

Artículo completo

Ciencias Ambientales, Agroindustrias y de la Tierra

Microgeodesia, método de intersección en la determinación de los ejes del láser utilizado en AGGO (Observatorio Geodésico Argentino Alemán)

Microgeodesy, intersection method in the determination of the laser axes used in AGGO (German Argentine Geodetic Observatory)

Mangiaterra Wischnivesky, Aldo Oscar ^{1,2}; Calvo Pascual Joaquín ^{1,2}

¹ Universidad Nacional de Rosario

² Colegio de Profesionales de la Agrimensura de la Provincia de Santa Fe

DOI: 10.59872/icu.v7i9.429

Correo de correspondencia: aldomangiaterra@gmail.com

Recepción: 17/06/2023; Aceptación: 11/12/2023;

Publicación: 19/04/2023

Palabras claves: punto invariante, precisión, microgeodesia, SLR, AGGO

Keywords: invariant point, precision, microgeodesy, SLR, AGGO

Resumen

En el Observatorio Geodésico Argentino Alemán se utiliza, entre otras, la técnica Satellite Laser Ranging, consistente en medir distancias a satélites. El objetivo de este trabajo es conocer la posición del punto principal del instrumento láser, es decir el punto origen de las distancias que mide ese instrumento. Esto resulta necesario para determinar la posición relativa entre las distintas técnicas geodésicas utilizadas en este observatorio. En las mediciones efectuadas se ha utilizado instrumental de precisión (estación total y teodolito) aplicando el método de intersección.

En este artículo, recurriendo a conceptos de la microgeodesia, se expone la definición convencional de tal punto principal del instrumento (punto invariante), las mediciones realizadas, los cálculos efectuados y la precisión resultante, demostrando que la misma es mejor que la obtenida con el método tradicional de relevamiento radial.

Abstract

At the German Argentine Geodetic Observatory, the Satellite Laser Ranging technique is used, among others, which consists of measuring distances to satellites. The objective of this work is to know the position of the main point of the laser instrument, that is, the origin point of the distances measured by that instrument. This is necessary to determine the relative position between the different geodetic techniques used in this observatory. Precision instruments (total station and theodolite) were used in the measurements carried out, applying the intersection method.

In this article, resorting to concepts of microgeodesy, the conventional definition of such main point of the instrument (invariant point), the measurements made, the calculations carried out and the resulting precision are presented, demonstrating that it is better than that obtained with the traditional radial survey method.



Introducción

Para muy diversos fines es fundamental contar con un sistema único mundial de referencia al cual referir los puntos del espacio que componen y rodean nuestro planeta, lo que permite correlacionar información de distintas fuentes y de distintas épocas. A la vez, es necesario que ese sistema sea lo más preciso posible.

El marco de referencia terrestre internacional ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) es el resultado del cálculo combinado de cuatro redes, las que son medidas mediante cuatro técnicas diferentes llamadas: VLBI, SLR, GNSS y DORIS (Altamimi *et al*, 2016). Aquellos observatorios geodésicos que cuentan con más de una de esas técnicas, como es el caso de AGGO, resultan fundamentales. Es necesario conocer la vinculación espacial entre los puntos principales de tales instrumentos. Gracias a la posibilidad de medir, mediante métodos terrestres, la posición relativa de los instrumentos correspondientes con mejor precisión que la que brindan las técnicas mencionadas, se introducen tales valores diferenciales como observaciones en el cálculo combinado del ITRF, logrando su mejoramiento.

Esa determinación de posición relativa es lo que se conoce como colocación. Se trata de mediciones de alta precisión en espacios reducidos, aplicando microgeodesia (Chueca Pazos *et al.*, 1996).

Para efectuar la colocación es necesario determinar con precisión la posición espacial de los puntos principales de cada uno de los instrumentos que utiliza cada técnica.

En este trabajo se presenta una metodología que, haciendo uso de la microgeodesia, pretende determinar el punto principal del telescopio SLR con una precisión mejor que ± 1 mm.

Objetivo

Determinar la ubicación de los ejes principal (o vertical) y secundario (u horizontal) que permiten ambos giros del telescopio del instrumento que es utilizado en la técnica geodésica denominada SLR en el observatorio AGGO.

