

Software de Corrección Geométrica Automática de Imágenes NOAA-AVHRR ---

*Nicolás Gese, Enrique
Díez de Arribas, Jose .M.*

*Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá
C/ Colegios, 2. 28801, Alcalá de Henares
Tlfnº: 91 885 44 82. Fax: 91 885 44 39*

Resumen

A partir de técnicas utilizadas en Fotogrametría Digital, como es el LSM (ajuste basado en mínimos cuadrados) se pretende obtener la corrección geométrica automática de una imagen NOAA-AVHRR, utilizando el método de corrección geométrica en dos pasos. En primer lugar se parte de una imagen patrón y se utilizan ventanas de búsqueda a lo largo de la misma. Los valores obtenidos se comparan con ventanas aproximadas de la imagen a corregir. Posteriormente se realiza un ajuste global para toda la imagen, obteniéndose una precisión de ajuste en los resultados por debajo de un pixel.

1. Introducción

De todos es sabido que la base para cualquier trabajo de aplicación de la teledetección requiere utilizar imágenes corregidas geoméricamente y más aun si se trata de un estudio basado en análisis multitemporal, debido a que la calidad de los resultados puede verse directamente afectada por la repetibilidad en todas las imágenes del mismo área, sin efecto de errores de desplazamiento.

La corrección geométrica:

Se define como el proceso que produce un cambio en la posición espacial de los píxeles de una imagen (Chuvieco, 1996). Este tipo de correcciones no afecta a las características radiométricas del píxel, y esta basado en funciones numéricas:

$$f(c') = f_1(c, l) \quad f(l') = f_2(c, l)$$

Así las coordenadas columna y línea de la imagen corregida (c', l') están en función de las coordenadas fila y columna de la imagen de entrada (c, l).

El proceso de corrección geométrica comprende tres etapas:

- 1- Localización de puntos comunes en mapa-imagen , imagen-imagen, vector-imagen.
- 2- Calculo de la función de transformación entre las coordenadas imagen y las del mapa (imagen, o vector).
- 3- Transferencia de los ND originales a su nueva posición.

Tradicionalmente se consideraba que las imágenes de baja resolución (NOAA-AVHRR o METEOSAT) no necesitaban de una corrección geométrica, pero en el caso de las imágenes NOAA-AVHRR se demuestra que una imagen unicamente corregida de errores orbitales, posee un error geométrico de ± 5 píxeles (Ho y Asem, 1986). Este desplazamiento que puede inducir a errores si queremos realizar un análisis multitemporal de imágenes, de ahí que sea necesaria una corrección geométrica mas precisa. Recordar que la corrección orbital unicamente corregira los errores debidos a la posición del satélite en su órbita, así que esta corrección eliminara los errores producidos por la inclinación de la imagen, la distorsión panorámica y el efecto de la curvatura terrestre. Debido a este error que permanece, nos vemos obligados a aplicar una segunda corrección (la corrección geométrica) que ajustara exactamente la imagen, y para ello se recurre a los puntos de control.

Han surgido diversos métodos de corrección geométrica, siendo el más usual la introducción de puntos de control en sus diversas modalidades:

- ✓ a partir de cartografía indicando puntos comunes en la misma y en la imagen.

- ✓ por comparación de dos imágenes, una corregida geoméricamente utilizada como referencia y la otra la imagen a corregir, buscando entre ambas puntos homólogos.

- ✓ o por último utilizando vectores georreferenciados como plantilla para ajustar la imagen que se desea corregir.

Ahora bien todos estos métodos requieren de un laborioso trabajo del operador, con lo que se pierde gran cantidad de tiempo en dicha tarea. Por esta razón hemos planteado la elaboración de un programa informático que permita resolver este problema de modo automático.

