

Calibración geométrica de escáner láser terrestre mediante software específico

REVISTA **MAPPING**
Vol. 22, 158, 30-39
marzo-abril 2013
ISSN: 1.131-9.100

D. García San Miguel¹
J. L. Lerma García²
S. Navarro Tarín³

Resumen

El empleo de tecnologías de escaneado láser para el registro masivo de información se ha visto tremendamente impulsado en estos últimos tiempos. Del mismo modo que cualquier otro instrumento topográfico o geodésico, estarán sujetos a sistematismos varios e imperfecciones. Estos sistematismos quedarán modelizados por un conjunto de parámetros adicionales de orientación interna, cuya obtención será posible gracias a la implementación de un software de cálculo específico. Se mostrarán los pasos a seguir para la consecución de la calibración geométrica de un escáner láser Leica HDS3000 de tiempo de vuelo, y se cuantificarán las mejoras logradas a posteriori.

Abstract

The use of laser scanner technology to capture massive information has been tremendously boosted in recent times. In the same way as any other surveying or geodetic instrument, they are subjected to systematic errors and imperfections. These systematic errors will be modeled by a set of additional parameters of internal orientation through the implementation of specialized software. The different steps carried out to determine the terrestrial laser scanning Leica HDS3000 geometric calibration in flight time will be presented. The a posteriori improvements will also be quantified.

Palabras clave: autocalibración, calibración geométrica, escáner láser, precisión, tiempo de vuelo.

Key words: selfcalibration, geometric calibration, laser scanner, accuracy, time of flight.

(1) Universitat Politècnica de València. Grupo de Investigación de Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE).

dagarsa4@topo.upv.es

(2) Universitat Politècnica de València. Grupo de Investigación de Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE).

jllerma@cgf.upv.es

(3) Universitat Politècnica de València. Grupo de Investigación de Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE).

sannata@upvnet.upv.es

Recepción 01-06-2012
Aprobación 31-07-2012

1. INTRODUCCIÓN

En cualquier ámbito científico resulta imperativo contar con un instrumental totalmente carente de sistematismos, ya sean éstos fruto de imperfecciones en su fabricación, desgaste, o impactos. El conocimiento y determinación de estos errores se aborda habitualmente con objeto de subsanarlos o mitigarlos al máximo posible. Este proceso en el que los errores instrumentales son eliminados de los observables se denomina habitualmente *calibración geométrica*. Así mismo, el uso de equipos de escaneado láser cada día está más presente en múltiples y dispares campos de conocimiento, como construcción, patrimonio, industria o medio ambiente. Dada la velocidad de captura de información y el volumen de la misma, resulta imperativo que dicho instrumental proporcione al usuario coordenadas totalmente fiables, exentas de errores evitables. La calibración geométrica de escáneres láser (también llamada *Autocalibración* cuando es llevada a cabo en el propio lugar donde se realiza la toma de datos) se aborda generalmente desde dos perspectivas, diferenciadas básicamente por el tipo de entidad que va a registrarse y sobre la que se sustentará el modelo matemático posterior: métodos basados en entidades planas, y métodos basados en entidades puntuales. El presente artículo seguirá la segunda de las metodologías citadas, requiriéndose para ello la materialización de una red de puntos de coordenadas conocidas (red de apoyo), que constituirán precisamente esas entidades puntuales. Se realizarán medidas con el instrumento láser desde distintas posiciones, planteándose posteriormente un ajuste mínimo cuadrático conjunto con el que se pretende obtener un conjunto óptimo de *parámetros adicionales (PADs) de calibración (parámetros de orientación interna)* definitorio de los sistematismos propios del dispositivo de registro.

La calibración de equipos de escaneado láser ha sido tratada por diversos autores obedeciendo a distintos modelos de error. De entre los diferentes modelos de error planteados, el presente artículo seguirá el propuesto por Lichti [LIC06-2], formado por un total de 21 parámetros de orientación interna, divididos en grupos: 9 PADs para la distancia medida (ρ), 7 para el ángulo horizontal (Θ) y 5 para el ángulo de elevación (α). Algunos de estos parámetros responden a sistematismos clásicos de las estaciones totales ([LIC06-2]), como el error de bajada de bandera en la determinación de la distancia, o la falta de perpendicularidad entre los tres ejes del sistema instrumental (*parámetros físicos*), mientras que otros tantos se han obtenido mediante experimentación y análisis de datos test (*parámetros empíricos*) (véase [LIC06-2, LIC09]).

Lichti, Brustle & Franke [LIC07] presentan el modelo inicial y ponen a prueba el mismo con un escáner *Surphaser 25HS*. La calibración por entidades planas es puesta en práctica por Gielsdorf, Rietdorf y Gruendig [GIE04] (calibración de un dispositivo prototipo) y por Bae & Lichti [BAE06]. Parian y Gruen [PAR05] aplican una extensión del modelo planteado para cámaras panorámicas en un escáner láser *Imager 5003*. El proceso de calibración por entidades puntuales también ha sido objeto de análisis: Kersten et al. [KER05] con errores de distancia y del eje de muñones en un escáner láser *MENSI GS100*; Schneider [SCH09] plantea un modelo alternativo para calibración de un equipo *Riegl LMS-Z420i*; González-Aguilera et al. [GON11] plantean un modelo de ocho parámetros físicos evaluado en dos equipos, un *Riegl LMS-Z390i* y un *Trimble GX200*.

