

La tecnología al servicio del medio ambiente

Francisco Sacristán R.¹

Resumen

La teledetección ofrece grandes posibilidades para la realización de progresos en el conocimiento de la naturaleza, aunque todavía no se ha logrado todo lo que de ella se esperaba, debido a que se piensan realizar perfeccionamientos en el nivel de resolución espacial, espectral y temporal de los datos. Además, se necesita mayor rigor científico en la interpretación de los resultados obtenidos, tratando de no extraer conclusiones definitivas de los estudios medioambientales realizados mediante técnicas de teledetección. Los modelos que se elaboran para interpretar los datos de teledetección

deberán tener el objetivo de eliminar los efectos ocasionados por la variabilidad en las condiciones de captación, la distorsión provocada por la atmósfera y la influencia de parámetros tales como la posición del Sol, la pendiente, la exposición y la altitud.

Palabras clave

Teledetección, tecnología, medio ambiente, comunicaciones por satélite

Technology at the service of environment

Summary

Teledetection technique offers great possibilities for the achievement of advance in the knowledge of nature although not everything expected has been accomplished yet, as there are still important improvements to perform in space, spectral and temporary resolution of data. In addition, a greater scientific rigor in the interpretation of obtained results is necessary, trying not to draw definitive conclusions from environmental studies performed with teledetection

Models elaborated to process data obtained from teledetection should eliminated effects caused by variability in collection conditions, distortion caused by the atmosphere and the influence of parameters such as sun position, slope, exposition and altitude.

Key words

Teledetection, technology, environment, satellite communications

¹ Doctor en ciencias de la información, licenciado en ciencias de la información, psicología y derecho, docente de la Facultad de Ciencias de la Información de la Universidad Complutense de Madrid. Cibercorreo: fransacris@ozu.es

Recibido: 21 de febrero de 2006 Aceptado: 15 de noviembre de 2005

Introducción

La preocupación de los ciudadanos por la escasez creciente de los recursos naturales y energéticos, así como la degradación que ha realizado el ser humano en su medio ambiente a través de sus actuaciones, muchas veces irracionales y contra natura, han planteado en el mundo entero la imprescindible necesidad de un mejor conocimiento de su hábitat natural dentro del cual se desenvuelve. La adecuada planificación de las actividades humanas que las circunstancias actuales exigen han de descansar en la realización de un inventario más completo y actualizado de las riquezas naturales nacionales e internacionales, ya sean agrícolas, forestales, hidrológicas, mineras, etc. De igual forma, la vigilancia sobre el medio ambiente debe ser mayor y esta actitud producirá una reducción en los impactos sufridos por el medio hasta la fecha. Los datos procedentes del servicio conocido como teledetección son una gran fuente de información y desempeñan un importante papel en la consecución de los dos objetivos anteriormente apuntados.

Centrándonos más específicamente en el caso español, una de las acciones más importantes debe enfocarse a la *calidad de las aguas* y la *detección de incendios*, dos problemas de todos. El agua es una de las grandes riquezas de la península Ibérica, indispensable para la vida y la ontogenia del ser humano. Si su calidad se deteriora, todos sufrimos las consecuencias: hombres, animales y plantas. Preservar y mejorar la calidad del agua de nuestros ríos es cuidar el medio ambiente para todos y para todo. Los ríos españoles tienen una longitud total de 172.000 kilómetros, más de cuatro veces la vuelta al mundo. Vigilar su situación, impedir cualquier vertido contaminante, requiere un sistema moderno de análisis que utilice las tecnologías de comunicación más avanzadas. Es preocupante que hoy un tercio de la longitud de nuestros ríos necesite atención y saneamiento inmediato, según la información suministrada por el Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente.

Para que todos dispongamos de agua en la cantidad precisa, en el momento y lugar en que sea necesaria, hace falta una actuación planificada, global, de regulación de recursos. Pero junto a ella es indispensable también conservar la calidad del agua. Por una parte, depurando el agua utilizada y, a la vez, vigilando su calidad e impidiendo su deterioro. Una tarea que hay que realizar de forma continua las 24 horas de cada día.

Otro asunto en el que existe una especial preocupación es el de los *vertidos urbanos*. En poco más de diez años, las grandes ciudades españolas, en su inmensa mayoría, han abordado este problema de forma conjunta con el de la depuración de las aguas residuales. Hacia mediados de los años ochentas, 60% de nuestra población estaba ya conectada a sistemas de depuración. La directiva europea 91/271/CEE planteaba importantes retos: antes del año 2000 debían depurar sus aguas todas las poblaciones con más de 10.000 ha-

bitantes. Antes del año 2005 debían hacerlo las poblaciones con más de 2.000 habitantes.

Las empresas públicas y privadas españolas no podrán competir ni en Europa ni en el mercado interior si no asumen los costes de depuración. Por todo ello, el Plan de Regularización de Autorizaciones de Vertidos y Gestión del Canon, previsto en el Plan Hidrológico Nacional, necesita fundamentarse en sistemas altamente fiables de control y vigilancia.

El uso de fertilizantes y plaguicidas en la agricultura provoca graves alteraciones en la calidad del agua. En consecuencia con lo acordado en la directiva europea 91/676/CEE sobre contaminación producida por los nitratos, el Ministerio del Medio Ambiente y el de Agricultura están desarrollando en nuestro país la normatividad necesaria.

