ENIA 4 ENCUENTRO NACIONAL DE INVESTIGADORES DE AGRIMENSURA
10 y 11 de noviembre de 2022.
Catamarca. Argentina
Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas
50 AÑOS UNCA

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE ENSAYO Y VERIFICACIÓN DE RECEPTORES GNSS RTK

Paús, P[(1)]; Romano, J[(2)]; Rohner, A; Aldasoro R; Bergamini, J

(1) Facultad de Ingeniería (UNLP), Prof. Instrumental y Técnicas Especiales, Calle 1 y 47 - La Plata (B1900TAG) - Buenos Aires - Argentina - Tel: (+54) (221) 425-8911 Int. 254, pablo.paus@ing.unlp.edu.ar
(2) Facultad de Ingeniería (UNLP), Prof. Topografía I y II, Calle 1 y 47 - La Plata (B1900TAG) - Buenos Aires - Argentina - Tel: (+54) (221) 425-8911 Int. 254, jose.romano@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

Las actividades aquí presentadas fueron desarrolladas por el Grupo de Metrología del Departamento de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, se encuadra en la continuidad de un proyecto de metrología aplicada a instrumental Topogeodésico.
El objetivo general de este trabajo es analizar e interpretar la Norma ISO 17123-8:2015 para implementar un procedimiento de ensayo que permita determinar la calidad en la medición de receptores GNSS RTK, para luego poder ofrecer servicios de evaluación metrológica a los usuarios de estos equipos.
La aplicación del procedimiento en campo fue desarrollada en AGGO, (Observatorio Argentino Alemán de Geodesia), y los resultados obtenidos permitieron obtener la incertidumbre de medición del equipo ensayado y a partir de esta información se pudo determinar su aptitud para realizar las tareas requeridas. Estos resultados son expresados en un informe técnico emitido por el Grupo de Metrología, expresando la incertidumbre tipo A del instrumental, así como la incertidumbre expandida (nivel de cobertura del 95%).

PALABRAS CLAVE: ISO 17123-8:2015; GNSS RTK; Metrología; Verificación.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo, se enmarca en una beca de extensión otorgada por la Facultad de Ingeniería de la UNLP. Las tareas se realizaron de forma virtual, durante el año 2020, con el Grupo de Metrología del Departamento de Agrimensura que desarrolla sus actividades en el Gabinete "Prof. Ing. Gabriel Jesús Gómez", con la colaboración de personal del Laboratorio de Óptica, Calibraciones y Ensayo de la FCAGLP.
El levantamiento de puntos en modo cinemático en tiempo real (RTK, por sus siglas en inglés) es de uso habitual y extendido por profesionales de la Agrimensura. Pero regionalmente, el uso masivo de estas técnicas no ha sido acompañado por el desarrollo e implementación de métodos orientados a garantizar la calidad de las determinaciones efectuadas, ofreciendo la correspondiente certificación. La tendencia a nivel global es la adopción de normas internacionales, las cuales dentro del campo de la Geodesia y la Topografía (Normas ISO 17.123), establecen los procedimientos para la verificación de instrumentos. Por otro lado, para la implementación de estos procedimientos se deben observar los "requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración", como los establecidos en la norma ISO 17.025.
Parte de este trabajo consistió en analizar e implementar la norma ISO 17.123-8:2015 GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK). Esta norma establece los procedimientos de campo y gabinete para determinar la precisión (repetibilidad) de

equipos GNSS aplicando la metodología RTK.
Este trabajo se suma a las tareas que viene desempeñando el Grupo de Metrología del Departamento de Agrimensura, en cuanto a la verificación y calibración de Instrumental Topogeodésico, orientadas a brindar al sector público y privado la posibilidad de disponer de un certificado de verificación y/o calibración de instrumental de uso corriente en la Ingeniería, y en particular en aplicaciones propias de la Agrimensura.

