Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008

Módulo II: Sistemas de información geográfica y teledetección

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN EN INGENIERÍA MEDIOAMBIENTAL

Autor: ANTONIO RUIZ VERDÚ

Índice

1. Introducción.....3
2. Estudios globales o continentales.....4
2.1. Procesos atmosféricos.....5
2.2. Oceanografía.....8
2.3. Cambio climático.....10
3. Estudios regionales.....11
3.1. Inventarios agrícolas y forestales.....11
3.2. Incendios forestales.....11
3.3. Hidrología.....12
3.4. Calidad del agua.....14
3.5. Estudio de hábitats e impacto ambiental.....15
3.6. Catástrofes naturales.....16
3.7. Geología.....17
4. Estudios locales.....17

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

1. INTRODUCCIÓN

La teledetección es una herramienta que puede aplicarse en un gran número de trabajos, dentro del ámbito de la ingeniería medioambiental. Por su concepción y capacidad sinóptica e integradora, es muy adecuada para el seguimiento de procesos que varían de forma continua en el territorio. En principio, cualquier fenómeno en el que se produzca una variación de la respuesta espectral de la superficie terrestre, tanto en el espacio como en el tiempo, es susceptible de ser estudiado por teledetección. Ahora bien, antes de plantearse la utilización de la teledetección en una aplicación concreta, hay que analizar si cumple al menos una de las dos condiciones siguientes:

- El coste de su uso es inferior al de un estudio convencional.
- Aporta información que no puede obtenerse por otros medios

Una vez que se ha decidido utilizar la teledetección, hay que escoger los sensores y plataformas de observación que más se adecúen a las necesidades del trabajo. Para ello hay que fijarse en tres características que definen su idoneidad:

- Resolución espacial (tamaño del píxel)
- Resolución espectral (número de bandas)
- Resolución temporal

Como ejemplo de la diversidad de sensores y plataformas disponibles, en la tabla 1 se muestran los más utilizados en el estudio de masas de agua oceánica o continental.

Sensor	Resolución espacial	Resolución temporal	Resolución espectral *
Landsat-TM	30 m	16 días	VIS, IRC, IRM, T – 7C
SPOT-HRV	20 m	2 a 26 días	VIS, IRC – 4C
NOAA - AVHRR	≈1,1 km	Diaria (4)	VIS, IRC, IRM, T – 5C
Nimbus - CZCS	0,5 – 1 km	Diaria	VIS, IRC, T – 11C
ERS-1 y ATSR	≈30 m y 1 km	31 días	MO, T – 3C
MERIS	≈250 m	2-3 días	VIS, IRC – 15C
SeaWifs	1000	1 día	VIS, IRC – 8C
MODIS	250-500-1000 m	1-2 días	VIS, IRC, IRM, T – 36C
MOS	1000 m	16 días	VIS, IRC – 18C
OCTS	700 m	40 días	VIS, IRC, T – 18C

VIS=Visible, IRC=Infrarrojo cercano, IRM=Infrarrojo medio, T=Infrarrojo térmico, MO=Microondas. C=canales

Tabla 1

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

En la mayoría de las ocasiones, las limitaciones al posible uso de la teledetección no son de tipo técnico sino económico. El elevado coste de adquisición de muchas de las imágenes, así como la necesidad de invertir en equipos informáticos y en programas específicos de tratamiento digital de imágenes tiene un efecto disuasorio para muchos usuarios potenciales. Por lo general la teledetección es más competitiva cuanto mayor sea el área de estudio y cuanto mayor sea la necesidad de actualización periódica de la información espacial.

El coste de las imágenes depende del tipo de misión espacial. En algunos casos tienen un carácter netamente comercial (Ikonos, Quick-Bird, Landsat, Spot...) Y el coste de las imágenes suele ser alto, aunque variable según las áreas geográficas y sujeto a la competencia entre distribuidores, por lo que tampoco es difícil encontrar ofertas (precios especiales para imágenes de archivo, series temporales, suscripciones etc). En otros casos (Envisat, Aster...) La misión tiene un carácter más experimental y dirigido a la comunidad científica. En estos casos, el coste puede ser muy reducido cuando el trabajo se enmarca en un proyecto de investigación, mientras que la adquisición de imágenes puede ser una tarea complicada para un usuario no enmarcado en ese tipo de proyectos.

Sensor	Res. espacial (m)	Nº bandas	$ por km2	Tamaño imagen (km2)
QUICK BIRD	0,61 - 3	4	22,5 - 30	64 – 10.000
IKONOS	1 - 4	4	18 - 62	121
EROS – A1	1	1	5 - 10	156 - 450
IRS-1 PAN	5	1	0,5 - 1,5	529 – 4.900
SPOT	2,5 – 10 - 20	5	0,5 - 15,5	400 – 3.600
LANDSAT-TM	30 - 120	7	0,019 - 0,48	2.500 – 32.000
LANDSAT-ETM+	15 –30 -60	8	0,019 - 0,48	2.500 – 32.000
IRS-1 LISS	23	4	0,15 - 0,37	4.900 – 19.600
IRS-1 WIFS	188	2	0,0014	600.000
ERS-1/2 SAR	10 - 30	2	0.04 – 0.05	25.000
RADARSAT	8 - 100	1	0.013	2.500 – 250.000
ENVISAT-1 MERIS	250 – 1.000	15	0.0027 – 0.00009	112.000 – 1.700.000
NOAA AVHRR	500 – 1.000	5	0.00002	4.500.000

Tabla 1. Coste aproximado de algunas imágenes (datos de Eurimage, Space Imaging y Spot Image, correspondientes a productos estándar equiparables y actualizados para 2007). Los precios pueden variar según distribuidores, ofertas y tipo de producto.

