

Capítulo 10

Teledetección

10.1. Fundamentos de la teledetección

Teledetección es la técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material. Para que ello sea posible es necesario que, aunque sin contacto material, exista algún tipo de interacción entre los objetos observados; situados sobre la superficie terrestre, marina o en la atmósfera; y un sensor situado en una plataforma (satélite, avión, etc.).

En el caso la teledetección la interacción que se produce va a ser un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor (figura ??). Este flujo puede ser, en cuanto a su origen, de tres tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos(luz visible e infrarrojo reflejado)
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico)
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar)

Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva y la última como teledetección activa.

La radiación (solar reflejada, terrestre o emitida por el sensor y reflejada) que llega de la superficie terrestre y que ha atravesado la atmósfera, es almacenada en formato digital. Una vez recuperados los datos en el centro de control del satélite, permitirán obtener información acerca de la superficie terrestre y de la atmósfera. El tipo de información que se obtiene dependerá de la longitud de onda en la que el sensor capte radiación.

El análisis de esta información permite el reconocimiento de las características de los objetos observados y de los fenómenos que se producen en la superficie terrestre y oceánica y en la atmósfera. Por tanto son muchas las ciencias, tanto naturales como sociales, interesadas en su uso (Geografía, Geología, Meteorología, Agronomía, etc.).

Región	Rango de longitudes
Rayos γ	$<0,03nm$
Rayos X	$0,03nm - 3nm$
Ultravioleta	$3nm - 0,3\mu$
Visible	$0,3\mu - 0,7\mu$
Infrarrojo	$0,7\mu - 300\mu$
Microondas	$300\mu - 20cm$
Radio-TV	$> 200cm$

Cuadro 10.1: Regiones del espectro electromagnético

10.1.1. Naturaleza de la radiación

La naturaleza de la radiación electromagnética puede ser explicada a partir de dos modelos aparentemente contradictorios y en el fondo complementarios. El modelo de onda asume que la radiación se produce en forma de ondas que resultan de oscilaciones en los campos eléctrico y magnético en las inmediaciones de los objetos y se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz. Las ondas se definen fundamentalmente por su longitud (λ) o distancia entre dos picos de onda (se mide en μm , es decir 10^{-6} metros). El modelo de partícula asume que la energía viaja como un flujo de elementos discretos: los fotones. La energía transportada por cada fotón (Q) depende de la longitud de onda, de este modo ambos modelos se relacionan mediante la ecuación:

$$Q = \frac{hc}{\lambda} \quad (10.1)$$

donde h es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} Js$) y c la velocidad de la luz ($300000m/s$). La ecuación ?? implica que a menor longitud de onda mayor es la energía transportada por la radiación.

El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético (figura ?? y tabla ??). Dentro del espectro electromagnético se distinguen una serie de regiones, las más utilizadas por las diferentes técnicas de teledetección son la luz visible, el infrarrojo reflejado, el infrarrojo térmico y las microondas (radar).

Cualquier cuerpo en la naturaleza emite radiación y lo hace con diferentes longitudes de onda. La cantidad de energía que emite un cuerpo por radiación como la distribución de esta energía en diferentes longitudes de onda depende fundamentalmente de la temperatura de dicho cuerpo (ley de Stefan-Boltzman):

$$M = \sigma T^4 \quad (10.2)$$

por otro lado la ley de Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (10.3)$$

nos permite calcular a que longitud de onda se produce el pico de máxima emisión de energía de un cuerpo a una temperatura T . Como puede observarse a mayor temperatura menor longitud de onda. Tanto en la ecuación ?? como en la ?? la temperatura se expresa en grados Kelvin.

La temperatura del Sol es de aproximadamente $6000^{\circ}K$ mientras que la de la Tierra es de $300^{\circ}K$. Esto significa que la radiación solar va a ser máxima para una longitud de onda de 0.48μ (región visible) y la terrestre máxima en una longitud de onda de 9.66μ (infrarrojo térmico).

Determinados fenómenos de la superficie terrestre (por ejemplo los incendios) implican una temperatura mucho mayor ($548,5-693,5^{\circ}K$) que la habitual de la superficie terrestre, esto significa que el total de radiación emitida va a ser mucho mayor y que el pico de emisión va a estar en longitudes de onda de $5.28 - 4.3 \mu$, también en el infrarrojo térmico pero con valores considerablemente diferentes a los correspondientes a la temperatura normal de la Tierra.

Por tanto puede concluirse que la radiación solar domina aquellas regiones del espectro electromagnético que corresponden a la radiación visible y al infrarrojo reflejado. La radiación terrestre domina el infrarrojo térmico, mientras que las radiaciones que corresponden a las microondas (radar) no aparecen en la naturaleza, deben ser por tanto de origen artificial, generadas por el propio sensor que las recibe posteriormente reflejadas (figura ??).

10.1.2. Interacciones entre la radiación y los objetos

Todos los objetos (independientemente de la radiación que emitan) van a recibir radiación, fundamentalmente del sol, que, en función del tipo de objeto que estemos considerando, puede seguir tres caminos:

- reflejarse (la radiación es reenviada de vuelta al espacio)
- absorberse (la radiación pasa a incrementar la energía del objeto)
- transmitirse (la radiación se transmite hacia los objetos situados detrás).

La fracción de energía que se refleja se denomina reflectividad o albedo (ρ); la fracción de energía que se absorbe se denomina absorptividad (α); la fracción de energía que se transmite se denomina transmisividad (τ) cumpliéndose que $\rho + \tau + \alpha = 1$. Las tres variables tienen lógicamente valores entre 0 y 1.

La interacción de la radiación con la atmósfera y con los objetos terrestres, es decir los valores de ρ , τ y α de un cuerpo concreto, va a depender de la longitud de onda de que se trate y de las características de ese cuerpo. Unas primeras líneas generales acerca del comportamiento de diferentes objetos respecto a su interacción con la radiación serían:

- Atmósfera despejada:
 - ρ muy baja para todas las longitudes de onda
 - α depende de la longitud de onda

- τ depende de la longitud de onda
- Nubes :
 - ρ muy alta en el visible
 - α depende de la longitud de onda
 - τ depende de la longitud de onda
- Agua:
 - ρ muy baja en todas las longitudes de onda
 - α depende de la longitud de onda
 - τ depende de la longitud de onda
- Superficie terrestre:
 - ρ y α muy variable, dependiendo de la longitud de onda y del tipo de cobertura
 - τ nulo

10.1.3. Interacción atmósfera-radiación electromagnética

Algunos de los gases que componen la atmósfera absorben radiación en determinadas longitudes de onda. La radiación no absorbida se transmite a la superficie terrestre aunque se ve afectada por procesos de dispersión (responsables del color azul del cielo y de que podamos ver en zonas de sombra). Los gases responsables de la absorción son fundamentalmente:

- Ozono: Absorbe radiación ultravioleta
- Dióxido de carbono: Absorbe radiación en $13 - 17,5\mu$;
- Vapor de agua: Absorbe radiación en $5,5 - 7\mu$ y por encima de 27μ ;

De este modo aparecen una serie de regiones en el espectro en las que la radiación es absorbida por uno o varios de los gases. Esto deja, por otro lado, regiones del espectro en las que no se produce absorción, son las denominadas ventanas atmosféricas.

- Visible e infrarrojo cercano ($0,3 - 1,35\mu$)
- Varias en el infrarrojo medio ($1,5 - 1,8\mu$; $2 - 2,4\mu$; $2,9 - 4,2\mu$; $4,5 - 5,5\mu$)
- Infrarrojo térmico ($8 - 14\mu$)
- Microondas, por encima de $1cm$ la atmósfera es prácticamente transparente

Problema aparte supone la aparición de partículas líquidas (nubes, figura ??) o sólidas (figura ??) que reflejan gran parte de la radiación solar que reciben. Las nubes emiten su propia radiación en el infrarrojo térmico, diferente a la terrestre debido a su menor temperatura, con lo que *ocultan* la superficie terrestre en ambas regiones del espectro. Debido a la saturación en vapor de agua, su capacidad de absorber radiación en la banda de absorción del vapor de agua dependerá de su espesor.

A la hora de diseñar un sensor, existen tres posibilidades fundamentales:

- Captar radiación solar reflejada por la superficie (en una longitud de onda correspondiente a una ventana atmosférica)
- Captar radiación infrarroja procedente de la superficie terrestre o las nubes
- Captar radiación de una banda en la que un gas presente una elevada capacidad de absorción para así estimar la concentración de este gas. Cuanto menos radiación llegue mayor será la cantidad de gas.

Las tres bandas de Meteosat (figura ??) son un ejemplo de cada una de estas posibilidades:

1. La imagen visible capta radiación solar reflejada integrando todas las longitudes de onda del visible y parte del infrarrojo reflejado ($0,5 - 0,9\mu$), cuanto mayor sea el valor recibido por el sensor mayor es el albedo (colores claros).
2. La imagen del infrarrojo térmico capta radiación emitida por la Tierra ($5,7 - 7,1\mu$) que, por tanto, depende de su temperatura, a mayor temperatura mayor energía recibida (colores oscuros).
3. La imagen del vapor de agua ($10,5 - 12,5\mu$) capta energía en la longitud de onda en que mayor es la absorción del vapor de agua; por tanto cuanto mayor sea la cantidad de vapor de agua presente en la columna atmosférica menor es la cantidad de energía que capta el sensor (colores claros).

La combinación de estas tres bandas permite distinguir:

- Tierra de oceano, por su diferente albedo y temperatura
- Temperatura de la superficie terrestre sin cubierta nubosa
- Nubes bajas (albedo muy alto, temperatura moderada, contenido en vapor de agua moderado)
- Nubes altas (albedo muy alto, temperatura muy baja, contenido en vapor de agua moderado)
- Nubes de desarrollo vertical (albedo muy alto, temperatura muy baja, contenido en vapor de agua elevado)

En general se considera que si el día es suficientemente despejado la absorción atmosférica puede despreciarse en las ventanas. Dispersión y refracción son más difíciles de evitar, introduciendo distorsiones que deben ser corregidas.

En todo caso, los problemas relacionados con la interacción de la atmósfera tienen mayor importancia en estudios multitemporales. Si se trabaja con imágenes de una sola fecha se asume que la distorsión atmosférica es equivalente en todo el espacio (al menos en las imágenes de alta resolución que cubren una pequeña porción de la superficie terrestre).

10.2. Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación

De cara a la identificación de objetos y procesos en la superficie terrestre, lo que nos interesa es la reflectividad de estos objetos respecto a las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidente de forma distinta, lo que permitirá distinguirlo de los demás si medimos la radiación reflejada. A partir de medidas de laboratorio se ha obtenido la reflectividad para las distintas cubiertas en diferentes longitudes de onda.