Teóricamente ambos ejes deberían interceptarse, pero sabemos que ningún instrumento es perfecto y, por lo tanto, es posible que los ejes sean rectas albeadas.

En tal caso, por convención, se considera punto principal al punto del eje principal más próximo al eje secundario.

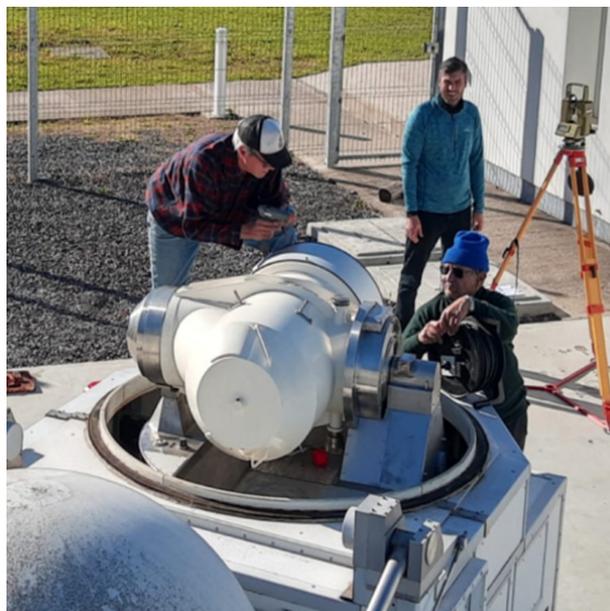


Figura 1. Foto del instrumento SLR.

Materiales y métodos

En el presente trabajo se recurre a la microgeodesia, es decir a mediciones espaciales de alta precisión en espacios reducidos, apelando al instrumental, la medición y el cálculo propios de la geodesia.

El lugar de la medición es el observatorio AGGO (latitud $-34^{\circ} 52' 25.34914''$, longitud $-58^{\circ} 08' 23.48308''$, altura elipsoidal 39.685 m) y la fecha de la misma fue el 26 de mayo de 2022, utilizando el siguiente instrumental: Estación Total Leica TS60 (Precisión angular 0.5") y Teodolito Wild T1610 (Precisión angular 1.5").

Posición del eje principal:



Figura 2. Punto E (Pilar GNSS)



Figura 3. Punto G

Se indica la posición del eje principal (con la letra O en Figura 4), en forma relativa a los puntos fijos E y G de la red planimétrica; el primero de ellos ubicado en el pilar correspondiente a una antena GNSS (Figura 2) y el segundo en la estructura de hormigón próxima al equipo SLR (Figura 3).

Procedimiento

Se colocaron los instrumentos de medición en posiciones arbitrarias H e I, materializadas durante la medición por los centros de los instrumentos utilizados (H el teodolito e I la estación total) y adecuadamente elegidos como base de la medición (Figura 4) y se colocaron señales de puntería en el extremo del tubo del telescopio del SLR (Figura 5).

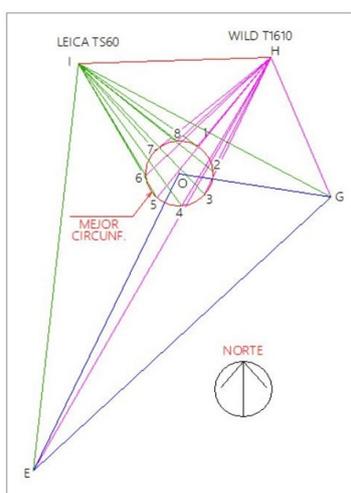


Figura 4. Disposición de las estaciones en los puntos H e I y croquis de la planimetría de los puntos observados (fuera de escala).



Figura 5. Señales de puntería adosadas al tubo del telescopio



Figura 6. Imagen del apuntamiento a una de las señales, obtenida a través del ocular del teodolito.

Se hizo girar el telescopio obteniendo ocho posiciones (aproximadamente 45° en cada giro, puntos 1 a 8 de Figura 4) hasta completar una vuelta.

Desde ambos instrumentos se realizaron las observaciones angulares horizontales a los puntos fijos E y G y a las señales de puntería adosadas al telescopio láser en cada una de las ocho posiciones en que se detuvo.

A los efectos de mejor precisión la observación de H desde I (y viceversa) se hizo apuntando recíprocamente a los hilos del retículo del instrumento opuesto.

