

# RECTIFICACIÓN DE UNA IMAGEN SPOT CON PUNTOS DE CONTROL OBTENIDOS POR GPS-DIFERENCIAL

José E. Pernía y Juan Y. López

Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Ingeniería Forestal, Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos, Mérida-Venezuela. E-mail: epernia@forest.ula.ve y jlopez@forest.ula.ve

## RESUMEN

Las imágenes de percepción remota adolecen de deformaciones geométricas que deben ser corregidas apropiadamente para que la información en ellas contenida pueda ser representada en sistemas cartográficos convencionales o mapas. La rectificación geométrica realizada a través de ecuaciones polinomiales ha sido muy utilizada para imágenes de terreno plano o poco ondulado. Las coordenadas de los puntos de control terrestre para este proceso son obtenidas generalmente de cartas topográficas de buena calidad y escala adecuada. En ausencia de cartas topográficas apropiadas, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), en modo diferencial, puede brindar con suficiente exactitud y a un costo competitivo las coordenadas de los puntos necesarios. El presente estudio fue realizado para determinar la capacidad de receptores y software de tipo métrico, para obtener las coordenadas de puntos de control requeridas para rectificar una imagen multispectral del satélite SPOT (20 m de resolución espacial) de la Reserva Forestal de Caparo, Estado Barinas, en los llanos occidentales venezolanos. Para determinar la exactitud de los receptores GPS utilizados (Trimble Pathfinder PRO-XL) y la metodología propuesta se determinaron dos puntos de primer orden de la red geodésica nacional, a partir de dos puntos utilizados como base, también del mismo orden y de la misma red, ubicados a 23.4 y 55.0 Km de distancia. En ambos casos las discrepancias entre las coordenadas GPS y las coordenadas geodésicas fueron menores a un metro en norte, este y altura. La verificación de la exactitud de las cuatro imágenes rectificadas (tres con puntos de control GPS y una con puntos obtenidos de cartas topográficas de 1973, a escala 1:25.000) mostraron discrepancias de 15.1 m (4 puntos de control GPS), de 14.0 m (5 puntos de control GPS), de 9.6 m (10 puntos de control GPS) y 37.0 m (7 puntos de control de las cartas topográficas).

**Palabras clave:** Percepción remota, imagen SPOT, rectificación, GPS diferencial.

## ABSTRACT

Remote sensing images have geometric distortions that must be appropriately removed in order that the information they contain could be represented in conventional cartographic systems or maps. The geometric rectification using polynomial equations has been highly used for images of flat and gently terrain. The coordinates of the ground control points for this process are generally obtained from topographic maps of good quality and adequate scale. In absence of appropriate topographic maps, the Global Positioning System (GPS) in differential mode, could provide the coordinates of the necessary ground control points with sufficient accuracy and competitive cost. The present study was undertaken to determine the efficiency of metric accuracy GPS receivers and software to determine the coordinates of the ground control points to rectify a multispectral SPOT image (resolution of 20 m) of the Caparo Forest Reservation, Barinas State, in the western Venezuelan flood plains. In order to determine the accuracy of the GPS receivers used in this study (Trimble Pathfinder PRO-XL), and the proposed methodology, two first order points of the Venezuelan geodetic net were determined, from two base stations located on other points also of first order and of the same geodetic net, located at distances of 23.4 and 55.0 Km. In both cases the discrepancies between the GPS coordinates and the geodetic coordinates of the determined points were within one meter in north, east and elevation. The verification of the accuracy of the four rectified images (three with GPS coordinates and one with coordinates from 1:25.000 scale topographic maps prepared in 1973) showed discrepancies of 15.1 m (4 GPS control points), of 14.0 m (5 GPS control points), of 9.6 m (10 GPS control points), and 37.0 m (7 control points from the topographic maps).

**Key words:** Remote sensing, SPOT imagery, rectification, GPS differential.

Las imágenes de percepción remota constituyen una valiosa fuente de información para la evaluación de los recursos ambientales, cuyo uso para este propósito se ha venido incrementando a través del tiempo. Para el presente año 2000 se cuenta con más de 20 programas espaciales de percepción remota, con resolución espacial de 30 metros o mayor (píxeles iguales o menores de 30 m). Seis de ellos tienen

resolución de 10 m o mayor (SPOT, IRS-1C e IRS-1D, RADARSAT, IKONOS y SPIN-2). IKONOS-2, lanzado el 24 de setiembre de 1999, ha tomado excelentes imágenes pancromáticas y multispectrales con 1 y 4 m de resolución respectivamente. Se espera que por lo menos otros tres programas, con resolución parecida a la de IKONOS-2, colocarán satélites en el espacio durante

este o el próximo año (QUICKBIRD-1, ORBVIEW-3 y EROS-1). También están a punto de lanzarse al espacio sensores hiperspectrales (más de 32 bandas) a bordo de ORBVIEW-4 (con 200 bandas y 8 m de resolución espacial) y ARIES (con 96 bandas y 12 y 30 m de resolución) (Pernía, 1999). La mayoría de estos programas son de tipo comercial y se espera que la oferta de imágenes aumente fuertemente en el futuro cercano, con la consecuente reducción de los precios.

Las imágenes obtenidas por los sensores remotos adolecen de deformaciones geométricas, como consecuencia de la naturaleza intrínseca de los instrumentos sensores y de las técnicas de adquisición de las imágenes. El relieve del terreno contribuye sustancialmente en la magnitud de estas deformaciones. La corrección geométrica de las deformaciones de las imágenes es necesaria para que la información que ellas contienen pueda ser expresada en los sistemas cartográficos convencionales o mapas.

Existen técnicas tanto digitales como analógicas que permiten realizar las correcciones geométricas de las imágenes. Una de las más comunes es la rectificación, la cual es apropiada cuando la superficie del terreno es plana o poco ondulada. El término "poco ondulado" es relativo, debido a que la magnitud de los desplazamientos dados por el relieve depende de la geometría de visión y la altura del sensor (Pernía *et al.*, 1999).

Una de las modalidades más difundidas para llevar a cabo el proceso de rectificación geométrica es la que hace uso de un grupo de puntos de control, claramente visibles en la imagen, cuyas coordenadas han de ser conocidas (Mather, 1987; Lillesand y Kiefer, 1994; Chuvieco, 1996 y Jensen, 1996). Contando con un número adecuado de puntos de control, representados en un determinado sistema de proyección cartográfico y distribuidos de manera homogénea, la geometría de la imagen puede corregirse de modo que corresponda con la de los puntos de control y su sistema de referencia, a través de ecuaciones polinomiales que simulen la geometría proyectiva del sensor que tomó la imagen o la geometría plana u ondulada del terreno. El resultado de este proceso es una imagen que coincide con el sistema de referencia de los puntos de control.

