

APORTACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO HIDROLÓGICO DEL NÚMERO DE CURVA

M. Ferrer Julia¹, A. Ruiz Verdú², M. Dimas Suárez³ y T. Estrela Monreal³

RESUMEN: El número de curva es uno de los parámetros más utilizados en España para estimar la infiltración en el suelo a partir de la precipitación. Uno de los problemas que presenta su estimación es que la información que para ésta se precisa no está en muchos casos actualizada. Para resolver este problema, en el presente artículo se propone utilizar la teledetección como fuente de información adicional a otras fuentes convencionales. Para evaluar su aportación, se han escogido seis cuencas experimentales pertenecientes a la base de datos del proyecto AMHY-FRIEND (Ferrer y otros, 1997) y se ha analizado las diferencias que presentan los números de curva estimados a partir de diferentes fuentes de información. Los resultados muestran que dichas diferencias son importantes en cuanto a la variabilidad espacial del parámetro, pero no así en cuanto a los valores areales del mismo en la cuenca.

INTRODUCCIÓN

Uno de los componentes del ciclo hidrológico que resulta más difícil de analizar es el de la infiltración. La infiltración es el proceso por el que la precipitación penetra a través de la superficie del suelo y aumenta la humedad del suelo. Entre los métodos más extendidos para su estimación está el del parámetro del número de curva, del Soil Conservation Service (SCS) de los EE.UU (McCuen, 1982; Ferrer y otros, 1995).

En el presente estudio se ha trabajado con una adaptación desarrollada por Témez (1987) en España de dicho método, el cual se define por cinco variables: el uso del suelo, el tipo de práctica con la que se cultiva, la pendiente del terreno, el tipo de suelo, categorizado según su facilidad de drenaje, y las condiciones de humedad del suelo. Tomando estas condiciones como medias, y basándose en que en la mayoría del territorio español se cultiva siempre siguiendo la máxima pendiente, la determinación del número de curva se basa en tres parámetros físicos: la pendiente, el tipo de suelo (definido en base a su textura) y los usos de suelo. Hasta hace poco, las fuentes de información con las que se contaban para obtener estos datos se reducían a cartografía analógica que en la mayoría de los casos no estaba actualizada. Durante los últimos años, se han desarrollado nuevas tecnologías como son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección, que permiten tener actualizada la información necesaria para definir

el número de curva y facilitar la combinación de información espacial (Ferrer y otros, 1995). El objetivo del presente artículo es analizar las ventajas que presenta la teledetección frente a la cartografía temática convencional.

Se entiende como teledetección, en sentido amplio, a la recogida e interpretación de datos sobre un objetivo a distancia, desde aviones o satélites, y se restringe a los métodos que detectan energía electromagnética (p.e. fotografías aéreas, imágenes de satélite, ...). Sin embargo, en este artículo, se utilizará para referirse a la teledetección espacial, es decir, a aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales (Chuvieco, 1996). Existen dos tipos de sensores: pasivos y activos. En los primeros (que son los utilizados para el presente artículo), su función es medir la parte de energía reflejada y/o emitida por los cuerpos terrestres o por las nubes. Según el tipo de sensor, se detecta la energía correspondiente a un intervalo (banda) de longitud de onda del espectro u otro, siendo esta variedad juntamente con la resolución espacial y temporal las características que harán que un sensor sea más aplicable a un campo de la ciencia u a otro. Como resolución espacial se entiende al tamaño del pixel, es decir, del área mínima de información de la superficie terrestre que refleja la energía. La resolución temporal se refiere al tiempo en que tarda el sensor en recoger de nuevo información de una

^{1,2,3} Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, Ministerio de Fomento. Pº Bajo de la Virgen del Puerto, 3 -28005 - Madrid

¹ Universidad de Salamanca. Área de Geografía Física. e-mail: monserrat.ferrer@cedex.es

² Fundación de Bethencourt. e-mail: averdu@cedex.es

³ Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX. e-mail: mirta.dimas@cedex.es e-mail: teodoro.estrela@cedex.es

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol. 5 Num.1 (marzo 1998), páginas 35-46, recibido el 10 de octubre de 1997 y aceptado para su publicación el 18 de febrero de 1998. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

misma área. Los sensores activos (p.e. radar) se diferencian de los pasivos en que son receptores de la energía emitida por ellos mismos. Una de sus características principales es que permiten medir las variaciones de la constante dieléctrica que se dan entre los diferentes materiales del terreno, lo que permite diferenciar fácilmente entre materiales secos y húmedos.

Dentro de la hidrología, la teledetección se puede utilizar para numerosas aplicaciones: meteorología, humedad del suelo, calidad de las aguas, etc. En el presente estudio, se utilizará para definir los usos del suelo necesarios para determinar el número de curva, mediante una clasificación supervisada de las imágenes de satélite. Dependiendo de los valores de reflectancia recibidos por todas las bandas excepto la térmica del sensor Landsat Thematic Mapper y basándose en datos de campo, se considerará que unos píxeles tienen las características electromagnéticas de un uso de suelo u otro (p.e. de un bosque, o de un campo de cereales). Otras técnicas que podían haberse utilizado son las clasificaciones jerárquicas, clasificaciones sin supervisar, o los índices entre bandas, de los cuales el más utilizado es el índice de vegetación normalizado.

Los problemas con los que se encuentra la teledetección ante la técnica de clasificación supervisada son varios:

- Usos del suelo diferentes pueden tener una respuesta espectral similar. Hay que tener en cuenta que los sensores más utilizados disponen como máximo de 7 bandas (intervalos de longitud de onda) para definir su curva espectral.
- Un mismo uso del suelo puede tener una respuesta espectral diferente según el grado de crecimiento de la planta, el estado de humedad del suelo, la época del año, si está enfermo o no, etc.
- Pocas veces se puede considerar que los píxeles son puros, es decir, que están compuestos por un único uso del suelo. Como regla general, al menos en España, un pino tendrá una vegetación arbustiva alrededor que afectará a la respuesta espectral del píxel.
- Dependiendo del tipo de sensor con el que se trabaje, las nubes y sombras afectarán a la reflectancia medida.