Se obtuvieron las planillas de observaciones indicadas en Anexo, Tabla 1.

En las mismas se hacen constar las lecturas angulares horizontales a la señal de puntería consistente en alfiler de cabeza esférica.

Cálculo de la posición relativa del eje principal del SLR respecto de E y G predeterminados en tareas de colocalización

Se utilizó el programa Autocad para, en un sistema de referencia XY planimétrico arbitrario y mediante intersección de las direcciones adoptadas, obtener la posición de los puntos fijos E y G y de las ocho ubicaciones de la señal de puntería con respecto a la base materializada por los instrumentos ubicados en H e I. Lo singular del método es que no requiere ninguna medición de distancia, en comparación con la técnica tradicional de radiación, mediante ángulos y distancias (Córdoba Hita y López Ramasco, 2018).

A posteriori, ya conformada la figura (Figura 4) que comprende 12 puntos, se la escaló utilizando la medida del segmento EG provista por la red planimétrica utilizada en la colocalización, (Grupo de Geodesia Satelital de Rosario, 2018), obteniéndose entonces coordenadas planimétricas en un sistema arbitrario.

Con las coordenadas de las ocho posiciones de la señal ubicada en el extremo del tubo del telescopio del SLR (hipotéticamente una circunferencia) se calculó la ecuación de la circunferencia que mejor se ajusta a esos puntos por el método de mínimos cuadrados.

Se parte de las coordenadas de ocho puntos $P_i (X_i, Y_i)$, (Anexo, Tabla 2) que el elemento de puntería ubicado en el telescopio del SLR describe al girar una vuelta, relevados por intersección horizontal de las direcciones angulares medidas desde los dos instrumentos.

Se calculan coordenadas del centro de la circunferencia más probable (a, b) y el radio r - (medidas en mm).

Se parte de la ecuación de la circunferencia: $(X - a)^2 + (Y - b)^2 = r^2$ (Ec.1)
donde a, b y r son las incógnitas.

Apelamos al método de medidas indirectas, variación de coordenadas. Se linealiza la Ec.1 aplicando desarrollo de Taylor hasta el primer orden y se reemplaza a, b y r; siendo: $a = a_0 + \alpha$; $b = b_0 + \beta$; $r = r_0 + \rho$

Se obtiene la ecuación:

$$X\alpha + Y\beta + r\rho = (X^2 + Y^2 - r_0^2) / 2 \quad (\text{Ec.2})$$

siendo las incógnitas α, β, ρ ; en la cual se adopta $a_0 = b_0 = 0$ y $r_0 = 458.5960378$ (calculado según el punto 1 de la figura 4)

Al segundo miembro de la (Ec.2) lo llamamos $U = (x^2 + y^2 - r_0^2) / 2$ (ver valores calculados en Anexo, Tabla 3)

Estimación de pesos:

$$\sigma_u = \text{raíz} (U'_x{}^2 * \sigma_x^2 + U'_y{}^2 * \sigma_y^2)$$

$$U'_x = X \quad U'_y = Y \quad \sigma_u = \text{raíz} (X^2 * \sigma_x^2 + Y^2 * \sigma_y^2)$$

Considerando $\sigma_x = \sigma_y \approx 0,1$ (verificado en Autocad que no exceden ese valor)

$$\sigma_u = \text{raíz} ((x^2 + y^2) * \sigma_x^2) = r * \sigma_x \text{ (para todo } U_i)$$

En la Ec.2 hay coeficientes experimentales X e Y pero con el mismo razonamiento, dado que en todos los U_i resulta $X^2 + Y^2 = r^2$, se consideran todos los pesos iguales a 1.

En el Anexo se insertan las tablas 4 a 14 que reproducen los datos utilizados para el cálculo.

De la Tabla 9 surgen los resultados: $a = 0,09$ mm; $b = 0,01$ mm y $r = 458,57$ mm cuyas diferencias con los valores adoptados para realizar el cálculo son ínfimas.

