

## PRECISIÓN DE LA ORTO-RECTIFICACIÓN DE UNA IMAGEN DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA

VÍCTOR GUEVARA <sup>1</sup>, RAMIRO SALCEDO <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fundación Instituto de Ingeniería y Universidad Central de Venezuela.

e-mail: victorg@fii.gob.ve, victguevara@gmail.com

<sup>2</sup> Fundación Instituto de Ingeniería. e-mail: ramiros@fii.gob.ve

Recibido: noviembre 2014

Aprobado para publicación: junio 2016

### RESUMEN

Las imágenes de sensores, tanto ópticos como de radar, facilitan tener datos oportunos de la superficie terrestre. Los sensores de radar, en particular, presentan mayor complejidad en su geometría de adquisición. Por lo tanto, esta investigación define los criterios y procedimientos en la obtención de estimaciones más precisas para la orto-rectificación de imágenes de RADAR de Apertura Sintética. La metodología empleada involucró varios procesos, dentro de los cuales destaca la orto-rectificación de este tipo de imágenes aplicando un ajuste de las efemérides con puntos de control GNSS Diferencial. Se corrigieron las distorsiones por efecto del relieve usando un DEM adecuado, para la escala de trabajo en una zona del centro-norte de Venezuela. Posteriormente, se realizó la validación del producto cartográfico a los fines de verificar que este se encuentre dentro de los estándares de precisión cartográfica, independientemente de las condiciones de relieve. De esta forma, se logró un producto a escala 1:50.000 que podrá emplearse tanto en aplicaciones de ingeniería o catastro como en cualquier otra vertiente de la Geomática. El resultado final de la investigación queda plasmado en una síntesis de criterios y procedimientos para el control planimétrico en la generación de orto-imágenes.

*Palabras clave:* control de calidad, DEM, GNSS, orto-rectificación, precisión cartográfica, radar, RADARSAT-2

### ACCURACY OF SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGE ORTHORECTIFICATION

#### ABSTRACT

Images of microwave sensors such as radar help to have well-timed data of land areas, which allow to produce basic mapping or thematic information. The radar sensors are more complex in their acquisition geometry. Therefore, this research defines criteria and procedures to obtain more precise estimates in the process of ortho-rectification of Synthetic Aperture Radar images. The methodology involved several processes that emphasized the ortho-rectification of SAR images, applying ephemeris adjustment with DGNSS ground control points. The distortions by relief effect were corrected by using a DEM suitable to the working scale in an area of North Central Venezuela. Subsequently, the cartographic product validation was performed in order to verify that it is within the mapping accuracy standards under different conditions of relief. As a result, a product at 1:50,000 scale which may be used in engineering applications and in any other application in Geomatics was obtained. The final result of the research is reflected in a synthesis of criteria and procedures for the planimetric control in the generation of orthoimages.

*Keywords:* quality control, DEM, GNSS, orthorectification, accuracy mapping, radar, RADARSAT-2

#### INTRODUCCIÓN

La presente investigación plantea criterios y procedimientos en la obtención de estimaciones más precisas en el proceso para la orto-rectificación de imágenes de RADAR (detección y localización por Radio [Radio Detection And Ranging]) de Apertura Sintética (SAR, Synthetic Aperture Radar).

Estos sistemas poseen una virtud fundamental: trabajan en la región del espectro electromagnético, correspondiente a las longitudes de ondas de las microondas, al ser prácticamente transparentes a la influencia atmosférica, ya que sus longitudes de ondas son muy superiores al tamaño habitual de las gotas de agua (Chuvieco, 2010). Además, resultan de particular interés para países que se encuentran

en la zona de convergencia inter-tropical (ITCZ), la cual conlleva la presencia de cobertura nubosa en gran parte del año.

Estas imágenes, por ser sensores activos de RADAR, son un caso exclusivo al que se le debe prestar especial atención, ya que se emplean como insumo para levantar información cartográfica básica y/o temática, en especial, cuando se intenta usar métodos clásicos de georreferenciación de éstas, debido a que poseen una geometría de adquisición compleja, como es el caso de los múltiples ángulos de adquisición, característica que prevalece en este tipo de insumo, siendo muy superior al de los sensores ópticos (Huang et al., 2004). Otro elemento de gran importancia es la topografía presente en el área de estudio, puesto que resulta determinante en la precisión cartográfica.

Por estas razones, el procesamiento de estas imágenes amerita emplear modelos matemáticos de rectificación diferencial que consideren la realidad física desde el punto de vista geométrico y corrijan las deformaciones producidas por la plataforma, el sensor y la Tierra.

Por el planteamiento anterior, es necesaria la implementación de criterios y procedimientos para el control de calidad planimétrica. Este control sirve como fundamento en el establecimiento de especificaciones técnicas para el tratamiento espacial de imágenes satelitales, en específico las SAR, que requieren ser usadas dentro algún campo de aplicación de la Geomática como un producto cartográfico. El área de estudio considerada para la investigación responde a tres factores fundamentales: área de adquisición de la imagen SAR del satélite RADARSAT-2, disponibilidad y características del Modelo Digital de Elevación (DEM –por sus siglas en inglés, *Digital Elevation Model*) para el área considerada y, por último, condiciones de relieve presentes en la zona.

Los resultados se presentan y analizan estadísticamente. En primer lugar, se muestra el modelo matemático de orto-rectificación para la validación del uso de un mínimo de 5 puntos de control terrestre (GCP) medidos con la técnica Diferencial GNSS (DGNSS, Differential GNSS [Global Navigation Satellite System]), cuya identificación tanto en el campo como en la imagen es de vital importancia. Posteriormente, se evalúa la calidad planimétrica de la orto-imagen SAR, resultante para las diferentes condiciones de relieve, y se valida como producto cartográfico de calidad. Como punto de cierre de la investigación, se reúnen una serie de conclusiones y recomendaciones que permiten establecer los criterios y procedimientos más adecuados para la orto-rectificación de imágenes SAR, obtenida

como producto cartográfico validado a escala 1:50.000 en diferentes condiciones de relieve.

## **METODOLOGÍA**

### **Insumos para la investigación**

#### Imagen RADARSAT-2:

La imagen SAR del satélite RADARSAT-2 (CSA, 2010) fue adquirida en órbita descendente, con resolución espacial en la dirección del alcance y azimut de 6,25 m y resolución radiométrica de 16 bits por cada banda. En la constitución de la imagen, esta ha sido proyectada sobre el plano del alcance terrestre. El ángulo de incidencia local es de 38,40 con dirección de emisión del pulso desde el este hacia el oeste. La dirección de la toma fue a 90° de la dirección de azimut. La longitud de onda es de 5,5 cm. La polarización fue en HH y HV. Estos elementos geométricos permitirán distinguir las diferentes estructuras naturales y antrópicas sobre el área adquirida.

