

GENERACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DEL TERRENO MEDIANTE PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO DE IMÁGENES AÉREAS.

Mario Martín SANZ-MUÑOZ^a, Juan Martín AGUILAR-VILLEGAS^b, Luis Carlos BRAVO-PEÑA^c

^a Estudiante de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. De las Américas y Av. Universitarios S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México.

^b Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. De las Américas y Av. Universitarios S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México.

^c Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Licenciatura en Geoinformática. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). Cd. Cuauhtémoc Chihuahua.

RESUMEN

La generación de Modelos Digitales de Terreno (MDT) puede realizarse utilizando diferentes métodos e insumos, mediante la digitalización de fuentes análogas, la restitución de pares estereoscópicos de sensores remotos como ASTER, SPOT o fotografías aéreas, y más recientemente con el uso de la tecnología Lidar. El presente trabajo consiste en la generación de un MDT mediante el procesamiento fotogramétrico con alto rigor metodológico de 8 imágenes aéreas de archivo, obtenidas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), con formato de 23cm x 23cm, a escala 1:20,000, con resolución espacial de 18 μm (36 cm en el terreno). El proceso fotogramétrico se llevó a cabo utilizando el Sistema Fotogramétrico Digital (SFD) Photomod Lite 5.1. Las etapas del proceso fotogramétrico consisten en la orientación interna, orientación relativa y orientación absoluta de las imágenes, la construcción y redacción de la Red de Triángulos Irregulares (TIN) y la generación del MDT. Se discute la precisión en cada etapa del proceso con respecto a la precisión estimada en la obtención de información por métodos fotogramétricos.

Palabras clave: Modelo Digital de Terreno (MDT), Procesamiento Fotogramétrico, Red de Triángulos Irregulares (TIN).

ABSTRACT

Generation of Digital Elevation Models (DEM) can be performed using different methods and inputs, through digitalizing of analog sources, photogrammetric restitution of stereopairs of remote sensors as SPOT, ASTER or aerial imagery, and recently, using Lidar technology. The aim of this work is generation of DEM, applying a rigorous photogrammetric process method, using 8 aerial imagery, obtained by Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), format of 23cm x 23cm, 1:20,000 scale, spatial resolution of 18 μm (36cm ground cover). Photogrammetric processing was developed using the Digital Photogrammetric Station Photomod Lite 5.1. The steps of photogrammetric process involves internal orientation, relative orientation and absolute orientation of aerial imagery, construction and redaction of Triangulated Irregular Network (TIN) and generation of DEM. Accuracy assessment of photogrammetric process comparing every process step respect estimated accuracy by photogrammetric methods is discussed.

Keywords: Digital Elevation Model (DEM), Photogrammetric Processing, Triangulated Irregular Network (TIN).

1. INTRODUCCIÓN

La obtención de información sobre imágenes aéreas se ve limitada por un sinnúmero de factores: el tamaño de pixel, la precisión en la medición de puntos sobre la imagen, la escala, altura de vuelo y base de fotografiado son propiedades geométricas que influyen directamente en la precisión final de la información obtenida de las mismas (Cramer, 2006) (Kraus, 2004). Para cualquier método fotogramétrico aplicado a cuestiones prácticas, por razones de confiabilidad y para la determinación del sistema de referencia, la disposición de información de control de campo de alta precisión es necesaria para obtener precisiones a nivel de sub-pixel (Li, Chen, & Baltsavias, 2008).

En el presente trabajo, se pretende comprobar la metodología fotogramétrica para la obtención de datos físico-geográficos de calidad. El objetivo es la generación de un MDT a través del riguroso proceso fotogramétrico de imágenes aéreas de alta resolución espacial, y comparar los resultados obtenidos en las diferentes etapas del proceso, con las prescripciones establecidas por los principios básicos de la fotogrametría en términos de precisión estimada, expresadas por (Cramer, 2006), (Kraus, 2004) y (Li, Chen, & Baltsavias, 2008).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio corresponde a una parte de la zona conurbada de la ciudad de Culiacán, Sinaloa. Se ubica entre los 24°47' a los 24°50' latitud norte, y los 107°20' a los 107°24' longitud oeste, con una altura media de 50 m sobre el nivel del mar, ocupando un área aproximada de 40 km².