Si asumimos que la influencia de la atmósfera es mínima, ya que estamos trabajando en una ventana atmosférica y en un día despejado, podemos calcular la reflectividad como:

$$\rho = \frac{R_{sen}}{R_{sol}} \quad (10.4)$$

donde R_{sen} es la radiación que ha recibido el sensor procedente de un punto de la superficie terrestre y R_{sol} es la radiación que, emitida por el sol en las longitud de onda correspondiente al canal con que se está trabajando, llega a dicho punto de la superficie terrestre.

El gráfico que, para cada longitud de onda, nos da la reflectividad en tanto por ciento se conoce como signatura espectral (figura ??) y constituye una marca de identidad de los objetos. Resulta así fácil por ejemplo distinguir entre suelo y vegetación, e incluso entre diferentes tipos de suelo o diferentes tipos de vegetación.

10.2.1. Respuesta espectral del agua

El agua clara tiene unas excelentes propiedades en cuanto a transmisión de la radiación electromagnética en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo. En cuanto a la reflectividad, aparece un pico en el verde que va reduciéndose hasta el infrarrojo. Esta falta de reflectividad en el infrarrojo va a ser la clave para distinguir entre áreas de tierra y agua tanto en costas o lagos como en ríos, incluso en ríos pequeños.

El carácter tridimensional de las superficies de agua hace que en su respuesta espectral aparezca un componente debido a la superficie, otro a la columna de agua y un tercero al fondo. Por lo tanto, cualquier variación tanto en la columna de agua como en los materiales del fondo van a alterar su respuesta; un fondo de arena clara proporciona mayor reflectancia que otro compuesto por materia orgánica en descomposición. Sin embargo

debido a la escasa capacidad de penetración de la radiación, estas consideraciones sólo son válidas en aguas muy someras.

La profundidad a la que la luz puede penetrar depende de la longitud de onda. En el agua clara la profundidad de penetración son 10 m entre $0,5$ y $0,6\mu$ cayendo hasta 10 cm en $0,8 - 1,1\mu$. Por tanto al incrementarse la profundidad del agua la reflectancia, en cualquier longitud de onda, desciende.

Cuando el agua contiene turbidez, las consecuencias sobre la respuesta espectral van a depender del tipo de turbidez. Si se trata de fitoplancton, aparecen importantes alteraciones en el verde (aumenta) y en el azul (disminuye). Estos resultados han permitido el desarrollo de diversas ecuaciones empíricas. Si se trata de sedimentos inorgánicos la reflectividad aumenta, especialmente en el rojo

La reflectividad en la nieve es completamente diferente a la del agua, alta en todas las longitudes de onda, especialmente en el caso de la nieve fresca, pudiendo incluso saturar los sensores¹. Es posible confundir nieve con nubes altas (al fin y al cabo formadas por partículas de hielo) con la salvedad de que la reflectividad de la nieve cae hasta cero para longitudes de onda mayores de $1,4\mu$ mientras que la de las nubes sigue siendo alta.

10.2.2. Respuesta espectral de la vegetación

La **vegetación sana** tiene una reflectividad baja en el visible aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila, ese pigmento aparece en concentraciones entre 5 y 10 veces mayores que otros como el caroteno). La reflectividad es muy alta en el infrarrojo reflejado o próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía. Durante el otoño, las hojas pierden los cloroplastos (organos que contienen la clorofila) ya que dejan de ser necesarios, por tanto deja de ser la clorofila el pigmento principal y las plantas adquieren un color pardo-amarillento debido a la cada vez mayor importancia relativa de carotenos y otros pigmentos.

Esta curva tan contrastada se debilita en el caso de la **vegetación enferma** en la que disminuye el infrarrojo y aumenta la reflectividad en el rojo y azul. Se observa también que la reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. Cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta.

La cantidad de energía de los fotones que viajan con longitudes de onda mayores (infrarrojo cercano) es demasiado baja para ser aprovechada por la vegetación por lo que sólo se absorbe en torno al 5 %, el resto se transmite (40 %) o refleja (55 %). Sin embargo, la energía transmitida acabará llegando a otra hoja situada por debajo, y portanto el 55 % de ese 40 % se volverá a reflejar. Este proceso, repetido en diferentes capas hace que se incremente el tanto por ciento de energía reflejada por un dosel vegetal. El envejecimiento de la planta conlleva también una reducción en la reflectividad en el infrarrojo. Las variaciones en la estructura interna de las hojas son la causa principal de que los patrones de respuesta espectral sean diferentes de unas especies a otras.

En cuanto al infrarrojo medio, el agua presente en los tejidos vegetales absorbe la radiación en diversas longitudes de onda hasta alcanzar valores de $\alpha = 0,9$ que afectan incluso a las longitudes de onda vecinas de aquellas

¹Un sensor se satura cuando la radiación que recibe es superior al máximo que puede recibir dada su resolución radiométrica

en las que se produce máxima absorción. En general cuanto menor sea el contenido de agua de una planta, mayor será su reflectividad en el infrarrojo medio.

10.2.3. Respuesta espectral del suelo

Las propiedades espectrales del suelo son relativamente simples, la transmisión es nula, por tanto toda la energía se absorbe o refleja. La reflectividad es relativamente baja para todas las bandas aunque aumentando hacia el infrarrojo. Hay una cierta dependencia entre reflectividad y contenido en agua del suelo, cuanto mayor es el segundo, mayor es la primera como se puede ver en la figura ??². Este aumento se ve interrumpido en aquellas regiones en las que el agua absorbe energía, por tanto cuanto mayor sea el contenido de agua en el suelo, mayor va a ser la disminución en reflectividad de estas regiones.

Otros factores que afectan la respuesta espectral del suelo son la textura con una mayor reflectividad al aumentar el tamaño medio de las partículas de suelo, los suelos arenosos tienen mayor reflectividad (se ven más claros) que los arcillosos. El problema es que la textura afecta también al contenido de humedad por lo que no resulta fácil diferenciar (con imágenes de satélite) entre ambos factores. Los minerales de la arcilla tienen, por su parte, una caída en reflectividad entorno a 2.2μ que no tienen las arenas.

El contenido en materia orgánica también afecta a la reflectividad, cuanto mayor sea su contenido y cuanto menos descomuesta se encuentre más oscuro resulta el suelo (menor reflectividad). La composición química y mineralógica también va a influir en la respuesta espectral, así por ejemplo el contenido en óxidos de hierro va a incrementar la reflectividad en el rojo.

La fuerte correlación entre muchos de los factores que influyen sobre la respuesta espectral del suelo, imposibilita el que puedan sacarse conclusiones claras del análisis de una imagen de unas zonas cuyas características edáficas se desconocen. En todo caso se ha comprobado que las áreas de suelo desnudo de una misma imagen siguen una serie de pautas reconocibles. La más estudiada es que si se hace una representación gráfica con la reflectividad en el rojo en abscisas y la reflectividad en el infrarrojo cercano en ordenadas, las zonas de suelo desnudo aparecen formando una línea que se conoce como **línea del suelo** (figura ??).

10.3. Caracterización de las imágenes de satélite

10.3.1. Plataformas, sensores y canales

Se entiende por **plataforma** los satélites (LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT) o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (**sensores**).

Un sensor es el aparato que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina **canal** o **banda**.

²Esta es la razón de que un suelo mojado se vea más oscuro

Por ejemplo, landsat es una plataforma que contiene dos sensores landsat-TM y landsat-MSS, el primero de los cuales tiene 7 bandas (azul, verde, rojo, 3 en el infrarrojo cercano y 1 en el infrarrojo térmico) y el segundo 4 bandas (verde, rojo y 2 en el infrarrojo cercano). La figura ?? muestra la ubicación, dentro del espectro electromagnético, de las 6 bandas de landsat que corresponden con el espectro solar.

La salida de radiación (emitida o reflejada) de la superficie terrestre es un fenómeno continuo en 4 dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). Un sensor debe muestrear en este continuo discretizándolo en cada una de esas dimensiones. El modo en que esta discretización se lleva a cabo define los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección:

- Resolución espacial (tamaño de pixel)
- Resolución temporal (tiempo que tarda el satélite en tomar dos imágenes del mismo sitio)
- Resolución espectral (capacidad de discriminar entre longitudes de onda vecinas en el espectro, así como el número de bandas disponible).
- Resolución radiométrica (número de intervalos de intensidad que puede captar el sensor)

La figura ?? muestra como cambios en la resolución espacial de una imagen afectan a su calidad. La imagen procede del sensor Quick Bird, con una resolución espacial de aproximadamente 1 metro, y es una composición de 3 bandas (rojo, verde y azul) en color real, la resolución radiométrica es de 256 niveles de gris por banda. En la segunda imagen se ha simulado una reducción de la resolución espectral agrupando las tres bandas del visible en una sola banda pancromática que se representa con 256 niveles de gris. La tercera y la cuarta imágenes simulan una reducción de la resolución radiométrica a 4 niveles por banda en lugar de los 256 anteriores, lo que da un total de 12 colores para la tercera imagen y 4 para la cuarta. Las dos imágenes inferiores muestran una reducción de la resolución espacial a 25 y 50 metros respectivamente.

En la tabla ?? aparecen estas características para varios sensores y plataformas. Se trata de un resumen ya que en algunos casos (Spot, Ikonos) se dispone también de una banda pancromática (todo el visible integrado, como si se tratase de una fotografía en blanco y negro) generalmente con mayor resolución espacial que las restantes; en otros casos no todas las bandas tienen la misma resolución espacial

La altura a la que se sitúa el satélite y sus movimientos van a condicionar las características geométricas y la resolución temporal de las imágenes que producen (figura ??).

Los satélites que como meteosat se sitúan en órbita geoestacionaria (36.000 Km) permanecen fijos y producen una imagen que abarca la mayor parte de la porción del globo terrestre a la que apuntan, sin embargo las distorsiones que aparecen hacia los polos limitan su utilización a la porción entre $50^{\circ}N$ y $50^{\circ}S$. El área de la superficie abarcada por cada pixel es necesariamente grande (2500 o 5000 metros dependiendo de las bandas) su resolución espacial es por tanto pequeña. Al permanecer fijos su resolución temporal puede ser muy grande, en el caso de Meteosat hay una imagen cada 30 minutos

El problema de la correlación negativa entre resolución espacial y temporal se está solucionando en parte debido a la existencia mejores sistemas de almacenamiento de datos y al desarrollo de la teledetección aerotransportada, los sensores se colocan en aviones que vuelan a la altura (resolución espacial) deseada en el momento que se requiera.

