

Documentación de sitios arqueológicos usando estereo-imágenes de formato pequeño (cámaras no métricas)

Documentation of archaeological sites using small format stereo-images (non metric cameras)

Jáuregui Manuel*, Jáuregui Luis*, Chacón Leira* y Vílchez José*

Recibido: octubre, 2008 / Aceptado: enero, 2009

Resumen

La documentación de sitios de interés arqueológico tradicionalmente se ha realizado mediante planos a escala grande. Actualmente, el procesamiento de imágenes digitales permite la generación de estereo-ortofotos como una alternativa para realizar su documentación. Una ortofoto es una representación fotográfica de la superficie del terreno a una escala uniforme, conocida, y correctamente georreferenciada. Una estereo-ortofoto está constituida por la ortofoto y su imagen asociada, llamada *estereomate*, permitiendo su observación tridimensional, muy útil en la fotointerpretación y registro de la información geométrica y semántica de un sitio. La estereo-ortofoto puede elaborarse a partir de fotografías aéreas de formato pequeño (FAFP) tomadas con cámaras no métricas. En este caso, los parámetros de orientación interna pueden determinarse mediante procedimientos de calibración, como la transformación lineal directa. Este artículo presenta un procedimiento para elaborar una estereo-ortofoto utilizando FAFP y su aplicación sobre las ruinas del pueblo de San Antonio de Mucuño de Venezuela.

Palabras clave: Herencia cultural; fotogrametría digital; arqueología; Sistemas de Información Geográfica (SIG); interpretación de imágenes; estereo-ortofoto digital.

Abstract

The documentation of archaeological sites has been done traditionally by means of large scale maps. Nowadays, the use of digital images allows the production of digital stereo-orthophotographs as an alternative manner to perform that documentation. A digital orthophoto is a photographic representation of the terrain surface, at a known and uniform scale, and correctly georeferenced where the position of all terrain features correspond with those on a conventional map. When the orthophoto is accompanied by its mate image, named stereomate, its advantages raise significantly, because the image observation can be performed in 3D. This fact makes this product suitable for photo-interpretation. The nature of the digital stereo-orthophoto allows the recording of metrical and non metrical information of a specific site. In this article, a procedure to generate a stereo-orthophoto by using digital small format aerial photographs (SFAP) and an example on the town of San Antonio de Mucuño in Venezuela, is presented.

Key words: Cultural heritage; digital photogrammetry; archaeology; Geographic Information System (GIS); image interpretation; digital stereo-orthophoto.

* Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Instituto de Fotogrametría, Mérida-Venezuela. E-mail: manuel@ula.ve; iluis@ula.ve; leirac@ula.ve; vilchez@ula.ve

1. Introducción

La documentación de los sitios de interés arqueológico tradicionalmente se ha realizado mediante la elaboración de mapas temáticos a escala grande. La producción de mapas temáticos requiere de una correcta georreferenciación de los detalles representados. Una forma de obtener esta georreferenciación es por medio de la ortofoto. Una ortofoto es una representación fotográfica de la superficie del terreno, la cual tiene las mismas características métricas que tiene un mapa de líneas, incluyendo una escala conocida y retícula de coordenadas de referencia. La estereo-ortofoto consiste de un par de imágenes: una ortofoto y su correspondiente imagen asociada llamada *estero-mate*, permitiendo éstas en conjunto la visualización de la superficie del terreno en tres dimensiones (3D). Estos productos cartográficos se generan a través del procesamiento de imágenes digitales basado en los principios de la fotogrametría (Jáuregui, *et al.*, 2005; Jáuregui, *et al.*, 2000). La estereo-ortofoto puede producirse usando fotografías aéreas de formato estándar tomadas con cámaras métricas, o de formato pequeño tomadas con cámaras no métricas. En el caso de cámaras no métricas, los parámetros de orientación interna de la cámara pueden determinarse mediante procedimientos de calibración, como por ejemplo la transformación lineal directa o TLD (Seedahmed y Schenk, 2002).

