

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA SENCILLA PARA LA GEORREFERENCIACIÓN Y MEDICIÓN DE DISTANCIAS A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE SISTEMÁTICAMENTE GEORREFERENCIADAS

Leonardo Gónima, Libardo E. Ruiz y Marcos E. González

Universidad de Córdoba, Departamento de Física y Electrónica, Grupo de Materiales y Física Aplicada. Carrera 6 No. 76-103, Montería, Córdoba, Colombia. lgonima@sinu.unicordoba.edu.co (L.G.); libardo2323@hotmail.com (L. R.); macgort@hotmail.com (M.G.)

RESUMEN

Uno de los principales problemas para una precisa georreferenciación y medición de distancias a partir de imágenes de satélite, especialmente en zonas geográficas con una gran dinámica morfológica y ambiental, reside no solamente en la dificultad para la identificación de puntos de control (GCPs, por su sigla en inglés), sino también en las limitaciones reales para el acceso a dichos lugares. En el presente trabajo se propone una metodología relativamente simple para la georreferenciación y la medición de distancias a partir de imágenes de satélite, basada en la utilización de imágenes de la reflectancia de la superficie previamente calculadas y luego orientadas hacia el norte (georreferenciación sistemática). A partir de estas imágenes y fijando un punto (píxel) de control básico P, medido con GPS, los demás GCPs se obtuvieron midiendo distancias definidas desde dicho punto P hasta puntos (píxeles) representativos sobre la imagen, seleccionados para la georreferenciación de ella. La validación estadística de los resultados obtenidos, utilizando una muestra diferente de GCPs medidos con GPS, muestra que la precisión de la georreferenciación y la medición de distancias utilizando la metodología desarrollada son similares a la obtenida por medios convencionales como la georreferenciación de imágenes por medio de datos de GPS.

PALABRAS CLAVE: Imágenes de satélite, Radiometría, Georreferenciación, Medición de distancias, Errores estadísticos.

ABSTRACT

Development of a simple methodology for georeferencing and distance measuring from systematic georeferenced satellite images. One of the main problems for a precise georeferencing and distance measurements from satellite images, especially in geographical zones with strong morphologic and environmental dynamics, lies not only in the difficulty for identifying ground control points (GCPs), but also in real limitations for accessing such places. In this work a relatively simple methodology is proposed for georeferencing and distance measuring from satellite images, based on the utilization of previously calculated reflectance images from the surface and then oriented toward the north (systematic georeferencing). From these images and setting a basic control point (pixel) P, measured with GPS, the

other GCPs were obtained by measurements of distances defined from the P point to representative points (pixels) on the image, selected for its georeferencing. The statistical validation of the obtained results, using a different sample of GCPs measured with GPS, shows that the precision of the georeferencing and distance measurement utilizing the developed methodology is similar to that obtained by conventional procedures, such as image georeferencing from GPS data.

KEY WORDS: Satellite images, Radiometry, Georeferencing, Distance measurements, Statistical errors.

INTRODUCCIÓN

La utilización de imágenes de satélite es una herramienta muy poderosa para el estudio y el monitoreo de los fenómenos naturales y antrópicos ocurridos en el sistema superficie terrestre-atmósfera. En este sentido, para la localización geográfica de dichos fenómenos se requiere una gran precisión cartográfica de las imágenes, proceso digital que se conoce con el nombre de georreferenciación.

Para georreferenciar una imagen de satélite es indispensable disponer de puntos de control (GCPs, por su sigla en inglés), adquiridos a través de mapas, de otras imágenes georreferenciadas o de mediciones en terreno con GPS. De esta manera la precisión de la georreferenciación dependerá de la calidad de los GCPs adquiridos, estando ésta representada por la capacidad que se tenga en localizar acertadamente, tanto en la imagen como en el terreno o lugar deseado, los puntos de control a utilizarse en el proceso. En la literatura se encuentran un sinnúmero de referencias relacionadas con la georreferenciación de imágenes de los satélites Landsat y SPOT de zonas planas (cultivos, áreas urbanas, planicies y llanuras, desiertos, entre otros), basada en la utilización de GCPs provenientes de mapas cartográficos o de imágenes de satélite previamente georreferenciadas (Pratt, 1974; Lucas y Kanade, 1981; Brown, 1992)

En la búsqueda continua para facilitar y mejorar la precisión de la georreferenciación de imágenes de satélite, en las últimas décadas se han desarrollado nuevos métodos para la adquisición de los GCPs. Wisetphanichkij *et al.* (1998) muestran los resultados obtenidos con la aplicación de algoritmos de detección secuencial similar (SSDAs) para la determinación precisa de los GCPs utilizando imágenes ópticas del satélite JERS-1 de la ciudad de Bangkok (Tailandia). Por otra parte, Huseby y Solberg (1998) presentan un algoritmo para la detección automática de GCPs basado en una técnica de “matching”, utilizando imágenes NOAA-AVHRR, EOS MODIS y Landsat TM. Otro procedimiento desarrollado es la extracción automática de GCPs comparando radiométrica y visualmente imágenes IKONOS (Ambrosio *et al.*, 1996).

