

ESTIMACIÓN DE EXISTENCIAS A PARTIR DE IMÁGENES LANDSAT DERIVADAS DE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE MEZCLAS ESPECTRALES

C. Quintano Pastor¹, A. Fernández Manso², J. R. Rodríguez Pérez², M. F. Álvarez Taboada² y J. Ramírez Cisneros²

¹ Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad de Valladolid. EUP. Francisco Mendizábal 1. 47014-VALLADOLID (España)

² Grupo de investigación IPR-Ingeniería y Planificación Rural. Universidad de León. EST Ingeniería Agraria. Avda. Astorga s/n. 24400-PONFERRADA (León, España)

Resumen

El objetivo del presente trabajo es la aplicación de nuevas técnicas de procesamiento digital de imágenes en la estimación del volumen de una masa forestal. En concreto, la técnica utilizada ha sido el Modelo de Mezclas Espectrales Lineal (Spectral Mixture Analysis, SMA). Dicha técnica, apenas utilizada en España aunque ampliamente desarrollada en otros países, permite transformar de forma rápida y sencilla las imágenes originales en otras con pleno significado físico que facilitan el estudio de la zona considerada. El análisis se centrará en la estimación de las existencias volumétricas. La obtención de estos datos a partir de imágenes de satélite supone la reducción del trabajo de campo para obtener dicha información con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero, y, además, el empleo del Modelo de Mezclas Espectrales mejora la precisión con la que se obtienen las estimaciones. Para alcanzar los objetivos propuestos, en primer lugar se ha descompuesto espectralmente ('unmixing') una imagen del satélite Landsat, obteniéndose de esta forma las imágenes proporción de los componentes sombra, vegetación y suelo. A continuación, a partir de dichas imágenes fracción y técnicas de regresión, que utilizan como información del terreno datos del IFN2, se ha realizado la estimación de la variable dasométrica considerada.

Palabras clave: *Teledetección, Inventario forestal, Unmixing*

INTRODUCCIÓN

De todas las variables forestales, el 'volumen de rodal' constituye una de las más importantes para la gestión sostenible de los bosques, puesto que es el principal producto tangible demandado por la sociedad. Esta demanda obliga al gestor, no sólo a extraer la máxima cantidad posible de madera, sino a que dicha extracción no repercuta negativamente en la produc-

ción de la masa misma y de todas las poblaciones que constituyen el ecosistema forestal. Por lo tanto, el conocimiento de la cantidad de volumen de madera que hay en una masa forestal es tan importante, que cualquier actuación extractiva sin su conocimiento es simplemente inviable y la gestión sostenible de los bosques sería imposible (STELLINGWERF & HUSSIN, 1997).

La forma clásica para estimar el volumen de las masas forestales es mediante tarifas y tablas

de cubicación, de una o más entradas (PRIETO Y HERNANDO, 1995). Estas tablas son unas ecuaciones en las que la variable dependiente es el volumen y, las independientes, el diámetro y la altura de fuste, fácilmente medibles en el campo. Durante las últimas décadas, los datos obtenidos a partir de fotografías aéreas han sido aceptados por muchas instituciones forestales como herramienta para actividades tales como planificación, cartografía, inventario e identificación de áreas, tanto a escala local y regional, como nacional. Empleando estos datos, el volumen del rodal se determina mediante ecuaciones de regresión a partir de fotografías aéreas. Con el lanzamiento de los satélites de observación terrestre, una nueva herramienta se ha incorporado a la gestión sostenible de las masas forestales y, en concreto, al seguimiento de dichas masas. Sin embargo, la estimación de variables dasométricas a partir del estudio de las relaciones entre las imágenes y estas variables, no ha sido tan profuso como cabría esperar.

Este trabajo presenta la relación entre la Teledetección y la gestión forestal, en su aspecto de cuantificación de masas forestales. Concretamente, en la aplicación realizada se estima el volumen de un rodal de *Pinus sylvestris*, a partir de las relaciones entre las fracciones obtenidas aplicando el Modelo de Mezclas Espectrales a imágenes TM, y la variable 'Volumen Maderable con Corteza' (VCC) extraída de los datos del Segundo Inventario Forestal Nacional. El empleo de las imágenes fracción para estimar el volumen de masas forestales ya ha sido validado en bosques boreales, pero no existe ninguna experiencia, al menos no se ha localizado, que trabaje en entornos mediterráneos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de trabajo se ha ubicado en el Alto Valle del Ebro (comarcas del Valle de Losa y Valdegovia). Los bosques constituyen más del 58% del total de la superficie vegetal, destacando los pinares de pino silvestre, que, favorecidos por la acción del hombre, han sustituido prácticamente a los quejigales de la mayor parte de las laderas. En concreto, la masa forestal que va a ser estudiada corresponde a los pinares de *Pinus*

syvestris que habitan esta zona, y que se corresponde con la región de procedencia Alto Ebro (GIL *et al.*, 1991). Esta procedencia presenta una gran diversidad edáfica y climática. La superficie de arbolado donde dicha especie es predominante, es aproximadamente 10.000 ha.