El uso de estereo-ortofotos digitales ofrece ventajas en la documentación de sitios arqueológicos como: i) se puede

observar en 3D la superficie del terreno, permitiendo la fotointerpretación de los detalles; ii) las características extraídas mediante la fotointerpretación están georreferenciadas; iii) características geométricas de la superficie del terreno como distancias, áreas y alturas, pueden medirse sobre la estereo-ortofoto; iv) la información extraída, por estar georreferenciada, puede integrarse a una base de datos geoespacial, así como nueva información levantada en campo, de forma tal que pueda ser manejada por un Sistema de Información Geográfica (SIG).

2. La fotografía aérea de formato pequeño

Las fotografías aéreas tomadas con cámaras de formato de película de 35 mm y 70 mm, y cámaras digitales de aficionados se conocen como fotografía aérea de formato pequeño (FAFP). El uso de este tipo de formato fotográfico no ha tenido aceptación en los levantamientos fotogramétricos a causa de sus características no métricas, limitándose su principal aplicación en el campo de la fotointerpretación. Por lo tanto, para la extracción de información métrica se hace necesario la calibración de estas cámaras, lo cual consiste en la determinación de su distancia principal, de los factores de distorsión y de la posición del punto principal del plano imagen (Seedahmed y Schenk, 2002; Warner *et al.*, 1996). Los métodos digitales de calibración han permitido la determinación de los parámetros de orientación interior y exterior de la cámara

de una forma asequible, expandiendo el potencial de uso de la FAFP en levantamientos de áreas pequeñas, donde el uso de la fotografía de formato estándar no es competitivo económicamente.

3. La transformación lineal directa (TLD)

Una forma de relacionar directamente los puntos fotografiados del terreno con sus puntos correspondientes en el plano imagen de una cámara no métrica, es a través de la transformación lineal directa (TLD), la cual permite determinar simultáneamente los parámetros de orientación internos y externos de la cámara para el momento de la toma de la ima-

gen (Jáuregui, *et al.*, 2004; <http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html>)

En la figura 1 puede observarse la proyección central de un punto P del terreno sobre una imagen fotográfica (plano del negativo) en p' , con centro de proyección O (lente de la cámara). Cuando se digitaliza esta imagen se proyecta nuevamente sobre otro plano (plano de la imagen digital). El sistema X,Y,Z es el marco de referencia del terreno y el sistema U,V,W es el del plano de la imagen digital. El punto P con coordenadas en el terreno (x,y,z) se proyecta como el punto p en el plano de la imagen digital con coordenadas (u,v,o) . El centro de proyección O se proyecta ortogonalmente sobre el plano de la imagen digital en el punto o (punto principal), con coordenadas (u_o,v_o,o) .

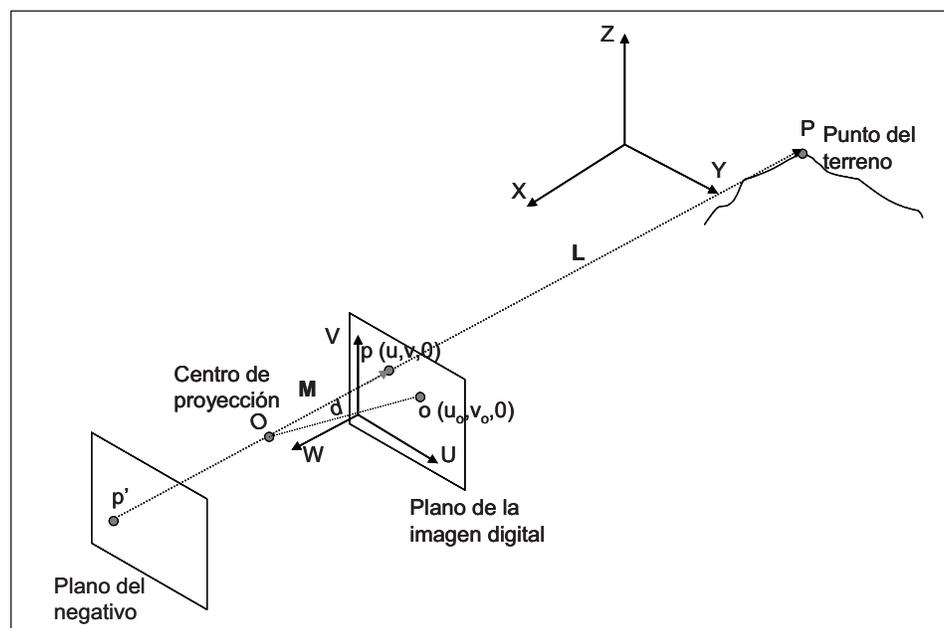


Figura 1. Proyección central del punto P del terreno sobre el plano del negativo

La distancia entre O y o se conoce como distancia principal equivalente de la imagen digital, denotada d. Nótese que los puntos P, p, y O son colineales, condición fundamental para el método de la TLD.