2. ESTUDIOS GLOBALES O CONTINENTALES

Requieren el uso de satélites geoestacionarios o satélites de órbita polar que cubran áreas extensas en cada imagen. La resolución espacial suele ser del orden de 0,5 a 5 km, mientras que la resolución espectral es variable, según el tipo de aplicación.
Es en este tipo de estudios en los que la teledetección ha alcanzado una auténtica

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

operatividad, con productos elaborados a disposición de los usuarios en "tiempo real" o "casi real" (*near real time*). Este es el caso de los satélites meteorológicos y de algunas aplicaciones oceanográficas. Por el contrario, otras aplicaciones siguen en el ámbito académico, en especial las relacionadas con el estudio del cambio climático.

2.1. Procesos atmosféricos

El estudio de la atmósfera, al igual que ocurre con los océanos, es un ámbito en el que la teledetección es hoy por hoy imprescindible. Sólo mediante teledetección puede obtenerse información detallada de procesos que ocurren a escala planetaria y cuya velocidad de cambio es muy rápida. Esto se consigue con dos tipos de satélites:

- Satélites meteorológicos geoestacionarios (METEOSAT, GOES, MSG, METOP)
- Nuevas misiones de satélites ambientales multisensores (Terra y Aqua de la NASA; Envisat-1 de la ESA)

Las principales aplicaciones operativas son:

- *Medida de la temperatura y estimación precipitaciones*: La temperatura de la superficie terrestre se determina a partir de la radiancia medida en la región del infrarrojo térmico (8-14 μm). En las áreas continentales, si se conoce su emisividad, la temperatura de la superficie sirve para estimar la temperatura del aire, permitiendo una extrapolación más precisa de los datos de estaciones meteorológicas. En cuanto a las nubes, su temperatura y forma permite clasificarlas (figura 2). En el caso de las nubes de tipo convectivo (de desarrollo vertical), la temperatura de la nube indica la altura que ha alcanzado en su "techo" y muestra una buena correlación con la cantidad de agua precipitable. Esto permite la elaboración de mapas de precipitación (figura 1), que ofrecen una mejor estimación en las regiones intertropicales.

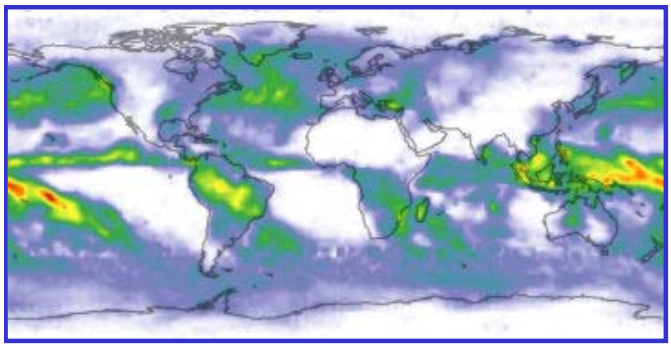

Figura 1. Mapa de precipitación estimada en diciembre de 2001 a partir de imágenes del infrarrojo térmico (NASA)

