

2. PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN

En el capítulo anterior se presentaban algunos aspectos introductorios de las técnicas analizadas en esta obra. En los dos próximos, se van a exponer los procesos que permiten la adquisición de la imagen, para dedicar el resto a las tareas de interpretación. Como científicos con preocupación por el medio ambiente, lo habitual será que estos últimos sean los que merezcan una mayor atención. Sin embargo, como es obvio, la interpretación de la imagen será tanto más rigurosa, cuanto mayor conocimiento se tenga de los procesos que permitieron adquirirla.

2.1. FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN REMOTA

Anteriormente se definió la teledetección como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esa señal, además, no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que le ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad.

Este sencillo ejemplo nos sirve para introducir los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección: sensor (nuestro ojo), objeto observado (árbol) y flujo energético que permite poner a ambos en relación. En el caso del ojo, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Estas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión (fig. 2.1).

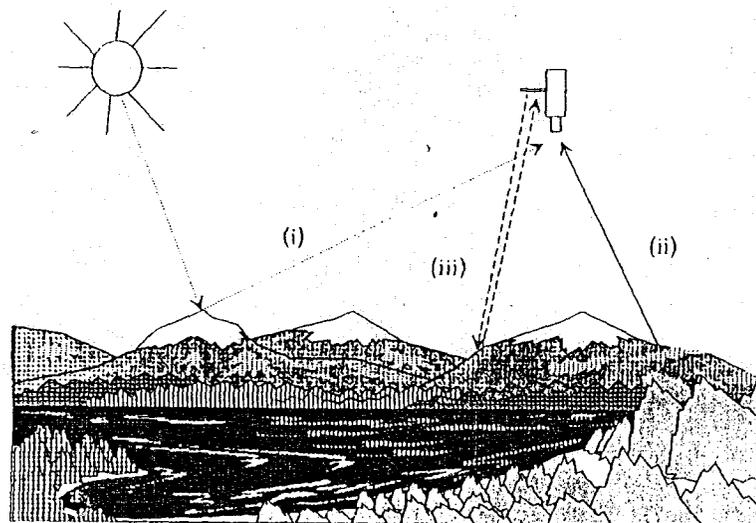


Fig. 2.1 - Formas de teledetección

La primera de ellas es la forma más importante de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro Planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras. Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma, la observación remota puede basarse en la energía emitida por las propias cubiertas, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre.

En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electro-magnética. Como es sabido, la energía térmica se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción, y radiación. De ellos, nos centraremos en este último, pues constituye la base de los sistemas de teledetección analizados en esta obra.

Históricamente las propiedades de la radiación electro-magnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: aquella que

la concibe como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell), y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero (Planck, Einstein). Actualmente, parece que ambas teorías se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo a ambos planteamientos.

Según la teoría ondulatoria, la energía electro-magnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético (fig. 2.2). Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (F). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados, como describe la siguiente fórmula:

$$c = \lambda F \quad [2.1]$$

donde c indica la velocidad de la luz (3×10^8 m/s), λ expresa la longitud de onda y F la frecuencia (Herzios, ciclos por segundo). En definitiva, a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta con indicar un sólo término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado.

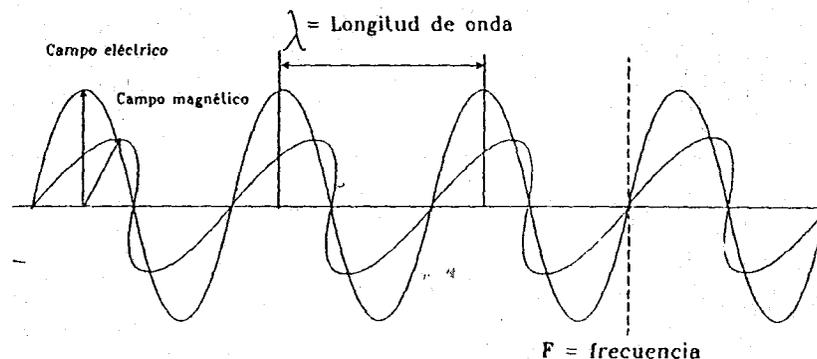


Fig. 2.2 - Esquema de una onda electro-magnética

Gracias a la teoría cuántica, podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia:

$$Q = h F \quad [2.2]$$

donde Q es la energía radiante de un fotón (en julios), F la frecuencia y h la constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ J s). Sustituyendo en [2.1] podemos así mismo expresar:

$$Q = h (c/\lambda) \quad [2.3]$$

lo que significa, en definitiva, que a mayor longitud de onda - o menor frecuencia- el contenido energético será menor y viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella centrada en longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran más sofisticados medios de detección.