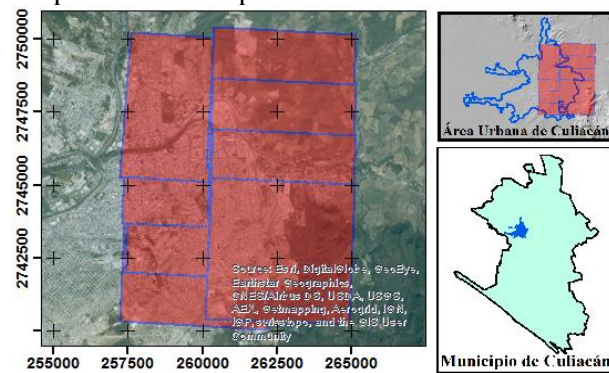


Figura 1. Área de Estudio.

Precisión Teórica en la Determinación de la Posición de un Objeto

La precisión en la determinación de la posición de un objeto sobre una imagen aérea está limitada por diferentes factores geométricos, dividiéndose en dos componentes (horizontal XY y vertical Z). La estimación de la precisión esperada en ambas componentes se determina mediante las siguientes funciones (Cramer, 2006) (Kraus, 2004):

$$\sigma_x = \sigma_y = m_b * \sigma_B$$

$$\sigma_z = m_b \frac{h_g}{B} * \sigma_B$$

Donde:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – Precisión esperada en el eje X, Y y Z respectivamente.

m_b – Denominador de la escala de la imagen aérea.

σ_B – Precisión en la medición de un punto sobre la imagen aérea.

h_g – Altura de vuelo del levantamiento.

B – Línea base de fotografiado.

La escala de la fotografía es 1:20,000, la altura de vuelo es de 3,170 m (10400 ft) y la precisión en la medición de un punto sobre la imagen es de 3 μ m (INEGI). La línea base de fotografiado se obtiene mediante la siguiente función (García, 2002):

$$B = S * (1 - p\%)$$

Donde:

S – Longitud del lado de la imagen en el terreno.

$p\%$ - Sobreposición longitudinal de las imágenes.

Proceso Fotogramétrico de las Imágenes Aéreas

Para el procesamiento fotogramétrico de las imágenes aéreas se utilizó el SFD Photomod Lite 5.1. La creación del proyecto consiste en seleccionar las imágenes aéreas que cubren el área de estudio, definir las rutas de vuelo, los recubrimientos (transversal y longitudinal), y obtener el certificado de calibración de la cámara fotogramétrica. El proceso fotogramétrico consiste en la orientación interna, relativa y absoluta de las imágenes aéreas, la construcción y redacción del TIN y la generación del MDT.

Fase 1. Orientación Interna

La orientación interna de las imágenes aéreas consiste en reconstruir la geometría que existía en

la cámara fotogramétrica en el momento en que se colectaron las imágenes aéreas, (posición de la película fotosensible con respecto al centro de proyección) (Linder, 2003). Para ello, es necesario conocer la distancia focal (f), posición y coordenadas de las marcas fiduciales en el sistema de coordenadas imagen, posición del punto principal de la fotografía (intersección de las marcas fiduciales) y la función de distorsión radial, reportados en el certificado de calibración de la cámara LMK 2015 (INEGI, 1993). La precisión en la orientación interna se obtiene mediante la diferencia de mediciones de distancias sobre las imágenes entre marcas fiduciales opuestas con sus correspondientes distancias calibradas (Wolf & Bon, 2000).

Fase 2. Orientación Relativa

La orientación relativa consiste en reconstruir la geometría del modelo del bloque de imágenes que se obtuvo durante el vuelo fotogramétrico (García, 2002). Para ello, se identificaron 18 pares de rayos homólogos (puntos de enlace) en cada estereopar que cumplen la condición de coplanariedad mediante la fotointerpretación de rasgos geométricos y topológicos sobre las imágenes, utilizando la función del coeficiente de correlación, aceptándose valores superiores al 90% de confiabilidad, resolviendo el modelo en base a las ecuaciones de condición de colinearidad (Wolf & Bon, 2000):

$$x_a = x_0 - f \left[\frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right]$$

$$y_a = y_0 - f \left[\frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right]$$

Donde:

x_a, y_a – Coordenadas imagen del objeto.

x_0, y_0 – Coordenadas del punto principal de la imagen.

f – Distancia focal de la cámara fotogramétrica.

m_{ii} – Funciones de los ángulos de rotación ω, ϕ y K .