En general, las coordenadas de los puntos de control para rectificar las imágenes pueden ser: 1) Leídas de una carta o mapa topográfico de mayor escala que la de la imagen, 2) medidas en el terreno

con instrumentos topográficos o geodésicos, o 3) medidas en el terreno a través de los sistemas de posicionamiento por satélite.

El uso de cartas topográficas para leer en ellas las coordenadas de los puntos de control ha sido ampliamente aplicado y resulta satisfactorio cuando se cuenta con cartas a escala adecuada, de buena calidad, actualizadas al menos en los últimos quince años. Pero, cuando no se dispone de cartas actualizadas se presentan serias dificultades, debido a que los detalles bien visibles en la imagen reciente pueden no aparecer en los viejos mapas o viceversa. Como buenos puntos de control se consideran las intersecciones de vías, galpones, viviendas o algún otro detalle distintivo, que pueda definirse con exactitud tanto en los mapas como en las imágenes. En las llanuras aluviales, por ejemplo, la mayoría de las vías en el medio rural son de tierra, y debido a las inundaciones periódicas su trazo va cambiando ligeramente de un año a otro. Un mapa editado hace treinta años presenta una vialidad rural con bastante variación si lo comparamos con la que muestra una imagen de los últimos años. El analista no va a tener seguridad en la determinación del mismo punto en ambos medios (mapa e imagen). Hay incluso un gran riesgo al usar las viviendas como puntos de control debido a que en las llanuras aluviales los comunes caneyes (viviendas con techo de palma) en 30 años pudieron haber cambiado su ubicación, obligado también por las inundaciones y el cambio de curso de los caños y ríos llaneros (López, 1997).

La otra situación adversa que puede presentarse es la falta de cartas topográficas a la escala adecuada en el área de interés. Gran parte del área al sur del Orinoco, que representa el 40 % del territorio nacional, hasta mediados del presente año 2000 carecía de mapas topográficos a escalas 1:25.000 y 1:100.000. Esta dificultad también se está haciendo presente, con el aumento de la disponibilidad de imágenes espaciales de resolución fina (1-6 m), capaces de proporcionar información a escalas mucho mayores de 1:25.000. Para corregir geoméricamente estas imágenes se requiere de cartas topográficas de buena calidad, a escalas mayores de la indicada.

En las dos situaciones anteriormente expuestas, es decir, la marcada desactualización de las cartas topográficas o la ausencia de ellas, es necesario recurrir a un medio alternativo para obtener las coordenadas de los puntos de control requeridos para corregir geoméricamente las imágenes.

En los métodos tradicionales de la geodesia y/o la topografía hay dos alternativas que podrían ser utilizadas para la obtención de las coordenadas de los puntos de control. La primera consiste en utilizar triangulaciones, trilateraciones o poligonales desde puntos de primero, segundo o tercer orden de la red geodésica nacional, para darle coordenadas a los puntos de interés. Estos procedimientos resultan altamente costosos y laboriosos debido a que las cadenas de triángulos o polígonos deben ser desplazadas por largas distancias. Por ejemplo, para corregir una imagen TM de LANDSAT, que tiene 180 Km de lado, se requerirían mediciones a lo largo de 480 Km, tan sólo para unir los cuatro puntos en las cercanías de las esquinas. Además habría que incluir algunos puntos en el resto del área y conectar todo el conjunto a un punto de la red geodésica nacional, que en muchos casos puede estar a 100 o 200 kilómetros de distancia. La segunda alternativa de la geodesia-topografía tradicional consiste en la obtención de las coordenadas de los puntos de interés usando observaciones astronómicas. Esta posibilidad está sujeta a las condiciones atmosféricas, que en el trópico limitan severamente los períodos favorables para la toma de los datos.

Una alternativa más reciente para obtener en el terreno las coordenadas de los puntos de control terrestre a ser usadas en la corrección geométrica de las imágenes consiste en la utilización de un sistema de posicionamiento satelital, como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas de *Global Positioning System*) del Departamento de Defensa de los Estados Unidos o el Sistema Satelital de Navegación Global (GLONAS, por sus siglas de *Global Navigation Satellite System*), de la Fuerza Espacial de Rusia. El sistema GPS se basa en la constelación de alrededor de 30 satélites geodésicos llamada NAVSTAR, que están circundando la tierra en seis planos orbitales, a una altura aproximada de 22.000 Km (Hurn, 1989; Nuñez, 1992).

A partir del 31 de mayo del año 2000, fecha en que el gobierno de los Estados Unidos eliminó la perturbación intencional conocida como *disponibilidad selectiva* o SA (Selective Availability), el error que brinda el sistema GPS, utilizando observaciones individuales a través de un solo receptor (modo autónomo) se redujo a valores alrededor de los 15 metros.

El mecanismo que ha diseñado el medio civil para aprovechar la tecnología GPS y lograr errores

menores del metro, del decímetro y del centímetro, aunque la disponibilidad selectiva esté activada, es a través de lo que se conoce como *método o modo diferencial*. Este método consiste en utilizar al menos dos receptores, uno de los cuales se ubica en una estación base o punto de coordenadas conocidas y el otro receptor se ubica en un punto cuyas coordenadas se desean conocer. Los dos instrumentos se activan para que reciban simultáneamente las señales de los satélites durante un determinado lapso de tiempo (10 minutos o más), y estos datos son procesados posteriormente con un software apropiado. La señal recibida en el receptor ubicado en el punto de coordenadas conocidas permite obtener factores de corrección que son utilizados para determinar las coordenadas corregidas del punto de localización desconocida (Hurn, 1993). Si se dispone de tres receptores, dos se colocan en puntos de coordenadas conocidas y el otro en el punto desconocido. Esta posibilidad aumenta la exactitud. Como estaciones base pueden utilizarse en Venezuela los puntos de primero, segundo o tercer orden de la red geodésica nacional, o la más reciente Red GPS Venezolana (REGVEN) del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) (SAGECAN, 1999), así como también puntos geodésicos determinados por otras instituciones (Petróleos de Venezuela, CADAFE, MTC, etc.).

Los objetivos fundamentales del presente estudio fueron los siguientes:

- Determinar la exactitud de las mediciones diferenciales realizadas con los instrumentos Trimble Pathfinder PRO-XL, utilizando mediciones entre puntos de primer orden de la red geodésica nacional.
- Comparar la exactitud de la corrección geométrica (rectificación) de una imagen multispectral HRV de SPOT de la Reserva Forestal de Caparo utilizando: a) Coordenadas tomadas de las cartas topográficas disponibles a escala 1:25.000, y b) Coordenadas obtenidas con receptores GPS Trimble Pathfinder PRO-XL.

