

Optimización de Explotaciones Madereras con Análisis de Redes y Enrutamiento Basados en Sistemas de Información Geográfica

Rubén Valbuena Puebla

**Sistemas de Información Geográfica
Licenciatura en Ciencias Ambientales
Universidad Politécnica de Madrid**

INTRODUCCIÓN

La realidad geográfica se compone de diversos objetos lineales; por ejemplo ríos, carreteras o ferrocarriles. A partir de tres modelos de situaciones, se pueden generar diversos tipos de relaciones entre modelos lineales: aislados, dirigidos o circuitos. Una primera situación puede darse cuando existen diversos tipos de objetos lineales sin que conste ninguna unión entre ellos; en este caso, la relación entre los objetos será de vectores aislados. Un segundo tipo ocurre cuando existen uniones entre los objetos lineales pero nunca se forma un bucle, siendo la red de un aspecto ramificado, como puede ocurrir con una la red hidrográfica de una misma cuenca; este tipo de red es una red dirigida, ya que los flujos en ella suelen ir en una sola dirección. El último tipo se denomina circuito, siendo éste una red de objetos lineales en la que existen uniones entre ellos de forma que se creen circuitos cerrados, como ocurre con las calles de una ciudad (Bosque Sendra, 2000). Este último caso es el que se entiende propiamente como una red, no obstante, algunas de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que describiremos para el análisis de redes pueden ser también utilizadas en redes dirigidas o de objetos aislados.

También puede darse el caso de que una red esté compuesta por varios circuitos que se encuentran aislados entre ellos. Es común por ejemplo, tener información sobre una red fluvial y un red de carreteras que comparten el mismo ámbito geográfico pero que estén completamente aisladas entre sí a efectos de su análisis; en este caso, se dice que los elementos lineales tienen relaciones intra-grupales, pero no entre grupos. Generalmente, las redes de comunicación e infraestructuras son las que requieren un análisis mediante un SIG.

Las redes de comunicaciones normalmente necesitan un análisis profundo. Las aplicaciones logísticas de los SIG son algunas de las más ampliamente utilizadas e intensamente desarrolladas. Las redes viales son circuitos complejos con múltiples y variados tipos de relaciones de conexión entre sus objetos lineales. Estos objetos pueden a su vez tener diversos atributos con una influencia decisiva en los flujos que pasan por ellos. Estos atributos pueden ser limitaciones en la velocidad máxima o en el peso máximo permitido para camiones, o la presencia de calles de único o doble sentido. Además, la mayoría de los programas de SIG adaptados a la gestión logística son capaces de calcular horarios de turnos para una flota heterogénea de coches, camiones y remolques. Incluso es posible organizar a la vez el transporte de diversos tipos de cargas que precisen de condiciones y necesidades diferentes para su transporte. Para los forestales, las redes de comunicaciones permiten el acceso a nuevas zonas de bosque. Las carreteras son indispensables para la cosecha y los tratamientos selvícolas. Además, son también necesarias para el transporte de trabajadores y el control de los incendios forestales (Kantola, 1991).

Las redes de infraestructuras están generalmente compuestas por tuberías o cables que distribuyen electricidad, agua, gas, teléfono, etcétera, así como los servicios de alcantarillado y evacuación a las plantas de tratamiento de vertidos. Es importante tener en cuenta algunos aspectos de este tipo de redes al organizarlos mediante un SIG. Normalmente, estos servicios se encuentran enterrados bajo tierra. Por ello, deben estar bien localizados, de forma que no sean dañados cuando los trabajadores caben en la calle. de esta forma pueden ser además localizados rápidamente cuando necesiten ser reparados. Es necesario también conocer bien de qué tipo son las conexiones entre los elementos lineales de este tipo de redes. El último aspecto importante son los atributos que caracterizan una red de infraestructuras dada: que tipo de flujos soporta, que tipo de tubería o cable lo conforma y cuál es su impedancia asociada, etcétera (Burrough, 2000).

Este trabajo se concentra en el uso de las herramientas disponibles en los SIG y el análisis estadístico para la mejora de la extracción maderera de un bosque natural. Se mostrará la complejidad que puede alcanzar la información contenida en un SIG que represente una estructura de redes, y las propiedades de los objetos que constituyen un circuito. Como se explicará, es importante conocer estas propiedades al realizar un análisis estadístico de dichos objetos. Después, se explicará los instrumentos de análisis de redes más comúnmente utilizados en los programas de SIG. Al final del presente trabajo, se expondrán cuáles son los criterios necesarios y los pasos a dar, a la vista de las herramientas disponibles, para planear la construcción de una red de vías forestales que maximice los beneficios de la cosecha y de las operaciones selvícolas. Se tendrán asimismo en cuenta otros criterios que ayuden a preservar la salud del ecosistema forestal como el control de la erosión y los incendios forestales.

REDES EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Definición de Redes

Redes son sistemas interconectados de elementos lineales formando una estructura espacial por la que circula algún tipo de flujo (Davis, 2001). Estos flujos pueden ser de gente, bienes, agua, energía, información, tráfico, madera, etcetera, dependiendo de lo que la red represente. Una red está caracterizada por dos categorías diferentes de objetos: elementos lineales y puntuales (Bosque Sendra, 2000; Longley, 2001).

Los *objetos lineales o aristas* interrelacionan pares de nodos y definen el origen y destino de los flujos que pasan entre de ellos. La más simple de las líneas requiere al menos el almacenamiento de los puntos de origen y destino – un par de coordenadas XY (nótese que, en geografía se suele denominar X al eje norte-sur e Y al eje este-oeste, al contrario de cómo suele ser para la abscisa y la ordenada en cualquier eje cartesiano común) –. Una *poli-línea o cadena* es una serie de pares de coordenadas XY que describen una línea compleja y continua (Burrough, 2000). Cuanto más cortos sean los segmentos que la componen, más grande será el número de pares de coordenadas XY que la definen, y más se aproximará la poli-línea a formar una curva compleja. El atributo más importante asociado a una arista es su longitud. Esta longitud puede expresarse también como el coste de atravesar dicha arista, más comúnmente conocido como impedancia. La impedancia es entonces la oposición de la arista a que el flujo pase a lo largo de ella, o el coste producido por dicho paso. El camino escogido por un proceso de enrutamiento será siempre el de menor impedancia total; el usuario definirá que atributo considera que debe ser la impedancia: tiempo, dinero, riesgo, etcétera. Dependiendo del caso, otro atributo incorporado a las líneas y cadenas de una red puede ser la oferta o la demanda de un bien a lo largo de ella.