Sensor	Res. espacial	Tamaño de imagen	Res. temporal	Res. Radiométrica	Res. espectral
Meteosat	2500 m	Toda la esfera	0.5 horas	256 ND	1Vis 1Ir 1It
NOAA AVHRR	1100 m	2700 x 2700 Km	12 horas	1024 ND	2Vis 1Ir 1It
Landsat TM	30 m	185x185 Km	16 días	256 ND	3Vis 3Ir 1It
SPOT HRV	20 m	60x60 Km	20 días	256 ND	2Vis 1Ir
SPOT Vegetation	1150 m	2200x200 Km	1 día	1024 ND	2Vis 2Ir
MODIS	250 - 100 m	2330x2330 Km	1	1024 ND	36 bandas
IKONOS	4 m	100x100 Km	a petición	2048 ND	3Vis 1Ir

Cuadro 10.2: Características de los principales sensores utilizados en teledetección

Al recibir la radiación procedente de la superficie terrestre, el sensor almacena un número entero, se trata de un intervalo de intensidad o **nivel digital** a partir del cual se puede obtener de nuevo la radiación recibida mediante una sencilla transformación lineal. El número de niveles de intensidad se denomina **resolución radiométrica**

Una imagen de satélite en estado bruto es un conjunto de imágenes (una por banda) similares a las que se obtienen haciendo una fotografía digital. Los pixels están organizados en un sistema de filas y columnas pero sin referencia a coordenadas reales.

10.3.2. Análisis de imágenes de satélite en un SIG

Una imagen de satélite en bruto, tal como normalmente llega al usuario final, consiste en un conjunto de matrices, una por cada canal del sensor, en la que aparecen números del 0 al 255. El cero indica que no llega nada de radiación desde ese punto y el 255 que llega el valor más alto de radiación. Estos valores se denominan **Niveles Digitales** y será necesario transformarlos en algún tipo de variable física.

El tratamiento de una imagen de satélite previo a su análisis incluye:

- Georreferenciación (paso de un sistema de filas y columnas a un sistema de coordenadas estándar). Para ello debe obtenerse una muestra de puntos de control de los que conozcamos tanto sus coordenadas reales como sus coordenadas en la imagen, deben ser por tanto objetos de un tamaño adecuado para resultar identificables tanto en la imagen como sobre el terreno, el tamaño dependerá lógicamente de la resolución de la imagen.
 A partir de estos puntos de control se obtendrán por regresión unas ecuaciones que permitirán a cada par fila, columna un par de coordenadas X,Y.
- Paso de nivel digital a radiación recibida por el sensor. Normalmente a través de una ecuación lineal cuyos parámetros se suministran junto con la imagen. En la tabla ?? aparecen los parámetros para las 6 bandas más utilizadas del sensor LANDSAT -TM, junto con la irradiancia solar extraterrestre, cantidad de energía solar que llega al límite de la atmósfera que se utiliza para calcular la reflectividad.

Banda	a0	a1	E0
1 (Azul)	-6.2	0.768	1970
2 (Verde)	-6	0.818	1843
3 (Rojo)	-4.5	0.64	1555
4 (Infrarrojo a)	-4.5	0.635	1047
5 (Infrarrojo b)	1	0.128	227.1
6 (Infrarrojo térmico)			
7 (Infrarrojo c)	-0.35	0.0424	80

Cuadro 10.3: Parámetros del sensor Landsat TM

- Corrección atmosférica (para eliminar las interferencias producidas por la absorción, dispersión y refracción en la radiación recibida)
- Corrección de luminosidad (para eliminar el efecto de solana-umbría)
- Dependiendo de la región del espectro de que se trate:
 - calculo de la reflectividad dividiendo la radiación recibida por el sensor entre la radiación estimada en superficie (ventana atmosférica en el visible). A partir de la reflectividad en diferentes bandas pueden obtenerse índices que se comporten como indicadores de desertificación. Puede también clasificarse los distintos píxeles de la imagen en función de sus valores de reflectividad en clases que se correspondan con tipos de suelo, vegetación, etc. Ejemplos: Landsat, NOAA
 - Estimación de la concentración del gas que absorbe la radiación en la región del espectro manejada (zona de absorción): Ejemplos TOMS y Meteosat
 - Estimación de la temperatura del cuerpo emisor utilizando la banda de infrarrojo térmico. Casi todos los satélites recogen radiación en alguna región del infrarrojo térmico.

En ocasiones no se llevan a cabo todos los pasos incluidos, depende de los objetivos que se persigan con el empleo de la teledetección, en algunos casos es suficiente trabajar con los ND georreferenciados. El paso siguiente suele incluir todas o alguna de las siguientes fases:

- Visualización y composiciones de color
- Obtención de variables físicas a partir de los valores de reflectividad
- Clasificación de la imagen

10.4. Visualización de imágenes

Tradicionalmente se ha dividido el análisis de imágenes de satélite en 2 fases, un análisis visual y un análisis digital. El primero es similar en muchos aspectos a la fotointerpretación clásica con las ventajas que aporta

la fotografía digital en cuanto a las posibilidades de retocar y realzar las imágenes. Sin embargo una imagen de satélite en bruto presenta un aspecto bastante apagado, por lo que el análisis visual no resulta sencillo. En teledetección se han desarrollado diferentes técnicas que permiten resaltar determinados aspectos para facilitar este análisis.

Aunque el espectro electromagnético abarca un amplio número de regiones y el ojo humano tiene una gran capacidad de discriminación de estos colores, podemos descomponer cualquier color en tres componentes (azul, verde y rojo) que corresponden a tres regiones del espectro visible. Los dispositivos de visualización de imágenes (monitores, televisiones, etc) forman sus imágenes mediante la combinación de diferentes niveles de intensidad en estos tres colores. Cada pixel en pantalla es representado mediante 3 puntos de luz, rojo, verde y azul (composición RGB) al dispositivo encargado de *pintar* todos los puntos de un color se le denomina **cañon**. De este modo existen el cañon del rojo, el del verde y el del azul.

En el ejemplo de la figura ?? se puede ver la descomposición de una imagen de colores vivos en 3 imágenes que reflejan la intensidad en el azul, el verde y el rojo.

Una imagen de satélite tiene varias bandas, algunas de ellas responden a estos colores y otras a regiones fuera del espectro visible. Para visualizarlas podremos pasar las diferentes bandas por cada uno de los cañones o por todos a la vez (imagen en blanco y negro).

10.4.1. Ajuste de contraste

Los sensores utilizados en teledetección están calibrados para recibir valores muy altos de radiación sin llegar a saturarse por lo que lo normal es que todos los valores recibidos estén muy por debajo de los máximos posibles. La consecuencia es que los valores de ND obtenidos son muy bajos y las imágenes se van a ver oscuras, muy poco contrastadas. Una forma de solventar este problema es ajustar el contraste mediante diversas técnicas:

1. Expansión lineal

$$ND' = 255 \frac{ND - ND_{min}}{ND_{max} - ND_{min}} \quad (10.5)$$

2. **Expansión lineal restringida**, los valores de ND_{max} y ND_{min} los decide el usuario en lugar de corresponder a los valores reales de la imagen. De esta forma si $ND_{max} > ND > ND_{min}$ se aplica la fórmula ??; si $ND_{max} < ND$ entonces $ND' = 255$ y si $ND_{min} > ND$ entonces $ND' = 0$
3. **Ecuilibración del histograma**. Tiene en cuenta, no sólo los valores de ND, sino también su frecuencia de manera que aquellos valores de ND más frecuentes resultarán más ajustados que los menos frecuentes.

10.4.2. Composición de color

Puesto que la imagen de cada banda representa niveles de intensidad de un color (azul, verde, rojo, etc.) y los monitores y tarjetas de video disponen de 3 canales

- **R** rojo
- **G** verde
- **B** azul

para representar los 3 colores básicos; puede utilizarse cada canal para representar la intensidad de una banda y obtener así una composición de color, la más obvia sería simular el color real. Para ello, en landsat, la correspondencia entre bandas y colores sería:

b1 ->B
b2 ->G
b3 ->R

pero como se dispone de más bandas, nada impide utilizarlas para generar visualizaciones en **falso color**. Estas composiciones servirán para resaltar los elementos que mayor reflectividad presentan en las bandas utilizadas, además de obtener visualizaciones más o menos estéticas. Por ejemplo, si se pasa la banda 4 de landsat (con alta reflectividad por parte de la vegetación) por el canal verde, la vegetación se verá mucho más claramente que si se utiliza la banda 2

b1 ->B
b4 ->G
b3 ->R

En general, se trata de aprovechar que podemos visualizar tres canales a la vez para introducir las tres bandas que más nos van a ayudar a discriminar visualmente los elementos que nos interesan.

En la figura ?? aparece una composición a partir de la descomposición en colores de la figura ?. La intensidad del rojo se pasa por el canal azul, la del color azul por el canal verde y la del color verde por el canal rojo.

El equivalente *satelital* de las figuras ? y ? son las figuras ? y ? en las que se puede ver en el extremo NO el embalse de Puentes y en el SE la ciudad de Lorca y parte del valle del Guadalentín.

10.4.3. Filtros

Se utilizan para destacar algunos elementos de la imagen. Consiste en la aplicación a cada uno de los pixels de la imagen de una matriz de filtrado (generalmente de 3x3) que genera un nuevo valor mediante una media ponderada del valor original y los de los 8 pixels circundantes. Mediante diferentes combinaciones de los factores de ponderación se pueden conseguir diferentes efectos.

Los filtros más utilizados son los de paso bajo que asignan a cada pixel el valor medio de los pixels circundantes; o los de paso alto (para resaltar zonas de gran variabilidad).

La ecuación que se utiliza es:

$$ZF_{f,c} = \frac{\sum_{dc=-1}^1 \sum_{df=-1}^1 w_{dc,df} Z_{c+dc, f+df}}{\sum_{dc=-1}^1 \sum_{df=-1}^1 w_{dc,df}} \quad (10.6)$$

1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0

Cuadro 10.4: Filtro de paso bajo

-1.0	-1.0	-1.0
-1.0	9.0	-1.0
-1.0	-1.0	-1.0

Cuadro 10.5: Filtro de paso alto

que, en definitiva, es la ecuación de un operador de vecindad que calcula la media ponderada. Los coeficientes de ponderación se definen como matrices (de 3x3 en este caso). Los valores de estas matrices dependerán de lo que se busque con el filtrado. Un filtro de paso bajo tenderá a suavizar la imagen, uno de paso alto (incluyendo valores negativos en algunos coeficientes de ponderación) resalta las variaciones. Finalmente existen filtros direccionales que resaltarán elementos lineales con determinadas orientaciones (figura ??).

10.5. Obtención de variables. Índices y transformaciones

Cuando interesa detectar algún aspecto específico de la superficie terrestre, pueden utilizarse índices que utilicen algunas de las bandas. Estos índices suponen a su vez una transformación de las bandas.

En general podemos hablar de dos tipos de transformaciones:

- Orientadas: Se sabe lo que se busca
 - Índices de vegetación
 - Transformación Tasseled Cap
- No orientadas: No sabemos a priori lo que buscamos
 - Análisis de Componentes Principales

-1.0	-1.0	-1.0		-1.0	2.0	-1.0
2.0	2.0	2.0		-1.0	2.0	-1.0
-1.0	-1.0	-1.0		-1.0	2.0	-1.0

Cuadro 10.6: Filtros direccionales (N-S y E-W)

10.5.1. Índices de vegetación

El más conocido es el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) cuya ecuación es:

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (10.7)$$

Este índice se basa en que la vegetación tiene una reflectividad muy alta en la banda 4 de landsat y muy baja en la banda 3. Por tanto cuanto mayor sea la diferencia entre ambas bandas mayor es el porcentaje de cobertura vegetal y más sana es esta. El dividir el índice entre la suma de ambas reflectividades compensa tanto el efecto de mayor o menor luminosidad como el efecto de la atmósfera.

