

## UTILIZACION DE INFORMACION ESPECTRAL LANDSAT TM PARA LA ESTRATIFICACION FORESTAL. APLICACION EN EL INVENTARIO DE UN HAYEDO NAVARRO

J.M. Cuevas Gozalo, F. González Alonso y M. Herrón Gómez  
*Laboratorio de Teledetección  
Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria  
Tlf. (91)3476817, Fax (91)3572293, Apdo. 8.111, 28.080 Madrid, España*

**RESUMEN.-** Se ha estratificado mediante clasificación no supervisada de información espectral Landsat TM el área inventariada por muestreo terrestre de los montes del Concejo de Oroquieta - Erviti, situados en la Comunidad Autónoma de Navarra (España). Los resultados obtenidos muestran que la información Landsat TM es de gran interés para la inventariación forestal ya que mediante ella es posible estratificar las masas forestales en zonas significativamente diferentes respecto a sus características dasométricas.

**ABSTRACT.-** The spectral information of a Landsat TM image has been used to stratify through not supervised classification the ground inventoried area of the forests of the Council of Oroquieta - Erviti in the Autonomous Community of Navarra (Spain). The obtained strata are significantly different for the dasometric values of the ground plots in them included. The results show that the Landsat TM information is a tool of great interest for the forest inventory stratification.

### 1.- INTRODUCCION

La estratificación es una práctica habitual en la inventariación forestal ya que es uno de las formas posibles de aumentar la precisión de los resultados obtenidos, o bien, de reducir los costos.

El objetivo perseguido en este estudio ha sido analizar el interés de la información espectral captada por el sensor TM de los satélites norteamericanos de recursos naturales de la serie Landsat como herramienta de estratificación en el inventario forestal, analizando para ello si los estratos obtenidos a partir de la información espectral son significativamente diferentes respecto a las características dasométricas de las masas forestales en ellos incluidas.

Para la realización de este estudio se han utilizado los datos de campo del inventario forestal de los montes del Concejo de Oroquieta - Erviti (Navarra, España). Los datos de campo de este inventario forestal se han empleado para efectuar diversos estudios como son: las ecuaciones de cubicación construidas para el haya (Cuevas, 1989a), la estratificación de las parcelas de inventario mediante el método ITE empleando sus datos de carácter fisiográfico, ecológico y selvícola (Cuevas, 1989b), la comparación de la estimaciones del volumen de crecimiento de fuste usando y sin usar los incrementos diametrales obtenidos en los árboles tipo de las parcelas (Cuevas, Barrios, 1992) y el método empleado para la determinación de la calidad de las masas (Cuevas, 1992).

## 2.- CARACTERISTICAS DEL AREA EN ESTUDIO

El área en estudio son los Montes de Utilidad Pública nºs 416, 417 y 418, pertenecientes al Concejo de Oroquieta - Erviti de la Comunidad Autónoma de Navarra (España) que está situado (Figura 1) al noroeste de esta Comunidad Autónoma, 30 km al norte de Pamplona y junto a la divisoria de aguas Ebro - Cantábrica, y se extiende en una franja de 10 km en sentido Norte - Sur, y de 1 a 3 km de anchura.

El clima es húmedo, aumentando las precipitaciones hacia el norte, de forma que

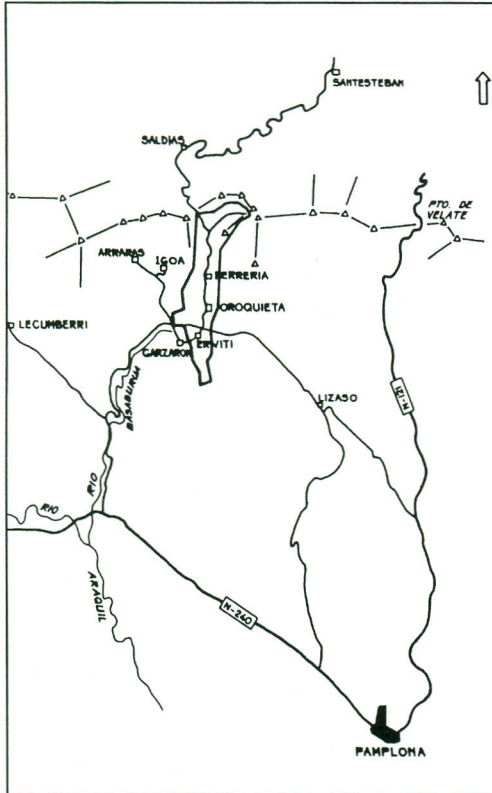


Figura 1.- Situación del Concejo de Oroquieta - Erviti

conservación es bueno.