Los *elementos puntuales o nodos* son los cruces existentes entre las distintas aristas de una red. Cualquier entidad geográfica o gráfica con una posición definida por un único par de coordenadas XY puede ser considerada como un objeto puntual. Aparte de sus coordenadas, otro tipo de información en forma de atributo puede especificar la naturaleza del elemento puntual o añadir información que sea útil al análisis. Normalmente, el atributo más importante de un elemento puntual es la oferta o demanda relacionada a un bien determinado. En la cosecha maderera, por ejemplo, se puede establecer la posición de los distintos rodales forestales y el atributo de volumen total a cosechar en cada uno de ellos como información de referencia de la demanda. Es posible entonces establecer la posición de los cargaderos de madera y su atributo de capacidad como información sobre la oferta. Un nodo puede ser también una barrera, cuando se trata de una unión de elementos lineales que no puede ser cruzada.

Utilizando la estructura de un grafo, se puede representar como una red diversas entidades de la realidad. En un grafo se establecen las coordenadas de los nodos como sus posiciones relativas. Después se determinan las relaciones entre pares de nodos mediante las aristas del grafo (Bosque Sendra, 2000). El análisis de una red de drenaje o de transporte de carreteras precisa de una información de interconectividad que no es inherente a sus elementos simple, sean líneas simples o poli-líneas. Para lograr esta información sobre una red de elementos lineales interconectados que pueden ser recorridos por un ordenador, se requiere añadir una serie de puntos topológicos a la estructura de datos. Normalmente, esta estructura de puntos topológicos se desarrolla por la presencia de los nodos. Además de definir la posición de las aristas, los nodos pueden contener información sobre el ángulo con el que cada arista se une a él, definiendo así la topología de la red perfectamente. Esta estructura simple de uniones conlleva algunas redundancias, ya que las coordenadas de cada nodo son grabadas $n + 1$ veces, siendo n el número de aristas que se unen a un mismo nodo (Burrough, 2000). Debido a esto, en los SIG la información de una red se organiza de forma diferente a cómo sería si se tratase de sus mismos elementos lineales y puntuales aislados.

Representación Digital de una Red

La información analógica, tanto espacial como temática, tiene que ser llevada a una representación digital para su análisis computerizado. En un SIG, la información espacial se representa como objetos vectoriales, mientras que sus bases de datos asociadas incluyen la información temática como atributos en sus distintos campos. Un proceso de análisis de redes requiere además que estos objetos vectoriales tengan la topología propia de una red. Esto significa que pueda existir la opción de que en un cruce de dos aristas exista un nodo cuando los elementos que representan intersecten de hecho en la realidad (como en un cruce de carreteras), o de que no exista un nodo cuando dos aristas se crucen sin que exista ningún cruce de facto en la realidad (como en un puente o un túnel). De esta forma se puede encontrar incluso en la misma capa vectorial diversos tipos de objetos lineales que formen redes diferentes presentando una relación intra-grupos, pero no entre-grupos (Davis, 2001).

Al contrario que en otros tipos de análisis basados en los SIG, en las operaciones vectoriales de redes los objetos se encuentran unidos directamente por su base de datos; esta unión puede ser espacial o una red topológica que modela líneas de comunicación o flujos. Al decir que los objetos se encuentran conectados topológicamente, se entiende que éstos usan información que se encuentra explícita en sus bases de datos espaciales para definir cómo están unidos dos a dos. Es posible utilizar como indicadores de la interacción entre los distintos objetos de una red la información derivada de esta topología, como la distancia entre dos objetos dentro de una red u otras medidas de conectividad como tiempo de recorrido, coste del viaje, preferencia de una ruta, etcétera. Estos cálculos pueden ser también utilizados para diversas aplicaciones prácticas como por ejemplo determinar la localización óptima de servicios de emergencia u optimizar rutas de reparto.

Como se ha explicado, los nodos son representados como objetos puntuales localizados por sus datos de coordenadas X e Y (Davis, 2001). Dichas coordenadas son ya un par de atributos localizados en campos de una base de datos relacionada con los propios nodos mencionados. Es posible añadir otros campos que incluyan diversos atributos o variables asociadas a cada nodo, como la oferta o demanda asociada a un producto concreto.

Por otro lado, las aristas se representan como objetos lineales. Su base de datos asociada se encuentra relacionada topológicamente a la base de datos de los nodos ya que la información de cada arista incluyen un nodo de origen y otro de destino. En la representación vectorial de una red los datos incluyen más información que la de un simple conjunto de poli-líneas. Si no fuese así, los elementos representados dentro de la red serían simples líneas o a lo sumo polígonos englobados por ellas. Por ello, en este caso se dice que la estructura de la base de datos es híbrida (Burrough, 2000). esta denominación parte del hecho de que no es información vectorial sobre puntos, ni sobre líneas, sino que se guarda también información sobre qué líneas son unidas en cada nodo, e incluso cuál es el ángulo que forman entre ellas.

No puede faltar tampoco información relacionada con la longitud del objeto en un campo diferente de su base de datos. Esta longitud se puede expresar como distancia, tiempo de recorrido, impedancia, coste, etcétera. El procedimiento más simple y común para indicar la longitud de una determinada arista es utilizar la propia definición de distancia Euclídea (Bosque Sendra, 2000). A partir de las coordenadas de los puntos de origen y destino es posible calcular la distancia que los separa mediante el teorema de Pitágoras:

$$D_{od} = \sqrt{(X_o - X_d)^2 + (Y_o - Y_d)^2}$$

Siendo: D_{od} = Distancia entre origen y destino

X_o, Y_o = Coordenadas del punto de origen

X_d, Y_d = Coordenadas del punto de destino

En el caso en el que la arista no es una línea recta simple, sino una cadena o poli-línea, la longitud total del objeto es la suma de las distancias Euclídeas calculadas para cada uno de los segmentos que la forman. Al contrario que en otros análisis SIG, en la aplicaciones de redes la distancia entre dos puntos no se basa únicamente en los puntos de origen y destino, sino en todas las aristas y segmentos que deben ser recorridos.

Ya que la representación de una red en un grafo matemático no es más que una abstracción matemática y una simplificación de la realidad, la representación de curvas complejas que unen dos nodos se realiza mediante una línea simple o una poli-línea; de esta forma se evita el uso de fractales, ya que por lo general no es necesaria tanta precisión (Longley, 2001). Es necesario, no obstante establecer un método que evalúe la intensidad de semejante simplificación. Un índice que suele utilizarse es la Tasa de Sinuosidad que relaciona la longitud real de un elemento de la realidad - sea por ejemplo una carretera o un río - con la distancia Euclídea calculada para el objeto que lo representa en el SIG: $S = L / D_{od}$, siendo S = Tasa de Sinuosidad, y L = Longitud Real (Bosque Sendra, 2000).