Aún así, la teledetección presenta las ventajas de un bajo coste en la actualización de cartografía, de poder disponer de datos del momento y lugar que se requieran (dato muy importante en determinadas modelizaciones de hidrología, p.e. cálculo de avenidas) y de poder analizar digitalmente sus imágenes, con la información adicional que ello conlleva.

Los resultados obtenidos en este estudio se enmarcan dentro del proyecto de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), *Estudio de las posibilidades que ofrece la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica en la estimación de Parámetros Hidrológicos a Escala Regional* (Ref. AMB95-1099).

ANTECEDENTES

La utilización de la teledetección para la obtención del número de curva se ha utilizado ya en otros países. Básicamente se han desarrollado dos corrientes:

1. Obtención de los usos del suelo, como variable determinante del número de curva. Sus antecedentes más significativos, entre otros, son:
 - Engman y Gurney (1991) utilizaron imágenes Landsat MSS (resolución espacial de 80×80) para determinar los usos del suelo de dos cuencas de EEUU, con el fin de utilizar sus resultados para estimar el parámetro del número de curva. Comparando el porcentaje obtenido de cada uso del suelo mediante el método convencional y la teledetección, observaron que en algunas clases éste difiere considerablemente (p.e. en suelo urbano en una de las cuencas la diferencia de superficie es del 50%). Sin embargo, utilizando ambos resultados, obtuvieron números de curva para toda la cuenca muy similares. Este resultado confirma el del estudio de Rango y otros (1983), en el que se concluye que cualquier píxel de uso de suelo puede estar mal clasificado en un tercio, pero que al agregarse los usos del suelo en una superficie relativamente grande, el error se reduce a un 2%.
 - Proyecto I+D *Modelos Hidrológicos de Previsión de Avenidas: Aplicación en Cuencas Experimentales con el informe sobre Caracterización Geomorfológica de la Cuenca Alta del Río Palancia. Utilización de la Teledetección y de los Sistemas de Información Geográfica*, elaborado por el CEDEX en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia (CEDEX, 1994), en el que se utiliza la Teledetección y un SIG para la evaluación de los parámetros del modelo de generación de escorrentía que se propone. La aplicación de dicho modelo se realiza a escala local en una cuenca de 477 km². Los resultados de dicho informe han permitido sistematizar la metodología de la manera que se presentó en Ferrer y otros (1995) y que se ha utilizado en esta investigación.
 - Ardiles y otros (1996) realizaron un estudio sobre la influencia del número de curva obtenido a través de una clasificación supervisada de imágenes sobre la estimación de caudales en diferentes periodos de retorno, resaltando su utilidad para áreas en las que la cartografía estaba ya muy obsoleta o en la que no existía.
2. Obtención directa del parámetro del número de curva utilizando la Teledetección. En esta línea han trabajado de manera destacada, entre otros:
 - Sharma y Singh (1993) estimaron la escorrentía siguiendo el método del hidrograma unitario del SCS en una cuenca india. Para ello tuvieron que estimar el parámetro del número de curva, determinando sus variables con análisis de imágenes Landsat TM. En dicho análisis se basaron en una interpretación visual de una composición en falso color, asociando a cada unidad morfológica una determinada textura y uso del suelo.

- McGregor (1987) estudió la posibilidad de obtener el número de curva directamente de los valores de reflectancia de las imágenes.

Dado los problemas que ha presentado esta última línea, y especialmente el que sus datos sean demasiado locales y temporales (mucho más de lo que pueden ser los datos obtenidos de usos del suelo), en el presente estudio se consideró que la primera corriente, al menos tal y como están las investigaciones en estos momentos, era la más operativa para la actualización del número de curva. Igualmente se tuvo en cuenta que los cambios en el número de curva para unas mismas condiciones de humedad se deben básicamente a los cambios en los usos del suelo, y no en la textura del suelo y la pendiente de la cuenca que se pueden admitir como invariables.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Como ya se ha comentado, el número de curva para condiciones medias está definido por tres parámetros físicos: la pendiente del terreno, los tipos de suelo y los usos del suelo. Hasta hace unos años, la pendiente debía calcularse manualmente a partir de los mapas topográficos, los tipos de suelo se obtenían a partir de mapas geológicos y los usos de suelos de los mapas de Usos y Aprovechamientos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). En la actualidad, esta información puede mejorarse con otras fuentes, que se presentan de forma digital:

- *Mapa de pendientes*: se ha obtenido directamente de un Modelo de Elevación Digital (MED), de 80 m de resolución, originado a partir de las curvas de nivel de los mapas topográficos a escala 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército. Utilizándolo como dato de entrada, con las funciones básicas del SIG utilizado se ha generado automáticamente el mapa de pendientes.
- *Mapa de tipos de suelo*: dado que se estaba trabajando con SIG, la única fuente de información existente en formato digital a la que se tuvo acceso fue el mapa edafológico distribuido por EUROSTAT a través del proyecto GISCO, en el que se divide el territorio en unidades homogéneas (escala 1:1.000.000). Uno de los campos de la tabla de datos asociada es la textura. Dado que esta variable se define según su textura, con este dato se ha generado un mapa, y a cada clase se le ha asignado un tipo de suelo (A, B, C o D) de la clasificación utilizada por el SCS.
- *Mapa de usos del suelo*: la fuente de información más actualizada y que además está disponible en formato digital, es el mapa de usos del suelo a escala 1:100.000, originado por el proyecto Land Cover dentro del programa CORINE (Coordinación de la Información del Medio Ambiente). Esta información se distribuye por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y tiene su origen, básicamente, en imágenes de satélite, fotografías aéreas, mapas de usos y aprovechamientos (tanto a escala 1:50.000 como 1:200.000) del MAPA, y datos de campo (Arozarena y Herrero, 1994). Esta infor-

mación es la que en el presente artículo se denomina convencional y es la que se ha contrastado con los datos obtenidos por la clasificación supervisada de imágenes de satélite Landsat TM (30 m de resolución espacial). Todas las imágenes con las que se ha trabajado son del mes de julio, dependiendo el año del área de estudio.