Los puntos O de coordenadas (x_o, y_o, z_o) y P de coordenadas (x, y, z) en el sistema X, Y, Z, definen el vector **L** $[x - x_o, y - y_o, z - z_o]$. Los puntos O de coordenadas (u_o, v_o, d) y p de coordenadas (u, v, o) en sistema U, V, W definen el vector **M** $[u - u_o, v - v_o, -d]$. Como **M** y **L** son colineales, entonces se cumple la siguiente relación:

$$\mathbf{M} = k \mathbf{L} \quad (1)$$

Donde k es un factor de escala.

Si se expresa el vector **L** en el sistema U, V, W, (1) queda como:

$$\mathbf{M} = k \mathbf{R} \mathbf{L} \quad (2)$$

Donde R es una matriz de rotación para transformar desde el sistema X, Y, Z y U, V, W, y tiene la forma:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La expresión (2) en forma matricial queda como:

$$\begin{bmatrix} u - u_o \\ v - v_o \\ d \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ z - z_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

La ecuación (4) puede expresarse como

$$\begin{aligned} u - u_o &= k[r_{11}(x - x_o) + r_{12}(y - y_o) + r_{13}(z - z_o)] \\ v - v_o &= k[r_{21}(x - x_o) + r_{22}(y - y_o) + r_{23}(z - z_o)] \\ d &= k[r_{31}(x - x_o) + r_{32}(y - y_o) + r_{33}(z - z_o)] \end{aligned} \quad (5)$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación (5) el factor k para el punto P queda como:

$$k = \left[\frac{-d}{r_{31}(x - x_o) + r_{32}(y - y_o) + r_{33}(z - z_o)} \right] \quad (6)$$

Cabe destacar que las coordenadas del plano de la imagen digital (u, v, u_o, v_o) están expresadas en unidades de longitud continuas (por ejemplo, como mm); en tanto que las del sistema de digitalización usa unidades discretas como el pixel. En consecuencia, la ecuación (5) puede expresarse como:

$$\begin{aligned} u - u_o &= \left[\frac{d}{\lambda_u} \frac{r_{11}(x - x_o) + r_{12}(y - y_o) + r_{13}(z - z_o)}{r_{31}(x - x_o) + r_{32}(y - y_o) + r_{33}(z - z_o)} \right] \\ v - v_o &= \left[\frac{d}{\lambda_v} \frac{r_{21}(x - x_o) + r_{22}(y - y_o) + r_{23}(z - z_o)}{r_{31}(x - x_o) + r_{32}(y - y_o) + r_{33}(z - z_o)} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Donde λ_u, λ_v corresponden a los factores de conversión para los ejes U y V, respectivamente. Arreglando la ecuación (7) queda como:

$$\begin{aligned} u &= \left[\frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \right] \\ v &= \left[\frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Donde los coeficientes L_1, L_2, \dots, L_{11} se conocen como los parámetros de la TLD, y los cuales expresan las relaciones entre el marco de referencia del terreno y el marco de referencia del plano de la imagen digital.

4. Generación de la estereo-ortofoto digital

Para la generación de la estereo-ortofoto digital se parte de la imagen digital a ortoproyectar referenciada en el sistema U,V,W, y de un MDET correspondiente al área fotografiada, referenciado en el sistema X,Y,Z. Los productos a obtener son dos imágenes: la ortofoto y la *estereomate*, cuyas coordenadas están expresadas en el marco de referencia del terreno X, Y, Z.

El esquema del procedimiento usado para la generación de la estereo-ortofoto se muestra en la figura 2. Cada etapa del procedimiento se explica en detalle en las próximas secciones.

4.1 Determinación de los parámetros de orientación internos y externos de la cámara fotográfica

En esta fase se determinan mediante la TLD tanto la geometría y características internas de la cámara (parámetros internos), como la localización y orientación de la cámara en relación al momento de la toma de una imagen (parámetros externos), en el marco de referencia del terreno. Estos parámetros son indispensables para la extracción de información métrica del terreno (3D) a partir de imágenes (2D).