Se han propuesto distintas variantes para mejorar este índice. El objetivo fundamental es eliminar la influencia que el suelo puede tener sobre las reflectividades en el rojo y el infrarrojo y que pueda enmascarar las de la vegetación.

Otros índices, utilizando otras bandas, permitirían analizar otros aspectos como puede ser la litología. Este tipo de índices pueden calcularse en un SIG ya que, en definitiva, no son más que operadores sencillos de álgebra de mapas

10.5.2. Transformación Tasseled Cap

La transformación tasseled cap supone pasar de las 6 bandas de landsat a 3 bandas con un claro sentido físico que representan el brillo de la imagen (albedo), el verdor y la humedad. Estas nuevas bandas se obtienen mediante:

$$brillo = \sum_{k=1}^6 C_{kb} \rho_k \quad (10.8)$$

$$verdor = \sum_{k=1}^6 C_{kv} \rho_k \quad (10.9)$$

$$humedad = \sum_{k=1}^6 C_{kh} \rho_k \quad (10.10)$$

$$(10.11)$$

En estas ecuaciones C_{kb} significa Coeficiente para obtener brillo (b) en la banda k . Los coeficientes C_{kb} , C_{kv} y C_{kh} de estas ecuaciones aparecen en la tabla ???. Permiten llevar a cabo análisis de la densidad y estado de salud de la vegetación.

Componente	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Brillo	0.3037	0.2793	0.4743	0.5585	0.5082	0.1863
Verdor	-0.2848	-0.2435	-0.5436	0.7243	0.0840	-0.1800
Humedad	0.1509	0.1973	0.3279	0.3406	-0.712	-0.4572

Cuadro 10.7: Coeficientes de la transformacion *tasseled cap*

10.5.3. Análisis de Componentes Principales

Uno de los problemas que aparecen en la clasificación estadística es la alta correlación entre variables. En este caso la introducción de varias variables en la clasificación no aporta más información. En la figura 2 aparece un ejemplo en el cual las bandas 3 y 4 de Landsat TM podrían resumirse en una sola variable.

Las diferentes técnicas de análisis multivariante permiten transformar una serie de variables en nuevas variables denominadas componentes incorrelacionadas, que absorben la varianza (variabilidad) total de los datos. Estos componentes están ordenados además de mayor a menor en relación al porcentaje de la varianza total que absorben. Ello permite eliminar los componentes que absorban un escaso porcentaje de la varianza original y quedarnos con los que absorban mayor variabilidad.

Para ello hace falta analizar los resultados del análisis de componentes principales: la matriz de vectores propios y el vector de valores propios. Sin embargo los módulos de análisis de componentes principales de los programas de SIG no suelen aportar toda la información necesaria.

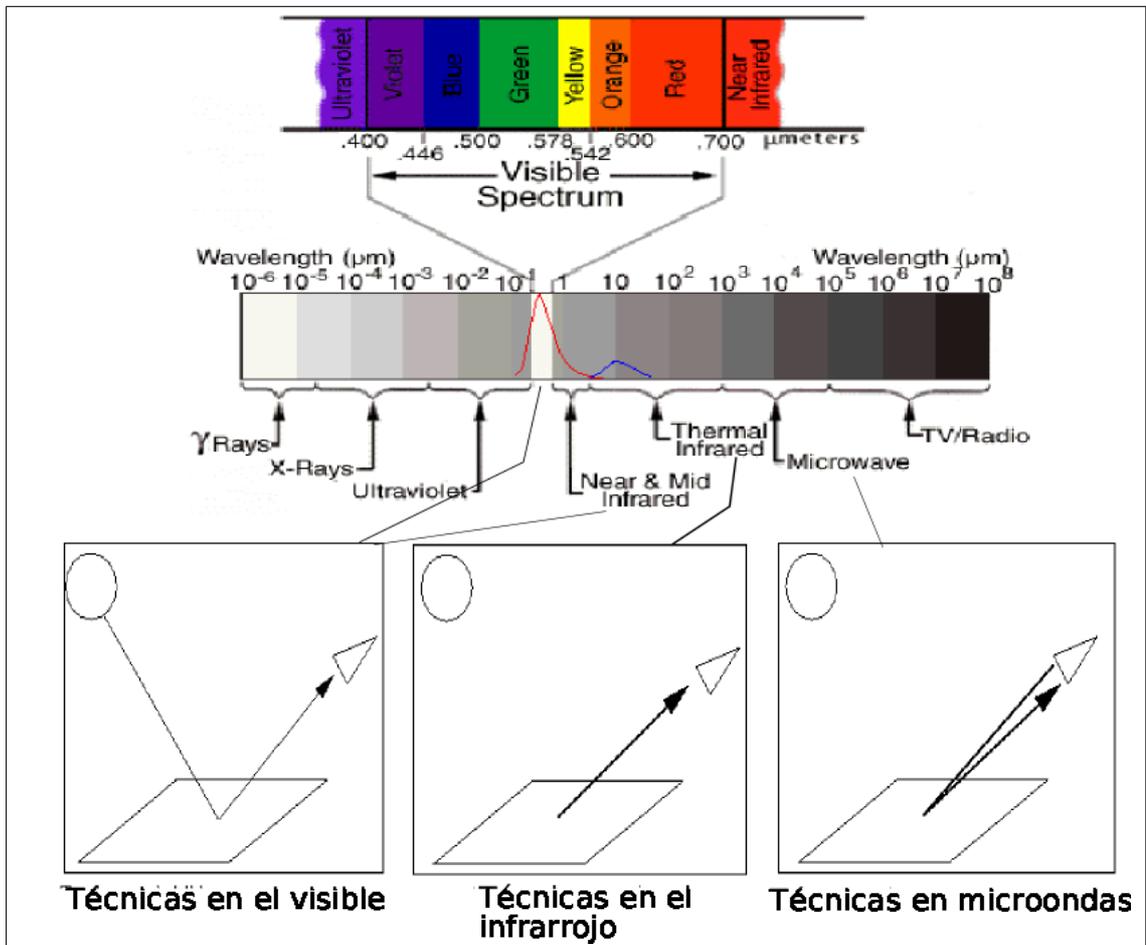


Figura 10.1: Espectro electromagnético y técnicas de teledetección

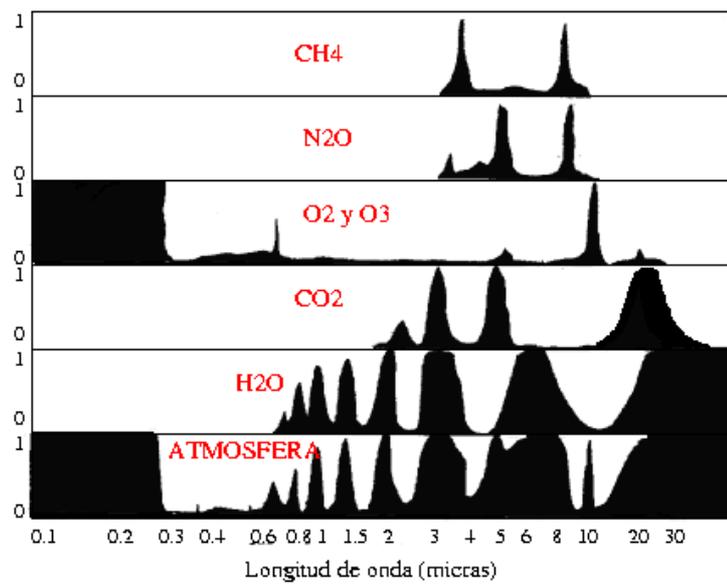


Figura 10.2: Bandas de absorción y ventanas en el espectro electromagnético

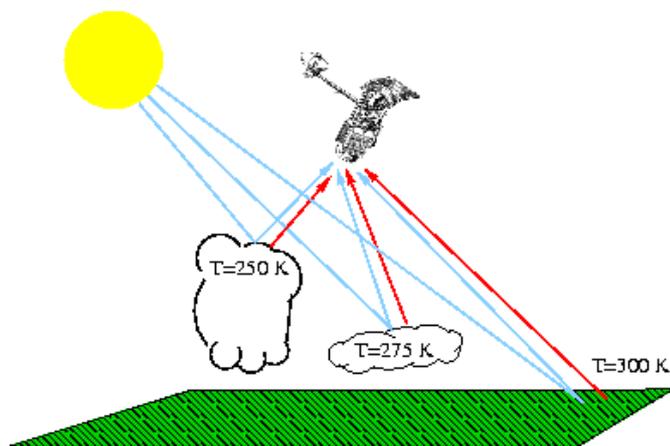


Figura 10.3: Efecto de las nubes sobre las observaciones de satélite

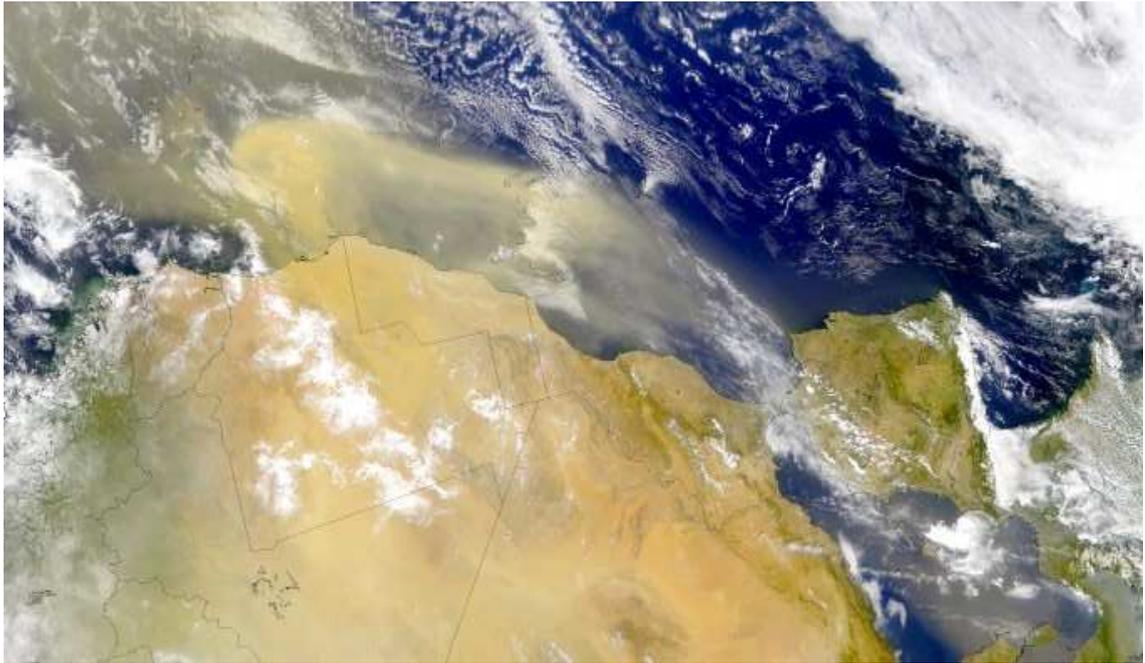
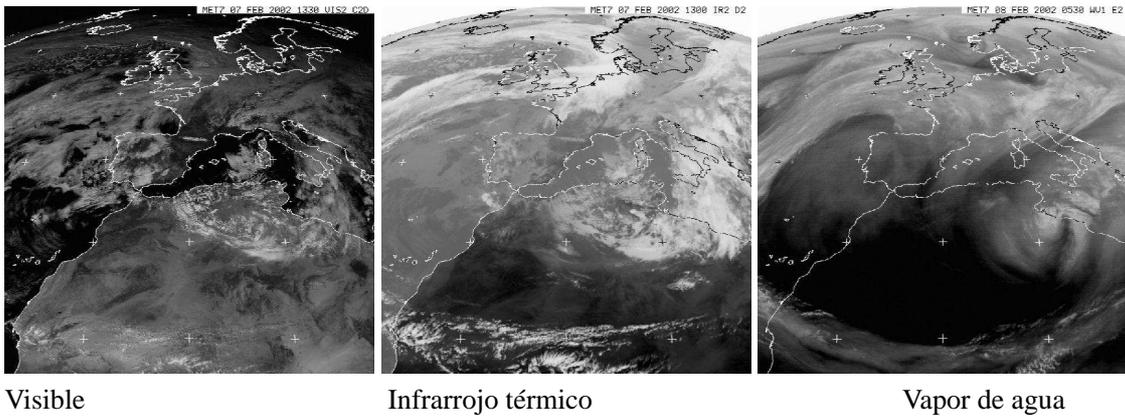