2.2. EL ESPECTRO ELECTRO-MAGNÉTICO

De las fórmulas anteriores, se deduce que podemos describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electro-magnético (fig. 2.3). Comprende, en un continuo, desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X), hasta las kilométricas (telecomunicaciones). Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda. Para las más cortas se utilizan micras ($\mu\text{m} = 10^{-6}$ metros), mientras las más largas se miden en centímetros o metros. Normalmente a éstas últimas (denominadas micro-ondas) se les designa también por valores de frecuencia (en gigahercios, $\text{GHz} = 10^9$ Hz).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varían según distintos autores, si bien la terminología más común es la siguiente:

- Espectro visible (0,4 a 0,7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electro-magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (0,4 a 0,5 μm); verde (0,5 a 0,6 μm), y rojo (0,6 a 0,7 μm), en razón de los colores elementales asociados a esas longitudes de onda.

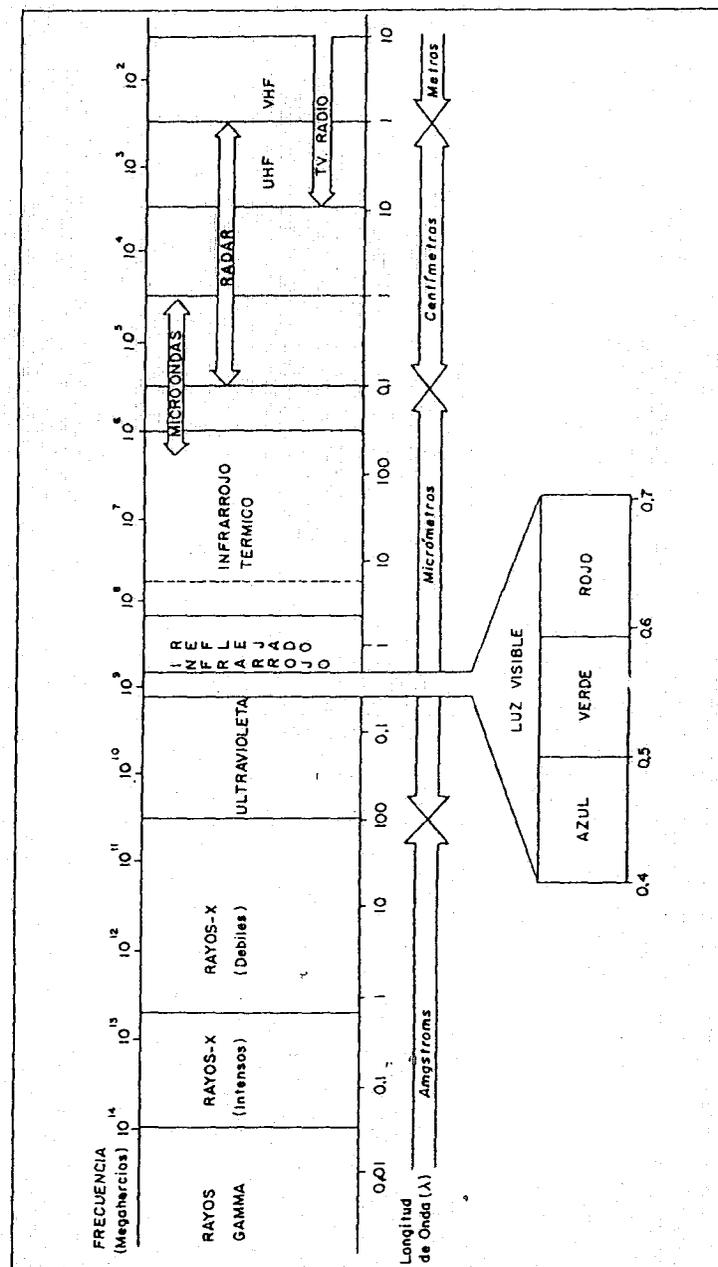


Fig. 2.3 - Espectro electro-magnético

- Infrarrojo próximo (0,7 a 1,3 μm). A veces se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

- Infrarrojo medio (1,3 a 8 μm), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre.

- Micro-ondas (a partir de 1 mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

Más adelante se estudiará el comportamiento espectral de las principales cubiertas terrestres en cada una de estas bandas del espectro. Antes de ello, convendrá introducir algunos conceptos y unidades de medida comúnmente empleadas en teledetección.