#### Puntos DGNSS

Se ejecutó un levantamiento de puntos DGNSS para esta investigación. Además, se consideraron puntos adicionales de proyectos anteriores de la Fundación Instituto de Ingeniería (FII), uno de ellos en el municipio Francisco Linares Alcántara del estado Aragua. Allí el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) certificó el levantamiento (*Guevara et al., 2002*) y, adicionalmente, se consideraron los puntos del proyecto “Análisis de imágenes multi e hiperespectrales con fines de prospección petrolera al norte del río Orinoco: detección de anomalías espectrales y térmicas” para la elaboración del Taller de Procesamiento Digital de Imágenes ASTER para la Generación de DEM y ortoimágenes, el cual fue ejecutado como proyecto piloto de investigación en la FII en el año 2009. De las fases de post-procesamiento de los datos GNSS de los diferentes proyectos se obtuvo una precisión planimétrica inferior a 0,738 m y altimétrica de 0,504 m. Se concluyó que, según el *United States National Map Accuracy Standards* (NMAS), el error de los Puntos de Control Terrestres (GCP por sus siglas en inglés, Ground Control Point) levantados debe ser inferior a 0,254 mm medidos en el mapa (citado en USGS, 1999), lo cual corresponde a la escala 1:50.000 con 12,7 m. El Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España especifica que, para el parámetro de calidad cartográfica de 0,25 mm, los GCP resultantes del levantamiento deben tener una precisión menor a 0,083 mm (Sevilla, 1991), que corresponde para la escala 1:50.000 a 4,16 m, y por esta razón el error de procesamiento es para todos los puntos,

inferior a 4,16 m. Esto garantizará la generación de la orto-imagen con la precisión cartográfica requerida. Además específica, para los Puntos de Verificación Terrestre (GVP), que el error debe ser menor a 0,25 mm, lo que corresponde a 12,5 m y, en consecuencia, también cumple con los parámetros de precisión.

#### Puntos de validación adicionales

Para el proceso de validación cartográfica de la orto-imagen SAR o de certificación del modelo de orto-rectificación, se usaron productos cartográficos existentes en IGVSb a escala 1:25.000 de la zona de estudio correspondiente a los proyectos aero-fotogramétricos. Para efectuar este control, se eligió en la imagen SAR orto-rectificada un conjunto de 20 a 25 GVP bien definidos e identificados (Sevilla, 1991) por cada área de cubrimiento del índice de carta 1:50.000.

#### Modelo Digital de Elevación

##### *DEM del SRTM*

El DEM Global de la Misión Topográfica de Radar del Transbordador Espacial (SRTM por sus siglas en inglés, Shuttle Radar Topography Mission) fue generado por la NASA para obtener la topografía de gran parte de la superficie terrestre. Para Venezuela, se dispone de un DEM con una resolución espacial de 3 arco-segundos (USGS, 2014).

##### *DEM de las cartas topográficas*

Se utilizaron los DEM de diferentes zonas, denominados para esta investigación SIACARG (generado por Jácome *et al.*, 2001) en condiciones de relieve onduladas y SISDELAV (Castillo 2007) en zona plana. Estos fueron construidos a partir de curvas de nivel e hidrografía vectorizadas de las cartas 1:25.000 del IGVSb; el primero con un píxel de 30 m y el segundo con 10 m de mallado.

Adicionalmente, se usó los DEM del IGVSb correspondiente a las coberturas de las campañas aero-fotogramétricas en zona plana (6646-1-se) y montañosa (Caramacate).

##### *Validación de los DEM*

Los DEM se verificaron con los datos DGNSS capturados en la zona de estudio y cuatro vértices geodésicos del IGVSb, correlacionándose las alturas cuasi-ortométricas con las alturas de los diferentes DEM. En la Tabla 1, para el DEM del SISDELAV se observa una desviación estándar de 5,44 m y una media de 0,36 m, mientras que el DEM del

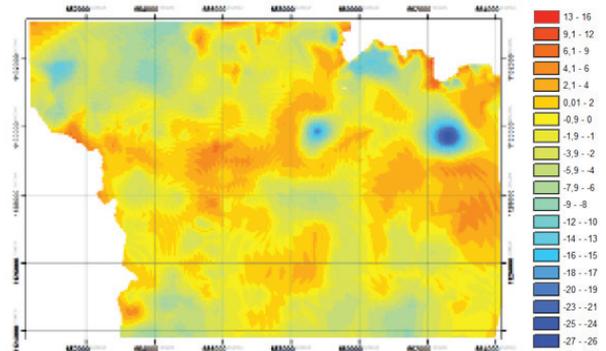
SIACARG posee una desviación estándar de 4,60 m y una media de 2,50 m. Finalmente, el DEM Global del SRTM presenta una desviación estándar de las diferencias de 3,23 m y una media de -4,16 m.

**Tabla 1.** Estadísticas de las diferencias de altura de los DEM con las medidas DGNSS cuasi-ortométrica

DEM	Min	Max	Mediana	Media	Desv Estándar
SRTM v.2	-16,51	9,70	-4,39	-4,16	3,23
SISDELAV	-22,03	11,55	0,71	0,36	5,44
SIACARG	-4,11	7,70	2,71	2,50	4,60
6646-1-se	-5,00	3,87	-0,09	-0,20	1,85

Unidades en metros. 2012

Los DEM de los orto-fotos están validados y certificados por el IGVSb por ser el ente rector en materia cartográfica. Por ejemplo, el DEM correspondiente a la carta topográfica del IGVSb 6646-I-SE tiene una desviación estándar de 1,85 m y una media de -0,20 m (Tabla 1), comprobándose que ambos parámetros están ajustados a las normas cartográficas correspondiente a escala 1:25.000. Por consiguiente, los orto-fotos se usaron para hacer dos comparaciones capturando las diferencias altimétricas píxel a píxel: la primera en zona plana, con el DEM de SISDELAV y el DEM del SRTM; y la última en una zona montañosa con el SRTM.



**Figura 1.** Diferencias de alturas (m) entre el DEM de la carta 6646-I-SE y del SISDELAV

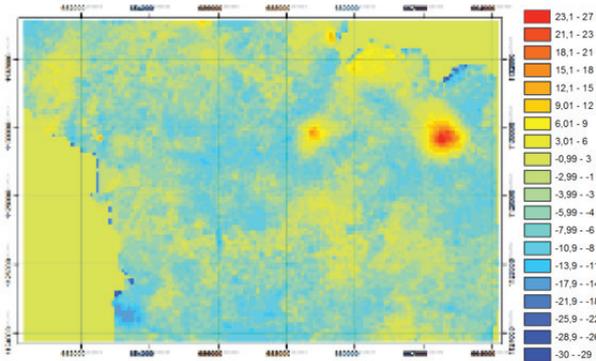
Al analizar la Figura 1 y la Tabla 2 se puede observar que los valores con diferencias en metros se cuantifican estadísticamente con la mediana en -1, media -0,879, moda 0 y desviación estándar 3,464, estando graficadas en la Figura 1 con los colores en amarillo y anaranjado claro para los cercanos a 0. Las dos zonas con mayor diferencia se grafican en tonalidades de azul y se ubican al noreste y noroeste de la carta. Por su disposición, según

las especificaciones en la construcción de este DEM por interpolación, se usaron como insumo los puntos de cota a partir de las cartas, las cuales podrían tener un valor de cota errado, afectando la orto-rectificación de la Imagen-SAR. Por lo tanto, se recomienda corregirlo.