A partir de las coordenadas de terreno de los puntos de control y sus correspondientes en la imagen digital, se determi-

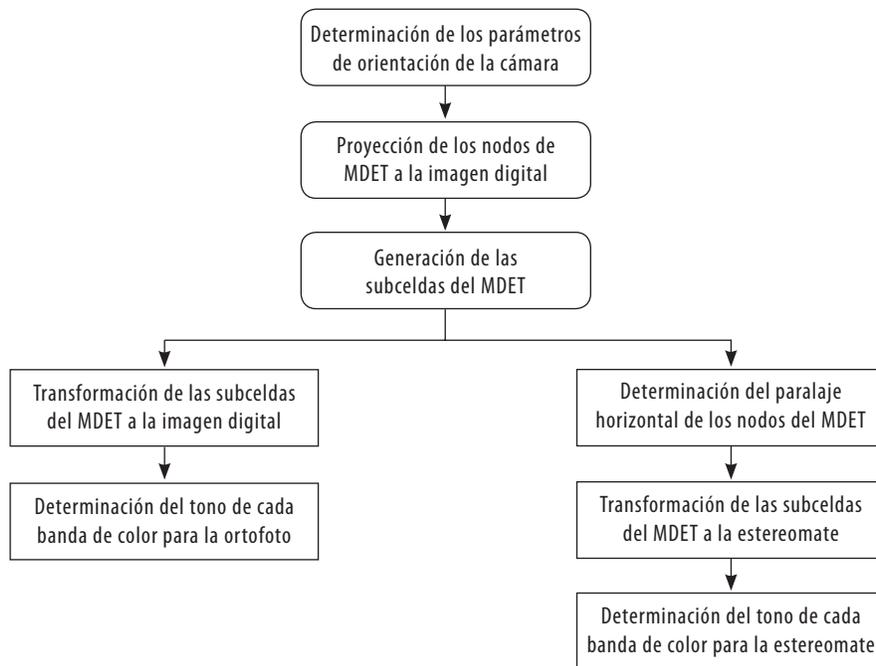


Figura 2. Esquema del procedimiento para generar una estereo-ortofoto

nan simultáneamente los parámetros internos de la cámara como son la distancia focal (d), coordenadas del punto principal de la imagen digital (u_o, v_o), y los parámetros externos como son la matriz de rotación R y la posición del centro de proyección (x_o, y_o, z_o). Con estos parámetros, las coordenadas de cualquier punto de la imagen digital pueden transformarse al sistema de coordenadas del terreno y viceversa.

4.2 Proyección del MDET al sistema de coordenadas de la imagen

Las coordenadas de los nodos del MDET, las cuales están referidas al marco de referencia del terreno se transforman al sistema de la imagen digital usando los parámetros determinados en la fase 4.1.

4.3 División de las celdas del MDET en subceldas

Generalmente, el tamaño de las celdas del MDET proyectadas sobre la imagen digital no coincide con el del píxel de la imagen, por lo tanto éstas deben dividirse en subceldas con ese mismo tamaño.

En esta parte del procedimiento se tienen una bifurcación; por un lado, las etapas que conducen a generar la ortofoto, y por el otro, aquellas para generar la *estereomate*. Ambas imágenes constituyen la estereo-ortofoto.

4.3.1 Transformación de las subceldas del MDET a la imagen digital

La correspondencia geométrica entre cada subcelda del MDET y la imagen di-

gital se determina mediante una transformación proyectiva, considerando cada celda del MDET como una superficie plana (Figura 3), (Jáuregui *et al.*, 2000). Los parámetros de la transformación proyectiva se determinan a partir de las coordenadas de los cuatro nodos de la celda del MDET, tanto en el marco de referencia del terreno como en el sistema de la imagen digital. De esta forma, cada subcelda del MDET se proyecta con estos parámetros, a la imagen digital.

