

Generación de una ortofoto digital para San Miguel de Tucumán

Javier A. Carelli¹ & Carlos E. Valdez¹

(1) Cátedra de Fotogrametría, Departamento de Geodesia y Topografía, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.

jcarelli@herrera.unt.edu.ar & carernestovaldez@hotmail.com

RESUMEN: La producción de cartografía tuvo un impulso fundamental con la aparición de las técnicas fotogramétricas. Estas técnicas han ido evolucionando hasta llegar a la actual Fotogrametría Digital.

Recientemente, el Instituto Geográfico Nacional (IGN) realizó vuelos de prueba con una cámara aérea digital Ultracam XP, en distintas regiones del país. En la zona de San Miguel de Tucumán se voló a una escala aproximada de 1: 67.000, lo que origina una resolución en el terreno (tamaño de píxel) del orden de cuarenta centímetros. En base a estas fotografías y mediante técnicas de aerotriangulación fotogramétrica, se confeccionó un mosaico de ortofotografías digitales. La compensación del bloque arrojó precisiones del orden del píxel.

Se prevé en el futuro, en el marco de las tareas de investigación que se llevan a cabo en la cátedra de Fotogrametría, realizar un análisis detallado de la exactitud geométrica de este producto cartográfico.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Fotogrametría y Cartografía

La producción de cartografía tuvo un impulso fundamental con la aparición de las técnicas fotogramétricas. La Fotogrametría permite la reconstrucción del terreno (u otro objeto) a partir de fotografías.

La invención de la fotografía por Niépce y Daguerre en 1839 tuvo una decisiva importancia ya que a partir de allí comienza una continua evolución de la Fotogrametría. En 1851 el topógrafo militar Aimé Laussedat realizó mediciones sobre fotografías (Konecny, 2003). Laussedat realizó ensayos de fotografías aéreas con globos y cometas pero al no obtener buenos resultados se concentró en la producción de mapas a partir de fotogrametría terrestre (Lerma García, 2002). En 1859 explica el uso del fototeodolito y describe el método de determinación de coordenadas objeto a través de la intersección espacial de rayos provenientes de dos fotografías. Queda en evidencia porque se considera a Laussedat como el Padre de la Fotogrametría (Wolf, 1983).

En 1858 el arquitecto alemán Meydenbauer realizó mediciones sobre fotografías para la documentación de edificios públicos (Konecny, 2003). A Meydenbauer se le atribuye el empleo por primera vez de la palabra Fotogrametría, definida entonces como “el arte de hacer proyección ortogonal a partir de dos perspectivas”.

En el año 1901, con diseño de C. Pulfrich, la casa Zeiss construyó el instrumento denominado Estereocomparador. Este instrumento era capaz

de procesar fotogramas tomados con ejes paralelos, haciendo uso de la visión estereoscópica y del principio de la marca flotante, lo cual constituyó una elegante y a la vez práctica solución para la identificación de puntos homólogos en ambos fotogramas (Juliá, 2003).

En el año 1914, la misma casa Zeiss pudo construir un aparato diseñado por von Orel que significó todo un hito en la historia de la Fotogrametría; el estereoaquígrafo de von Orel, construido sobre el desarrollo anterior de Pulfrich. Este aparato fue el primero que posibilitó el trazado continuo de los rasgos cartográficos, especialmente de las curvas de nivel, y su ventaja principal residía en la velocidad con que podía cartografiarse el terreno, casi independientemente de su complejidad.

El rápido desarrollo de la aviación posibilitó el surgimiento y generalización de la Fotogrametría Aérea. En 1915 aparece la primera cámara aerofotogramétrica, de formato grande, óptica muy precisa y apta para una cobertura estereoscópica sistemática del terreno. A partir de allí continúa la evolución tanto del proceso fotográfico como de los aparatos encargados de la reconstrucción del terreno, denominados genéricamente, restituidores. Estos aparatos tenían ingeniosas soluciones analógicas ópticas o mecánicas y habían nacido por la imposibilidad práctica de resolver el problema fotogramétrico empleando las extensas y complejas fórmulas de la Fotogrametría Analítica. En ese entonces, Otto von Gruber define la fotogrametría como “el arte de evitar todo cálculo”.