Con la puesta en funcionamiento operacional de los GPS, a partir de 1990, el uso de este instrumento para la medición de GCPs con el fin de georreferenciar imágenes de satélite ha tenido una vasta difusión, registrada profusamente en la bibliografía especializada. Por ejemplo, Wilkie (1990) obtuvo GCPs necesarios para la georreferenciación de imágenes Landsat TM en zonas con cartografía inexistente o deficiente (bosque húmedo tropical del noreste de Zaire) utilizando un GPS Magnavox 4400. Con un Magellan NAV 1000 PRO, Clavet *et al.* (1993) georreferenciaron imágenes SPOT con la precisión requerida para la producción de cartografía digital a escala 1:50000. Más aún, imágenes digitales georreferenciadas de mayor precisión, de Landsat TM, SPOT multiespectral y SPOT pancromática fueron obtenidas a partir de mediciones con GPS, que aquellas con GCPs provenientes de tabletas digitales (mapas impresos), según lo registrado por Cook y Pinder (1996) y Kardoulas *et al.* (1996). Esto último fue posteriormente comprobado por Smith y Atkinson (2001) al establecer la importancia que tiene la recolección de GCPs con GPS diferenciales en la calidad de la georreferenciación de imágenes de satélite SPOT. Finalmente, Gao (2001) mostró que utilizar GPS no diferenciales para la medición de GCPs es un procedimiento suficientemente preciso para la georreferenciación de imágenes de satélite de resolución espacial media como Landsat TM y SPOT multiespectral.

A pesar de los avances expuestos anteriormente para lograr una más precisa georreferenciación de imágenes de satélite, todavía subsisten dificultades en la ubicación de los respectivos GCPs, aún en zonas planas y de acceso relativamente fácil, pero especialmente en aquellas aisladas de acceso difícil o prácticamente nulo. Como una contribución a la solución de este problema, en el presente trabajo se discute y se propone una metodología relativamente simple y de fácil aplicación para la georreferenciación satisfactoria de imágenes de satélite de resolución espacial media (por ejemplo, SPOT 4) y la medición de distancias a partir de ellas, cuya aplicabilidad también es válida para zonas de difícil o restringida accesibilidad. Esta metodología está basada en la precisa identificación, en una imagen calculada de la reflectancia de la superficie georreferenciada sistemáticamente, de un único punto (píxel) de control básico P, simultáneamente medido con un GPS no diferencial. A partir de dicho P se obtienen, por medición de distancias (conteo de píxeles), los demás GCPs indispensables para la adecuada georreferenciación de la imagen de satélite seleccionada.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio está localizada al norte del departamento de Córdoba como se muestra en la Figura 1. En ésta se incluye parte de los municipios de San

Bernardo del Viento, Lorica y San Antero, el delta de Tinajones y la bahía de Cispatá. Está caracterizada por ser una zona con una gran dinámica morfológica, debido a los continuos cambios de curso del río Sinú y las consecuentes variaciones de la línea de costa (Sánchez *et al.*, 2005). Por otra parte, la zona presenta algunas dificultades para el acceso a diversos lugares, tanto por tierra (vías en mal estado) como por vía acuática, por ejemplo: el delta de Tinajones, el sector de las ciénagas de la bahía de Cispatá y aquel denominado Cuchilla de Cispatá (cerros de baja altura). Además de lo anterior, como consecuencia de la uniformidad en la cobertura vegetal de la área de estudio, representada principalmente por vegetación de manglar y pastos, en algunos lugares se presentan inconvenientes en la ubicación de puntos de control, con la suficiente precisión, lo cual se traduce en una menor calidad de los resultados obtenidos con el proceso de georreferenciación.

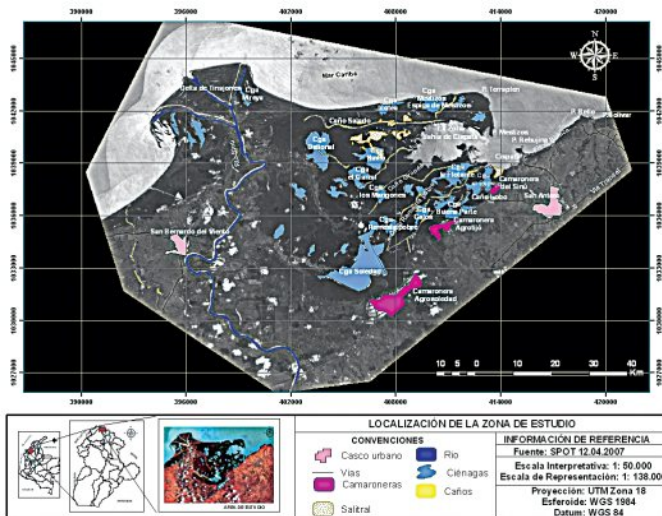


Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio (imagen SPOT 4).

MATERIALES Y MÉTODOS

Está ampliamente difundido en la literatura especializada que una de las dificultades en la identificación adecuada de los GCPs en una imagen de satélite óptica es la alteración que produce la atmósfera sobre la radiación solar reflejada por la superficie terrestre y que posteriormente es captada por los sensores satelitales (Jensen, 2005). Esto es aún más evidente en regiones tropicales, en las cuales la atmósfera, debido a su alto contenido de vapor de agua, modifica aún más la

