

## Tema 7

# Correcciones a las imágenes de satélites

Una imagen de satélite está sometida a una serie de interferencias que hacen que la información que quiere obtenerse aparezca perturbada por una serie de errores. Estos errores han sido ya mencionados en el tema 3:

- Fallos en los sensores, generan píxeles incorrectos (corrección radiométrica)
- Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación e los sensores, generan distorsiones en la imagen global (corrección geométrica)
- Interferencia de la atmósfera, alteran de forma sistemática los valores de los píxeles (corrección atmosférica).

En este tema se introducirán un conjunto de métodos para la corrección de estos errores. En el caso de la georreferenciación no se trata sólo de corregir errores sino de ubicar una imagen en el espacio geográfico para poder integrarla con otras capas de información o con otras imágenes en un entorno SIG.

### 7.1 Corrección radiométrica

De los tres tipos de correcciones que se mencionan al final del tema 3, esta es la más sencilla. De hecho en algunos casos las estaciones receptoras llevan a cabo algún tipo de corrección en el momento de recepción de la imagen. La corrección radiométrica implica por una parte la restauración de líneas o píxeles perdidos y por otra la corrección del bandeo de la imagen.

#### 7.1.1 Píxeles o líneas perdidas

Si se ha perdido el valor de algún píxel la solución más simple sería estimarlo como la media de los valores del mismo píxel en las líneas anterior y posterior (no es recomendable utilizar los píxeles contiguos

de la misma línea por que han sido captados por el mismo detector que ha dado el fallo, por tanto son poco fiables).

$$ND_{i,j} = \text{round}\left(\frac{ND_{i-1,j} + ND_{i+1,j}}{2}\right) \quad (7.1)$$

donde *round* indica redondeo al número entero más cercano.

No hay que olvidar sin embargo que las diferentes bandas de una imagen están altamente correlacionadas y además los detectores de dos bandas diferentes no son los mismos. Por tanto podría utilizarse el valor del pixel faltante en una banda diferente para mejorar la estimación:

$$ND_{i,j,k} = \text{round}\left(\left(\frac{s_k}{s_r}\right)(ND_{i,j,r} - \frac{ND_{i+1,j,r} - ND_{i-1,j,r}}{2} + \frac{ND_{i-1,j,k} + ND_{i+1,j,k}}{2}\right)\right) \quad (7.2)$$

En caso de que la imagen abarque un territorio amplio y cambiante resulta recomendable calcular los coeficientes de correlación y las desviaciones típicas ( $s_k$  y  $s_r$ ) en un entorno cercano al pixel perdido.

Para detectar líneas perdidas se compara la media de los ND de una línea con las medias de las líneas anterior y posterior, para detectar pixeles perdidos se compara el valor de un pixel con los de los 8 pixeles vecinos mediante algún procedimiento de filtrado.

### 7.1.2 Bandedo

El fenómeno del bandedo se debe a una mala calibración entre detectores y resulta especialmente visible en las zonas de baja radiancia (zonas marinas por ejemplo). El resultado es la aparición periódica de una banda más clara u oscura que las demás.

Para corregir el bandedo se asume que, en caso de no haber error, los histogramas obtenidos por cada uno de los detectores serían similares entre sí y similares al histograma global de la imagen que se toma como referencia.

En primer lugar se calculan los coeficientes  $a_k$  y  $b_k$  para una corrección lineal de cada uno de los detectores.

$$b_k = s/s_k \quad (7.3)$$

$$a_k = m - b_k m_k \quad (7.4)$$

Donde  $m$  y  $s$  son la media y la desviación típica del conjunto de pixeles de la imagen y  $m_k$  y  $s_k$  la media y la desviación típica de los pixeles obtenidos por el detector  $k$ . A continuación los ND de la imagen se recalculan como:

$$ND'_{i,j} = a_k + b_k ND_{i,j} \quad (7.5)$$

asumiendo que la línea  $i$  ha sido captada por el detector  $k$ .