Gracias a los trabajos realizados a través del sistema SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas), que se hace posible vía HISPASAT desde 1994, la "reutilización" de las aguas residuales se ha convertido en una actuación básica en la calidad de las aguas. Existen ya importantes programas piloto en las Islas Canarias y en Madrid. Esta nueva aplicación de las aguas permite liberar recursos cada vez mayores para abastecimientos y otros usos, asegurando las necesidades en agricultura, en el riego de parques y jardines y en la recarga de acuíferos.

La estrecha relación que la Universidad Complutense de Madrid tiene con la sociedad Hispasat S. A. ha permitido que dispongamos de una información muy detallada de lo que constituye el núcleo central de este artículo sobre medio ambiente: el Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (SAICA). Adelantamos aquí algunos de los objetivos más importantes de este programa nacional:

- Detectar y controlar la contaminación de los ríos y acuíferos, con carácter preventivo.
- Cumplir y hacer cumplir las directivas de la Unión Europea sobre la calidad de las aguas.
- Controlar exhaustivamente los niveles de calidad por tramos de río en función de los requisitos establecidos para cada uso (abastecimiento, regadío, vida piscícola, etc.) y llegar a los objetivos finales de calidad de los planes hidrológicos de cuenca.
- Proteger de vertidos indeseados las 24 horas del día respecto a determinados empleos específicos, sobre todo los abastecimientos a núcleos de población.
- Aplicar de forma eficiente la normativa española, en particular la Ley de Aguas, sancionando de forma ágil a los responsables, empresariales y particulares, de vertidos contaminantes para la salud.
- Promover nuevas tecnologías y procedimientos modernos de gestión, que permitan, con poco personal de vigilancia, realizar una amplia cobertura de control de nuestra red hidrográfica de forma continua.

El SAICA constituye, dentro de su género, uno de los sistemas más avanzados y pioneros de Europa, en concep-

ción y tecnología. Es, a la vez, un sistema extremadamente económico, que permite la cobertura de todas nuestras cuencas hidrográficas con un presupuesto de 10.000 millones de pesetas, para el que cuenta con apoyo de fondos de la Unión Europea. Ha recibido el plácet de la Comisión Europea.

Este programa es un sistema de ámbito nacional que recibe y procesa durante las 24 horas del día la información procedente de las Redes Integrales de Control de Calidad de las Cuencas Hidrográficas. Permite el control continuo y sistemático de la cantidad y calidad de las aguas de los ríos, según el uso a que estén destinados: abastecimiento, regadío, baños, etc.

El Sistema SAICA permite tener una información real e inmediata de lo que sucede en nuestros ríos y acuíferos. Por ello se pueden desgranar, entre otras, las siguientes funciones:

- Alerta automática de protección, principalmente para abastecimientos.
- Diagnósticos continuos de calidad por tramos de río, según los usos de cada segmento de terreno.
- Datos estadísticos, informes temáticos, con seguimiento de los diferentes tipos y niveles de contaminación.
- Estrategias de control, vigilancia y sanción de vertidos contaminantes.
- Simplificación de procedimientos e informatización y mayor agilidad en las autorizaciones de vertido y expedientes sancionadores.
- Informes a la Unión Europea para el cumplimiento de las diferentes directivas sobre la calidad de las aguas.

A modo de apunte general en esta introducción, que posteriormente desarrollaremos con más amplitud y detalle, hay que precisar que en cada cuenca hidrográfica, el SAICA cuenta con una red de información de calidad de las aguas. En total, el sistema se compone de:

- 1.000 estaciones de muestreo periódico (EMP).
- 200 estaciones de muestreo ocasional (EMO).
- 115 estaciones automáticas de alerta (EAA).
- 9 centros periféricos de proceso (CPP), uno en cada cuenca hidrográfica.
- Una unidad central en el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- El enlace entre todo el sistema se realiza usando el sistema Hispasat.

Las “estaciones automáticas de alerta” realizan mediciones de forma continua de los diferentes parámetros elegidos sobre la calidad de las aguas. Realizan la alerta cuando detectan que determinados parámetros de calidad superan los valores exigidos por la normativa vigente.

Disparada una alarma, el sistema pone en marcha automáticamente mecanismos de interrupción de tomas de suministro de agua a poblaciones, a la vez que lleva a cabo los análisis que permiten identificar el vertido causante de la alarma y su posible origen, facilitando así las medidas sancionadoras.

Las Estaciones de Control, instaladas en los puntos más conflictivos de los ríos, transmiten a los Centros de Proceso de cada cuenca y a la Unidad Central del Ministerio de Medio Ambiente la información sobre la calidad de las aguas a través del satélite español Hispasat, mediante el sistema VSAT. En los centros de control se investigan las causas, se analizan las posibles consecuencias de cada contaminación y se advierte a la inspección. Entran así en funcionamiento los mecanismos de policía de agua previstos en nuestras leyes.

En estos momentos, el funcionamiento normal del sistema SAICA pasa por ser la mejor opción para mantener y mejorar la calidad de las aguas de nuestros ríos y acuíferos. Este sistema tiene en cuenta las responsabilidades en materia de saneamiento y depuración de las administraciones locales y autonómicas. Hace posible la coordinación con la administración central del Estado, que es a quien corresponde el control, vigilancia y conservación del dominio público hidráulico, garantizando así la calidad de las aguas continentales.