Algunas investigaciones han sido realizadas sobre la exactitud lograda en la determinación de coordenadas empleando receptores GPS de tipo similar al usado en el presente estudio. Por ejemplo, August, *et al.* (1994) evaluaron la calidad de la determinación de la posición horizontal obtenida a través de receptores GPS Trimble Pathfinder de tres

canales. Los datos usados para la corrección diferencial fueron obtenidos con una estación base comunitaria de Trimble, con un receptor profesional de Trimble, ubicada en la Universidad de Rhode Island (Kingston, Rhode Island, Estados Unidos). Las coordenadas de la antena en la estación base fueron obtenidas a través de una triangulación a partir de dos puntos de primer orden del Servicio Geodésico Nacional. La estación Universidad está ubicada a 0.51 Km al este de la estación base, y la estación Pleasant, a 2 Km al noroeste de la estación base. Se usaron tres receptores Trimble de la serie 4000, de tipo geodésico, operados simultáneamente en los dos puntos geodésicos y en la estación base, durante una hora. Para confirmar la exactitud en la determinación de la posición de la base, se recalculó su posición usando poligonales topográficas convencionales. Los dos métodos independientes difirieron en 9.24 cm. En las observaciones diferenciales se colectaron 300 observaciones secuenciales a razón de una por segundo. Ni la estación base ni las dos estaciones de control tenían cobertura arbórea ni obstrucciones. Las observaciones fueron hechas simultáneamente desde la estación base y las estaciones de control de primer orden en 20 sesiones con 300 observaciones cada una.

En el modo diferencial, cuando se usaron observaciones individuales, la separación media de la verdadera posición fue de 7 m en la estación Universidad y de 5 m en la estación Pleasant, cayendo el 95% de todas las observaciones dentro de los 15 y 10 m respectivamente. Cuando se usó el promedio de 300 observaciones por medición, la separación media bajó a 2.7 y a 2.1 m en las estaciones Universidad y Pleasant respectivamente, cayendo el 95% de todas las observaciones dentro de los 6 m (Estación Universidad) y de los 4 m (Estación Pleasant). El promedio de 50 a 300 observaciones secuenciales produjo un aumento notable de la exactitud. Pero, con el promedio de 20 observaciones o menos la exactitud mejoró solo ligeramente.

Deckert y Bolstad (1996) evaluaron la exactitud en la determinación de la posición de 27 puntos del terreno usando instrumentos GPS, en tres tipos de terreno (crestas, laderas y valles) y tres tipos de cubierta (bosque deciduo, bosque de coníferas y sitios abiertos). Usaron puntos de primero y segundo orden de la red del Servicio Geodésico Nacional de los Estados Unidos, mayormente ubicados en el tope de las elevaciones. Para densificar esta red hacia laderas

y valles usaron receptores Magellan 5000 Pro, con capacidad submétrica, con los cuales determinaron la posición de nuevos puntos con mediciones desde los puntos del Servicio Geodésico Nacional, obteniéndose un error horizontal promedio de 20 cm. Desde estos puntos se determinó la posición de puntos con la cobertura y tipo de terreno deseado a través de poligonales topográficas, con error de cierre promedio de 0.58 m y máximo de 0.89 m. Posteriormente se hicieron las observaciones sobre esos puntos, con receptores Trimble Pathfinder Professional. Para las correcciones se usó una base comunitaria de Trimble y un receptor Trimble Pathfinder.

Los resultados muestran que la exactitud en la determinación de la posición de los puntos varió con los tipos de bosque y el número de lecturas GPS hechas en cada punto. Bajo cubierta decidua, la exactitud media aumentó de 5.9 m para 60 lecturas a 3.1 m, para 500 lecturas. La exactitud media bajo cubierta de coníferas aumentó de 6.6 m para 60 lecturas, a 4.4 m para 500 lecturas. En los sitios abiertos la exactitud aumentó de 3.9 m para 60 lecturas a 2.2 m para 500 lecturas. El tipo de terreno (valles, laderas y crestas) fue menos significativo que el tipo de cobertura, aunque también contribuyó a la variación de la exactitud. Se determinó que para lograr la misma exactitud, cuando hay cobertura de coníferas se requiere el doble del tiempo de observación que en sitios abiertos. Bajo cubierta decidua, el tiempo de observación debe estar entre los dos anteriores, es decir, 1.5 veces más que en sitios abiertos.

En lo que se refiere a la rectificación de imágenes de percepción remota, Welch et al. (1985) reportaron los resultados de la evaluación de la exactitud geodésica y cartográfica de imágenes TM de LANDSAT, usando imágenes completas y cuartos de imagen de áreas de relieve accidentado (menos de 1000 m) y suave (menos de 110 m) en Georgia y Iowa, en Estados Unidos. Probaron la rectificación con polinomios de primero a quinto orden. Tanto los puntos de control utilizados en la rectificación como los puntos utilizados en la verificación fueron obtenidos de cartas topográficas del Servicio Geológico de los Estados Unidos, a escala 1:24.000. El error medio cuadrático en x,y (RMSE<sub>xy</sub>) determinado en las imágenes rectificadas fue de 0.23 pixeles (6.8 m) a 0.93 pixeles (28 m). Los polinomios de menor orden resultaron superiores a los de mayor

orden para la rectificación. Polinomios de primer grado y tan pocos como cuatro puntos de control probaron ser suficientes para rectificar imágenes TM completas y cuartos de imagen al sistema UTM, con exactitudes dentro del pixel. Similares resultados fueron obtenidos en otras investigaciones (Fusco *et al.*, 1985; Bryant *et al.*, 1985; Borgeson *et al.*, 1985).

La literatura especializada cita muchos otros trabajos en los que se utilizan ecuaciones polinomiales para la rectificación de imágenes TM y SPOT. La mayoría de ellos indican la exactitud lograda en el proceso de rectificación a través del error medio cuadrático en los puntos que permitieron determinar los coeficientes de las ecuaciones polinomiales. En muchos casos el error medio cuadrático reportado es inferior al tamaño del pixel (Rutchev y Vilcheck, 1994, por ejemplo). Sin embargo, el error determinado al utilizar puntos de verificación o chequeo, diferentes a los utilizados en el proceso de rectificación (determinación de los coeficientes), generalmente resulta muy superior a ese error, llegando a alcanzar el valor de 3 ó 4 pixeles. Esta situación se mantiene incluso utilizando modalidades de rectificación que corrigen errores sistemáticos de la imagen causados por la rotación de la tierra y la inclinación del ángulo de visión al terreno, y que utilizan ecuaciones de colinearidad. Por ejemplo, El-Manadili y Novak (1996), aplicando una metodología de esta naturaleza a una imagen pancromática de SPOT, con resolución de 10 m, y utilizando seis puntos de control terrestre, encontraron una desviación estándar de 2.38 m en X y de 3.24 m en Y. El error medio obtenido en 12 puntos de verificación fue de 13.43 m en X y de 18.91 m en Y.