radiación electromagnética reflejada proveniente de la superficie terrestre y que es medida por los sensores satelitales. Por otra parte, el que no todas las imágenes de satélite sean captadas en forma vertical, sino con un ángulo de visión determinado, también contribuye a alterar radiométricamente los valores de los píxeles: entre mayor sea la inclinación del sensor respecto a la vertical a la superficie, mayor será la probabilidad de equivocación en la interpretación de ellos. Para el caso de la imagen seleccionada en este estudio, SPOT 4, la inclinación del sensor respecto a la superficie correspondió a un ángulo de visión bastante grande (26.8°). Por consiguiente, para una mejor y más precisa identificación e interpretación de las imágenes de satélite, se calcularon a partir de estas imágenes de la reflectancia de la superficie con correcciones atmosféricas y del ángulo de visión para una banda espectral i , ρ_i , de acuerdo con la siguiente ecuación (Gónima y Alados, 2002):

$$\rho_i = (L_i \uparrow - A_i) / [B_i + (L_i \uparrow A_i) * C_i] \quad (1)$$

Donde, $L_i \uparrow$ es la radiación solar espectral reflejada por la superficie en dirección del sensor y A_i , B_i y C_i son constantes radiativas espectrales. Acorde con lo expuesto anteriormente, la metodología utilizada fue la siguiente:

1. Procesamiento digital de una imagen de satélite SPOT 4 del 12.04.2007 sin georreferenciar, representado por el cálculo de la reflectancia de la superficie para cada banda espectral (cuatro en total), de acuerdo con la ecuación 1.

2. Agrupamiento de las cuatro imágenes ópticas de reflectancia espectral de la superficie calculadas en un solo archivo imagen, con el fin de georreferenciarlas posteriormente en bloque.

3. Otro de los efectos que no solamente afectan la radiometría de una imagen, sino que también la distorsionan espacialmente, es que la órbita del sensor no está muchas veces orientada exactamente hacia el norte geográfico. Este es el caso particular de la imagen seleccionada, en la cual debido al ángulo de visión del sensor y a la órbita desfasada respecto al norte, las superficies en la imagen original aparecen de dimensiones diferentes a las que realmente tienen. Esta situación se corrige en gran medida georreferenciando la imagen en forma sistemática. Entonces, la imagen del numeral anterior se georreferenció sistemáticamente utilizando los cinco GCPs (uno por cada una de las esquinas y uno del centro de la imagen SPOT de dimensiones originales) suministrados en el archivo VOL_LIST existente en el "header" de la imagen SPOT 4 mencionada. Este procedimiento, a pesar de que la precisión de localización absoluta de puntos en las imágenes (zonas planas) registrada por SPOTimage (2008) es de aproximadamente 350 m, permite orientarlas hacia el norte geográfico, lo cual es muy importante para el desarrollo de la metodología propuesta.

4. Ubicación en la imagen georreferenciada sistemáticamente del píxel correspondiente al punto de control básico P, a partir del cual se determinaron los GCPs indispensables para la georreferenciación de ella. P fue seleccionado de manera que correspondiera a un píxel lo más precisamente identificable (radiométrica y visualmente) en la imagen y que representara al mismo tiempo un punto fácilmente reconocible visualmente en el terreno, en este caso dentro del casco urbano de la población de San Antero (Figura 2: círculo color rojo).

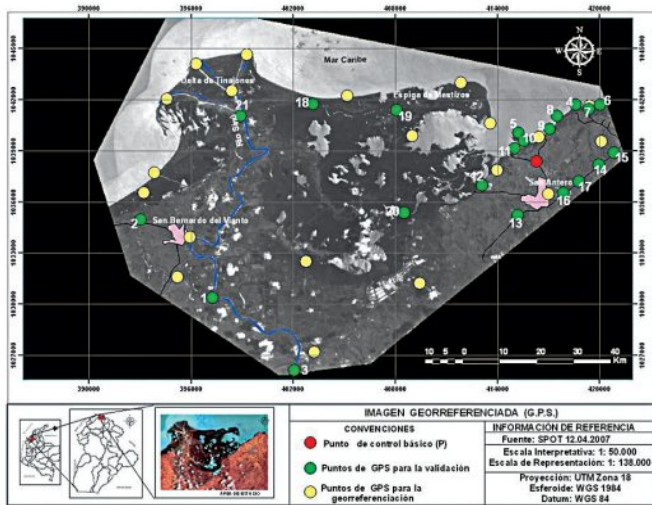


Figura 2. Imagen de la reflectancia de la superficie georreferenciada a través de 20 puntos de GPS y utilizada para la validación estadística con 21 nuevos GCPs medidos con GPS.



Figura 3. Representación gráfica para la definición de los GCPs de acuerdo con la metodología desarrollada.

5. Medición en campo de las coordenadas del píxel P con GPS no diferencial.

6. Georreferenciación de la imagen del numeral 3 utilizando 20 GCPs medidos en campo con GPS para posterior validación de la metodología propuesta a continuación (Figura 2: círculos amarillos).