se puede estimar que oscilan entre 1.300 y 2.000 mm anuales.

El relieve es accidentado y variado, con altitudes entre 500 y 1.000 m y pendientes en general muy acentuadas.

Los sustratos son cretácicos, en los que predominan las litologías de flysch al sur y margas y calizas al norte con algunas emergencias de ofitas.

Los suelos forestales del Concejo de Oroquieta - Erviti son suelos pardos ácidos o suelos pardos con fenómenos de hidromorfía.

Como consecuencia básicamente del clima, los suelos se caracterizan por una acidez muy acentuada.

La especie forestal principal es el haya (*Fagus sylvatica* L.) que forma extensas masas puras. Sólo en algunas laderas, a baja altitud y en solana, cede el lugar al rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.). En las zonas semillanas cercanas al valle de Basaburua y sobre suelos con encharcamiento frecuente el roble (*Quercus robur* L.) es la especie dominante.

El método de beneficio es en monte alto, siendo los montes bajos muy escasos, las masas son regulares o semirregulares, de calidad variable y su estado de

## 3.- METODOLOGIA Y RESULTADOS DEL INVENTARIO FORESTAL

En 1984, y como paso previo a su ordenación, se realizó un inventario por muestreo sistemático de estos montes. Mediante fotointerpretación convencional de vuelos fotográficos del año 1979 se delimitaron las zonas consideradas como inventariables, excluyendo de éstas las zonas forestales sin masa arbórea o con muy baja densidad de arbolado, las repoblaciones artificiales de coníferas, los enclaves dentro de la masa forestal y los pastizales.

En la fecha de realización del inventario, estos montes tenían una superficie forestal total de 1.091,83 ha, de las que 1.003,72 eran arboladas. La superficie arbolada inventariada fue

914,11 ha. A efectos del inventario se diferenciaron las siguientes especies: haya, haya leñosa, roble, rebollo, castaño y otras especies.

Se siguió un diseño de muestreo sistemático de parcelas utilizando una malla cuadrada de 125 m de lado, excepto en la zona central de los montes, entre La Ferrería y Oroquieta, en que se adoptó una malla cuadrada de 115 m debido a la mayor heterogeneidad de las masas y el previsible menor tamaño de los cantones a definir por ser un área de relieve más complejo que el resto. Las mallas de muestreo se dispusieron teniendo en cuenta las orientaciones dominantes del relieve.

Las parcelas fueron circulares de 14 m de radio (615,75 m<sup>2</sup> de superficie), lo que supuso una tasa de muestreo del 3,94 % para el conjunto del área inventariada.

En cada parcela se tomaron tres tipos de datos:

1) Enumeración de los árboles de diámetro normal superior a 17,5 cm (pies mayores), anotando su especie y su diámetro normal, y conteo de los árboles de diámetro normal inferior a 17,5 cm y superior a 10 cm (pies menores).

2) Medidas adicionales (altura total, espesor normal de corteza y crecimiento radial normal en los diez últimos años) en tres árboles tipo en pie. Se eligieron los tres pies mayores de haya no leñosa más próximos al centro de la parcela, excepto en la zona donde el roble era más abundante en que fueron los tres pies mayores de haya no leñosa o roble.

3) Datos de carácter fisiográfico, ecológico y selvícola de la parcela.

