

CREACIÓN DE UN POLÍGONO GEODÉSICO PARA LA VALIDACIÓN DE LA TECNOLOGÍA GNSS

Dr.C. Ernesto Rodríguez Roche, Inv. Titular; GEOCUBA Investigación y Consultoría.
Calle Loma y 39. Plaza de la Revolución. La Habana. Teléf.: 053-7-8832491
erroche@uct.geocuba.cu

Palabras claves: red geodésica, GPS, GNSS, polígono de validación GNSS.

1. Resumen

En la actualidad se ha afianzado el empleo de los sistemas globales de navegación por satélites (GNSS) para las tareas de posicionamiento geodésico. Para ello se emplean receptores de diferentes precisiones y precios, en función de las exigencias de exactitud que demandan los proyectos. Con vistas a determinar el grado de aptitud de la tecnología GNSS a ser empleada en el marco de diversos trabajos, la práctica internacional apunta a la verificación de la misma en redes geodésicas especiales, denominados polígonos de validación GNSS (PVG), consistentes en micro-redes conformadas por estaciones de centración forzada, cuyas coordenadas patrones se conocen con un alto grado de precisión y confiabilidad.

En el presente trabajo se analizan las experiencias en la creación de un PVG, ubicado en la zona nororiental de La Habana, que servirá para verificar los receptores GPS de que dispone la Empresa GEOCUBA Geodesia, así como de otros organismos que arriben a su Laboratorio Metrológico.

2. Introducción

El posicionamiento geodésico con tecnología espacial se emplea por primera vez en Cuba durante el período de diciembre de 1989 a marzo del 1990, cuando en el país se desarrolló una campaña de determinaciones Doppler. Como resultado se obtuvo una red de 14 estaciones para las que el error medio cuadrático (e.m.c.) en su ubicación tridimensional (3D) osciló entre 0,20 m y 0,40 m [6].

Con vistas a facilitar la adopción del Sistema Geodésico Mundial del año 1984 (WGS84) como superficie geodésica normalizada en la navegación aérea del país y así cumplir con un compromiso internacional ante la Organización Internacional de Aeronáutica Civil (OACI), el Grupo Empresarial GEOCUBA proyectó y desarrolló los trabajos para crear una red GPS de referencia en todo el territorio nacional, que finalmente quedó conformada por 20 estaciones. El empleo de receptores GPS de alta precisión (doble frecuencia), efemérides precisas, datos iniciales de una estación IGS cercana, así como una acertada estrategia de medición y cálculo de los

puntos de la red, permitió alcanzar precisiones del orden de 1-2 cm en su ubicación 3D. Las mediciones directas estuvieron referidas al Marco Internacional Terrestre de Referencia ITRF96 (época 1998.46). Finalmente se determinaron los parámetros de transformación entre este datum y Clarke 1866, obteniéndose las coordenadas de las 20 estaciones de la red en los sistemas WGS84 y Clarke 1866 [3]. Los nuevos valores de las coordenadas en nuestro elipsoide de referencia fueron adoptados como iniciales para el reajuste conjunto de la red planimétrica de 1er. orden, lo que permitió mejorar significativamente los principales parámetros de precisión de dicha red [5].

Para poder validar el desempeño de la tecnología de los Sistemas Globales de Navegación por Satélites (GNSS) que se emplea en los trabajos topogeodésicos, en diversos países se han creado redes o polígonos especiales empleando metodologías rigurosas y tecnologías de alta precisión, donde las coordenadas de los puntos fungen como “patrón de comparación” para el proceso de determinación de coordenadas y alturas con GNSS en diferentes aplicaciones. Así, por ejemplo, Canadá dispone de una red de este tipo en cada provincia [6], [7]. En Cuba existen experiencias de validar la tecnología GPS en polígonos de comparación de distanciómetros electro-ópticos.