7. Determinación de los GCPs necesarios para la georreferenciación de la imagen orientada hacia el norte. El procedimiento desarrollado para la obtención de cada uno de los nuevos GCPs fue el siguiente (Figura 3):

a) Selección de un píxel cualquiera en otro lugar sobre la imagen M.

b) A partir del píxel P se traza una línea recta horizontal (en dirección E-W O W-E, según M se encuentre al oeste de P o viceversa) que intersecte la línea recta proyectada verticalmente desde el píxel M (en dirección N-S O S-N, según M se encuentre al norte de P o viceversa). El píxel de intersección entre las dos líneas rectas se denomina c en la Figura 3.

c) A continuación se cuenta el número de píxeles existentes entre los píxeles P y c, multiplicándose dicho número por el tamaño lineal del píxel (resolución espacial). Para la imagen seleccionada la resolución espacial es de 20 m.

d) De acuerdo con el literal anterior, la distancia horizontal en metros así calculada, sumada o restada al valor de la componente x del píxel P, dependiendo de si c se encuentra al este o al oeste de dicho punto respectivamente, representa la coordenada x del nuevo GCP.

e) Para la definición de la coordenada y del nuevo GCP se procede de manera similar a partir del píxel c, midiendo la distancia (línea recta vertical) en metros desde dicho píxel hasta el píxel M y sumándola o restándola a la coordenada y del píxel P, de acuerdo a que M se encuentre al norte o al sur de dicho píxel, respectivamente. El resultado de la operación matemática anterior corresponde con la coordenada y del nuevo GCP.

Es de anotar que las coordenadas de P y las correspondientes a los nuevos GCPs, medidas y calculadas respectivamente, fueron asignadas al centro de cada uno de los píxeles respectivos, como representativo de cada punto de control en particular. En la Figura 4 se muestra la ubicación de 26 píxeles M (círculos azul claro) seleccionados en la imagen corregida (reflectancia de la superficie y orientación hacia el norte) y que corresponden a los GCPs utilizados para la georreferenciación de ella de acuerdo con la metodología desarrollada (numeral 7). Es de anotar que aún en las zonas marinas y terrestres de acceso restringido, se establecieron también puntos de control.

8. Georreferenciación de la imagen utilizando los GCPs calculados de acuerdo con el numeral anterior. Comparación de los resultados obtenidos con la imagen georreferenciada por medio de la metodología desarrollada con los de las imágenes georreferenciadas sistemáticamente (numeral 3) y con GPS (numeral 6).

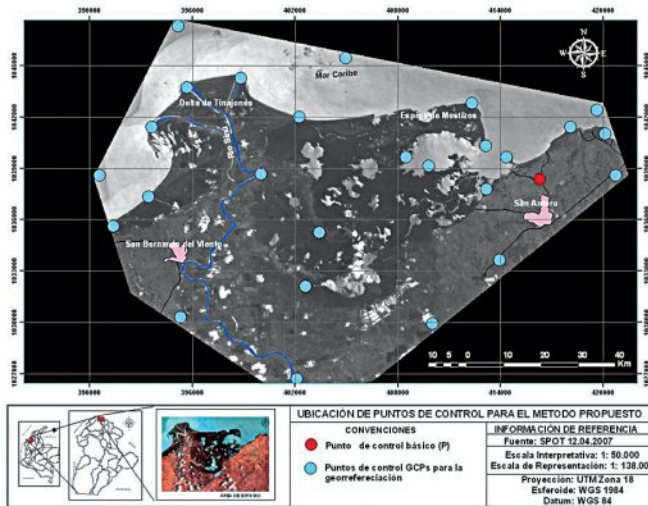


Figura 4. Ubicación espacial de los GCPs utilizados para la georreferenciación de la imagen de la reflectancia de la superficie por medio de la metodología desarrollada (imagen SPOT 4).

9. Validación de las tres imágenes georreferenciadas mencionadas anteriormente con nuevos GCPs medidos con GPS (21 en total).

10. Validación de distancias calculadas en las tres imágenes georreferenciadas por medio de los métodos expuestos anteriormente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A pesar de que las imágenes calculadas de la reflectancia de la superficie con correcciones atmosféricas y del ángulo de visión posteriormente fueron orientadas hacia el norte, permitieron obtener una mayor precisión y facilidad en la interpretación y la ubicación de los GCPs requeridos para la posterior georreferenciación y medición de distancias más precisas a partir de ellas, sólo es posible establecer la validez de la metodología desarrollada por medio de comparaciones estadísticas entre los resultados obtenidos, inicialmente a partir de los mismos GCPs utilizados para la georreferenciación de la imagen corregida por los tres métodos expuestos anteriormente, a saber:

- a) Los cinco GCPs suministrados en el “header” de la imagen SPOT 4 adquirida, procedimiento denominado comúnmente georreferenciación sistemática.
- b) 20 GCPs medidos en campo con GPS (Figura 2: círculos amarillos).
- c) La metodología desarrollada (Figura 4).

La comparación estadística mencionada se muestra en la siguiente Tabla 1.

Los resultados de la Tabla 1 demuestran que la imagen corregida (georreferenciación sistemática) es la que menor precisión ofrece, tanto por lo pequeño de la muestra de GCPs seleccionados (cinco en total) como por la calidad de éstos, lo que corrobora lo informado por SPOTImage (2008). Si se comparan los

Tabla 1. Error medio cuadrático (emc) calculado para las tres imágenes georreferenciadas a partir de sus respectivos GCPs.

Imagen georreferenciada sistemáticamente (5 GCPs: “header” imagen SPOT 4)		Imagen georreferenciada con GPS (20 GCPs: círculos amarillos en Figura 2)		Imagen georreferenciada metodología desarrollada (26 GCPs: Figura 4)	
emc (x)	emc (y)	emc (x)	emc (y)	emc (x)	emc (y)
388 m	367 m	27 m	27 m	28 m	29 m

resultados de la georreferenciación realizada con datos de GPS con los obtenidos mediante la metodología desarrollada, se observa que los errores medios cuadráticos emc calculados por ambos métodos son bastante similares, lo que significa que la precisión de ambos procedimientos es de aproximadamente ± 1 píxel para las muestras de GCPs con que ellas mismas fueron georreferenciadas.