A estos objetos digitales se les puede añadir fácilmente datos temáticos de diferentes tipos. Cuando la información es homogénea a lo largo del propio objeto lineal, se puede simplemente añadir un nuevo campo en la base de datos de dichos objetos. Esta operación es más difícil cuando existe algún tipo de heterogeneidad o gradación a lo largo del elemento lineal. Una posible solución sería dividir dicha información en varios segmentos discretos indicando diferentes clases de este atributo, y la cantidad de kilómetros desde el punto origen para indicar la localización de cada clase. En resumen, aunque la distancia Euclídea es el método más utilizado para medir distancias en todas las aplicaciones SIG, el análisis de redes puede incluir varios factores que influyan en el cálculo de esta distancia: la necesidad de realizar el camino a lo largo de una serie de objetos lineales y a través de unos nodos; la posibilidad de expresar esta distancia no sólo como una medida de longitud, sino también de tiempo, impedancia o coste; y la posibilidad de incluir de diversas formas información de varios atributos que influyan a la vez en el concepto de distancia que el análisis requiera.

ANÁLISIS DE REDES I: ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA Y COMPARATIVA

Hay diversos indicadores que proporcionan una evaluación general cuantitativa de toda una red, y permiten además un análisis comparativo entre distintas redes.

Los estadísticos derivados de la información de distancias de todas las aristas de una red pueden servir para evaluar la densidad de una red o tener una idea general de la longitud de sus aristas. De una red determinada es posible calcular (Bosque Sendra, 2000):

- la longitud media: $\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}$;
- la densidad de aristas: $\rho = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{A}$, siendo $A = \text{Área Total cubierta por la Red}$;
- o la frecuencia de líneas: $\nu = n / A$

También puede ser interesante estudiar simultáneamente todas las aristas y nodos de una red. Es posible calcular en general la facilidad o dificultad con la que cualquier flujo podrá pasar a través de una red mediante el análisis de su cohesión topológica, también denominada conectividad (Davis, 2001). La conectividad de una red depende de la longitud de sus aristas y del número de nodos que la componen. Han sido desarrollados diversos indicadores relacionados con la medición de la conectividad de una red (Bosque Sendra, 2000):

El índice beta: $\beta = l / n$, siendo $l = \text{número de aristas}$ y $n = \text{número de nodos}$. Es una simple expresión de la proporción de aristas en relación al número de nodos que las unen. Sus valores se encuentran entre 0 – para una red nula – hasta el número máximo de aristas que pueden salir de un mismo nodo: $n \cdot (n - 1) / 2$ – en el caso de que todos los nodos tuviesen conexión con el resto de nodos de la red –. Por lo tanto, el índice beta es solamente válido para comparar redes que tienen el mismo número de nodos, como por ejemplo distintas formas de unir el mismo número de localizaciones. Para otro tipo de comparaciones, es mejor utilizar el índice gamma.

El índice gamma: $\gamma = \frac{l}{n \cdot (n-1) / 2}$, es una expresión del número de aristas que tiene la red en relación al número máximo de aristas que podrían existir. Los valores de este índice oscilan entre 0 y 1. Es un índice más adecuado para comparar redes que son muy diferentes.

El número ciclomático (G) es el número total de bucles posible que puede dar un flujo al circular por una red determinada. Un bucle o ciclo es cada uno de los diferentes caminos por los que se puede llegar al mismo nodo del que el flujo partió de origen sin atravesar una misma arista dos veces. No es necesario contar el número de bucles uno por uno. El cálculo se realiza a partir del número total de aristas al que se le substraen el número total de aristas necesarias para formar un árbol $(n-1)$ y el número de circuitos aislados presentes en una misma red (g) (normalmente una red consta de un solo circuito, pero en redes especialmente grandes y complejas se pudiera dar el caso de que está formada por varios circuitos desconectados entre sí); en el caso de tratarse de un solo circuito: $g=1$. El número ciclomático se calcula como: $G = l - (n-1) - g$, y su valor oscila entre 0 – una red de segundo tipo, con forma de árbol – y el número máximo de bucles posibles $(2n-5)$. Por lo tanto, el número ciclomático es únicamente válido para comparar redes que tienen el mismo número de nodos. Para otro tipo de contrastes, es más apropiado utilizar el índice alfa.

El índice alfa: $\alpha = \frac{M}{(2n-5)}$ es la relación entre el número ciclomático y el número máximo de bucles que pueden existir dentro de una misma red. Su valor oscila entre 0 y 1. Es más adecuado para la comparación de redes que son muy distintas entre sí.

ANÁLISIS DE REDES II: ESTADÍSTICA INFERENCIAL

Es tan amplia la aplicabilidad del análisis de bases de datos relacionadas con redes, que existen muy diversas versiones de SIG analítico de acuerdo a los distintos propósitos posibles y dependiendo de diferentes requerimientos de planificación y de los distintos productos que se desee obtener. Normalmente, un SIG desarrollado específicamente para redes tolera de forma flexible un amplio rango de posibilidades por las que obtener la respuesta deseada a partir de su análisis. Los posibles análisis que se pueden realizar a partir de un SIG de redes incluyen las siguientes posibilidades (Tomlinson, 2003):

El Camino más Corto

El principal criterio para tomar una decisión sobre un enrutamiento u otras aplicaciones del análisis de redes es normalmente el del camino más corto desde un nodo de origen a uno de destino. Entiéndase que nos referimos como más corto únicamente en el caso de que el atributo que nos interese minimizar sea principalmente la distancia. No obstante, podríamos también referirnos al camino más barato en el caso de una minimización de costes de recorrido, o el camino menos resistente cuando hablemos de impedancia.

Una de las aplicaciones prácticas más importantes de un análisis de redes basado en los SIG es la posibilidad de determinar rutas óptimas entre diferentes nodos. Una ruta óptima es la que minimiza los costes de recorrido. Para ello es necesario previamente determinar las distancias dentro de la red. Obviamente, la distancia Euclídea no es adecuada ni suficiente en estos casos, ya que los movimientos por dentro de la red son sólo posibles a lo largo de sus aristas. El camino más corto es por tanto la sucesión de aristas que permite alcanzar un determinado punto de la red utilizando el mínimo tiempo o coste necesario (Weigel, 2001).