## 7.2 Georreferenciación y corrección geométrica de imágenes de satélite

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento digital de imágenes.

El proceso de **georreferenciación** consiste en dar a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estandar (UTM, lambert, coordenadas geográficas) para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG. Tras la georreferenciación se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud. En caso de que la imagen no hubiese sufrido ningún tipo de distorsión, el procedimiento sería bastante sencillo, sin embargo una imagen puede sufrir diversos tipos de distorsiones (ver tema 3).

Las correcciones necesarias para transformar en cada punto de la imagen sus coordenadas arbitrarias (fila-columna) en coordenadas reales ( $X$  e  $Y$  UTM por ejemplo) se explicitan mediante un par de ecuaciones que hacen corresponder a cada pixel par  $(f, c)$  un par  $(X, Y)$ .

$$X = f_1(f, c) \quad (7.6)$$

$$Y = f_2(f, c) \quad (7.7)$$

La forma y parámetros de estas funciones depende fundamentalmente del tipo de enfoque que se escoja para realizar la georreferenciación. Existen fundamentalmente dos métodos.

El primero, la **corrección orbital**, modeliza las fuentes de error y su influencia. Para ello es necesario conocer con precisión tanto las características de la órbita del satélite como las del sensor. El segundo es un enfoque empírico que modeliza la distribución de errores en la imagen utilizando **puntos de control**. El primero es más automático conociendo la información necesaria y las ecuaciones de transformación, aunque falla cuando aparecen errores aleatorios; es el que se suele suministrar cuando los datos se piden georreferenciados. El segundo es más simple en cuanto a su formulación y corrige mejor los errores aleatorios, su inconveniente es que es más trabajoso. El método de los puntos de control no deja de ser un procedimiento de regresión.

En general, en los métodos de regresión se dispone del valor de dos variables,  $X$  e  $Y$ <sup>1</sup>, medidas en una serie de casos y, a partir de ellos, se obtiene una ecuación que permite estimar  $Y$  a partir de nuevos valores de  $X$ . A la variable  $X$  se le denomina independiente y a  $Y$  variable dependiente.

En el caso de la georreferenciación las variables independientes son  $c$  y  $f$ , es decir la columna y fila en que se ubica un pixel en la imagen original; mientras que  $X$  e  $Y$ , las coordenadas correspondientes a un sistema estandar, son las dependientes.

Lo primero que hay que decidir es el tipo de ecuaciones que se van a utilizar. Normalmente se trabaja con ecuaciones polinómicas que permiten modificar de forma flexible las coordenadas de la imagen. El

---

<sup>1</sup>En este párrafo,  $X$  e  $Y$  representan cualquier variable: altitud, renta *per cápita*, tamaño de las orejas, etc. y no hacen referencia a siste de coordenadas alguno.

orden del polinomio determina la flexibilidad del ajuste y de la transformación, normalmente se emplean transformaciones de tipo lineal (polinomio de grado 1), cuadrático (polinomio de grado 2) o cúbico (polinomio de grado 3).

Los casos más habituales son la transformación lineal:

$$X = Ac + Bf + C \quad (7.8)$$

$$Y = Dc + Ef + F \quad (7.9)$$

y la transformación cuadrática

$$X = Ac + Bf + Cc^2 + Df^2 + Ecf + F \quad (7.10)$$

$$Y = Gc + Hf + Ic^2 + Jc^2 + Kcf + L \quad (7.11)$$

la transformación cúbica es más compleja, las ecuaciones son similares a las lineales y cuadráticas pero incluyendo términos elevados al cubo.

Es importante determinar cual es el tipo de transformación más adecuada en función del tipo de distorsiones que se supone que aparecen en la imagen y de la cantidad y calidad de los puntos de control. Es necesario tener en cuenta que cuanto mayor sea el grado de los polinomios implicados, más sensible será la transformación a errores en la selección de los puntos de control.