2. Metodología: corrección en dos pasos.

2.1. Estructura

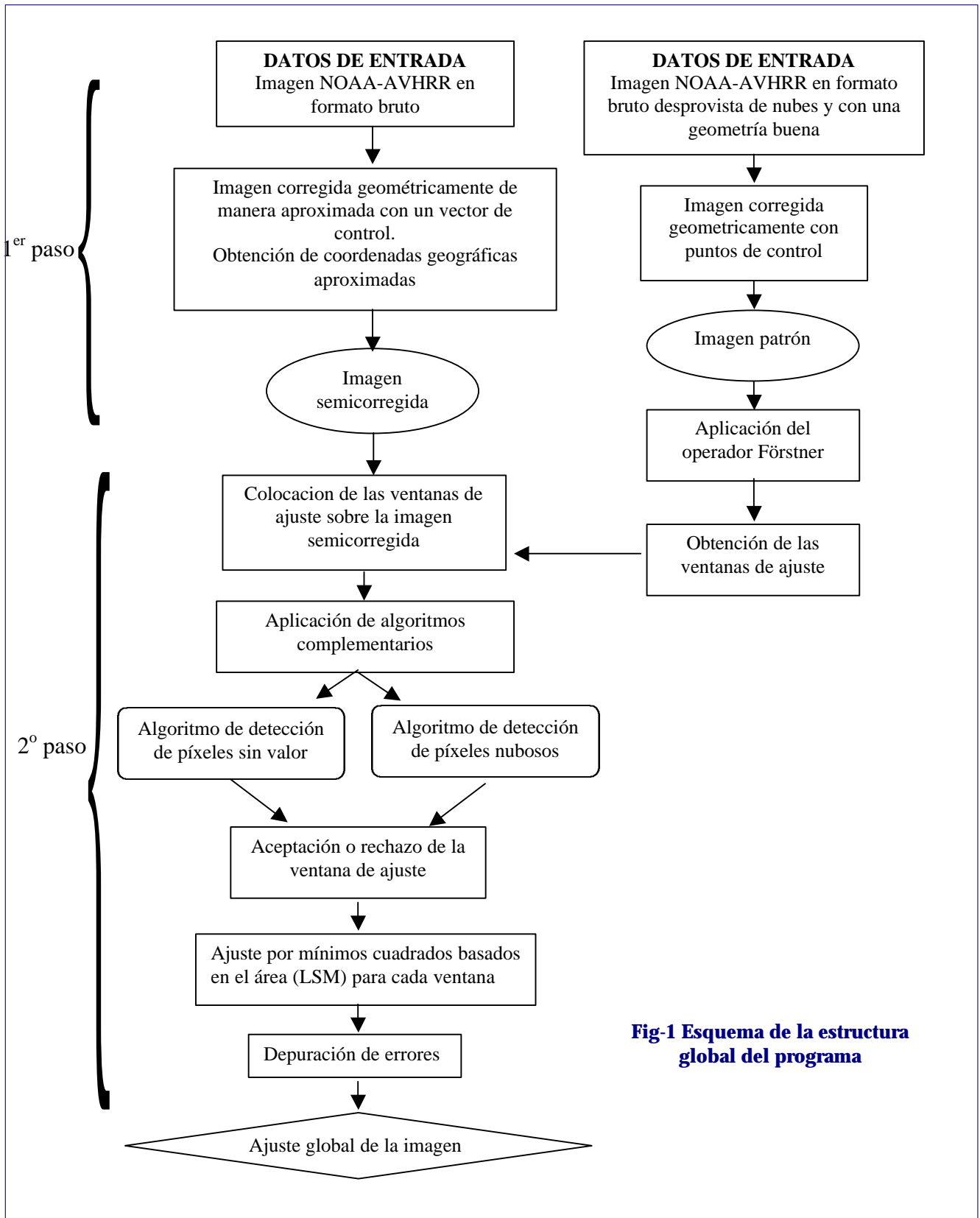


Fig-1 Esquema de la estructura global del programa

2.2 Primer paso

Se trata de un método experimental ya aplicado con anterioridad a imágenes NOAA-AVHRR en el formato de baja resolución de este sensor GAC (4*4 km). En este caso nosotros lo aplicamos a imágenes de resolución LAC (1.1*1.1 km).

En esta etapa se realiza una primera corrección que se le aplica a la imagen a corregir, esta primera corrección dota a la misma de unas coordenadas aproximadas (primer paso), el error que tendrá esta imagen será el de basculación del satélite sobre su órbita, con lo que la deformación se producirá en la dirección de paso del satélite, siendo este error de 5 a 10 píxeles en función de la geometría de la imagen¹.

Con esta acción tendremos en la imagen patrón un área definida por el operador Förstner con coordenadas exactas, y por otro lado tendremos el área homóloga aproximada en la imagen a corregir.

Esta primera corrección se realiza con un software de tratamiento digital de imágenes denominado SIAMIV (se basa en un ajuste con respecto a un vector) que nos ofrece la imagen corregida orbitalmente con y en una proyección cartográfica determinada.

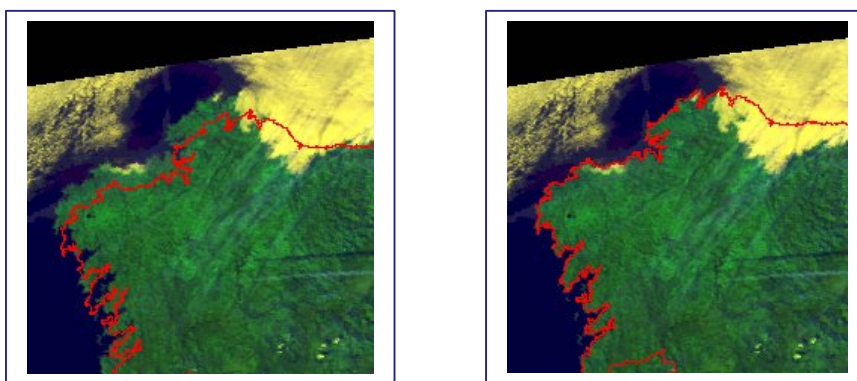


Imagen después del primer paso

Imagen perfectamente corregida

Fig-2 Imágenes con corrección aproximada y con corrección definitiva con respecto a un vector de referencia.

Para detectar puntos en la costa de la península Ibérica (en la imagen patrón), que sean lo suficientemente característicos necesitaremos un algoritmo de detección de puntos de interés y en este caso recurriremos al Operador Förstner.