George B. Dantzig (1914-2005) desarrolló un algoritmo heurístico (de ensayo y error) que soluciona este problema (Eppstein, 1993). Es fácil encontrar una implementación de éste realizada en lenguaje de programación BASIC para su uso en un SIG.

Otro instrumento útil para la mayoría de los análisis de rutas óptimas es la posibilidad de disponer de una lista de objetos que deben ser traspasados a lo largo del camino entre el punto de origen y el de destino. El mencionado algoritmo de Dantzig permite conservar una lista de aristas y nodos por los que se puede conseguir el objetivo de la mínima distancia o coste de recorrido (Bosque Sendra, 2000). Esta herramienta está ya normalmente implementada en todos los *software* de navegación de vehículos basados en los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y en páginas *web* de búsqueda de rutas que son fáciles de encontrar en la *internet*.

Construcción de una Matriz Origen/Destino

De una serie de orígenes (O) y destinos (D), un SIG construye una matriz OD de distancias, tiempos o costes entre cada par OD (Weigel, 2001). Esta es una herramienta muy común que se suele representar como una red. Las matrices OD son ampliamente utilizadas como un primer paso antes de realizar otros análisis de redes.

Una matriz OD que contiene información sobre el tiempo de viaje o la distancia desde un cliente a otro proporciona la información primaria para un análisis de asignación de recursos, secuenciación, o procedimiento de mejora de rutas. El tiempo recorrido se obtiene aplicando para cada par Origen/Destino el algoritmo del camino más corto dentro de un SIG con la base de datos de las calles donde se realiza el negocio. De esta forma se puede prevenir la formación de escenarios irreales que expresen rutas que atraviesen montañas, lagos, o zonas sin acceso por carretera. Es crucial el cálculo de tiempos y distancias precisos si se requiere una solución de calidad. De hecho, aunque dos puntos de una zona montañosa pueden parecer cercanos si nos basamos en el cálculo de la distancia Euclídea entre ellos, éstos bien pudieran estar a muchos más kilómetros de distancia al tener que recorrer las carreteras que se encuentran entre ellos. Una matriz OD puede ser desarrollada en un SIG con alta precisión si se tienen en cuenta diversos criterios para su cálculo tales límites de velocidad, calles de un solo sentido de circulación, barreras, o incluso puntos de comienzo y destino de todas las rutas o lugares donde descargar o almacenar.

Búsqueda de la Instalación más Próxima

Siguiendo el mismo procedimiento que el análisis del camino más corto, es también posible encontrar la instalación o el servicio más cercano a un determinado punto. Para ello se incluiría una lista de los mencionados servicios en una capa que se superponga a la red. Este instrumento es uno de los más utilizados en los programas de SIG destinados a la organización logística y enrutamiento; para encontrar por ejemplo la parada de autobús, cajero automático, hospital, almacén, tienda, comisaría o estación de bomberos más cercana. Una vez más, el análisis de redes incluye más posibilidades para esta herramienta que el simple cálculo de la distancia Euclídea que se utiliza para buscar el servicio más próximo en un SIG convencional.

La primera operación típica que un SIG puede realizar para este propósito es realizar un *buffer* del punto de origen del análisis. En algunos casos, a un enrutamiento realizado por este método se le denomina a vuelo de pájaro (*as the crow flies*). Una operación se denomina *buffer* cuando construye un nuevo polígono o grupo de polígonos identificando todas las áreas que se encuentran dentro de una distancia especificada a partir de las aristas de la red (Longley, 2001). Esta operación es en la mayoría de los casos inadecuada e insuficiente para organizar una red apropiadamente (Weigel, 2001), ya que no tiene en cuenta ningún otro atributo más que la distancia Euclídea. Como se explicará más adelante, un *buffer* puede ser utilizado también para determinar el área de servicio de una determinada instalación, por ejemplo de almacenamiento. Esta operación puede realizarse no sólo en SIG vectorial sino también en ráster, por lo que en este último se pueden incluir intrínsecamente en sus celdas la información sobre los atributos requeridos por el análisis concreto (Longley, 2001). Por ejemplo, es posible pedirle a un SIG ráster que extienda un *buffer* a partir de un determinado punto teniendo en cuenta tiempos, impedancias o fricciones, o costes de recorrido recogidos por separado en cada una de las celdas de un ráster. En este caso, la forma de los búffer no sería la clásica, sino que vendría deformada según se reparta el citado atributo por el espacio. Dependiendo de cada caso, seguramente pueda interesar que esta sea un función inversa – a la velocidad de recorrido, por ejemplo –, o acumulativa – de gasolina gastada –.

Una generalización de esta herramienta para todo el área de estudio servirá para hacer un análisis de asignación a un centro, como se explicará más adelante.

El Análisis del Viaje del Vendedor (*Travelling Salesman Analysis*)

Este tipo de análisis no sólo busca encontrar el camino más corto entre un punto de origen y destino, sino que puede tener también en cuenta un número determinado de paradas que deben realizarse a lo largo del camino, así como otros parámetros que se necesiten para controlar la ruta seguida. Este tipo de análisis utiliza varias de las herramientas ya descritas. No obstante se requiere utilizar estos instrumentos en dos pasos bien definidos. El primer paso debe ser la determinación de la secuencia óptima de paradas a realizar durante el viaje. Una vez se ha determinado esta secuencia, es cuando se puede realizar la búsqueda del camino más corto de acuerdo a los criterios necesarios e incluyendo las limitaciones precisas (Weigel, 2001).

Asignación a un Centro y Reparto de Áreas de Servicio

En las aplicaciones de asignación se indica la posición de las distintas instalaciones o centros de los que puede provenir un flujo determinado; el procedimiento asigna a cada componente lineal de la red uno de esos centros de flujo. De esta forma se consigue un reparto eficiente del flujo a lo largo de la red. El conjunto de elementos lineales asignados a un centro de flujo se denomina el área de servicio de ese centro. Esta operación se parece bastante a la realización de un *buffer*, aunque en este caso se tiene en cuenta la información de varios puntos de servicio a la vez y se realiza según las características de la red. De hecho, el SIG no construye un área poligonal sino un árbol alrededor de cada punto (Tomlinson, 2003); esta estructura en forma de árbol es el camino más corto en tiempo o coste.

Una vez que los puntos, o centros de demanda, se encuentran localizados – en una operación de ubicación o situación (*location*) – , es posible identificar los componentes lineales de una red que pueden llevar a dicho centro – asignación a un centro (*allocate in*) – o a los que se puede llegar desde el centro – área de servicio (*allocate out*) –.