En la actualidad la Empresa GEOCUBA Geodesia desarrolla trabajos al este de la capital para la actualización del mapa topográfico a escala 1:10000, empleando las técnicas de posicionamiento GPS e imágenes cósmicas de alta resolución. Los mismos requieren de una base geodésica confiable, tanto en el sistema WGS84, como en el datum del Sistema Geodésico Nacional (SGN), con vistas a poder georreferenciar con exactitud los levantamientos para la actualización, así como para determinar los parámetros de transformación más confiables entre los citados datum. Estos trabajos exigen conocer a priori el estado de la tecnología GPS, fundamentalmente monofrecuencia (L1) y el soporte lógico asociado, para prever un cumplimiento exitoso de las exigencias de calidad proyectadas. En esta zona existe una red de puntos consistentes en pilares de centración forzada, ubicados en lugares de acceso relativamente fácil cercanos a estaciones de la red de triangulación. Esta red fue edificada en el año 1989 con el propósito de disponer de un polígono geodésico para validar las diferentes técnicas de posicionamiento geodésico (planimétrico, altimétrico, gravimétrico, astrogeodésico) disponibles en el país en esa época. La llegada del período especial deprimió sensiblemente la actividad topo-geodésica nacional, por lo que de dicha red sólo se consiguió cumplimentar la etapa de monumentación, faltando los Datos Geodésicos de los Puntos (DGP) correspondientes a la mayoría de las estaciones. Atendiendo a las características de estos puntos: acceso relativamente fácil, falta de obstrucción natural o artificial significativa en los sitios, distribución homogénea en el área con distancias que fluctúan entre 4 km y 16 km y una monumentación de alta calidad que garantiza la estabilidad de la reducción a la referencia geodésica mientras dure la ocupación, los puntos constituyen una infraestructura ideal para crear una red GPS de alta precisión y exactitud como referencia a trabajos de posicionamiento en el área. Para ello se debe establecer, en primer lugar, la existencia física de los monumentos, el grado de aptitud actual para la ocupación GPS y los procedimientos adecuados para la determinación rigurosa de sus coordenadas 3D referidas al WGS84. Todas estas razones conllevan a la creación de un proyecto para la creación de un PVG en la zona de Guanabo [7].

3. Objetivos

El objetivo fundamental de los trabajos era disponer de una red de puntos geodésicos con coordenadas precisas en el sistema WGS84, que sirvieran como patrón para validar la tecnología GPS L1 de que dispone la Empresa GEOCUBA Geodesia. Esto permitiría cumplir con las exigencias de calidad impuestas para la certificación de su laboratorio metrológico. Para dar cumplimiento a este objetivo fue necesario satisfacer los objetivos específicos siguientes:

- Evaluar el estado actual de los puntos existentes.
- Determinar las coordenadas geodésicas WGS84 de los puntos.
- Determinar las alturas normales de los puntos.

Los objetivos generales y específicos trazados se correspondieron con las siguientes etapas fundamentales, a saber:

- La proyección de los trabajos.
- El reconocimiento de los puntos de la red.
- El estudio geólogo-geográfico del área.
- Las determinaciones GNSS.
- El procesamiento y confección del catálogo de coordenadas.
- La nivelación de precisión.
- La confección del Informe Técnico.

4. Material y métodos

4.1. Proyección de la red.

Los trabajos proyectados abarcaron un área aproximada de 156 km², ubicada en el territorio de las provincias La Habana y Mayabeque.

Para la identificación de los puntos se utilizó un esquema con la ubicación aproximada de las estaciones, que databa de la etapa de monumentación. Inicialmente, de la red original de 13 puntos se eligieron seis, que conformaban dos cuadriláteros con un lado común. Con vistas a seleccionar la configuración definitiva de la red se desarrolló el reconocimiento de campo. Para el mismo se tuvieron en cuenta los criterios generales para elegir un sitio para la ocupación GPS: posibilidad de acceder fácilmente al punto, el sitio deberá estar desprovisto de obstrucciones naturales o artificiales en todo el horizonte para un ángulo máscara de 15°, en las cercanías no deberán existir fuentes potentes de transmisión radioeléctrica, ni superficies reflectantes significativas (techos con cubiertas de aluminio, grandes superficies acuosas, etc.). La inspección a los lugares permitió también valorar las condiciones geológicas e ingeniero-geológicas donde están enclavados los puntos de la red, con vistas a determinar la factibilidad de que los mismos permanezcan en el lugar actual, o si por problemas de inestabilidad tectónica o de las características

de los suelos, convenía reubicarlos para cumplir con los planes de obtener una red de alta precisión [7]. Finalmente se decidió conformar la red como un cuadrilátero compuesto por las estaciones 02-P-ICGC-1989, 05-P-ICGC-1989, 06-P-ICGC-1989 y 07-P-ICGC-1989, con distancias entre los puntos que oscilan entre 4 km y 11 km (figura 1).