Como la comparación de los resultados a partir de los mismos GCPs utilizados para la georreferenciación de las tres imágenes mencionadas anteriormente no puede ser interpretada estadísticamente como suficientemente significativa, se seleccionó una nueva muestra de datos constituida por 21 GCPs diferentes, medidos en campo con GPS y representados por los círculos verde claro de las Figuras 2, 5 y 6. La Tabla 2 muestra la aplicación de la metodología desarrollada en la definición de las coordenadas de los nuevos GCPs por medio del cálculo de las distancias entre el punto P y cada uno de dichos puntos de control.

Así mismo, en la Tabla 3 se muestran las coordenadas de los 21 GCPs utilizados para la validación definitiva de la metodología desarrollada, tanto para las mediciones con GPS como para cada una de las tres imágenes georreferenciadas por los tres métodos expuestos anteriormente. A partir de los datos de la Tabla 3 se hizo una comparación estadística entre las coordenadas de los nuevos GCPs medidas con GPS y las coordenadas extraídas de cada una de las tres imágenes georreferenciadas, basada en el cálculo de las diferencias entre ellas (Tabla 4).

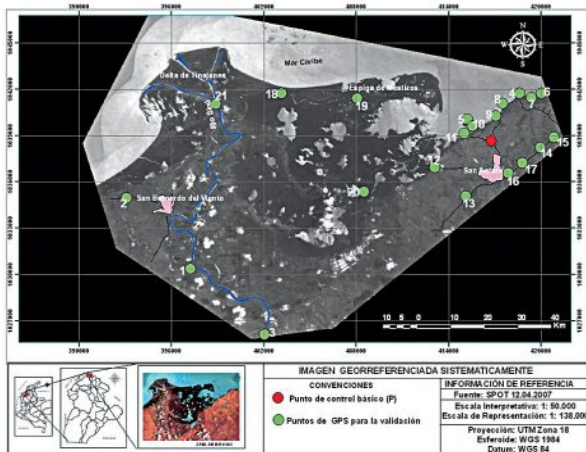


Figura 5. Imagen de la reflectancia de la superficie georreferenciada sistemáticamente y utilizada para la validación estadística con 21 nuevos GCPs medidos con GPS.

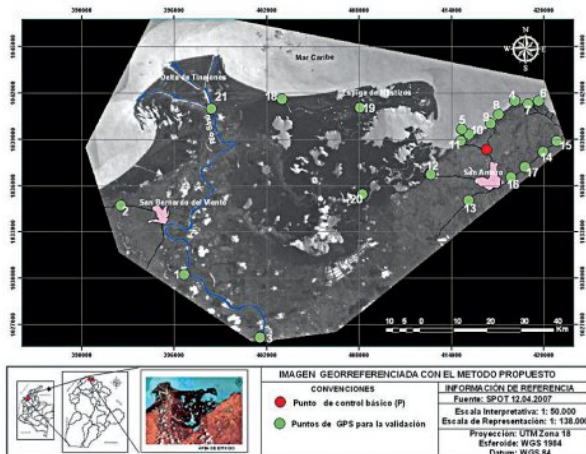


Figura 6. Imagen de la reflectancia de la superficie georreferenciada a través de la metodología desarrollada y utilizada para la validación estadística con 21 nuevos GCPs medidos con GPS.

Observando las diferencias individuales de la Tabla 4, nuevamente las imágenes georreferenciadas con datos provenientes de GPS y con aquellos provenientes de la metodología desarrollada, son las que muestran resultados bastante similares respecto a las mediciones en campo con GPS de los 21 GCPs. Como era de esperarse, la imagen georreferenciada sistemáticamente es la que menor precisión ofrece, mucho menor que cualquiera de las otras dos. Analizando el emc calculado para dicha muestra de datos, se comprueba que con la imagen

Tabla 2. Determinación de las distancias a partir del punto de control básico P (x = 416262 m, y = 1038330 m) y las coordenadas de los píxeles (GCPs) utilizados para la validación de la metodología desarrollada (Figura 6).

GCPs	Lugar	Número de píxeles a partir de P (conteo)		Distancia calculada (m)		Coordenadas imagen georreferenciada metodología desarrollada (m)	
		x	y	x	y	x	y
1	Erosión río Sinú	972 (Oeste)	409 (Sur)	19440	8180	396822	1030150
2	Puente La Balsa	1183 (Oeste)	182 (Sur)	23660	3640	392622	1034590
3	Puente La Doctrina	726 (Oeste)	596 (Sur)	14520	11920	401742	1026410
4	Punta Bello	97 (Este)	157 (Norte)	1940	3140	418182	1041480
5	Punta Rebujina I	76 (Oeste)	69 (Norte)	1520	1380	414742	1039710
6	Punta Bollívar	170 (Este)	158 (Norte)	3400	3160	419662	1041450
7	Arroyo Punta Bello	135 (Este)	146 (Norte)	2700	2920	418962	1041210
8	Playa Blanca I	32 (Este)	106 (Norte)	640	2120	416902	1040450
9	Playa Blanca II	16 (Este)	83 (Norte)	320	1660	416582	1039990
10	Punta Rebujina II	58 (Oeste)	50 (Norte)	1160	1000	415102	1039290
11	Caño Cabañas	83 (Oeste)	51 (Norte)	1660	1020	414602	1039350
12	Caño Lobo	181 (Oeste)	84 (Sur)	3620	1680	412642	1036650
13	Volcán de Iodo	76 (Oeste)	178 (Sur)	1520	3560	414742	1034770
14	Vía a Coveñas I	186 (Este)	1 (Sur)	3720	20	419982	1038310
15	Vía a Coveñas II	141 (Este)	39 (Sur)	2820	780	419082	1037550
16	Vía San Antero	45 (Este)	118 (Sur)	900	2360	417162	1035970
17	Arroyo Mamón	75 (Este)	95 (Sur)	1500	1900	417762	1036430
18	Caño Salado I	444 (Oeste)	2331 (Norte)	8880	2900	407382	1041230
19	Caño Salado II	679 (Oeste)	161 (Norte)	13580	3220	402702	1041550
20	Caño Remediapobre	415 (Oeste)	158 (Sur)	8300	3160	407962	1035170
21	Delta de Tinajones	901 (Oeste)	138 (Norte)	18020	2760	398242	1041090