Sistemas GNSS RTK

GNSS (Sistemas de Navegación Global por Satélite) es el término que se utiliza genéricamente para cualquier tipo de sistema de posicionamiento satelital. Los equipos receptores GNSS son el segmento de usuario en este sistema de posicionamiento, y su objetivo es observar las señales transmitidas por los satélites para calcular su posición sobre el globo terrestre, ya sea en tierra, mar o aire. Existen distintos tipos de técnicas GNSS, la norma ISO 17.123-8:2015 trata sobre los de tipo cinemático en tiempo real (RTK: Real Time Kinematics) que requiere del uso de dos o más receptores. Todos los equipos deben estar recibiendo en simultáneo la señal de, por los menos, cuatro satélites en común, lo que permitirá determinar posiciones (coordenadas en el espacio) sobre el terreno, prácticamente en cualquier parte del planeta, con una exactitud de algunos centímetros, lo que lo hace muy adecuado para la mayoría de los propósitos de topografía y cartografía.
La medición con GNSS RTK consiste en colocar uno de los equipos, denominado base sobre un punto cuya posición (coordenadas) es conocida. Como la misma es un dato, el receptor base puede calcular los errores de medición y las correspondientes correcciones, las que luego se transmiten al otro equipo denominado rover (o móvil), que se ubica sobre un punto de coordenadas desconocidas a determinar. Al recibir éste las mismas señales de los satélites y además las correcciones de la estación base, se encuentra en condiciones de calcular sus coordenadas en tiempo real.
Cuando se trabaja en RTK, la transmisión de las correcciones desde el equipo base hacia el rover se realiza mediante una conexión de radio UHF, cuyo alcance máximo varía entre los 5/10km, donde se puede considerar que los errores que afectan a los dos equipos son los mismos.

OBJETIVOS

- Determinar la precisión alcanzable por un equipo GNSS RTK aplicando los procedimientos propuestos por la norma ISO 17123-8. De este modo se puede establecer si el equipo es apto o no para cada tarea en particular.
- Brindar a los profesionales de la Agrimensura servicios de control metrológico sobre sus instrumentos. Sumando un servicio más al Gabinete “Prof. Ing. Gabriel Jesús Gómez” del Dpto. de Agrimensura de la FI UNLP.
- Formación de recursos humanos en el marco de una beca de extensión; lo cual permite formar al alumno becario en la temática desarrollada.

Norma ISO 17123-8:2015

El objeto de la norma ISO 17123 es proveer un método uniforme para la evaluación de la precisión (desviación estándar experimental) de los distintos instrumentos de medición.

También es utilizada como herramienta para definir las incertidumbres estimadas, lo cual permite sumar todas las componentes, aleatorias o sistemáticas, y obtener una precisión de medición representativa, esto es la incertidumbre estándar combinada.
Esta norma cuenta de diferentes partes, la número 8 del año 2015 brinda una serie de procedimientos de campo y cálculo que permiten determinar y evaluar la incertidumbre de los resultados de medición obtenidos mediante receptores GNSS RTK. Para ello se proponen dos procedimientos, un simple y otro completo, el último posibilita obtener la incertidumbre de medida del equipo y sus accesorios, en condiciones de campo, y de este modo establecer que tareas son posibles de realizarse.
Esta norma brinda una estimación sobre la calidad de las coordenadas relativas dada por los equipos; y no sobre sus valores absolutos.
Este tipo de normas constituye un documento de uso restringido, el ejemplar utilizado fue adquirido por la Facultad de Ingeniería, en formato papel.

MÉTODO

La norma ISO 17123-8:2015 provee dos procedimientos, uno simple y otro completo. En ambos casos el ensayo de campo requiere de una base con dos puntos fijos sobre los que se posicionará el equipo rover, separados una distancia que puede variar dentro de un rango de 2 a 20 metros (figura 1).