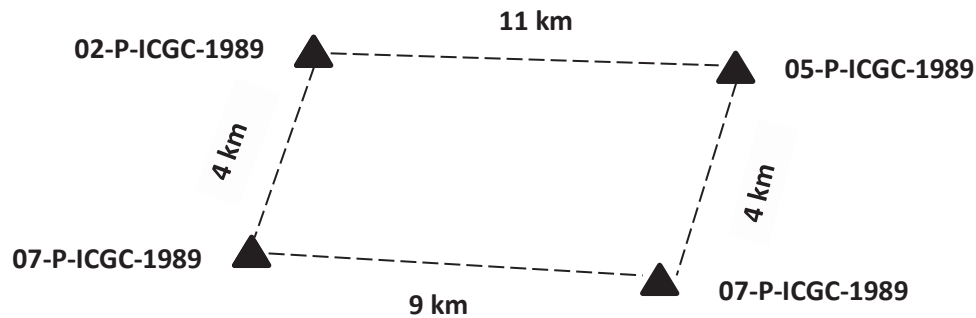


Fig. 1 Esquema de la red

Además de estas cuatro estaciones se utilizaron otros dos puntos de centración forzada, más alejados del área, que disponían de coordenadas precisas determinadas con anterioridad por enlace directo GPS. Estas son la estación *Metro-1-26*, perteneciente a la red planimétrica superficial del Metro y *HAVA*, ubicada en la azotea de GEOCUBA Investigación y Consultoría (véase Anexo 1). Esta última dispone de coordenadas precisas (e.m.c. 3D: ± 1 cm) referidas al ITRF2008. El empleo de estos puntos obedeció a la necesidad de acercar la base geodésica al área, así como para referir la red al SGN.

4.2. Tecnología empleada.

La tecnología a emplear para los trabajos consta del equipamiento GNSS y el soporte lógico utilizado para la elaboración matemática de las observaciones.

Las mediciones se realizaron con cuatro estaciones GNSS de doble frecuencia *Leica Viva GS10* (GS10 & CS10 & AS10), véase figura 2, que brindan una precisión nominal relativa del orden de $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ p.p.m.}$ (parte por millón).

Para el procesamiento de las mediciones se empleó el paquete de programas *Leica Geo Office v8.2*, del que se disponen las opciones siguientes:

- Procesamiento de vectores con las observables GPS L1 y L2.
- Importación de ficheros en formato RINEX.
- Exportación a formato GIS/CAD (.dwg, .dxf, .dgn).
- Diseño y ajuste de redes 3D.
- Transformación de coordenadas (Datum & Map).

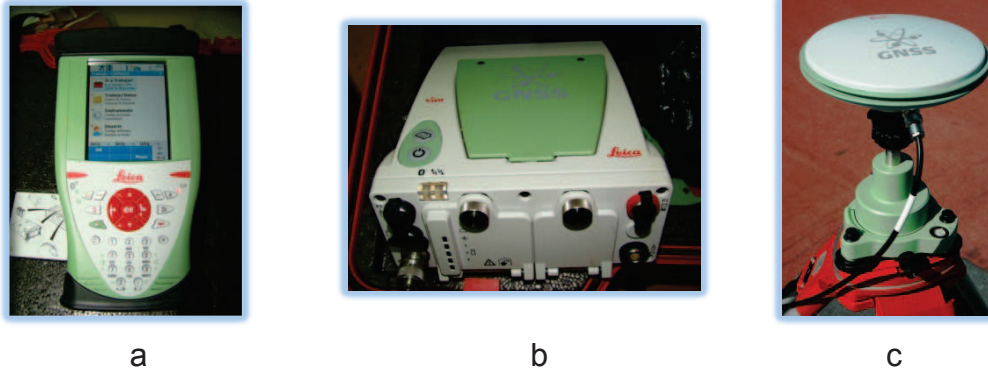


Fig. 2 Componentes de la tecnología *Leica Viva GS10*: controlador CS10 (a), sensor GS10 (b) y antena AS10 (c)

4.3. Requisitos técnicos.

La red se proyectó de modo que cumpliera con las exigencias técnicas de una red GPS de 3er. orden, para la cual el error relativo permisible debe ser de 1 p.p.m. [3]. Las alturas ortométricas de los puntos se determinará con nivelación geométrica de II orden [4].