Los resultados obtenidos dependerán tanto del estado del instrumento, como de las propias características del mismo (campo de vista, compensador de doble, eje, etc.). Ante la inexistencia de un modelo universal o un software comercial, la presente investigación pretenderá la implementación de diversas herramientas estadísticas que permitirán al usuario obtener el conjunto de parámetros de calibración más significativos y que mejor solución aporten, todo ello desde un prisma riguroso estadísticamente hablando. El desarrollo de esta herramienta informática se ha llevado a cabo por los miembros del *Grupo de Investigación de Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE)* de la *Universitat Politècnica de València*. El presente artículo se estructura de la siguiente forma: en primer lugar, se presenta una exposición del modelo matemático completo; a continuación, el instrumental y las metodologías desarrolladas; y por último, los resultados obtenidos para el caso del escáner láser Leica HDS3000 con su correspondiente discusión; el artículo finaliza con unas conclusiones y recomendaciones finales.

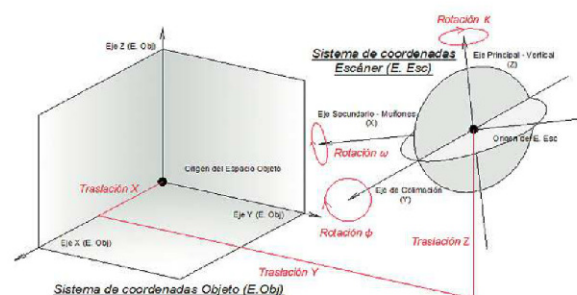


Figura 1. Representación gráfica de la transformación sólido rígido 3D. Mediante la aplicación de los seis parámetros de orientación externa los sistemas de coordenadas objeto y escáner se ubicarán de forma superpuesta

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1 Orientación externa

Tal y como se ha comentado anteriormente, la calibración basada en entidades puntuales requerirá la materialización de una red de puntos de coordenadas conocidas (véase 3.2). De la posterior medición de dichos puntos con el equipo láser y su correspondiente relación con sus homólogos medidos previamente y calculados por técnicas microgeodésicas se obtendrá el conjunto de PAdS pretendido. Se denominará *sistema objeto* al sistema tridimensional determinado por la nube de puntos de referencia (o puntos de apoyo), y quedará relacionado con el *sistema escáner* (sistema 3D cuyo origen queda situado en el propio origen de medidas del instrumento, y cuyos ejes coinciden con los propios ejes principal, secundario y colimación del láser) mediante una transformación *sólido rígido 3D* (véase Figura 1). Dicha transformación se compone de tres giros, uno sobre cada uno de los ejes del triedro, y tres traslaciones. Este conjunto de parámetros de transformación entre ambos sistemas se denomina *parámetros de orientación externa*. Cada punto implicado proporcionará una terna de ecuaciones tal que (Eq. 1) [LER02]:

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = R_\kappa R_\varphi R_\omega \begin{Bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq. 1})$$

Donde:

- (x_i, y_i, z_i) son las coordenadas del punto 'i' en el espacio escáner.
- R_ω, R_θ y R_k son las matrices de rotación sobre los tres ejes (X, Y, Z, respectivamente)
- (X_i, Y_i, Z_i) son las coordenadas del punto 'i' en el espacio objeto.
- (X_s, Y_s, Z_s) son las coordenadas del origen del sistema escáner en el espacio objeto.
- Los parámetros de translación entre ambos orígenes vendrán dados por las diferencias $(X_i - X_s)$, $(Y_i - Y_s)$ and $(Z_i - Z_s)$.

2.2 Orientación interna

El error manifestado en un punto (x_i, y_i, z_i) quedará dividido en tres componentes: errores en distancia ($\Delta\rho$), ángulo horizontal ($\Delta\theta$) y ángulo de elevación sobre el plano del horizonte ($\Delta\alpha$). Cada punto del modelo, aportará al sistema tres ecuaciones tales que (Eq. 2-4):

$$\rho + \varepsilon_\rho = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\theta + \varepsilon_\theta = \text{atan} \frac{x_{ij}}{y_{ij}} + \Delta\theta \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\alpha + \varepsilon_\alpha = \text{atan} \left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}} \right) + \Delta\alpha \quad (\text{Eq. 4})$$

Donde:

- ρ, θ y α son los observables de distancia, ángulo horizontal y elevación.
- $\Delta\rho, \Delta\theta$ y $\Delta\alpha$ son los sistematismos asociados a sus respectivos observables.
- (x_i, y_i, z_i) son las coordenadas del punto 'i' en el espacio escáner.
- ε son las magnitudes residuales, correspondientes a cada ecuación.