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

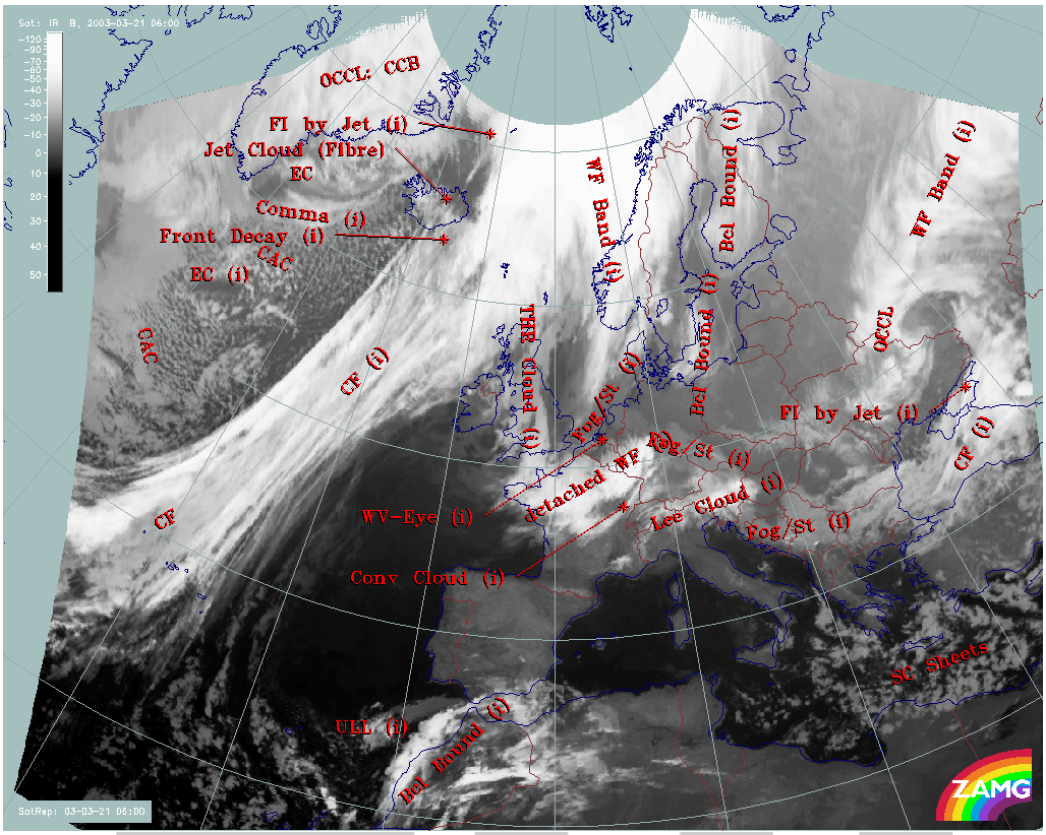

Figura 2. Ejemplo de clasificación automática de nubes utilizando imágenes visibles e infrarrojas del satélite Meteosat (obtenido por el ZAMG, Instituto Central de Meteorología y Geodinámica de Austria)

– *Gases atmosféricos y aerosoles*: Su concentración y espesor óptico se estima a partir de la radiancia de bandas del infrarrojo, ubicadas en las regiones espectrales de absorción de estos gases (vapor de agua, ozono, oxígeno...). Además de su interés en meteorología, el estudio de los gases y aerosoles atmosféricos tiene otras dos utilidades: Es de vital importancia para la correcta estimación de los balances energéticos en la atmósfera, suministrando datos a los modelos climáticos. Y además se utiliza en uno de los pasos básicos en teledetección, conocido como *corrección atmosférica*. Para ello, los sensores oceánicos (SeaWifs, MODIS, MERIS) incorporan bandas para la estimación de la concentración de aerosoles y vapor de agua.

Un ejemplo de sensor específico para el estudio de constituyentes atmosféricos es el GOMOS (*Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars*), instalado en el satélite ENVISAT-1. Conforme avanza el satélite en su órbita, el sensor va apuntando a estrellas próximas al horizonte, y va midiendo la atenuación de la radiancia de la estrella en varias bandas del visible e infrarrojo cercano, hasta que queda oculta por la superficie terrestre (figura 3).

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

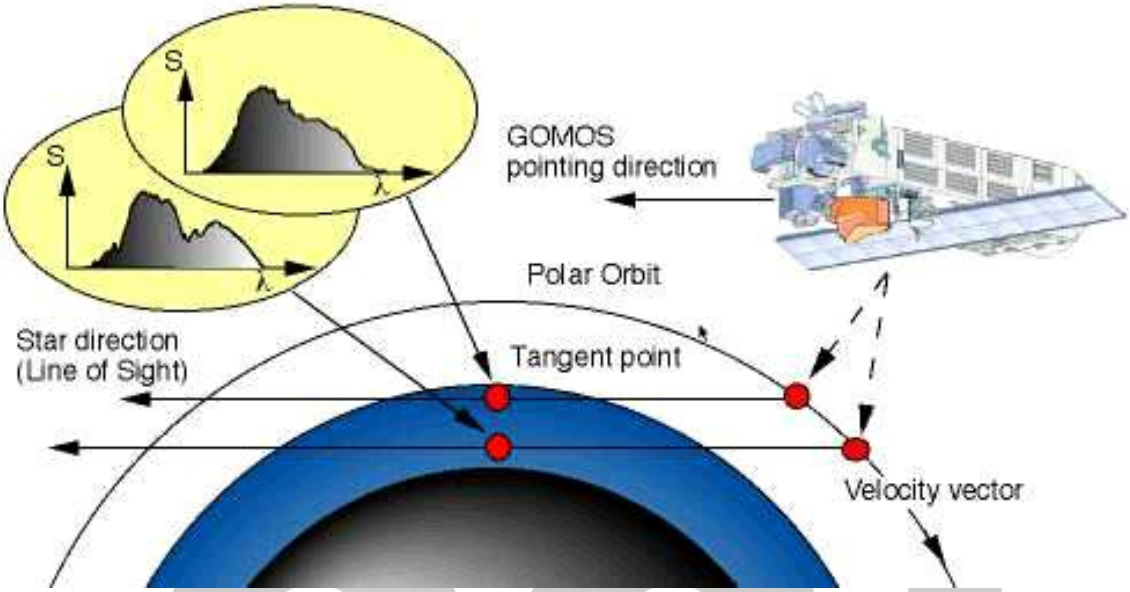

Figura 3. Esquema de operación del sensor GOMOS, del satélite ENVISAT-1 (ESA, Agencia Espacial Europea)

El sensor GOME (Global Ozone Monitoring Experiment), instalado a bordo del satélite ERS-2, es un espectrómetro de alta resolución espectral (0,2 nm) con capacidad para cuantificar la concentración de gases atmosféricos (O_3, NO_2, O_2, O_4, H_2O, BrO, OClO, SO_2, H2CO y NO), aunque está especialmente diseñado para la cuantificación del ozono. Otro instrumento similar es el SCIAMACHY, a bordo del satélite Envisat-1.