Metodologías de rectificación basadas en el modelaje riguroso de las condiciones geométricas del sistema SPOT en el momento de registrar la imagen, usando parámetros orbitales y unos pocos puntos de control terrestre (Westin, 1990), permiten mantener los errores de los puntos de verificación dentro del tamaño del pixel.

## METODOLOGÍA

### Materiales y equipos

Los materiales utilizados en el presente estudio fueron los siguientes:

- Carta NB 19-1 (Guasdalito), a escala 1:250.000 del Servicio Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB).
- Treinta cartas topográficas a escala 1:25.000 del IGVSB.
- Dos cartas isogónicas de Venezuela, a escala 1:2.000.000 de los años 1955 y 1995, del IGVSB.
- Una imagen multiespectral HRV de SPOT, en formato digital, nivel 1B, de la Reserva Forestal de Caparo (652-335), Estado Barinas, tomada el 20 de enero de 1994 y dos composiciones infrarrojo a color, a escala aproximada 1:100.000 de esa misma imagen.
- Descripciones suministradas por el IGVSB de los puntos de triangulación de primer orden de la red geodésica nacional, localizados en las márgenes de los ríos Uribante y Apure. Estos puntos son los siguientes: Capilla, Bocachico, Cubarro, Concepción, Orurita y Glamelotal.
- Dos receptores GPS marca Trimble, Modelo Pathfinder PRO-XL, de 8 canales, con colectores de datos TDC1 de 1 MB de memoria y antenas de domo compacto.
- Dos computadoras portátiles, dos radios de 2 m de longitud de onda, con servicio de repetidora en Santa Bárbara de Barinas y dos baterías de 12 voltios y 700 amperios para alimentar los receptores, los radios y las computadoras en el campo.
- Dos polos para las antenas de los receptores GPS, compuestos por secciones de aluminio de 1.5 m cada una, que pueden interconectarse para alcanzar una longitud de 12 m (cada polo).
- Dos trípodes de aluminio para teodolito, adaptados para sostener los polos de las antenas antes citadas.
- Un teodolito WILD T1, dos brújulas Brunton, varios jalones, trípodes para jalones, una mira taquimétrica y dos cintas métricas, de 50 m de longitud cada una.
- Equipos menores como cargadores eléctricos para baterías de 12 V, convertidores de corriente de 12 V a 110 V, niveles de jalón, cabillas de marcaje y de soporte (vientos para los polos), machetes, porras, linternas, cámaras fotográficas, etc.
- Software básico (Microsoft Windows-98, Word-97, etc.) y software especializado de Trimble (Asset Surveyor, versión 3.02, Quick Plan, versión 2.00b y Pfinder, versión 3.00).

## Selección de los puntos de medición GPS diferencial

Para los propósitos de este proyecto se utilizaron tres tipos de puntos:

- Puntos usados como bases para las mediciones GPS por el método diferencial. Como bases fueron seleccionados dos puntos de triangulación de primer orden de la red geodésica nacional: *Capilla*, ubicado en la margen norte del río Uribante, aproximadamente a 15 Km al este de Guacas de Rivera, en el Estado Apure y el punto *Glamelotal*, ubicado en la margen sur del río Apure, aproximadamente a 8 Km aguas arriba, por este río, del caserío Totumito en el Estado Apure (Figura 1). Estos puntos fueron seleccionados como bases porque están ubicados en los lados oeste y este respectivamente de la imagen SPOT, y porque permitían desde ellos medir los puntos necesarios para corregir la imagen, sin que las distancias entre los puntos a determinar y las bases fueran mayores de 60 Km.
- Puntos usados para la corrección geométrica de la imagen SPOT. Se seleccionaron 10 puntos de control (Figura 1), cuatro de los cuales fueron ubicados en las esquinas de la imagen y los otros seis, distribuidos de manera uniforme en el resto de la imagen. Todos los puntos escogidos fueron esquinas de techos de zinc de casas o galpones, por la mayor definición que presentan, en relación con otros detalles posibles (techos de palma e intersección de vías, por ejemplo).
- Puntos usados para la verificación de la corrección geométrica de la imagen. Se seleccionaron para este propósito uno de los puntos usados como base (*Glamelotal*) y otros tres puntos adicionales de primer orden de la red geodésica nacional, localizados a lo largo de los ríos Uribante y Apure. Estos puntos fueron los siguientes: Bocachico, Concepción y Orurita (Figura 1).

## Observaciones GPS

El día anterior al inicio de las mediciones los receptores fueron activados para recibir la información de efemérides de la constelación de satélites GPS (datos orbitales, mensajes de navegación, etc.). Esta información fue transferida a los computadores portátiles y revisada con el software PFINDER, para ver las ventanas de observación del

día siguiente, de acuerdo a los parámetros de observación escogidos para el proyecto. Los parámetros fueron los siguientes: duración de la observación para la determinación de un punto: 1 hora; intervalo de grabación: 1 segundo; máscara de elevación: base, 12° y rover (receptor móvil), 15°; PDOP: base: 2 y rover: 3; cociente señal/ruido (SNR): 6. Se trató en lo posible de buscar ventanas de observación y hacer las observaciones con PDOP menor de 2.

No se consideró necesario activar la opción de recepción de la portadora que tienen los receptores utilizados, por considerar que la mayor exactitud que esta opción brinda no era requerida para este proyecto, sobre todo por la resolución de la imagen utilizada que es de 20 m.

Con la información obtenida sobre las posibilidades de observación se planificaron las jornadas de trabajo de los días siguientes. Generalmente este proceso de planificación, basado en efemérides recientes, fue actualizado diariamente, de acuerdo al progreso en las observaciones.

Para las observaciones GPS por el método diferencial se ubicó un receptor Trimble Pathfinder PRO-XL en una base (*Capilla* o *Glamelotal*), y se configuró para esa función, y el otro receptor se ubicó en el punto a determinar y se configuró como "rover".

En las cercanías de los dos puntos geodésicos de primer orden utilizados como bases se encontraron árboles que interferían la recepción de las señales provenientes de los satélites, por arriba de la máscara de elevación. Para evitar este efecto y el denominado «*multipath*», la antena fue elevada en ambas bases a una altura de 9 m. El polo de secciones de aluminio fue izado sobre el punto utilizando cuerdas que actuaban como *vientos*. Seis vientos fueron aplicados al polo.