Se calcularon los residuos a partir de los valores ajustados del centro y radio de la circunferencia y con ellos el σ a posteriori, utilizado finalmente para la estimación de la precisión de los parámetros, obteniendo

$$\sigma_a \approx \pm 0,03 \text{ mm} \quad \sigma_b \approx \pm 0,03 \text{ mm} \quad \sigma_r \approx \pm 0,03 \text{ mm}$$

Se adopta el centro de esa circunferencia como posición de O

Precisión: mejor que ± 0.1 mm

De esta forma quedó determinada la posición relativa de O respecto de los puntos E y G (Figura 7)

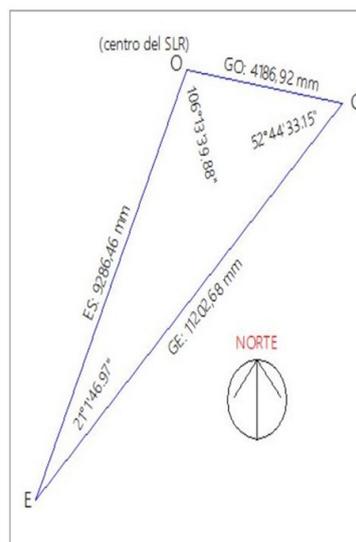


Figura 7. Gráfico del triángulo GEO con medidas lineales y angulares.

Posición del eje secundario

Se indica dicha posición del eje en forma relativa mediante dos valores:

- a) Distancia del eje secundario al eje principal.
- b) Cota del eje secundario en el sistema SRNV16 (Sistema de Referencia Nacional Vertical 2016).

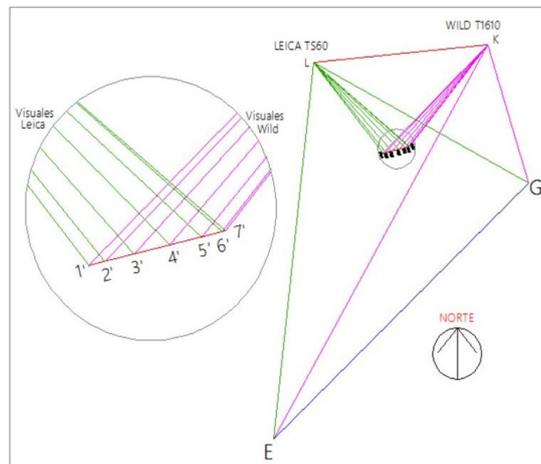


Figura 8. Disposición de las estaciones en los puntos K y L y croquis de la proyección planimétrica de los puntos observados correspondientes al miniprisma (fuera de escala).

Procedimiento

Se estacionaron los instrumentos mencionados (teodolito y estación total) en los puntos arbitrarios K y L, adecuadamente elegidos como base de la medición (Figura 8), y se colocaron dos señales de puntería próximas al extremo del tubo del telescopio del SLR (Figura 9).



Figura 9. Señales colocadas en el telescopio (miniprisma y marca de puntería).

En estas condiciones y manteniendo fijo el azimut del telescopio del SRL, se hizo girar el mismo alrededor del eje secundario obteniéndose siete posiciones hasta completar aproximadamente 180°. Según las lecturas en altura (del telescopio) provistas por el equipo SLR, éstas fueron de 0,7°, 30,44°, 60,02°, 90,04°, 120,03°, 150,03° y 179,52°.

Desde ambos instrumentos se realizaron las observaciones angulares horizontales a los puntos fijos E y G para obtener la vinculación al sistema planimétrico de AGGO previamente descrito y utilizado. En tanto que se efectuaron lecturas horizontales y verticales a las señales de puntería adosadas al tubo del telescopio, en cada una de las siete posiciones en que se detuvo (Figura 8).

A los efectos de mejor precisión la observación de K desde L (y viceversa) se hizo apuntando recíprocamente a los hilos del retículo del instrumento opuesto.

También, desde ambos instrumentos, se hicieron las observaciones necesarias para determinar la cota de cada uno de sus centros ópticos respecto al tetón del sistema de referencia altimétrico de AGGO, asignándole al mismo, provisoriamente, cota 0,00 mm. (Figura 10).