Los diferentes sistematismos se definen en las ecuaciones 5-7 [LIC06-2]:

$$\Delta\rho = a_0 + a_1 \rho_{ij} + a_2 \sin(\alpha_{ij}) + a_3 \sin\left(\frac{4\pi \rho_{ij}}{U_1}\right) + a_4 \cos\left(\frac{4\pi \rho_{ij}}{U_1}\right) + a_5 \sin\left(\frac{4\pi \rho_{ij}}{U_2}\right) + a_6 \cos\left(\frac{4\pi \rho_{ij}}{U_2}\right) + a_7 \sin(4\theta_{ij}) + a_8 \cos(4\theta_{ij})$$

$$\Delta\theta = b_1 \sec(\alpha_{ij}) + b_2 \tan(\alpha_{ij}) + b_3 \sin(2\theta_{ij}) + b_4 \cos(2\theta_{ij}) + b_5 \theta_{ij} + b_6 \cos(3\alpha_{ij}) + b_7 \sin(4\alpha_{ij})$$

(Eq. 5)

(Eq. 6)

$$\Delta\alpha = c_0 + c_1 \alpha_{ij} + c_2 \sin(\alpha_{ij}) + c_3 \sin(3\theta_{ij}) + c_4 \cos(3\theta_{ij})$$

(Eq. 7)

Donde:

- Los coeficientes 'a' se asocian al error en la distancia.
- Los coeficientes 'b' se asocian al error en la medición del ángulo horizontal.
- Los coeficientes 'c' se asocian al error en la medición del ángulo de elevación.

De entre todos ellos, cabe destacar alguno de naturaleza física y bien conocido en topografía, como por ejemplo el error de bajada de bandera (a_ρ), el factor de escala (a_s), la falta de perpendicularidad entre los ejes instrumentales (b_1 y b_2), la excentricidad de los círculos (b_6 y b_7), error del índice vertical (c_0) o los errores de escala en las direcciones angulares (b_3 para la horizontal, c_1 para la elevación). Los parámetros a_{3-6} serán exclusivos de los instrumentos de onda continua, por lo que no participarán en el proyecto actual. Para un completo detalle del conjunto de PAdS, véase Lichti [LIC06-1, LIC06-2].

2.3 Modelo matemático conjunto

El modelo matemático final comprenderá la parte referente a la orientación interna (modelo de errores) y la referente a la orientación externa (transformación entre sistemas) integradas de forma conjunta. Cada punto observado proporcionará una terna de ecuaciones, una para cada observable (Eq. 2-4), donde las coordenadas (x,y,z) en el sistema escáner se obtienen a partir de la transformación sólido rígido aplicada sobre las entidades de la red de apoyo. Para la resolución de los coeficientes se planteará un ajuste mínimo cuadrático, donde la matriz de diseño (A) quedará determinada por las respectivas linealizaciones de las ecuaciones 2-4, y el vector de términos independientes (K) se formará a partir de las diferencias entre las magnitudes observadas y las calculadas mediante los parámetros aproximados.

La elección del modelo estocástico será fundamental para garantizar la rigurosidad del proceso y la significatividad estadística del conjunto de parámetros. Con este objetivo, el software implementado estará provisto de varias herramientas estadísticas que conducirán al usuario a la correcta elección de la matriz de pesos y la mejor elección del conjunto de PAdS.

Como todo proceso fotogramétrico, se tratará de un proceso iterativo y convergente, del que se obtendrán los parámetros de orientación interna (nulos a priori), las correcciones a los parámetros de orientación externa y las correcciones de los puntos de apoyo. Por último, cabe destacar la importancia del campo de vista del aparato (ya sea híbrido, o panorámico), ya que el rango de valores angulares que éste tome ha de quedar reflejado en la formación del sistema de ecuaciones.

3. CAPTURA DE LOS DATOS

3.1 Instrumental empleado

Para la puesta en práctica del experimento se empleó un Láser Leica HDS3000 (Figura 2a), escáner de pulsos láser y determinación de la distancia por tiempo de vuelo. Se trata de un modelo de arquitectura híbrida: su campo de rotación comprende la circunferencia completa en el plano horizontal y su recorrido en la dirección vertical recorre el perfil desde 50° por debajo del horizonte hasta el cénit. En base a los datos técnicos aportados por el fabricante, el aparato contará con precisiones de 4 mm en distancia y 60 μrad ($\approx 40''$) en caso de ángulos. Otra característica reseñable, es la antigüedad y desgaste del mismo, por lo que se le presupone un error sistemático significativo. Con objeto de automatizar el proceso y conseguir la máxima precisión en la determinación del centroide de la diana registrada, se emplearán blancos específicos asociados al instrumental

La elección del modelo estocástico será fundamental para garantizar la rigurosidad del proceso y la significatividad estadística del conjunto de parámetros. Con este objetivo, el software implementado estará provisto de varias herramientas estadísticas que conducirán al usuario a la correcta elección de la matriz de pesos y la mejor elección del conjunto de PAdS

de la casa comercial Leica (dianas circulares en blanco y negro). Gracias a sus cámaras fotográficas integradas será posible efectuar la captura de las mismas a alta resolución, obviando el resto del entorno. Para la observación y cálculo de las coordenadas de la red, se empleó una estación total Leica TS-30 (Figura 2b), con precisiones angulares de $0.5''$.