Este sistema contribuye de forma importante a la realización del Plan Hidrológico Nacional, convirtiendo a España en uno de los países europeos con más y mejores recursos hidrológicos, a pesar de los pasados años de sequía pertinaz. En suma, una buena herencia para las próximas generaciones si saben aprovecharlo con racionalidad y coherencia.

Aparte del sistema SAICA, ampliaremos información con apartados sobre el avance más reciente de la teledetección, tecnología abanderada en el estudio de los impactos medioambientales. Nos centraremos en algunos de los antecedentes, en las características de los datos estadísticos de teledetección y en los satélites de recursos naturales anteriores a Hispasat, para luego exponer, con más profundidad, nuestra explicación sobre el SAICA.

La función de la teledetección en el estudio del medio ambiente

La teledetección de recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biosfera, que está basado en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre. Todos los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia que se denomina *signatura espectral*. La teledetección estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre estas y las características de los diferentes materiales terrestres. Su objetivo esencial se centra en la identificación de los materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella se operan a través de su signatura espectral. La información se recoge desde plataformas de observación, que pueden ser aéreas o espaciales, pues los datos adquiridos a partir de sistemas situados en la Tierra constituyen un estadio preparatorio de

la teledetección propiamente dicha y se consideran como campañas de verdad en terreno.

Las plataformas de observación portan los captosres, es decir, aquellos instrumentos que son susceptibles de recibir y medir la intensidad de la radiación que procede del suelo en una cierta gama de longitudes de onda y transformarla en una señal que permita localizar, registrar y digitalizar la información en forma de fotografías o imágenes numéricas grabadas en cinta magnética compatibles con un ordenador (CCT).

Los captosres pueden ser cámaras fotográficas, radiómetros de barrido multiespectral (MSS), radares y láseres. Estos aparatos generan imágenes analizando la radiación emitida o reflejada por las formas y objetos de la superficie terrestre en las longitudes de onda en las cuales son sensibles (ultravioleta visible, infrarrojo próximo, infrarrojo técnico, hiperfrecuencias) con el fin de reconocer la variada gama de formas y objetos.

Satélites de recursos naturales Landsat

Con objeto de hacer un breve recorrido histórico sobre los satélites con servicios destinados al cuidado del medio ambiente, empezamos este apartado por el sistema que se encuentra como uno de los pioneros: el Landsat, primer satélite de recursos naturales lanzado por la NASA en julio del ya lejano 1972. Con posterioridad a este lanzamiento, se pusieron en órbita los satélites Landsat 2 y Landsat 3 en enero de 1975 y marzo de 1978, respectivamente, con la finalidad de asegurar la recogida de datos para ulteriores estudios. Los satélites Landsat están situados en una órbita casi polar y sincrónica con el Sol, a 920 km de altura sobre la superficie de la Tierra. Tardan 103 minutos en efectuar una órbita completa, barren la superficie terrestre cada 18 días y obtienen información simultánea de zonas de la Tierra de 185 x 185 km (aproximadamente 34.000 km).

Los satélites Landsat están provistos de sensores remotos de varios tipos. El primero es el RBU (*return beam vidicon*) que consiste esencialmente en un sistema de cámaras de televisión. El segundo sensor es un equipo de barrido multiespectral o MSS (*multispectral scanner*), que registra la energía reflejada por la superficie terrestre en las regiones verde, roja e infrarroja del espectro electromagnético. La unidad elemental de información tiene una resolución espacial de 79 metros.

Las señales analógicas registradas por los sensores se convierten a un formato digital y se transmiten a la Tierra. Los datos del Landsat se comercializan, bien en forma de productos fotográficos, bien en forma de imágenes digitales grabadas en cintas magnéticas compatibles con ordenador.

Características de los datos de teledetección

El conjunto de los datos adquiridos mediante procedimientos de teledetección de aviones o naves espaciales comprende siempre tres tipos de información:¹

- Una información espacial que representa la organización en el espacio físico de los elementos que constituyen la imagen.
- Una información espectral que caracteriza y puede conducir al conocimiento de la naturaleza de la superficie terrestre.
- Una información temporal que permite la detección de los cambios operados en la superficie de la Tierra con el transcurso del tiempo.

Además, los sensores remotos, especialmente los radiómetros de barrido multiespectral de la serie de satélites Landsat, realizan una percepción muy particular del medio ambiente y del paisaje que se caracteriza porque existe una homogeneización de la imagen, que es función del nivel de resolución de los sensores o captosres.

La información elemental o píxel (contracción en inglés de “*picture element*”) tenía, a principios de la década de los ochentas, en el satélite Landsat, unas dimensiones sobre el terreno de 56 m x 79 m. Estas unidades informativas se disponen en la superficie terrestre a modo de malla geométrica con una cierta inclinación respecto de meridianos y paralelos, pareciéndose en cierto modo a la malla UTM o Lambert. La malla del Landsat no tiene ninguna relación con los límites geográficos de los objetos situados en la superficie terrestre. En estas condiciones, lo más normal es que un píxel tenga una naturaleza heterogénea, pudiendo englobar —en el caso de una zona urbana— una manzana de casas, un jardín y una autopista.