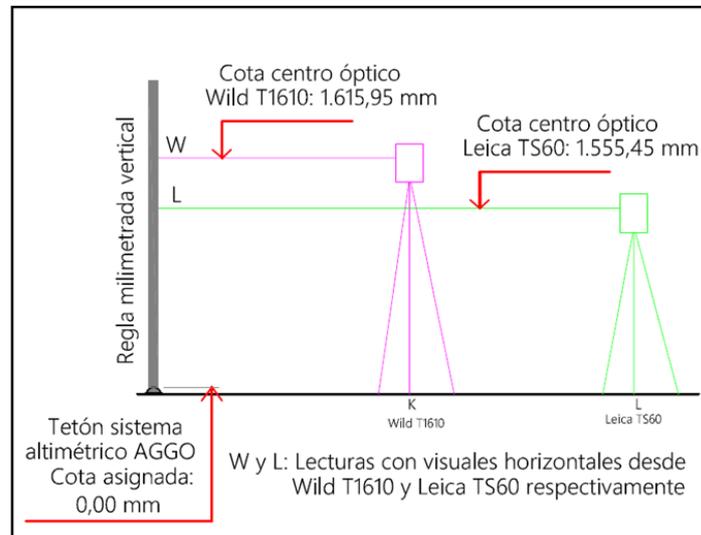


Figura 10. Gráfico y resultado de la determinación de cotas de los centros ópticos de los instrumentos en K y L.

Para el desarrollo y cálculo de este manuscrito se ha trabajado con las lecturas horizontales y verticales al miniprisma. No obstante, en las planillas de observación se muestran todas las observaciones realizadas al miniprisma y a la marca de puntería (Anexo, Tablas 15 y 16)

Aclaración: Las lecturas verticales (h) de la Estación Total Leica TS60 se han convertido a cenitales (z) para homogeneizar el cálculo.

Cálculo de la posición relativa del eje secundario del SLR respecto al eje principal:

Se utilizó software Autocad para, en un sistema de referencia XY planimétrico arbitrario y mediante intersección de las direcciones adoptadas, obtener la posición de los puntos fijos E y G y de las siete ubicaciones del miniprisma, todo con respecto a la base materializada por los instrumentos ubicados en los puntos K y L.

A posteriori, ya conformada la figura (Figura 8) que comprende once puntos, se la escaló utilizando la longitud del segmento EG, provista por la red planimétrica calculada previamente en mediciones de la red de colocación, (Grupo de Geodesia Satelital de Rosario, 2018) obteniéndose entonces coordenadas planimétricas en un sistema arbitrario.

Se supone que al girar el telescopio sobre su eje secundario lo hace describiendo un plano vertical, por lo que la proyección horizontal de las siete posiciones del miniprisma ubicado en el brazo del telescopio del SLR, deberían pertenecer a una recta (puntos 1' a 7' de Figura 8).

Estaba previsto calcular la recta que mejor se ajuste a estos siete puntos proyectados al plano, sin embargo, uniendo inicialmente los puntos 1' y 7' se observó que, en el peor de los casos las proyecciones de los puntos 2' y 6', se separan de la recta adoptada en 0,1 mm. Por tal razón no se consideró necesario realizar ese cálculo y se resolvió con la recta 1'-7'.

Vale señalar que, en este caso específico, se considera innecesario todo trabajo pretendiendo precisión mejor que ± 0,1 mm. Con esta conclusión se considera que los siete puntos están contenidos en un plano vertical cuya intersección con un plano horizontal es la recta mencionada (1'-7').

A continuación, se calculan las cotas de los siete puntos respecto al tetón altimétrico próximo al equipo SLR (Ver Figura 11, ejemplo punto 4). En Anexo, se pueden ver en la Tabla 17 las coordenadas y cotas de los 7 puntos, las últimas calculadas aplicando nivelación trigonométrica.

Estas cotas, hipotéticamente deberían pertenecer a un arco de circunferencia con centro en el eje secundario del instrumento (Figura 12). Luego se debería proceder a calcular el arco que mejor se ajuste a esos siete puntos a fin de determinar su centro C.