Los datos satelitales utilizados han sido 'miniescenas' Landsat-5 de fechas 12 de marzo de 1996 y 13 de julio del mismo año, y los datos dasométricos han sido extraídos del Segundo Inventario Forestal Nacional mediante el programa BASIFOR. Diferentes autores (entre ellos, CURRAN & HAY, 1986) afirman que la correlación entre los valores de campo y los datos de satélite de diferentes fechas, no ha de ser inferior a la observada con el empleo de la misma fecha, siempre y cuando no existan daños o cortes de vegetación que afecten a la radiancia de forma fuerte. En el trabajo se han empleado imágenes de fechas cercanas a la de realización del Segundo Inventario Forestal en la zona de estudio.

La metodología utilizada sigue las siguientes etapas de trabajo.

Preprocesamiento

Las correcciones necesarias se han llevado a cabo mediante software desarrollado por el grupo de trabajo del LATUV. (ILLERA *et al.*, 1995; DELGADO, 1991)

Modelo de Mezclas Espectrales Lineal

El Modelo de Mezclas Espectrales Lineal supone que la energía recibida por el sensor puede considerarse como la suma de las energías recibidas desde cada componente. Cada campo en la escena contribuye con una cantidad de señal recibida en el sensor que es característica del tipo de cubierta del campo y proporcional al área ocupada dentro del píxel. Además, la suma de estas proporciones de cubiertas básicas debe ser la unidad para cada píxel. De esta forma, el modelo lineal se define para cada píxel de la imagen como: $x = Mf + e$. Donde 'x', es un vector columna (nx1) cuyas componentes representan la reflectividad del píxel considerado en las 'n' bandas utilizadas en la transformación, 'f', es un vector (mx1) cuyas componentes indican la proporción de superficie ocupada por cada uno de los 'm' componentes o cubiertas

básicas que forman parte de la imagen, 'M' es una matriz (nxm) que almacena la reflectividad en cada banda de cada componente básico, y 'e', es un vector (nx1) que representa el error de la predicción. Al resolver el sistema de ecuaciones antes planteado, se obtiene una imagen por cada componente básico definido que representa una estimación de la proporción de píxel ocupado por ese componente. Además, se obtiene una imagen del error cometido en la transformación.

En este trabajo, se han considerado tres componentes básicos: suelo, vegetación y sombra y se ha utilizado el método propuesto por SHIMABUKURO & SMITH (1991) para imágenes TM para resolver el sistema. El método está basado en la consideración de todas las posibles salidas del estimador clásico, y permite incluir de forma sencilla las dos restricciones habitualmente utilizadas (suma unidad y fracciones positivas). Este algoritmo ha sido tomado como referencia a la hora de establecer comparaciones y es uno de los más ampliamente utilizados. Pero antes de aplicar propiamente el modelo es necesario identificar la firma espectral de los componentes puros considerados; en esta aplicación, los espectros de los componentes básicos utilizados se han obtenido de la propia imagen.

Creación de la base de datos de trabajo

Para formar la base de datos a partir de la cual se localizarán las relaciones entre las imágenes de satélite y la variable 'volumen de rodal', es necesario, por una parte, identificar los valores de las imágenes fracción consideradas en las parcelas objeto de estudio; y por otra, añadir a esa información los datos dasométricos obtenidos de la información proporcionada por el Segundo Inventario Forestal Nacional.

Selección de las variables independientes implicadas

Se ha empleado el parámetro 'Cp de Mallows' para elegir la combinación de variables independientes más aconsejable en la ecuación de regresión. Entre las variables independientes candidatas se encuentran los valores de las imágenes fracción obtenidas y todos los parámetros extraídos del Segundo Inventario Forestal Nacional como índices Reineke y Hart, pendiente, y exposición.

Definición de la ecuación de regresión

El problema de la baja correlación entre datos de satélite y parámetros forestales, unido a una alta significación ya ha sido encontrado por otros autores (AHERN *et al.*, 1991; GEMMELL, 1995; HYYPPA *et al.*, 2000). Como indica BRAVO (2001), la forma de solucionar este importante inconveniente según FRANKLIN (1986) es la agrupación de datos en clases discretas para asegurar un amplio rango de variación de las variables dasométricas de interés y compensar parcialmente la heterogeneidad espacial de las masas a escala de parcela. Ahora bien, los trabajos que se han basado en esta agrupación han sido siempre desarrollados en zonas muy homogéneas y la mayoría de las veces con topografía suave, caso de los autores citados u otros como ARDÓ (1992) y DANSON & CURRAN (1993), siempre trabajando con bosques boreales.