Figura 10.4: Efecto del polvo sobre las observaciones de satélite



Visible

Infrarrojo térmico

Vapor de agua

Figura 10.5: Imágenes de cada uno de los canales del satélite Meteosat

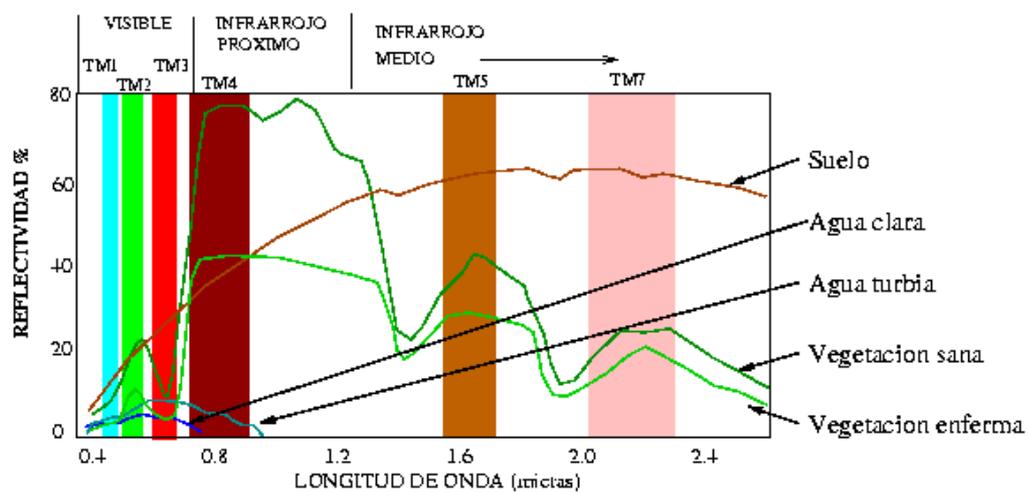


Figura 10.6: Respuestas espectrales

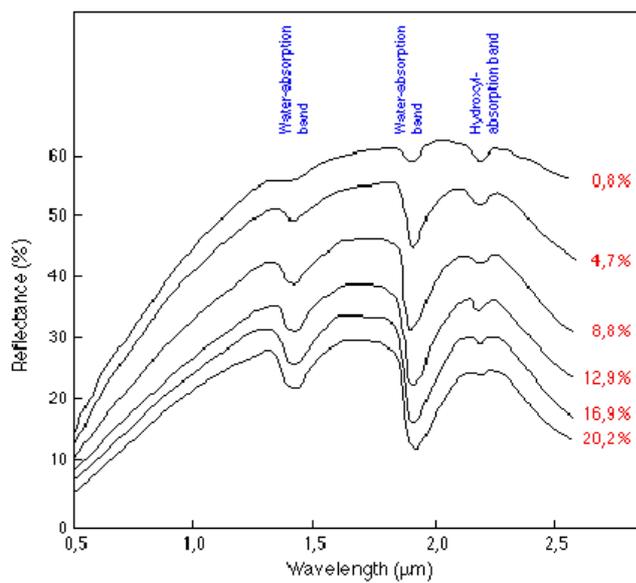


Figura 10.7: Refreltividad del suelo

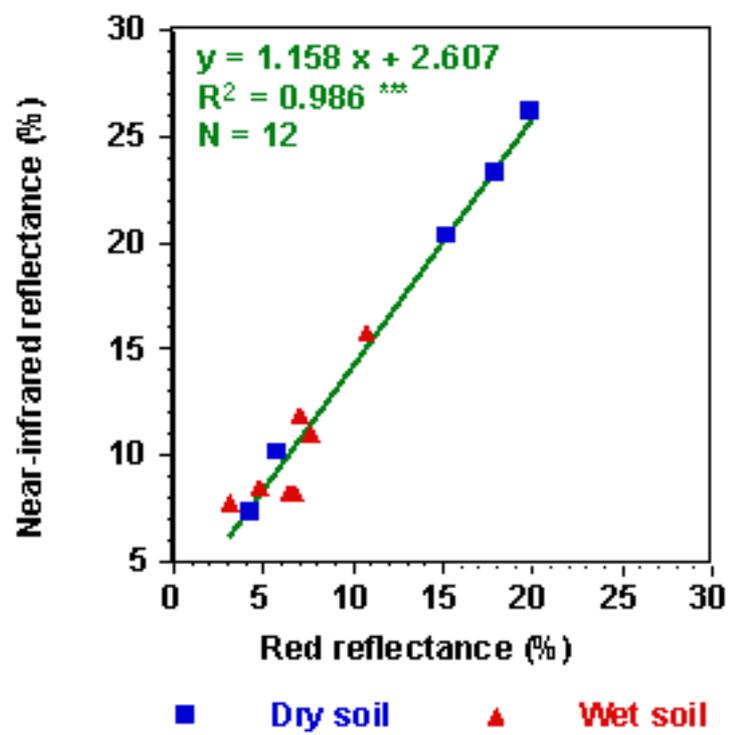


Figura 10.8: Línea del suelo



Figura 10.9: Efectos de los cambios en la resolución de las imágenes de satélite

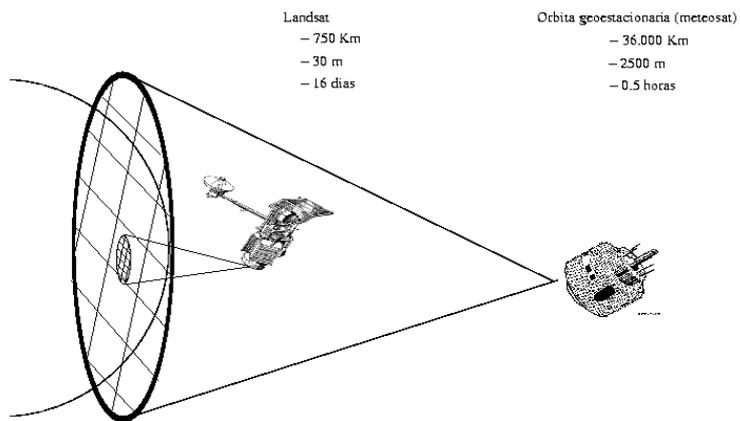


Figura 10.10: Efecto de la altura del satélite sobre las imágenes

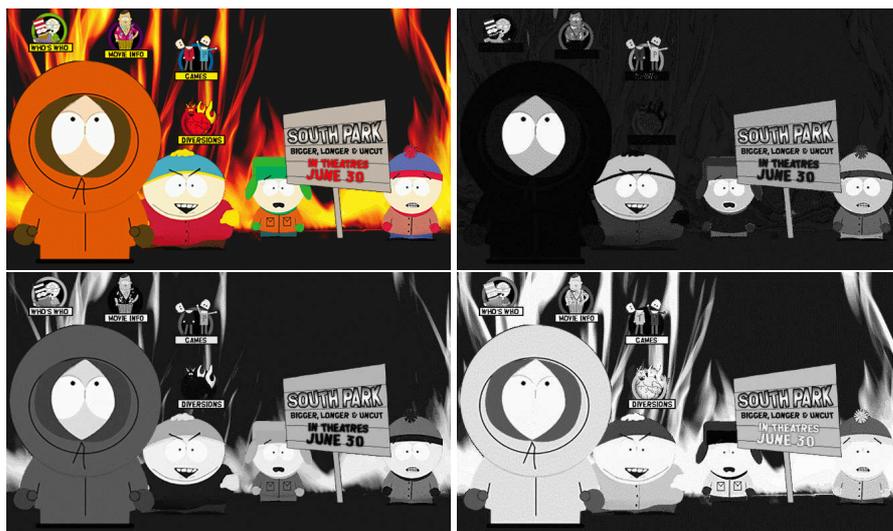


Figura 10.11: Descomposición de una imagen en las componentes azul, verde y rojo



Figura 10.12: Combinación falso color

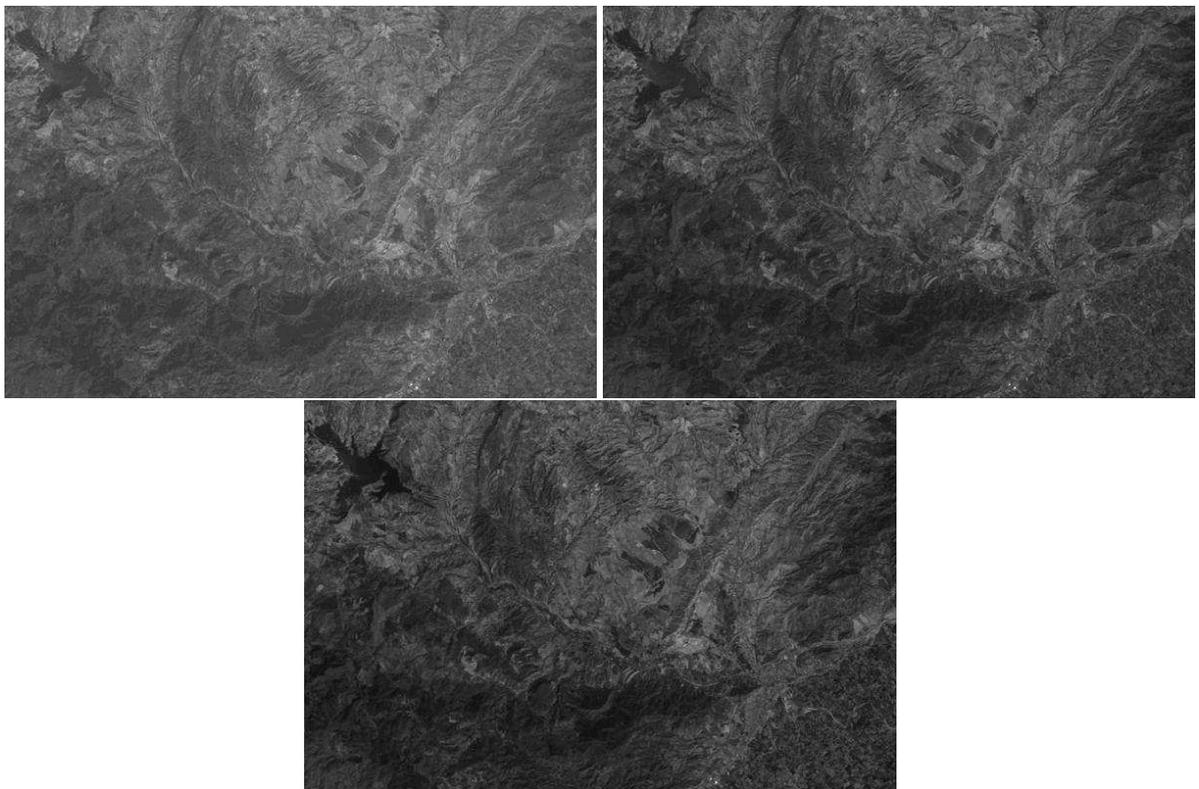


Figura 10.13: Bandas 1 a 3, imagen landsat de Abril-1993



Figura 10.14: Combinación de color y falso color

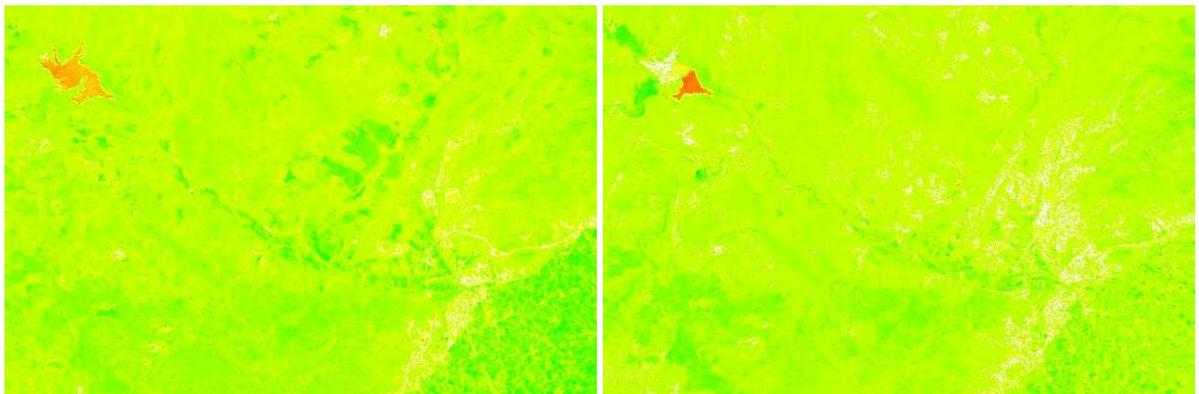


Figura 10.15: NDVI de Abril-1993 y septiembre-1993

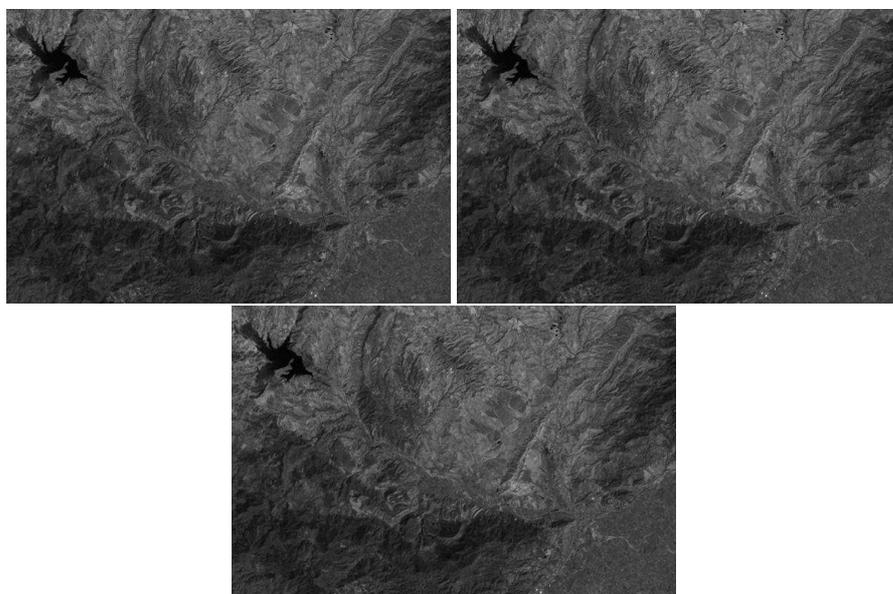


Figura 10.16: Efecto de la transformación *tasseled cap*

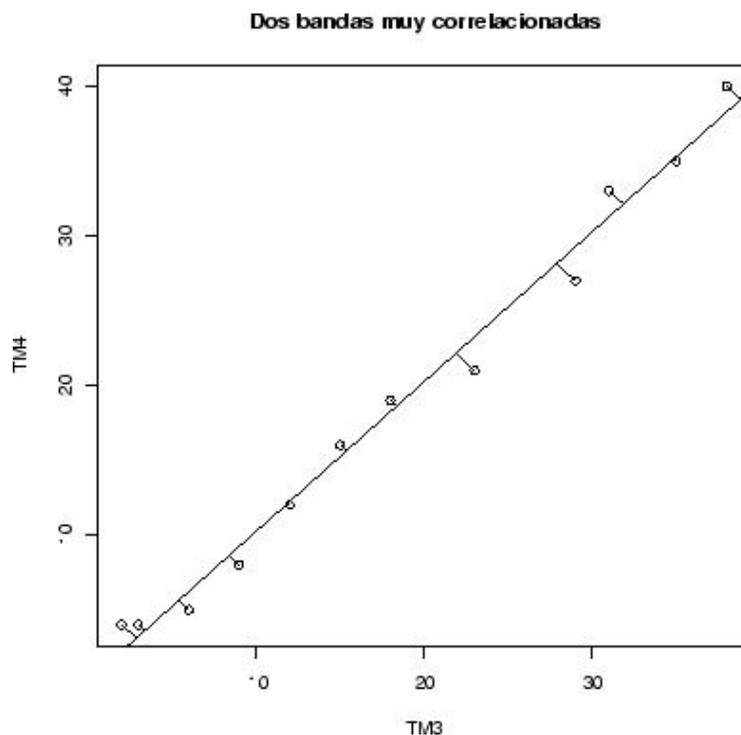


Figura 10.17: Alta correlación entre bandas

Sin entrar demasiado en los detalles del procedimiento, en la Región de Murcia, el primer componente suele poder asimilarse al albedo, el segundo a la presencia de vegetación y el tercero a la presencia de agua, por lo que son similares a la transformación tasseled cap. Los últimos componentes, puesto que absorben fundamentalmente aleatoriedad, ruido, tienen un aspecto similar a una televisión no sintonizada.

10.6. Clasificación de imágenes

La elaboración de una clasificación del área de estudio en una serie de clases relativas a litología, tipos de vegetación, usos del suelo, etc., es uno de los objetivos fundamentales en teledetección.