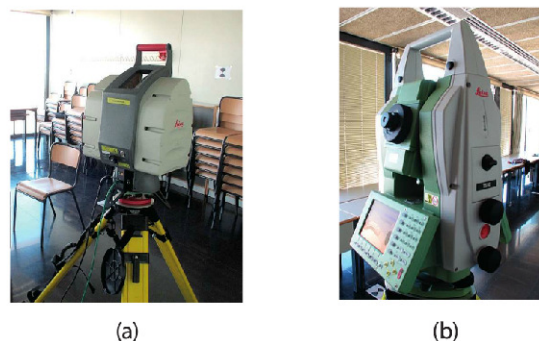


Figura 2. Instrumental empleado; a) láser escáner Leica HDS 3000; b) estación total Leica TS-30.

3.2 Red de Apoyo

El proceso de calibración a partir de entidades puntuales requerirá la materialización de una red de puntos de coordenadas conocidas, llamada habitualmente red de referencia, o red de apoyo, y que constituirá el marco sobre el que se sustentará el *espacio objeto* o *sistema de coordenadas objeto*. En este caso, la red estará formada por un total de 62 puntos (dianas circulares) distribuidas de forma homogénea a lo largo de todo el laboratorio de calibración (de dimensiones $15 \times 8 \times 3$ m). Será vital que los puntos cubran la bóveda de registro del escáner en su totalidad, desde el cénit hasta el ángulo mínimo de eleva-

ción por debajo del plano horizontal. La distribución de los puntos puede apreciarse en la Figura 3.

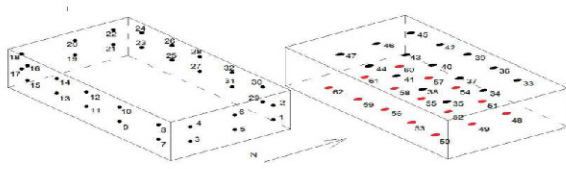


Figura 3. Red de Apoyo establecida

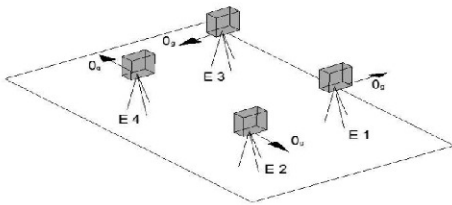


Figura 4. Estaciones de escaneo y orientaciones de sus respectivas líneas de cero

Se efectúan observaciones en ambos círculos a todos los puntos, desde tres bases ubicadas en triángulo. Para otorgar escala a la red, se medirán los segmentos del triángulo principal reiteradamente (hasta un total de 8 mediciones por segmento) con una cinta métrica de precisión. Seguidamente, se realizará un ajuste libre con todos los observables, para obtener el mejor datum y localizar posibles errores groseros. Una vez en posesión del datum, se calculará un ajuste ligado al mismo. La precisión media lograda a posteriori para los puntos fue inferior al milímetro.

3.3 Metodología a desarrollar

El desarrollo y establecimiento de una metodología completa en el proyecto de calibración será vital para el éxito del mismo. Un factor fundamental para garantizar la validez de los parámetros de calibración será la total eliminación de correlaciones entre los mismos, o bien con alguno de los parámetros de orientación externa. Bae y Lichti [BAE06] plantean una simulación con objeto de determinar las posiciones óptimas de escaneo, recomendándose un mínimo de cuatro estaciones con posiciones ortogonales de sus líneas de ceros. Además, según Alder

[ALD03] la altura de estación deberá variar también. El objetivo de estas premisas es doble: por un lado, dotar al ajuste del suficiente número de redundancias para la consecución del ajuste; y por otro lado, eliminar toda posible correlación lineal entre parámetros, que de lo contrario pueden dificultar la convergencia de la solución, y por tanto, invalidar los valores calculados. La influencia del número de escaneados en las correlaciones es expuesta por Reshetyuk [RES09, RES10]. Del mismo modo, una débil geometría de la red o un habitáculo de calibración insuficientemente grande (poca variedad en las distancias medidas) puede provocar también efectos negativos en ese sentido (véase Lichti [LIC10]). En el presente experimento, se tomarán cuatro escaneados cuya posición y orientación puede apreciarse en la Figura 4.

La eliminación de correlaciones no será atribuible exclusivamente al diseño de la red o las posiciones de escaneo. Otros factores relevantes serán aportados por las propias características del instrumento, como son la arquitectura de su campo de vista (*Field of view, FoV*) o la presencia/ausencia de compensador de doble eje. En [LIC09, LIC10] se analiza la influencia del FoV en las correlaciones, proponiéndose la medición externa de los parámetros de orientación externa y la consiguiente imposición de constreñimientos en el ajuste, pese a la dificultad que esto puede aportar a la medición (por ejemplo, la medición del origen del sistema escáner). Lichti [LIC06-2] y Reshetyuk [RES09] proponen el uso de inclinómetros para la determinación de los giros Omega y Phi.