Las operaciones de asignación a un centro identifican las líneas de un circuito que deben ser utilizadas para transportar gente o materiales hasta cada centro de demanda identificado; en ejemplo de este tipo de operación puede ser la asignación de los diferentes alumnos a cada escuela de una ciudad, o la organización de rutas para el transporte de dichos alumnos. Al contrario, la generación de un área de servicio identifica los elementos vectoriales de una red que deben ser utilizados para distribuir desde un centro determinado; es un análisis típico de reparto de áreas de servicio entre las pizzerías o las oficinas de correos que se encuentran en una ciudad.

El área de servicio de un centro depende de la accesibilidad de cada punto de la red a las actividades de sus instalaciones (Davis, 2001). La accesibilidad puede ser definida como la facilidad para alcanzar la oferta existente sobre un determinado bien o servicio, cuando esta oferta no se reparte de una forma uniforme dentro del área que cubre la red. Por lo tanto, el concepto de accesibilidad está íntimamente relacionado con el concepto de distancia entre la oferta y la demanda, por lo que su cálculo difiere de la misma forma entre un análisis de redes y un calculo convencional de accesibilidad en SIG. El área de servicio puede entonces depender de la oferta de un determinado bien en cada punto de la red, de los horarios y disponibilidad temporal de cada uno de los servicios ofrecidos, o de la propia demanda del centro para el que se establece el área de servicio (Bosque Sendra, 2000):

- Medidas de la accesibilidad basadas únicamente en la distancia: son de uso común en el establecimiento de áreas de servicio de emergencias hospitalarias, bomberos, o áreas de reparto de correo, ya que cualquiera puede utilizar el servicio sin que exista ninguna limitación en la oferta.

Por lo tanto, la accesibilidad (A_i) de un centro de demanda i , es equivalente a la distancia (D_{ij}) entre dicho centro y el punto de oferta más cercano j : $A_i = D_{ij}$. También es posible tener en cuenta la posición del centro de demanda respecto a todos los puntos de oferta disponibles en la red, expresándola como la

$$\text{suma: } A_i = \sum_{j=1}^n D_{ij} \text{ , o la media: } A_i = \frac{\sum_{j=1}^n D_{ij}}{n} .$$

El área de servicio de una instalación se construye a partir de la accesibilidad total (A_t) de ese centro de demanda hasta cada punto de la red. A_t se obtiene sumando todas las mínimas distancias ($DMIN_{ij}$) – el camino más corto – desde las instalaciones de demanda i a cada punto de oferta j , y multiplicándolo por el valor de la demanda en dicha instalación (De_i).

Dado un grupo de instalaciones con diversos valores de demanda, sus áreas de servicio serán determinadas por los valores de A_t que obtengan cada una de ellas. El área de servicio de un centro serán todos los puntos de oferta en la red para los que la accesibilidad total A_t a ese centro es mayor que para el resto de los centros. En explotaciones forestales, los centros de demanda pueden ser los distintos cargaderos situados en la zona, y el valor de la demanda puede ser su capacidad máxima de almacenamiento. Su capacidad aumentará en este caso el área de servicio de cada cargadero. En el análisis se podría incluir además el valor de la oferta expresado en este caso por el volumen a cosechar en cada punto de la plantación. El valor de la oferta se puede incluir tal y como se detalla a continuación.

- Medidas de la accesibilidad basadas en la distancia y en el valor de la oferta en cada punto: en este caso, la accesibilidad (A_i) de un centro de demanda depende directamente de la oferta disponible de la oferta en cada punto de la red (O_j) y, e inversamente a una función de la distancia ($F(D_{ij})$) entre el centro de demanda y los puntos de oferta: $A_i = \sum_{j=1}^n \frac{O_j}{F(D_{ij})}$. Por lo tanto, según cambie dicha función ($F(D_{ij})$) podremos dar una mayor o menor importancia a la distancia, respecto de la cantidad de oferta.

Así entonces, podemos por ejemplo asumir que la distancia disminuye linealmente dependiendo de un parámetro b que tenga el valor que se quiera

considerar en cada modelo: $A_i = \sum_{j=1}^n \left(O_j - \frac{O_j}{b \cdot D_{ij}} \right)$. O podemos de otra forma

presumir que la distancia disminuye exponencialmente dependiendo también de

un parámetro b también según consideremos en cada caso: $A_i = \sum_{j=1}^n \frac{O_j}{e^{(b \cdot D_{ij})}}$. Este

caso puede ser de gran utilidad, por ejemplo, cuando la oferta deba ser alcanzada por peatones en lugar de vehículos.

Esta herramienta puede ayudar además a gestionar una flota heterogénea de vehículos. Sería para este caso posible utilizar valores diferentes del parámetro b para cada clase de coche, furgoneta, camión, remolque, etcétera.

- Medidas de la accesibilidad basadas tanto en el valor de la oferta como de la demanda. En algunas situaciones, no es tan importante la propia distancia a las instalaciones como la necesidad de satisfacer plenamente una demanda concreta o de alcanzar completamente una determinada oferta. En tal caso, la accesibilidad (Ar_i) depende únicamente de la cantidad de demanda (De_i) de cada centro i , y del valor de la oferta (O_j) en cada punto de la red j :

$$Ar_i = \frac{\sum_{j=1}^n O_j}{\sum_{i=1}^k De_i}$$

Gracias al concepto de accesibilidad podemos repartir el asignar el área de servicio al que un punto de la red pertenece entre todos los centros de demanda disponibles. En un primer paso, se pueden repartir áreas de servicio teniendo sólo en cuenta un análisis del camino más corto. Posteriormente, se puede sofisticar el modelo teniendo en cuenta varios factores de oferta y demanda repartidos en el espacio cubierto por la red, tal y como ha sido explicado.

Ubicación/Situación

La búsqueda de la ubicación óptima de un servicio o instalación es una de las aplicaciones más ampliamente utilizadas de los SIG. En un marco de trabajo de análisis de redes, a esta herramienta se le pueden añadir las características y atributos de los objetos del circuito. Las características de los objetos lineales y puntuales de la red influyen de esta forma en el resultado del análisis. Al conocer el valor de la accesibilidad para cada punto de la red, dependiendo de los criterios y limitaciones que se desee, es fácil optimizar la ubicación de un determinado servicio. Un centro de demanda es un punto dentro de una red al que se llevan materiales o personas o desde el cuál éstos son distribuidos.