4.3.2 Determinación del valor del tono para la ortofoto

Para producir una ortofoto se separa en tres bandas (rojo, verde y azul) la imagen a color. Para cada banda se asigna un valor de tono a cada subcelda del MDET, la cual ha sido proyectada sobre la imagen digital en la etapa 3.3.1.1. Generalmente, las subceldas proyectadas del MDET no coinciden con las posiciones del píxel, presentándose un solapamiento sobre varios píxeles. Por lo tanto, lo que se hace es interpolar el valor del tono a partir de los valores de tono de los píxeles de la imagen cubiertos por la subcelda. En este caso se usó el método del vecino más cercano.

4.3.3 Cálculo de los paralajes horizontales de los nodos de las celdas del MDET

Los paralajes horizontales de cada nodo de las celdas del MDET se determinan en el marco de referencia del terreno con respecto al plano de referencia para las alturas, el cual se establece de manera tal que contenga el valor mínimo de altura Z (cota mínima) del MDET. Con estos pa-

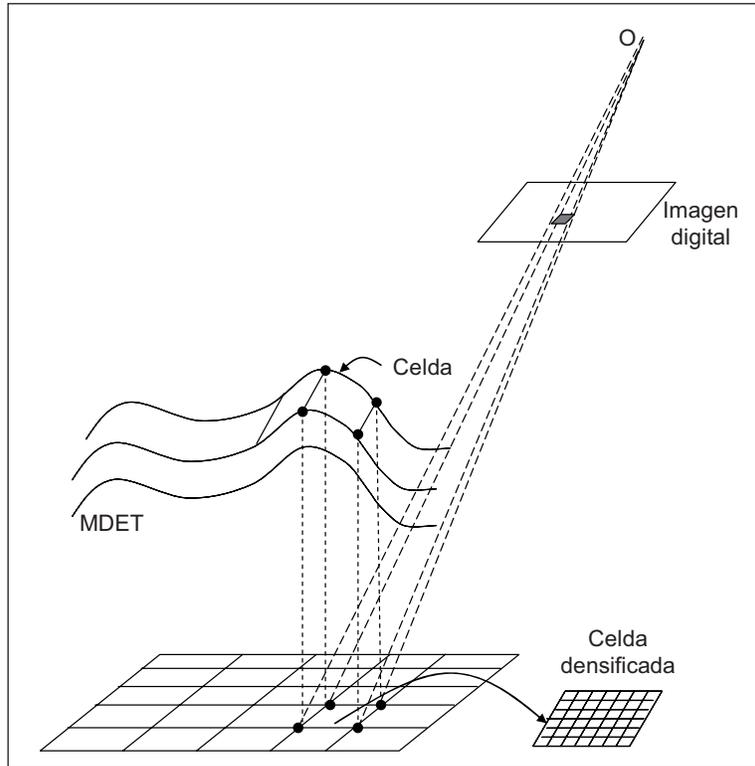


Figura 3. Densificación del MDET y su proyección sobre la imagen digital

ralajes y asumiendo una base fotográfica que garantice una adecuada visión estereoscópica, se determina para cada nodo de la celda, el paralaje horizontal P_x mediante la ecuación (9).

$$P_{x_i} = \frac{(Z_{p_i} - Z)}{[(Z_0 - Z) - (Z_{p_i} - Z)]} B \quad (9)$$

Donde
 Z_{p_i} : altura del nodo i
 Z : altura del plano de referencia (altura mínima del MDET)
 Z_0 : altura del centro de proyección
 B : base fotográfica de la estereomagen

($B=Z_0-Z/5$ garantiza una adecuada visión estereoscópica)

Las coordenadas de cada nodo del MDET proyectado en la *estereomate*, X' , se determina mediante la ecuación (10)

$$X'_i = X_j + P_{x_i} \quad (10)$$

Donde
 X'_j : Coordenada en el eje X del nodo j proyectado en la *estereomate*
 X_j : Coordenada en el eje X del nodo j en la ortofoto
 P_{x_j} : Paralaje horizontal del nodo j

4.3.4 Transformación de las subceldas del MDET a la estereomate

Con la posición de los nodos del MDET en la ortofoto y en la *estereomate*, se hallan los parámetros de la transformación proyectiva entre ambos sistemas de coordenadas, con los cuales se determina la posición de cada subcelda de la ortofoto en la *estereomate*, generando un arreglo con el mismo número de subceldas pero de diferentes tamaños y formas (Figura 4). Obviamente cada subcelda deformada tiene asociado los valores de tono del correspondiente píxel en la ortofoto.