Las diferencias locales se diluirán en la respuesta promedio y este efecto crea una ilusión sobre la existencia de zonas de transición y zonas de contacto gradual entre distintas unidades de paisaje. Este efecto no se manifiesta cuando existe un contraste brusco entre dos usos del suelo contiguos; por ejemplo, un movimiento de tierras reciente en el interior de un bosque cerrado. La existencia de un contraste brusco puede permitir observar en una imagen objetos cuyas dimensiones sean inferiores a las de un píxel.

En definitiva, los datos adquiridos a través de teledetección se caracterizan por las siguientes propiedades:²

- Posibilidad de obtener información sobre aspectos del medio natural que escapan totalmente a nuestros sentidos (ondas de radar, infrarrojo de Landsat, etc.) La experiencia “natural” del hombre es, por lo tanto, nula en estos dominios espectrales y, por esta razón, se realizan “visualizaciones” que tienen una función y utilidad análogas a la de las fotografías aéreas y que se denominan imágenes, para evitar la confusión.
- Estas informaciones que son registradas por los sensores y que miden la cantidad de energía reflejada o emitida por los objetos naturales que componen el paisaje son de tipo numérico y se prestan al tratamiento matemático. Por otro lado, su extremada abundancia obliga al empleo de grandes ordenadores y métodos de tratamiento de datos muy sofisticados y potentes.

- Los datos extraídos de los servicios de teledetección nos revelan ciertos aspectos de los ecosistemas difíciles de estudiar, prácticamente desconocidos, contribuyendo de una forma eficaz a su conocimiento y su funcionamiento (detección de enfermedades en las plantas, efectos del estrés debido a la falta de agua, transpiración, régimen térmico, etc.).
- Por último, la teledetección permite seguir la evolución de las grandes extensiones forestales que persisten en la superficie del globo, tener una visión de conjunto sobre los efectos producidos por las grandes catástrofes (como por ejemplo, las sequías aterradoras de las regiones saharianas de África) y reconocer ciertos fenómenos de polución a gran escala en el cielo y en el mar.

Resolución espacial de los satélites de protección medioambiental

En la década de los años setentas, la mayoría de las imágenes de satélites empleados en el estudio de los fenómenos terrestres pertenecían a la serie Landsat. Muchos científicos han realizado aplicaciones empleando dichas imágenes, sobre todo en los Estados Unidos, pero también muchos otros se dieron un compás de espera debido a la baja resolución espacial de dichas imágenes con respecto a la fotografía aérea convencional. La mayoría de los satélites de recursos naturales, que se diseñaron y construyeron para lanzarlos al espacio en la década de los ochentas, han proporcionado imágenes con mejoras sustanciales en la resolución espacial con respecto a la que ofrecían los satélites pioneros.

La necesidad de disponer de imágenes con mejor definición espacial quedó parcialmente satisfecha con el lanzamiento en 1982 del Landsat D y por el satélite SPOT (Sistema Probatorio de Observación de la Tierra), que fue puesto en órbita en 1984. Además, el lanzador Columbia dispuso de cámaras métricas con resoluciones inferiores a los 10 metros. Estos avances en la tecnología de los sensores remotos permitían predecir a Allan que hacia mediados de los años ochentas, la mapificación de las grandes regiones a partir de las imágenes satelitales estaría muy extendida.³

En un principio, las imágenes se construían por medio del movimiento de un espejo situado transversalmente a la órbita del satélite. La imagen final estaba constituida por una matriz de elementos de imágenes o píxeles. Este método se empleó en el sistema multispectral scanner MSS de los satélites Landsat 1, 2 y 3, y se empleó en el mapeado temático del Landsat D.

En los radiómetros de barrido (pushbroom radiometers), no es necesario el espejo oscilante antes mencionado, pues un chip monolítico de silicón posee cientos o miles de detectores en línea con amplificadores y circuitos electrónicos multiplexados.⁴ Estos detectores hacen un muestreo electrónicamente, de tal forma que un vector que contiene toda una línea de la imagen se registra al mismo tiempo que el

satélite avanza a lo largo de la órbita un elemento de resolución.

Las carreteras y ríos de anchura inferior a 79 metros son frecuentemente detectables en las imágenes Landsat. La alineación de los objetos es también muy importante y la eficacia en la detección depende mucho de que el eje central del objeto se encuentre en la mitad de una línea de barrido o en la frontera entre dos líneas de barrido. En el segundo caso, la detección es más difícil. Mientras hay objetos inferiores a 79 metros que se pueden detectar, muchos objetos de tamaño igual o mayor no son detectables. En las imágenes Landsat se ha mostrado que los objetos de bajo contraste solo son detectables si tienen una longitud superior a 250 metros.

Una consecuencia obvia de todo esto es que la habilidad del sensor para detectar objetos depende del contraste con los alrededores y está en relación con la sensibilidad que posea el captor para detectar pequeñas diferencias. El tamaño mínimo de los objetos que son detectables en una imagen también está en función de las condiciones atmosféricas locales.⁵ Finalmente, para que la utilidad de los satélites se entienda mejor y los futuros sistemas se diseñen de una manera más eficiente, Townshend indicaba que sería necesario investigar dos áreas principales:⁶

- Elaboración de medidas de resolución que reflejen mejor la cantidad y calidad de la información que puede extraerse de los datos.
- Desarrollo de índices que midan las propiedades espaciales de los atributos (vegetación, geología, etc.) en el terreno.