4. APROXIMACIÓN AL CÁLCULO

4.1 Preprocesado de los datos

Los ficheros ASCII obtenidos tras la descarga de los datos se introducirán al software LASERGIFLE. Por medio de un ajuste mínimo cuadrático, se calculará un registro de las nubes de puntos escaneadas obteniéndose de esta forma los parámetros de orientación externa (POE) asociados a la estación. En este momento será posible realizar una depuración inicial de los observables mediante el análisis de los residuos generados, ya que los POE calculados jugarán un papel fundamental en el ajuste posterior, por lo que deberán ser calculados de forma satisfactoria. La causa de estos observables erróneos obedece habitualmente a ángulos de incidencia excesivamente oblicuos, o a detecciones erróneas del centroide de la diana.

Una vez en disposición de los ficheros de trabajo, el usuario de LASERGIFLE deberá especificar las preferencias del cálculo y las características del instrumento a calibrar, como el tipo de ajuste (con corrección de la red de apoyo o ajuste ligado), el número de iteraciones máximo, el umbral

de detención de las mismas (magnitud por debajo de la cuál la corrección obtenida resultará suficientemente pequeña como para detener las iteraciones), el FoV (híbrido/panorámico) o la presencia del compensador de doble eje. Pero si hay un elemento a tener en cuenta en el preprocesado, éste será la elección del modelo estocástico. La elección de los pesos correctos será fundamental para garantizar la validez de los parámetros adicionales calculados. Diversos experimentos previos realizados con datos test demuestran que una ponderación incorrecta invalida completamente los resultados buscados para las incógnitas, así como sus desviaciones típicas asociadas. De ahí que LASERGIFLE incorpore la posibilidad de realizar la comparación estadística de las varianzas a priori y a posteriori tanto de las ecuaciones (ecuaciones de distancia y angulares) como del ajuste al completo en sí (Chueca, Herráez, Berné [CHU96]).

4.2 Cálculo del ajuste

En primer lugar, y como se ha comentado previamente, existirá un considerable número de observables prescindibles. Para su localización y posterior supresión se realizarán los ajustes necesarios en ausencia de PAds. A partir de los residuos generados, el software permitirá al usuario realizar un análisis de la fiabilidad interna del ajuste por medio de diversas herramientas (Test de Baarda [BAA68], test de Pope [POP76]). Según Baselga [BAS11], no existe ningún método de detección de errores groseros que permita la detección múltiple de los mismos en ajuste mínimo cuadrático. De ahí, que dada la cantidad de observables erróneos presentes en el ajuste, se propone establecer un criterio alternativo: la eliminación de todo punto del ajuste cuya ecuación (de distancia, ángulo horizontal o de elevación) supere el valor de su desviación típica a posteriori multiplicada por 3 (desviación típica llevada a $p=99\%$). Tanto la supresión de observables como la aceptación de los mismos deberá ejecutarse bajo estricto cumplimiento del test global del modelo. Será por tanto una condición obligatoria la comprobación de la consistencia de las varianzas a priori y a posteriori, que se valorará de acuerdo a [CHU96]:

$$F_{gdl,\infty,0.01} > \frac{\hat{\sigma}_i^2}{\sigma_i^2} > F_{gdl,\infty,0.99} \quad (\text{Eq. 8})$$

Donde:

- es la varianza del observable i a posteriori.
- es la varianza del observable i a priori.
- es el valor de la distribución para los grados de libertad del ajuste, y la probabilidad asociada a la misma.

En caso de que el cociente entre estimadores satisfaga el intervalo dado por la distribución, se aceptará la hipótesis nula (varianzas estadísticamente compatibles) para un nivel

A partir de los residuos generados, el software permitirá al usuario realizar un análisis de la fiabilidad interna del ajuste por medio de diversas herramientas (Test de Baarda [BAA68], test de Pope [POP76]). Según Baselga [BAS11], no existe ningún método de detección de errores groseros que permita la detección múltiple de los mismos en ajuste mínimo cuadrático. De ahí, que dada la cantidad de observables erróneos presentes en el ajuste, se propone establecer un criterio alternativo: la eliminación de todo punto del ajuste cuya ecuación (de distancia, ángulo horizontal o de elevación) supere el valor de su desviación típica a posteriori multiplicada por 3 (desviación típica llevada a $p=99\%$)

de significación del 1%. De lo contrario, deberán de asignarse pesos más apropiados a las ecuaciones y repetir el ajuste. La realización de estos ajustes previos se repetirá tantas veces como sea necesario hasta que la totalidad de observables dudosos hayan sido localizados, y siempre satisfaciendo la Eq. 8. Una vez en disposición de los observables válidos, se procederá a un ajuste contemplando la totalidad de los parámetros de orientación interna. Del conjunto completo se irán extrayendo parámetros insuficientemente significativos y correlados, dando por buena la solución que menores errores genere en los parámetros de orientación interna, externa y coordenadas objeto. Ésta es la solución implementada en el programa LASERGIFLE.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Obtención del conjunto de parámetros adicionales

De acuerdo a lo comentado en 4.1, se procederá a la carga de los ficheros de trabajo (red de apoyo y ficheros de escaneado) y orientación de los mismos, resultando un error medio cuadrático para las transformaciones ligeramente superior a 2 mm. Seguidamente, y mediante las herramientas expuestas en el apartado 4 se llevará a

El primer ajuste se efectúa con el conjunto completo de parámetros, obteniéndose como resultado una falta de relevancia estadística para los parámetros b2 y b4 (valores de T-test de 0.08 y 0.25 respectivamente). Los estimadores experimentan una leve mejora, que no se ve acentuada hasta el ajuste con $p > 80\%$, donde la orientación externa mejora considerablemente (por la eliminación del parámetro b5)

cabo el filtrado de los datos observados, para una vez en disposición de los mismos, realizar un ajuste completo a excepción de b1 (por tratarse de un instrumental de arquitectura híbrida). A continuación, se procederá con la eliminación progresiva de parámetros atendiendo primero a sus coeficientes de correlación, y posteriormente a su significatividad estadística, eliminándose inicialmente los PADs no significativos y seguidamente los de menor probabilidad asociada (desde el 70% hasta 99.9%).