A pesar de su elevado precio los Restituidores Analógicos alcanzan una rápida y formidable difusión en todo el planeta. La producción de

mapas empieza a parecerse a un proceso industrial (Juliá, 2003).

Con el advenimiento de las computadoras todas esas dificultades desaparecen y empiezan a surgir los primeros Restituidores Analíticos. Los componentes electrónicos sustituyen a los elementos mecánicos y comienzan a automatizarse los procesos. También resulta posible plantear de manera simultánea la solución de bloques de haces de rayos formados por un elevado número de fotogramas, algo que implica la resolución de sistemas de ecuaciones de cientos o miles de incógnitas.

Cuando se reemplazan las fotografías por imágenes digitales dentro de una computadora surge la Fotogrametría Digital. El hardware y el software reemplazan a la mayoría de los aparatos fotogramétricos y bajan considerablemente los costos.

Actualmente es posible generar productos fotogramétricos con fines cartográficos empleando software de relativo bajo costo o incluso software de propio desarrollo.

La confección mediante técnicas digitales de uno de esos productos, la ortofotografía, para la zona de San Miguel de Tucumán, es el objetivo del presente trabajo.

2. CONCEPTOS FOTOGRAMÉTRICOS

2.1 Intersección espacial

En Fotogrametría la posición de un punto en el espacio se determina mediante la intersección de dos rectas determinadas por los centros de perspectiva O' , O'' , y las imágenes homólogas p' , p'' de ese punto (Fig. 1).

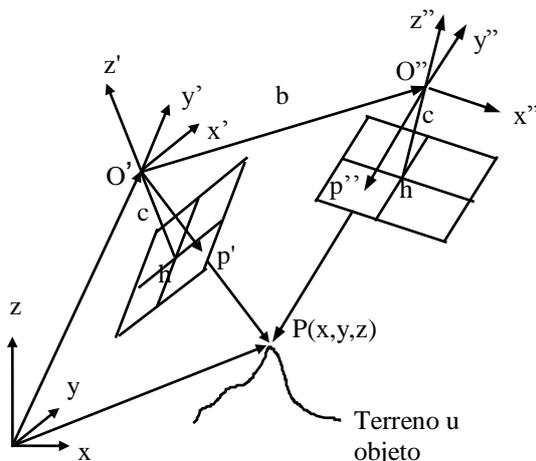


Figura 1: Un punto queda determinado por la intersección de dos rayos homólogos.

Normalmente se conocen los parámetros de la orientación interior de la cámara, distancia principal “ c ” y posición del punto principal “ h ” en el plano imagen, (Fig. 1) y, por lo tanto, la forma de los haces de rayos.

Resulta necesario, entonces, determinar las posiciones espaciales de los centros O' , O'' , y las orientaciones de ambos haces de rayos (Carelli & Juliá, 2009).

2.2 Orientación exterior

La posición y orientación de cada haz de rayos se denomina Orientación Exterior e implica la determinación de 6 incógnitas: las 3 coordenadas del centro de perspectiva y tres giros (los ángulos ω , φ , κ , por ejemplo). Los ángulos ω , φ , κ , son los formados por los ejes x' , y' , z' del sistema de la fotografía con los ejes x , y , z del sistema del terreno, considerando la secuencia en que se definen las rotaciones, ω (primaria) alrededor del eje x , φ (secundaria) alrededor del eje y cuya posición ha sido afectada por ω y, finalmente, κ (terciaria) alrededor del eje z que ha sido doblemente afectado por las rotaciones ω , φ .