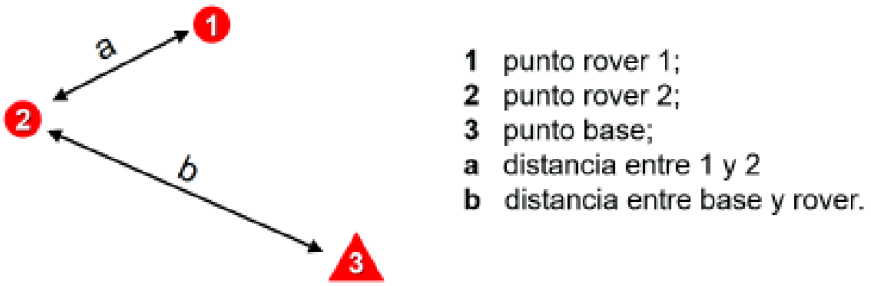


Figura 1.- Esquema del campo de ensayo.

Para los puntos 1 y 2, la distancia horizontal y la diferencia de altura calculadas a partir de las coordenadas en cada grupo de mediciones, deben ser comparadas con los respectivos valores nominales para asegurar que estén libres de errores groseros. Estos valores nominales se deben determinar por métodos cuya precisión sea mejor que 3mm, excluyendo a RTK, y se usan en el primer paso de ambos procedimientos de las pruebas.
En estos procedimientos, una sesión de mediciones consiste en cinco grupos. Cada grupo consiste en 2 mediciones, una en el punto 1 y la otra en el punto 2 de rover; en total, son 10 mediciones por sesión (figura 2).

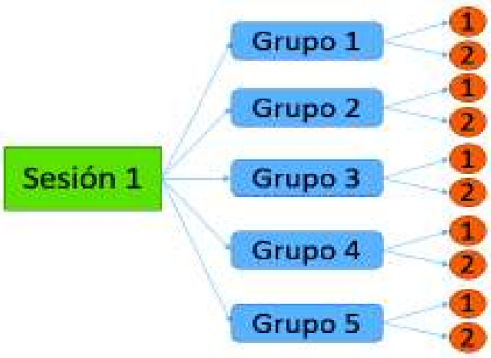


Figura 2.- Esquema de una sesión de medición.

Entre sucesivos grupos de mediciones debe existir un lapso de 5 minutos. Por lo tanto, una sesión de medición tiene una duración de al menos 25 minutos. Además, el tiempo de inicio entre sesiones sucesivas debe ser de al menos 90 minutos. De este modo, se tienen en cuenta la influencia de los cambios en la configuración de los satélites y las variaciones en las condiciones ionosféricas y troposféricas.

Procedimiento de ensayo simple

Consiste en una única sesión de medición y permite determinar si un equipamiento es apto o no para realizar una tarea que requiere una determinada precisión. En este procedimiento se busca identificar la existencia de errores groseros, cuya presencia implicaría el descarte de las mediciones y la necesaria repetición del procedimiento. Si se rechaza nuevamente el procedimiento, se debe dudar del operador o de algún daño en el equipo.
Este procedimiento está basado en un limitado número de mediciones, por consiguiente, no se puede aplicar ningún análisis estadístico. Si se requiere una evaluación más precisa del equipamiento, es recomendable adoptar un procedimiento más riguroso, como el sugerido en el ensayo completo.

Procedimiento del ensayo completo

Este procedimiento requiere de tres sesiones de medición y permite obtener más información que el procedimiento simple sobre la precisión alcanzable con un equipo RTK. Como resultado de su aplicación, se obtienen los valores correspondientes a la desviación estándar experimental para una posición (s_{xy}), así como la desviación estándar experimental para una altura (s_h) de un punto medido con el equipo ensayado. Una vez definidos estos parámetros, se realiza un test estadístico chi-cuadrado para establecer la calidad de los resultados, verificando si la desviación estándar experimental es un estimador del desvío estándar de la población.

Trabajo de campo realizado

El campo de ensayo se configuró en AGGO, ubicado en el predio del IAR, en el Parque Pereyra Iraola, y la ubicación de los puntos se aprecia en la figura 3. La distancia entre los puntos 1 y 2 se fijó de acuerdo con la norma, mientras que la distancia al punto 3 (base) se elige de acuerdo a la distancia habitual de trabajo; lo mismo ocurre para otros parámetros de trabajo como por ejemplo la cantidad de épocas de medición del rover.



