser potenciales lugares de ubicación de canchas de acopio de la madera. Mediante esta técnica y utilizando variables físicas como la pendiente del terreno, hidrología y caminos forestales, se elaboró un modelo de capacidad de acogida que estableció que las zonas idóneas para la ubicación de canchas de madereo corresponden a un 24,3% de la superficie total del predio evaluado.

Estimación de la Productividad de Sitio en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don mediante el algoritmo de Redes neuronales y el método de mínimos cuadrados: en la investigación se elaboró una metodología para estimar la productividad de sitio en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, mediante la utilización de técnicas geomáticas. En este contexto, el trabajo se centró en comparar la capacidad de estimación mediante el método de mínimos cuadrados y redes neuronales artificiales para predecir la productividad de sitio, expresada como la altura de los cien árboles más altos por hectárea (ver figura N°5). Los resultados demuestran que las variables seleccionadas como mejores predictoras están relacionadas con la pendiente del terreno y la distancia a cursos de agua. En cuanto a la comparación de ambas estimaciones, el modelo de regresión lineal presentó un menor Sesgo Medio (SM), mientras que el modelo neuronal tuvo un menor error medio absoluto (EMA) y una menor raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

Figura 5. Modelos cartográficos de productividad de sitio

Conclusiones

En la actualidad, las empresas forestales requieren analizar grandes volúmenes de información cartográfica relativa a las condiciones y características en que se encuentra su patrimonio forestal, para llevar a cabo un correcto proceso de toma de decisiones en la planificación de los recursos. En este contexto, la Teledetección se ha constituido en una herramienta eficaz para adquirir información cartográfica temática, principalmente en la generación y actualización de información de las unidades de manejo establecidas por cada empresa. Por su parte, los SIG representan un instrumento tecnológico y conceptual fundamental para manipular, modelar y analizar con eficiencia la información cartográfica de una empresa forestal, puesto que permiten interrelacionar múltiples variables espaciales necesarias para alcanzar un mayor grado de certidumbre en la planificación. Para ello se requiere de información precisa, única, oportuna y relevante al proceso de toma de decisiones, particularmente en el marco del desarrollo de actividades ligadas al manejo y producción forestal.

En este escenario, el desarrollo de estudios aplicados de Teledetección y SIG a la planificación forestal en Chile presenta un adecuado y creciente desarrollo, puesto que se han elaborado soluciones afines a las necesidades y realidad del sector forestal nacional, considerando las diversas etapas del ciclo económico forestal. En este sentido los estudios llevados a cabo por el Centro de Geomática y la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Talca, muestran la amplia variedad de temas abordados por estas tecnologías. De hecho, en el futuro próximo se vislumbra la profundización de la investigación aplicada en temas referidos a incendios forestales (cartografía de incendios, análisis de riesgo, modelos de combustibles, entre otras), redes de accesibilidad, impactos ambientales de las actividades forestales, silvicultura de precisión, modelos espaciales del terreno, entre otras.

Referencias

ALFARO, W. *Metodología de análisis para imágenes Landsat*. Tesis Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 180p., 1992.

BELL, J. Elementos fundamentales para la planificación y ejecución de un inventario. En *XIII Silvotecnica*. Concepción, Chile. 12 p., 1999.

CONAF. *Proyecto Teledetección para manejo forestal dinámico TEMFORD*. Informe final. CONAF. Santiago, Chile. 76p., 1983.

CONAF y CONAMA. *Proyecto Establecimiento de un sistema de seguimiento y monitoreo del estado de conservación de las formaciones vegetales naturales*. Chile, 2002.

CORVALÁN, P.; HERNÁNDEZ, H. J. Predicción del diámetro normal de individuos de pino insigne usando atributos locales de imágenes aéreas digitales. En *XIII Silvotecnica*. Concepción, Chile. 14 p., 1999.

GAYOSO, J.; ALARCÓN, D. *Guía de conservación de suelos forestales*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 96 p., 1999.

GOFFARD, J.; GONZÁLEZ, S. Sistema de Información Patrimonial: La solución de Arauco. En *XIII Silvotecnica*. Concepción, Chile. 6 p., 1999.

INFOR. *Estadísticas del sector forestal*. Consultado el 07 de agosto de 2006, disponible en <http://www.infor.cl/>, 2006.

JULIO, G.; PEDERNERA, P.; AGUILERA, R. Aplicaciones del SIG en la Gestión de la Protección contra los Incendios Forestales - *El Sistema KITRAL. Actas Taller Regional FAO Aplicaciones de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica a la Gestión Agrícola del Medio Ambiente*. FAO Chile. Santiago, Chile, 1998.

LETELIER, T. *Análisis de Algoritmos de Localización Óptima y su Implementación en Sistemas de Información Geográfica*. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Informática, Universidad Austral de Chile. 126 p., 2003.

MENA, C. *Análisis del Proceso de Forestación Artificial en la VII Región del Maule: Un Ejemplo Modélico en la Comuna de Empedrado*. Tesis Doctoral. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá de Henares. España. 358 p., 1996.

MENA, C. *Geomática para la Ordenación del Territorio*. Editorial Universidad de Talca. Talca, Chile. 344p., 2005.

REAL, P.; SANDOVAL V.; G. TRINCADO. Sistema de reporte gráfico y alfanumérico para base de datos nacional. En *XIII Silvotecnica*. Concepción, Chile. 16 p., 1999.

SAPUNAR, P.; G. MANSILLA; G. FUENTEALBA. Sistema cartográfico de apoyo a la planificación y habilitación de la cosecha. En *XIII Silvotecnica*. Concepción, Chile. 12 p., 1999.

SEGURA, R.; TRINCADO, G. Cartografía digital de la reserva nacional Valdivia a partir de imágenes satelitales Landsat TM. *Revista Bosque* (Valdivia), Vol.24, N° 2, p.43-52, 2003.

TAPIA, V. Aplicación de la tecnología SIG y sensores remotos en el desarrollo de herramientas de apoyo al combate de incendios forestales. En *XIII Silvotecnia*. Concepción, Chile. 3 p., 1999.

VERGARA, G.; GAYOSO, J. Efecto de factores físico-sociales sobre la degradación del bosque nativo. *Bosque* (Valdivia), Abr. 2004, Vol.25, N°1, p.43-52. ISSN 0717-9200, 2004.