Operador Förstner (Papí, 1999):

Este operador es de interés para buscar pequeñas ventanas en la imagen digital que proporcionen un adecuado éxito en la operación de correlación. Como hemos comentado anteriormente en el proceso del LSM las exactitudes de los parámetros de este cálculo dependen de las diferencias de densidad

¹ La geometría de imagen se refiere a la situación del área de interés dentro de la franja de toma del satélite, así cuanto más centrada este el área en el centro de la pasada, mejor geometría tendrá.

$$\begin{aligned} g'_x &= g_{x+1,y} - g_{x-1,y} \\ g'_y &= g_{x,y+1} - g_{x,y-1} \end{aligned}$$

Estas diferencias son los coeficientes de los parámetros de desplazamiento en las ecuaciones de observación planteadas en el rango bidimensional subpixel.

Si planteamos la ecuación bidimensional de la correlación en el rango subpixel tendremos que $g_2(x,y) = g_1(x+a,y+b)$; donde a es la translación horizontal y b la vertical por la cual las posiciones de las dos componentes de densidades g_1 y g_2 están relacionadas.

Las áreas de búsqueda y blanco no solo difieren en sus posiciones, sino también en sus densidades, termino que se incluirá en la ecuación de observación. Así que aplicaremos por un lado una componente accidental v a la densidad g_2 , y por otro lado una corrección sistemática a la densidad g_1 , quedándonos en dos dimensiones.

$$v(x,y) + g_2(x,y) = r_1 g_1(x+a,y+b) + r_0$$

La suma de los cuadrados de las componentes accidentales v se minimiza por mínimos cuadrados en un calculo en el que se determinan a, b, r_0 , r_1 . Primero linealizamos la ecuación y debido a que los cambios que se producen pequeños nos queda

$$v(x,y) + g_2(x,y) = r_1(g_1(x,y) + g'_x(x,y)a + g'_y(x,y)b) + r_0$$

con $r_1 a = \bar{a}$ y $r_1 b = \bar{b}$ obteniendo la siguiente expresión linealizada

$$v(x,y) + g_2(x,y) = r_1 g_1(x) + g'_x(x,y)\bar{a} + g'_y(x,y)\bar{b} + r_0$$

después de ordenar los términos, se obtienen las ecuaciones de observación deseadas con cuatro incógnitas \bar{a} , \bar{b} , r_0 , r_1 para un ajuste por mínimos cuadrados para observaciones indirectas.

$$v(x,y) = g'_x(x,y)\bar{a} + g'_y(x,y)\bar{b} + g_1(x,y)r_1 + r_0 + g_2(x,y)$$

$g_1(x)$, $g_2(x)$ son densidades correspondientes en las dos áreas de búsqueda, el numero de pares de densidades, en general, vienen definidas por el tamaño del blanco de la primera área; $g'_x(x)$ es la pendiente del perfil de densidad de la primera área en la porción de un píxel $g'_x(x) = g_x(\frac{\Delta g_1}{\Delta x})$; igualmente según el eje y $g'_y(y) = g_y(\frac{\Delta g_1}{\Delta y})$; primer píxel $\Delta g = g_2 - g_1$ y el ultimo $\Delta g = g_n - g_{n-1}$; $1 < i < n$

A continuación obtenemos la matriz de ecuaciones normales N de los cuatro coeficientes para los dos parámetros de desplazamiento

$$N = \begin{bmatrix} \sum g_x'^2 & \sum g_x' g_y' \\ \sum g_x' g_y' & \sum g_y'^2 \end{bmatrix}$$

Estas sumas se extienden a todos los pixeles en cada ventana donde se realizara la correlación mas tarde. La inversa Q de la matriz de ecuaciones normales, proporcionara la medida de la exactitud de las incógnitas. Aplicando este planteamiento seleccionaremos las áreas que mejor correlación nos darán en el futuro y donde designaremos las ventanas a correlacionar.

Este operador posee dos criterios evaluadores, el primero de ellos se denomina W y se basa en utilizar la traza de la matriz $Q=N^{-1}$ para evaluar la correlación en las dos direcciones coordenadas

$$w = tr(Q) = \frac{tr(N)}{\det(N)}$$

Este criterio debe ser pequeño, por tanto buscamos los valores en los maximos o minimos de w (por ejemplo el mínimo local) y comprobamos estos según valores umbrales. Este valor umbral lo obtenemos calculando el valor w para todas las ventanas de búsqueda y determinando la media de todos los valores, llegando a la conclusión de que este umbral debe ser de $1/3^2$.

En cuanto al segundo criterio de evaluación se basa en que la elipse de error definida por la matriz Q sea lo más próxima posible a un círculo, el criterio será

$$q = 1 - \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right)^2 = \frac{4 \det(N)}{tr^2(N)}$$

λ_1 y λ_2 son autovalores de la matriz Q , y son proporcionales al cuadrado de los semiejes de la elipse de error en las correspondientes ventanas. Las pruebas realizadas mostraron que un valor umbral de 0.75 (Papí, 1999) es adecuado para evaluar el criterio "q".