**Tabla 2.** Estadísticas de las diferencias del DEM de los orto-fotos comparados con el de SISDELAV y el SRTM

	Min	Max	Media	Mediana	Moda	Desv Estándar
Zona Plana						
SRTM v.2	-28	14	-4,856	-5	-4	2,707
SISDELAV	-27	16	-0,879	-1	0	3,464
Zona Montañosa						
SRTM v.2	-93	54	-9,743	-10	-10	14,835

Unidades en metros. 2012



**Figura 2.** Diferencias de alturas (m) entre el DEM del SISDELAV y del SRTM v.2

Cuando no se disponga de información precisa, como el DEM de otras cartas topográficas, se puede realizar el proceso de validación espacial de DEM cuantitativamente. Para ello se usa el DEM del SRTM v-2 para la detección de anomalías en zonas planas, como se muestra en la Figura 2, zonas que tienen similitud con los presentados en la Figura 1. Al comparar el DEM Global del SRTM con el DEM de SISDELAV, desde un contexto general en zonas con topografía planas, se observa que ambos están bien correlacionados, pudiéndose utilizar el primero para orto-rectificar la imagen SAR.

### Orto-rectificación de Imagen SAR

Para la Orto-rectificación de la imagen de satélite RADARSAT-2, usando el ajuste de la efemérides del satélite,

se utilizó el programa propietario ERDAS IMAGINE ® 2010 con su módulo de IMAGINE OrthoRadar en su versión 10.0 Demo. Este programa permite realizar la orto-rectificación de las imágenes SAR, usando el modelo del sensor SAR, los parámetros orbitales y el DEM. Este nuevo muestreo orienta la imagen SAR para corregir directamente a la distancia oblicua en la dirección del alcance a la proyección del mapa, sin que la conversión intermedia a Tierra sea necesaria. El método utilizado es de Intersección del Rango Esférico, del Cono Doppler y el Modelo de la Tierra, lo que en otras palabras significa Corrección del Terreno por el Alcance Doppler (Erdas, 1997-2001).

En este trabajo se realizó el ajuste de la efemérides del satélite usando los GCP que se midieron en campo con la técnica DGNS y fue corregido el desplazamiento por relieve usando dos fuentes diferentes de DEM: DEM Global del SRTM versión 2 (strm\_v2); y los DEM de los orto-fotos y los DEM interpolados (SIACARG y SISDELAV).

Se procedió a evaluar el Error Medio Cuadrático (RMS) usando desde 5 GCP hasta los 20 GCP levantado con DGNS.

Para generar las orto-imágenes SAR de 6,25 m de resolución en la dirección de alcance y del azimut con polarización HH y HV se procedió de la siguiente manera:

1. La orto-imagen *sar\_srtm\_v2* fue orto-rectificada usando el DEM *srtm\_v2*.
2. La orto-imagen *sar\_sisdelav* fue orto-rectificada usando el DEM *SISDELAV*.
3. La orto-imagen *sar\_siacarg* fue orto-rectificada usando el DEM *SIACARG*.
4. La orto-imagen *sar\_6646-I-se* fue orto-rectificada usando el DEM *6646-I-SE*.
5. La orto-imagen *sar\_caramacate* fue orto-rectificada usando el DEM de los orto-fotos 6746-II-NO, 6746- II -NE, 6746- II -SE y 6746- II -SO.

Para el remuestreo de la imagen se usó el algoritmo de interpolación de convolución cúbica. Este es el más recomendado para la imágenes de RADAR porque genera buen registro y apariencia del producto (CCRS, 2017).

Para el proceso de calidad a cada imagen orto-rectificada se realizó la comparación visual con las orto-fotos a escala 1:25.000 y se agregó GVP usando estas mismas orto-fotos para proceder al análisis estadísticos de las diferentes áreas y por consiguiente, realizar la evaluación de los errores permisibles del mapa.

## La evaluación de las tolerancias o errores permisibles en el mapa

La precisión planimétrica de un mapa está indicado por el error medio cuadrático de las coordenadas horizontales (X, Y). Ahora bien, el control planimétrico tiene como finalidad comprobar que este límite de precisión es alcanzando verazmente. En definitiva, un producto cartográfico que es aceptado con una precisión de  $\sigma_0$  significa que las diferencias están por debajo de  $\sigma_0$  con una probabilidad del 68,3 por 100 y por debajo de  $3\sigma_0$  con una probabilidad del 99,7 por 100.

Con la evaluación de la precisión cartográfica de la orto-imagen SAR resultante, se persiguió establecer si este producto será o no rechazado como producto cartográfico. Es importante recalcar la aplicación que se le dará al mapa. Solo se analizó la componente horizontal de error de posición espacial de la orto-imagen, a partir de su distribución circular del error (CEP). Según norma del NMAS, queda planteado, por un lado, que el 90% de los puntos bien definidos y distribuidos en la orto-imagen no debe estar con un error horizontal mayor a 0,508 mm en el mapa (sobre el papel) para escalas de representación igual o menor a 1:20.000 (citado en USGS,1999) y, por otro lado, que para este estudio se plantea como escala resultante la 1:50.000 que corresponde con la realidad a 25,4 metros.

Greenwalt y Schultz (1968) citado por FGDC (1998), mencionan que, si el error es normalmente distribuido en cada componente  $x$  y  $y$ , el factor aplicado para calcular el error circular en un nivel de confiabilidad del 90 % es 2,146 (citado por la FGDC, 1998). El estándar de error circular del mapa (CMAS por sus siglas en inglés, Circular Map Accuracy Standard) basado por la NMAS se muestra en la ecuación 1.

Norma de precisión cartográfica (probabilidad de 90%) =  $2,146 \cdot \sigma$

$$\begin{aligned} CMAS - 90 &= 2,1460 * RMSE_r / 1,4142 \\ CMAS - 90 &= 1,5175 * RMSE_r \end{aligned} \quad (1)$$

Como se está generando un nuevo producto cartográfico, considerando una información básica como lo son los puntos de control terrestre GNSS y un modelo matemático de orto-rectificación SAR, se obtiene que el error final esté representado como se muestra en la ecuación 2.

$$RMSE_r = (E_{ot})^2 = (E_{GNSS})^2 + (E_{SAR})^2 \quad (2)$$

$E_{ot}$ : Error total (orto-imagen)  
 $E_{GNSS}$ : Error de los puntos GNSS  
 $E_{SAR}$ : error del modelo matemático de orto-rectificación de la imagen SAR con  $N$  GCP.

Durante el proceso de generación de la orto-imagen los  $RMS_r$  se presentan en unidades de pixeles y es necesario conocer la ecuación de transformación para distancias representadas por la imagen a su correspondiente valor sobre el terreno, usando la siguiente ecuación:

$$d_T = G \quad DS * d_i \quad (3)$$

$d_T$ : Distancia terreno. Unidades metro  
 $GDS$ : Resolución espacial. Unidades metro/píxel  
 $d_i$ : Distancia sobre la imagen. Unidades píxel

Entonces, siendo el parámetro de precisión cartográfica del mapa (CMAS-90) de 25,4 m, al sustituir y despejar de la ecuación 1 el  $RMSE_r$ , se obtiene que este error total ( $E_{ot}$ ) para la generación de la orto-imagen SAR debe estar por debajo de 16,73 m. Al conocer el error máximo del levantamiento de los puntos GNSS ( $E_{GNSS}$ ) utilizados como GCP que corresponde a 0,738 m, al despejar de la ecuación 2 se obtiene que el error de la orto-rectificación ( $E_{SAR}$ ) no debe ser mayor de 16,71 m. Adicionalmente, al despejar de la ecuación 3 en unidades imagen este error no debería ser mayor a 2,67 píxel.