Métodos de tratamiento para la extracción de información de los datos de teledetección

El lanzamiento del satélite Landsat 1 en 1972 comenzó una nueva era en los estudios de medio ambiente, proporcionando datos de alta calidad que se pueden obtener a intervalos frecuentes sobre cualquier zona de la superficie terrestre. Sin embargo, la capacidad de obtener información desde los satélites es mayor que la capacidad que hasta hace poco tiempo se tenía para analizar e interpretar los datos de una forma totalmente eficaz.

En los albores iniciales del programa Landsat, se estableció una especie de diálogo de sordos entre los promotores de la teledetección (que a menudo tenían una formación en ingeniería técnica o superior, en física o en informática) y los usuarios potenciales (geólogos, geógrafos, agrónomos, forestales, hidrólogos, etc.), debido a que los primeros interpretaban las imágenes de forma demasiado ingenua, según la opinión de los usuarios, que a su vez hacían gala de gran escepticismo, alimentado por una cierta inercia frente a su necesario reciclaje.

De una forma progresiva estas barreras tienden a desaparecer y así, cada vez más, gentes de formación académica

muy diferente tienden a las colaboraciones mutuas y al intercambio de informaciones. Además, en teledetección existe muy a menudo una interacción grande entre las técnicas y las aplicaciones, debido a que estas últimas permiten frecuentemente replantearse los métodos empleados.

Las técnicas de tratamiento de datos en teledetección tienen como objetivo esencial ayudar al investigador en la interpretación de los datos procedentes de sensores remotos.

La interacción hombre-máquina

Desde hace más de una década, los esfuerzos realizados para extraer información a partir de sensores remotos multiespectrales han venido dando resultados progresivamente. Dichos esfuerzos se han centrado esencialmente en la aplicación de las técnicas de reconocimiento automático de patrones a las medidas de multiespectro que caracterizan a los elementos de resolución.

Generalmente, las escenas son clasificadas píxel a píxel basándose en los vectores de medidas espectrales que están asociados a los elementos que componen la imagen, empleando para este proceso ordenadores y programas desarrollados al efecto. Los sistemas completamente automáticos de tratamiento de imágenes digitales no han proporcionado resultados del todo satisfactorios en las aplicaciones relativas a la mapeación de usos del suelo.

La perfección del ojo humano es muy grande y el papel que ha de desarrollar el analista como fotointérprete es esencial, tanto en la interpretación de las imágenes fotográficas como en el proceso automático de las imágenes digitales. Por ello, cada vez más, los sistemas de tratamiento se diseñan de tal forma que en el proceso intervengan más activamente especialistas de las ciencias medioambientales.

El papel del especialista consiste en incorporar al sistema su conocimiento del medio ambiente, particularmente, las peculiaridades regionales de las imágenes en cuestión, localizando en el espacio los distintos tipos de cubierta u otros fenómenos que están acordes con las relaciones ecológicas y/o antropógenas que se manifiestan en las imágenes.

Los progresos que preferentemente se han llevado a cabo en la cuestión del tratamiento numérico consisten en la puesta a punto de dispositivos de visualización que permiten un diálogo permanente del investigador con el ordenador, pudiendo escoger aquellos los tratamientos numéricos adecuados y, una vez aplicados, controlar los resultados, apreciando la concordancia existente entre dichos resultados y sus conocimientos.²

Clasificación automática de los datos de teledetección

La clasificación automática de los datos digitales de teledetección es una gran ayuda para el investigador en la interpretación de imágenes multiespectrales. El objetivo de toda clasificación es el reconocimiento de clases o grupos cuyos miembros tengan ciertas características en común. El resul-

tado ideal sería la obtención de clases mutuamente excluyentes y exhaustivas.

En teledetección, las clases obtenidas, cuando se realiza una clasificación, deben ser espectralmente diferentes unas de otras y, además, deben contener un valor informativo de interés para la investigación de que se trate. Tradicionalmente se han seguido dos enfoques en la realización de las clasificaciones: uno de tipo supervisado y otro, no supervisado.

El enfoque de tipo supervisado supone un entrenamiento de clasificador a través de un conocimiento a priori de la verdad terreno que se ha seleccionado como representativa de las clases informacionales que se quieren reconocer en la imagen.

El enfoque no supervisado no precisa el conocimiento previo de una verdad terreno y tiene la pretensión de segmentar la imagen en una serie de clases por procedimientos exclusivamente numéricos, basándose solo en la estructura que posean los datos espectrales.

En las clasificaciones supervisadas, normalmente se parte de la hipótesis de que la distribución de los datos espectrales es normal multivariante, lo que permite la utilización de procedimientos paramétricos, tales como los clasificadores bayesianos. Ahora bien, suele ocurrir que los datos espectrales no se ajustan bien a la distribución multinormal, pudiendo ser arriesgado realizar la hipótesis anterior.