Tabla 3. Coordenadas de los píxeles (GCPs) seleccionados para la validación de la metodología desarrollada (Figuras 2, 5 y 6: círculos color verde).

GCPs	Lugar	Mediciones hechas con GPS (m)				Imagen georreferenciada sistemáticamente (m)				Imagen georreferenciada con GPS (m)				Imagen georreferenciada metodológicamente desarrollada (m)			
		x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y		
1	Erosión río Sinú	396871	1030118	397336	1030408	397336	1030408	396822	1030150	396822	1030150	396822	1030150	396822	1030150		
2	Puente La Balsa	392675	1034615	393133	1034877	393133	1034877	392622	1034590	392622	1034590	392622	1034590	392622	1034590		
3	Puente La Doctrina	401757	1026384	402251	1026669	402251	1026669	401742	1026408	401742	1026408	401742	1026410	401742	1026410		
4	Punta Bello	418230	1041434	418714	1041715	418714	1041715	418182	1041450	418182	1041450	418182	1041480	418182	1041480		
5	Punta Rebufina I	414778	1039731	415253	1039955	415253	1039955	414742	1039711	414742	1039711	414742	1039710	414742	1039710		
6	Punta Bolívar	419624	1041483	420173	1041735	420173	1041735	419660	1041450	419660	1041450	419662	1041450	419662	1041450		
7	Arroyo P. Bello	418987	1041248	419474	1041495	419474	1041495	418963	1041211	418963	1041211	418962	1041210	418962	1041210		
8	Playa Blanca I	416930	1040403	417413	1040695	417413	1040695	416902	1040450	416902	1040450	416902	1040450	416902	1040450		
9	Playa Blanca II	416617	1039939	417091	1040234	417091	1040234	416582	1039990	416582	1039990	416582	1039990	416582	1039990		
10	Punta Rebufina II	415078	1039290	415614	1039574	415614	1039574	415103	1039291	415103	1039291	415102	1039290	415102	1039290		
11	Caño Cabañas	414643	1039301	415123	1039594	415123	1039594	414603	1039348	414603	1039348	414602	1039350	414602	1039350		
12	Caño Lobo	412687	1036645	413135	1036945	413135	1036945	412642	1036651	412642	1036651	412642	1036650	412642	1036650		
13	Volcán	414762	1034735	415252	1035012	415252	1035012	414743	1034768	414743	1034768	414742	1034770	414742	1034770		
14	Vía a Coveñas I	420034	1038278	420513	1038554	420513	1038554	419983	1038310	419983	1038310	419982	1038310	419982	1038310		
15	Vía a Coveñas II	419140	1037535	419594	1037795	419594	1037795	419080	1037551	419080	1037551	419082	1037550	419082	1037550		
16	Vía San Antero	417200	1035947	417674	1036213	417674	1036213	417160	1035970	417160	1035970	417162	1035970	417162	1035970		
17	Arroyo Mamón	417794	1036432	418274	1036674	418274	1036674	417762	1036433	417762	1036433	417762	1036430	417762	1036430		
18	Caño Salado I	407310	1041164	407894	1041406	407894	1041406	407382	1041230	407382	1041230	407382	1041230	407382	1041230		
19	Caño Salado II	402636	1041483	403192	1041792	403192	1041792	402702	1041551	402702	1041551	402702	1041550	402702	1041550		
20	Caño Remediapobre	407930	1035072	408493	1035410	408493	1035410	407962	1035170	407962	1035170	407962	1035170	407962	1035170		
21	Delta de Tinajones	398282	1041049	398755	1041330	398755	1041330	398235	1041049	398235	1041049	398242	1041090	398242	1041090		

Tabla 4. Evaluación estadística de la precisión de la georreferenciación y de la medición de distancias realizadas por los tres métodos utilizados (muestra de 21 GCPs medidos con GPS seleccionados para la validación). x: diferencia de la coordenada x entre los GCPs medidos con GPS y los obtenidos a partir de la respectiva georreferenciación, y: diferencia de la coordenada y entre los GCPs medidos con GPS y los obtenidos a partir de la respectiva georreferenciación, emc: error medio cuadrático de las respectivas diferencias.