METODOLOGÍA

La metodología seguida para obtener los mapas de números de curva para cada una de las cuencas experimentales es la descrita por Ferrer y otros (1995). Para poderla aplicar, primero se ha realizado una equivalencia entre los usos de suelo descritos en la leyenda del proyecto CORINE Land Cover y los del SCS y, segundo, se han obtenido los usos de suelo requeridos por el SCS a partir de teledetección.

Equivalencia entre usos del suelo del proyecto Land Cover y los del SCS

El proyecto Land Cover ofrece dos tipos de leyenda: una que está dividida en 44 clases, y otra en 64 clases. En el estudio llevado a cabo se ha trabajado con esta última leyenda ya que permitía pasar rápidamente en caso necesario a la de menor detalle. Los problemas que se han encontrado, básicamente, han sido respecto a la descripción de cada una de las clases, descripción que puede llevar a sobrevalorar la cubierta vegetal. Las equivalencias entre ambos usos de suelo se presentan en la *Tabla 1*. Al analizarlas, se ha de tener en cuenta siempre la estación del año en que se esté trabajando: un bosque de frondosas no será lo mismo en invierno, cuando no tienen prácticamente cobertura, que en verano, en pleno apogeo.

Clasificación supervisada

La obtención de mapas de usos del suelo mediante teledetección, se ha realizado a partir de imágenes del satélite Landsat-TM correspondientes a las cuencas de estudio. Las escenas, almacenadas en soporte magnético, se han incorporado al programa de tratamiento digital de imágenes PCI v. 6.1. y se han georreferenciado, lo que permite su superposición con cualquier otra capa de información geográfica y la localización de las áreas de verdad-terreno para la clasificación supervisada.

1. *Georreferenciación*

Una vez incorporada la imagen Landsat-TM de la zona de trabajo a la base de datos, ha sido necesario efectuar una corrección geométrica o georreferenciación, con el fin de situar correctamente cada uno de los puntos de las imágenes en sus coordenadas geográficas. Las imágenes, tal como se reciben, constituyen un conjunto de datos dispuestos en una matriz numérica definida por filas y columnas con coordenadas X e Y. La georreferenciación se realiza mediante la identificación de puntos de imagen (denominados puntos de control) con detalles coincidentes del terreno cuyas coordenadas UTM (deducidas del mapa topográfico a escala 1:50.000) son conocidas.

DETERMINACIÓN DEL N° DE CURVA MEDIANTE LA TELEDETECCIÓN

CODIGO Y DESCRIPCION DE USOS DEL CORINE	USOS DEL SUELO DEL SCS
11100 'Tejido urbano continuo'	Rocas impermeables
11200 'Tejido urbano discontinuo'	Rocas permeables
11201 'Estructura urbana laxa'	Rocas permeables
11202 'Urbanizaciones exentas y/o ajardinadas'	Rocas permeables
11210 'Estructura urbana laxa'	Rocas permeables
11220 'Urbanizaciones exentas y/o ajardinadas'	Rocas permeables
12100 'Zonas industriales o comerciales'	Rocas impermeables
12200 'Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados'	Rocas impermeables
12201 'Autopistas, autovías y terrenos asociados'	Rocas impermeables
12202 'Complejos ferroviarios'	Rocas permeables
12210 'Autopistas, autovías y terrenos asociados'	Rocas impermeables
12220 'Complejos ferroviarios'	Rocas permeables
12300 'Zonas portuarias'	Rocas impermeables
12400 'Aeropuertos'	Rocas impermeables
13100 'Zonas de extracción minera'	Barbecho
13200 'Escombreras y vertederos'	Barbecho
13300 'Zonas en construcción'	Barbecho
14100 'Zonas verdes urbanas'	Pradera media
14200 'Instalaciones deportivas y recreativas'	Pradera pobre
21100 'Tierra de labor en secoano'	Cereales de invierno
21200 'Terrenos regados permanentemente'	Rotación de cultivos densos
21201 'Cultivos herbáceos en regadío'	Rotación de cultivos densos
21202 'Otras zonas de irrigación'	Rotación de cultivos densos
21210 'Cultivos herbáceos en regadío'	Rotación de cultivos densos
21220 'Otras zonas de irrigación'	Rotación de cultivos densos
21300 'Arrozales'	Rotación de cultivos densos
22100 'Viñedos'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
22200 'Frutales y plantaciones de bayas'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
22201 'Frutales en secoano'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
22210 'Frutales en secoano'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
22221 'Cítricos (regadío)'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media
22222 'Frutales tropicales (regadío)'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media
22223 'Otros frutales en regadío'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media
22300 'Olivares'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
23000 'Praderas'	Pradera buena
23100 'Praderas'	Pradera buena
24100 'Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media
24200 'Mosaico de cultivos'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
24201 'Mosaico de cultivos anuales con praderas y/o pastizales'	Cereales de invierno
24202 'Mosaico de cultivos permanentes'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
24203 'Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media
24210 'Mosaico de cultivos anuales con praderas y/o pastizales'	Cereales de invierno
24220 'Mosaico de cultivos permanentes'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
24230 'Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media
24300 'Terrenos agrícolas, con importantes espacios de vegetación natural'	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
24400 'Sistemas agroforestales'	Pradera media
31100 'Bosque de frondosas'	Masa forestal espesa
31101 'Perennifolias y quejigales'	Masa forestal espesa
31102 'Caducifolias y rebollares'	Masa forestal espesa
31103 'Otras frondosas de plantación'	Masa forestal muy espesa
31110 'Perennifolias y quejigales'	Masa forestal espesa
31111 'Perennifolias esclerófilas y quejigales'	Masa forestal espesa