De la misma forma, se consideró la evaluación del error con otro parámetro de validación cartográfica como es la del American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), en que se evalúa los errores lineales en la componentes  $x$  y  $y$  de manera independiente y donde el error debe ser menor a  $\frac{1}{4}$  del mm sobre el mapa (citado en USGS, 1999), que a la escala 1:50.000 corresponde a 12,5 m sobre el terreno, siendo éste el  $RMSE_r$ . De igual forma, el  $E_{GNSS}$  es conocido para los GCP y al despejar de la ecuación 2 resulta que el  $E_{SAR}$  no debería ser mayor a 12,47 m en ninguna de sus componentes, siendo su equivalente con unidades de imagen a 1,99 pixeles.

Se verificaron los errores posicionales tomando en cuenta la evaluación de la cantidad de los puntos de control terrestre usados en la generación del modelo de orto-rectificación, considerando su aplicación desde 5 GCP (sugeridos por Mansourpour et al., 2008) hasta llegar a los 20 GCP.

La validación cartográfica se cuantificó utilizando GVP, de manera de correlacionarlos con los parámetros de tolerancia cartográfica definida previamente. Para la realización de los

controles posicionales se recurrió a una fuente de mayor exactitud, siendo estos los orto-fotos a escala 1:25.000. Para el área de cubrimiento de un mapa a escala 1:50.000 se escogieron un conjunto de 20 a 25 puntos de validación bien definidos, identificados en el terreno y uniformemente distribuidos por toda la hoja (recomendado por Sevilla 1991).

## RESULTADOS OBTENIDOS

### Selección de puntos

Los criterios a considerar para una identificación precisa de puntos GCP y GVP sobre estas imágenes, fueron los siguientes:

1.- Los puntos deben estar uniformemente distribuidos en la imagen.

2.- Estos deben estar bien identificados sobre la imagen. Para ello, se analizó la retro-dispersión de la señal que está íntimamente relacionada con la característica del objetivo y con la geometría de observación. Ambas permitieron definir la conformación de elementos geométricos ubicados sobre la superficie terrestre y su identificación en la imagen, estableciendo así los puntos de control terrestre. Este análisis consistió en considerar la longitud de onda, el ángulo de incidencia, la polarización, la dirección del alcance y de la trayectoria de la plataforma. Todo este conjunto geométrico permitió estudiar cualitativamente la rugosidad y la constante dieléctrica de los elementos sobre la superficie que se representan en la imagen de radar. Siendo los elementos sobre la superficie terrestre, en este caso denominados reflectores de esquina, se pueden identificar con precisión en la imagen porque registran una alta constante dieléctrica como es el caso de superficies metálicas, como por ejemplo, los techos de zinc. Cada uno de estos parámetros tiende a crear variaciones en el contraste de la imagen, lo cual permitió diferenciar los elementos naturales y las estructuras desarrolladas por el hombre.

3.- Se escogieron los GCP y GVP de tal manera que puedan ser fácilmente accesibles, reconocidos y ubicados en la imagen con una precisión del orden de un (1) píxel (6,25m).

4.- El área que cubre la imagen es de aproximadamente 3.450 Km<sup>2</sup>, lo que comprende zonas urbanas importantes y áreas rurales que se extienden sobre una topografía muy diversa en la zona central del país. Esto influye, por una parte, en la distribución ideal de los puntos y, por otra, en los tiempos de accesibilidad a las zonas de levantamientos.

### Análisis de la calidad visual

Los sistemas sensor con tamaño de píxel de 6 m son ideales para la producción de mapas topográficos a escala 1:50.000 y para la actualización de mapas a escala 1:25.000. Adicionalmente, esta relación depende de la calidad radiométrica, de la información espectral y del tipo de aplicación a considerar, ya que el ámbito urbano requiere un nivel de detalle diferente al ámbito rural (Jacobsen et al., 1998).

La Tabla 3 muestra los parámetros de calidad visual sobre la base de la medida en el papel y su comparación con el valor real, que para un mapa específico a escala 1:50.000 estaría íntimamente relacionado con una resolución espacial de una imagen de cualquier sensor remoto. Para esta investigación, la imagen SAR con sus características de adquisición estaría referida a una escala específica que, a la vez, estaría vinculada a una aplicación en el campo de la geomática. Ahora bien, debido a que este tipo de imagen resalta lineamientos en direcciones específicas asociadas a las características del objetivo y el modo de observación (geometría de adquisición y su polarización), ésta no aplicaría en un 100% para actualización cartográfica como fue conformada. En definitiva, las escalas mínimas de representación (ver Tabla 3) sobre la base de la resolución en la dirección del alcance y azimut,  $x$  y  $y$  respectivamente, aplicaría solo en geomática desde escala 1:20.833, y para cartografía básica a 1:62.500 y actualización cartográfica a 1:32.500.

**Tabla 3.** Parámetro de calidad visual – valor gráfico vs valor real a escala 1:50.000 y diferentes escalas mínimas en función de la resolución espacial

Aplicaciones	Parámet del Mapa	Escala 1:50.000 = píxel	Escala mín res esp de 6,25 m
Ingeniería, Catastro urbano y Cartografía Básica	$\leq 0,1$ mm	5 m	1:62.500
Actualización, Catastro Rural, ASPRS	0,2 mm	10 m	1:32.250
Geomática precisa, ASPRS	0,3 mm	15 m	1:20. 833
Geomática según aplicación	0,5 mm	25 m	1:12.500

La norma cartográfica de la ASPRS establece que el menor elemento identificable de un mapa está comprendido entre 0,2–0,3 mm. En este sentido, debido a la complejidad para su interpretación visual de las imágenes SAR se sugiere usar la más estricta que corresponde a 0,2 mm (1/5 mm), la cual para la escala 1:50.000 correspondería a 10 m

estando la resolución de la imagen RADARSAT-2 de esta investigación en cada una de sus componente  $x$  y  $y$  en 6,25 m. Si se parte de esta última relación, la escala mínima de trabajo de esta imagen sería 1:32.250.

### Resultado del modelo orto-rectificación SAR sobre la base del número de GCP

Al orto-rectificar la imagen SAR con GCP medidos con la técnica DGNSS, se lograron identificar con excelente nivel de detalle sobre la imagen un total de 20 puntos, tomando estos como la mayor cantidad de puntos utilizados en este trabajo para ajustar los parámetros orbitales para el modelo de orto-rectificación. Adicionalmente, para su validación se usaron 7 GVP. De acuerdo a la metodología empleada, se fue disminuyendo de un punto a la vez la cantidad de GCP hasta alcanzar a 5 de estos. Para cada nueva distribución de los GCP fue considerada primero, y con mayor grado de importancia, la distribución de los puntos y, segundo, se eliminó el punto con mayor contribución en el error. Inversamente, se iba aumentando la cantidad de GVP hasta 22 (Tabla 4).