Debido al material del polo (aluminio) y a su diseño (secciones de 1.5 m de largo), resultó imposible mantenerlo vertical en toda su extensión. Por esta razón, la antena fue centrada sobre la placa del monumento del punto de triangulación usando un teodolito WILD T1. El teodolito fue colocado aproximadamente a 25 m del punto, y desde esta posición la antena fue proyectada sobre el monumento (modificando su posición con el manejo de los vientos). Luego, el teodolito se desplazó en una dirección perpendicular a la que anteriormente tenía con respecto al punto, y a una separación similar de 25 m. La posición de la antena fue proyectada sobre

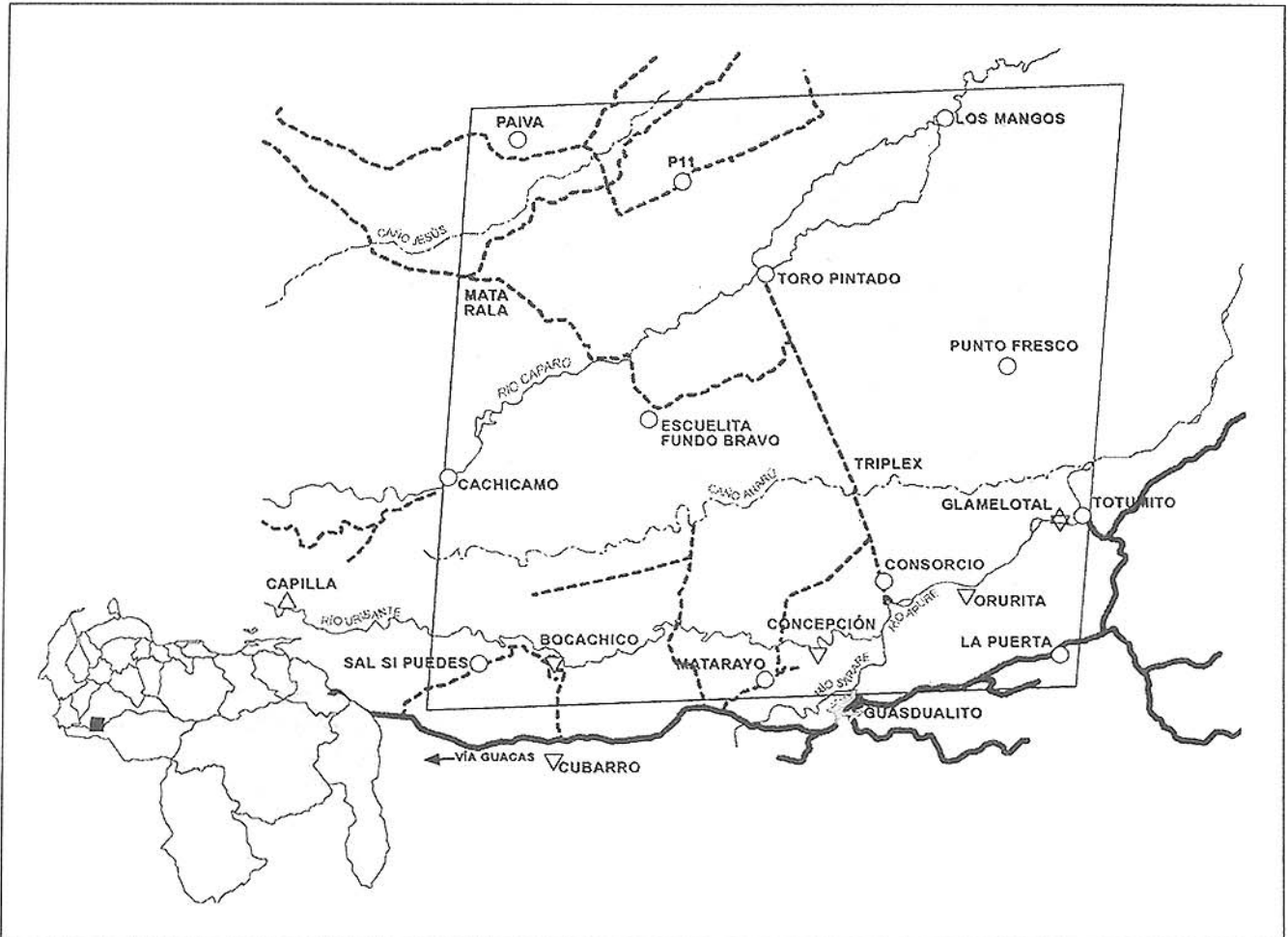


Figura 1. Mapa de ubicación relativa del área de estudio (esquina inferior izquierda) y mapa de ubicación de: 1) los puntos utilizados como estación base ( $\Delta$ ), 2) los puntos de control terrestre para las rectificaciones ( $\circ$ ) y 3) los puntos de verificación de las rectificaciones ( $\nabla$ ). El recuadro interno corresponde al área cubierta por la imagen SPOT.

el monumento. Esta operación se realizó reiterativamente desde las dos posiciones del teodolito, hasta que desde ambas la antena se proyectaba exactamente sobre el centro de la placa del punto de triangulación. Finalmente, el teodolito fue colocado en otra posición diferente a las dos anteriores, para verificar el centraje de la antena.

En el punto *Capilla* el monumento superficial del punto principal de primer orden fue arrancado por la maquinaria que construyó una carretera por donde él se encontraba (el monumento subsuperficial debe haber quedado debajo del terraplén de esa vía). Sin embargo, los dos monumentos de referencia están en buenas condiciones y el No 2 (R2) fue usado como base. Con la información proporcionada en la descripción del punto y la carta isogónica de 1955 fue posible determinar las coordenadas UTM de esta referencia.

La mayoría de los puntos cuyas coordenadas se deseaba determinar, bien para conocer la exactitud de los receptores utilizados, o para corregir la imagen SPOT, tenían cobertura de árboles en sus cercanías, u ofrecían interferencia de cualquier índole. Con la finalidad de reducir el efecto "multipath" la antena fue colocada en posición excéntrica con el punto a determinar y elevada con un polo vertical instalado en un trípode. En todos los puntos medidos con excentricidad, ésta no sobrepasó los 61 m. Para calcular posteriormente las coordenadas del punto de referencia, a partir de las coordenadas determinadas para el lugar donde se colocó la antena, se midió la distancia (con cinta) y los acimutes directo e inverso (con brújula) de la antena al punto de referencia.

Con la finalidad de conocer la exactitud de los receptores bajo el método de observación adoptado

en el proyecto, se hizo la determinación GPS de las coordenadas de los puntos de triangulación de primer orden Bocachico y Cubarro. El primero de estos puntos fue determinado usando como base el punto Capilla, con una separación entre ambos de 23.4 Km, y el punto Cubarro fue determinado usando como base el punto Glamelotal, con una separación de 55.0 Km (figura 1).

Para la rectificación geométrica de la imagen SPOT la posición de los puntos Sal Si Puedes, Cachicamo y Paiva fue determinada con las observaciones hechas usando como base el punto Capilla, y la de los puntos Matarrayo, P11, Punto Fresco, La Puerta, Escuelita de Fundo Bravo, Los Mangos y Triplex fue hecha desde la base Glamelotal (Figura 1).