En las ecuaciones de condición de colinearidad se encuentran involucradas 9 incógnitas, las coordenadas X_L, Y_L, Z_L de los centros de proyección de las imágenes aéreas, los ángulos de giro ω, ϕ y K conocidos como los elementos de orientación externa, y las coordenadas terreno-objeto

X_A, Y_A, Z_A . Las ecuaciones de colinearidad son linealizadas utilizando el teorema de las series de Taylor y aplicadas en la solución de la orientación relativa, procedimiento que puede consultarse a detalle en (Wolf & Bon, 2000).

Fase 3. Orientación Absoluta

La orientación absoluta involucra la orientación relativa y orientación externa de las imágenes aéreas. En este proceso se aplica la técnica de la aerofototriangulación, la cual, García (op cit) define como “la técnica por excelencia para la disminución del trabajo de campo en las tareas fotogramétricas”. El objetivo es ajustar el bloque de imágenes con respecto al sistema de coordenadas terreno-objeto, obtener las correcciones a las coordenadas de los Puntos de Control de Campo (PC), las coordenadas de los puntos de enlace, la escala del bloque de imágenes y los elementos de orientación externa de las imágenes aéreas. Para realizar el ajuste del bloque se establecieron 21 PC distribuidos lo más homogéneamente posible sobre el área de estudio, de tal forma que en cada imagen aparecen al menos 3 PC formando en lo posible un triángulo equilátero, cubriendo la mayor área posible sobre la imagen. Los PC deben ser fotoidentificables y medidos sobre todas las imágenes en las que aparezca, con valores de confianza mayores al 90%, deben existir en el terreno y ser accesibles a ocupación y observación (García, 2002). Los PC fueron medidos en campo utilizando un receptor geodésico Ashtech Z-Extreme de doble frecuencia, el cual tiene una precisión en la componente horizontal de 5mm+1ppm, y de 10mm+1ppm en la componente vertical (Magellan Corporation, 2001), satisfaciendo las necesidades de precisión del proyecto. Se realizaron sesiones de medición de 40 minutos, con un intervalo de grabación de 15 s, procesando los datos colectados con referencia a la estación CULC de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) de INEGI.

Para el ajuste del bloque se utilizó el método de estereopares independientes ajustado por mínimos cuadrados de aproximaciones sucesivas (García, 1999), aplicando la **Transformación de Coordenadas Conformes en Tres Dimensiones**, que consiste en transformar un sistema tridimensional a otro. Esta transformación resuelve

dos problemas en aplicaciones fotogramétricas: 1) Transformar el modelo (bloque de imágenes) de un sistema arbitrario (orientación relativa) x,y,z , a un sistema georreferenciado X,Y,Z utilizando PC. 2) Conformar un modelo continuo tridimensional agrupando el conjunto de estereopares. Las ecuaciones de transformación se expresan para 7 parámetros independientes, los elementos de orientación externa ω , ϕ y K , un factor de escala s , y 3 parámetros de traslación T_x , T_y y T_z .

Las ecuaciones de transformación se desarrollan en dos etapas: 1) Rotación del sistema. 2) Escala y traslación del modelo. La rotación del sistema se lleva a cabo colocando el origen del sistema de coordenadas X,Y,Z en el origen del sistema de coordenadas arbitrarias x,y,z , desarrollándose 3 ecuaciones de rotación sobre cada uno de los ejes: 1) Rotación del ángulo ω sobre el eje x . 2) Rotación del ángulo ϕ sobre el eje y . 3) Rotación del ángulo K sobre el eje z . El resultado final es la obtención de las siguientes funciones:

$$\begin{aligned} x' &= m_{11}x + m_{21}y + m_{31}z \\ y' &= m_{12}x + m_{22}y + m_{32}z \\ z' &= m_{13}x + m_{23}y + m_{33}z \end{aligned}$$

Donde:

x',y',z' – Solución de la transformación entre el sistema de coordenadas arbitrario x,y,z y el sistema de coordenadas x',y',z' el cual es paralelo al sistema de coordenadas X,Y,Z .

x,y,z – Coordenadas x,y,z respectivamente en el sistema de coordenadas arbitrario.

m_{ii} – Matriz de rotación que está en función de la rotación de los 3 ejes.