El primer ajuste se efectúa con el conjunto completo de parámetros, obteniéndose como resultado una falta de relevancia estadística para los parámetros b2 y b4

(valores de T-test de 0.08 y 0.25 respectivamente). Los estimadores experimentan una leve mejora, que no se ve acentuada hasta el ajuste con $p > 80\%$, donde la orientación externa mejora considerablemente (por la eliminación del parámetro b5). El proceso proseguirá secuencialmente, hasta dar con el conjunto de probabilidad asociada 99.9 %. Tal y como se muestra en los estimadores, los mejores resultados en los dos campos de mayor importancia (POE y apoyo) se presentan en la parametrización $p > 99.9\%$ (formada por a0, a1, a2, b6, b7, c0 y c1, véase tabla 1).

HDS 3000		
a0	-0.00158 ± 0.00018	Bajada de bandera (cte. aditiva).
a1	-0.00034 ± 0.00003	Factor de escala
a2	0.00094 ± 0.00028	Traslación del eje de colimación sobre el eje de muñones
b6	-0.00005 ± 0.00001	E. residuales en la dirección horizontal
b7	0.00004 ± 0.00001	E. residuales en la dirección horizontal
c0	-0.00021 ± 0.00003	E. del índice en el círculo vertical
c1	0.00022 ± 0.00003	E. de escala en el ángulo vertical

Tabla 1. Valores calculados para los PADs, junto con su desviación típica asociada y la descripción del mismo

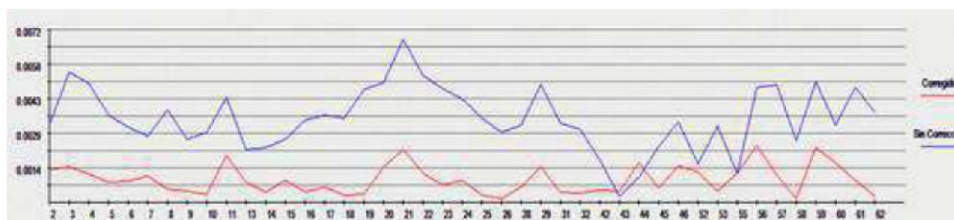


Figura 5a. Errores para el Scan 3

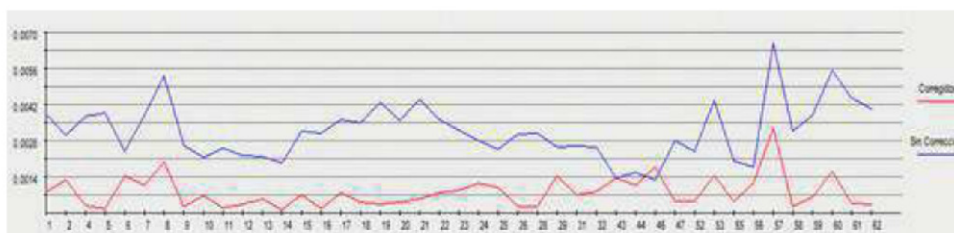


Figura 5b. Errores para el Scan 4

Atendiendo al criterio empleado, es posible distinguir dos estrategias diferenciadas: una primera, donde sólo se tienen en cuenta las propias mediciones realizadas con el escáner, y que proporcionarán valores descriptivos de la mejora global; y una segunda estrategia, que se apoya en la red de puntos de apoyo y que proporciona valores para cada uno de los estacionamientos del escáner

5.2 Cuantificación de la mejora y validación de resultados

LASERGIFLE permitirá al usuario comprobar y cuantificar la mejora experimentada tras la calibración mediante diferentes herramientas. Atendiendo al criterio empleado, es posible distinguir dos estrategias diferenciadas: una primera, donde sólo se tienen en cuenta las propias mediciones realizadas con el escáner, y que proporcionarán valores descriptivos de la mejora global; y una segunda estrategia, que se apoya en la red de puntos de apoyo y que proporciona valores para cada uno de los estacionamientos del escáner. Para la primera aproximación a la mejora lograda se compararán las desviaciones típicas de distintas variables implicadas. Por un lado, como resultado del ajuste mínimo cuadrático realizado, se dispondrá de las magnitudes residuales asociadas a cada observable, y con su consiguiente promedio, las desviaciones típicas correspondientes a las distancias y ángulos. Así pues,

bastará con comparar el estadístico obtenido en ausencia de parámetros de calibración, y su homólogo tras la calibración.