Figura 3.- Campo de ensayo utilizado en AGGO.

Los equipos ensayados fueron dos receptores gemelos, marca TOPCON, modelo Hiper V, uno configurado como base y otro como rover (figuras 4a y 4b).



Figura 4.- (a) Receptor base colocado sobre un pilar. (b) Receptor rover.

En lo que respecta al ensayo con los equipos, se colocó al receptor base en un pilar con coordenadas conocidas y se conformó una línea de base para el rover con dos trípodes (figura 5) y se realizaron las tres sesiones de medición como indica la norma. La duración total del ensayo fue de aproximadamente 4,5 hs.



Figura 5.- Implementación de la línea base para el rover.

Para poder comparar las distancias y las diferencias de alturas obtenidas a partir de GNSS RTK con sus correspondientes valores nominales fue necesario utilizar trípodes con bases nivelantes con sistema de centrado forzoso, para asegurar la precisión exigida por la norma. A su vez, las coordenadas planas (x,y) obtenidas con GNSS RTK corresponden al sistema oficial argentino POSGAR 07 empleando la proyección Gauss-Krüger Faja 6, mientras que las alturas (h) son elipsoidales.

Medición de valores nominales

El sistema de centrado forzoso permitió que las mediciones realizadas con instrumental diferentes apliquen sobre los mismos puntos (figura 6).

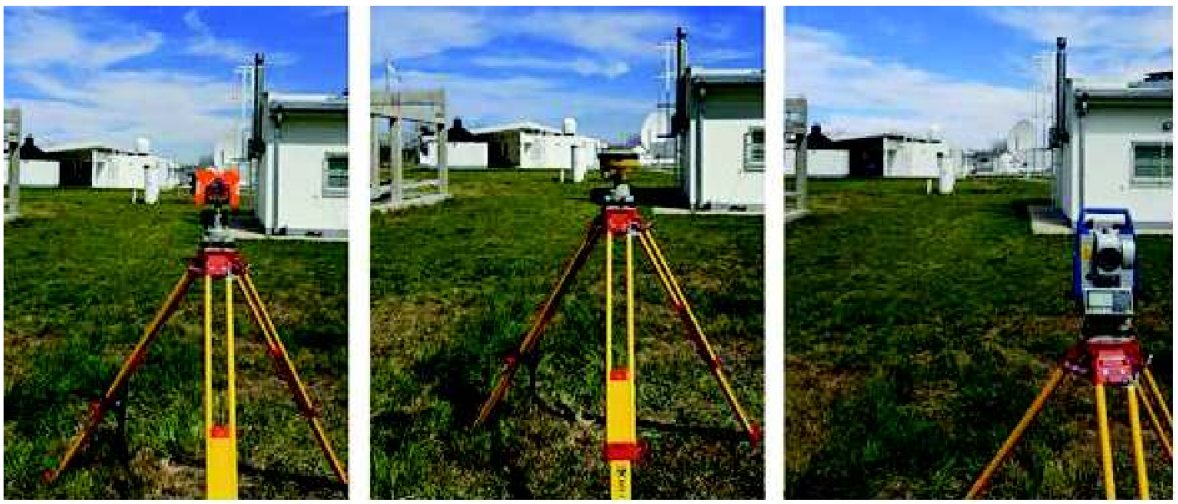


Figura 6.- Punto rover 2 en diferentes etapas del ensayo.

Con los puntos rover 1 y 2 se conformó una línea base de 19,039 m, con un desnivel entre ambos de -0,176 m. Ambas magnitudes anteriores, que constituyen los valores nominales, se determinaron a partir de un método elaborado por este grupo de trabajo. Sobre los dos trípodes y mediante el sistema de centrado forzoso, se realizaron tres sesiones de medición con estación total, de forma recíproca, midiendo al prisma en sus dos posiciones y aplicando el método de doble lectura de Bessel. En total se realizaron 48 mediciones, tanto de la distancia como del desnivel, lográndose una precisión mejor que ± 1 mm en la determinación de estos valores nominales (tabla 1)

Tabla 1.- Valores nominales y sus desvíos.