La escala y traslación del modelo se lleva a cabo multiplicando las ecuaciones anteriores por el factor de escala y los factores de traslación:

$$\begin{aligned} X &= sx' + T_x = s(m_{11}x + m_{21}y + m_{31}z) + T_x \\ Y &= sy' + T_y = s(m_{12}x + m_{22}y + m_{32}z) + T_y \\ Z &= sz' + T_z = s(m_{13}x + m_{23}y + m_{33}z) + T_z \end{aligned}$$

El desarrollo de este proceso se describe con mayor detalle en (Wolf & Bon, 2000).

Fase 4. Red de Triángulos Irregulares (TIN)

Al obtener el ajuste del bloque de imágenes, es posible trabajar con el principio de la estereoscopia para coleccionar información tridimensional (nodos) de los estereopares (Paine & Kiser, 2012), utilizando el principio de las imágenes coplanares

y el principio de la paralaje vertical, proceso que se conoce como restitución fotogramétrica.

El TIN es una representación de la morfología del terreno en formato vectorial, una serie de aristas basada en vectores que construyen una red de triángulos con forma indefinida a partir de un conjunto de vértices (nodos). En la construcción del TIN es ampliamente utilizado el algoritmo de la triangulación de Delaunay (Li et al., 2004) (ArcGIS Resources). Los nodos son establecidos en puntos de cota máxima, cotas mínimas, y en los puntos que presentan cambios de pendiente, con el objetivo de representar lo más fiel posible, la configuración de la geomorfología.

Fase 5. Generación del MDT

La generación del MDT es un proceso que consiste en convertir el TIN a un formato raster. Un MDT es una representación estadística de la superficie continua del terreno representada por un gran número de puntos con coordenadas conocidas X,Y,Z referenciado a un sistema de coordenadas, representado por la función (Li et al., 2004):

$$Z = f(X, Y)$$

Donde:

Z – Es la coordenada Z para cada pixel.

X, Y – Son las coordenadas X, Y para cada pixel.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fase 1. Orientación Interna

La figura 2 muestra los resultados de la orientación interna manual aplicada a las 8 imágenes aéreas:

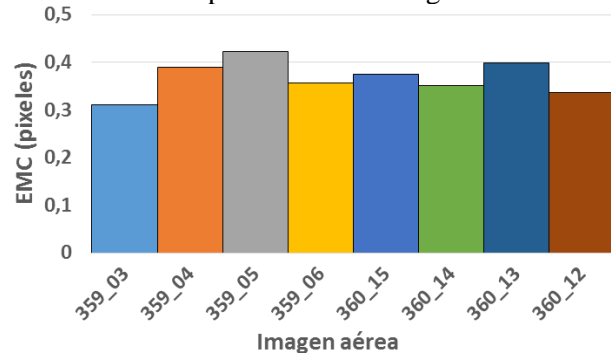


Figura 2. Residuales del EMC en la orientación interna de las imágenes aéreas.

Fase 2. Orientación Relativa

El reporte de la orientación relativa de las imágenes aéreas se divide en dos segmentos; el

primero evalúa los EMC correspondientes a la paralaje vertical para cada estereopar (figura 3). El segundo evalúa el EMC en el eje z para cada triplete del bloque de imágenes (figura 4):

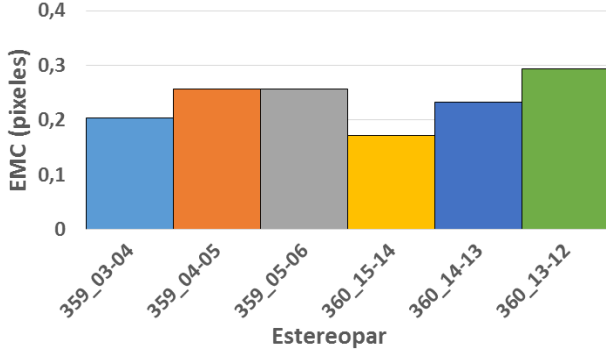


Figura 3. Residuales del EMC en la paralaje vertical en la orientación relativa de las imágenes aéreas para los estereopares.