**Tabla 4.** RMS en  $x$ ,  $y$  y total de los GCP y GVP en los ajustes del modelo de la imagen SAR

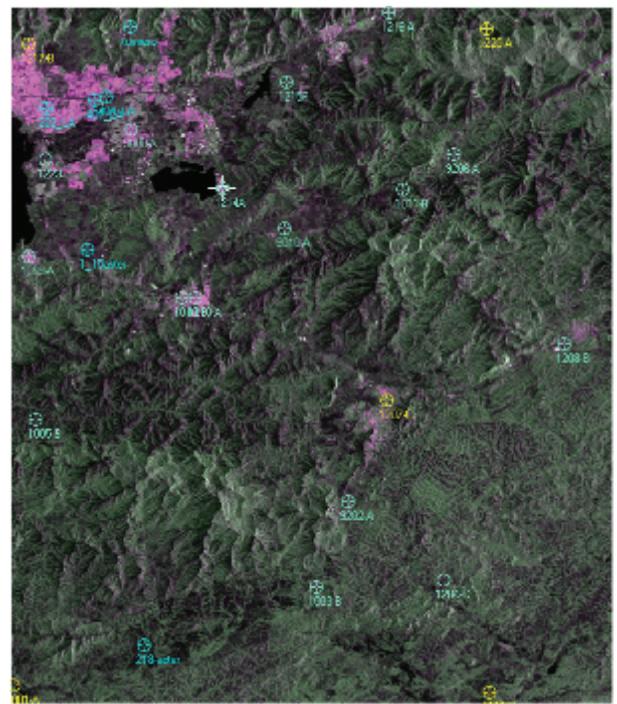
8		Control (m)			Verificación (m)		
GCP	GVP	RMS (X)	RMS (Y)	RMS (Total) $E_{SAR}$	RMS (X)	RMS (Y)	RMS (Total)
20	7	0,576	0,446	0,7285	0,7189	0,3299	0,791
19	8	0,5841	0,411	0,7143	0,5986	0,4553	0,7521
18	9	0,5923	0,3718	0,6994	0,5807	0,5398	0,7928
17	10	0,5904	0,3207	0,6718	0,5852	0,6122	0,8469
16	11	0,5978	0,3231	0,6795	0,5747	0,6022	0,8324
15	12	0,5869	0,2817	0,651	0,6511	0,6435	0,9154
14	13	0,5629	0,2915	0,6339	0,6148	0,6199	0,8731
13	14	0,5374	0,3021	0,6165	0,6814	0,601	0,9086
12	15	0,6005	0,2399	0,6466	0,5787	0,6596	0,8775
11	16	0,5718	0,2482	0,6234	0,5997	0,6468	0,882
10	17	0,5962	0,2603	0,6505	0,547	0,628	0,8328
9	18	0,5769	0,265	0,6348	0,5382	0,6617	0,853
8	19	0,5617	0,2562	0,6174	0,547	0,6487	0,8486
7	20	0,6005	0,2465	0,6491	0,5415	0,6703	0,8617
6	21	0,6281	0,2614	0,6803	0,5466	0,6707	0,8652
5	22	0,6944	0,2511	0,734	0,5036	0,6933	0,8569

En la Tabla 4 se ilustra para cada caso planteado los errores medios cuadráticos (RMS) en  $x$ , RMS en  $y$  y los totales tanto para los GCP como los GVP; todos están por debajo de un píxel. Al relacionarlo con las resoluciones de la

imagen SAR en la dirección de alcance y del azimut en su par de bandas, polarización HH y HV, cualquiera de estos RMS están por debajo de 6,25 m. Para los 20 GCP el RMS Total fue de 0,7285 píxel, pasando los 13 GCP con 0,6165 píxel hasta llegar a los 5 GCP con 0,734 píxel que corresponde a 4,55 m, 3,22 m y 4,59 m, respectivamente. Los GVP en proceso de validación del modelo comenzaron en 7 puntos con un RMS total de 0,7910 píxeles, pasado con 0,9154 píxeles con 15 hasta llegar con 22 puntos con 0,8569 píxeles, que equivaldría a 4,94 m, 5,72 m y 5,36 m. Del estudio exhaustivo de los resultados del modelo de ajustes de los parámetros orbitales para las diferentes cantidades de GCP y GVP, se enfatiza que es suficiente la cantidad de 5 GCP para generar la orto-imagen SAR.

### Resultados con 5 GCP y 22GVP

En la Figura 3 se puede observar la distribución de los 5 GCP a lo largo de toda la imagen, identificados con el color amarillo, cuatro orientados hacia las esquinas y uno hacia un punto central. Los puntos GVP se identifican de color aguamarina y cian. Aunque es poca la cantidad de GCP, el modelo de orto-rectificación queda validado por la gran cantidad y buena distribución de los GVP.



**Figura 3.** Distribución de los 5 GCP (amarillo) y los 22 GVP (aguamarina y cian) sobre la imagen RADARSAT-2 sin georreferenciar

Al evaluar los errores individuales de cada uno de los GCP, como se detalla en la Tabla 5, los residuales de cada uno para las componentes  $x$  y  $y$ , además del RMS de los mismos, se observa que están por debajo de 1,99 píxel, apreciándose que el residual en su máximo valor en  $x$  fue de 0,91 píxel y en  $y$  fue de 0,414, el valor RMS de 0,93 aportado respectivamente por los puntos 1217-B, 1002-H y de nuevo por 1217-B. Para los GVP se aprecia sus residuales en sus componentes  $x$  y  $y$ , los RMS están por debajo de 1,99 píxeles, apreciándose que el residual en su máximo valor en  $x$  fue de 0,857 píxel y en  $y$  fue de -1,294, y el RMS de 1,43 aportado respectivamente por el punto 1010-B y en el resto con el punto 1214A.

**Tabla 5.** Residuales y RMS de los 5 GCP y 22 GVP

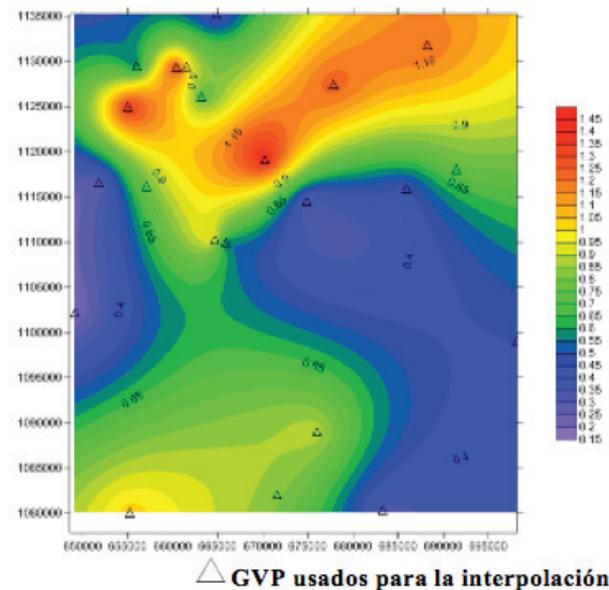
Nombre	Tipo Punto	Residual		RMS $E_{SAR}$
		X	Y	
1001-A	Control	0,377	0,199	0,426
218-aster	Check	0,747	-0,711	1,032
1003-B	Check	0,686	-0,44	0,815
1002-H	Control	0,198	0,414	0,459
1005-B	Check	-0,179	-0,064	0,191
1009-A	Check	-0,206	-0,161	0,262
1010-B	Check	0,857	-0,428	0,958
9010-A	Check	-0,145	-0,274	0,31
1011-B	Check	-0,048	-0,44	0,443
1_15aster	Check	0,726	-0,281	0,779
turmero	Check	-0,016	-0,389	0,389
202_LA	Check	0,5	-0,252	0,56
401_LA	Check	-0,801	-1,03	1,305
404_LA	Check	-0,003	-0,984	0,984
1214A	Check	-0,608	-1,294	1,43
1219-A	Check	0,742	-0,953	1,207
1217-B	Control	0,91	-0,19	0,93
1208-B	Check	-0,284	-0,352	0,452
1220-A	Control	0,902	-0,201	0,924
9206-A	Check	-0,642	-0,357	0,735
1204-C	Check	-0,174	-0,285	0,334
1207-C	Control	0,767	-0,166	0,785
1210-A	Check	0,365	-0,425	0,56
9202-A	Check	0,159	-0,869	0,884
9008-A	Check	0,456	-0,57	0,73
1223	Check	-0,59	-1,221	1,356
1215F	Check	-0,376	-1,185	1,243