La clasificación en teledetección es, por tanto, un caso particular del problema general de clasificar N individuos en un conjunto de K clases en función de una serie de variables cuantitativas (X_1, X_2, \dots, X_n). Para resolver este problema se necesita una medida de la semejanza o diferencia entre los diferentes individuos y entre los individuos y las clases. Dos individuos muy parecidos pertenecerán probablemente a la misma clase, mientras que dos individuos distintos pertenecerán a diferentes clases. La medida más utilizada es la distancia euclidiana:

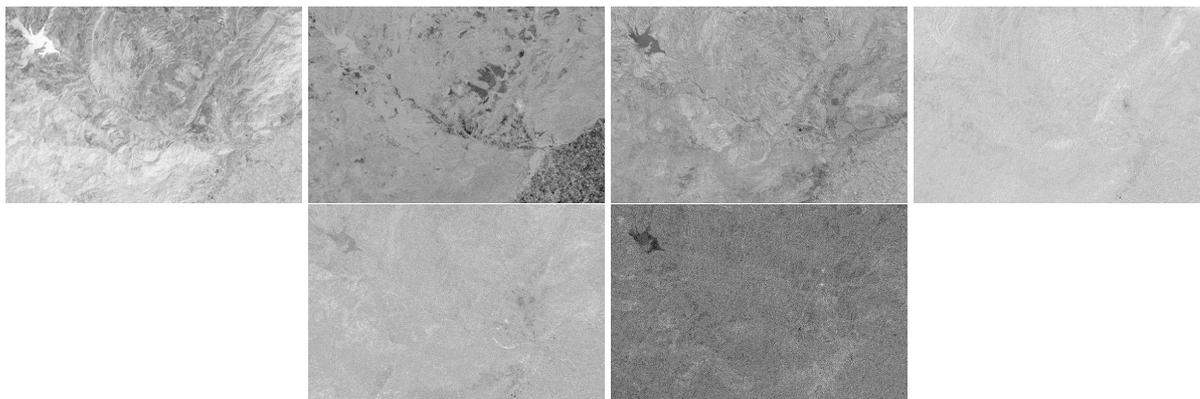


Figura 10.18: Análisis de componentes principales

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{v=1}^n (X_{vi} - X_{vj})^2} \quad (10.12)$$

aunque pueden utilizarse otro tipo de distancias. Para estimar los valores de X_1, X_2, \dots, X_n para las diferentes clases se utiliza la media aritmética de los valores de los pixels incluidos en la clase.

Puesto que en la práctica no podemos saber con certeza a que clase corresponde cada uno de los pixels, el problema de la clasificación se convierte en un problema de probabilidad de pertenencia a cada una de las clases de un conjunto, por tanto se suelen usar métodos estadísticos.

El procedimiento de clasificación supone dos fases:

- Definición de las clases
- Adjudicación de cada uno de los pixels del terreno a las clases previamente definidas

10.6.1. Definición de clases

Suponiendo que los datos han pasado ya todo tipo de correcciones de tipo geométrico o atmosférico, existen dos métodos complementarios para afrontar la definición de clases, estos son válidos tanto en imágenes de satélite como en cualquier otro campo.