Maynard y Strahler propusieron el clasificador LOGIT,⁷ un clasificador no paramétrico. En una simulación realizada con ordenador generando datos no normales, el clasificador LOGIT fue significativamente superior al bayesiano, mejorando la exactitud en 34%. Cuando se utilizó dicho procedimiento en una zona agrícola, y con datos Landsat reales, el incremento de precisión experimentado fue del 39%.

Los mayores problemas que subyacen a las clasificaciones de tipo supervisado son:

- Validez de las clases espectrales, construidas en la fase de entrenamiento de los clasificadores, para representar a las clases informacionales que se quieren reconocer.
- Elevado coste (desde el punto de vista del tiempo de cálculo) que puede suponer la realización de tales clasificadores. Una forma eficaz de reducir el coste de las clasificaciones consiste en el empleo de las tablas de clasificación. Estas tablas están basadas en la alta correlación que presentan las cuatro bandas del radiómetro del Landsat, lo que reduce el número de combinaciones espectrales distintas que se pueden presentar en la imagen. De esta forma, normalmente en una imagen Landsat, solo se presentan varios miles de combinaciones de las aproximadamente 16 millones de combinaciones espectrales posibles.

La fiabilidad de las clasificaciones realizadas mediante este procedimiento suele tener el mismo orden de magnitud que la obtenida mediante los métodos convencionales, pero el tiempo de cálculo es sensiblemente inferior.

Técnicas de mejora de las clasificaciones de datos en teledetección

La modesta y limitada precisión que se obtuvo desde un punto de vista estrictamente estadístico en la realización de clasificaciones convencionales de una sola imagen Landsat fue un estímulo esencial en los investigadores para la realización de estudios multitemporales y análisis que tuviesen en cuenta el contexto o información espacial de la imagen, además de la información espectral que es la característica.

Estudios multitemporales

El objetivo principal de los estudios multitemporales es encontrar una forma de combinar o integrar en el proceso varias imágenes correspondientes a diferentes fechas, con distintos estados fenológicos en la vegetación, para a la obtención de un incremento en la precisión de las clasificaciones.

La integración de imágenes de satélite relativas a una misma área pero de fechas sucesivas se realiza a través de un procedimiento de registro multitemporal de las imágenes. Este proceso consiste, en líneas generales, en obtener la posición de una imagen con respecto a otra que proporciona la máxima correlación en el espacio de los datos radiométricos. El resultado final que se obtiene es una sola imagen que posee tantos canales espectrales como bandas suman las imágenes procesadas.

En los estudios multitemporales se pueden emplear diversas metodologías, pero conviene tener en cuenta algunas consideraciones:

- La intersección de clasificaciones de imágenes pertenecientes a distintas fechas reduce generalmente las clasificaciones erróneas, en el sentido de que un elemento que no posea cierta cualidad sea clasificado como poseedor de ella, pero también aumenta los errores en el sentido de que un individuo que tiene dicha cualidad se clasifique como que no la posee.
- La superposición o integración de las imágenes previamente a la clasificación reduce generalmente los errores de clasificación en ambos sentidos.
- El producto de las probabilidades de clasificación por separado en ambas imágenes generalmente proporciona mejores resultados que el método anterior, y está además mejor adaptado a la metodología de clasificación supervisada, pues permite mayor libertad en la elección de las áreas de entrenamiento en cada una de las imágenes por separado.

Expondremos algún ejemplo que ayude a la explicación de todo lo anterior. Así, Megier ensayó los procedimientos anteriores en un problema referente al inventario de choperas en el valle del río Po y consiguió mejorar la ratio: número de píxeles de chopo en la realidad, del 0,94 (estudio unitemporal) al 0,96 (estudio multitemporal).⁸

Clasificaciones de contexto

Las imágenes de teledetección se pueden considerar como un proceso aleatorio en dos dimensiones y las características de este proceso se pueden incorporar a la estrategia de clasificación. Mientras los datos espectrales se han empleado en la mayoría de las aplicaciones de Landsat, algunos investigadores han fijado su atención en el contexto espacial de los mismos.

Una de las razones por la que en los inicios de la investigación de cuestiones medioambientales no se tomó con la debida consideración la información espacial estuvo en que los datos espectrales pueden analizarse fácilmente píxel a píxel, mientras el empleo de la información del contexto ecológico requiere la consideración de varios o muchos píxeles para obtener una estructura espacial significativa.

El análisis espacial de los datos es más difícil que el análisis espectral, pues requiere el conocimiento de complejas técnicas matemáticas para poner de manifiesto la estructura de los datos.

La denominación de “clasificadores de contexto” alude a aquellas técnicas de clasificación que tienen en cuenta las características ecológicas y espectrales de las imágenes de teledetección con el objetivo de obtener resultados más precisos.

Las características espaciales incluyen factores tales como la forma, la textura y las relaciones estructurales. Una manera de incorporar la información espacial puede consistir en la hipótesis de que el tipo de cubierta asociado a un píxel determinado no es independiente del tipo de cubierta que presentan los píxeles vecinos. Por ejemplo, determinados tipos de cubierta del suelo aparecen con mayor frecuencia en un contexto dado. A priori, es fácil aceptar que una parcela de trigo es más probable que esté al lado de una de cebada, que contiguamente a una zona urbana de alta densidad.