A partir de los datos obtenidos en 125 pies de haya no leñosa apeados se construyeron mediante regresión lineal ecuaciones de cubicación para el haya (Cuevas, 1989a). En el caso del roble se usaron como ecuaciones de cubicación las obtenidas para esta especie en Navarra en el Primer Inventario Forestal Nacional de España (IFN, 1980). Estas ecuaciones de cubicación fueron utilizadas para cubicar los árboles tipo de las parcelas (1.716 de haya no leñosa y 49 de roble). A partir de estas cubicaciones se obtuvieron, por regresión lineal, tarifas de cubicación, que permiten estimar los diferentes volúmenes de los pies en función exclusivamente de su diámetro normal.

Para construir las tarifas de cubicación del haya no leñosa se agruparon los cantones en once grupos con el fin de disponer de un número suficiente de árboles tipo de las parcelas, basándose para ello en la semejanza de las relaciones entre la altura total y el diámetro normal de los árboles tipo de las parcelas de cada cantón. Las tarifas utilizadas para las especies diferentes al haya no leñosa o el roble fueron las más lentas de las obtenidas.

Las características principales de estos montes, deducidas de este inventario, son:

Montes en que la especie dominante es el haya de la que son el 94,1 % de los pies menores, el 96,5 % de los pies mayores, el 96,6 % del volumen total y el 95,4 % del volumen de crecimiento total. El roble y el rebollo suponen el 1,7 % y el 0,9 % del volumen total.

Las masas arboladas tienen una espesura generalmente completa. Existencias medias de 17,1 m<sup>2</sup>/ha de área basimétrica, 134,3 m<sup>3</sup>/ha de volumen de fuste, 159,0 m<sup>3</sup>/ha de volumen total, 1,61 m<sup>3</sup>/ha de volumen de crecimiento de fuste y 1,93 m<sup>3</sup>/ha de volumen de crecimiento total. Estos valores son muy altos comparativamente a las condiciones de la mayoría de los montes españoles.

A partir de los datos de carácter fisiográfico, ecológico y selvícola de las parcelas de inventario se obtiene el que las parcelas de inventario estaban distribuidas en todo tipo de orientaciones y que la mayoría de ellas estaban situadas en laderas con una pendiente bastante accentuada (Cuevas, 1989b).

#### **4.- IMAGEN LANDSAT TM UTILIZADA**

Se ha empleado para realizar este estudio una imagen captada por el sensor TM de los

satélites norteamericanos Landsat el año 1987, en tanto que los trabajos de campo del inventario forestal se realizaron en 1984. La diferencia de fechas es consecuencia de las características climatológicas del área en estudio, que hacen difícil conseguir una imagen cubriendo este área completamente libre de nubes y de una época adecuada (primavera - verano).

Esta diferencia de fechas no parece especialmente grave en este caso, dado que por ser el haya una especie forestal de crecimiento relativamente lento y al estar estos montes sometidos a Proyecto de Ordenación, y por las características de éste (método de beneficio en monte alto, tramos periódicos revisables, turno de 125 años y cortas por aclareos sucesivos uniformes), no se producen cambios de gran importancia en las características dasométricas de estas masas forestales en periodos de tiempo similares a la diferencia de fechas entre la toma de datos de campo y la imagen Landsat TM utilizada.

Según el Proyecto de Ordenación de estos montes, elaborado a partir de los datos de este inventario, en los tres años de diferencia entre la toma de datos de campo y la imagen utilizada se extrajeron 3.090 m<sup>3</sup> de volumen total, a los que hay que añadir 1.694 m<sup>3</sup> de cortas de mejora. Estos valores de explotaciones durante el periodo de tiempo existente entre la toma de los datos de campo y la fecha de la imagen Landsat TM utilizada son muy inferiores a las existencias de los montes que se estimaron en 145.365 m<sup>3</sup> de volumen total, suponiendo sólo un 3,29 p. 100 del volumen total estimado en el momento del inventario. Lo anterior, unido al hecho de ser las cortas por aclareos sucesivos uniformes, hace que no sea esperable que la diferencia de fechas entre la toma de datos de campo del inventario y la imagen Landsat TM utilizada pueda tener gran influencia, a no ser excepcionalmente en alguna parcela o en el píxel correspondiente. Mayor importancia podría tener el que no se hubieran localizado correctamente las parcelas en la imagen, aunque al haberse seguido en el inventario un diseño de muestreo sistemático ha sido posible efectuar esta labor con gran seguridad.