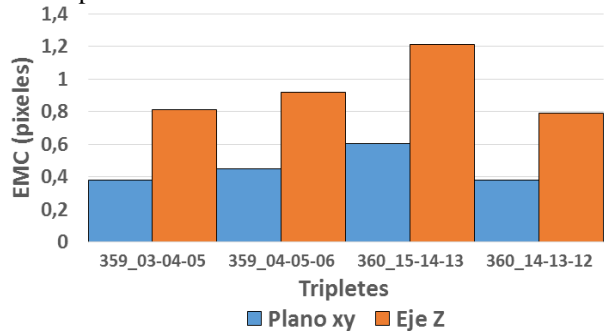


Figura 4. Residuales del EMC en el plano xy y en el eje z en la orientación relativa de las imágenes aéreas para los tripletes.

Fase 3. Orientación Absoluta

Al realizar la orientación absoluta del bloque de imágenes, se obtuvieron las correcciones a las coordenadas de los PC, las coordenadas de los puntos de enlace y los elementos de orientación externa del bloque de imágenes.

Fase 4. Red de Triángulos Irregulares (TIN)

El TIN se construyó con aproximadamente 19,000 nodos, determinándose el EMC altitudinal mediante las discrepancias existentes en la componente vertical entre el TIN y los puntos de la aerofototriangulación.

Fase 5. Generación del MDT

El MDT se generó utilizando un tamaño resolución espacial de 36 cm, atendiendo las recomendaciones técnicas del software Photomod, que corresponde

al tamaño medio del pixel de las imágenes aéreas, con el cual se obtuvieron los mejores resultados. La figura 5 muestra el MDT resultante:

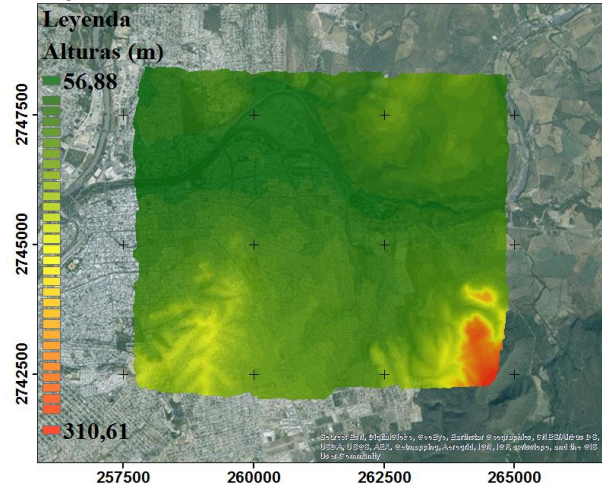


Figura 5. MDT generado, sobrepuesto a imagen del área de estudio.

Los residuales obtenidos en la orientación interna y la orientación relativa son en la mayoría de los casos, al nivel del sub-pixel. En el plano xy, son inferiores a la mitad del pixel en la orientación interna, mientras que para la orientación relativa, el único valor que supera la mitad del tamaño del pixel es en el triplete 360_15-14-13, resultando un EMC de 0.605. En el eje z, los EMC para la paralaje vertical en los estereopares, no superan en ningún caso la mitad del tamaño del pixel, un resultado excelente que contribuirá a mejorar la calidad de los resultados en las tareas subsecuentes de restitución fotogramétrica. Para el caso del EMC en el eje z, se obtienen valores inferiores al tamaño del pixel, excepto nuevamente en el triplete 360_15-14-13, el cual muestra el EMC de 1.213. Este resultado puede atribuirse al hecho que la faja 360 cubre una zona en la que existe una menor densidad de PC, su distribución no es homogénea a consecuencia de que algunas zonas son inaccesibles y hay presencia de zonas montañosas, que contribuyen a la inestabilidad en la calidad de obtención de datos en la componente vertical.