En resumen el resultado que obtenemos al aplicar este operador, es la situación a lo largo de la imagen de todas las áreas de mejor correlación para el ajuste posterior, siendo representadas por un punto central.

El numero de puntos que aparecerán en la imagen patrón, será muy elevado, por lo que se deberán depurar y elegir solamente aquellos que se encuentren en áreas costeras, en función de éstos se definirán el numero de ventanas de correlación que entraran en el segundo paso de la corrección geométrica.

² Este valor se ha obtenido por métodos empíricos, y es aplicable a nuestro caso. (Papí, 1999).

2.3 Segundo paso

En primer lugar se van a aplicar unos algoritmos a las ventanas de ajuste para seleccionar de todas ellas las que tengan unas condiciones optimas para el ajuste posterior, así aplicaremos dos algoritmos:

1. El primero de ellos es una máscara de exclusión de píxeles sin información, o bien píxeles marginales de la imagen que pueden causar errores de correlación, en el caso de encontrarse dentro de una de las ventanas de correlación. La forma de actuar de esta máscara es detectando píxeles con un ND igual al valor nulo y asignarles un valor x. En función del número de píxeles de este tipo que tengan las ventanas de correlación, estas se rechazarán o se utilizarán (marcando un límite del 20%).
2. El segundo de ellos es más complejo y se trata de una máscara de detección de píxeles nubosos, que pasamos a describir más detalladamente a continuación.

Máscara de detección de píxeles nubosos

Esta máscara está basada en el algoritmo descrito por Saunders y Kriebel, en sus diversas publicaciones a lo largo de los años 1986-1988, estos algoritmos son calculados a partir de medidas empíricas sobre un área de Escocia. Debido a que los umbrales fijados para estos algoritmos han sido calculados para ese área, nos hemos visto obligados a recalcular estos umbrales utilizando técnicas estadísticas simples.

Este algoritmo está basado en 4 test que se aplican a la imagen total, la condición para que un píxel sea clasificado como nuboso es que cumpla afirmativamente todos los test. En este programa hemos utilizado los tests para imágenes diurnas, pero existen también una serie de test para imágenes nocturnas. Este algoritmo divide la superficie terrestre en tres tipos: mar, tierra, y costa siendo este último una mezcla de los anteriores.

Para la ejecución de este algoritmo, necesitaremos como información de entrada los siguientes canales del satélite NOAA-AVHRR:

- Canal-1: Albedo (0.58-0.68 μ m).
- Canal-2: Albedo (0.72-1.10 μ m).
- Canal-4: Temperatura de Brillo (10.3-11.3 μ m).
- Canal-5: Temperatura de Brillo (11.5-12.5 μ m).
- Angulo cenital solar.

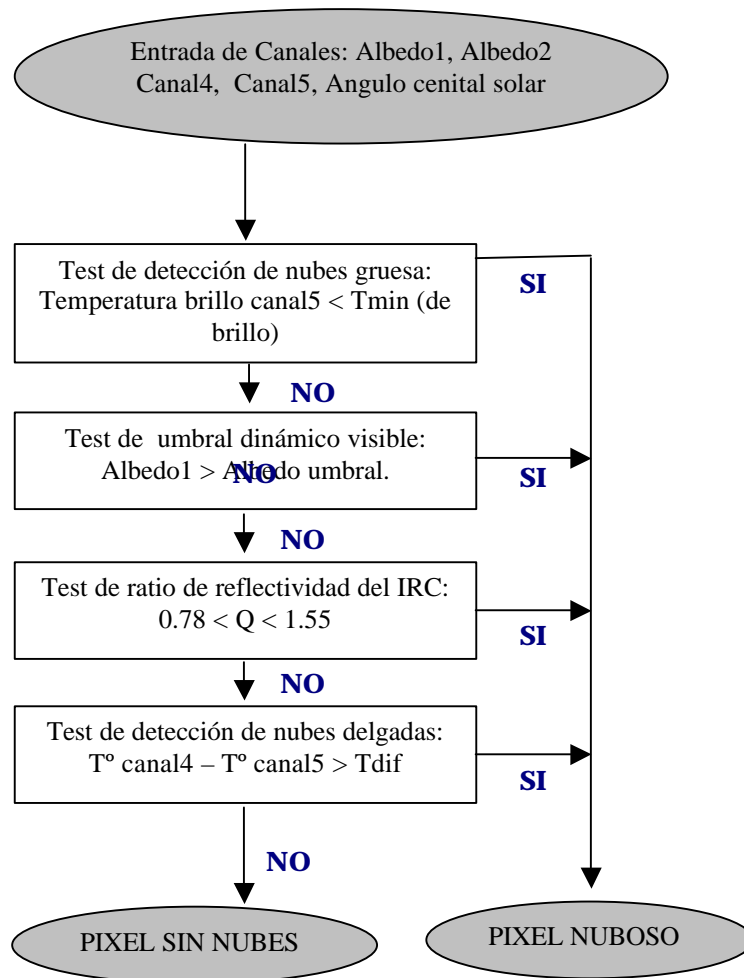


Fig-3 Descripción de los diferentes tests aplicados para la detección de pixeles nubosos