Una manera analítica de encontrar los 6 parámetros de la orientación exterior de un haz de rayos es la siguiente: Cada punto origina un par de ecuaciones de colinealidad (1).

$$x'_j = -c \frac{a_{11}(x_j - x_0) + a_{12}(y_j - y_0) + a_{13}(z_j - z_0)}{a_{31}(x_j - x_0) + a_{32}(y_j - y_0) + a_{33}(z_j - z_0)} \quad (1)$$

$$y'_j = -c \frac{a_{21}(x_j - x_0) + a_{22}(y_j - y_0) + a_{23}(z_j - z_0)}{a_{31}(x_j - x_0) + a_{32}(y_j - y_0) + a_{33}(z_j - z_0)}$$

Los coeficientes a son los elementos de una matriz ortogonal según las expresiones que siguen:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\varphi \cos\kappa \\ a_{21} &= -\cos\varphi \sen\kappa \\ a_{31} &= \sen\varphi \\ a_{12} &= \cos\omega \sen\kappa + \sen\omega \sen\varphi \cos\kappa \\ a_{22} &= \cos\omega \cos\kappa - \sen\omega \sen\varphi \sen\kappa \\ a_{32} &= -\sen\omega \cos\varphi \\ a_{13} &= \sen\omega \sen\kappa - \cos\omega \sen\varphi \cos\kappa \\ a_{23} &= \sen\omega \cos\kappa + \cos\omega \sen\varphi \sen\kappa \\ a_{33} &= \cos\omega \cos\varphi \end{aligned}$$

Los valores x'_j , y'_j , son las coordenadas del punto j medidas en el fotograma y referidas a su punto principal, h ; los valores x_0 , y_0 , z_0 , ω , φ , κ , son los seis parámetros de la orientación exterior del haz de rayos, mientras que x_j , y_j , z_j , son las coordenadas del punto en el terreno. Tanto las

coordenadas x_0, y_0, z_0 , como las x_j, y_j, z_j , están referidas al sistema del terreno, x, y, z (Fig. 1).

Si se conociesen las coordenadas espaciales del terreno de al menos 3 puntos que aparezcan en ambas imágenes, con las (1) se podría formar un sistema de 6 ecuaciones, tanto para el fotograma izquierdo como para el derecho. Conocidas las orientaciones exteriores, después de resolver ambos sistemas, la posición de cualquier otro punto se obtendrá mediante la intersección de rectas determinadas por los centros de perspectiva y las imágenes p' y p'' respectivamente (Fig. 1).

Un problema importante se plantea porque las (1) no son lineales. La solución implica un proceso de linealización bastante extenso. El lector puede encontrarlas en la bibliografía (Juliá, 1992), (Wolf, 1983).

2.3 Orientación relativa y absoluta

Otra manera de resolver el problema es no emplear la ecuación de colinealidad sino la condición de coplanaridad de los vectores b, p', p'' (Fig. 1), que puede expresarse igualando a cero el producto mixto de esos vectores:

$$b \times p' \cdot p'' = 0 \quad (2)$$

La linealización de esta ecuación conduce también a expresiones extensas. Aplicando la (2) para al menos cinco puntos homólogos se consigue la orientación relativa, o recíproca, de un haz de rayos con respecto al otro, consiguiéndose así, formar un modelo semejante al objeto, aunque en una posición arbitraria en el espacio, que permite la observación y medición estereoscópica (Carelli & Juliá, 2009). Las siete incógnitas restantes para la solución completa del problema constituyen la orientación absoluta que requiere del conocimiento de posiciones de puntos en el terreno, o en el objeto.

3. RECTIFICACIÓN Y ORTOFOTOGRAFÍA

Si bien los procedimientos que se describirán a continuación son perfectamente válidos para el caso de Fotogrametría Terrestre, su principal aplicación es la producción cartográfica a partir de fotografías aéreas. Estas fotografías son tomadas con cámaras fotogramétricas de muy alta calidad, a bordo principalmente, de aviones.

El eje de la cámara se encuentra en posición aproximadamente vertical pero debido a los movimientos del avión es prácticamente imposible lograr una fotografía con eje exactamente vertical.

Por ello, una fotografía no es equivalente a un mapa desde un punto de vista geométrico. Sólo lo

sería en el caso ideal de un terreno llano y eje exactamente vertical.

3.1 Rectificación

La rectificación, o enderezamiento, es el procedimiento fotogramétrico mediante el cual, a partir del fotograma original, que no es vertical, se obtiene otra imagen que es equivalente a una fotografía tomada con eje estrictamente vertical. En este caso, si el terreno es llano, la foto rectificada puede considerarse un mapa, puesto que han desaparecido las discrepancias ocasionadas por la no verticalidad del eje de toma. Este procedimiento es aconsejado sólo para zonas de terreno llano.