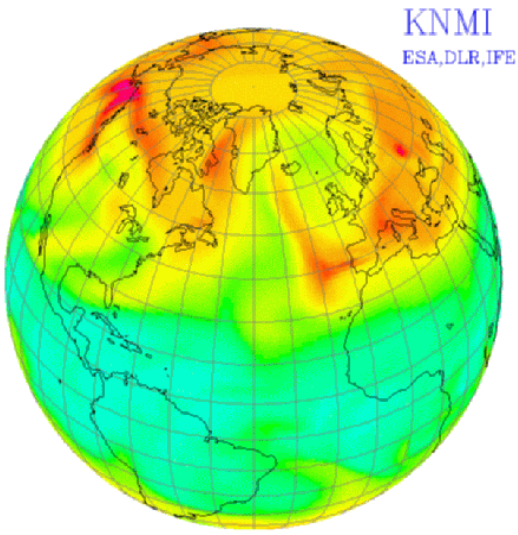

Figura 4. Ejemplo de mapa global de ozono atmosférico (media mensual) obtenido a partir de medidas del sensor GOME (tomado del KNMI, Servicio Meteorológico de Holanda)

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Las aplicaciones meteorológicas requieren por lo general una resolución temporal elevada (de 15 minutos a una semana) y una cobertura global. Para una utilización habitual de las imágenes es necesario disponer de una antena de recepción de datos y por tanto es precisa una importante inversión económica. No obstante, para una utilización esporádica, el coste de adquisición de las imágenes es relativamente bajo.

2.2. Oceanografía

Como ocurre con las aplicaciones meteorológicas, en los estudios oceanográficos la teledetección es hoy por hoy una herramienta plenamente operativa. La información obtenida desde satélite es la única que ofrece una visión global y continua, con una inmediatez y a un coste que los estudios convencionales no pueden ofrecer. Los sensores utilizados principalmente en este ámbito son:

- Sensores específicos para el "color del oceano" (Sea-Wifs, MODIS, OCTS, MERIS)
- Sensores térmicos (NOAA-AVHRR, AATSR, AMSR)
- Radar (ERS-1/2, RADARSAT)
- Altímetros (RA-2)

Las principales aplicaciones operativas son:

Estudio de corrientes y zonas de afloramiento: Para lo que se emplean sensores térmicos, a partir de los cuales se elaboran mapas de temperatura superficial del mar (*Sea Surface Temperature, SST*), como el que se muestra en la figura 5

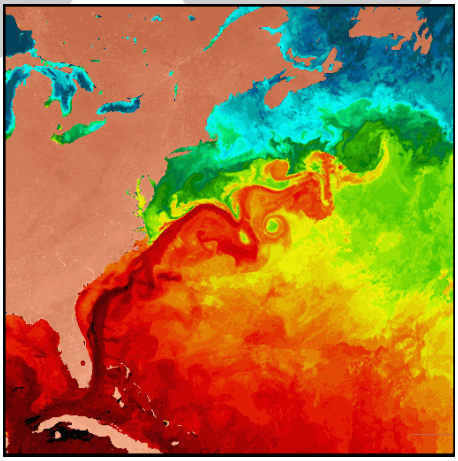

Figura 5. Mapa de temperatura superficial del mar elaborado a partir de imágenes del sensor AMSR de la NASA (elaborado por el NOAA, Instituto de Estudios Oceánicos y Atmosféricos de los EE.UU., 2000)

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Concentración de clorofila y producción primaria: Los pigmentos fotosintéticos del fitoplancton alteran, cualitativa y cuantitativamente, la respuesta espectral del medio acuático: La clorofila-*a* presenta dos máximos de absorción a 440 nm (azul) y 665 (rojo), y una absorción mínima en la región del verde. Los sensores que estudian el "color del océano" poseen bandas centradas en estas regiones, a partir de las cuales se desarrollan modelos matemáticos (de tipo analítico o empírico) que permiten estimar la concentración superficial de este pigmento en el océano. Los más sencillos están basados en el cociente entre la reflectancia en el verde (550-560 nm) y el azul (440 nm).

La concentración de clorofila-*a* muestra una elevada correlación con la biomasa del fitoplancton. A su vez, existen modelos que correlacionan esa concentración con la producción primaria de los ecosistemas marinos. En conclusión, la teledetección permite cartografiar de forma continua la distribución espacial y la evolución temporal del fitoplancton y estimar la producción primaria oceánica. En la figura 6 se muestra un ejemplo de producto operativo.

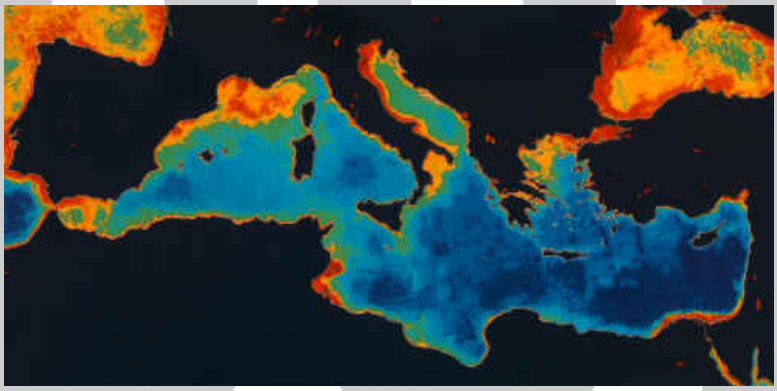

Figura 6. Mapa de Concentración media de clorofila - a en el periodo 1979 –1983 obtenido por el sensor CZCS (Coastal Zone Colour Scanner) de la NASA

Estudios de oleaje y nivel del mar: La rugosidad del océano puede estudiarse mediante sensores activos (radar). Estos sensores emiten un haz de radiación electromagnética en diferentes bandas en la región de las microondas (de 0,1 cm a 1 m de longitud de onda) y registran la fracción de la señal que es devuelta (*backscattering*) en al menos un ángulo de observación. La intensidad de la señal se correlaciona con la rugosidad de la superficie del mar y por tanto con el oleaje.