Tabla 1. Equivalencias entre los usos del suelo del proyecto Land Cover y los del SCS

CODIGO Y DESCRIPCION DE USOS DEL CORINE	USOS DEL SUELO DEL SCS
31112 'Laurisilva macaronésica'	Masa forestal muy espesa
31120 'Caducifolias y rebollares'	Masa forestal espesa
31130 'Otras frondosas de plantación'	Masa forestal muy espesa
31132 'Otras zonas de irrigación'	Rotación de cultivos densos
31200 'Bosque de coníferas'	Masa forestal espesa
31201 'Pináceas'	Masa forestal espesa
31202 'Sabinas y enebro'	Masa forestal media
31210 'Pináceas'	Masa forestal espesa
31220 'Sabinas y enebro'	Masa forestal media
31300 'Bosque mixto'	Masa forestal muy espesa
32100 'Pastizales naturales'	Pradera media
32101 'Pastizales supraforestales'	Pradera pobre
32102 'Otros pastizales'	Pradera pobre
32110 'Pastizales supraforestales'	Pradera pobre
32120 'Otros pastizales'	Pradera pobre
32200 'Landas y matorrales'	Masa forestal media
32201 'Landas y matorrales templado-oceánicos'	Masa forestal media
32202 'Fayal-brezal macaronésico'	Masa forestal media
32210 'Landas y matorrales templado-oceánicos'	Masa forestal media
32220 'Fayal-brezal macaronésico'	Masa forestal media
32300 'Vegetación esclerófila'	Masa forestal media
32301 'Grandes formaciones de matorral denso o medianamente denso'	Masa forestal media
32302 'Matorral subarbusivo o arbustivo muy poco denso'	Masa forestal muy clara
32303 'Matorrales xerófilos macaronésico'	Masa forestal media
32310 'Grandes formaciones de matorral denso o medianamente denso'	Masa forestal media
32320 'Matorral subarbusivo o arbustivo muy poco denso'	Masa forestal muy clara
32330 'Matorrales xerófilos macaronésico'	Masa forestal media
32400 'Matorral boscoso de transición'	Masa forestal media
33100 'Playas, dunas y arena'	Barbecho
33200 'Roquedo'	Rocas impermeables
33201 'Rocas desnudas con fuerte pendiente (acantilados, etc.)'	Rocas impermeables
33202 'Suelos desnudos'	Barbecho
33203 'Coladas lávicas cuaternarias (malpaís)'	Rocas permeables
33210 'Rocas desnudas con fuerte pendiente (acantilados, etc.)'	Rocas impermeables
33220 'Suelos desnudos'	Barbecho
33230 'Coladas lávicas cuaternarias (malpaís)'	Rocas permeables
33300 'Espacios con vegetación escasa'	Pradera pobre
33301 'Xeroestepa subdesértica'	Pradera pobre
33302 'Cárcavas y/o zonas en proceso de erosión'	Barbecho
33303 'Espacios orófilos altitudinales con vegetación escasa'	Pradera pobre
33304 'Espacios orófilos altitudinales y otras zonas de roquedo con vegetación escasa'	Pradera pobre
33310 'Xeroestepa subdesértica'	Pradera pobre
33320 'Cárcavas y/o zonas en proceso de erosión'	Barbecho
33330 'Espacios orófilos altitudinales con veg. escasa'	Pradera pobre
33340 'Espacios orófilos altitudinales y otras zonas de roquedo con vegetación escasa'	Pradera pobre
33400 'Zonas quemadas'	Barbecho
33500 'Glaciares y nieves permanentes'	Rocas impermeables
41100 'Humedales y zonas pantanosas'	Rocas permeables
41200 'Turberas'	Rocas permeables
42100 'Marismas'	Rocas permeables
42200 'Salinas'	Rocas permeables
42300 'Zonas lianas intermar.'	Rocas permeables
51100 'Cursos de agua'	Rocas impermeables
51101 'Ríos y cauces naturales'	Rocas impermeables
51102 'Canales artificiales'	Rocas impermeables
51110 'Ríos y cauces naturales'	Rocas impermeables
51120 'Canales artificiales'	Rocas impermeables
51200 'Laminas de agua'	Rocas impermeables
51201 'Lagos y lagunas'	Rocas impermeables
51202 'Embalses'	Rocas impermeables
51210 'Lagos y lagunas'	Rocas impermeables
51220 'Embalses'	Rocas impermeables
52100 'Lagunas costeras'	Rocas impermeables
52200 'Estuarios'	Rocas impermeables
52300 'Mares y océanos'	Rocas impermeables

La transformación de coordenadas se realiza mediante una regresión lineal múltiple en la que las variables independientes son las coordenadas X,Y de la imagen y las variables dependientes, o estimadas, las coordenadas UTM. La bondad del grado de ajuste se determina por el error cuadrático medio (RMS). En el presente estudio el RMS ha sido en todos los casos inferior a un píxel. La transferencia de los niveles digitales originales a la posición corregida se ha realizado por el método del "vecino más próximo". Este proceso de georreferenciación se ha realizado con todas las bandas de cada escena (salvo la 6, correspondiente al infrarrojo térmico).

2. Clasificación supervisada

El objetivo de una clasificación es establecer una correspondencia entre el nivel digital (ND) de los píxeles de la imagen y los usos del suelo que se pretenden discriminar. El método empleado en este trabajo es el de clasificación supervisada.