La resolución espacial de las imágenes Landsat TM (30 m) es adecuada para el objetivo de este estudio, ya que las parcelas de campo del inventario tenían un radio de 14 m.

## **5.- PROCESO SEGUIDO**

Se extrajo el sector de la imagen Landsat TM cubriendo el área inventariada, quedando constituido por 10.172 píxeles. Mediante el algoritmo ISODATA se clasificó no supervisadamente este sector de la imagen Landsat TM no utilizando la banda correspondiente al infrarrojo térmico.

Se eligió que el número de clases a obtener fuese tres, ya que este era el número de clases utilizado en la estratificación realizada mediante el método ITE (Cuevas, 1989b).

Posteriormente, utilizando las clases espectrales obtenidas con el algoritmo ISODATA, se clasificó de nuevo el sector de la imagen Landsat TM cubriendo el área inventariada usando un algoritmo de máxima verosimilitud. Se localizaron las parcelas de inventario en la imagen Landsat TM y se averiguó a cual de las tres clases obtenidas mediante la clasificación del sector cubriendo el área inventariada pertenecían.

A partir de los datos de campo de las parcelas de inventario se obtuvo para cada una de ellas los valores de los siguientes parámetros dasométricos: número de pies menores, número de pies mayores, área basimétrica (superficie de la sección del árbol a 1,30 m del suelo), volumen de fuste con corteza, volumen total con corteza, volumen de crecimiento de fuste y volumen de crecimiento total. En cada parcela se han utilizado las tarifas de cubicación que le correspondían de acuerdo a la estratificación realizada mediante el método ITE (Cuevas, 1989b).

Se unieron los parámetros dasométricos de las parcelas de inventario y los valores procedentes de la imagen Landsat TM, y se procedió al análisis estadístico de los tres estratos obtenidos, con el objetivo de analizar si estos estratos son significativamente diferentes respecto a los parámetros dasométricos de las parcelas de campo del inventario.

## 6.- RESULTADOS

En la Figura 2 aparece la información Landsat TM del área inventariada y en la Figura 3 los tres estratos o clases obtenidos como resultado de la clasificación de máxima verosimilitud con la situación de las parcelas de campo del inventario.

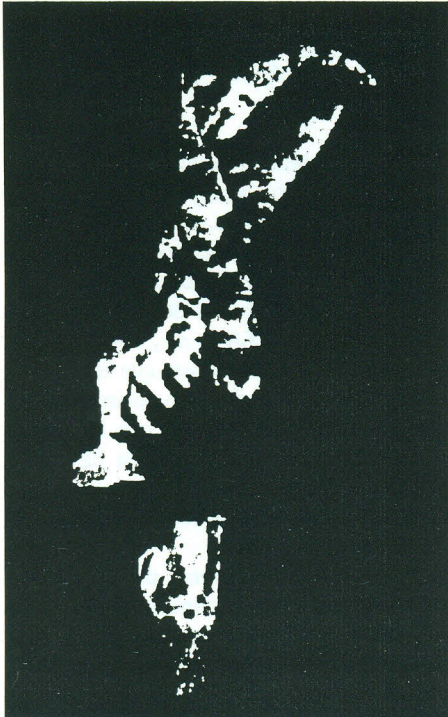


Figura 2.- Información Landsat TM del área inventariada. Banda 4 en rojo, banda 3 en verde y banda 2 en azul (C. 40)



Figura 3.- Estratos obtenidos a partir de información Landsat TM con la situación de las parcelas de campo del inventario. Estrato 1 verde oscuro, estrato 2 verde claro y estrato 3 ocre (C 41)

Estos tres estratos tienen una continuidad espacial bastante acentuada y su distribución parece estar relacionada con las condiciones orográficas del terreno. Podría pensarse que, dado el relieve del área en estudio, habría sido interesante haber sometido la información Landsat TM a una corrección radiométrica en función del relieve, pero es preciso tener en cuenta que este estudio es en relación con masas forestales y que las características dasométricas de éstas están muy ligadas a la insolación, y que el proceso de la imagen se ha basado en clasificación no supervisada.