Enrutamiento de vehículos

El análisis de la conectividad de una red, que ha sido previamente explicado, está ya ampliamente aplicado en procedimientos automatizados de búsqueda de rutas óptimas, así como para aplicaciones de localización y asignación de diversos servicios. El enrutamiento es la típica herramienta en la que se basa los sistemas de navegación de vehículos basados en las tecnologías de GPS.

Los atributos asociados a objetos lineales pueden identificar la naturaleza de un conector. Una carretera puede ser identificada no sólo por su anchura, superficie, clase o número de carriles, sino también por la densidad de tráfico o de demanda a lo largo de él. Añadiendo datos de series temporales de densidades de tráfico a la información de una ruta, tanto por días como por semanas, se puede tener una buena base para el cálculo de tiempos de ruta. De este forma, los resultados pueden diferir significativamente de los encontrados por un análisis a vuelo de pájaro basado en un simple *buffer* (Weigel, 2001).

Un análisis de redes basado en los atributos de los nodos y líneas puede producir resultados con mucho significado práctico. No se puede obtener un enrutamiento adecuado sin tener en cuenta calles de un solo sentido de circulación o cruces que no puedan ser traspasados en una dirección concreta. Otros atributos como la longitud de la vía, límites de velocidad, giros permitidos, señales, tiempos medios de semáforos, desvíos, stops, etcétera, pueden permitir describir con mayor precisión las propiedades de una red vial. Por ejemplo, en numerosas aplicaciones *web* de fácil acceso público que están dedicadas al enrutamiento y la búsqueda de direcciones en mapas pueden dar la posibilidad de tener diversos criterios con los que calcular la ruta óptima: camino más corto, camino más corto por carreteras de mayor límite de velocidad, o camino más seguro. En algunas rutas también es necesario tener en cuenta datos sobre oferta y demanda de un determinado producto. Cuanto mayor sea la coincidencia entre el grafo vectorial del nuestro SIG y el mundo real, más precisos serán los enrutamientos óptimos que se obtengan.

Otras limitaciones pueden ser importantes en el cálculo de enrutamientos. El vehículo puede tener una capacidad máxima, o un límite de impedancia. Los valores de demanda son importantes a la hora de tener en cuenta los límites de capacidad. Cada línea puede tener un atributo con un valor de oferta, de forma que la capacidad máxima de un centro de demanda se iguale al valor total de oferta de toda la ruta calculada. Los límites de impedancia, tales como la distancia máxima de recorrido hasta un centro, pueden ser razonablemente aplicados simplemente tomando información directa de los atributos de los objetos de la red.

Es también posible organizar una flota entera de diferentes tipos de vehículos, con diversas capacidades, horarios de servicio, coste de uso, costes por hora extra, etcétera (Longley, 2001). También suele estar disponible la posibilidad de añadir una base de datos de diferentes destinos; los atributos de éstos pueden incluir datos sobre su accesibilidad, demanda, etcétera. En definitiva, se pueden tener en cuenta para el enrutamiento de vehículos datos basados en atributos de la propia red por la que se circula, de los vehículos que circulan, o de los propios centros de origen y destino a los que se dirigen.

El Análisis del Cartero Chino (*Chinese Postman Analysis*)

Se trata de un tipo concreto de aplicación de un análisis de enrutamiento óptimo. En él no sólo se puede elegir el punto por el que la ruta comienza y acaba, sino también la posición de todas las paradas intermedias que deben ser cubiertas. El procedimiento determina el camino más óptimo. El análisis del cartero chino tiene como aplicaciones típicas la organización de rutas y horarios de camiones de recogida de basuras, de reparto de periódicos y, por supuesto, de reparto postal. En este análisis, el camino más corto se calcula a través de una serie concreta de aristas interconectadas (Tomlinson, 2003).

Rastreo

El análisis de redes permite además realizar operaciones de búsqueda de un rastro. Estas operaciones son únicamente aplicables cuando la red está dirigida. Una red está dirigida cuando es una red de segundo tipo, o sea con una forma ramificada que no presenta bucles en ningún caso.

Una operación de rastro puede por ejemplo localizar con precisión la dirección que tomará un vertido situado en una compleja red de alcantarillado. Dependiendo de la información que contengan los atributos, es posible también realizar una búsqueda del origen de un vertido. Otra aplicación de esta herramienta podría ser la evaluación de la calidad del propio sistema de alcantarillado, ya que este análisis puede detectar la presencia de bucles no deseados en la red.

También puede tener otras múltiples aplicaciones hidrográficas, ya que la búsqueda de rastros permite en general realizar análisis de como fueron las cosas aguas arriba o como serán aguas abajo.

CASO A ESTUDIO: EXTRACCIÓN ÓPTIMA DE MADERA DE UN BOSQUE

Algunas de las herramientas que han sido descritas en este trabajo pueden utilizarse con propósitos forestales. El punto de arranque de cualquier análisis SIG viene dado por un conocimiento apropiado y un correcto entendimiento de la materia en cuestión y sus dinámicas – en el caso del bosque su desarrollo ecológico, las características clave de la metodología usada para la cosecha, la demanda y precios de la madera, etcétera –. La mayoría de los análisis estarán finalmente basado en un estudio de la rentabilidad de las operaciones a realizar, por lo que se hace también fundamental un correcto conocimiento sobre computación financiera: Es necesario identificar y entender apropiadamente cuáles son los factores de coste y las tasas de rendimiento, para así poder estudiar como optimizar las extracción de madera de un área forestal.

Para poder planificar la red de carreteras que darán acceso al área de estudio, el primer paso consiste en familiarizarse con la red vial ya existente, así como la topografía del área a cosechar. En este caso a estudio, pretendemos optimizar la explotación maderera de un bosque en función de los siguientes criterios:

- La posición y topografía de la red de vías forestales existente.
- La situación y capacidad de los centros de demanda existentes, como almacenes o aserraderos, así como otras infraestructuras como cargaderos.
- La posición de todo tipo de redes fluviales, ríos, arrollo, así como diques o acequias afectará enormemente al coste de acceso a diversas áreas.
- El coste de acceso al área forestal. Es posible asumir que los gastos de acceso, recorrido y transporte de material vienen determinados por el coste de viaje a lo largo de la red vial existente más los costos de atravesar las zonas sin vía. La posición de los centros de almacenamiento, aserraderos, etcétera se puede tener en cuenta a la hora de localizar el área que alimenta una determinada instalación.

- La posición de los rodales con calidades madereras de alto valor económico. La posición de estos rodales respecto a la red vial existente tendrá un efecto claro sobre el coste de acceso a ellos. Se puede asumir que los costes de atravesar una área que está forestada vienen determinados por la pendiente. A este coste habrá que añadirle el de tener que atravesar acequias o cursos de agua. Podríamos incluso incluir los costes derivados de la capacidad del propio suelo para soportar el peso del transporte por él, o las limitaciones que se puedan incurrir de esta característica.