1er test: Es posible su aplicación tanto a imágenes diurnas como a nocturnas, y consiste en aplicar un umbral de IR al canal 5 para comprobar si existe contaminación por nubes gruesas. Se utiliza el canal 5 debido a que las nubes tienen una profundidad óptica grande en estas longitudes de onda. Si la medida de temperatura de brillo esta por debajo de un cierto umbral de temperatura, el pixel es identificado como contaminado. El método para fijar este umbral ha sido el siguiente:

- ✓ Primero se ha dividido la superficie costera de la península Ibérica en cuatro regiones: Cantábrica, Atlántica, Estrecho, Mediterránea.
- ✓ Posteriormente se introduce un elemento temporal que clasifica cada una de estas regiones según el periodo del año: Primavera, Verano, Otoño e Invierno.
- ✓ Una tercera variable que se ha añadido, a la vertiente Atlántica y Mediterránea es la variación de la temperatura con la latitud (generando tres áreas: Norte, Media y Sur).

- ✓ Finalmente iniciamos el cálculo de dicho umbral para cada una de las regiones y en sus diferentes estaciones climáticas³. En primer lugar vamos a generar Compuestos de Máximo Valor de Temperatura de Superficie (MVC-TS), con periodos de 10 días a lo largo de 2 años de imágenes (abril-98 a marzo-00). A continuación extraemos los valores de temperatura (canal 5) para diversos vectores situados en las diferentes regiones y próximos a la costa. Calculamos la media y la desviación típica para las cuatro regiones. En las regiones que se ven afectadas por la latitud, calculamos unos valores a diferentes altitudes a lo largo de los compuestos de esos dos años. A continuación restamos el valor de la desviación típica al valor promedio y le asignamos un peso en función del valor de la desviación típica, otorgando más peso a los valores que tengan una desviación típica menor. En el caso de las vertientes, se aplicará un valor de desviación típica promedio para cada una de las áreas. Y como medida final restamos 1°C a todas las medidas resultantes. Los umbrales obtenidos según este test se pueden apreciar en la tabla.

Temp en °C	ATLANTICO	ESTRECHO	MEDITERRANEO	CANTABRICO
PRIMAVERA	N: 7.85069	12.21642	N: 10.86953	8.41027
	M: 9.08521		M: 11.52834	
	S: 10.23936		S: 12.76703	
VERANO	N: 11.51219	16.86897	N: 15.37852	12.45628
	M: 13.28988		M: 18.75966	
	S: 13.97701		S: 18.30878	
OTOÑO	N: 9.72179	12.46780	N: 12.26575	10.09115
	M: 10.99679		M: 13.10484	
	S: 11.26012		S: 12.64384	
INVIERNO	N: 6.85560	9.64754	N: 7.97895	6.54712
	M: 6.90503		M: 9.24077	
	S: 8.95453		S: 9.63349	

Tabla nº 1: valores de temperatura de brillo para las diferentes regiones y épocas del año introduciendo el factor latitud.

2º test: Se basa en un test de umbral de reflectividad dinámica. El umbral para este test se obtiene a partir de analizar los histogramas de las imágenes del año 1999, la banda que se utiliza en este caso es el canal-1 y sus unidades son reflectividad expresadas en %. El modo de fijar este umbral ha sido el siguiente:

- ✓ Identificamos en el histograma del canal 1 de la imagen si existe un máximo diferenciado (mayor del 0.5% del número de píxeles de la imagen) (I_{pk}).
- ✓ Se determinan los límites inferiores y superiores del histograma (I₁ e I₂). Si el valor I₁ está comprendido dentro de un margen de reflectividad *m* desde el pico de reflectividad (I_{pk}), y a su vez este pico de reflectividad es menor que el valor típico I_{max} de una imagen con nubes, el pico se asumirá como libre de nubes y el umbral visible T es fijado por encima de I_{max} un

³ El programa informático posee ficheros de configuración para cada una de estas regiones y periodos estacionales. El usuario puede seleccionar la más conveniente según la imagen que se vaya a corregir.

valor igual a n . Los valores de n , m e I_{max} están tabulados y son validos para la región europea. (valores expresados en tantos por uno)

$$\begin{aligned} m &= 0.03 \\ n &= 0.015 \\ I_{max} &= 0.15 \end{aligned}$$

Visualizando las imágenes correspondientes al año 1999, se ha obtenido un valor promedio para el umbral de un **25.26** % de reflectividad.