### Postprocesamiento de las observaciones GPS

El postprocesamiento fue realizado con el software Pfinder, versión 3.0, de Trimble. Para cada uno de los puntos cuyas coordenadas se quiso determinar, se ingresaron los dos archivos requeridos, conteniendo las observaciones simultáneas de una hora: uno con las observaciones para la base (Capilla o Glamelotal) y el otro con las observaciones para el rover (punto a determinar). La aplicación de la corrección diferencial fue hecha con el programa Mcorr300. Se utilizó el sistema de proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) y el datum PSAD-56 (Provisional South American Datum - año 1956) y el elipsoide Internacional de Hayford. La transformación del datum WGS-84 al PSAD-56, con referencia al punto Canoa, se realizó utilizando el modelo de Molodensky de cinco parámetros, con los valores siguientes:

$Dx = -295$ ;  $Dy = 173$ ;  $Dz = -371$  (Microimages, Inc., 1998);  $Da = -251$  y  $Df = -1.419270225 \text{ e-}5$ .

Parámetros proporcionados por otras fuentes (Hoyer et al, 1997) para todo el país y para la región Barinas-Portuguesa fueron probados y dieron como resultado discrepancias mayores con respecto a los puntos de primer orden de la red geodésica nacional.

El postprocesamiento produjo las coordenadas de los puntos donde se ubicó la antena. En los casos donde la posición de la antena fue excéntrica con respecto al punto de referencia visible en la imagen SPOT, se determinó las coordenadas definitivas de

este punto de referencia utilizando la distancia, los acimutes magnéticos (de la antena al punto y viceversa) y el valor de la declinación magnética.

### Corrección geométrica de la imagen SPOT

La imagen multiespectral HRV de SPOT fue corregida geoméricamente a través del método conocido como *rectificación*, el cual es apropiado cuando el terreno es plano u ondulado suave. La superficie del área cubierta por esta imagen es parte de una llanura aluvial de desborde, cuyos mayores desniveles están dados por el microrrelieve típico de esta forma fisiográfica, como son los diques y bancos, los subbancos, los bajíos y los esteros. La elevación máxima que se apreció en el área de la imagen fue de aproximadamente 151 msnm, en el campamento Cachicamo (parte oeste de la imagen), en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Caparo, y la mínima fue de 119 msnm, en el sector conocido como Los Mangos, en la esquina noreste de la imagen. Según esto, la máxima diferencia de elevación en toda el área de la imagen no sobrepasa los 35 m; sin embargo, las diferencias locales en distancias de 10 Km, son generalmente menores a los 5 m.

La rectificación fue realizada con un modelo polinomial afín (polinomio de primer grado), cuatro veces separadamente, con diferente número de puntos de control, de la manera siguiente:

- Usando cuatro puntos de control GPS, ubicados en las esquinas de la imagen (Puntos Sal Si Puedes, Matarrala, Los Mangos y La Puerta).
- Usando cinco puntos de control GPS: los cuatro puntos antes citados y uno en la parte central de la imagen (Punto Escuelita de Fundo Bravo).
- Usando diez puntos de control GPS: los cinco anteriores y otros cinco ubicados para rellenar lo más uniformemente posible el área de la imagen (Puntos Paiva, Cachicamo, Matarrayo, P11 y Punto Fresco).
- Usando siete puntos cuyas coordenadas se obtuvieron de las cartas a 1:25.000 del año 1973 del IGVSB (No fue posible obtener con seguridad más puntos de control que aparecieran tanto en las cartas como en la imagen).

Cada rectificación incluyó las tres bandas de la imagen multiespectral de SPOT. En la interpolación geométrica el tamaño del pixel fue redimensionado en 10 m (originalmente era de 20 m). La interpolación

de intensidades se hizo por el método de la convolución cúbica. La primera imagen rectificadas fue contrastada para lograr la mejor presentación visual en simulación infrarrojo a color. Las tablas de contraste de esta imagen fueron copiadas a las otras imágenes rectificadas para tener una presentación similar del color.

Cada una de las imágenes rectificadas fue evaluada internamente, a través de la determinación de las nuevas coordenadas que toman los puntos de control utilizados en la rectificación, después que esa corrección geométrica fue aplicada a la imagen. Las diferencias entre las coordenadas medidas en el terreno (GPS en este caso) o leídas en las cartas topográficas, de los puntos de control utilizados en la rectificación, y las coordenadas de esos mismos puntos, después de realizada la rectificación, proporcionan una medida de la bondad del ajuste hecho con un determinado modelo polinomial, así como también de la bondad del grupo de puntos para representar la superficie del terreno. En la evaluación se calculó el error medio cuadrático para la coordenada norte y para la coordenada este, para cada punto y para el total de puntos utilizados.

### **Evaluación de la exactitud de la rectificación geométrica**

La evaluación de la exactitud que se logró con las cuatro modalidades utilizadas para la rectificación de la imagen fue hecha utilizando cuatro puntos de primer orden de la red geodésica nacional. Esos cuatro puntos fueron los siguientes: Bocachico, Concepción, Orurita y Glamelotal, ubicados en las márgenes de los ríos Uribante y Apure (Figura 1).

Puesto que el monumento que representa a cada uno de esos puntos no puede ser detectado en la imagen, fue necesario escoger un punto de referencia con la mayor definición y lo más cercano posible al punto correspondiente. En todos los casos se utilizó como punto de referencia visible en la imagen la casa más cercana con techo de zinc. La distancia desde los puntos Bocachico, Concepción, Orurita y Glamelotal a la casa de referencia fue de 763 m, 169 m, 244 m y 725 m respectivamente. Para determinar las coordenadas UTM del punto del techo de la casa de referencia, se levantó una poligonal abierta desde el punto de triangulación de primer orden al punto de referencia (techo de la casa), utilizando un teodolito Wild T1 y una mira taquimétrica.

Cada imagen rectificadas fue puesta en el monitor de un sistema de procesamiento digital de imágenes del Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos, para leer las coordenadas UTM de la esquina del techo de las casas usadas como referencia. El tamaño del pixel, aunque fue disminuido de 20 a 10 m, hizo difícil la ubicación, en la imagen desplegada, del punto que corresponde con la esquina del techo de la casa de referencia. Esto es debido a que los pixeles que caen en el borde del techo contienen parte de él y parte del terreno inmediato, sin que sea posible la definición clara del borde del techo ni de las esquinas. Por esta razón, la ubicación de la esquina seleccionada como referencia del techo de zinc de una casa en la imagen es un tanto subjetiva, y para disminuir esta subjetividad la determinación de las coordenadas de la esquina de referencia de las casas fue encargada a tres intérpretes con buena formación en el manejo de imágenes de percepción remota, quienes realizaron las lecturas de manera independiente, basados en los croquis de detalles levantados en el terreno.