Las variaciones en el nivel del mar pueden estudiarse con una precisión centimétrica utilizando *altímetros radar*, que son sensores activos que emiten pulsos muy breves y calculan la distancia a la que se ha producido el eco en

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

función del tiempo transcurrido hasta su recepción. Diversos sistemas han estado en órbita desde 1973 (a bordo del SkyLab), hasta la actualidad (TOPEX/Poseidón, ERS-1 y –2, Envisat-RA-2, Jasón), permitiendo el estudio preciso de las variaciones del geoide marino (y en los más recientes también del geoide terrestre).

En comparación con las aplicaciones meteorológicas, las aplicaciones de la teledetección en oceanografía no requieren una resolución temporal tan elevada. Los productos basados en medidas realizadas en el espectro visible ("color del océano") suelen ser composiciones medias de 15 a 30 días, aunque su frecuencia depende de la persistencia de la nubosidad en el área de estudio. Las aplicaciones del radar, menos afectadas por la nubosidad, permiten resoluciones temporales más elevadas. El coste puede ser relativamente bajo si se utilizan productos elaborados (mapas de clorofila, por ejemplo).

2.3. Cambio climático

La necesidad de disponer, de forma continua en el espacio y el tiempo, de datos de variables necesarias para alimentar los modelos climáticos, ha impulsado la puesta en órbita de misiones específicas con satélites que incorporan varios sensores. Tal es el caso de las misiones *Terra* y *Aqua* de la NASA, o el satélite Envisat-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA). Además de las aplicaciones meteorológicas y oceanográficas ya indicadas, algunas aplicaciones de especial relevancia en este ámbito son:

- *Estudio de cubiertas de hielo*: Llevado a cabo con sensores activos de radar, como los sensores ERS (1 y 2) y el satélite RADARSAT
- *Gases efecto invernadero*: Para cuyo estudio se han diseñado sensores específicos, como el MIPAS, a bordo del satélite Envisat-1, capaz de obtener perfiles verticales de concentración atmosférica para algunos de estos gases.
- *Deforestación*: El seguimiento de la cobertura vegetal se ha realizado, principalmente, con sensores para el espectro visible – infrarrojo (como las series Landsat o NOAA-AVHRR), que permiten el cálculo de Índices de Vegetación, correlacionados con la densidad de la vegetación y su estado vegetativo. La alta cobertura nubosa que caracteriza a las regiones ecuatoriales, ha impulsado el uso de sensores radar para este tipo de estudios, aunque en este caso la información que se puede obtener es menor, ya que no informan del estado fisiológico de la vegetación.

El estudio de los procesos climáticos a escala planetaria requiere el manejo de grandes volúmenes de datos y no persigue una rentabilidad económica, por lo que suele ser llevado a cabo por grandes instituciones internacionales o en el ámbito académico.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

3. ESTUDIOS REGIONALES

Se entienden como tal aquellos cuya área de aplicación suele estar entre unos 1.000 y 1.000.000 km^2. Aunque en algunos casos requieren el uso de satélites geoestacionarios, suelen llevarse a cabo con satélites de órbita polar. Por su magnitud, pueden abordarse con una inversión en equipamiento y personal relativamente baja y en muchos de los casos, permitir una rentabilidad económica. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones no se dispone de productos operativos por lo que este tipo de trabajos conlleva siempre una cierta componente de I+D.

3.1. Inventarios agrícolas y forestales

Se basan en el estudio de la respuesta espectral de la vegetación y el suelo en el espectro visible e infrarrojo (400 – 2500 nm de longitud de onda). En regiones de elevada cobertura nubosa se acude a las imágenes radar. Según la extensión del área de estudio se acude a dos tipos de satélites:

- Satélites de recursos naturales, escala media (Landsat, IRS, SPOT)
- Satélites de recursos naturales, gran escala (NOAA)

La mayoría de los trabajos se basan en el uso de *algoritmos de clasificación*, que clasifican los píxeles de las imágenes en función de sus *firmas espectrales*. Cuando esta clasificación es de tipo *supervisado*, es necesario realizar campañas de obtención de datos en campo. Otro requisito imprescindible es una buena corrección geométrica y georreferenciación de las imágenes, que permita la superposición de otras capas de información geográfica. En los casos más sencillos se puede acudir al estudio de *índices de vegetación*.

Cuando se pretende clasificar distintos tipos de vegetación, es siempre recomendable, aunque incrementa el coste del trabajo, que se utilicen imágenes de varias fechas. El enfoque multitemporal, aprovecha las diferencias fenológicas entre los distintos tipos de cubiertas vegetales, que son, por lo general, más acentuadas que las diferencias en su respuesta espectral y más cuando se trabaja con sensores con pocas bandas espectrales (poca *resolución espectral*).

3.2. Incendios forestales

En este tipo de aplicaciones, se siguen dos enfoques:

- *Estudio de los efectos del incendio*: La metodología es muy similar a la utilizada en los inventarios agrícolas y forestales, ya que se basa en la clasificación de las coberturas y usos de suelo de las imágenes. En este caso el enfoque multitemporal es imprescindible, pues se analiza la cobertura vegetal antes y después del incendio. Para detectar las superficies quemadas se aplican técnicas de *análisis de cambios*.