En este estudio, se trabaja con bosques de transición entre zonas mediterráneas y eurosiberianas y, por lo tanto, se desconoce si dicha metodología es aplicable al área de estudio considerada. En concreto, para realizar las agrupaciones de los datos asegurando que los grupos realizados eran significativamente diferentes se han seguido las siguientes etapas: análisis de clusters, análisis discriminante y test de medias de Tukey. Una vez realizados los grupos para la variable considerada, se obtuvieron los valores medios del resto de las variables de interés para los grupos definidos, para, a continuación, establecer las ecuaciones de regresión entre ellas. Para obtener las ecuaciones de regresión fueron empleadas tan sólo la mitad de las parcelas disponibles, para, de esta forma, reservar la otra mitad para la etapa de validación de resultados.

Validación de los resultados

Tras definir dichas ecuaciones, se revisó el coeficiente R2 obtenido y se realizó un análisis de los residuales. Las etapas 5 y 6 (definición de la ecuación de regresión y validación de los resultados) se repitieron para diferentes alternativas, hasta encontrar la forma de establecer la ecuación de regresión más adecuada. Finalmente, cuando esta ecuación fue localizada, se empleó toda la información disponible (todas las parcelas consideradas) para obtener el mejor estimador posible.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se analizó la imagen de 13 de julio de 1996, para una vez determinada la metodología, repetir los cálculos para la imagen del mes de marzo. Tras corregir adecuadamente las imágenes, realizar la descomposición espectral correctamente y obtener así las imágenes fracción, se aplicó un filtro de media y se extrajo su valor digital en las parcelas consideradas. Aquellas parcelas que se encontraban en el límite de la imagen fueron eliminadas. Así mismo, tampoco fueron consideradas aquellas en las que el error cuadrático medio al efectuar la descomposición espectral superó el umbral permitido. Por lo que finalmente, en la imagen de julio se consideraron un total de 107 parcelas válidas, (53 para obtener la estimación y 54 para verificarla).

Para plantear la ecuación de regresión se empleó como variable independiente únicamente la componente fracción sombra, y se intentó establecer grupos de valores para mejorar los resultados obtenidos planteando la ecuación de regresión sin agrupar los datos. En un primer intento, se realizó la agrupación de los datos en función de la variable VCC (tal y como sugieren algunos autores como ARDÓ, 1992). Una vez agrupados los datos, la expresión obtenida tuvo que ser rechazada pues al considerar el resto de parcelas no empleadas hasta el momento, se comprobó la no validez de la estimación realizada.

Tras este fracaso, se intentó realizar la agrupación de los datos teniendo en cuenta los valores de la variable fracción sombra en lugar de los valores de la variable VCC, repitiéndose las etapas anteriormente mencionadas; pero, de nuevo, no se obtuvieron los resultados esperados (siendo bastante peores los coeficientes de las regresiones obtenidas).

Por último, se definieron los grupos de VCC mediante los percentiles 25%, 50%, 75% y 99%. De forma que, el primer grupo de valores englobó

a los valores de volumen que se encontraban por debajo del percentil 25%, el segundo, a los que se situaron por debajo del percentil 50% y no estuvieran incluidos en el grupo primero, etc. A continuación, se aplicaron el análisis discriminante y el test de medias de Tukey para comprobar la corrección estadística de los grupos realizados. Los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 1, observándose una buena homogeneidad en el número de parcelas por grupo.

Tras esto, se realizó la regresión entre el volumen y las imágenes fracción grupo a grupo, obteniéndose un R2 igual a 0,913 y un R2 ajustado igual a 90.51 (p-valor fue inferior a 0,001). Para validar el análisis realizado se emplearon las 54 parcelas no utilizadas hasta el momento. En esta ocasión, el coeficiente de correlación Pearson entre el volumen observado y el estimado fue de 0,89, con un alto nivel de significación (p-valor < 0,0001). Una vez definida la forma de establecer la ecuación de regresión entre la variable VCC y la variable fracción sombra, se aplicó la metodología definida a todas las parcelas consideradas, de esta forma se evitó perder información innecesariamente, y se pudo obtener una expresión para realizar la estimación más precisa. La ecuación de regresión finalmente obtenida fue la siguiente:

$$VCC = -4,12 + 0,44 * \text{sombra} + 33,14 * (GR_VCC = 2) + 70,06 * (GR_VCC = 3) + 154,96 * (GR_VCC = 4)$$

donde, GR_VCC = x es una variable lógica que toma el valor '1' cuando el valor de VCC considerado pertenece el grupo 'x', y el valor '0', cuando no pertenece a dicho grupo. El R2 alcanzó el valor de 0.76 y el R2 ajustado de 0.75. La figura 1 muestra gráficamente los resultados definitivos.