4.4. Determinaciones GNSS.

En la Tabla 1 se indica la información que resume la ocupación de las estaciones. En la misma se aprecia la inclusión de un punto geodésico con monumento sencillo, ITM-4, que por su cercanía a escasos metros del punto 07-P-ICGC-1989 fue ocupado con un receptor L1 Leica SR20, mientras aquel se determinaba desde HAVA. Durante las mediciones los datos del rastreo quedaron plasmados en libretas de campo confeccionadas al efecto (Anexo 2).

El procesamiento de las determinaciones GPS se desarrolló en el ambiente del soporte lógico LGO v8.2., adoptando como referencia las coordenadas ITRF2008 de la estación HAVA. En el Anexo 3 aparece el informe del cálculo de uno de los vectores GPS.

Una vez calculados todos los vectores medidos se procedió a realizar el ajuste por mínimos cuadrados, empleando para el ello el correspondiente módulo del programa LGO. Para el mismo se adoptó únicamente como iniciales las coordenadas de la estación HAVA.

Tabla 1. Esquema de ocupación de las estaciones

N°	Referencia	Móvil	Distancias (km)	Tiempo medición (h)
1	HAVA	Metro-1-26	14,7	2,5
		02-P-ICGC-1989	25,1	2,5
		07-P-ICGC-1989	23,1	2,5
	07-P-ICGC-1989	ITM-4	0,004	1,0
	07-P-ICGC-1989	ITM-4	0,004	1,0
2	HAVA	02-P-ICGC-1989	25,1	2,5
		07-P-ICGC-1989	23,1	2,5
		06-P-ICGC-1989	31,7	2,5
3	02-P-ICGC-1989	05-P-ICGC-1989	8,6	1,5
		06-P-ICGC-1989	8,1	1,5
	07-P-ICGC-1989	05-P-ICGC-1989	10,8	1,5
		06-P-ICGC-1989	8,6	1,5

5. Resultados

En la Tabla 2 se resumen los valores de coordenadas y alturas ajustadas referidas al ITRF2008, el error tridimensional en la ubicación del punto, así como las coordenadas planas. En la última columna de la tabla se indican los valores de las alturas normales de las estaciones, obtenidas por nivelación GPS, con una exactitud similar a la de III orden de nivelación geométrica [4]. Están en proceso de obtención los valores precisos de las alturas normales a partir de la nivelación geométrica de II orden.

Para calcular las coordenadas planas se utilizaron los parámetros de transformación determinados durante la campaña GPS del año 1998 [5] y los parámetros de la proyección cónica conforme de Lambert, sistema Cuba Norte.

Tabla 2. Listado de coordenadas y alturas ajustadas de las estaciones

N°	Estación	Coordenadas WGS84						E.m.c. 3D ¹	Coordenadas Planas (CN) ²		Altura	
		Latitud Norte			Longitud Oeste				Altura	x	y	H _n
		°	'	"	°	'	"		m	m	m	m
1	02-P-ICGC-1989	23	09	25,47171	82	09	09,82994	62,453	± 0,012	381937,29	370066,58	85,004
2	05-P-ICGC-1989	23	09	17,16256	82	04	08,67983	86,580	± 0,020	390501,85	369747,83	109,101
3	06-P-ICGC-1989	23	07	07,91277	82	05	07,51613	49,190	± 0,020	388799,55	365783,72	71,289
4	07-P-ICGC-1989	23	07	27,97194	82	10	10,55295	71,846	± 0,013	380181,95	366465,28	94,001

¹ Error medio cuadrático tridimensional

² Cuba Norte

Otro elemento utilizado para comprobar la robustez interna de la red fue el cálculo del error de cierre tridimensional relativo. El cálculo del mismo arrojó un resultado de 0,93 p.p.m., por lo que la red clasifica entre 2do. y 3er. orden GPS [3].