La primera etapa en la clasificación supervisada consiste en la localización de una serie de áreas sobre la imagen, denominadas parcelas de entrenamiento, cuyo uso del suelo es conocido. A partir de ellas se calculan los ND medios para cada una de las bandas del sensor, obteniéndose la firma espectral de cada clase. Esa información espectral permite asignar de forma automática todos los píxeles de la imagen a cada una de las clases definidas, utilizando un algoritmo de clasificación. En este estudio se ha utilizado un clasificador de máxima probabilidad, que considera que los ND de cada clase se ajustan a una distribución

normal, lo que permite describir cada categoría por una función de probabilidad. La clase a la que se asigne un píxel dado será aquella para la que alcance mayor valor dicha función de probabilidad.

Como paso previo a la clasificación supervisada se realizó una clasificación automática, que identifica zonas espectralmente homogéneas en las imágenes, con objeto de facilitar la localización de las parcelas de entrenamiento. En la campaña de campo se anotó el tipo y densidad de la cubierta vegetal en cada una de las parcelas estudiadas, realizando fotografías de aquellas más representativas. Sus coordenadas geográficas fueron determinadas con un GPS, lo que permitía su ubicación aproximada (± 100 m) en la imagen. Cada parcela fue asignada a una de las clases del SCS, siguiendo un criterio similar al empleado con los mapas del proyecto CORINE. Los límites de las parcelas se identificaron en la imagen utilizando como fondo para la digitalización un falso color 453, que permite una buena discriminación visual de los principales usos del suelo presentes en las cuencas.

Dado que la respuesta espectral de cada clase no es homogénea incluso dentro de una misma cuenca, se ha partido para la clasificación de tantas clases como parcelas se tuvieran, agregando posteriormente aquellas correspondientes a un mismo uso del suelo, siempre que su distancia estadística sea pequeña. El índice utilizado ha sido el de la distancia de Bhattacharyya (Richards, 1986), que permite además descartar aquellas parcelas demasiado heterogéneas o que se confunden con otras clases en base a unos valores umbral. Siguiendo este esquema de clasificación se han obtenido valores muy bajos de confusión entre clases, quedando reducidos a menos de un 10% los errores de asignación en las parcelas de entrenamiento. Las clases distintas correspondientes a una misma categoría según el SCS, se han agrupado finalmente en el mapa temático.

APLICACIÓN A LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Localización y descripción de las áreas de estudio

Con el objetivo de evaluar las ventajas que presenta el análisis de imágenes de satélite frente al de la cartografía de usos del suelo convencional, se han escogido seis cuencas piloto distribuidas por diferentes partes del territorio nacional como una pequeña representación de la diversidad de las características físicas del terreno de España. Estas seis cuencas son (Figura 1):

- La del río Tajo situada en Peralejos de las Truchas correspondiente a la estación de aforos 03001. Esta cuenca es la única que podemos considerar prácticamente natural, entendiendo como natural un uso no agrícola del suelo, sin entrar en detalle en el grado de degradación de los bosques, etc.
- La del río Azuer situada en Vallehermoso, correspondiente a la estación de aforos 04101. Esta cuenca se halla bastante cultivada, quedando cubierta en un 25-30% por vegetación natural.



Figura 1. Localización de las cuencas de estudio

- La del río Córcoles, situada en Los Castellones, correspondiente a la estación de aforos 04206. Su uso del suelo es básicamente agrícola.
- La del río Alfambra situada en Villalba Alta, correspondiente a la estación de aforos 08028. Sus valles y laderas intermedias están cultivados o con vegetación rala (pastizales), mientras que las áreas más montañosas están cubiertas de vegetación natural.
- La del río Marimota o Belbis situada en Belmontejo, correspondiente a la estación de aforos 08087. Esta cuenca está cubierta básicamente por uso agrícola.
- La del río Jalón situada en Jubera, correspondiente a la estación de aforos 09058. Se combinan diversos tipos de uso del suelo, existiendo una ligera predominancia de la vegetación natural sobre la agrícola.

Usos obtenidos por teledetección

En la campaña de campo se ha procurado dar una descripción detallada de cada tipo de cubierta, haciendo hincapié en la orientación (umbría o solana), estado vegetativo y sobre todo en la densidad de las masas forestales. Este es un aspecto importante a la hora de calcular el número de curva y que no puede ser tenido en cuenta al utilizar la información del CORINE, que no hace referencia explícita al grado de cobertura del suelo por la vegetación. El problema ha sido definir los umbrales que separan las distintas categorías de masa forestal (clara, media y espesa) o los distintos tipos de “praderas” (pobre, buena). En el caso de las áreas arboladas, se han adoptado como límites entre las tres categorías cubiertas del 30 y 60%. En cuanto a las praderas, se ha aplicado este término en un sentido laxo, entendiendo como tales a los pastizales naturales. En las zonas áridas, con poca cobertura del suelo, se han asignado a la categoría de “pobre”, mientras que majadales empraizados y pastos húmedos en zonas de montaña se han considerado como “praderas buenas”.

La interpretación visual del falso color 453 (Figura 2) ha sido de gran ayuda para la delimitación de las parcelas de entrenamiento, cuyos contornos, más o menos difusos, no pueden determinarse en el campo. Este falso color permite distinguir los diferentes tipos de masa forestal (coníferas, frondosas), dando una idea aproximada de su densidad. Los pastos húmedos y cultivos herbáceos de regadío, los barbechos y áreas de suelo desnudo y los cereales sin cosechar, dan señales características,



Figura 2. Falso color 453 correspondiente a la cuenca 8087 (río Alfambra)

lo que facilita también su localización sobre la imagen. Los cultivos leñosos (olivar, vid, frutales en secano) son más difíciles de identificar y se confunden con otros usos de baja cobertura del suelo.