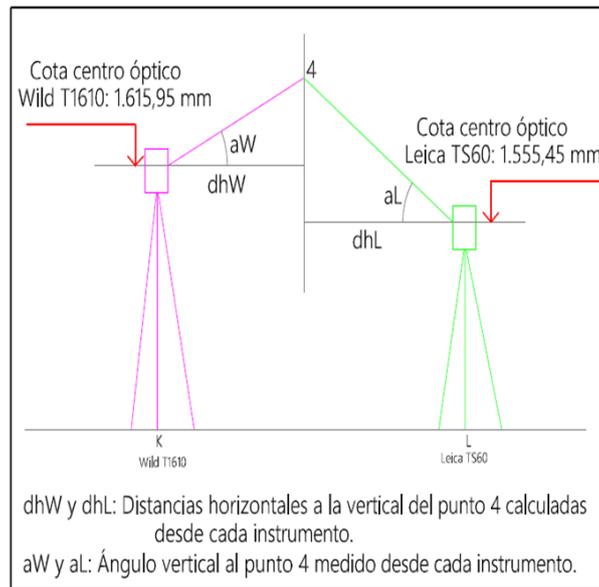


Figura 11. Esquema del cálculo de cotas.

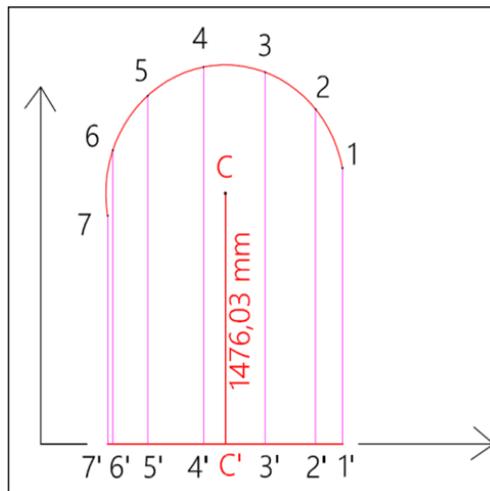


Figura 12. Altimetría (fuera de escala) de los puntos 1 a 7 (miniprisma).

Nuevamente nos encontramos con que adoptando el arco determinado arbitrariamente por tres puntos no contiguos (mediante Autocad), los restantes no se separan del mismo en más de 0,1 mm. Se considera válido entonces a dicho arco, se determina su centro C y su altura (diferencia de cota entre el eje secundario y el tetón de referencia utilizado), así como su proyección C'. De Autocad se obtiene entonces que el centro C tiene una altura de 1476.03 mm respecto al punto fijo (tetón) próximo al SLR.

Este centro C corresponde al arco de circunferencia que describió el miniprisma ubicado en el brazo del telescopio del SLR. Como dicha señal fue colocada sobre un lateral del mismo (Figura 9), el plano que la contiene está desplazado respecto al eje principal del instrumento.

Se observa que proyectando ahora el centro C del arco vertical estudiado hacia la recta horizontal, nos determina el punto C' (Figura 12); punto por el cual debe pasar la proyección horizontal del eje secundario, la que además debe ser perpendicular al plano vertical que contiene a los siete puntos relevados y, por lo tanto, a la recta de sus proyecciones indicada en Figura 8.

Para resolver el punto a) mencionado anteriormente «Distancia del eje secundario al eje principal» se utilizó la determinación planimétrica del eje principal del SLR estudiada con anterioridad (punto O, Figura 7), la que también estuvo apoyada en los puntos fijos E y G de AGGO.

Para ello se insertó entonces la posición del punto O (posición del eje principal del SLR - Figura 7), resultando la siguiente situación.

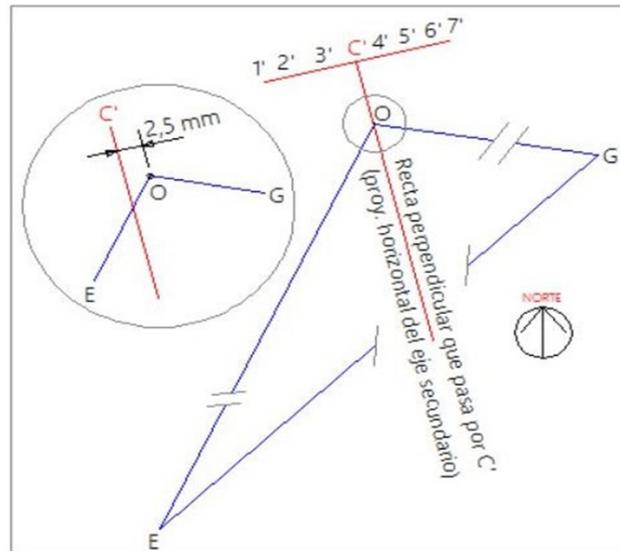


Figura 13. Proyección horizontal del eje secundario y ubicación del punto O (posición del eje principal).