Este método se basa en la idea de que todos los puntos del bosque pueden ser alcanzados, aunque no todos son rentables. Los costes de atravesar áreas forestales pueden ser modelados como una función continua y acumulativa que atraviesa el bosque desde la red vial existente. Los caminos más cortos para las operaciones de cosecha son tomados hasta que se llega entonces a un punto cualquiera de la red de vías forestales existente. A partir de ahí, se puede utilizar también el análisis de redes para optimizar el transporte de la madera por la citada red.

- Es importante conocer la naturaleza del terreno que se encuentra dentro del área de la explotación. En conexión con el cálculo del coste de acceso, se precisará de toda la información posible sobre la geología, geomorfología y la formación de suelos, así como su calidad, gradientes que pueda encontrarse, rugosidad, humedad o riesgos de erosión.
- El estado inventarial de los rodales con maderas de alto coste económico. La naturaleza, localización y estado de los rodales forestales puede haber sido determinado por uno o varios de los siguientes métodos: inventario de campo, fotogrametría aérea o teledetección. De los resultados obtenidos se puede extraer, entre otros datos, una estimación razonable del volumen total a cosechar en un rodal forestal por cada tipo de calidad maderera y destino – aserradero, pulpa de papel, o combustible –.

- El flujo de madera cosechada. Las cantidades de madera que deben ser cosechadas afectarán seriamente a las decisiones sobre la rentabilidad de cada método de cosecha y de transporte. Determinará además que tipo de vías forestales son necesitadas en cada zona de la red, ya que es posible que en los casos den los que el tráfico va a ser evidentemente grande sea rentable una mejora previa de las propias vías.
- Otros factores de diversa índole e importancia como el clima, los periodos de uso de las carreteras, las restricciones ambientales o la sensibilidad de la flora y fauna y del paisaje del área de estudio, las infraestructuras e instalaciones ya existentes, las políticas y regulaciones gubernamentales y los otros posibles usos del terreno (Kantola, 1991).
- Y finalmente, se tendrá en cuenta el actual valor en el mercado de las especies forestales a cosechar, que determinará qué rodales son los que tienen un alto valor económico. También determinará las dimensiones de los troncos cortados para cada calidad maderera. El valor del mercado de las distintas especies a cosechar es un dato clave sin el que no se puede determinar la rentabilidad de las operaciones a realizar.

El procedimiento de este análisis en SIG tiene varios pasos principales: primero la determinación de la accesibilidad de cada zona del bosque para después determinar cuáles de los árboles serán realmente rentables para la explotación bajo unas determinadas condiciones del mercado. Basándose en estos resultados, se diseñará e implementará la construcción de una red de vías forestales que sean necesarias aparte de las ya existentes, así como de las operaciones de cosecha a realizar fuera de las vías. La calidad de las vías puede comprender un amplio rango que parte desde vías de alto estándar hasta simples senderos temporales para el transporte de madera,. dependiendo en cada caso de la densidad de tráfico que suponga el uso de cada una de ellas. Una vez que la red de vías forestales ha sido implementada, se utilizarán también las herramientas descritas de SIG para calcular las rutas de todas las labores logísticas, y para determinar el área de servicio de cada instalación disponible dependiendo de la oferta de volumen de madera a cosechar en cada zona del área de estudio.

En una primera etapa, a partir de un mapa de curvas de nivel se puede crear un Modelo Digital de Elevaciones (*Digital Elevation Model o DEM*) en 2 dimensiones – es de hecho una versión ráster del mapa vectorial de curvas de nivel –, e incluso una Red Irregular de Triangulación (*Triangular Irregular Network o TIN*) en 3 dimensiones – mediante un análisis de polígonos Thiessen –. Normalmente, desde un mapa de curvas de nivel se puede obtener a su vez información sobre las redes de carreteras y las redes fluviales del área de estudio; esta información puede ser añadida al DEM.

A partir de este DEM se puede también calcular un mapa de pendientes; de esta forma podremos añadir al análisis una limitación de pendiente a partir de la cual el área no pueda ser atravesada por un determinado método de cosecha o de transporte. Con el DEM puede también estudiarse la red de drenaje del área de estudio. Es posible tener también en cuenta el riesgo de erosión y la capacidad que cada suelo tenga para soportar un determinado método de cosecha o transporte. Estas cualidades del terreno pueden ser estudiadas a partir de mapas geológicos y geomorfológicos; para cada celda de un ráster se puede realizar un cálculo de la estabilidad de los suelos y del riesgo de erosión. Puede de la misma forma ser determinado un mapa de riesgos de deslizamiento de tierras a partir del propio DEM, los datos de los suelos y los datos de inventario de densidad de cubierta forestal. Es también una buena idea realizar un recálculo de este mismo riesgo simulando una situación virtual en la que la cosecha ha sido ya realizada. El uso de las vías forestales y su propia construcción pueden causar graves problemas de erosión si estas actividades no son apropiadamente planeadas, diseñadas y gestionadas.

Por otro lado, las posibilidades del TIN pasan por poder analizar el área desde diversas perspectivas para tener una primera idea de cómo pueden ser los resultados de la explotación maderera. Estas funciones pueden ser claves a la hora de tener que manejar áreas de estudio que sean muy amplias. Un análisis de cuencas visuales puede ser muy útil a la hora de poder modelizar el impacto de las operaciones de la explotación maderera en el paisaje. De esta forma puede ser de gran utilidad en la determinación de las áreas a ser cosechadas, que tendrá gran importancia al planear como la red deberá ser construida.

El punto de arranque de cualquier planificación de vías forestales está en los propios planes de gestión y ordenamiento y en sus turnos de cosecha. Los planes de ordenamiento muestran cuáles son las áreas que deben ser cosechadas en cada rodal y las direcciones generales de transporte que tendrán los flujos de madera generados. Una vez que se ha obtenido y recolectado toda la información disponible sobre las pendientes, el terreno, los cursos de agua, la red vial existente y los costes de transporte a una determinada instalación, es posible realizar un único ráster que sintetice todos estos datos en un único archivo de coste de recorrido. Este valor de coste de recorrido será, para cada celda, el resultado de la suma del coste de despejar de árboles el propio camino, la construcción de la vía forestal en los casos que sea necesario – o en el caso de que ya exista una vía, el coste de conducir a través de ella –, además del coste extra debido a la necesidad de tener que atravesar pendientes pronunciadas o cruzar cursos de agua (Burrough, 2000). Después de esto, el programa de SIG puede crear una red dirigida con forma de árbol de camino óptimos entre los rodales de alto valor económico hasta la red vial existente o las propias instalaciones de almacenamiento o aserraderos. Esta red de caminos óptimos se deduce del coste acumulativo de acceder a cada una de las celdas recorridas.