La base de fotografiado resulto de 3170 m, y la precisión estimada en la determinación de la posición de un objeto sobre una imagen aérea de acuerdo a las funciones especificadas por Cramer y Kraus, es de 0.08 m para la componente horizontal xy, y de 0.10 m para la componente vertical z.

Estas precisiones estimadas, suponen un límite en la precisión máxima posible al determinar la posición de un objeto mediante métodos fotogramétricos, y no lograr una precisión a este nivel, no dictamina que el proceso fotogramétrico no se haya realizado correctamente, pues existen diferentes factores que influyen en la calidad de la precisión final de los resultados.

En el caso del ajuste del bloque de imágenes, el EMC obtenido en la componente horizontal xy fue de 0.120 m, un error que se encuentra por encima del error estimado (0.08 m), mientras que en el eje z, el EMC obtenido en el ajuste del bloque es de 0.252 m, el cual se encuentra más del 200% por encima del error estimado (0.10 m).

La precisión del TIN con respecto a los puntos de la aerofototriangulación, se obtuvo con un EMC de 0.123 m, mientras que la precisión obtenida en la generación del MDT con respecto a la superficie del TIN se obtuvo con un EMC de 0.092 m.

4. CONCLUSIONES

Aunque el resultado en la evaluación del MDT contiene una acumulación de errores (orientación interna, relativa y absoluta, ajuste del bloque, construcción del TIN, y la misma generación del MDT), este proceso garantiza que cada una de las fases del proceso fotogramétrico se realice con la rigurosidad y calidad.

En cuestiones de la precisión esperada en la determinación de la posición de un objeto mediante métodos fotogramétricos, se deduce que el rigor metodológico no garantiza los resultados especificados por Cramer y Kraus, y este resultado puede atribuirse a diferentes fuentes de error, tal como la pérdida de calidad de información al convertir las fotografías aéreas a imágenes aéreas, que las mismas presentan raspaduras e imperfecciones, existen considerables diferencias en la escala de niveles de gris entre imágenes consecutivas, y en el certificado de calibración no se reporta la distorsión radial de las mismas.

Sin embargo, las precisiones en la determinación de la posición de objetos sobre las imágenes, han sido del orden de los 12 cm en la componente horizontal, valor inferior a la mitad del tamaño del pixel, y de 25 cm en la componente vertical, un valor inferior al tamaño del pixel, cumpliendo con

las especificaciones de Li et al (2008) y García (2002), que indican que aplicando una metodología rigurosa, los métodos fotogramétricos ofrecen precisiones al nivel del sub-pixel.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de la tesis de licenciatura del primer autor, bajo la dirección del segundo. Se agradecen los apoyos a CONACYT, la Academia Mexicana de Ciencias (XXV Verano de la Investigación Científica, 2015); y Programa PROFAPI (Universidad Autónoma de Sinaloa), para una estancia de verano en el Programa de Geoinformática de la UACJ.

REFERENCIAS

- Cramer, M. (2006). The ADS40 Vaihingen/Enz geometric performance test. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(6), 363–374.
- García, J. L. L. (1999). *Aerotriangulación: Cálculo y Compensación de un Bloque Fotogramétrico*. Universidad Politécnica de Valencia.
- García, J. L. L. (2002). *Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital* (Edición: 1). Valencia: Universitat Politècnica de València.
- INEGI. (1993, Septiembre 2). Certificación de calibraciones de las cámaras. <http://www.inegi.org.mx>
- Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie I: Geometrische Informationen Aus Photographien Und Laserscanneraufnahmen: Bd 1* (7, vollst. bearb. und erw. A.). Gruyter.
- Linder, W. (2003). *Digital Photogrammetry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Li, Z., Chen, J., & Baltsavias, E. (2008). *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book*. CRC Press.
- Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2004). *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology* (Edición: Ill). New York: CRC Press.
- Magellan Corporation. (2001, Febrero). Z-Extreme GPS Receiver, Operation & Reference Manual.
- Paine, D. P., & Kiser, J. D. (2012). *Aerial Photography and Image Interpretation* (3 edition). Hoboken: Wiley.
- Racurs. (2010). Sistema Fotogramétrico Digital PHOTOMOD. Manual de Usuario.
- Wolf, R. P., & Bon, A. D. (2000). *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*, (3rd edition). McGraw-Hill Professional.