	Distancia (D)	Desnivel (Δh)
Promedio	19,0386 m	-0,1765 m
s	0,0008 m	0,0007 m

La estación total utilizada fue un equipo Spectra Focus 2. La diferencia de altura entre el punto de referencia de la estación total y el centro óptico del prisma se determinó por medición recíproca. Previo al ensayo, este equipo de estación total fue verificado en la línea base de la Facultad de Ingeniería (UNLP).

RESULTADOS

Se realizó el ensayo de acuerdo con el procedimiento completo dado por la norma ISO 17123-8, completándose las tres sesiones de medición previstas. En la tabla 2 se muestra la sesión 1 completa.
Con se aprecia en la tabla 2, para la sesión 1 se calculan la distancia horizontal (Dj) y la diferencia de altura (Δhj) entre los puntos rover 1 y 2. Esto se realiza para cada grupo de las tres sesiones. Posteriormente las distancias horizontales y las diferencias de alturas se contrastan con los valores nominales, para así detectar posibles errores groseros. Finalizadas y verificadas las tres sesiones, se pasa al cálculo estadístico y a la realización del test de hipótesis; de acuerdo a los procedimientos de la norma.

Tabla 2.- Observaciones GNSS TTK realizadas en los puntos rover 1 y 2 para la sesión 1.

Secuencia Nro.	Serie	Grupo	Punto Rover	Mediciones			Distancia Horizontal	Diferencia de altura
				x	y	h	D_j	Δh_j
1	1	1	1	6140851.301	6395787.390	16.901	19.044	-0.179
2	1	1	2	6140870.316	6395786.343	16.722		
3	1	2	1	6140851.301	6395787.385	16.899	19.047	-0.165
4	1	2	2	6140870.319	6395786.341	16.734		
5	1	3	1	6140851.301	6395787.387	16.906	19.043	-0.184
6	1	3	2	6140870.315	6395786.343	16.722		
7	1	4	1	6140851.303	6395787.382	16.896	19.042	-0.166
8	1	4	2	6140870.316	6395786.340	16.730		
9	1	5	1	6140851.303	6395787.386	16.901	19.042	-0.174
10	1	5	2	6140870.316	6395786.342	16.727		

Cumpliendo con el procedimiento completo, a partir de las coordenadas planas observadas de los puntos se calcula la desviación estándar experimental para una única posición denominada s_{xy} y la desviación estándar experimental para una única altura s_h. Estos resultados corresponden a las denominadas incertidumbres tipo A, para el caso del equipamiento ensayado:

$s_{xy} = 4{,}0\ mm$

$s_h = 7{,}9\ mm$

Test estadístico

La norma ISO 17.123-8:2015 aplica el test de hipótesis chi-cuadrado que permite dar respuesta a la siguiente pregunta: *¿Es la desviación estándar experimental calculada a partir de las mediciones (s), menor o igual al valor de referencia dada por el fabricante (σ)*?

Si bien la norma no lo establece, es importante verificar al menos en forma empírica, que los residuos de las observaciones no tengan sesgo y su distribución sea normal, para ello se realizó un gráfico de residuos para xy y otro para h, con sus correspondientes histogramas, que se muestran en la figura 7 y figura 8 respectivamente.