Del mismo modo, y dado que se dispone de las medidas de la red de puntos desde diferentes ubicaciones, se propone el análisis de las medidas de dispersión de las coordenadas escáner antes y después de la corrección. Es decir, las coordenadas de un mismo punto medido desde diferentes posiciones deberán parecerse más entre sí tras calibrar los observables que previamente. Los valores obtenidos para las componentes X, Y, Z, así como para los observables ρ , θ y α , se muestran a continuación en la tabla 2.

	Previa	Posterior	Mejora (%)
σ_x (mm)	0.61	0.44	28.33
σ_y (mm)	0.71	0.55	22.89
σ_z (mm)	0.36	0.25	29.75
σ_ρ (mm)	3.10	0.97	69.11
σ_θ (cc)	14.20	13.83	3.97
σ_α (cc)	36.01	33.54	7.31

Tabla 2. Comparativa de las desviaciones típicas asociadas a las coordenadas de los puntos escaneados y los observables, antes y después de efectuarse las correcciones.

Mediante el conjunto de puntos de apoyo corregidos tras la calibración, será posible calcular dos ratios de mejora para cada posición de escaneado (véase tabla 3). El primero de estos indicadores será el módulo del vector 3D determinado por la diferencia entre el punto de apoyo (ajustado y corregido), y el punto escaneado por un lado (resultando un primer vector de error previo), y ese mismo punto escaneado pero sometido a las correcciones resultantes de la calibración (obteniéndose así un segundo vector de error a posteriori). Igualmente, podrá obtenerse un segundo ratio mediante un nuevo cálculo

	Vector de Error			Registro de los puntos (Orientación externa)		
	EMC previo (m)	EMC posterior (m)	Mejora %	EMC previo (m)	EMC posterior (m)	Mejora %
E1	0.0032	0.0008	74,50%	0.002	0.0006	71.60%
E2	0.0035	0.0009	74,18%	0.0022	0.0006	73.47%
E3	0.0035	0.0009	73,53%	0.0022	0.0006	70.70%
E4	0.0031	0.0008	75,24%	0.0019	0.0006	70.48%

Tabla 3. Errores medios cuadráticos obtenidos antes de aplicar las correcciones sobre los observables, y tras su aplicación en las cuatro estaciones

La calibración del instrumental láser será vital, dado el gran volumen de datos medidos en cada estacionamiento, y se verá magnificada a medida que aumenta el número de escaneados implicados en el proyecto. La eliminación de sistematismos traerá consigo considerables mejoras no sólo en términos de precisión propiamente hablando, sino que conducirá a una reducción de tiempos de trabajo tanto en la toma de datos como en el posterior tratamiento de los mismos.

del registro de la nube de puntos escaneada, frente al registro de la nube de puntos escaneada y convenientemente corregida. LASERGIFLE incorpora también una representación gráfica del reparto de los errores generados en los puntos de apoyo, donde puede apreciarse la distribución de los vectores de error antes (línea azul) y después (línea roja) de las correcciones. Véanse Figura 5a, donde se representan gráficamente los errores para el escaneado 3, y Figura 5b, donde se representan los correspondientes al escaneado 4.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de una red de coordenadas conocidas y su medición con el instrumental de escaneado láser (un equipo Leica HDS3000, de medición por pulsos láser) desde diferentes precisiones, será factible eliminar los sistematismos asociados al instrumental empleado en sus observables de distancia, ángulo horizontal y ángulo de elevación. A la vista de los resultados obtenidos en los diferentes ratios de mejora expuestos, es posible confirmar los beneficios de la calibración geométrica alcanzándose con ella valores de precisión a posteriori inferiores al milímetro. Además, contar con un programa de cálculo para este tipo de proyectos ayudará a agilizar los cálculos, y gracias a las herramientas estadísticas empleadas, garantizar tanto la rigurosidad de la solución

como la óptima elección del conjunto de parámetros de orientación interna, así como la significatividad estadística de los mismos.

La calibración del instrumental láser será vital, dado el gran volumen de datos medidos en cada estacionamiento, y se verá magnificada a medida que aumenta el número de escaneados implicados en el proyecto. La eliminación de sistematismos traerá consigo considerables mejoras no sólo en términos de precisión propiamente hablando, sino que conducirá a una reducción de tiempos de trabajo tanto en la toma de datos como en el posterior tratamiento de los mismos. La estabilidad de las mediciones realizadas permitirá reducir el número de posiciones de escaneado (siempre y cuando no haya oclusión de elementos). Igualmente, la fusión de distintas nubes mejorará, reduciéndose en consecuencia el ruido y los trabajos de filtrado.

Como ventajas destacables podrían citarse también la recuperación de instrumentos obsoletos, el hecho de contar con mediciones totalmente fiables sin necesidad de enviar el equipo a fábrica, o el conocimiento exacto de la precisión dada por el instrumento (en contraste con los valores proporcionados por el fabricante).

Las investigaciones en esta materia continuarán comprobando la estabilidad de los parámetros obtenidos y en diferentes escenarios (exteriores, mayores distancias).