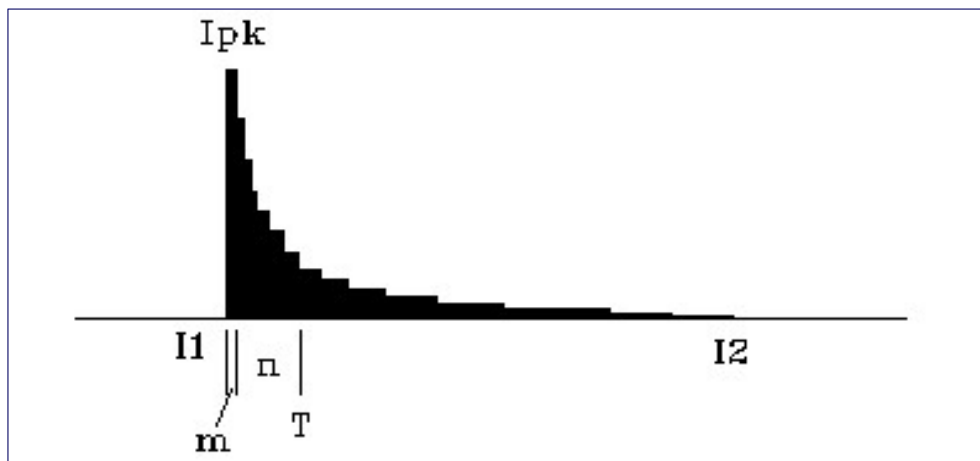


Fig-4 Histograma del canal 1. El umbral dinámico es el valor T, y los parametros m, n, I_{max} vienen dados de manera empirica y estan tabulados para europa.

3er test: Utiliza un ratio de la reflectividad bidireccional del infrarrojo cercano (canal2) y del visible (canal1). Con este test podemos evitar o reducir los efectos de anisotropía que se producen, ya que es semejante en ambos canales y se anula. El modo de calcular los umbrales de este ratio ($Q = canal2 / canal1$) es el siguiente:

- ✓ Calculamos el ratio y obtuvimos una imagen sintética con este valor.
- ✓ Una vez que tenemos la imagen sintética hacemos mediciones sobre las nubes tanto en áreas de mar como en superficie terrestre. En este ultimo caso las medidas deben efectuarse en zonas próximas a la costa, y por otro lado las mediciones deben ser realizadas en los bordes de las nubes (nubes delgadas). Estas mediciones se hicieron de octubre de 1998 a septiembre de 1999.
- ✓ Obtuvimos 12 valores para nubes costeras sobre mar y otros 12 valores para nubes costeras sobre tierra definiendo así los umbrales del ratio Q calculando el promedio de los mismos se obtuvo que:

$$0.78043 < Q < 1.54932$$

Cualquier píxel cuyo valor esté dentro de este rango será reconocido como nuboso por este test.

4° test: este test se encarga de detectar las nubes finas o delgadas, y lo hace a partir de los canales 4, 5 (temperatura de brillo) y el ángulo cenital solar. Este algoritmo resta el canal 4 del 5 y si la diferencia es mayor que un valor umbral T_{dif} se considerara pixel nuboso. La forma en que se calcula el valor del umbral viene dada por la expresión:

$$T_{dif} = \text{Canal4} * \sec(\text{ángulo cenital solar})$$

Una vez finalizada la descripción de todos los test, un pixel se considerará nuboso si todos los tests propuestos han resultado positivos, y en cuyo caso lo que hará el algoritmo del programa será asignar un valor nulo a estos píxeles, para que puedan ser utilizados como máscara.

Una vez que sepamos el número de píxeles con cobertura nubosa en una ventana de correlación, esta se desechará o se utilizará en función del porcentaje de estos píxeles, fijando un umbral del 25% como criterio de eliminación.

Una vez aplicados estos algoritmos, se va a aplicar el método de correlación por mínimos cuadrados basado en el área (LSM), sobre las áreas definidas por los puntos Förstner, efectuándose un ajuste para cada una de las ventanas (aproximadamente 50 ventanas), con lo que tendremos una ecuación de ajuste para cada ventana, aplicaremos un polinomio de ajuste global a toda la imagen y tendremos la imagen corregida geoméricamente.

Ajuste por mínimos cuadrados basado en el área (LSM – *Least Square Matching*):

En la actualidad la Fotogrametría Digital, es una técnica con un gran desarrollo y que esta relegando a un segundo plano a la tradicional Fotogrametría analítica.

La F. Digital parte al igual que la Analítica de la fotografía aérea, pero difiere en que la digital convierte el documento analógico que es el fotograma en un documento digital por medio del escaneado de alta resolución. Este proceso posee ciertas analogías con lo que ocurre en Teledetección, aunque el sensor de detección sea un instrumento estático y perfectamente configurable y calibrable a diferencia de los sensores espaciales.

El objetivo de nuestro proyecto es desarrollar una metodología aplicable a la teledetección homologa a la usada en Fotogrametría Digital para realizar la orientación de la cámara (basado en reconocimiento de marcas fiduciales por LSM), la extracción de características así como la correspondencia entre parcelas de imágenes. Este análisis que hemos empleado en la bibliografía recibe el nombre de *Matching* y más específicamente el que resulta de interés en nuestro caso es el ajuste por mínimos cuadrados basado en el área.

La adaptación de este algoritmo a nuestro trabajo, se basó en la búsqueda de zonas perimetales características de la península Ibérica sobre las que se va a realizar la correlación. Así en vez de utilizar como patrón una marca fiducial, se utilizara una ventana de un área costera y la misión del algoritmo será la búsqueda y ajuste de ese patrón a la imagen por corregir.