Una vez obtenidas las lecturas por cada intérprete, para los cuatro puntos de verificación de las cuatro imágenes rectificadas (cuatro grupos de puntos de control), se avaluó la exactitud lograda en cada rectificación, comparando esos valores con las coordenadas de las esquinas de referencia, obtenidas a partir de las coordenadas geodésicas (IGVSB) de los puntos de triangulación de primer orden y las poligonales levantadas desde esos puntos a la esquina escogida de las casas de referencia. Esta comparación permitió obtener: la discrepancia en cada coordenada, para cada punto, leída por cada intérprete; la discrepancia promedio (todos los intérpretes) por coordenada y por punto; la discrepancia promedio general para cada coordenada y la discrepancia promedio total para los puntos de cada modalidad de rectificación.

## **RESULTADOS**

### **Evaluación de la exactitud de los receptores GPS y metodología utilizada**

El Cuadro 1 presenta los resultados de la determinación de las coordenadas UTM de los puntos de triangulación de primer orden Bocachico y Cubarro, a partir de las coordenadas diferenciales

**Cuadro 1.** Diferencias entre las coordenadas geodésicas y las coordenadas determinadas por GPS de dos puntos de triangulación de primer orden (Bocachico y Cubarro).

Base	Rover	Dist. (Km)	Coordenadas geodésicas UTM rover (m)			Coordenadas GPS UTM rover (m)			Diferencia (m)		
			N	E	h	N	E	H	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta h$
Capilla	Bocachico	23.4	810635.26	281901.09	136.02	810635.75	281901.57	136.57	0.49	0.48	0.55
Glamelotal	Cubarro	55.0	799930.76	276728.09	137.25	799930.78	276727.06	137.57	0.02	0.95	0.32

obtenidas de las observaciones realizadas tomando como bases a los también puntos de triangulación de primer orden, Capilla y Glamelotal respectivamente. En la determinación del punto Bocachico, las diferencias en las coordenadas norte, este y elevación son de 0.49, 0.48 y 0.55 m, respectivamente. En el caso de la determinación de las coordenadas del punto de primer orden, Cubarro, las diferencias fueron de 0.02 m en la coordenada norte, 0.95 m en la coordenada este y 0.32 m en la elevación. La mayor diferencia observada en la coordenada este del punto Cubarro, y que proporciona una mayor diferencia x,y, fue debida muy probablemente a la mayor separación de este punto a la base respectiva (Glamelotal), que en este caso fue de 55 Km, en comparación con la separación entre el punto Bocachico y su base (Capilla), que fue de 23.4 Km.

### Evaluación interna de las rectificaciones geométricas hechas a la imagen SPOT

El Cuadro 2 muestra, en primer lugar, los residuales y el error medio cuadrático (EMC) por coordenada, y el error medio cuadrático total (EMCt) para cada una de las cuatro rectificaciones realizadas: con 4, con 5 y con 10 puntos de control terrestre obtenidos con GPS, y con 7 puntos de control tomados de las cartas topográficas.

En la rectificación utilizando siete puntos de control cuyas coordenadas fueron leídas en las cartas topográficas a escala 1:25.000, el error medio cuadrático total resultó ser de 24.4 m. Comparativamente, los errores obtenidos en las rectificaciones en las que se utilizaron coordenadas obtenidas a través de mediciones GPS fueron mucho menores (entre 3.9 y 8.8 veces) que los obtenidos en la rectificación que utilizó coordenadas leídas en las cartas topográficas. El error medio cuadrático total

fue de 2.8 m, cuando se utilizaron 4 puntos de control GPS; cuando se utilizaron 5 puntos GPS el error total fue de 6.3 m, y cuando el número de puntos de control GPS fue de 10, el error medio cuadrático general se redujo a 5.6 m. Estos resultados muestran que en terreno plano, aún con sólo cuatro puntos de control, ubicados en las esquinas de la imagen y determinados con mediciones GPS con exactitud cercana al metro, se puede realizar un buen proceso de rectificación geométrica de una imagen SPOT completa. Por otra parte, se aprecia que el aumento de puntos de control disminuye levemente los errores de la rectificación.

### Verificación de la exactitud de las rectificaciones geométricas

El Cuadro 3 muestra los resultados de la verificación de la exactitud de las cuatro imágenes rectificadas: la primera, la segunda y la tercera, usando respectivamente cuatro, cinco y diez puntos de control, cuyas coordenadas fueron obtenidas a través de mediciones GPS, y la cuarta usando siete puntos de control, cuyas coordenadas fueron leídas en las cartas topográficas a escala 1:25.000.

Para cada imagen rectificada se presentan las discrepancias obtenidas entre las coordenadas UTM geodésicas de los cuatro puntos de triangulación de primer orden, usados en la verificación (Glamelotal, Orurita, Concepción y Bocachico) y las coordenadas de esos puntos, leídas en la pantalla del sistema de procesamiento digital de imágenes por cada uno de los tres intérpretes utilizados en esa tarea. Esas discrepancias se dan para las coordenadas norte y este de cada punto, para el promedio de los tres intérpretes por punto. Finalmente se da la discrepancia media general para cada coordenada y la discrepancia media total (x,y).

Las discrepancias que se observan en las imágenes



rectificadas con los puntos obtenidos con mediciones GPS resultaron en general mucho menores a las de la rectificación realizada con puntos de control leídos en cartas topográficas. En la imagen rectificada con cuatro puntos GPS la discrepancia media en la coordenada norte fue de 10.3 m, en la coordenada este fue de 11.0 m y la discrepancia total fue de 15.1 m. Ésta equivale a 0.75 veces el tamaño del pixel de SPOT. En la imagen rectificada con cinco puntos GPS la discrepancia media en la coordenada norte fue de 10.2 m, en la coordenada este fue de 9.6 m y la discrepancia media total fue de 14.0 m, que equivale a 0.7 veces el tamaño del pixel de SPOT. En la imagen rectificada con 10 puntos GPS estas discrepancias resultaron ser de 7.8 m, 5.7 m y 9.6 m respectivamente, equivalente este último a aproximadamente la mitad del tamaño del pixel de la imagen multispectral de SPOT. En la imagen rectificada con los siete puntos tomados de las cartas topográficas, la discrepancia media para la coordenada norte fue de 27.8 m, para la coordenada este fue de 24.4 m y la discrepancia media total fue de 37.0 m. Este valor equivale a 1.85 pixeles de la imagen HRV de SPOT, cuya resolución es de 20 m.