Una vez obtenidas las coordenadas y alturas de los puntos se confeccionó una metodología dirigida fundamentalmente al personal del Laboratorio Metrológico 56 de GEOCUBA Geodesia, que le permite investigar el grado de aptitud de la tecnología GPS L1 que reparan. En esta metodología los esquemas de ocupación que se proponen variarán según la cantidad de equipos de que se disponga:

Para dos receptores GPS.

Se medirán dos sesiones de una hora de duración cada una, a velocidad de muestreo de 1 s y con un ángulo máscara de 15°. El esquema de ocupación será como sigue:

Sesión	Estación referencia	Estación a ocupar
1	02-P-ICGC-1989	05-P-ICGC-1989, 06-P-ICGC-1989, 07-P-ICGC-1989
2	07-P-ICGC-1989	02-P-ICGC-1989, 05-P-ICGC-1989, 06-P-ICGC-1989

Para tres receptores GPS.

Se medirá una sesión de una hora, a velocidad de muestreo de 1 s y con un ángulo máscara de 15°. El esquema de ocupación será como sigue:

Sesión	Estación referencia	Estación a ocupar
1	02-P-ICGC-1989	05-P-ICGC-1989, 06-P-ICGC-1989
	07-P-ICGC-1989	05-P-ICGC-1989, 06-P-ICGC-1989

Para cuatro receptores GPS.

Se medirá una sesión de una hora, a velocidad de muestreo de 1 s y con un ángulo máscara de 15°. El esquema de ocupación será idéntico al anterior, sólo que como referencias se adoptan al mismo tiempo las estaciones 02-P-ICGC-1989 y 07-P-ICGC-1989.

Durante las mediciones se llenará la libreta de campo que se muestra en el anexo 2, prestándose especial atención a los valores de las alturas de la antena GPS. Independientemente del esquema utilizado, como resultado del procesamiento se obtendrán los valores promediados de coordenadas de las estaciones. La diferencia entre las coordenadas patrones y las determinadas no deberán exceder los **0,05 m**.

6. Conclusiones

Se creó una red de validación GPS, consistente en un cuadrilátero constituido por pilares de centración forzada, ubicado al este de la capital, que permitirá la validación de la tecnología GPS L1, que arribe al Laboratorio Metrológico 56 de la Empresa GEOCUBA Geodesia.

Las determinaciones GNSS se desarrollaron con cuatro estaciones de triple frecuencia, alcanzándose una precisión de la determinación de las coordenadas elipsoidales igual o mejor a $\pm 0,02$ m, por lo que se puede afirmar que la red creada constituye un marco geodésico de referencia adecuado para la validación de la tecnología GPS L1 y las coordenadas de sus puntos se pueden considerar como patrones.

El análisis del error de cierre tridimensional relativo del cuadrilátero, es de 0,93 p.p.m., por lo que la red clasifica entre 2do. y 3er. orden GPS.

Se dan indicaciones para validar dos, tres o cuatro receptores L1, a partir de los resultados alcanzados en el presente trabajo de determinaciones GNSS.

7. Bibliografía

1. Anónimo, Referencia técnica de la estación GNSS Leica GS10. Heerbrugg. Suiza. 2012.
2. Anónimo. Documentación técnica de soporte lógico Leica Geo Office v 8.2. Heerbrugg. Suiza. 2012.
3. **MET30-09:2005**. Metodología para la creación y modernización de las redes geodésicas empleando la tecnología GPS. GEOCUBA IC. La Habana. 2005.
4. **NC 57-13:82** Red Geodésica de Nivelación Nacional. La Habana. 1982.
5. Rodríguez, R. E. Informe Técnico General *Introducción de los resultados de la Campaña GPS en la Red Geodésica Nacional*. GEOCUBA Geodesia. La Habana. 1998.
6. Rodríguez, R. E.; Proyecto de Investigación y Desarrollo *Proyección para la modernización de la Red Geodésica Estatal Planimétrica de la República de Cuba*. GEOCUBA IC. La Habana. 2005.
7. Rodríguez, R. E.; Proyecto de Investigación y Desarrollo *Creación del Polígono de Validación GPS Guanabo*. GEOCUBA IC. La Habana. 2011.
8. Rodríguez, R. E.; Informe Técnico *Creación del Polígono de Validación GPS Guanabo*. GEOCUBA IC. La Habana. 2013.