#### Análisis de resultados

Los parámetros cartográficos propuestos por la ASPRS para aplicaciones de ingeniería en su Clase I plantea

que el máximo residual de cada punto no podrá pasar de 0,25 mm, tanto en su ejes  $x$  (dirección del alcance) como en el  $y$  (dirección del azimut). Este valor gráfico para la escala 1:50.000, restándole el probable error de arrastre de los puntos DGNS, resultó que el residual máximo ( $E_{SAR}$ ) no debe ser mayor a 12,47 m, que en unidades de imagen es 1,99 píxeles. Al analizar la Tabla 5, todos los puntos GCP (determinan los parámetros de ajuste del modelo) y en especial los puntos GVP (certifican el modelo matemático de orto-rectificación SAR), están todos y cada uno de ellos por debajo de esta especificación cartográfica para la escala establecida. Es de recordar que la distribución de los GCP en toda la imagen (Figura 3), su proceso de identificación en campo versus imagen SAR al nivel del sub-píxel y la precisión plani-altimétrica del levantamiento de los puntos son vitales para obtener un modelo preciso de orto-rectificación.

A partir de la selección de los 5 GCP, se tiene el modelo geométrico de orto-rectificación de la imagen SAR ya establecido y validado por los 22 GVP. Ahora bien, al ver la Figura 4 observamos el comportamiento de los errores interpolados de los RMS de cada GVP por el método de *kriging* y, de igual forma, no se observa algún valor que se pueda extralimitar de la norma cartográfica para la imagen SAR orto-rectificada. Los colores morados son errores que tienden a cero y los colores rojos tienden a 1,5 píxeles.



**Figura 4.** Estimación de la propagación de los RMS de los GVP (DGNS) de la orto-imagen SAR resultante usando 5 GCP

Finalmente, al analizar la Tabla 5 y la Figura 4, se determina que es suficiente un mínimo de 5 puntos de control terrestre bien distribuidos en toda el área de estudio para el proceso de ajuste de los parámetros orbitales del modelo orto-rectificación de imágenes SAR. El siguiente paso consiste en avalar la orto-imagen SAR según un DEM en diferentes condiciones de relieve.

El error definitivo se calculó a partir del  $E_{GNSS}$  siendo este de 0,738 m y  $E_{SAR}$  1,294 píxel correspondiendo a 8,088 m; por consiguiente, el error de la orto-imagen ( $E_{OI}$ , calculado de la ecuación 2) resultó 8,122 m. Con base en lo anteriormente expuesto y en los parámetros de precisión cartográfica, se puede observar en la Tabla 6 la escala mínima de uso más estricta de la orto-imagen es de 1:32.488, basado a la precisión del modelo matemático de orto-rectificación.

**Tabla 6.** Parámetro de precisión cartográfica– errores permisibles a escala 1:50.000 y diferentes escalas mínimas en función del  $E_{OI}$

Aplicaciones	Parámetro del Mapa	Residual Escala 1:50.000	Escala mínima con $E_{OI}$ de 8,122 m
Ingeniería (ASPRS I), Catastro urbano y Cartografía Básica	$\geq 0,25$ mm	12,5 m	1:32.488
Actualización, Catastro Rural	0,3 mm	15 m	1:27.074
Geomática precisa (ASPRS II)	0,5 mm	25 m	1:16.244
Geomática (ASPRS III)	0,75 mm	37,5 m	1:10.830

Al hacer la relación utilizando como base la norma de precisión cartográfica establecida por el NMAS de un CMAS-90, considerando además que el RMS máximo obtenido de los GVP es de 1,43 píxeles que equivale en el terreno a 8,938 m ( $E_{SAR}$ ) y aplicando de igual forma el máximo aporte al error del levantamiento DGNSS ( $E_{GNSS}$ ), el Error máximo de la imagen SAR ( $E_{OI}$ ) queda en 8,968 m, el cual corresponde a  $1 \sigma$ . De esta forma, ahora para el 90% resulta 13,609 m (ecuación 1), y es conocido por esta norma que el error en el mapa no debería ser mayor a 0,508 mm. Haciendo la relación entre valor real y valor gráfico resultó que la escala mínima será 1:26.789.

Ahora, al interceptar los valores de la escala obtenidos anteriormente con la Tabla 3, según la norma de la ASPRS más exigente de calidad visual y la precisión en su Clase I para la misma norma, se concluye que la escala mínima de este producto cartográfico, según la precisión de los puntos

de validación DGNSS con su respectiva altura cuasi-ortométrica, es de 1:32.500.

### Resultados de precisión cartográfica bajo diferentes condiciones de relieve

En esta sección se validaron las orto-imágenes SAR resultantes en diferentes condiciones de relieve tomando GVP identificados en las orto-fotos del IGVS, para establecer su precisión planimétrica. Estos GVP solo se reflejaron en tres condiciones de relieve genéricas en la zona de estudio: plana, ondulada y montañosa. Considerando que se tienen diferentes insumos de DEM, una de representación global (SRTM v2) y los generados de las cartas topográficas del IGVS a una escala 1:25.000, siendo estas de mayor detalle que la escala establecida para este estudio, cada uno de ellos se usarán para generar las diferentes orto-imágenes SAR. Los GVP extrajeron los valores de altimetría de los diferentes tipos de DEM según sea el caso, resultando que para el mismo punto su residual fue cambiando en función de la precisión altimétrica de su respectivo DEM, debido a que con la altura se determina el desplazamiento por relieve.

La Tabla 7 permite observar la resultante de los RMS de los GVP correspondiente a la zona plana que cubre el DEM de SISDELAV para cada orto-imagen SAR. Los RMS tienen un comportamiento mejor al DEM de las cartas topográficas que con los modelos globales. Al detallarlo, el RMS de los GVP con altura del *SISDELAV* tiene un RMS un poco mejor comparado con el *srtm\_v2*, con 1,368 y 1,9402 píxeles, respectivamente.

**Tabla 7.** Error medio cuadrático de los puntos de verificación para las orto-imágenes con diferentes DEM para un área en condiciones de relieve plano

ORTO-SAR	RMS X	RMS Y	RMS Total
<i>sar_sisdelav</i>	0,914	1,0179	1,3681
<i>sar_srtm_v2</i>	1,6518	1,0179	1,9402

Al observar la Tabla 8, se muestra el RMS de los GVP para cada orto-imagen SAR en zonas con relieve ondulado cuyos datos de altura son tomados de los diferentes DEM. Donde estos RMS tienen un comportamiento mejor con las cartas topográficas que con el modelo global. El DEM de las cartas topográficas tiene un RMS considerablemente mejor con 1,7102 píxeles comparado con el *srtm\_v2* con 3,9537 píxeles.