Desde el punto de vista de la clasificación estadística, existirán más posibilidades de clasificación correcta de un píxel si, además de la información espectral asociada al mismo, se tienen en cuenta sus relaciones con las medidas de reflectancia y/o las clases asignadas a los píxeles de su vecindad.

Swain realizó experiencias usando clasificadores de contexto y obtuvo los siguientes resultados: empleando un conjunto de 50 x 50 píxeles situados en una zona agraria de Williston (norte de Dakota), con una resolución espectral y espacial semejante a la del Thematic Mapper del Landsat D, obtuvieron porcentajes de clasificación correcta que oscilan entre el 82,5 (en el caso del clasificador convencional) y el 96 (en el caso del clasificador de contexto).⁹

Con el empleo de un conjunto de datos relativos a una zona urbana en Grand Rapids (Michigan), obtenidos de una imagen Landsat, los resultados de clasificación correcta variaron entre el 54% (clasificador convencional) y el 96% (clasificador de contexto). Cuando se realizó un experimento

to en una situación real sobre un área extensa de Grand Rapids, en el que se emplearon muestras para comprobar el porcentaje de clasificación correcta, el uso de información espacial mejoró este porcentaje del 81,6 al 84,6%.

Por último, cabe reseñar que el tiempo de cálculo en el empleo de los clasificadores de contexto puede ser sensiblemente superior al caso de los clasificadores convencionales, sobre todo si se emplean imágenes de alta resolución espacial.

Integración de información de teledetección en bases de datos medioambientales

La amplia gama de sistemas de teledetección existentes (películas sensibles, radiómetros, radares, etc.) y las diversas plataformas desde donde actúan (globos, aviones, satélites, etc.) constituyen un avanzado sistema integrado de informaciones de gran apoyo logístico y científico para el estudio del medio natural en diferentes niveles, tales como usos del suelo, costas, bosques, recursos acuáticos, cuestiones biofísicas, paisaje, calidad de los distintos nichos ecológicos animales y humanos, impacto de grandes obras públicas civiles, catástrofes naturales, etc.

El conjunto de los datos obtenidos vía teledetección tiene una naturaleza geográfica, física y radiométrica y, en consecuencia, distinta de las informaciones recogidas por los métodos convencionales. La información de teledetección es repetitiva, global y sintética, pues toma en consideración de forma simultánea un elevado número de variables relativas al medio ambiente.

Cada administración, ya sea local, regional autónoma o estatal, recoge informaciones sobre el medio ambiente y realiza un archivado y almacenaje en bancos de datos geográficos, a menudo incompatibles unos con otros. La teledetección, que debe apoyarse en datos complementarios de verdad, terreno para la producción de informaciones válidas, tiene pocas posibilidades para desarrollarse normalmente si este contexto no cambia. Para solventar estas trabas, es básico que los datos relativos al medio ambiente puedan circular con fluidez de una institución a otra, esencialmente a través de las avanzadas tecnologías electrónicas e informáticas.

La teledetección completa los sistemas de información tradicionales y además permite la posibilidad de incluir los límites administrativos convencionales o geográficos en los resultados derivados de su análisis e interpretación. De esta forma, se puede disponer de documentos adaptados a las necesidades de los planificadores y gestores de los recursos naturales. Como es lógico deducir, para que esta herramienta de recolección de datos relativa al medio ambiente sea tan eficiente como deja entrever su potencial, son necesarias la transferencia y la integración de los métodos tradicionales de gestión de las informaciones medioambientales en los sistemas de información ya existentes. Este proceso es neces-

sario para la actualización conveniente de los inventarios de recursos naturales y para llevar una contabilidad adecuada en términos físicos, detectando los cambios que se vayan produciendo en el transcurso del tiempo sobre el recurso en cuestión.

Un sistema integrado de información geográfica debe estar complementado en un ordenador (generalmente de gran capacidad de almacenamiento en disco) y debe poseer un soporte lógico (software) suficiente que le permita almacenar, manipular y recuperar la información localizada geográficamente.

Los sensores son una fuente muy importante para los sistemas de información geográfica y estos, a su vez, proporcionan un uso y diseminación de aquellos más eficiente.

Los modelos de paisaje

La denominación de “modelos de paisaje” se refiere a la integración de los datos de sensores remotos en un sistema de información geográfico. Esta combinación sinérgica produce un banco de datos multivariados y multitemporales que posibilitan una configuración matemática del paisaje de la misma forma que un modelo en tres dimensiones del terreno se representa por un mapa topográfico.

El uso de una base de datos geográficos puede mejorar los resultados de las clasificaciones automáticas realizadas con datos de teledetección, al incorporarse a modo de nuevas variables espectrales. De forma recíproca, la utilización de datos espectrales puede proporcionar ventajas en aquellos problemas referentes a la mapificación de tipos de cubierta del suelo y en los modelos de planificación física del territorio.

Se han desarrollado técnicas de proceso automático que combinan los datos Landsat con información de tipo geográfico —altitud, pendiente, exposición, insolación, etc.—, con el objetivo, por ejemplo, de obtener mapificaciones más precisas de las especies forestales en áreas de montaña.