El número de píxeles de los tres estratos o clases obtenidos es 2.509, 4.079 y 3.584. El

número de parcelas de campo situadas en cada estrato ha sido 146, 252 y 254.

En la Tabla I figuran los parámetros dasométricos de las parcelas situadas en cada uno de los tres estratos.

Como resultado del análisis de varianza entre los grupos de parcelas pertenecientes a cada uno de los tres estratos contruidos se obtienen los siguientes valores de F de Snedecor para los parámetros dasométricos:

Número de pies menores: 1,79  
 Número de pies mayores: 11,19  
 Area basimétrica: 17,47  
 Volumen de fuste con corteza: 16,71  
 Volumen total con corteza: 17,01  
 Volumen de crecimiento de fuste: 15,26  
 Volumen de crecimiento total: 14,43

Estos estratos son estadísticamente diferentes al 99 % de probabilidad fiducial para todos los parámetros dasométricos de las parcelas de campo situadas en ellos, excepto para el número de pies menores en que no hay diferencias significativas al 99 %, pero sí al 95 %.

El que el número de pies menores presente una F mucho menor parece consecuencia lógica de la débil relación existente en estos montes, en los que el método de beneficio es en monte alto, entre este parámetro dasométrico y las características de la cubierta de las copas, que es la que condiciona la respuesta espectral de una masa forestal (OZA *et al.*, 1992).

Destaca el valor de F obtenido para el área basimétrica, ligeramente mayor que en el caso de los volúmenes. Ello tal vez sea consecuencia de que en el cálculo del área basimétrica no intervienen tarifas de cubicación, pero sí en el caso de los volúmenes, y de que las tarifas de cubicación utilizadas en cada parcela han sido las que se construyeron en base a la estratificación realizada mediante el método ITE (Cuevas, 1989b), y no tarifas específicamente construidas para cada estrato obtenido a partir de la información Landsat TM.

Lo anterior puede tener una influencia notable puesto que ambas divisiones de las parcelas en tres grupos o estratos han resultado muy diferentes, como se puede observar en la Tabla II. La CHI<sup>2</sup> de esta tabla tiene un valor de solamente 9,651, mostrando que ambas estratificaciones son estadísticamente independientes al 99,95 % de probabilidad fiducial.

		ITE			TOTAL
		1	2	3	
T M	1	60	73	13	146
	2	97	109	46	252
	3	114	111	29	254
TOTAL		271	293	88	652

**Tabla II.-** Tabla de contingencia de las parcelas de inventario según las estratificaciones realizadas a partir de Landsat TM y con el método ITE

Se habrían obtenido presumiblemente resultados aún mejores si se hubiesen utilizado tarifas de cubicación específicamente construidas para cada estrato obtenido a partir de la

información Landsat TM y si se hubiera usado una imagen de la misma calidad que la empleada pero de fecha más cercana a la toma de datos de campo del inventario.

Los resultados están en concordancia con los obtenidos por Gemmell (1995) en un área de las Montañas Rocosas (Estados Unidos) ocupada por bosques de coníferas. Según este autor la información Landsat TM permite definir áreas muy relacionadas con las características dasométricas de las masas forestales.

El objetivo del estudio sobre estratificación de las parcelas de inventario mediante el método ITE (Cuevas, 1989b) utilizando el programa TWINSpan (Hill, 1979) fue analizar el interés de este método para la inventariación forestal y, aun cuando se obtuvo una notable reducción en los errores del inventario, las tres clases o estratos construidos no son estadísticamente independientes, siendo los valores de F obtenidos los siguientes:

Número de pies menores = 11,48  
Número de pies mayores = 0,81  
Área basimétrica = 0,83  
Volumen de fuste con corteza = 0,61  
Volumen total con corteza = 0,69  
Volumen de crecimiento de fuste = 0,96  
Volumen de crecimiento total = 0,86

Las variables seleccionadas por el programa TWINSpan para realizar esta estratificación fueron las distancia al norte, la altitud y la insolación en la primera división de las parcelas en dos grupos, y el grado de cubierta, la vegetación dominante, la altura dominante y el recubrimiento del suelo dominante en la división del primer grupo de parcelas en otros dos.