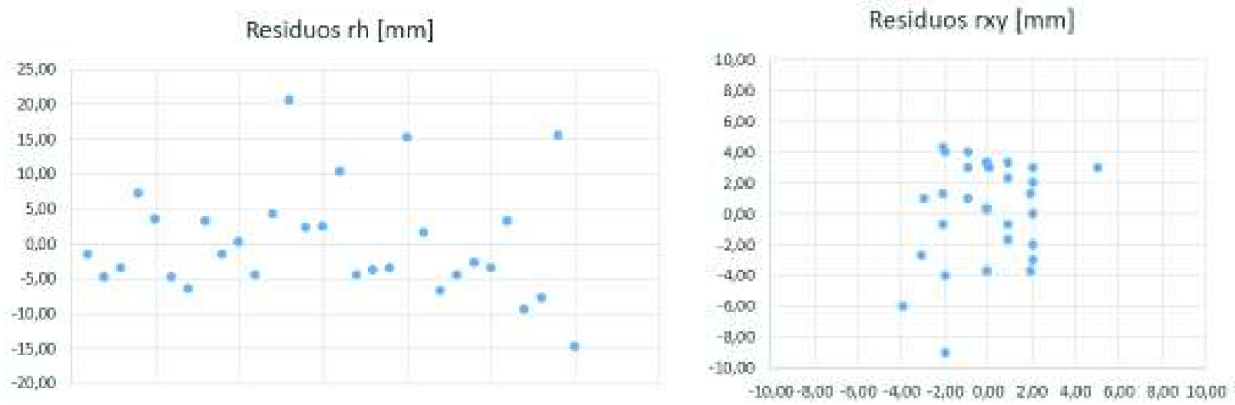


Figura 7.- Gráfico de los residuos

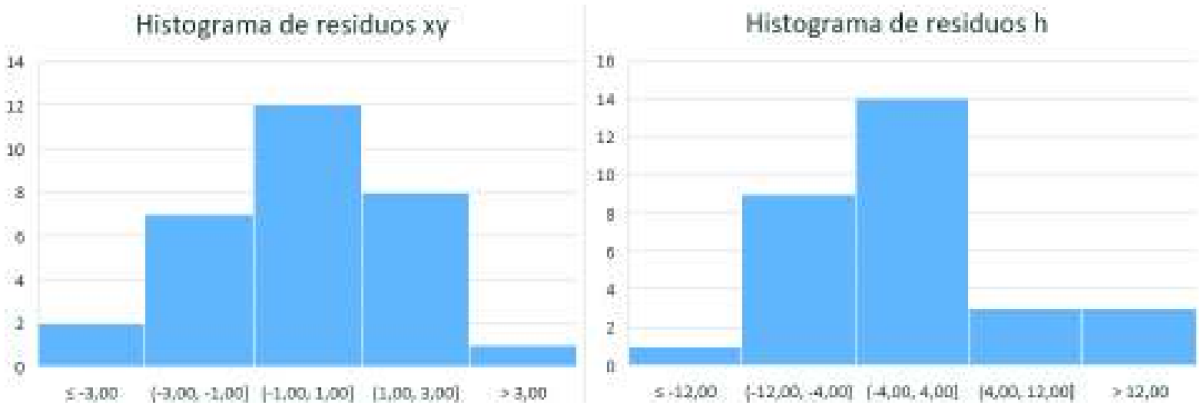


Figura 8.- Histograma de los residuos

Aceptada una distribución normal para los residuos se aplica el test estadístico chi-cuadrado tal como se establece en la norma:

Tabla 3.- Test chi-cuadrado.

Pregunta	Hipótesis nula	Hipótesis alternativa
a)	$s_{xy} \leq \sigma_{xy}$	$s_{xy} > \sigma_{xy}$
b)	$s_h \leq \sigma_h$	$s_h > \sigma_h$

Nivel de confianza: $1 - \alpha = 0,95$
Grados de libertad:

- $v_x + v_y = 56$
- $v_h = 28$

Tabla 4.- Valores utilizados en el test.

Datos experimentales		Datos del fabricante	
s_{xy} (mm)	3,98	σ_{xy} (mm)	10,00
s_h (mm)	7,88	σ_h (mm)	15,00

Se procede a aplicar las ecuaciones:

$$s_{xy} \leq \sigma_{xy}\ x\ 1,15 \quad (1)$$
$$s_h \leq \sigma_h\ x\ 1,22 \quad (2)$$

Resultando:

$$3,98\ mm \leq 10,00\ mm\ x\ 1,15 \quad (3)$$
$$3,98\ mm \leq 11,50\ mm \quad (4)$$

$$7,88\ mm \leq 15,00\ mm\ x\ 1,22 \quad (5)$$
$$7,88\ mm \leq 18,30\ mm \quad (6)$$

Por lo tanto, las desviaciones estándar experimentales para una posición (s_{xy}) y para una altura (s_h) superan el test estadístico.