4.3.5 Determinación del valor del tono para las bandas de color de la estereomate

La *estereomate* se crea a partir de los valores radiométricos de la ortofoto. Debido a la deformación geométrica de la subcelda de la *estereomate*, el número de píxe-

les de ambas imágenes es diferente. Por lo tanto, para generar la *estereomate* se requiere un arreglo de píxeles a la misma resolución que los de la ortofoto. Puede suceder que el número de píxeles de una fila en la imagen de la *estereomate* sea diferente a los de la fila correspondiente en la ortofoto, teniéndose entonces que establecer una relación entre las subceldas de la *estereomate* y los píxeles, a fin de asignar el respectivo valor de tono.

5. Aplicación

El procedimiento fue usado para producir una estereo-ortofoto digital del pueblo en ruinas de San Antonio de Mucúño, localizado en una zona montañosa del estado Mérida (Venezuela), fundado en 1620 y abandonado a principios del siglo XIX. Por razones no completamente claras,

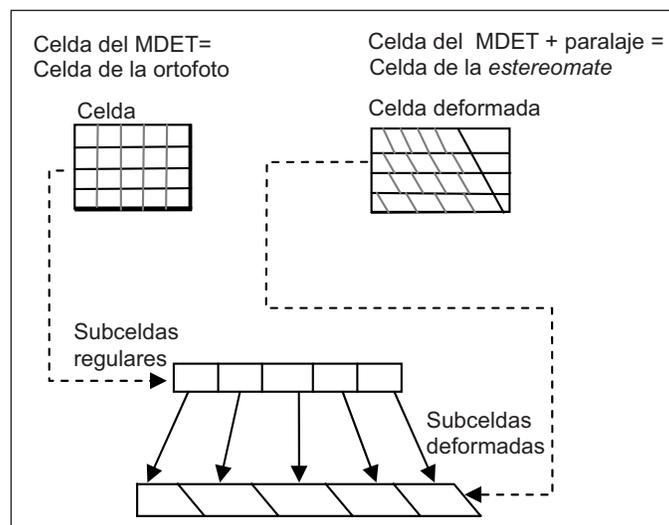


Figura 4. Correspondencia entre el MDET y la *estereomate*

la población fue mudada al sector Santa Juana, actualmente el pueblo de San Antonio de Acequias, municipio Campo Elías. La forma como fue abandonado el pueblo permitió que se conservaran diferentes estructuras arquitectónicas, siendo en la actualidad el único pueblo de doctrina observable en nuestro país. El conjunto de ruinas de San Antonio de Mucuño fue declarado patrimonio histórico de la nación en el año 1991.

Debido a las características topográficas del área y a la disponibilidad de un presupuesto reducido para realizar el levantamiento, se tomaron fotografías aéreas de formato pequeño. Como se tenía el levantamiento topográfico del área realizado seis años atrás, se pudo hacer una comparación entre éste y la estero-ortofoto.

En la zona fotografiada se establecieron con métodos convencionales diez y ocho (18) puntos de control, los cuales fueron señalizados en el terreno con dos círculos concéntricos antes de realizar el

vuelo, quedando claramente definidos en las imágenes. Estos puntos son fundamentales en la elaboración de la estero-ortofoto.

Se usó una cámara Hasseblad 553 (formato 70 mm) con lentes de $f = 40$ mm, montadas sobre un soporte especialmente acoplado en el portaequipajes de la avioneta Cessna 182. Se sobrevoló la zona con tres pases, con alturas entre 8000 y 10000 pies sobre el nivel del mar.

La escala de las fotografías fue 1:30.000. El área tiene alturas entre 1200 m y 2000 m sobre el nivel del mar, generando grandes desplazamientos por relieves. El MDET se generó a partir de un plano con curvas de nivel a intervalos de 2 m (Figura 5). El tamaño de las celdas del MDET fue de 2 m. Las fotografías aéreas fueron digitalizadas con un escáner de resolución óptica de 1200 dpi.