La ventaja de este método es su alta exactitud y fiabilidad. Esta exactitud requiere de aproximaciones iniciales, que en nuestro caso existen, ya que al realizar una primera corrección geométrica aproximada, el error será limitado. La aproximación también estará en función del dominio de las frecuencias, así si dominan las altas frecuencias se necesitará un grado de aproximación mayor.

Para evitar este efecto y fijar una tolerancia mayor se recurre a filtros de paso bajo siendo el que nosotros hemos usado de realzado de bordes.

El principal inconveniente de este método es que requiere valores bastante aproximados de posición, y no tolera más de una rotación de 30 grados o un factor de escala de $\pm 25\%$ ⁴ (Papí, 1999).

Para el correcto funcionamiento del método será necesario que las matrices de búsqueda sean grandes pero no excesivas ya que el volumen de cálculo se dispararía, aunque el tamaño puede ser definido en función del tamaño de la matriz patrón que se va a utilizar (entre 5 y 7 veces el tamaño de la matriz patrón).

En resumen LSM es un proceso relativamente lento, es iterativo y supone un remuestreo en la ventana de búsqueda en el cálculo de ajuste. El volumen de cálculo es alto para tareas extensivas, pero la gran ventaja es la información adicional sobre la exactitud y la posición.

Descripción

Este método de ajuste, considera una imagen como referencia (que será una ventana de ajuste) y se busca la ventana homologa en la imagen a corregir (ver apartado de corrección en dos pasos). Este proceso de correlación permite determinar puntos homólogos en imágenes digitales. Para ello partiremos de una matriz de referencia A corregida geoméricamente o patrón (existirán tantos patrones como ventanas de correlación tengamos) y tendremos una segunda matriz con coordenadas aproximadas B (afectada de errores).

En la siguiente figura se muestra la matriz de referencia A y la matriz B de búsqueda en la imagen a corregir se aprecia que la ventana de búsqueda es mayor que el patrón, así este se ira desplazando sobre la misma hasta encontrar la posición exacta.

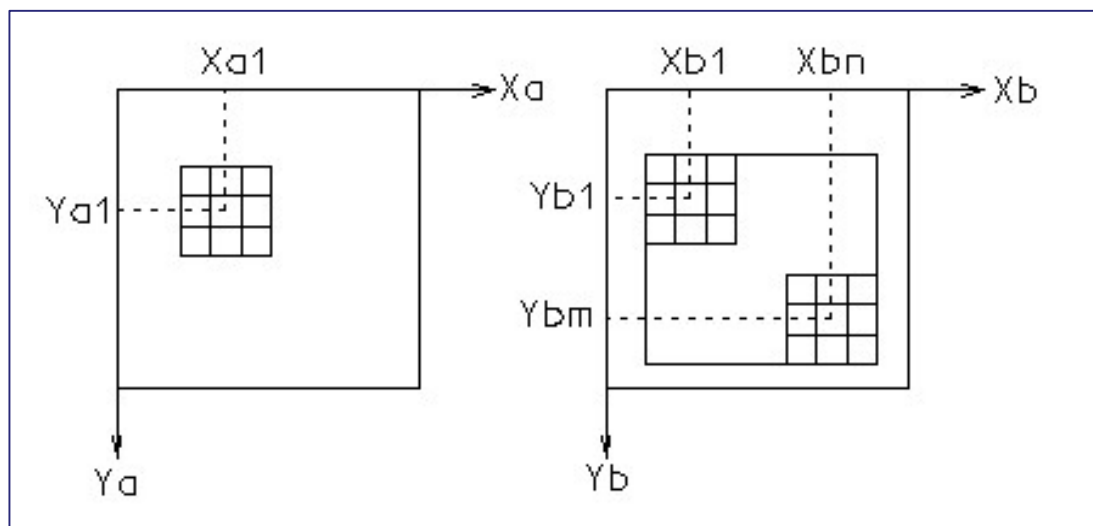


Fig-5 Se muestra la matriz de referencia A correspondiente a la imagen de la izquierda y la matriz B de búsqueda en la imagen de la derecha.

⁴ Todos estos valores están dentro del rango que obtenemos en una imagen NOAA-AVHRR ya que la escala entre la imagen patrón y la aproximada es la misma, y la rotación entre ambas es mínima siendo principalmente la diferencia entre ellas una ligera traslación en el sentido del desplazamiento del satélite.

Modelo matemático

El modelo matemático de la correlación mmcc utiliza una transformación afín como modelo para el ajuste geométrico (como aproximación de la transformación proyectiva). Suponemos que los diferenciales de superficie se consideran planos y que el ángulo de perspectiva del elemento extremo se considera una proyección paralela.

El ajuste radiométrico es compensado y modelado como una función de transferencia lineal. Así tendremos definidas las dos submatrices como:

$$\begin{aligned}\bar{g}_1(x_i) &= g_1(x_i) + n_1(x_i) \\ \bar{g}_2(x_i) &= g_2(x_i) + n_2(x_i)\end{aligned}$$

siendo: $g_1(x)$ y $g_2(x)$ son funciones de la imagen.
 $n_1(x)$ y $n_2(x)$ son ruidos de la imagen.