GCPs	Lugar	Imagen georreferenciada sistemáticamente		Imagen georreferenciada con GPS		Imagen georreferenciada metodología desarrollada	
		x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
1	Erosión río Sinú	-465	-290	49	-32	49	-32
2	Puente La Balsa	-458	-262	53	25	53	25
3	Puente La Doctrina	-494	-285	15	-24	15	-26
4	Punta Bello	-484	-281	48	-16	48	-46
5	Punta Rebutina I	-475	-224	36	20	36	21
6	Punta Bolívar	-549	-252	-36	33	-38	33
7	Arroyo Punta Bello	-487	-247	24	37	25	38
8	Playa Blanca I	-483	-292	28	-47	28	-47
9	Playa Blanca II	-474	-295	35	-51	35	-51
10	Punta Rebutina II	-536	-284	-25	-1	-24	0
11	Caño Cabañas	-480	-293	40	-47	41	-49
12	Caño Lobo	-448	-300	45	-6	45	-5
13	Volcán de Iodo	-490	-277	19	-33	20	-35
14	Vía a Coveñas I	-479	-276	51	-32	52	-32
15	Vía a Coveñas II	-454	-260	60	-16	58	-15
16	Vía San Antero	-474	-266	40	-23	38	-23
17	Arroyo Mamón	-480	-242	32	-1	32	2
18	Caño Salado I	-584	-242	-72	-66	-72	-66
19	Caño Salado II	-556	-309	-66	-68	-66	-67
20	Caño Remediapobre	-563	-338	-32	-98	-32	-98
21	Delta de Tinajones	-473	-281	47	0	40	-41
	emc (m)	508.2	284.0	44.2	41.1	43.9	43.5

georreferenciada mediante la metodología desarrollada se obtienen prácticamente los mismos resultados que con la imagen georreferenciada usando datos de GPS: la precisión alcanzada en la georreferenciación de ambas imágenes es aproximadamente de ± 2 píxeles para cada par de coordenadas x y y , lo cual representa el valor aceptado internacionalmente para considerar dicho proceso como suficientemente preciso. La precisión obtenida depende en gran medida de la asignación que se hizo a priori de que la coordenada de un GCP es representativa del centro del píxel en la imagen, lo cual muchas veces no representa la realidad del sitio o punto seleccionado. Por otra parte, en imágenes de resolución espacial media es imposible hacer coincidir exactamente el punto donde se miden las coordenadas con GPS con un píxel en particular, debido a que mientras la precisión de las medidas con GPS no diferencial varía generalmente entre 40 y 10 m, la resolución espacial de dichos píxeles es de algunas decenas de metros, como en el caso del SPOT 4 (20 m). Esta situación mejorará en la medida en que se disponga de imágenes de satélite con más altas resoluciones espaciales como IKONOS, QuickBird, IRS, entre otros.

Respecto a la calidad de la medición de distancias, al estar la metodología desarrollada basada exclusivamente en dicha medición para el cálculo de las coordenadas de cualquier punto o píxel de una imagen y ya que los resultados de la validación de la georreferenciación por medio de esta misma metodología son altamente satisfactorios, entonces también la medición de distancias es suficientemente precisa, como lo demuestran los datos de la Tabla 4. Es decir, por medio de esta metodología es posible obtener resultados suficientemente precisos tanto en la georreferenciación de imágenes de satélite como en la medición de distancias a partir de ellas.

Esta determinación precisa de distancias por medio de imágenes de satélite es muy importante para la estimación cuantitativa de variaciones espaciales de zonas urbanas, corrientes de agua (ríos, caños y canales), línea costera y en la delimitación de zonas con cobertura vegetal, suelos expuestos y superficies de agua (lagos, ciénagas y embalses, entre otros). Por ejemplo, se muestra claramente en el estudio de Pérez *et al.* (en prensa), en el cual se utilizaron imágenes multiespectrales Landsat (TM y ETM+) y SPOT 4 para la cuantificación de los procesos de erosión y acreción en los sectores La Balsa, el delta de Tinajones y la bahía de Cispatá (departamento de Córdoba) utilizando la metodología desarrollada.

En conclusión, la metodología desarrollada es una manera relativamente fácil, sencilla y suficientemente precisa para georreferenciar imágenes de satélite de zonas planas o relativamente planas, con la ventaja de que solamente requiere de la identificación lo más precisa posible de un punto de control básico en una imagen de la reflectancia de la superficie y orientada hacia el norte, a partir del

cual es posible obtener los demás GCPs necesarios para la georreferenciación, aún los de aquellos puntos o lugares inaccesibles como áreas marinas o terrenas. Es de esperarse, como también está registrado en la bibliografía especializada, que para otras condiciones orográficas la precisión de la georreferenciación dependerá de la disponibilidad y calidad de un modelo digital de terreno, con el cual se puedan corregir adecuadamente las variaciones radiométricas y espaciales causadas por la pendiente y orientación del terreno.

CONCLUSIONES

La metodología desarrollada permite obtener resultados suficientemente precisos de la georreferenciación y de la medición de distancias a partir de imágenes de satélite previamente corregidas radiométrica (reflectancia con correcciones atmosféricas y del ángulo de visión) y espacialmente al orientarlas hacia el norte por medio de una georreferenciación sistemática. Es de esperarse que, con la aplicación de la metodología desarrollada a imágenes de satélite solamente georreferenciadas sistemáticamente sin estar previamente corregidas radiométricamente, sea posible obtener resultados relativamente satisfactorios, siempre y cuando la atmósfera de la área de estudio sea bastante clara (bajo contenido de vapor de agua y aerosoles) y que el sensor satelital haya adquirido la imagen en posición vertical o cuasi-vertical.