Combinación de incertidumbres tipo A y tipo B

Posteriormente, estas incertidumbres tipo A deben combinarse con las del tipo B propuestas por la norma.

Tabla 5.- Incertidumbres Tipo A y Tipo B utilizadas de acuerdo con la norma ISO 17123-8

Evaluación	Causa de la incertidumbre
Tipo A	s_{xy}: $\mu_{ISO\text{-}GNSS\text{-}xy}$
Tipo A	s_h: $\mu_{ISO\text{-}GNSS\text{-}h}$
Tipo B	μ_{bub} = sensibilidad del nivel tubular
Tipo B	μ_{ha} = altura de la antena
Tipo B	μ_c = error de centrado
Tipo B	μ_{disp} = error de redondeo del display en x, y, h
Tipo B	μ_{dx} = parámetro dx de desplazamiento de centrado de la antena
Tipo B	μ_{dy} = parámetro dy de desplazamiento de centrado de la antena
Tipo B	μ_{dh} = parámetro dh de desplazamiento de centrado de la antena
Tipo B	μ_{tr} = transformación
Tipo B	μ_{dH} = ondulación del geoide
Tipo B	μ_{hs} = estabilidad de altura del trípode

En esta norma no se consideran los efectos de:

- Multicamino.
- Reloj del receptor GNSS o en los satélites.
- Retardo ionosférico.
- Retardo troposférico.

Las ecuaciones aplicadas para obtener las incertidumbres combinadas para una posición (μ_{xy}) y una altura (μ_h) son:

$$\mu_{xy} = \sqrt{\mu_{ISO-GNSS-xy}^2 + [h_a \times \tan(\mu_{bub})^2] + 2 \times \mu_{disp}^2 + \mu_c^2 + \mu_{dy}^2 + \mu_{tr}^2} \quad (7)$$

$$\mu_h = \sqrt{\mu_{ISO-GNSS-h}^2 + \mu_{disp}^2 + \mu_{ha}^2 + \mu_{dh}^2 + \mu_{dH}^2} \quad (8)$$

Incertidumbre expandida

Finalmente, se calculan las incertidumbres expandidas (U_{xy} y U_h). Se utilizó, según lo expresado en la norma, un factor de cobertura de 2 para un nivel de confianza de 94,45%:

$$U_{xy} = 2 \times \mu_{xy} = 13\ mm \quad (9)$$

$$U_h = 2 \times \mu_h = 17\ mm \quad (10)$$

CONCLUSIONES

A raíz de este trabajo fue posible

- Comprender y aplicar exitosamente la Norma ISO 17.123-8:2015 a un equipo GNSS RTK de uso común en Agrimensura.
- Incorporar al gabinete una nueva evaluación metrológica, que se suma dentro del proyecto de calibración y verificación de instrumental Topogeodésico.
- Satisfacer la necesidad de los profesionales de la Agrimensura en cuanto a la posibilidad de verificación de instrumentos GNSS RTK.
- Actualizar los contenidos de distintas cátedras de la carrera de Ing. Agrimensor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NORMA ISO 17.123 (2015). Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK).

NORMA ISO 17.123 (2010). Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 1: Theory.

BERNÉ VALERO, José Luis (2014). GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática. Valencia. Universitat Politècnica de València.

GHILANI, Charles D. and WOLF, Paul R. (2006). Adjustment Computations: Spatial Data Analysis (4th ed.). United States of America. John Wiley & Sons, Inc.

MONTGOMERY, Douglas C (2003). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería (2da ed.). México. LIMUSA, S.A.

CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA (2012). Vocabulario Internacional de Metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM) (3ra ed.).

TOPCON (2012). HiPer V Operator´s Manual.