Los parámetros de orientación se determinaron usando siete (7) puntos de control cuyas coordenadas, tanto en el

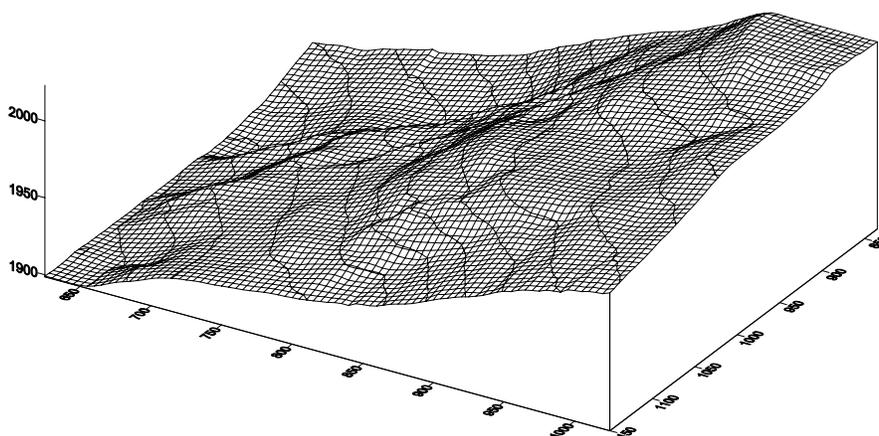


Figura 5. El MDET del área de aplicación, visto en perspectiva

marco de referencia del terreno como en la imagen digital, eran conocidas, y las ecuaciones de la TLD (Cuadro 1).

Conocidos estos parámetros, los nodos del MDET se proyectaron sobre la imagen digital usando las ecuaciones 6, obteniéndose la imagen ortorectificada que se muestra en la figura 6, y su correspondiente *estereomate*. En la figura 7 se muestra el ortofotomapa de la zona.

6. Conclusiones

El estereo-ortofoto elaborada sobre San Antonio de Mucúño contribuyó a obtener gran cantidad de información de las características de la zona, partiendo de imágenes fotográficas de formato pequeño, constituyéndose éstas en un instrumento de gran valor para el levantamiento de zonas de interés arqueológico.

Cuadro 1. Determinación de los parámetros de la TLD

Puntos de control	Sistema de la imagen digital (píxeles)*		Marco de referencia del terreno (m)		
	x	y	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	-239	979	881.34	930.02	2009.9
2	330	1096	943.61	1004.7	2011.6
3	727	467	1063.26	967.77	1992.1
4	390	177	1048.58	893.89	1982.7
5	111	-169	1049.99	817.40	1959.5
6	-459	-670	1027.52	681.16	1924.1
7	-72	174	986.96	844.17	1976.3

* Los valores están reducidos al centro de la imagen

$$\begin{aligned}
 L_1 &= -0.03237767788383 & L_2 &= -0.02642760334474 & L_3 &= -0.00002463502392 \\
 L_4 &= 0.10853484313026 & L_5 &= 0.02606740823882 & L_6 &= -0.03344834559532 \\
 L_7 &= -0.00612228915253 & L_8 &= 9.13022437271741 & L_9 &= 0.00004654725953 \\
 L_{10} &= -0.00014407270894 & L_{11} &= -0.00108518635547 & &
 \end{aligned}$$

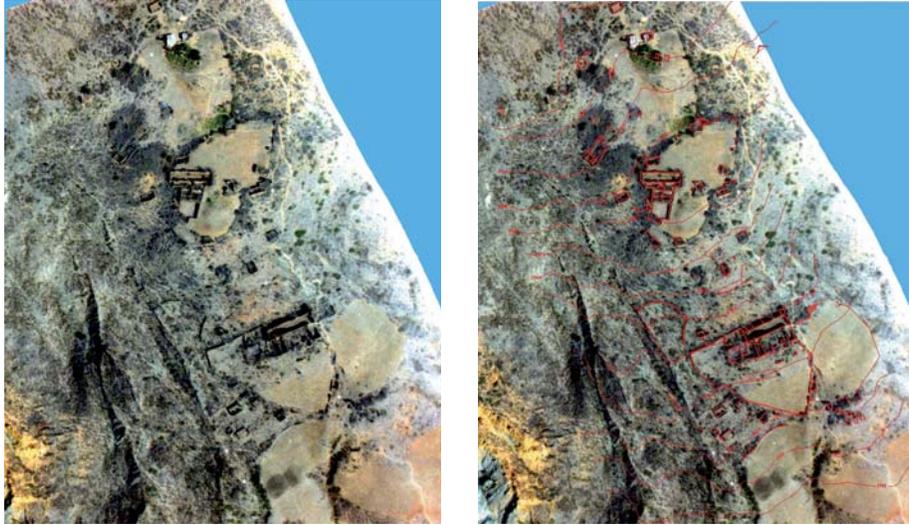


Figura 6. Derecha: Superposición de los planos de líneas de las construcciones en ruinas y de las curvas de nivel sobre el ortofoto de Mucuño. Izquierda: La estereomate digital