El uso del falso color y de la distancia de Bhattacharyya han permitido una buena definición de las clases utilizadas para la clasificación. El número medio de clases definidas ha sido de unas 10-12 por cuenca, aunque muchas de ellas correspondían a una misma categoría del SCS, por lo que se agruparon posteriormente en el mapa temático (Figura 3). Finalmente resultan unas 7 categorías por cuenca, lo que supone un número satisfactorio,

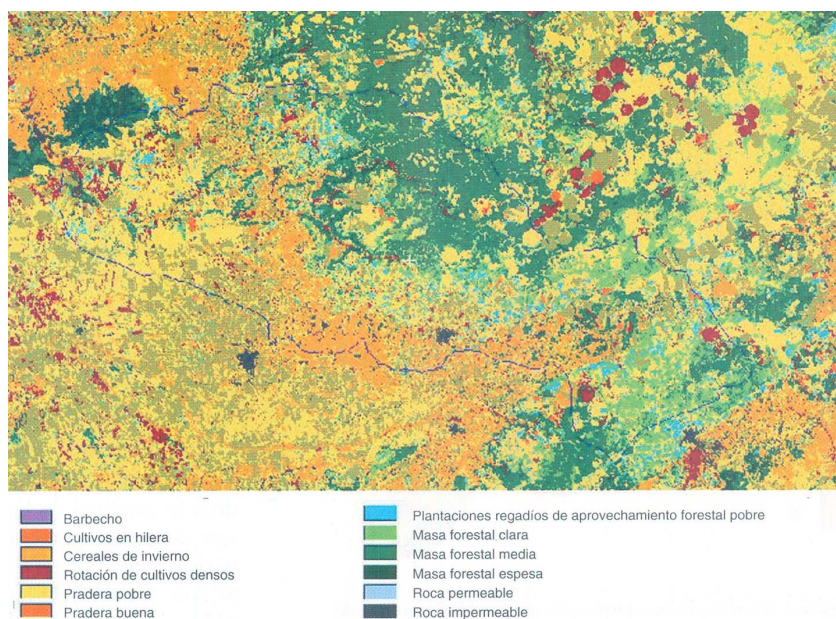


Figura 3. Clasificación supervisada de la cuenca 4101 (río Azuer)

dadas las limitaciones que ofrece la teledetección para discriminar un número elevado de usos del suelo. Las categorías definidas han sido:

- Barbecho
- Cultivos en hilera
- Cereales de invierno
- Rotación de cultivos densos
- Pradera pobre
- Pradera buena
- Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre
- Masa forestal clara
- Masa forestal media
- Masa forestal espesa
- Rocas permeables
- Rocas impermeables

Las principales confusiones se producen entre masa forestal clara y media, pradera pobre con masa forestal clara y en ocasiones con barbecho o con plantaciones regulares, así como pradera buena y rotación de cultivos densos. No obstante la separabilidad entre las clases (Tabla 2) es siempre aceptable desde el punto de vista estadístico y las confusiones (Tabla 3) se producen entre clases similares en cuanto a su comportamiento hidrológico y por tanto con números de curva parecidos.

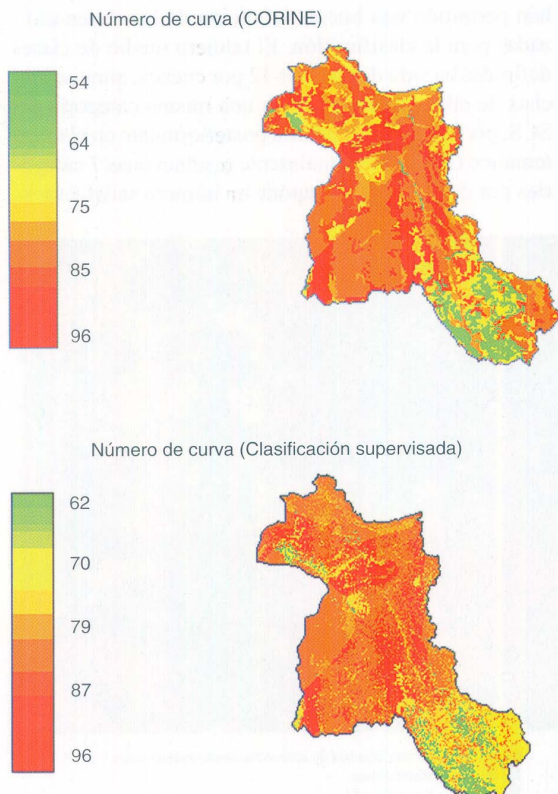


Figura 4. Números de curva obtenidos del CORINE y por teledetección correspondientes a la cuenca 8028 (río Alfambra)

Valores resultantes del número de curva

En la Tabla 4 se presentan los valores de los números de curva obtenidos a partir de los usos de suelo de CORINE-Land Cover y los deducidos a partir de la clasificación supervisada de imágenes de satélite. Como se puede observar, los valores areales en la cuenca no varían excesivamente; únicamente es en la cuenca del río Tajo donde existen ligeras diferencias (5%), resultado que apoya la tesis de Engman y Gurney (1991) y de Rango et al. (1983). Sin embargo, en los rangos de valores de cada cuenca se observan mayores diferencias. Si se analiza la variabilidad espacial del número de curva en cada cuenca según las dos fuentes de información, la diferencia es mayor. Las discrepancias entre los mapas de número de curva obtenidos a partir de una cartografía ya existente o de la clasificación supervisada de imágenes se deben principalmente a los siguientes factores:

1. Cambios existentes en los usos de suelo entre 1987 (fecha del proyecto Land Cover) y de la imagen clasificada.
2. Errores en las equivalencias entre usos del suelo del SCS y de la cartografía convencional. Estos errores se producen básicamente por las descripciones de la leyenda de la cartografía convencional, en concreto por la ausencia de datos sobre la densidad de la cubierta vegetal, y por la falta de uniformidad que existe entre las diferentes hojas cartográficas provenientes de autores distintos. Todo esto significó que para establecer equivalencias, se consideró que cada uso del suelo descrito por el proyecto Land Cover tenía la densidad media del país, sin establecer diferencias entre norte y sur. Así pues, en el área de estudio, se asignaron usos del SCS que se correspondían a una densidad mayor de la observada en las visitas realizadas a campo, sobretudo en los usos referentes a bosques y praderas (p.e. a los bosques de frondosas, teniendo en cuenta los característicos de todo el país, se les asignó el uso de suelo del SCS de “masa forestal muy espesa”, cuando en el área de estudio el proyecto Land Cover ha denominado bosque de frondosas a agrupaciones poco cohesionadas). Comparando los usos obtenidos por clasificación de la imagen y los del proyecto Land Cover, se observó que los valores del número de curva eran más bajos con la cartografía convencional (Figura 4), por lo que alguna de las equivalencias establecidas se modificaron. La Tabla 1 presentada anteriormente ya incorpora estas modificaciones, pero puede suceder que en otros usos que no aparecen en las cuencas de estudio, la descripción dada en el proyecto Land Cover no sea lo suficientemente específica.
3. Errores en la clasificación de los usos de suelo, debido a la similitud de las curvas espectrales de usos con diferentes números de curva. Esto es debido básicamente a que las clases de usos del suelo del SCS no se establecieron para ser diferenciadas espectralmente, por lo que algunas de ellas se confunden (p.e. bosque claro y bosque medio). También influye

DETERMINACIÓN DEL N° DE CURVA MEDIANTE LA TELEDETECCIÓN

	Rocude1	mafomed1	barbech1	plapob1	barbech2	cerinv4	mafocia1	cerinv5	mafomed3	mafocsp2	roimper1	rocude2	cerinv6	prapob4	prapob5	roimper2
Mafomed1																
Barbech1	1,960644															
Plapob1	1,999999	2,000000														
Barbech2	1,988698	1,990898	1,999983													
Cerinv4	1,999882	1,999987	1,834417	1,996489												
Mafocia1	1,999898	1,999945	2,000000	1,999786	1,999950											
Cerinv5	1,991891	1,844163	2,000000	1,994860	1,999999	2,000000										
Mafomed3	1,997732	1,981298	1,999195	1,998559	1,969363	1,907997	1,998429									
Mafocsp2	1,990118	1,872094	2,000000	1,998882	2,000000	1,999921	1,995904	1,994410								
Roimper1	1,997247	1,893404	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	1,999943	1,999171	1,865082							
Rocude2	1,999986	1,998228	2,000000	1,999309	1,999938	1,999954	1,999580	1,974046	1,996440	1,999928						
Cerinv6	1,993498	1,998633	2,000000	1,998899	1,999452	1,930874	1,999828	1,961734	1,999996	2,000000	1,999999					
Prapob4	1,999854	1,996957	2,000000	2,000000	2,000000	1,997334	2,000000	1,827969	1,999900	1,996455	1,999092	1,993186				
Prapob5	1,999898	1,999858	1,995040	1,993786	1,988730	1,999033	1,999920	1,830486	1,999497	2,000000	1,725866	1,999946	1,999972			
Roimper2	1,976413	1,901056	1,999871	1,548679	1,952391	1,999662	1,862141	1,998365	1,992850	1,999853	1,997611	1,998436	1,999991	1,994478		
Roimper3	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	
Roimper3	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	1,999832	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	1,968757

Medida de la separabilidad
(según Bhattacharrya):
Separabilidad media: 1.98
Separabilidad mínima: 1.55
Separabilidad máxima: 2.00

Tabla 2. Matriz de separabilidad correspondiente a la cuenca 4101 (río Azuer)

DETERMINACIÓN DEL N° DE CURYA MEDIANTE LA TELEDETECCIÓN

Parcelas de entrenamiento		Clase asignada en la clasificación														Exactitud media: 97.11% Exactitud promedio: 97.11%		
N° PIX-EL	RocUDE1	MAFOMEDI	ROIPE3	PRAPOB5	BARBECH1	ROIPE2	PLAPOB1	BARBECH2	CERINV4	MAFOCLAI	CERINV5	MAFOMED3	MAFOESP2	ROIPE1	ROCUDE2	CERINV6	FRAPOB4	TOTAL
rocude1	99.8	-	-	-	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
mafomed1	0.2	94.04	-	1.99	-	-	0.20	-	-	1.99	0.20	0.99	-	-	0.40	-	-	100
roiimper3	-	-	98.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.82	-	-	-	-	100
prapob5	-	0.29	-	95.23	0.44	-	3.30	0.37	-	-	-	-	-	0.15	-	-	0.22	100
barbech1	-	-	-	-	97.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
roiimper2	-	-	0.22	-	-	-	99.12	-	-	-	0.22	-	-	-	-	-	-	100
plapob1	-	-	-	3.66	-	-	95.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.22	100
barbech2	-	-	-	-	3.61	-	-	96.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
cerinv4	-	-	-	-	-	-	1.20	-	97.59	-	-	-	-	-	1.20	-	-	100
mafocla1	-	2.17	-	3.26	-	-	-	-	-	94.57	-	-	-	-	-	-	-	100
cerinv5	-	-	-	-	-	-	-	-	1.10	-	95.03	1.10	-	-	-	1.66	1.10	100
mafomed3	-	0.61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.39	-	-	-	-	-	100
mafocsp2	0.07	2.36	-	0.14	-	-	-	-	-	-	-	1.57	95.71	-	-	0.14	-	100
roiimper1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.43	-	-	96.09	-	-	3.48	100
rocude2	-	0.15	-	-	-	-	-	-	0.15	-	0.44	-	-	-	99.26	-	-	100
cerinv6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.95	-	-	-	-	98.05	-	100
prapob4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	100