- **Clasificación supervisada.**
- **Clasificación no supervisada.**

En realidad suelen utilizarse ambos procedimientos ya que son complementarios. La clasificación supervisada utiliza nuestro conocimiento del terreno pero si este conocimiento no es perfecto pueden escaparse cosas que una clasificación no supervisada detectaría.

Clasificación no supervisada

En la clasificación no supervisada no se establece ninguna clase a priori, aunque es necesario determinar el número de clases que queremos establecer, y se utilizan algoritmos matemáticos de clasificación automática. Los más comunes son los algoritmos de clustering que divide el espacio de las variables en una serie de regiones de manera que se minimice la variabilidad interna de los pixeles incluidos en cada región. Cada región de este espacio de variables (figura ??) define de este modo una *clase espectral*.

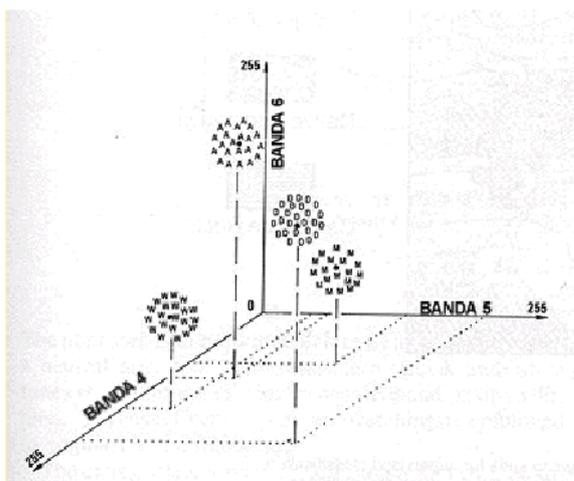


Figura 10.19: Definición no supervisada de clases en el espacio de variables

El procedimiento consta de una serie de pasos, en cada paso se identifican los dos individuos más próximos, se hace una clase con ellos y se sustituyen por el centroide de la clase resultante. De este modo cada paso analiza un individuo menos que el anterior ya que los individuos van siendo sustituidos por clases. El proceso se detiene cuando se ha alcanzado un número de clases igual al número de clases que había sido establecido a priori.

El resultado final de un proceso de clustering suele ser un dendrograma (figura ??) en el que puede verse como los diversos individuos se aglutinan en clases, primero los que están a una menor distancia (los más parecidos), y como posteriormente las clases se unen entre sí. A partir de un dendrograma podemos elegir el número de clases que queremos mantener en función de diferentes criterios.

Puesto que una imagen de satélite contiene del orden de millones de píxeles no tendría sentido hacer un dendrograma completo, ni siquiera utilizar todos los píxeles. En su lugar se establece una muestra con la que se

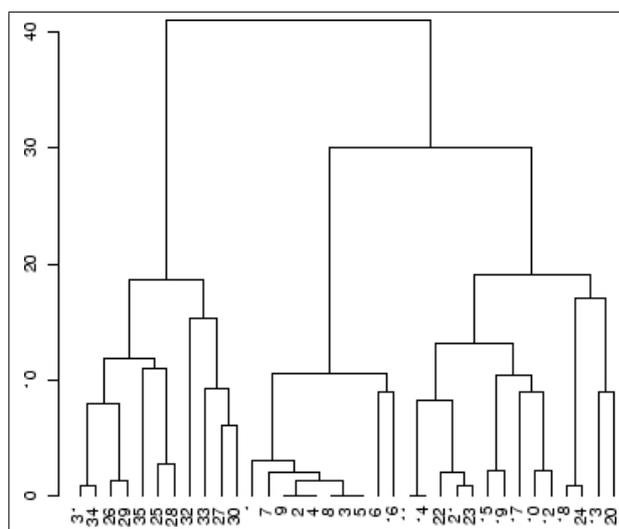


Figura 10.20: Dendrograma obtenido a partir de los pixels de las áreas de entrenamiento

inicia el proceso. El usuario debe decidir a priori con cuantas clases quiere trabajar y el programa parará en el momento que toda la muestra inicial se haya reducido a ese número de clases. El resultado final sería la caracterización de cada una de las clases obtenidas.

Clasificación supervisada

La clasificación supervisada se basa en la disponibilidad de áreas de entrenamiento. . Se trata de áreas de las que se conoce a priori la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una signatura espectral característica de cada una de las clases. Se denominan *clases informacionales*. Estas deben ser áreas lo más homogéneas posibles y en las que sepamos lo que había el día que se tomó la imagen. Por ello esta operación se realiza el mismo día en el que el satélite toma la imagen y luego se compra esta. Otra posibilidad es utilizar fotografía aérea o información de otro tipo.

Obtener las características de reflectividad de cada una de las clases implica una simple consulta a las imágenes (figura ??). La respuesta espectral de una clase será la respuesta espectral media de sus pixels.

10.6.2. Asignación de pixels a clases

Una vez que se dispone de un conjunto de clases y de sus signaturas espectrales características, vamos a tratar de adjudicar cada uno de los pixels a una clase. Los primeros métodos que se utilizaron eran de tipo no estadístico y con ellos se obtenían resultados bastante mediocres. Su análisis es, sin embargo, útil para comenzar a indagar en los problemas del proceso de clasificación.

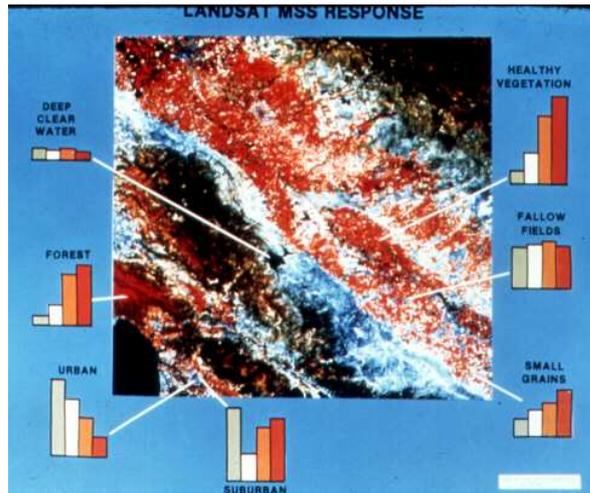


Figura 10.21: Imagen MSS y definición supervisada de clases

- No estadísticos (mínima distancia, paralelepípedos)
- Estadísticos clásicos (máxima probabilidad)
- Algoritmos basados en inteligencia artificial (clasificación contextual, lógica borrosa, redes neuronales, árboles de decisión)

A continuación se indagará en algunos de estos métodos. Se utiliza para ello una muestra de celdillas pertenecientes a 3 clases diferentes (figura ??) que podrían asimilarse a celdillas de vegetación (verde), suelo desnudo (rojo) y agua (azul). Los valores de reflectividad en las bandas 3 y 4 de landsat (ver figura ?? para ver a que regiones del espectro electromagnético equivalen) se representan mediante círculos; mediante cruces se han representado los centroides de cada una de las clases (valores de reflectividad media para cada una de las bandas; finalmente con un cuadrado se representa la celdilla que se va a clasificar.

Clasificación por mínima distancia

Evidentemente el pixel x se asignará a la clase respecto a la cual su distancia sea mínima (figura ??). En definitiva, se definen una serie de hiperesferas que rellenan el hiperespacio de variables sin intersectarse.

Este método no es demasiado bueno ya que sobreclasifica la imagen, es decir ningún pixel queda sin clasificar. Aunque algunos autores señalan esto como una ventaja, realmente es un problema ya que es preferible dejar áreas sin clasificar que clasificarlas sin garantías.

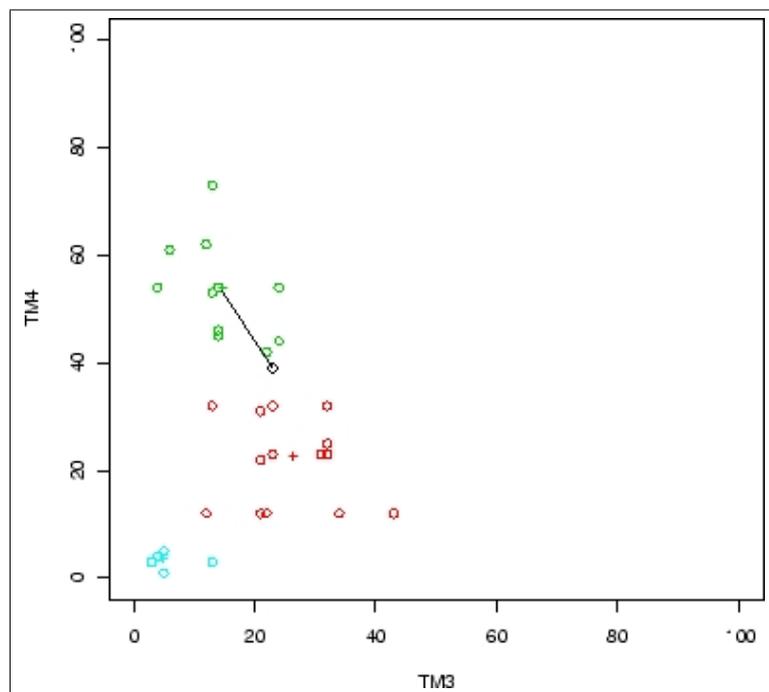


Figura 10.22: Clasificación por mínima distancia

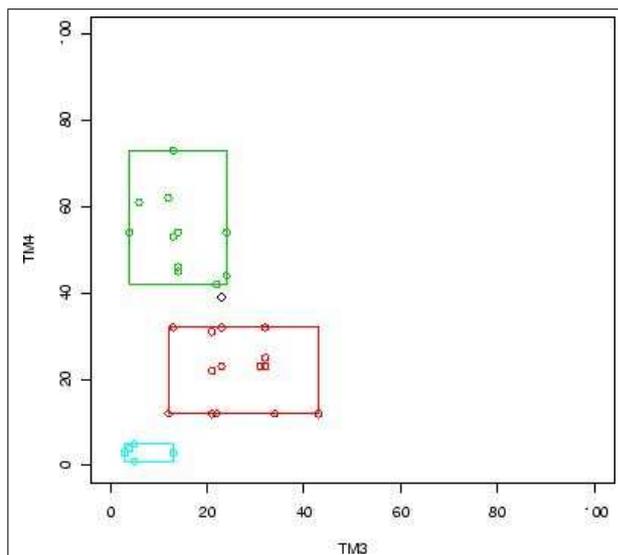


Figura 10.23: Clasificación por paralelepípedos

Clasificación por paralelepípedos

En este método se definen una serie de paralelepípedos, hiperparalelepípedos manteniendo la nomenclatura anterior, que definen las fronteras de cada clase (figura ??). La definición de cada uno de los paralelepípedos debe hacerse teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos de reflectividad para cada una de las bandas. Con este método pueden aparecer pixels sin asignar o pixels asignados a varias clases.

Aquellas celdillas que quedan sin clasificar representan otras clases que no se han tenido en cuenta o bien que resultan demasiado complejas para adjudicarlas a una clase.