Las técnicas de rectificación analógica tuvieron amplia aplicación en la Argentina en virtud de sus grandes extensiones llanas.

3.2 Ortofotografía

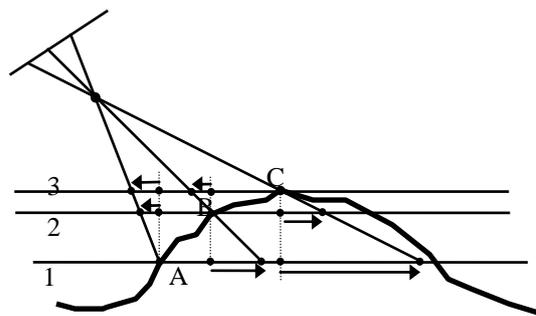


Figura 2: Desplazamientos debidos al relieve.

En la Fig. 2 se proyecta una fotografía con la orientación exterior correcta sobre los planos horizontales 1, 2 y 3 (se muestra solamente en un corte). Si la proyección se hace sobre el plano 1, el punto A resulta proyectado en su verdadera posición planimétrica, mientras que los puntos B y C resultan desplazados según indica la flecha. Si la proyección se hace sobre el plano 2, el punto B es el que resulta proyectado correctamente, mientras que los puntos desplazados son el A y el C. Similarmente, en el plano 3 el punto C está en la posición correcta y los puntos A y B han sido desplazados.

En la rectificación clásica los únicos corrimientos que desaparecen son los ocasionados por la no verticalidad del eje de la cámara en el instante de toma. Los desplazamientos ocasionados por los desniveles, en cambio, no desaparecen, y la situación final sería similar a la de la Fig. 2. Por ese motivo, la rectificación solo es recomendada para terrenos llanos.

En la rectificación diferencial u ortofotografía, cada punto es proyectado en su cota correcta. Esto equivale a decir que, en la Fig. 2, el punto A es proyectado en el plano 1, el B en el plano 2 y el C en el plano 3, y que lo mismo ocurre con todos los puntos. Es necesario, naturalmente, conocer la altimetría del terreno. Se entiende también que más que hablar de puntos, en un procedimiento práctico hay que hablar de pequeñísimas zonas del fotograma original proyectadas en igualmente pequeñísimas zonas de la ortofotografía.

4. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

4.1 Concepto de imagen digital

Si bien en la fotogrametría terrestre se ha comenzado a usar exitosamente cámaras digitales, no se han difundido, en virtud de su alto costo, cámaras fotogramétricas aéreas. Por tal motivo, en el caso convencional o de film, las fotografías deberán ser digitalizadas por medio de “scanners”.

Una imagen digital puede considerarse como una matriz de dos dimensiones. Cada elemento de esa matriz se denomina píxel (contracción de *picture element*), está ubicado en la intersección de una fila y una columna, y representa un área, por lo que hay que hablar de elementos de imagen más que de puntos de imagen. Los píxeles son los portadores de la información. El valor o atributo de un píxel depende del instrumento de registro.

En la fotografía blanco y negro, el valor de gris de un píxel se representa, en general, mediante 8 bits. Esto significa que la gama de grises puede albergar $2^8 = 256$ valores, un rango bastante más generoso que las posibilidades de diferenciación que tiene el ojo humano. En general, los valores de gris o densidades, van desde el 0 para el negro hasta el 255 para el blanco.

Para foto color tenemos que hablar de tres capas de 8 bits cada una para el formato RGB (*Red, Green, Blue*), lo que origina imágenes de 24 bits. Las modernas cámaras aéreas digitales poseen capacidad de registrar hasta en 12 bits y también permiten registrar información en la región del infrarrojo.

4.2 Correspondencia de imágenes

La identificación de puntos homólogos en dos fotografías, que realiza un operador mediante la visión estereoscópica y la marca medidora en los instrumentos analógicos y analíticos, queda reducida en los procedimientos digitales a comparar grupos en las dos matrices de grises de ambas fotografías.