Empleando el procedimiento de los mínimos cuadrados, se pueden calcular los valores de los coeficientes A,B,.. a partir de las coordenadas de un conjunto de **puntos de control**. Se trata de puntos en los que se conoce tanto la fila y la columna como las coordenadas reales. Como regla general, el número de puntos de control debería ser mayor que el número de parámetros que se van a calcular, 6 en la transformación lineal, 12 en la cuadrática y 24 en la cúbica.

La transformación lineal es la más sencilla (figura 1) asume que no hay distorsión en la imagen y simplemente se requiere una traslación (coeficientes  $A$  y  $E$ ), cambio de escala (coeficientes  $B$  y  $H$ ) y rotación de la imagen (coeficientes  $D$  y  $G$ ).

Por tanto si el origen de coordenadas de la imagen original es ( $c = 0, f = 0$ ) entonces:

- $A$ =valor de  $X$  en el punto en el que  $c=0$
- $E$ =valor de  $Y$  en el punto en el que  $f=0$

Si no es necesario rotar la imagen  $B$  y  $H$  son factores de escala

$$B = \frac{\max(X) - \min(X)}{\max(c) - \min(c)} \quad (7.12)$$

$$H = \frac{\max(Y) - \min(Y)}{\max(f) - \min(f)} \quad (7.13)$$

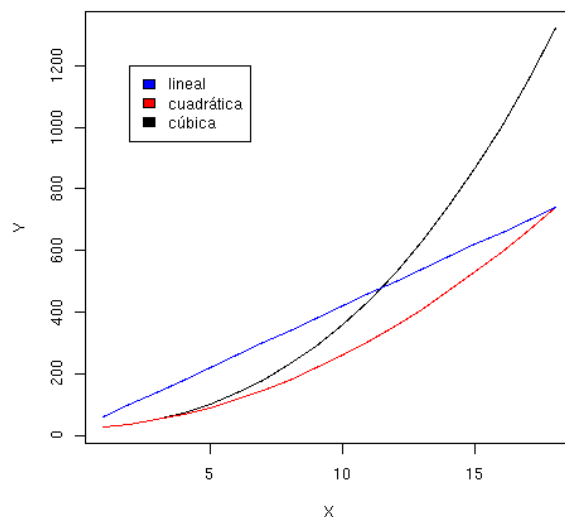


Figura 7.1: Diferentes modelos de regresión

y  $D = 0$ ,  $G = 0$ .

En caso de que sea necesario rotar la imagen, los valores de  $B$ ,  $H$ ,  $D$  y  $G$  determinan el tipo de rotación. Casi todos los programas de SIG disponen de algún procedimiento para realizar una transformación de coordenadas. Resultan además muy útiles para incorporar mapas escaneados. En general se basan en una serie de etapas básicas:

1. Se busca una serie de puntos de control (generalmente lugares muy destacados y visibles) y se averiguan las coordenadas de cada uno de ellos en los dos sistemas de coordenadas,  $(X, Y)$  y  $(f, c)$ . El número de puntos de control debe ser suficiente, mayor cuanto más grande sea la imagen, y mayor cuanto más abrupto sea el relieve. Además deben estar adecuadamente repartidos por toda la imagen para evitar que las distorsiones locales adquieran demasiado peso en las ecuaciones finales. Deben ser objetos perfectamente identificables y preferentemente artificiales ya que tienen menor movilidad. Las coordenadas reales pueden obtenerse a partir de un GPS, mapas en los que puedan identificarse o de otra imagen previamente georreferenciada.
2. Determinación del tipo de transformación más adecuada en función del tipo de datos de partida y del número de puntos de control que hayan podido encontrarse. Normalmente, para imágenes de satélite la opción preferible es una ecuación cuadrática.
3. Mediante mínimos cuadrados se obtienen los valores de los coeficientes de regresión  $A, B, C, D, E, F, \dots$ , estos coeficientes así calculados permiten realizar una modificación del sistema de coordenadas