En esta composición espacial sería de esperar que la proyección horizontal del eje secundario pasara por O, posición del eje principal sobre el cual gira el SLR. En el gráfico Autocad se observa que no es así y se mide su separación, la cual es de 2,5 mm.

Resultados

Como primer resultado se obtuvo la posición relativa de O respecto de los puntos conocidos G y E. Las distancias y ángulos que lo determinan se observan en la Figura 7.

Como segundo resultado se obtuvo la posición del eje secundario (u horizontal), expresada en los siguientes datos:

- Distancia del eje secundario al eje principal: 2.5 mm.
- Cota del eje secundario en el Sistema de Referencia Vertical Nacional 2016 (SRVN16) = 20.947,0 mm, valor que surge de sumar a la cota del tetón (19.471,0 mm) la diferencia de altura entre dicho tetón y el punto C cuyo valor es 1.476,03 mm (Figura 12).

Precisión: se estima en ± 0.1 mm (para resultados a) y b)).

Solución con observaciones a la marca de puntería

Las observaciones angulares horizontales y verticales a la marca de puntería figuran en las Tablas 15 y 16, y los puntos se designan como I a VII (Anexo, Tabla 18)

Para la recta (proyección al plano horizontal) de los mismos se unieron también, como en el caso del miniprisma, los puntos I' y VII', con el mismo criterio empleado anteriormente.

Con estas alturas se trazó un arco de circunferencia eligiendo arbitrariamente tres puntos no contiguos, y verificando que en los demás puntos la diferencia no superaba el 0,1 mm; razón por la cual tampoco aquí se justificaba calcular el mejor arco y se trabajó directamente con el trazado inicialmente.

Se determinó entonces la cota del centro del arco, la que dio como resultado 1475,80 mm (con miniprisma dio 1476,03 mm), es decir una diferencia de 0,23 mm.

Siguiendo igual razonamiento que con el miniprisma, la distancia de la proyección horizontal del eje secundario al punto O, dio un valor de 2,62 mm (con miniprisma dio 2,50 mm) es decir una diferencia de 0,12 mm.

Discusión sobre el método de medición

El método que podríamos llamar clásico o estándar es el que aparece publicado en las mediciones llevadas a cabo en diversos observatorios geodésicos en muy distintos lugares del mundo. Consiste en colocar un prisma reflector en el instrumento que gira y, desde una estación total observar dirección y distancia, obteniendo coordenadas que permitan calcular la posición del eje de giro (Córdoba Hita y López Ramasco, 2018; Muller et al., 2014).

Tomemos como ejemplo la estación total Leica TS60 cuya precisión angular es de $0.5''$ y de 0.5 mm en distancias cortas (pongamos por caso menores a los 50 m), es decir una estación total de la más alta calidad desde el punto de vista de su precisión. Estaríamos, en el mejor de los casos, con una incertidumbre de 0.5 mm en las coordenadas.

El método que proponemos en este trabajo es el de intersección de visuales efectuadas desde dos instrumentos ubicados en posiciones adecuadas para que la configuración sea favorable (condición ineludible), es decir procurando que los ángulos de las intersecciones se aproximen a 90° cuanto sea posible.

Se estacionan ambos instrumentos en posición adecuada para observar una señal de puntería adosada al telescopio que gira. Trabajamos con una precisión angular de $1''$.

Pongamos, el caso del SLR, donde la distancia de los instrumentos a las intersecciones no supera los 5 m. Si hacemos una simulación con un Cad, vemos que, con errores de $1''$, el máximo error en coordenadas puede ser del orden de ± 0.03 mm (Figura 14).