**Tabla 8.** Error medio cuadrático de los puntos de verificación para la imagen SAR con diferentes DEM para el área en condiciones de relieve ondulado

ORTO-SAR	RMS X	RMS Y	RMS Total
<i>sar_siacarg</i> <i>sar_sisdelav</i>	1,2687	1,0054	1,7102
<i>sar_srtm_v2</i>	3,8237	1,0054	3,9537

Al observar la Tabla 9 se nota el RMS de los GVP para cada orto-imagen SAR en zonas con relieve montañoso, donde los datos de altimetría se tomaron del DEM *caramacate* y del *srtm\_v2*, respectivamente. Donde estos RMS tienen un comportamiento mejor con las cartas topográficas que con los modelos globales. El DEM de las cartas topográficas tiene un RMS bastante mejor con 1,513 pixeles en comparación con el *srtm\_v2* de 4,5618 pixeles.

**Tabla 9.** Error medio cuadrático de los puntos de verificación para un DEM en un área con condiciones de relieve montañosas

ORTO-SAR	RMS X	RMS Y	RMS Total
<i>sar_caramacate</i>	1,1746	0,9532	1,5127
<i>sar_srtm_v2</i>	4,4611	0,9532	4,5618

### Análisis de resultados

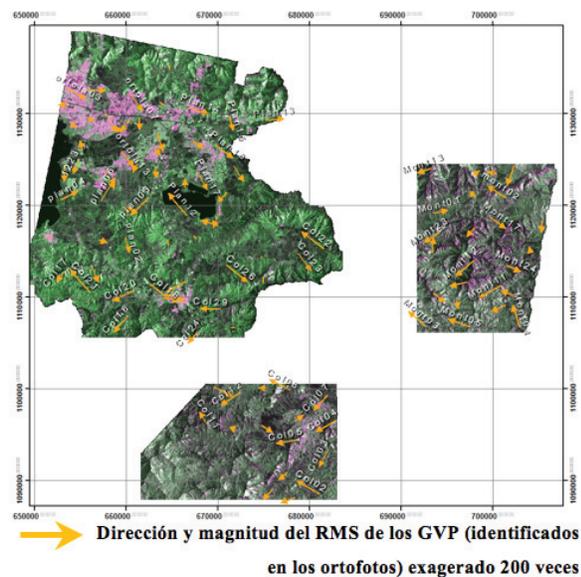
Como se mencionó anteriormente, la ASPRS establece como parámetro de precisión cartográfica para la imagen y escala de este trabajo, 2 pixeles en su Clase I, 4 pixeles en su Clase II y 6 pixeles en su Clase III. También se tiene otro estándar cartográfico dictado por el NMAS, donde el error circular del mapa CMAS-90 debe estar en 25,4 m; al llevarlo a la muestra estadística correspondiente a un  $\sigma$ , este se traduce en que el RMS de las muestras de los GVP de las orto-imágenes SAR no debe ser mayor a 2,67 pixeles.

En este sentido, al analizar cada uno de los GVP para cada orto-imagen SAR generadas usando DEM de las cartas topográficas 1:25.000 del IGVSb, se puede observar que cumplen con las normas de la ASPRS en su Clase I como producto cartográfico a escala 1:50.000, ya que cada uno de los puntos de verificación están por debajo de 2 pixeles lineales en cualesquiera de sus componente *x* o *y*, resultando como el máximo residual de todos los GVP en 1,984 pixeles para todas las condiciones de relieve.

Al analizar las Tablas 7, 8 y 9 y todas las orto-imágenes SAR que se generaron usando DEM de las cartas topográficas del IGVSb, se observa que también cumplen con las normas del NMAS como producto cartográfico a escala 1:50.000, ya que con la muestra estadística de todos los puntos de verificación se certificaron como producto cartográfico al estar por debajo de 2,67 pixeles, siendo el GVP *Col21* el de mayor RMS. Esto de igual forma para las diferentes condiciones de relieve.

Al observar la orto-imagen generada usando como insumo el DEM Global en las zonas de relieve ondulado y montañoso, se tiene que este no cumplen con las normas de precisión cartográfica del ASPRS, ya que están muy por encima de los valores máximos en casi 10 pixeles. En cambio, para la zona plana la orto-imagen cumple con ambas normas de precisión cartográfica.

Al observar el comportamiento de cada uno de los RMS en el proceso de generación de la orto-imagen usando DEM Global para las zonas planas, se tiene que tanto en la dirección orientada al azimut (RMS Y) como en la dirección del alcance (RMS X), tienen pequeñas variaciones, siendo este DEM adecuado para las condiciones geométricas de la imagen usada para esta investigación. Para las zonas con relieve ondulado y montañoso, el mismo no resuelve el efecto de desplazamiento por relieve en la dirección del alcance, como las sombras, la inversión y contracción por relieve.

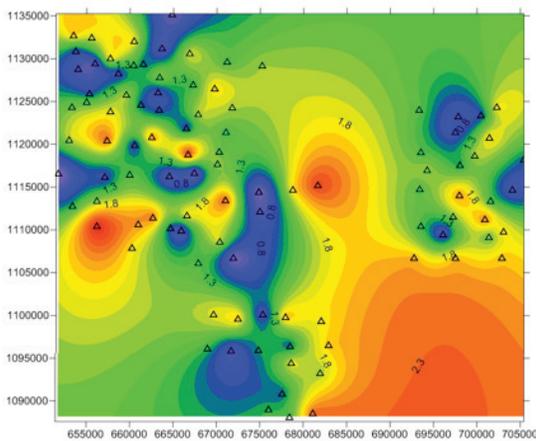


**Figura 5.** Imagen SAR resultante usando 5 GCP, y el DEM de *SISDELAV* al nor-este, *SIACARG* al sur y *Cartocentro* al este

Elaboración propia y vectores graficado por Daza, G, 2013

La Figura 5 muestra las tres orto-imágenes SAR obtenidas, más la ubicación espacial de cada uno de los GVP capturados sobre las cartas topográficas y los DGNSS, con la altura correspondiente extraída de cada DEM de las cartas topográficas. Se puede ver que las magnitudes de los vectores representan el RMS de cada punto GVP. Estas no son mayores a la norma cartográfica establecida, estando la mayoría de los puntos sin un patrón definido en su comportamiento.

En la Figura 6 observamos el comportamiento de los errores de cada GVP propagado hacia el área de cobertura de cada imagen para la cual se utilizó el método de interpolación por *kriging*. No se observa algún valor que se pueda extralimitar de la norma cartográfica para la coberturas de las imágenes SAR orto-rectificadas, al no presentarse esos valores máximos representados por rojo intenso sobre la gráfica; los colores morados son errores que tienden a cero y los colores entre amarillo y anaranjados tienden a valores por debajo de 2,0 pixeles.