## CONCLUSIONES

- Los receptores Trimble Pathfinder PRO-XL, a través de la metodología aplicada en el presente trabajo, que incluyó correcciones diferenciales a las observaciones de una hora sin recepción de la fase portadora, permitieron determinar la posición de los puntos de primer orden Bocachico y Cubarro con errores dentro del metro, cuando fueron medidos a partir de los puntos de primer orden, Capilla y Glamelotal respectivamente.
- El error medio cuadrático total, calculado para los puntos de control utilizados en cada rectificación, resultó inferior a 7 m, cuando las coordenadas fueron determinadas a través de observaciones GPS, por la metodología utilizada en el presente estudio. En comparación, cuando se utilizaron 7 puntos de control cuyas coordenadas fueron tomadas de las cartas topográficas de 1973, ese error fue de 24.4 m.
- En la verificación de la exactitud de las diferentes rectificaciones, la discrepancia total observada en los puntos de referencia, cercanos a los cuatro puntos de triangulación de primer orden de la red

geodésica nacional, resultó ser de 15.1 m (equivalente a 0.75 veces el tamaño del pixel de SPOT), cuando se usaron 4 puntos de control terrestre medidos con GPS diferencial; de 14.0 m (equivalente a 0.7 pixeles), cuando se usaron 5 puntos de control terrestre medidos con GPS diferencial y de 9,6 m (equivalente a 0.48 pixeles), cuando se usaron 10 puntos de control terrestre medidos con GPS diferencial. En la imagen rectificada con los 7 puntos tomados de las cartas topográficas este error fue de 37.0 m (equivalente a 1.85 pixeles de la imagen de SPOT).

- En las discrepancias totales encontradas en la verificación hay una importante contribución dada por la resolución de la imagen. La resolución de 20 m de la imagen SPOT utilizada no permite que los detalles usados como referencia para la determinación de la exactitud (esquinas de techos de zinc) puedan ser ubicados claramente en la imagen desplegada en la pantalla del sistema de procesamiento. Esto se debe a que los pixeles que caen en el borde del techo contienen parte de él y parte del terreno inmediato, sin que sea posible la definición clara del borde del techo ni de sus esquinas.
- Las mediciones GPS diferencial, con receptores de exactitud métrica, permiten la rectificación geométrica satisfactoria (exactitud dentro del tamaño del pixel) de imágenes SPOT de terreno plano. La exactitud obtenida por este medio es superior a la que brindan las imágenes rectificadas con puntos de control tomados de las cartas topográficas elaboradas hace muchos años, como las utilizadas en el presente estudio (1973).

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue ejecutado con el aporte financiero e institucional del Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT. Código del Proyecto FO-405-97-01-C) de la Universidad de Los Andes, organismo al cual los autores expresamos nuestro agradecimiento. Igualmente agradecemos al apoyo brindado por la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales en lo referente a vehículos y otro apoyo logístico. Especial reconocimiento expresamos al personal directivo, técnico y obrero de las empresas IMADELCA, Aserradero Zamora y

TRIPLEX, y la Estación Experimental de la Reserva Forestal de Caparo, por su valioso y decisivo apoyo logístico, proporcionado durante el trabajo de campo. Especial reconocimiento a los Señores Antonio Aquino, Juan Rodríguez y Felix Castro, por su valiosa ayuda como baqueanos. Nuestro agradecimiento va dirigido también a los bachilleres Jorge Parra, Frank Falco y Joel Jimenez, por su decidida participación en el trabajo de campo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUGUST, P.; J. MICHAUD; CH. LABASH y C. SMITH. 1994. GPS for environmental applications: accuracy and precision of locational data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60 (1): 41-45.
- BORGESON, W, R BATSON y H KIEFFER. 1995. Geometric accuracy of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51 (12): 1893-1898.
- BRYANT, N.; A. ZOBRIK; R. WALKER y B. GOKHMAN. 1985. An anlysis of Landsat Thematic Mapper P-product internal geometry and conformity to earth surface geometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51 (9): 1435-1447.
- CHUVIECO, E. 1996. *Fundamentos de teledetección espacial*. 3ª. ed. Ediciones Rialp, S. A. Móadrid, España, 568 p.
- DECKERT, C. y P. BOLSTAD. 1996. Forest canopy, terrain, and distance effects on Global Positioning System point accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62 (1): 67-72.
- EL-MONADILI, Y. y K. NOVAK. 1996. Precision rectification of SPOT imagery using the Direct Linear Transformation Model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62 (3): 317-321.
- FUSCO L.; U. FREI y A. HSU. 1985. Thematic Mapper: Operational activities and sensor performance at ESA/Earthnet. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51 (9): 1299-1314.
- HOYER, M. 1993. Sistema de posicionamiento global GPS en Venezuela: Aplicaciones, ejemplos problemas a considerar y alternativas de solución. *Rev. Téc. de Ing.* Universidad del Zulia. 16(2).
- HOYER, M.; G. ACUÑA; E. WILDERMANN; G. ROYERO y V. SALAZAR. 1997. Avances en la transformación del datum geodésico venezolano La Canoa al geocéntrico WGS-84. *Rev. Téc. Ing.*, Univ. Zulia 20(1): 29-36.
- HURN, J. 1989. GPS, a guide to the next utility. *Trimble Navigation Limited*. 76 p.
- HURN, J. 1993. Differential GPS explained. *Trimble Navigation Limited*. 55 p.
- JENSEN, J. 1996. *Introductory Digital Image Processing*, 2ª. ed. Preeentice Hall, New Jersey, EE. UU.
- LÓPEZ, J. 1997. *Mapa de vegetación y uso de la tierra de la Reserva Forestal de Caparo, Estado Barinas, y generación de una base datos para SIG usando una imagen HRV de SPOT*. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Trabajo presentado para adquirir el título de Magister Scientiae. ULA.
- LILLESAND, T. y R. KIEFFER. 1994. *Remote Sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons. New York. 750 p.
- MATHER, P. 1987. *Computer processing of remotely-sensed images*. St Edmundsbury Press Ltd. Suffolk. Singapore. 352 pp.
- MICROIMAGES, Inc. 1998. *Reference manual for the TNT products*. Microimages, Inc., Lincoln, Nebraska, EE UU.
- NUÑEZ, A. 1992. GPS. *La nueva era de la topografía*. Ed. de las Ciencias Sociales. S. A. Madrid. 236 pp.
- PERNÍA, E. 1999. Sensores espaciales para estudios ambientales, a las puertas del siglo XXI. *Revista Forestal Venezolana*, 43(2): 207-222.
- PERNÍA, E.; O. JURGENSON y J. LÓPEZ. 1999. Nuevas alternativas en la producción de mapas para el manejo forestal. *Revista Forestal Venezolana*, 43(1): 79-91.
- RUTCHEY, K. y L. VILCHEK. 1994. Development of an Everglades vegetation map using a SPOT image and the Global Positioning System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60 (6): 767-775.
- SAGECAN. 1999. Venezuela estrenará nuevo datum geodésico. *Vértice*, Etapa II, No. 26, enero-febrero de 1999.
- TRIMBLE. 1994. *Mapping System General Reference*. Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, California.
- WELCH, R.; T. JORDAN y M. EHLERS. 1985. Comparative evaluation of the geodetic accuracy and cartographic potential of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51 (9): 1249-1262.
- WESTIN, T. 1990. Precision rectification of SPOT imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56 (2): 247-253.