Los procedimientos digitales actuales, al contrario de lo que ocurría en el pasado, realizan gran parte de la tarea de manera automática. Si se define una ventana en el fotograma izquierdo, es posible encontrar el sector de imagen correspondiente en el fotograma derecho por medio de la comparación de niveles de gris. El algoritmo para la comparación más empleado es el de correlación cruzada. El procedimiento consiste en desplazar la ventana de ajuste, que tiene el mismo tamaño que la ventana de referencia o patrón, píxel a píxel a lo largo y a lo ancho de toda la ventana de búsqueda. En base a las densidades o valores de gris de esas matrices, se calcula el coeficiente de correlación ρ para cada nueva posición y el mayor de los coeficientes calculados definirá el mejor ajuste (ver Fig. 3). A medida que el coeficiente de correlación se aproxima a 1, mejor será la semejanza existente entre ambas ventanas (Luccioni & Juliá, 2008).

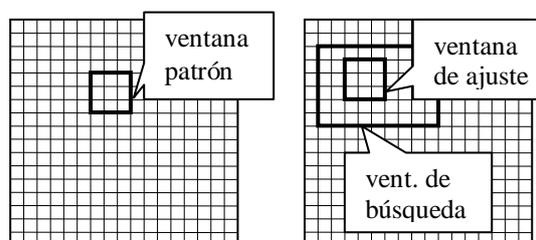


Figura 3: Correspondencia de imágenes.

4.3 Modelos Digitales de Terreno

Como se mencionó en el apartado 3.2 un requisito indispensable para la confección de la ortofoto es el conocimiento de la altimetría del terreno. Una de las maneras de conseguirlo es a través del denominado Modelo Digital del Terreno MDT, o con su sigla en inglés DTM (*Digital Terrain Model*). Este modelo digital puede obtenerse de varias maneras, como por ejemplo a partir de:

- Cartografía existente con curvas de nivel.
- Mediciones en el terreno.
- Procedimientos automáticos de la fotogrametría digital.
- Técnicas de escaneo láser (*laser scanning*).

La fotogrametría digital permite obtener de manera automática la nube de puntos necesaria para la confección de un MDT. Esta tarea puede llevarse a cabo de la siguiente manera: Una vez orientados los fotogramas, se encuentran automáticamente las zonas homólogas a través de la correspondencia de imágenes. Con las coordenadas del centro (u otro punto) de los píxeles centrales de ambos sectores, se calculan

por intersección en el espacio, las coordenadas del punto del terreno correspondiente. Repitiendo esta operación para una red de puntos de una cierta densidad, se obtendrá la nube de puntos necesaria para formar el MDT. En zonas de poco contraste, la correlación llega a dificultarse de manera importante y no puede ser totalmente automática. En estos casos resulta necesaria la supervisión de un operador.

5. GENERACIÓN DE UNA ORTOFOTO DIGITAL

Como ya se mencionó, las coordenadas de un determinado píxel serán su fila y su columna en la matriz de la fotografía. Ahora bien, en fotogrametría las coordenadas de puntos imagen se refieren a un sistema centrado en el punto principal. Cuando la imagen se obtiene a partir de una cámara digital será necesaria una simple traslación para identificar los píxeles en el sistema de la imagen cuyo origen se encuentra, generalmente, en el extremo superior izquierdo. En el caso de que la fotografía deba ser digitalizada a través de un escáner resulta necesaria una transformación entre ambos sistemas. Llamando x_s a la columna e y_s a la fila, la relación entre estas coordenadas y las coordenadas x' , y' en el fotograma original (referidas al punto principal) se puede expresar como:

$$x_s = a_0 + a_1 x' + a_2 y' \quad (3)$$

$$y_s = b_0 + b_1 x' + b_2 y'$$

Los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 , b_2 , se calculan conociendo las coordenadas de al menos tres puntos en ambos sistemas. En general, se emplearán las marcas fiduciales de la fotografía. Las (3) expresan una transformación afín que corregirá algunas deformaciones introducidas por el escáner.