Anexo 1. Esquema de las estaciones ocupadas para crear el PVG *Guanabo*



Anexo 2. Modelo de libreta de campo empleada durante las mediciones

Denominación del proyecto: _____

Provincia/Municipio: _____ / _____

Hoja a escala 1:25 000 _____

Nombre de la estación: _____

Coordenadas aproximadas estación: φ ____° ____' λ ____° ____' h _____ m

Nombre del operador: _____

Equipamiento empleado:

Sensor/Receptor: *Modelo:* _____ *N°. serie:* _____

Controlador: *Modelo:* _____ *N°. serie:* _____

Antena: *Modelo:* _____ *N°. serie:* _____

Fecha de las mediciones: _____

Hora de inicio del rastreo (local): _____

Hora de fin del rastreo (local): _____

Tipo de montaje de la antena *Trípode* _____ *Pilar b/n* _____ *Pilar s b/n* _____

Altura de la antena:

Inicio: _____ m.

Fin: _____ m.

Promedio: _____ m.

Total de épocas captadas: _____ épocas

GDOP Inicio/Fin _____ / _____

Observaciones significativas: _____

Revisado: _____
J' de Proyecto

Anexo 3. Ejemplo de informe resultante del cálculo de los vectores GPS



Resumen de procesamiento PVG Guanabo

Información del proyecto

Nombre del proyecto:	PVG Guanabo
Fecha de creación:	13/06/2013 07:47:08
Huso horario:	-4h 00'
Sistema de coordenadas:	SGN CN
Programa de aplicación:	LEICA Geo Office 8.2
Fecha y hora de inicio:	12/06/2013 09:55:49
Fecha y hora de término:	12/06/2013 16:05:54
Puntos ocupados manualmente:	1
Kernel de procesamiento:	PSI-Pro 3.0
Procesado:	15/06/2013 10:43:01

Parámetros de procesamiento

Parámetros	Selección
Ángulo de elevación:	15°
Tipo de efemérides:	Transmitidas
Tipo de solución:	Automático
Tipo GNSS:	GPS
Frecuencia:	Automático
Fijar ambigüedades hasta:	80 km
Duración mínima para solución flotante (estático):	5' 00"
Intervalo de muestreo:	Usar todas
Modelo troposférico:	Hopfield
Modelo ionosférico:	Automático
Emplear modelo estocástico:	Sí
Dist. mínima:	8 km
Actividad ionosférica:	Automático

Información general de la línea base

HAVA - 02-P-ICGC-1989	Referencia: HAVA	Móvil: 02-P-ICGC-1989
Tipo de receptor / N/S:	GS10 / 1532598	GS10 / 1533257
Coordenadas:		
Latitud:	23° 07' 16.31451" N	23° 09' 25.47179" N
Longitud:	82° 23' 40.95405" W	82° 09' 09.83017" W
Alt Elip.:	18.4550 m	62.4596 m
Tipo de solución:	Fase: todo fijo	
Tipo GNSS:	GPS	
Frecuencia:	Sin ionosfera (L3)	
Ambigüedad:	Sí	
Intervalo de observación:	12/06/2013 11:01:24 - 12/06/2013 15:24:04	
Duración:	4h 22' 40"	
Calidad:	Desv. Est. Lat: 0.0001 m	Desv. Est. Lon: 0.0001 m Desv. Est. Alt.: 0.0003 m
	Q Posic.: 0.0002 m	Desv. Est. geom.: 0.0001 m
Vector de línea base:	DLat: 0° 02' 09.15728" DLon: 0° 14' 31.12388" DAlt: 44.0046 m	
	Geométrica: 25099.4427 m	