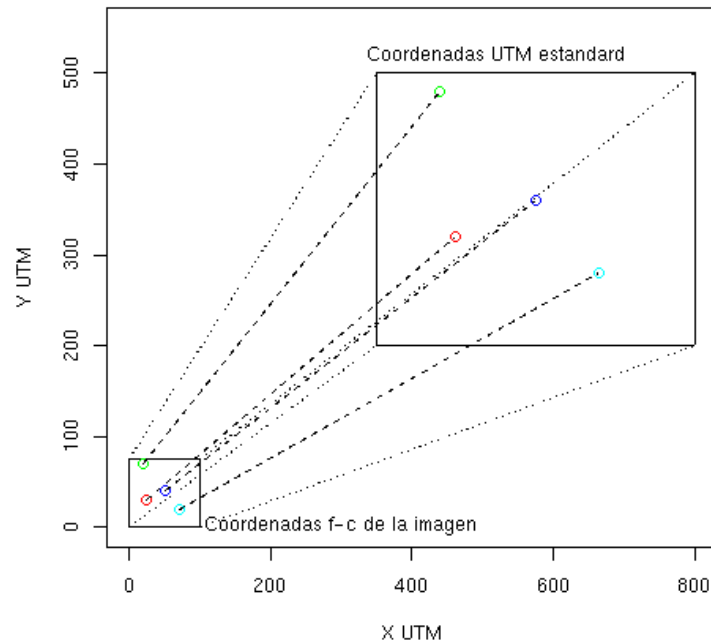


Figura 7.2: Proceso de georreferenciación

con el mínimo grado de error. Se obtiene además una estimación del **error cuadrático medio** (ECM) que resulta muy útil para determinar si es necesario ampliar el número de puntos de control. La ecuación del RMS es:

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X' - X)^2 + (Y' - Y)^2}{n}} \quad (7.14)$$

donde  $X'$  e  $Y'$  son las coordenadas estimadas por la transformación para cada punto de control y  $X$  e  $Y$  las coordenadas reales. Como norma general el ECM debería ser inferior al tamaño del pixel. Lógicamente, cada punto de control va a tener su propio error cuadrático:

$$EC = \sqrt{(X' - X)^2 + (Y' - Y)^2} \quad (7.15)$$

que permite determinar si existe algún punto erróneo que sea necesario eliminar.

4. Se aplican las ecuaciones anteriores, con los valores calculados de los coeficientes, a todas las coordenadas iniciales para obtener así sus nuevos valores en el sistema de referencia final.

Las etapas 3 y 4 suelen llevarse a cabo automáticamente.