  La estimación de superficies quemadas suele ser más precisa que la obtenida por métodos convencionales, que consideran el perímetro de la zona afectada

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

pero no contabilizan las "islas" de superficie no quemada. No obstante, la exactitud en la estimación de superficies dependerá de la relación entre la resolución espacial del sensor utilizado y la extensión del incendio. Los sensores más utilizados (Landsat, IRS, SPOT) tienen una resolución espacial de 10 – 30 m.

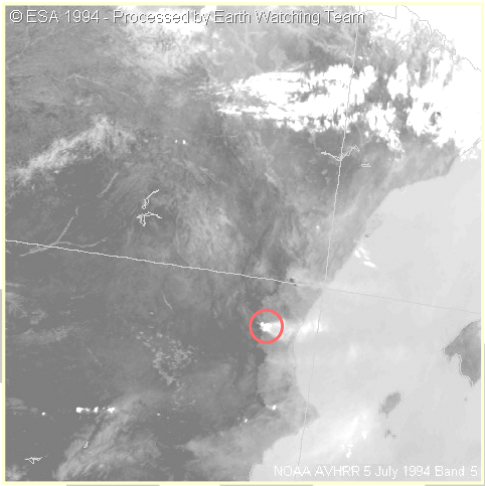

Figura 7. Banda térmica del sensor NOAA-AVHRR obtenida durante un incendio de garandes proporciones (procesada por la ESA)

- *Seguimiento del incendio*: En este caso se detecta el incendio en tiempo real, mediante el uso de sensores térmicos que detectan los focos de calor. En grandes incendios se procesan imágenes de satélites meteorológicos o ambientales (NOAA, Envisat-AATRS, METEOSAT), que ofrecen una resolución espacial de 1 km (figura 7). Para pequeños incendios se acude a sensores térmicos aeroportados o a la instalación de este tipo de sensores en torres de vigilancia, lo que permite desarrollar un sistema de alerta, detectando los primeros focos del incendio.

- *Mapas de riesgo de incendio*: Se basan en la evolución diaria o semanal del índice de vegetación en una región (obtenidos por satélites geoestacionarios) y el uso combinado de información meteorológica (viento, humedad relativa). Los descensos bruscos del índice de vegetación indican una acumulación importante de biomasa combustible, lo que, dependiendo de las condiciones meteorológicas, crea las condiciones propicias para el desencadenamiento de incendios.

3.3. Hidrología

La teledetección puede suministrar información de forma continua de todas de las fases del ciclo hidrológico. Muchas de las capas de las variables y parámetros que alimentan los modelos hidrológicos distribuidos pueden obtenerse por teledetección. Una vez establecida la relación entre la medida radiométrica del sensor remoto y la

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

variable a modelizar (precipitación, temperatura, evapotranspiración...), la estimación por satélite mejora sensiblemente la obtenida por interpolación de medidas puntuales. Los principales ámbitos de aplicación de la teledetección en hidrología son:

- *Estudio de usos de suelo*: Realizado mediante técnicas de clasificación de imágenes, normalmente de satélites de recursos naturales de resolución espacial media (Landsat, SPOT...)

- *Estimación precipitaciones*: Es una técnica semi-operativa, basada en el uso de satélites meteorológicos. Para la precipitación de tipo convectivo se obtienen buenos resultados con imágenes térmicas, analizando la temperatura en el techo de las nubes y la velocidad de evolución de los nucleos convectivos. En las precipitaciones de tipo advectivo (frontal) la correlación entre la temperatura de las nubes y la precipitación es peor, aunque se han desarrollado algunos modelos empíricos de buen resultado a escala regional.

  Mas habitual, aunque todavía en una fase semi-operativa, es el uso de imágenes de radar, obtenidas desde estaciones situadas en la superficie terrestre. La intensidad de la precipitación puede estimarse a partir de la intensidad del eco (reflectividad), pero depende de una buena corrección de los errores que dependen de la distancia al emisor, de la altura de la nube que se está observando y de la orografía.

- *Humedad del suelo*: En fase de investigación. La señal detectada por un radar de microondas depende de la constante dieléctrica del medio. Como el agua contenida en el suelo modifica la constante dieléctrica de éste, en teoría es posible estimar la humedad el suelo a partir de imágenes radar

- *Evapotranspiración*: Es una aplicación que está siendo investigada de forma intensa, al ser una variable clave en los modelos hidrológicos que es difícil de estimar sobre superficies extensas. Hay diversos modelos propuestos por grupos de investigación, basados casi todos en el uso de imágenes del infrarrojo térmico. Un ejemplo de estos modelos, basado en datos del satélite METEOSAT, calcula la evapotranspiración a partir de la ecuación del balance de energía:

  $$E = I_n - H$$

  Donde E es la evapotranspiración, I_n es la radiación global neta que alcanza la superficie terrestre (que se calcula aplicando un modelo de corrección atmosférica a los datos de radiación global extraterrestre) y H es el flujo de calor sensible (calculado de la diferencia entre la temperatura del suelo y la de la atmósfera, estimadas a partir de la banda del infrarrojo térmico)

- *Estudio superficies nevadas y hielo*: Basado en imágenes de radar de mi-

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

croondas, espectro visible e infrarrojo térmico. Las imágenes del radar de microondas permiten evaluar la profundidad de la capa de nieve, combinando la reflectividad de las bandas de 0,8 y 6 cm. No obstante, la estimación de la cantidad de agua acumulada es más difícil, ya que depende de la densidad de la nieve.