La aplicación de la metodología desarrollada es relativamente fácil y sencilla, ya que está basada en la adquisición de un solo punto de control GCP identificado lo más precisamente posible en la imagen de satélite y medido en terreno con GPS, a partir del cual es posible obtener los demás GCPs, independientemente de la accesibilidad física a dichos puntos, por medición de distancias. Estas últimas tienen especial importancia en la cuantificación de variaciones espaciales de zonas urbanas, corrientes de agua en general, línea costera y en la delimitación de zonas con cobertura vegetal, suelos expuestos y superficies de agua.

Aunque la precisión alcanzada por medio de la aplicación de la metodología desarrollada está dentro de los cánones internacionales, existen errores debidos al tamaño del píxel de las imágenes de satélite de resolución espacial media comparado con la precisión de los datos medidos con GPS no diferencial, lo cual genera incertidumbres al momento de hacer coincidir un mismo punto en el terreno por ambos medios (imagen y GPS). Por otra parte, las variaciones del relieve del terreno son otra de las causas de las imprecisiones en la georreferenciación de imágenes de satélite y en la medición de distancias a partir de ellas. Esto significa que la metodología desarrollada da los mejores resultados para zonas planas y/o relativamente planas, como es mayoritariamente la área de estudio seleccionada.

La metodología desarrollada ha sido aplicada a varias imágenes de satélite Landsat y SPOT con resultados satisfactorios para zonas planas y relativamente planas. Sin embargo, una validación definitiva de ésta sólo será posible a medida que tenga una mayor aplicación en diferentes imágenes de satélite. Una versión modificada que incluye el efecto de la pendiente del terreno está en vías de desarrollo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambrosio, G., J. González y V. Arévalo. 1996. Comparación de imágenes de satélite para la detección de cambios temporales. <http://www.ceafac.es/actividades/jornadas/XXIV/documentos/viar/96.pdf>. 17/02/2009.
- Brown, L. G. 1992. A survey of image registration techniques. *ACM Comp. Surv.*, 24 (4): 325-376.
- Clavet, D., M. Lasserre y J. Pouliot. 1993. GPS control for 1:50000-scale topographic mapping from satellite images. *Photogram. Engin. Rem. Sens.*, 59 (1): 107-111.
- Cook, A. E y J. E. Pinder. 1996. Relative accuracy of rectifications using coordinates determined from maps and the Global Positioning System. *Photogram. Engin. Rem. Sens.*, 62 (1): 73-77.
- Gao, J. 2001. Non differential GPS an alternate source of planimetric control for rectifying satellite imagery. *Photogram. Engin. Rem. Sens.*, 67 (1): 49-55.
- Gónima, L. y L. Alados. 2002. Cálculo de la reflectancia a partir de datos de satélite, versión alternativa. *Proceedings tercera Asamblea Hispano – Portuguesa Geodesia y Geofísica (Valencia, España)*, 3: 408-413.
- Huseby, R. B. y R. Solberg. 1998. A model-based approach for geometric correction of optical satellite images. *Reporte 932, Norwegian Computing Center, Oslo*. 24 p.
- Jensen, J. R. 2005. *Introductory digital image processing, a remote sensing perspective*. third edition. Prentice Hall Series, Upper Saddle River, EE. UU. 526 p.
- Kardoulas, N. G., A. C. Bird y A. I. Lawan. 1996. Geometric correction of SPOT and Landsat imagery: A comparison of map- and GPS- derived control points. *Photogram. Engin. Rem. Sens.*, 62 (10): 73-77.
- Lucas, B. D. y T. Kanade. 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (Vancouver)*, 2: 674-679.
- Pérez, M., L. Gónima y A. Pastrana. (en prensa). Dinámica de las variaciones morfológicas de la franja costera del DMI. En: *Teledetección aplicada al ordenamiento ambiental del Distrito de Manejo Integrado de Cispatá*. Serie de Publicaciones Especiales No. 17, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR, Santa Marta.
- Pratt, W. K. 1974. Correlation techniques of image registration. *IEEE Transact. Aerosp. Electr. Syst.-AES*, 10: 353-358.
- Sánchez, H., G. Ulloa, H. Tavera y W. Gil. 2005. Plan de manejo integral de los manglares de la zona de uso sostenible del sector estuarino de la bahía de Cispatá. MVDAT, CONIF, OIMT y Corporación

- Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS). Montería. 202 p.
- SPOTimage. 2008. www.spotimage.com/web/es/316-satelites-spot.php.15/01/2009.
- Smith, D. P. y S. F. Atkinson. 2001. Accuracy of rectification using topographic maps versus GPS ground control points. *Photogram. Engin. Rem. Sens.*, 67 (5): 585-587.
- Wilkie, D. S. 1990. GPS location data: an aid to satellite image analyses of poorly mapped regions. *International Journal of Remote Sensing*, 11 (4): 653-658.
- Wisetphanichkij, S., K. Dejhan, F. Cheevasuvit, S. Mitatha, S. Hanpipatpongsa, C. Pienvijarnpong y C. Soonyeechan. 1998. An improvement of geometric correlation of satellite image. www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1998/ps3/ps3014.asp. 25/03/2009.

FECHA DE RECEPCIÓN: 16/06/2008

FECHA DE ACEPTACIÓN:16/12/2009