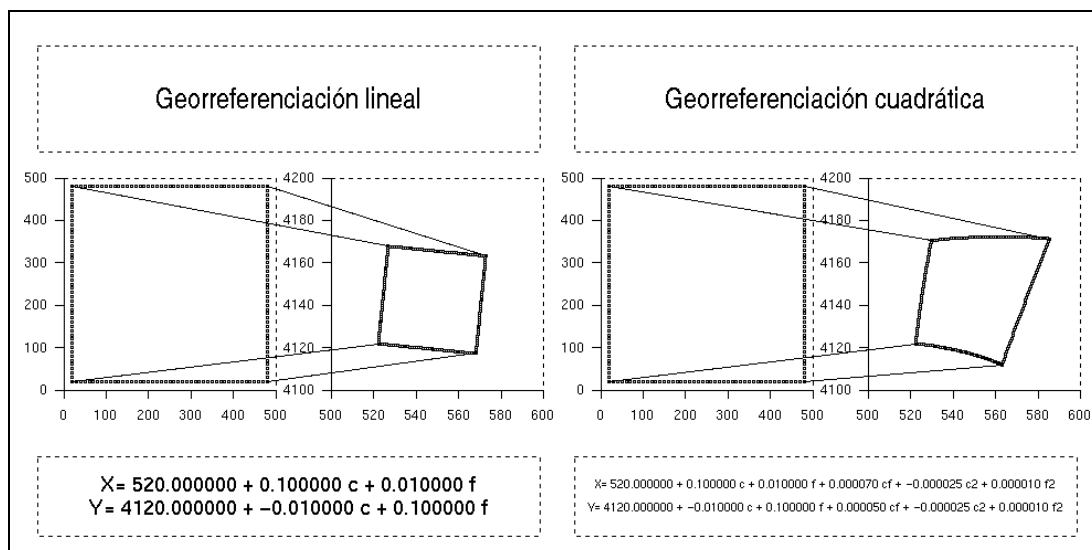


Figura 7.3: Resultados de diferentes ecuaciones de georreferenciación

Es necesario aplicar un procedimiento para transferir la información de los pixels originales a los pixels resultantes del proceso de transformación ya que con estas funciones de transformación va a crearse una nueva matriz correctamente posicionada, pero vacía. El llenado de esta matriz es, precisamente, el objetivo de la última fase de la transformación de coordenadas.

El problema resulta más complejo de lo que pudiera pensarse a primera vista. Idealmente, cada pixel de la capa transformada debería corresponderse a un solo pixel en la original. Lo normal, sin embargo, es que el pixel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original (rotación), incluso puede variar el tamaño de los pixels.

El trasvase de valores de la capa original a la transformada puede abordarse por tres métodos dependiendo de la complejidad de la transformación realizada y del tipo de datos.

- **Método del vecino más próximo.** Sitúa en cada pixel de la imagen corregida el valor del pixel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los valores originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen. Es la más adecuada en caso de variables cualitativas, pero evidentemente, no en teledetección.
- **Interpolación bilineal,** supone promediar los valores de los cuatro pixels más cercanos en la capa original. Este promedio se pondera según la distancia del pixel original al corregido, de este modo tienen una mayor influencia aquellos pixels más cercanos en la capa inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales pero difumina los contrastes espaciales.

- En la **Convolución cúbica**, se considera los valores de los 16 pixels más próximos. El efecto visual es mas correcto en caso de que se trabaje con imágenes de satélite o fotografías digitalizadas, sin embargo supone un volumen de cálculo mucho mayor.

### 7.3 Corrección geométrica con Modelos Digitales de Elevaciones

Uno de los principales elementos que introducen errores en la georreferenciación son los cambios bruscos de altitud dentro de una imagen. Generalmente puede disponerse de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), es decir una capa raster que contiene en cada celdilla su valor de altitud.

Puede incorporarse este MDE al proceso de georreferenciación complicando algo más las ecuaciones de transformación:

$$X = a_0 + a_1c + a_2f + a_3Z + a_4Zc + a_5Zf \quad (7.16)$$

$$Y = b_0 + b_1c + b_2f + b_3Z + b_4Zc + b_5Zf \quad (7.17)$$

### 7.4 Corrección atmosférica

La corrección radiométrica trata de corregir problemas mecánicos en el sensor que generan valores erroneos en píxeles concretos y la corrección geométrica ubica los píxeles en el espacio geográfico corrigiendo las posibles distorsiones. Por su parte la corrección atmosférica trata de evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre.

Por tanto se va a basar en modelos físicos más complejos que los modelos estadísticos utilizados anteriormente. El primer paso es convertir los Niveles Digitales (ND) almacenados por el sensor en valores de radiancia.

#### 7.4.1 Conversión de los ND a valores de radiancia

Una imagen de satélite en bruto contiene unos valores numéricos denominados niveles digitales (ND) que el satélite obtiene a partir de la energía recibida mediante una ecuación lineal. Para recuperar los valores de energía recibida es necesario aplicar la inversa de esa ecuación lineal.

$$L_{sen,k} = a0_k + a1_kND_k \quad (7.18)$$

El término  $k$  se refiere a cada una de las bandas del sensor,  $L_{sen,k}$  es la radiación que recibió el sensor. En la tabla ?? aparecen los valores de estos parámetros para landsat 5 junto a los valores de irradiancia solar en el techo de la atmósfera ( $E0_k$ ) y de transmitancia ( $\tau_k$ ) para cada una de las bandas.