Clasificación por máxima verosimilitud

Puesto que se tiene una muestra de reflectividades para cada clase y cada banda, puede calcularse la media y la desviación típica de cada una de las clases, y utilizar algún modelo de distribución de probabilidad. El clasificador de máxima probabilidad asume que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un pixel cualquiera pertenezca a cada una de las clases. El pixel se asigna de este modo a la clase a la que es más probable que pertenezca.

Este método puede usarse de forma automática, o puede establecerse algún criterio que permita asignar pixels a una clase sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Permite por otro lado definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación, por ejemplo la diferencia entre la máxima probabilidad y la siguiente.

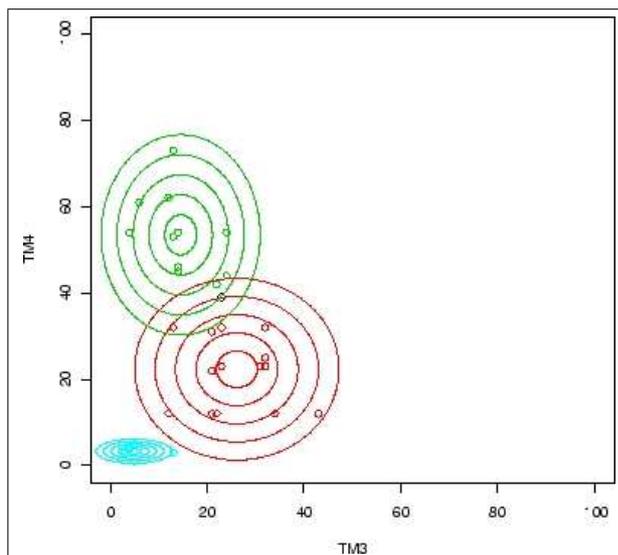


Figura 10.24: Clasificación por máxima probabilidad

En la figura ?? aparecen una serie de elipses rodeando a cada uno de los centroides, se trata de líneas de isoprobabilidad, por tanto el pixel se clasificará como perteneciente a la clase en la que sus valores resulten más probables.

Sin embargo la hipótesis de que los datos de reflectividad siguen una distribución normal no siempre se cumple y debería verificarse siempre.

Clasificación de contexto

Todos los métodos estudiados hasta ahora utilizan, para clasificar una celdilla, sólo los valores de reflectividad recogidos en dicha celdilla. Este hecho no es demasiado problemático si el tamaño de la celdilla es mayor que los diferentes elementos físicos que componen el paisaje. Sin embargo si el tamaño es más pequeño que las unidades de paisaje podría utilizarse la información de los pixels de alrededor para estimar la pertenencia a una clase o confirmar la estimación.

Puede resultar un método útil en combinación con el de máxima probabilidad ya que permite incluir la información de los pixels circundantes para tomar una decisión en caso de que las probabilidades para dos clases sean similares o no exista una clase con probabilidades de pertenencia suficientemente altas.

Contexto espacial

Se trata de incorporar otras fuentes de información distintas a las bandas para la clasificación. Entre esta información estaría la altitud, pendiente, litología, etc. Las distintas formaciones vegetales tienen mayor capacidad

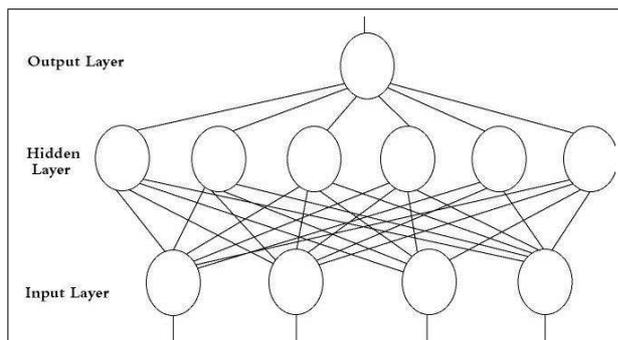


Figura 10.25: Ejemplo de red neuronal

para desarrollarse en determinados entornos definidos en parte por estas variables. Por tanto puede ser útil establecer cual es la formación vegetal con mayor probabilidad de desarrollarse en un determinado pixel (en función de topografía y litología) y combinar esta información con la de las bandas.

Clasificaciones multitemporales

Si lo que se pretende es distinguir entre clases cuya respuesta espectral varían con el tiempo, por ejemplo entre diferentes usos del suelo, puede ser interesante integrar imágenes obtenidas en diferentes fechas. Imágenes de primavera y otoño tienen un gran valor discriminante ya que las superficies vegetales, especialmente las de cultivo muestran grandes diferencias.

Si se utiliza esta técnica, resulta imprescindible realizar una buena corrección atmosférica de las imágenes. Si todas son de la misma fecha, la influencia de la atmósfera es la misma para todas por tanto podemos asumir que no influye demasiado en la clasificación. Sin embargo si las imágenes proceden de diferentes fechas, la diferente influencia de la atmósfera puede enmascarar y distorsionar los cambios en la respuesta espectral.

Clasificación por redes neuronales

Se basan en el uso de redes neuronales artificiales que, se supone, imitan a las redes neuronales reales en el desarrollo de tareas de aprendizaje. Una neurona artificial es un objeto lógico (se trata de software no de hardware) que recibe diversas entradas, hace una media ponderada de las mismas y produce una salida a partir de la aplicación de una función umbral a la media ponderada.

Si conectamos las salidas de unas neuronas como entradas de otras obtenemos una red neuronal. Uno de los ejemplos más típicos de red neuronal es el la Back Propagation Neural Network que aparece en la figura.

Consta de una capa de entrada con tantas neuronas como variables de entrada se vayan a introducir en el modelo (en el caso de la teledetección sería una por cada banda utilizada para clasificar), una capa oculta que realiza la mayor parte del cálculo y una capa de salida con tantas neuronas como posibles clases existan. En teledetección

esta salida suele consistir en un valor numérico entre 0 y 1 para cada clase, cuanto mayor sea este valor más verosímil resulta que el pixel pertenezca a la clase en cuestión

Para trabajar con una red neuronal existen varias fases:

1. **Entrenamiento.** Se le introducen a la red la respuesta espectral de pixeles cuya clase se conoce y se compara la salida con la realidad. A partir de esta comparación se modifican los coeficientes de ponderación de todas las neuronas para que se obtenga la respuesta adecuada (se trata de un procedimiento automático) es decir un 1 en la clase correcta y ceros en las incorrectas
2. **Estabilización.** Al principio del entrenamiento, los factores de ponderación cambian muy deprisa, pero conforme este se desarrolla (y si las areas de entrenamiento se han seleccionado correctamente) se estabilizan (no se modifican aunque se vuelvan a introducir los pixels de entrenamiento). En este momento finaliza la fase de entrenamiento
3. **Clasificación.** Se introducen las respuestas espectrales de los pixels cuya clase no se conoce y se adjudican a la clase que de una respuesta más alta (que no va a ser necesariamente 1).

Se trata en definitiva de un método de clasificación no paramétrico robusto que da buenos resultados cuando las respuestas espectrales de las clases no siguen una distribución normal. La clave está en el conjunto de coeficientes de ponderación que constituyen un conjunto de parámetros que deben ajustarse a unos datos de entrada y salida. Por tanto en cierto modo es equivalente a una regresión multivariante no paramétrica.

Arboles de clasificación

Suponen un análisis exhaustivo de las respuestas espectrales de las clases y del conjunto de datos disponibles, consiste en ir haciendo preguntas a cada pixel cuya respuesta positiva o negativa conducirá a otra pregunta y así sucesivamente hasta obtener la clase a la que pertenece. Se basa en los mismos principios que los sistemas expertos.

Clasificadores borrosos

Sea cual sea el procedimiento de clasificación utilizado, surge el problema de que algunos pixels resultan inclasificables, bien porque sus probabilidades de pertenencia a cualquier clase sean muy bajas (máxima verosimilitud, salidas de un método de redes neuronales, etc.) o porque aparezcan dos o más clases con muy alta probabilidad que se disputen el pixel. En estos casos tiene más sentido no clasificar los pixels de forma unívoca sino establecer cual es su posibilidad de pertenencia a cada una de las clases (el concepto de posibilidad no es exactamente igual al de probabilidad).

	A	B	C	D	E	F	Ni	ni/Ni	n_{ii}^c	n_{ic}^i
A	50	3	0	0	2	5	60	83.3	10	21
B	4	62	3	0	0	1	70	88.5	8	10
C	4	4	70	0	8	3	86	81.4	19	6
D	0	0	0	64	0	0	64	100.0	0	3
E	3	0	2	0	71	1	78	91.0	6	10
F	10	3	1	3	0	33	50	66.0	17	10
							408	85.8	60	60

Cuadro 10.8: Matriz de confusiones con 6 clases

10.7. Validación. Error de clasificación

Existen dos posibilidades, evaluar una estimación teórica del error en función de las características del algoritmo de clasificación o analizar una serie de áreas test obtenidas del mismo modo que las áreas de entrenamiento. El segundo modo de proceder permite obtener una estimación más realista de los errores mientras la muestra de pixels para la estimación del error sea lo suficientemente grande y representativo.

Un método simple y apropiado de evaluaciones de los errores es utilizar la matriz de confusión de clases (tabla ??).

Con este tipo de análisis, se obtiene, no sólo una caracterización del error cometido, sino también una medida sobre la adecuación de las clases consideradas a la realidad y de los parámetros utilizados para caracterizarlas. Puede por tanto utilizarse para definir un nuevo conjunto de clases para realizar una clasificación.

En la tabla aparece un ejemplo de matriz de confusiones, los valores en filas representan las clases reales y en columnas aparecen (en la parte izquierda de la tabla) las clases obtenidas tras la clasificación. Por tanto debe interpretarse como el número de pixels que perteneciendo a la clase fila han sido adjudicados a la clase columna.

En la parte derecha de la tabla aparece: N_i es el número total de pixels de cada clase, el porcentaje de pixels clasificados correctamente para cada clase. $(n_i)_{ci}$ es el número de pixels que correspondiendo a la clase y han sido adjudicados a otras, y $(n_{ic})_i$ es el número de pixels adjudicados a i cuando en realidad pertenecen a otra clase. La última fila presenta la totalización de estos resultados.

10.8. Bibliografía

- Chuvieco, E. (2000) *Fundamentos de Teledetección espacial*, RIALP, 568 pp.
- Chuvieco, E. (2002) *Teledetección Ambiental*, Ariel,
- Mather, P.M (1999) *Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction*, Wiley., 292 pp + 1 CDROM.

- NASA *The remote sensing tutorial* (<http://rst.gsfc.nasa.gov/start.html>)
- Parkinson, C.L. (1997) *Earth from above. Using Color-Coded Satellite Images to Examine the Global Environment*, University Science Books, 175 pp. Sobrino, J.A. (2000) *Teledetección* Servicio de Publicaciones Universidad de Valencia, 467 pp.
- VV.AA. *The remote sensing Core curriculum* (<http://research.umbc.edu/tbenja1/umbc7/>)