Con el objetivo de realizar el diseño final de la red de vías forestales, y con el objetivo de maximizar la rentabilidad de la explotación de la plantación, es posible tener en cuenta el valor actual en el mercado de las distintas especies existentes y de los distintos tipos de calidades madereras. La simulación del transporte y la cosecha dispersará una serie de caminos óptimos a partir de la red vial existente que serán el resultado de restarle el coste acumulado de acceso a la siguiente celda al propio valor monetario de la especie y calidad a cosechar en ella.

El diseño y delineación de las carreteras, así como la decisión sobre el tipo de carretera a construir en cada caso, se verá afectado por los diversos requisitos técnicos, ambientales, operacionales y económicos que deban ser tenidos en cuenta. El criterio más importante será la densidad de tráfico que una determinada vía tendrá que soportar. Otros criterios importantes incluyen la máxima velocidad que será permitida, la visibilidad requerida por los conductores, el control de la erosión, los métodos que se utilizarán para el transporte de la madera, y el propio margen de rentabilidad que ofrezca la construcción de cada una de ellas.

Cuando se seleccionan las posiciones en las que la vía comienza y termina, su delineación recta es preferida, ya que acorta su longitud, aunque raramente posible. En vías forestales de bajo coste con bajas densidades de tráfico no se pueden llevar a cabo trabajos caros de excavación ni de construcción de puentes. Determinados obstáculos como rocas, ríos, suelos inestables o blandos y otras áreas difíciles serán indicadas en el mapa como puntos a evitar. De la misma forma, posibles corredores serán identificados como puntos de control y señalados en el mapa. Algunos puntos de control pueden ser: cursos de agua que puedan evitarse mediante sobrepasarse mediante la simple instalación de una tubería o alcantarilla, zonas de baja pendiente y collados en terrenos montañosos, cotas en mitad de una pendiente donde se pueda situar una curva o un cruce de carreteras, o lugares en los que pueda situarse un cargadero, así como zonas en las que puedan situarse los residuos derivados de la construcción de la red de vías. Los puntos de control negativos a indicar serán a su vez indicados, tales como terrenos que no tengan la capacidad de soportar la maquinaria necesaria, pendientes que superen un máximo gradiente determinado para cada tipo de vía, pendientes inestables o con peligro de deslizamientos, cursos de agua fangosos, o la presencia de barrancos cercanos peligrosos (Kantola, 1991).

El espaciamiento entre las vías forestales estará además directamente relacionado con la rentabilidad de la cosecha del área forestal. El espaciamiento entre vías se define como la distancia media horizontal que existe entre las vías que componen toda la red. Puede ser también determinada por la densidad de líneas o la frecuencia de líneas, tal y como ha sido ya explicado. El espaciamiento entre vías óptimo para una determinada explotación forestal puede ser también directamente calculado por la comparación de los costes totales de las diversas alternativas. En este caso, los costes totales serán calculados por la suma de los costes de construcción y mantenimiento de las carreteras, los costes de transporte de la madera, y el valor monetario de la disminución en la producción causada por la apertura de una parte del bosque para abrir la propia carretera. Diversas publicaciones sugieren un método analítico desarrollado por la FAO para determinar el espaciamiento óptimo en explotaciones madereras. El Espaciamiento Óptimo de las Vías forestales (*ORS*) se puede calcular a partir del coste de la carretera (*RC*), del volumen de madera por unidad de área (*Q*) y del coste variable de extracción

(*VEC*) utilizando la fórmula: $ORS = 2 \cdot \sqrt{\frac{RC}{Q \cdot VEC}}$ (FAO, 1976).

Una comparación entre las diversas alternativas donde localizar las vías forestales y sus calidades puede ser realizado mediante el análisis de la conectividad de cada una de ellas, tal y como ha sido explicado en el capítulo de estadística descriptiva y comparativa. Esta herramienta permitirá escoger una solución final si se diese el caso de que los criterios anteriores desvelan la posibilidad de realizar varias alternativas.

Un primer análisis en las etapas más tempranas de la gestión de una zona forestal determinada ha permitido la planificación de las vías forestales a construir, así como la localización de las instalaciones necesarias para su explotación y el transporte de la madera. Una vez que esta red de vías forestales y carreteras sea determinada, un buen modelo de crecimiento de los rodales forestales del área de estudio debe ser diseñado apropiadamente. Un programa de SIG especializado en logística puede ser alimentado por este mismo modelo, para así ayudar a los gestores a tomar decisiones que hagan que la explotación sea no sólo rentable sino además ambientalmente sostenible. Además, el mismo soporte puede ser utilizado para otras tareas de enorme importancia como puede ser la realización de planes de emergencia y el control de los incendios forestales.

BIBLIOGRAFÍA

- BOSQUE SENDRA J. *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones Rialp S.A: Madrid, Spain. 2000.
- BURROUGH P.A. & McDONNELL R.A. *Principles of Geographical Information Systems. Spatial Information System and Geostatistics*. Oxford University Press Inc. New York, USA. 2000.
- DAVIS B.E. *GIS: A Visual Approach*. OnWord Pres. Canada. 2001.
- EPPSTEIN D. *Clustering for Faster Network Simplex Pivots*. University of California, Irvine, CA, USA. 1993.
- FAO. *Austria Training Course on Forest Roads and Wood Harvesting in Montanous Forest*. Technical Report of FAO. Rome. Italy. 1976.
- KANTOLA M. & HARSTELA P. *Handbook on Appropriate Technology for Forestry Operations in Developing Countries*. National Board of Education of the Government of Finland. Helsinki, Finland. 1991.
- LONGLEY P.A., GOODCHILD M.F., MAGUIRE D.J. & RHIND D.W. *Geographic Information Systems and Science*. Jonhn Wiley & Sons, Ltd. Chichester, England. 2001.
- TOMLINSON R. *Thinking about GIS*. ESRI Press. Redlands, CA, USA. 2003.
- WEIGEL D. *GIS-Based Route Optimization*. in *ArcUser, Vol. 4 No. 1, January-March 2001*. p. 40-42. ESRI Inc. Redlands, CA, USA. 2001.