El procedimiento de la formación de la ortofoto es el siguiente (Fig. 4): Con las coordenadas de un píxel de la ortofoto, similares a la coordenadas x, y de un punto en el terreno (en realidad se trata del centro de píxel de la ortofoto), se determina la coordenada z mediante el MDT. Con los tres valores de las coordenadas del punto en el terreno, x, y, z , se calcula x', y' , mediante las ecuaciones de colinealidad (1), y luego x_s, y_s , mediante las (3). De esta manera, partiendo de la fila y la columna de un píxel en la ortofoto se individualiza el píxel correspondiente en el archivo de grises de la fotografía original. Luego, el valor de gris de ese píxel de la fotografía

original es copiado en la posición del píxel de la ortofoto.

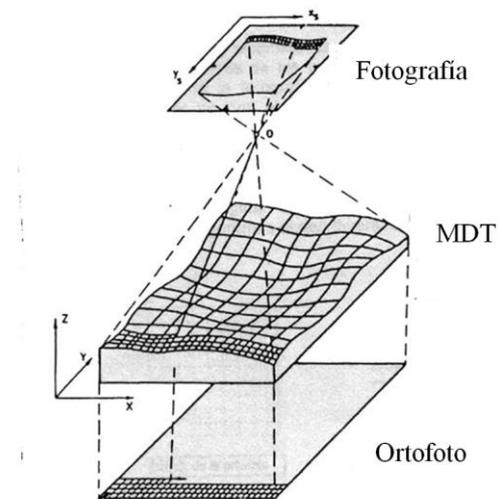


Figura 4: Esquema de generación de una ortofoto.

Esta operación se repite para todos los píxeles de una fila y para todas las filas.

El procedimiento descrito es muy resumido. Uno de los problemas que se presentan es que los centros de los píxeles de la ortofoto no coinciden con los centros de los píxeles del archivo de la fotografía original. Esto se aprecia mejor en la Fig. 5, donde se ve que un píxel de la ortofoto abarca varios píxeles de la fotografía original. Es necesario, por lo tanto, emplear algoritmos matemáticos de interpolación con diversos grados de complejidad. Los más empleados son: "Vecino más próximo" (*nearest neighbour*) que asigna el valor de gris o densidad del píxel más cercano e "Interpolación bilineal" (*bilinear interpolation*) en que el valor de gris del píxel de la ortofoto se determina teniendo en cuenta los valores de gris de los cuatro píxeles vecinos en la fotografía original.

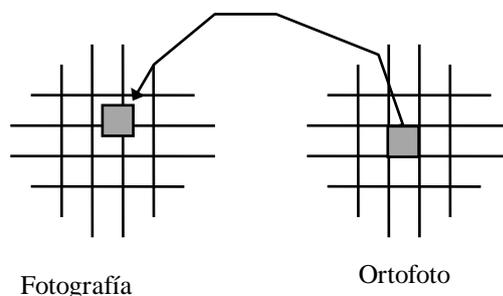


Figura 5: Proceso de interpolación.



Figura 6: Mosaico de Ortofotografías.

6. EJEMPLO PARA SAN MIGUEL DE TUCUMÁN

Se trabajó con un bloque de 20 fotografías distribuidas en dos pasadas. Estas fotografías fueron obtenidas con una cámara digital aérea Ultracam XP del Instituto Geográfico Nacional de Argentina (IGN). Esta cámara genera imágenes de 17.310 x 11.310 píxeles de 6 micras, que para la escala de vuelo empleada (1: 67.000) corresponde a aproximadamente 40 centímetros en el terreno. El procesamiento de compensación del bloque se realizó en la cátedra de Fotogrametría con el software Photomod, de origen ruso. Para ello fue necesario medir una serie de puntos de control en el terreno. Se midieron un total de 34 puntos, convenientemente distribuidos en todo el bloque. Las mediciones se llevaron a cabo con un equipo GPS Trimble 5700 de doble frecuencia del Departamento de Geodesia y Topografía. Para el cálculo de los

vectores se emplearon datos provenientes de la antena GPS de la estación permanente TUC1, que se encuentra en la Dirección General de Catastro de la provincia de Tucumán.