2.3. TÉRMINOS Y UNIDADES DE MEDIDA

Como más arriba se indicó, para que pueda producirse una observación remota de la superficie terrestre es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de ésta. Ese flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de o dirigida a una unidad de superficie y con una dirección concreta. Convendrá, por tanto, explicitar las unidades de medida comúnmente empleadas en teledetección, con objeto de ser más rigurosos a la hora de abordar posteriormente los procesos de adquisición. La formulación precisa de cada una de estas magnitudes se acompaña en la tabla 2.1 (Slater, 1980; Curran, 1985; Elachi, 1987):

- Energía radiante (Q). Indica el total de energía radiada en todas las direcciones. Se mide en julios (J).

- Densidad radiante (W). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de volumen. Se mide en julios por metro cúbico (J / m^3).

- Flujo radiante (ϕ). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W).

- Emitancia o excitancia radiante (M). Total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado (W / m^2).

- Irradiancia radiante (E), total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo. Es equivalente a la emitancia, si bien

ésta indica la energía emitida, mientras la irradiancia refiere a la incidente (W / m^2).

- Intensidad radiante (I). Total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω). Se trata éste de un ángulo tridimensional, que refiere a la sección completa de la energía transmitida, y se mide en estereo-radianes (fig. 2.4). Por tanto la intensidad radiante se mide en vatios por estereo-radian (W / sr).

- Radiancia (L). Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección,

Tabla 2.1.
Magnitudes radiométricas comúnmente
utilizadas en Teledetección

Concepto	Símbolo	Fórmula	Unidad de Medida
Energía radiante	Q	--	julios (J)
Densidad radiante	W	$\delta Q / \delta v$	J / m^3
Flujo radiante	ϕ	$\delta Q / \delta t$	vatios (W)
Emitancia radiante	M	$\delta \phi / \delta A$	W / m^2
Irradiancia	E	$\delta \phi / \delta A$	W / m^2
Intensidad radiante	I	$\delta \phi / \delta \Omega$	W / sr
Radiancia	L	$\frac{\delta I \cos \theta}{\delta A}$	$\text{W} / \text{m}^2 \text{sr}$
Radiancia espectral	L_λ	$\delta L / \delta \lambda$	$\text{W} / \text{m}^2 \text{sr} \mu\text{m}$
Emisividad	ϵ	M / M_n	
Reflectividad	ρ	ϕ_r / ϕ_i	
Absortividad	α	ϕ_a / ϕ_i	
Transmisividad	τ	ϕ_t / ϕ_i	

sr, estereo-radian, medida del ángulo sólido

μm , micrómetro o micra (10^{-6} metros)

M_n , Emitancia de un cuerpo negro

ϕ_i , flujo incidente

ϕ_r , flujo reflejado

ϕ_a , flujo absorbido

ϕ_t , flujo transmitido

θ , ángulo formado por la superficie y la dirección normal

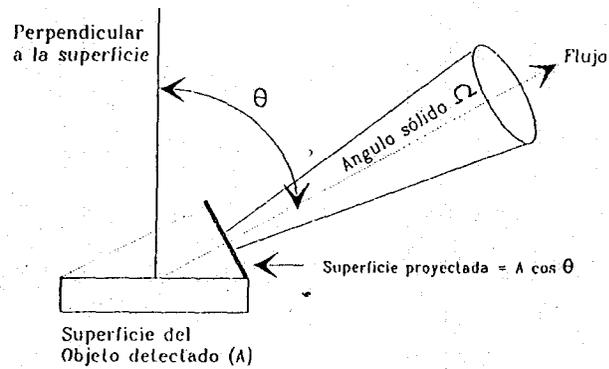


Fig. 2.4 - Diagrama de un ángulo sólido

por que, de hecho, describe lo que mide el sensor. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estereo-radian ($W / m^2 \text{ sr}$).

- Radiancia espectral (L_λ). Por extensión del concepto anterior, indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Por cuanto el sensor detecta una banda particular del espectro, ésta es la medida más cercana a la observación remota. De igual forma que la radiancia, la emitancia e irradiancia también puede completarse con el calificativo de espectral (añadiendo el subíndice λ), para referir a una determinada longitud de onda.

- Emisividad (ϵ), relación entre la emitancia de una superficie (M), y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura (M_n).

- Reflectividad (ρ), relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie;

- Absortividad (α), relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie;

- Transmisividad (τ), relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

Estos últimos términos son adimensionales; suelen expresarse en tantos por ciento o por uno. Por esta razón, hemos traducido los términos ingleses: *emittance*, *reflectance*, *absorptance* y *transmittance*, añadiendo el sufijo "ividad", para indicar que son cantidades relativas, distinguiéndolas así de las anteriores. También estas magnitudes son dependientes de la longitud de onda, por lo que conviene completarlas con el calificativo de espectral, para referirse a su comportamiento en una banda determinada del espectro.