△ GVP (identificados en los ortofotos) usados para la interpolación

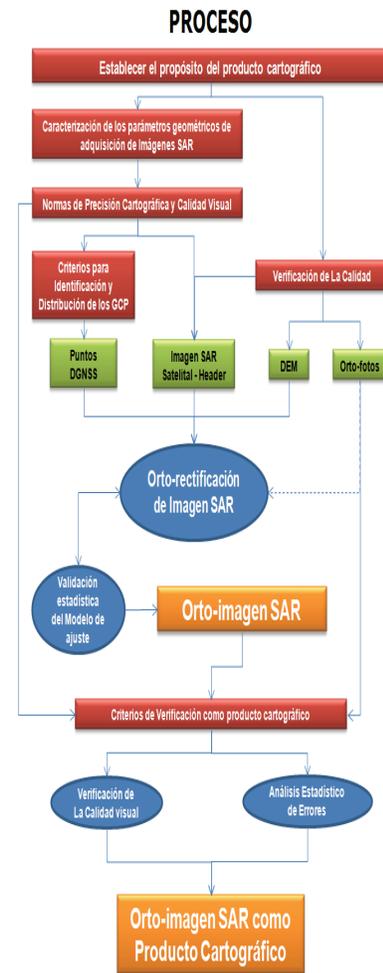
**Figura 6.** Estimación de la propagación de los RMS de la orto-imagen SAR resultante validados con los GVP como producto cartográfico 1:50.000

Al usar un DEM adecuado de igual o mejor resolución al producto cartográfico a generar, se garantiza las precisiones según la norma cartográfica a escala 1:50.000, sea el de la ASPRS o el NMAS, independientemente si el ángulo de incidencia es mayor o menor. Se recalca que el control de calidad del mapa se realizó tomando en cuenta normas internacionales. Se establecieron los valores máximos de los residuales por punto en la dirección *x* o *y* y del global planimétrico (CMAS-90) de toda la población de puntos de validación, solo enfocándose al elemento de calidad

de datos de *exactitud posicional* de la ISO 19113:2002 “Información Geográfica – Principio de Calidad” (IPGH, 2010).

### Sistematización de Procesos

El proceso de validación cartográfica realizado durante este trabajo de investigación, con base en la conceptualización teórica, la metodología aplicada y los resultados obtenidos, permite sistematizar criterios y procedimientos para la orto-rectificación de imágenes RADARSAT-2, usando GCP levantados con la técnica GNSS Diferencial y un modelo matemático que estará condicionado por la herramienta de procesamiento, de tal manera que garantice un producto cartográfico de calidad y se logre una homogeneidad en la generación del mismo. Por esta razón, es muy importante hacer la comprensión y el control tanto del proceso geométrico completo como de los errores resultantes. Es así que se muestra una secuencia de pasos que son esquematizados y se detallan en la Figura 7.



**Figura 7.** Esquema de la propuesta para el proceso de validación cartográfica de la orto-imagen SAR

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Cada uno de los criterios y procedimientos involucrados durante el desarrollo de este trabajo arrojaron resultados meritorios para valorar la precisión. Esto demuestra que la selección y adecuación de los insumos y el modelo matemático fueron acertadas para las condiciones de relieve del área de estudio, gracias a un proceso de validación.

Las imágenes SAR, debido a su geometría de adquisición, presentan deformaciones importantes. Por esta razón, es vital aplicar los criterios y procedimiento tratados en esta investigación para garantizar la generación de un producto cartográfico de calidad.

La definición de la aplicación que se le dará al producto final como información cartográfica sobre la base de su escala, servirá como fundamento para establecer los parámetros de precisión cartográfica y calidad visual que deberán ajustarse al mapa, los cuales son establecidos por el ente responsable en materia de cartografía del país o en su lugar a una norma internacional.

Es primordial la identificación de los puntos con una ubicación al nivel del sub-píxel, que se logra calificando elementos culturales con características geométricas bien definidas según las variables y características de las imágenes.

En el proceso de orto-rectificación, se puede considerar como última opción el uso de un DEM Global como el SRTM v-2.1 para corregir el efecto de relieve en la generación del producto cartográfico, claro está, aplicada a zonas planas y para imágenes con ángulo de toma igual o inferior a la de este estudio, el cual cumple con las especificaciones cartográficas exigidas.

En general, la precisión geométrica de la orto-imagen RADARSAT-2, comparada estadísticamente con los puntos de verificación y validada visualmente con las orto-fotos, es aceptable para la escala 1:50.000.

## REFERENCIAS

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING [CCRS] Tutorial: Globe SAR Características geométricas. pp 60-65 Recuperado el 07 de junio de 2017, de: [ftp://ftp.ccrs.nrcan.gc.ca/ad/MAS/globesar/spa/int6\\_s.pdf](ftp://ftp.ccrs.nrcan.gc.ca/ad/MAS/globesar/spa/int6_s.pdf)

CANADIAN SPACE AGENCY (CSA, 2010). RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. Recuperado el 01 de junio de 2013, de <http://www.rsi.ca/rs2/prod/xml/schemas>

CASTILLO, D. (2007) Actualización del sistema de información de suelos de la depresión del Lago de Valencia SISDELAV. Tesis de grado no publicada, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay Venezuela. 146 p.

CHUVIECO, E. (2010). Teledetección ambiental. 3da ed. Barcelona, España: Ariel Ciencias. 591p.

ERDAS, INC. (1997 – 2010). Erdas Tour Guide – Capitulo 12

FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE –FGDC (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Accuracy. FGDC-STD-007.3

GUEVARA, V., REYES, A. (2002) Precisión en la orto-rectificación de imágenes del satélite IKONOS en áreas urbanas. FIIDT – CPDI. Ponencia presentada en el Congreso Internacional de Geodesia y Cartografía, Caracas.

HUANG, G.M; GUO, J.K.; LV, J.G.; XIAO, Z.; ZHAO, Z. Y QIU, C.P. (2004). Algorithms and Experiment on SAR Image Orthorectification Based on Polynomial Rectification and Height Displacement Correction. XXth ISPRS Congress - Technical Commission II, (Istanbul, Turkey).

INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA (IPGH), Comité ISO/TC 211, Información geográfica/geomática, Grupo Consultivo de Desarrollo. (2010) Guía de normas Edición en Español. 541. ISBN: 978-607-7842-03-3

JACOBSEN, K. KONECNY, G., WEGMANN, M. (1998) High Resolution Sensor Test Comparison with SPOT, KFA1000, KVR 1000, IRS-1C and DPA in lower Saxony. ISPRS, vol. 32/4, pp. 260-269

JÁCOME P., A. AGUERREVERE W., G. LÓPEZ, M. (2001). Sistema de información ambiental cuenca alta del Río Guárico (SIACARG). Tesis de grado no publicada, UCV-FAGRO, FII-CPDI y PDVSA-Palmaven, Maracay Venezuela.

- MANSOURPOUR, M.; RAJABI, M.A. Y REZAEI, Z. (2008). Radiometric and Geometric Correction Methods for Active Radar and SAR Imageries. National Cartographic Center, Iran. Recuperado el 01 de abril de 2010, de [http://www.ncc.org.ir/\\_Douran Portal/Documents/p8766.pdf](http://www.ncc.org.ir/_Douran Portal/Documents/p8766.pdf)
- SEVILLA, M. (1991, Abril) Criterios de precisión cartográfica. Catastro, Año III, Num. 8. Instituto de Astronomía y Geodesia. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España. p.p 12-20
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY - USGS (1999) Map Accuracy Standards Fact Sheet FS-171-9
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY - USGS (2014). SRTM Topography. Descargable en [https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM3/](https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/)