Los resultados de la compensación muestran un Error Cuadrático promedio de 0.19 metros para la componente X, de 0.23 metros para la componente Y, y de 0.34 metros para la componente Z, con errores máximos de 0.40, 0.50 y 0.78 metros, respectivamente.

Una vez realizado el ajuste de las observaciones, se confeccionaron, los Modelos Digitales de Terreno para cada uno de los estereopares, mediante la técnica de correspondencia de imágenes, ya descrita. Fue necesario además, una tarea de edición manual con ayuda de la visión estereoscópica.

Los MDT resultantes se unieron para formar un ensamble continuo (mosaico). La construcción de la ortofoto digital implica un remuestreo o reasignación de los píxeles de la imagen como se

describe en el punto 5. El tamaño de píxel elegido para la ortofoto fue de 0.5 metros y el método de remuestreo adoptado fue el de interpolación bilineal.

El mosaico resultante es geoméricamente equivalente a un mapa (ver Fig. 6). En él se pueden leer coordenadas planimétricas (X e Y) en el sistema del terreno adoptado, proyección Gauss Krüger, marco de referencia POSGAR 98.

La información altimétrica no se obtiene de la ortofoto. Si es necesario puede obtenerse, de curvas de nivel generadas a partir del MDT o del modelo mismo.

El mapa puede alcanzar una escala de 1:20.000, considerando que una tolerancia de 0.1 a 0.2 milímetros en la representación arrojaría, para esta escala, errores admisibles de 2 a 4 metros, muy por encima de los valores registrados.

Podría eventualmente, llegarse a una escala de mapa de 1:10.000 (tolerancias de 1 a 2 metros) aunque habría que analizar la posibilidad de interpretación de la información para esta escala partiendo de una escala de vuelo de 1:67.000.

Resta además, realizar un análisis detallado de la exactitud geométrica de este producto cartográfico.

Cabe aclarar, que la representación aquí descrita se refiere a una ortofoto obtenida a partir de un Modelo Digital a nivel terreno. Si se quisiera representar todos los elementos de una imagen (edificios, árboles, etc.) en su posición planimétrica correcta habría que confeccionar lo que se denomina una "ortofoto verdadera" generada a partir de un Modelo Digital de Superficie (MDS). Este concepto es utópico puesto que siempre existen pequeños objetos que no estarán correctamente cartografiados (Lerma García, 2002).

Otra posibilidad es el relevamiento de cada una de las construcciones para obtener lo que se conoce como Restitución Fotogramétrica, muy empleada en los Catastros donde es fundamental este tipo de información. Este proceso conlleva un tiempo de realización muy grande y debe ser realizado por operadores entrenados en visión estereoscópica lo que implica un costo elevado.

7. CONCLUSIONES

Hoy en día resulta mucho más sencilla la generación de cartografía a través de las técnicas de la Fotogrametría Digital. La ortofoto digital es uno de los procedimientos que mejor se presta a este fin. Tiene además, la ventaja de que al tratarse de un producto digital, es posible aplicarle técnicas de mejora de imagen. Finalmente, debe mencionarse, que la ortofotografía puede implementarse de manera

sencilla, en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

REFERENCIAS

- Carelli, J.A. & J.E. Juliá, Restitución Fotogramétrica y materialización de una escultura, *Mapping* N° 133, 86-87, 2009.
- Juliá, J.E., Las Transiciones en la Fotogrametría,, *DATUM XXI* N° 5, 32-41, 2003.
- Juliá, J. E., *Apuntes de Fotogrametría Analítica*. Publicación de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Tucumán, 1992.
- Konecny, G., *Geoinformation*. Taylor & Francis, Londres, 2003.
- Kraus, K., *Photogrammetry 2nd edition*. Walter de Gruyter, Berlín, 2007.
- Lerma García, J.L., *Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital*. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2002.
- Luccioni, G.M. & J.E. Juliá, Correspondencia de imágenes basada en área, *Mapping* N° 124, 18-22, 2008.
- Wolf, P. R., *Elements of Photogrammetry*. Mc Graw- Hill Book Company, New York, 1983.