Tabla 3. Matriz de confusión correspondiente a la cuenca 4101 (rio Azuer)

	Land Cover (CORINE)		Clasificación Supervisada		Land Cover (CORINE) Diferencia entre CORINE y Supervisada (A - B)/A x 100
	Rango de variabilidad espacial	Valores areales (A)	Rango de variabilidad espacial	Valores areales (B)	
3001	52-96	67	48-94	72	-7.5
4101	54-93	76	62-96	78	-2.6
4206	62-93	77	62-93	79	-2.6
8028	54-96	80	62-96	79	1.3
8087	54-93	80	62-93	80	-
9058	54-96	81	62-96	78	3.7

Tabla 4. Rangos de variabilidad espacial de números de curva y valores areales para cada cuenca analizada según la fuente de información de los usos de suelo utilizada

la época del año en la que se ha tomado la imagen de satélite (p.e. un campo de trigo tendrá una curva espectral muy diferente si la imagen se toma en mayo o en diciembre).

CONCLUSIONES

En muchos estudios hidrológicos, es importante el conocimiento del estado del uso de suelo, masas de agua, etc., en un instante determinado. La teledetección es la técnica que aporta una información más actualizada de estos aspectos. Si en particular se trabaja con modelos hidrológicos distribuidos, su importancia aumenta. Las diferencias observadas en la variabilidad espacial del número de curva, si se compara con deducida de la cartografía existente, ponen de relieve la necesidad de actualizar la información a partir de teledetección. Si se utilizan valores agregados del número de curva por cuenca (valores areales), los resultados muestran que las diferencias son escasas a pesar de que el número de clases obtenidas por teledetección es mucho menor. Esto pone de manifiesto que la teledetección será de gran utilidad en aquellas áreas donde la cartografía esté obsoleta, sea inexistente o de difícil adquisición (Ardiles y otros, 1996).

Además de los cambios en los usos de suelo, parte de las diferencias presentadas en los valores del número de curva obtenidos a partir de teledetección respecto a la cartografía convencional con la que se ha trabajado en el presente estudio (proyecto Land Cover - programa CORINE) se deben a la leyenda de dichos mapas: al estar realizadas por diferentes organismos, por regla general carecen de uniformidad, resultando extremadamente difícil el establecer tablas de equivalencias entre ellas y la leyenda de usos del suelo requeridos por el SCS. Igualmente, estas leyendas deberían tener algún tipo de indicación referente a la densidad de la cobertura vegetal, tal y como se presentan en los mapas del MAPA. Si no, es imposible distinguir entre un encinar del norte de España de uno del centro de la

Meseta. Aprovechando las facilidades que muestran los SIG y dado que es información en formato digital, este tipo de características deberían formar parte de tablas asociadas.

Así pues, los resultados obtenidos muestran la utilidad que puede tener la teledetección para actualizar información sobre parámetros hidrológicos, e incluso para generarla si no se dispone de otra fuente de información.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto *Estudio de las Posibilidades que ofrece la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica en la estimación de Parámetros Hidrológicos a escala regional* (AMB95-1099) de la CICYT.

BIBLIOGRAFÍA

- Ardiles-López, L.; Ferrer Juliá, M.; Rodríguez Chapparro, J. (1996) *The Use of GIS to estimate Hydrological Parameters in a Rainfall-Runoff Model. Proceedings of Joint European Conference and Exhibition on Geographical Information*. Barcelona, March 27-29 1996, vol. 1, pp. 408-417.
- Arozarena, A. y Herrero, M. (1994) El Programa CORINE, Programa Land Cover. *Una Metodología aplicada a las Islas Canarias*. En: Jornadas Técnicas sobre Sistemas de Información Geográfica y Teledetección Espacial aplicados a la Ordenación del Territorio y el Medio Ambiente. Vitoria, 21-23 Nov. 1994, pp. 87-98
- CEDEX(1994) *Caracterización Geomorfológica de la Cuenca Alta del Río Palancia. Utilización de la Teledetección y de los Sistemas de Información Geográfica*, Informe Parcial n^o 3 del Proyecto I+D Modelos Hidrológicos de Previsión de Avenidas: Aplicación en Cuencas Experimentales. Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).

- Chuvieco, E. (1996) Fundamentos de Teledetección Espacial. Editorial Rialp, 3ª edición, Manuales Universitarios Rialp, 568 pp.
- Engman, E.T. y Gurney, R. J. (1991) Remote Sensing in Hydrology. Chapman and Hall
- Ferrer, M.;Estrela, T.; Quintas, L.; Villaverde, J. (1997) *Actualización de la base de datos de cuencas españolas en el proyecto Friend-Amhy*. Ingeniería Civil. nº 108. pp.25-36
- Ferrer, M.; Rodriguez, J.; Estrela, T. (1995) *Generación Automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica*. Ingeniería del Agua, vol.2, nº4, pp.43-58
- McCuen, R.H. (1982) A Guide to Hydrologic Analysis using SCS Methods. Prentice Hall, 110 pp.
- McGregor (1987) *Using Landsat to derive Curve number for Hydrologic Models*. En: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing and ASCM Fall Convention. Reno, NV, ASPRS Technical Papers, pp.129-135.
- Rango, A.; Feldman, A.; George, T. y Ragan, R. (1983) *Effective Use of Landsat Data in Hydrologic Models*. Water Resources Bulletin. 19 (2): 165-174
- Richards, J.A. (1986) Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. Springer-Verlag, 281 pp.
- Sharma, K.D. y Singh, S. (1992) *Runoff estimation using Landsat Thematic Mapping data and the SCS model*. Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques, 37, 1 / 2.
- Temez, J.R. (1987) Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales. MOPU, Dirección General de Carreteras, nº 12, 111 pp