## 7.- CONCLUSIONES

Las imágenes captadas por el sensor TM de los satélites de recursos naturales Landsat han mostrado su gran interés para el inventario forestal, en este caso por muestreo, pues su utilización como herramienta de estratificación ha conducido a estratos significativamente diferentes respecto a los parámetros dasométricos de las masas forestales incluidas en ellos.

## 8.- REFERENCIAS

- Cuevas, J. M. 1989a. Ecuaciones de cubicación para el haya de la Navarra orocantábrica. *Comunicaciones INIA, Serie Recursos Naturales*, 51.
- Cuevas, J. M. 1989b. Aplicación del método ITE de estratificación a la inventariación de los montes del Concejo de Oroquieta - Erviti (Navarra). *Ecología*, 3: 121-129.
- Cuevas, J. M. y Barrios, S. 1992. Estimación del crecimiento en volumen de fuste en un inventario por muestreo de un hayedo navarro. *Invest. Agr., Sist. Recur. For.*, 1(1): 83-93.
- Cuevas, J. M. 1992. Determinación de la calidad en un hayedo navarro. *Invest. Agr., Sist. Recur. For., Fuera de Serie*, 1: 190-196.
- Gemmell, F. M. 1995. Effects of forest cover, terrain and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a Rocky Mountain site. *Remote Sens. Environ.*, 51: 291-305.
- Hill, M. O. 1979. TWINSpan. A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes. Section of Ecology and Systematics, Cornell University, New York.
- IFN 1980. Las frondosas en el Primer Inventario Forestal Nacional. ICONA, Ministerio de Agricultura, Madrid.
- Oza, M. P., Srivastava, V. K. and Deviah, P. K. 1992. Estimating the mean canopy diameter of teak plantations from MSS data. *Int. J. Remote Sensing*, 13(12): 2363-2369.

Estrato 1			
	Media	Desviación típica	Error relativo
Número de pies menores/ha	165,41	195,79	118,37
Número de pies mayores/ha	266,07	166,21	62,47
Area basimétrica (m <sup>2</sup> /ha)	20,31	10,75	52,91
Volumen de fuste con corteza (m <sup>3</sup> /ha)	129,71	68,08	52,45
Volumen total con corteza (m <sup>3</sup> /ha)	162,90	85,72	52,62
Volumen de crecimiento de fuste (m <sup>3</sup> /ha)	2,21	1,31	59,19
Volumen de crecimiento total (m <sup>3</sup> /ha)	2,81	1,57	55,83
Estrato 2			
	Media	Desviación típica	Error relativo
Número de pies menores/ha	205,58	217,71	105,90
Número de pies mayores/ha	251,14	154,33	61,45
Area basimétrica (m <sup>2</sup> /ha)	18,01	10,20	56,61
Volumen de fuste con corteza (m <sup>3</sup> /ha)	115,66	64,39	55,67
Volumen total con corteza (m <sup>3</sup> /ha)	144,95	81,18	56,00
Volumen de crecimiento de fuste (m <sup>3</sup> /ha)	1,95	1,31	66,96
Volumen de crecimiento total (m <sup>3</sup> /ha)	2,59	1,48	57,29
Estrato 3			
	Media	Desviación típica	Error relativo
Número de pies menores/ha	192,45	194,80	101,22
Número de pies mayores/ha	197,82	156,04	78,88
Area basimétrica (m <sup>2</sup> /ha)	14,26	10,36	72,67
Volumen de fuste con corteza (m <sup>3</sup> /ha)	92,03	66,97	72,77
Volumen total con corteza (m <sup>3</sup> /ha)	115,11	83,71	72,77
Volumen de crecimiento de fuste (m <sup>3</sup> /ha)	1,50	1,28	85,44
Volumen de crecimiento de fuste (m <sup>3</sup> /ha)	2,05	1,50	73,17

**Tabla I.-** Parámetros dasométricos de las parcelas de campo del inventario forestal situadas en cada estrato construido a partir de la información Landsat TM