Tras este estudio, se repitió el proceso considerando la imagen del 12 de marzo. Los resultados obtenidos fueron similares, observándose que las mejores predicciones se obtienen para los valores de volumen situados por debajo de 200 m3/ha, hecho que coincide con los resulta-

Cantidad de volumen	Volumen medio (m ³ /ha)	Número de parcelas
Muy baja	55,3	13
Baja	93,7	13
Alta	130,6	13
Muy alta	221,9	14

Tabla 1. Agrupación en función de la variable VCC (percentiles)

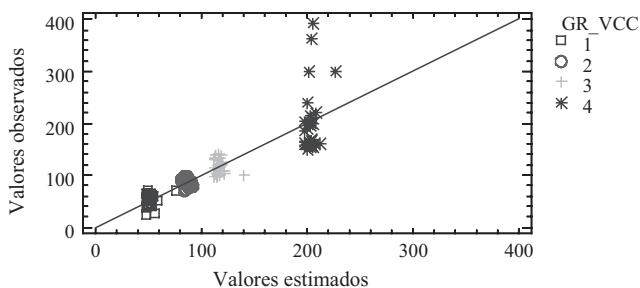


Figura 1. Relación entre los valores VCC estimados y los observados (reales)

dos obtenidos por otros investigadores (BRAVO, 2001; ARDÖ, 1992; entre otros).

CONCLUSIONES

Se ha confirmado la relación observada en masas boreales por diferentes investigadores entre el volumen de rodal y la imagen fracción sombra (obtenida mediante la aplicación del Modelo de Mezclas Espectrales a las imágenes originales) en las masas de transición mediterránea eurosiberiana; estableciéndose una metodología para estimar el volumen de masas forestales (*Pinus sylvestris*) a partir de la imagen fracción sombra.

No ha sido posible obtener una expresión que permita estimar el volumen sin emplear información adicional externa a las imágenes de satélite. La principal razón ha sido que se está trabajando por encima del punto de saturación de las imágenes fracción sombra. Sin embargo, una vez determinado el rango de volumen previsto a través de otras fuentes de información, empleando una simple ecuación lineal se obtiene el volumen estimado.

BIBLIOGRAFÍA

- AHERN, F.J.; ERDLER, T.; MACLEAN D.A. & KNEPPECK, I.D.; 1991. A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements. *Int. J. Rem. Sens.* 12(3):387-400.
- ARDÖ, J.; 1992. Volume quantification of coniferous forest compartments using Spectral Radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. *Int. J. Rem. Sens.* 13: 1779-1786.
- BRAVO, A.; 2001. *Estimación de existencias forestales mediante imágenes Landsat TM y parcelas del Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN2)*. Proyecto Fin de Carrera de Ingeniera de Montes. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.
- CURRAN, P.J. & HAY, A.M.; 1986. The importance of measurement error for certain procedures in remote sensing at optical wavelengths. *Photogrammetric Eng. Rem. Sens.* 52: 229-241.
- DANSON, F. & CURRAN, P.; 1993. Factors affecting the remote sensed response of coniferous forest plantations. *Rem. Sens. Env.* 43: 55-65.
- DELGADO, J.A.; 1991. *Clasificación y análisis de nubes mediante imágenes Meteosat*. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. España.
- FRANKLIN, J.; 1986. Thematic Mapper analysis of coniferous structure and composition. *Int. J. Rem. Sens.* 7: 1287-1301.
- GEMMELL, F.; 1995. Effects of forest cover terrain and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a Rocky Mountain site. *Rem. Sens. Env.* 51: 291-305.
- GIL, P.; GALERA, R.M.; MARTÍN, S.; AGUNDEZ D. Y ALIA, R.; 1991. *Regiones de procedencia de Pinus sylvestris L. y Pinus nigra subsp. salzmannii (Dunal) Franco*. ICONA. Madrid.
- HYPPÄ, J.H.; HYPPÄ, M.; INKINEN, M.; ENGDHL, S.; LINKO & ZHU, Y.; 2000. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *For. Ecol. Manage.* 128: 109-120.
- ILLERA, P.; FERNÁNDEZ, A. & PÉREZ, A.; 1995. A simple model for the calculation of global solar radiation using geostationary satellite data. *Atm. Res.* 39: 79-90.

- PRIETO, A. Y HERNANDO, A.; 1995. *Tarifas de cubicación e inventario por ordenador*. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior Ingeniería de Montes. Madrid.
- SHIMABUKURO, Y.E. & SMITH, J.; 1991. The Least-Squares Mixing Models to Generate Fraction Images Derived from Remote Sensing Multispectral Data. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 29(1): 16-21.
- STELLINGWERF, D.A. & HUSSIN, Y.A.; 1997. *Measurements and Estimations of Forest Stand Parameters Using Remote Sensing*. VPS. Utrecht.