En un trabajo minucioso realizado por Fleming y Hoffer sobre una región abrupta de las Montañas Rocosas en Estados Unidos, con el objetivo de estudiar los tipos de cubierta forestal, se llegó a las siguientes conclusiones:¹⁰

- La elaboración de un modelo de distribución topográfica de las especies proporciona una descripción cuantitativa estadísticamente significativa. Además, este modelo proporciona una descripción espectral más detallada de los tipos de vegetación porque considera la variabilidad de las condiciones ecológicas. Esta técnica permite la reducción notable de los tiempos de cálculo precisos para el entrenamiento de los clasificadores.
- El uso de datos geográficos conjuntamente con datos espectrales mejora significativamente el porcentaje de clasificación correcta de las clases de cubierta forestal con respecto a los resultados obtenidos usando exclusivamente los datos espectrales.

El empleo de la altitud conjuntamente con los datos espectrales proporciona una mejora en la precisión de los clasificadores del 15% aproximadamente. Los datos de sensores remotos procedentes de satélites espaciales son una fuente importante de información para la gestión y toma de decisiones dentro del sector agrícola y forestal, como lo son las fotografías aéreas.

Es esencial prestar mucho más atención a las técnicas de teledetección que se manifiestan útiles y eficaces para la gestión forestal en el ámbito geográfico local, dado que las decisiones locales pueden ser más importantes que los resultados de una planificación genérica a pequeña escala realizada más en términos burocráticos.

La evolución experimentada por la teledetección desde las plataformas aéreas hasta los satélites espaciales es un paso muy significativo respecto a la creación de una base de datos de recursos terrestres más completa que la existente hoy en día. Para conseguir este objetivo es imprescindible resolver muchos problemas relativos a la continuidad en la adquisición de los datos, su oportunidad y adaptación a las necesidades actuales, costo, etc.

Referencias

1. Guillot CH. Rapport de synthèse, C.R Table ronde C. N. R. S. écosystèmes bocagers, Rennes; 1976.
2. Tricart JL. Paysage et écologie. Revue de Géomorphologie Dynamique: Geodynamique Externe. Etud Integree du Milieu Naturel 1979;28(3):81-95.
3. Allan JA. Land use changes in land use in the Urla area of Aegean Turkey. En: Van Genderen JL, Collins WG. (eds.) Monitoring environmental change by remote sensing. Birmingham: The Remote Sensing Society; 1977.
4. Thompson LL. Remote sensing using solid state array technology. Photogrammetric Eng Remote Sensing 1979;45:47-55.
5. González F, Cuevas JM. Los satélites de recursos naturales y sus aplicaciones en el campo forestal. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias; 1982.
6. Townshend JR. The spatial resolving power of earth resources satellites. Prog Phys Geogr 1981;5(1):32-55.
7. Maynard PT, Strahler AH. The logit classifier, a general maximum likelihood discriminant for remote sensing applications. En: International Society of Electrical and Electronic Engineers. Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, MI: 1981.
8. Megier J. Multi-temporal digital analysis of Landsat data for inventory of poplar planted groves in North Italy”, proceedings of the International Symposium on image Processing, Interactions with photogrammetry and Remote Sensing, Graz. 1977 P. 135-140.
9. Swain PH, Siegel H, Smith BW. A method for classifying multispectral remote sensing data using context. p. 343-352. En: Proceedings of the Symposium on Machine Processing Of Remotely Sensed Data. West Lafayette, IN: Purdue University; 1979.
10. Fleming MD, Hoffer RM. Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping. p. 377-390. En: Proceedings of the Symposium on Machine Processing Of Remotely Sensed Data. West Lafayette, IN: Purdue University; 1979.

Otras referencias recomendadas

- Cole MM, Owen ES, Beaumont TE, Custance NDE. Recognition and interpretation of spectral signatures of vegetation from aircraft and satellite imagery in Western Queensland, Australia. p. 243-287. En: European Earth Resources Satellite Experiments: Proceedings of a Symposium Frascati, Italy ESRO SP 100; 1974.
- Heller RC. Evaluation of ERTS-1 data for forest and rangeland survey. Berkeley, CA: US Department of Agriculture; 1975.
- Husson A. Télédétection des incendies de forêts en région méditerranéenne. París: Les Cahiers de l'OPIT; 1980.
- Jano AP. Timber volume estimate with Landsat-1 imagery, proceedings of the workshop on Canadian forest inventory methods. Ontario: University of Toronto; 1975
- Kalensky Z. ERTS thematic map from multirate digital images. En: Symposium on Remote Sensing and Photo Interpretation, Banff, Alberta, Canada, October 7-11, 1974, Proceedings. Ottawa: Canadian Institute of Surveying; 1974. p. 767-785.
- Lapietra G, Cellerino GP. Elaborazione di immagini Landsat mediante il sistema ER-MAN II per un inventario della pioppicoltura italiana. Cellulosa e Carta 1980;31(6):3-20.
- Shasby MB, Burgan RE, Johnson RR. Broad area forest fuels and topography mapping using digital Landsat and terrain data. In: Proceedings of the 7th international symposium on machine processing of remotely sensed data, West LaFayette, LO; 1981. p. 529-537.
- Van Genderen JL, Lock, BF. A methodology for producing small scale rural land use maps in semi - arid developing countries using orbital imagery: final report. Londres: Department of Industry; 1976.