Banda	$E0_k$	$a0_k$	$a1_k$	$\tau_k$
TM1	1957	-1.5	0.602	0.5
TM2	1829	-2.8	1.17	0.3
TM3	1557	-1.2	0.806	0.25
TM4	1047	-1.5	0.815	0.2
TM5	219.3	-0.37	0.108	0.125
TM7	74.52	-0.15	0.057	0.075

Tabla 7.1: Parámetros para la conversión a reflectividades de las imágenes landsat

La radiancia recibida por el sensor no es exactamente la radiancia que procede del suelo. Esta resulta por un lado reducida por la absorción atmosférica y por otra incrementada por la radiancia introducida por la propia atmósfera (dispersión). La ecuación que expresa esta relación es:

$$L_{sen,k} = L_{sue,k}\tau_{k,a} + L_{a,k} \quad (7.19)$$

es decir que la radiación que llega al sensor es la procedente del suelo multiplicada por la transmisividad de la atmósfera en camino ascendente más la radiancia aportada por la dispersión atmosférica.

La corrección de la imagen para eliminar el efecto de la atmósfera resulta especialmente necesaria para:

- Calcular determinados índices entre bandas cuya distorsión debida a la atmósfera es iferente
- Calcular variables deducibles directamente de la radiancia mediante modelos de tipo físico
- Estudios temporales, ya que la distorsión atmosférica cambia de unos dias a otros

Esta variabilidad de la temperatura es una de las causas por las que la radiación atmosférica resulta compleja ya que se necesitan datos de la atmósfera en el día que se toma la imagen.

El primer paso para la corrección atmosférica es la estimación de  $L_{a,k}$ . Esta variable disminuye al aumentar la longitud de onda, por ejemplo será máxima en la banda 1 de landsat-TM. Existen dos métodos relativamente sencillos:

- **Mínimo del histograma.** Consiste en localizar en la imagen áreas con reflectancia cercana a cero en el infrarrojo (superficies de agua limpia y profunda). Si se representa el histograma de esta banda, los valores mínimos apareceran próximos a 0, este límite inferior aumenta conforme disminuye la longitud de onda.

Estos valore mínimos del histograma para las diferentes bandas ( $k$ ) son una buena aproximación a  $L_{a,k}$  y por tanto se substraen a los valores originales para obtener una mejor estimación de  $L_{sue,k}$ .

En el caso de landsat, las bandas 5 y 7 no suelen corregirse puesto que sus valores de  $L_{a,k}$  son despreciables.

- **Regresión.** Se hace un análisis de regresión de  $TM_1$ ,  $TM_2$  y  $TM_3$  respecto a  $TM_4$  para obtener los parámetros de las siguientes ecuaciones:

$$TM_1 = a_1TM_4 + b_1 \quad (7.20)$$

$$TM_2 = a_2TM_4 + b_2 \quad (7.21)$$

$$TM_3 = a_3TM_4 + b_3 \quad (7.22)$$

y utilizando  $b_k$  como estimación de  $L_{a,k}$ .

Los valores de transmisividad pueden evaluarse a partir de la ecuación

$$\tau_{k,a} = e^{-\tau_k/\cos\theta_o} \quad (7.23)$$

donde  $\theta_o$  es el ángulo de observación, los valores de  $\tau_k$  aparecen en la tabla 7.4.1.

Existen algoritmos más complejos como **LOWTRAN** o **5S/6S** que requieren múltiples datos acerca de las condiciones atmosféricas en el momento de la captura de la imagen, por ello no suelen utilizarse mucho.