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados se enmarcan dentro del proyecto de investigación HAR2010-18620 del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

REFERENCIAS

- [ALD03] J. Alder. «*Betrachtungen zur kalibrierung polarer Messsysteme*». Diploma Thesis (unpublished), Technical University of Berlin, Berlin. 2003.
- [BAE06] K-H.Bae, D.Lichti, D.D. «*An on-site self-calibration method using planar targets for terrestrial laser scanners*». The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36, 2006, 14 – 19.
- [BAA68] W. Baarda. «*A testing procedure for use in geodetic networks*». In: Publication on Geodesy, Netherlands, Geodetic Com., Delft, Netherlands. 1968.
- [BAS11] S. Baselga. «*Nonexistence of Rigorous Test for Multiple Outlier detection in Least-Squares Adjustment*». Technical note, Journal of Surveying Engineering, Vol 137, No 3. American Society of Civil Engineers. 2011.
- [PAZ96] Chueca Pazos, M., Herráez Boquera, J., Berné Valero, J.L. «*Tratado de Topografía 3: Redes Topográficas*

- y Locales. Microgeodesia». Ed. Paraninfo. Madrid. 1996.
- [GIE04] F. Gielsdorf, A. Rietdorf, L. Gruendig. «*A concept for the calibration of terrestrial laser scanners*». Proceedings FIG Working Week, Athens, Greece, 22-27 May 2004.
- [GON11] D. González-Aguilera, P. Rodríguez - González, J. Armesto, and P. Arias. «*Trimble GX200 and Riegl LMS-Z390i*». Optic Express Vol. 19, No.3. pp. 2676-2693. 2011.
- [KER05] T. P. Kersten, H. Sternberg, K. Mechelke. «*Investigations into the accuracy behavior of the terrestrial laser scanning system Mensi GS100*». In: Grün, A. Kahmen, H. (Eds.), Proceedings Optical 3D Measurement Techniques VII, Vienna, Austria, 3-5 October, 2005, col. I, pp. 122-131.
- [KRA97] Kraus, K., Jansa, J., Krager, H. «*Photogrammetry Vol.2: Advanced Methods and Applications (Fourth edition)*». Ed. Drümmers. Germany. 1997.
- [LER02] Lerma García, J.L. «*Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital*». Ed: Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. 2002.
- [LIC00] D. D. Lichti. «*Calibrating and testing of a terrestrial laser scanner*». International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 33, 485 – 492. 2000.
- [LIC06-1] D. D. Lichti, M.G. Licht. «*Experiences with terrestrial laser scanner modeling and accuracy assessment*». The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36, part 5, 155 – 160. 2006.
- [LIC06-2] D. D. Lichti. «*Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system*». ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 61 (2007, 307 -324). 2006.
- [LIC07] D. D. Lichti, S. Brustle, J. Franke. «*Self-calibration and analysis of the surphaser 25HS 3D scanner*». In: Proceedings of FIG Working Week, Hong Kong SAR, China, 13-17 May. 2007.
- [LIC09] D. D. Lichti. «*The impact of angle parameterization on terrestrial laser scanner self-calibration*». International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science 38, 171 – 176. 2009.
- [LIC10] D. D. Lichti. «*Terrestrial laser scanner self-calibration: correlation sources and their mitigation*». ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65 (2010, 93 -102). 2010.
- [PAR05] J. A. Parian, A. Gruen, 2005. «*Integrated laser scanner and intensity image calibration and accuracy assessment*». International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W52), 14-19.
- [POP76] A.J. Pope. «*The statistics of residuals and the detection of outliers*». NOAA Technical Report NOS 65 NGS 1, National Ocean Service, National Geodetic Survey, US Department of Commerce. Rockville, MD, p.133. 1976.
- [RES09] Y. Reshetyuk. «*Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*». Doctoral Thesis in Infrastructure. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. 2009.
- [RES10] Y. Reshetyuk. «*A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanners*». ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, doi 10.1016/j.isprsjprs.2010.05.005. 2010.
- [SCH09] D. Schneider. «*Calibration of a Riegl LMS-Z429i based on a multi-station adjustment and a geometric model with additional parameters*». International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (Part 3/W8), 177-182. 2009.

Sobre los autores

D. García San Miguel

Ingeniero Técnico en Topografía (Universidad del País Vasco), e Ingeniero en Geodesia y Cartografía (Universitat Politècnica de València). Miembro del Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE) desde 2011. Su investigación se centra en la automatización de tareas fotogramétricas y láser escáner.

J.L. Lerma García

Profesor Titular de Universidad en la Universitat Politècnica de València. Ingeniero Técnico en Topografía e Ingeniero en Geodesia y Cartografía. Director del Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE). Miembro de diversos comités científicos internacionales como CIPA y VSMM. Su investigación se centra en el desarrollo de mejoras geomáticas en el entorno de la documentación patrimonial a partir de sensores métricos y multiespectrales. Autor de siete libros de texto relacionados con la fotogrametría y el escaneado láser, presenta y publica de manera regular en foros internacionales.

S. Navarro Tarín

Ingeniero Técnico en Topografía e Ingeniero en Geodesia y Cartografía por la Universitat Politècnica de València, y actualmente cursando estudios de doctorado. Miembro del Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE) desde 2006. Su investigación se centra en el desarrollo de software fotogramétrico y en la implementación de algoritmos para fotogrametría arquitectónica, modelos 3D y visión por computador.