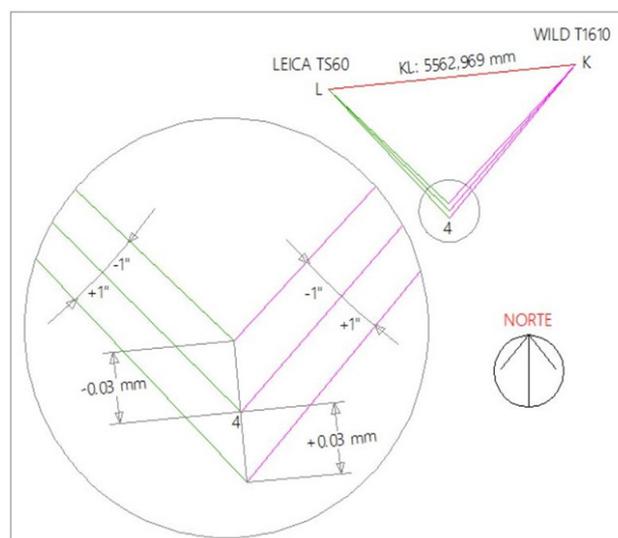


Figura 14. Cuantificación del error máximo posible en las coordenadas del punto 4 de la Figura 4 - Pág. 4
Distancias K4: 4238,84 mm, L4: 3768,61 mm.

En definitiva, vemos que, con el método de intersección se logran mejores resultados que con una radiación midiendo dirección y distancia.

No es difícil afirmar que esta aseveración es válida en diferentes aplicaciones de microgeodesia, como por ejemplo las expuestas en IPGH (1986).

Conclusiones

1. El método aplicado permitió alcanzar satisfactoriamente el objetivo señalado al principio, es decir obtener la posición espacial del punto principal del SLR.
2. Fue determinada la excentricidad de $2,5$ mm del eje secundario, lo que será motivo de futuros análisis por parte de los especialistas de AGGO a cargo de la técnica SLR.
3. La precisión obtenida en la determinación del punto principal es muy alta, mejor que $\pm 0,1$ mm. Sin embargo, la precisión de la posición espacial del punto principal depende de cuál sea la precisión con que se conocen las posiciones de los puntos utilizados para vincularse al sistema de AGGO; en este caso los puntos E y G de la figura 7.

4. El método utilizado y los resultados obtenidos son satisfactorios lo cual no quiere decir que sea la única posibilidad de obtener resultados similares. La tecnología aplicada en los equipos Láser-Tracker (Jordan, 2020), propia de la metrología industrial, puede aplicarse al caso que estamos tratando y obtener altas precisiones. Cabe tener en cuenta el alto costo de tales equipos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible a partir de las mediciones efectuadas en AGGO y de los cálculos correspondientes, todo lo cual forma parte de una tarea más amplia, la de la colocalización mencionada en Página 2.

Agradecemos a aquellos con quienes compartimos esa labor, Romina de los Ángeles Galván, Claudio Brunini, Alfredo Pasquare (AGGO), Pablo Paus, José Romano (Facultad de Ingeniería de La Plata), María Virginia Mackern, María Laura Mateo (Universidad de Cuyo y Universidad Maza), Laura Cornaglia, Gustavo Noguera, y Juan Manuel Calvo (Universidad Nacional de Rosario).

Bibliografía

Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Metivier, and X. Collilieux (2016), ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, doi:10.1002/2016JB013098.

Córdoba Hita Beatriz, López Ramasco Javier- Realización del local tie de las distintas técnicas geodésicas espaciales en el observatorio de Yebes - España - informe técnico IT CDT 2018-20 (<https://icts-yebes.oan.es/reports/doc/IT-CDT-2017-8.pdf>)

Chueca Pazos Manuel, Herráez Boquera José, Luis Berné Valero José - Redes Topográficas Y Locales Microgeodesia - Tratado de topografía 3 - Madrid - Editorial Paraninfo - Año 1996.

Grupo de Geodesia Satelital de Rosario, 2018, Informe técnico: AGGO -Colocalización, (<https://www.fceia.unr.edu.ar/gps/investigacion/Colocalización-AGGO.pdf>)

Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) - Manual de normas y especificaciones para levantamientos geodésicos de alta precisión en áreas pequeñas - Río de Janeiro - Año 1986.

Jordan, Kevin - United States Department of Commerce - National Oceanic & Atmospheric Administration - National Ocean Service - National Geodetic Survey - Foundation Cors Program - Local tie information report - IERS network site: Mauna Kea, HI (USA), 2020 (https://www.ngs.noaa.gov/corbin/iss/reports/MKEA_Report_2020.pdf)