El modelo funcional aplicado asume que $g_2(x)$ es una transformación de $g_1(x)$ con los siguientes valores:

- ✓ ventanas de la imagen pequeñas.
- ✓ Los parámetros de transformación: $(a_0, a_1, r_0, r_1)^0 = (0 \ 1 \ 0 \ 1)$ o $g_2^0(x) = g_1(x)$.

Con estas condiciones planteamos las siguientes transformaciones geométricas y radiométricas lineales unidimensionales

$$g_2(x) = r_0 + r_1 g_1(a_0 + a_1 x) \approx r_0 + r_1 g_1(\bar{x})$$

Los parámetros de transformación (incógnitas) representan una translación a_0 y un factor de escala a_1 e igualmente una translación a nivel cero r_0 y un factor de escala r_1 del brillo de los niveles de gris.

Diferenciando tenemos:

$$g_2(x) = g_1(x) + \dot{g}_1(x) da_0 + \dot{g}_1(x) da_1 + dr_0 + g_1(x) dr_1$$

donde la función gradiente de $g_1(x)$ es:

$$\dot{g}_1(x) = \frac{\partial g_1(x)}{\partial x}$$

teniendo en cuenta las condiciones iniciales y considerando las diferencias siguientes:

$$\Delta\bar{g}(x) = \bar{g}_2(x) - \bar{g}_1(x) = g_2(x) - g_1(x) + n_2(x) - n_1(x)$$

sabiendo que $n_1(x) - n_2(x) = v(x)$ obtendremos:

$$\Delta\bar{g}(x_i) + v(x_i) = \dot{g}_1(x_i)da_0 + \dot{g}_1(x_i)da_1 + dr_0 + g_1(x_i)dr_1$$

esta ecuación representa una ecuación de observación linealizada para cada pixel que relaciona las diferencias de los niveles de grises con los parámetros de transformación del modelo funcional a_0 , a_1 , r_0 , r_1 .

Un problema adicional es que en cada iteración los niveles de grises son interpolados sobre el sistema de coordenadas transformado, siendo necesario realizar un remuestreo. Se pueden aplicar diversos, si bien con el que se obtuvieron mejores resultados es el de interpolación bilineal sobre cuatro pixeles vecinos, aunque también hemos utilizado el ajuste por vecino más próximo, manteniendo así los ND originales.

3. Resultados

Después de la realización de diversas pruebas sobre diferentes imágenes de diversos tipos (con nubes, con mala geometría o con cortes) hemos obtenido una serie de conclusiones que redactamos a continuación.

En primer lugar reseñar que la correcta corrección de las imágenes depende directamente del número de puntos (o ventanas de correlación) que se utilicen en el ajuste de la imagen. En imágenes con buena geometría y no demasiadas nubes, la situación de estas ventanas es amplia y por lo tanto el ajuste de las mismas es muy bueno, fijando su precisión en 1/3 de pixel de error, pero a medida que introducimos factores de error como son regiones amplias cubiertas de nubes o bien deformación geométrica marginal se deteriora la precisión, y es necesario hacer una selección más cuidadosa de las ventanas que se van a utilizar en el ajuste, ya que en algunos casos el error propio de una de las ventanas puede arrastrar todo el error de la imagen.

También cabe destacar que un factor que influye notablemente en la precisión de la corrección es la distribución geométrica de las ventanas de correlación, así si disponemos de muchos puntos en una zona determinada y solamente de un punto en otro área alejada de la anterior, el peso de dicho punto sobre el grupo de los anteriores, puede desequilibrar el ajuste, por lo tanto uno de los factores clave será la situación de las ventanas de la forma geoméricamente más equilibrada (cuadrado, pentágono, etc.), ya que el error mínimo que obtengamos se mantendrá dentro de los límites de la figura generada por estos puntos.

En resumen, para imágenes con buena geometría, con o sin nubes, y para imágenes con una peor geometría pero con ausencia de nubes e incluso para imágenes en las que el corte por marginalidad permita situar alguna ventana en las costas más próximas a dicho corte el funcionamiento de nuestro programa permite obtener unos resultados que cumplen los estándares utilizados en los procesos de análisis multitemporal; pero en el caso de nubes regionales que oculten toda una costa ibérica el error se descompensará aumentando en dicha zona ostensiblemente y de igual manera en imágenes con cortes y sin referencias costeras suficientes.

4. Bibliografía

Chuvienco, E. , 1996. Fundamentos de Teledetección espacial.

Martín Asin, F., 1983. Geodesia y Cartografía matemática.

Papí, F., 1999. Apuntes de Fotogrametría Digital, Ingeniería en Geodesia y Cartografía UAH.

Saunders, R. W., 1986. An automated scheme for the removal of cloud contamination from AVHRR radiances over western Europe. *International Journal of Remote Sensing*. 7.

Saunders, R. W., Kriebel K. T., 1987. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 9: 1, 123-150.