3.4. Calidad del agua

Las propiedades ópticas de las aguas marinas y continentales pueden verse modificadas por la presencia de distintos constituyentes, de origen natural (fitoplancton, macrófitas, materia orgánica disuelta, partículas minerales en suspensión) o procedentes de las actividades humanas (vertidos). Siempre que las propiedades ópticas del agua resulten modificadas por esos constituyentes se podrán estudiar por teledetección. Algunos ejemplos son:

– *Calidad de las aguas costeras y continentales*: El estudio del fitoplancton en estas aguas se lleva a cabo de forma similar a las aguas oceánicas. La concentración de clorofila es la principal variable estudiada, normalmente mediante modelos empíricos que la correlacionan con cocientes entre bandas del espectro visible.

  Los sensores multiespectrales con pocas bandas en la región visible (Landsat, SPOT) tienen una capacidad limitada para estimar la concentración de clorofila, pero buena resolución espacial. Los sensores multiespectrales más recientes, como MERIS, MODIS o SeaWifs, poseen muchas más bandas de pequeña anchura y situadas en longuitudes de onda cuidadosamente elegidas. Tienen, no obstante, el inconveniente de una menor resolución espacial (250 – 500 m). En los últimos años se han desarrollado algoritmos que permiten cuantificar la clorofila-*a* y otros pigmentos fotosintéticos como la ficocianina, presente de forma casi exclusiva en las cianobacterias.

– *Vertidos de petróleo*: Los hidrocarburos modifican la tensión superficial del agua y en consecuencia su rugosidad, lo que altera la señal recibida por los sensores radar en la región de las microondas. Existen sistemas de alerta semi-operativos que detectan los vertidos de petroleo en el océano utilizando radares de apertura sintética (SAR, RADARSAT), permitiendo la localización de los buques infractores (o eventualmente accidentados). Para ser realmente útil, el sistema tiene que ser capaz de diferenciar los *falsos positivos* (cambios en la rugosidad debidos principalmente al viento a al fitoplancton) y minimizar los falsos negativos (manchas no detectadas). Un ejemplo de estos sistemas se muestra en la figura 8.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

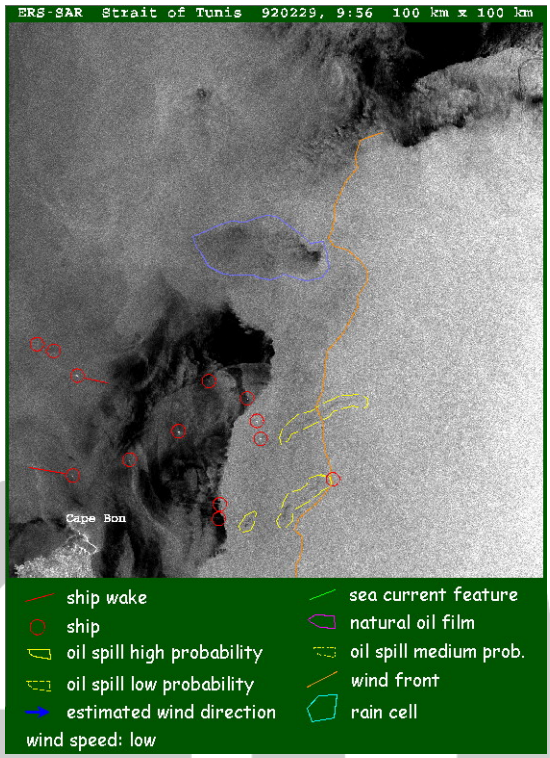

Figura 8. Detección de vertidos de petroleo mediante imágenes de radar (ERS-SAR)

– *Vertidos térmicos en aguas costeras y continentales*: Muchos vertidos pueden detectarse por su diferencia de temperatura con el medio receptor, aún cuando la sustancia que se vierte no altere las propiedades ópticas del agua en el espectro visible e infrarrojo. En algunos casos es la propia elevación de la temperatura, más que el contenido del vertido, lo que afecta gravemente a los ecosistemas de la masa de agua receptora. Esto es lo que ocurre con los vertidos de agua de refrigreración de centrales térmicas. La magnitud del vertido ha sido estudiada mediante sensores térmicos aeroportados, como el sensor *Daedalus*-ATM

3.5. Estudio de habitats e impacto ambiental

Su enfoque suele ser similar al de los inventarios forestales, ya que normalmente persiguen una clasificación de coberturas y usos del suelo. Los sensores habitualmente utilizados son los de resolución espacial media (Landsat, IRS). La potencia de las herramientas de tratamiento digital de imágenes permite estudiar cuantitativamente la fragmentación del paisaje o aplicar técnicas de análisis de cambios en series multitemporales. También se utiliza para evaluar el efecto de estructuras lineales y para escoger la alternativa de menor impacto sobre el territorio de una obra pública.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

3.6. Catástrofes naturales

Este es un ámbito en el que la teledetección es especialmente útil por su visión sinóptica y la inmediatez en la obtención de información de zonas frecuentemente inaccesibles. La diversidad de efectos de una catastrofe natural aconsejan un *enfoque multi*-sensorial. Algunos ejemplos de aplicaciones de la teledetección en el seguimiento de catástrofes naturales son:

- *Inundaciones*: En este caso, los sensores más útiles son los radares de microondas, que pueden obtener imágenes en presencia de nubes. En las llanuras aluviales, la superficie inundada puede detectarse fácilmente al comparar una imagen obtenida en el momento de la inundación con una imagen anterior, ya que el cambio de rugosidad de la superficie es muy nítido (figura 9)

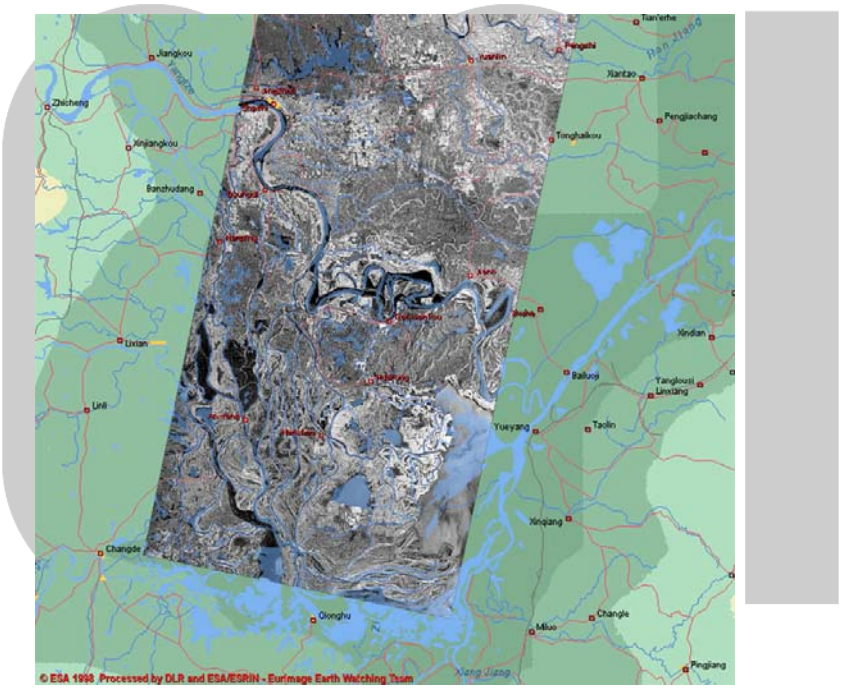

Figura 9. Imagen clasificada del sensor ERS-1, que muestra las zonas inundadas por el río Yangtze, en China, en 1998.

- *Erupciones volcánicas*: Al ser fenómenos muy dinámicos los sensores más adecuados son los meteorológicos, que detectan, tanto las coladas de lava (infrarrojo térmico) como la evolución de la *pluma* de humo del volcán

- *Terremotos*: Sus efectos superficiales pueden detectarse con imágenes visibles de alta resolución espacial (IKONOS, QuickBird). Los efectos en la superficie de la corteza terrestre se pueden poner de manifiesto por técnicas de interferometría de radar.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

– *Fenómenos meteorológicos extremos*: El ejemplo más ilustrativo es el de los huracanes, para los que existe un sistema operativo de detección basado principalmente en el análisis de imágenes de satélites meteorológicos.

3.7. Geología

Las aplicaciones de la teledetección en estudios geológicos pueden dividirse en tres grupos:

– *Prospecciones geológicas*: Con un enfoque basado en clasificaciones de imágenes multiespectrales, normalmente de satélites de recursos naturales con sensores de resolución espacial media (Landsat, RESURS, IRS...)

– *Geodinámica*: Fundamentalmente estudio de lineamientos y fenómenos sísmicos. Se basa en el uso de imágenes de radar e interferometría

Estudios de detalle: Esta es la aplicación que tiene más desarrollo en la actualidad. Se basa en el uso de sensores hiperespectrales, normalmente a bordo de avión (AVIRIS), aunque ya existe un sensor experimental de la NASA en una plataforma orbital (Hyperion).

Los minerales presentan firmas espectrales constantes, con picos de absorción característicos y estrechos, especialmente en la región del infrarrojo medio (1,9 – 2,5 µm) y en el infrarrojo térmico. Los espectros obtenidos en una imagen hiperespectral se comparan con bibliotecas (*librerias*) espectrales, clasificando la imagen en un mapa de minerales. Normalmente se requiere una resolución espacial elevada (1-10 m). La clasificación es más difícil cuanto mayor sea la cobertura vegetal, pero aún en el caso de coberturas densas, algunos minerales pueden detectarse indirectamente por sus efectos en la vegetación (cambios en el *red edge*)

4. Estudios locales

Comprende este grupo de aplicaciones, aquellas cuyo ámbito de aplicación es pequeño y, sobre todo, aquellas que requieren una elevada resolución espacial. Cabría incluir aquí a muchas de las aplicaciones ya citadas, incluyendo todas las que utilizan la teledetección aeroportada. No obstante, como ejemplos típicos de estudios que requieren el uso de sensores de alta resolución espacial hay que citar la elaboración de cartografía de detalle a pequeña escala (1:5.000, por ejemplo), en el ámbito del urbanismo, la ingeniería civil y las aplicaciones catastrales.

Es para este tipo de trabajos para los que han sido preferentemente diseñados los nuevos sensores de alta resolución espacial (IKONOS, QuickBird y SPOT-2), que poseen pocas bandas espectrales pero una elevada resolución espectral, inferior incluso a 1 metro (0,61 cm en el pancromático de QuickBird).

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.