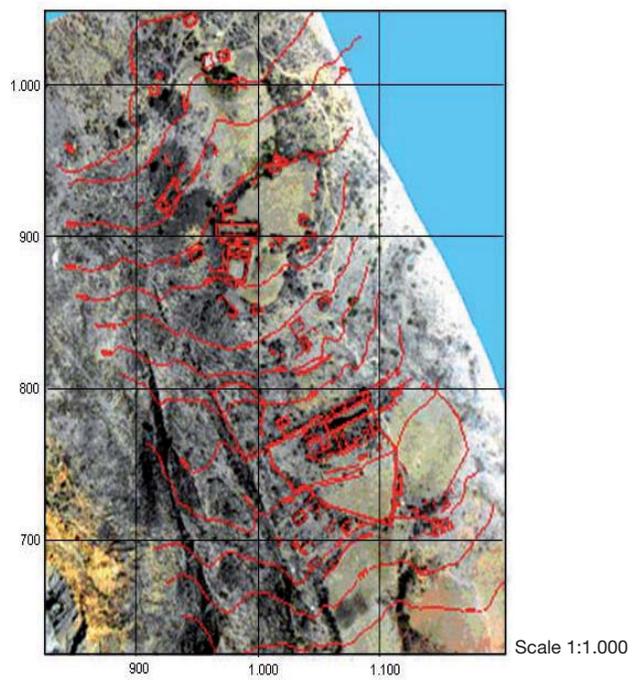


Figura 7. Superposición de los planos de líneas de las construcciones en ruinas y de las curvas de nivel sobre el ortofotomapa de Mucuño

El procedimiento de orto-rectificación realizado sobre una zona de relieve montañoso, produjo resultados satisfactorios comparados con el levantamiento de campo realizado tiempo atrás en el área, lo cual fortalece su uso.

La estereo-ortofoto provee un modelo virtual tridimensional de la superficie del terreno del área, lo cual puede ser usado para la fotointerpretación. Anotaciones y mediciones geométricas pueden realizarse directamente sobre la ortofoto, como se haría sobre un mapa detallado de la zona. El uso de las estereo-ortofotos permite la geo-referenciación directa de la información extraída de la fotointerpretación. Así mismo, pueden usarse como mapa base para la creación de una base de datos geográfica del sitio.

7. Agradecimiento

Este artículo es el resultado del desarrollo de un proyecto (código I-901-05-01-02-A) apoyado por el Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela. Este soporte se agradece altamente.

8. Referencias citadas

JÁUREGUI, M.; JAUREGUI, L.; VÍLCHEZ, J. y L. CHACÓN. 2000. Digital orthophoto generation. *Proceedings of the XIXth Congress of the ISPRS*. 400-407. Amsterdam-Holanda.

JAUREGUI, M.; JAUREGUI, L.; VÍLCHEZ, J. y L. CHACÓN. 2004. Digital stereo-orthophotos of archaeological sites from small-format aerial photographs. *Proceedings of the XX Congress of the ISPRS*. 461-466. Istanbul-Turquía.

JÁUREGUI, M.; JAUREGUI, L.; CHACÓN L. y J. VÍLCHEZ. 2005. *Generación de estereoimágenes mediante rectificación digital*. **Revista Ciencia e Ingeniería**. 26(2): 65-73.

[ON LINE] <http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html> DLT Method.

SEEDAHMED, G. and T. SCHENK. 2002. Retrieval of the Calibration Matrix from the 3-D Projective Camera Model. *15th International Conference on Vision Interfase*. 282-287. Calgary-Canada. (May 27-29).

WARNER, W.; GRAHAM, R. and R. READ. 1996. *Small Format Aerial Photography*. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 51(6): 316-317.