

Análisis Comparativo Del Posicionamiento GNSS Utilizando Receptor De Bajo Costo U-Blox De Doble Frecuencia Para Aplicaciones Topógrafo-Geodésicas

Rosendo Romero-Andrade,

Juan L. Cabanillas-Zavala,

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Posgrado en Ciencias de la Información, Universidad Autónoma de Sinaloa

Daniel Hernández-Andrade,

Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Manuel E. Trejo-Soto,

Sergio A. Monjardin-Armenta,

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Posgrado en Ciencias de la Información, Universidad Autónoma de Sinaloa

Doi:10.19044/esj.2020.v16n27p289 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n27p289](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n27p289)

Resumen

Se evaluó y comparó estadísticamente el posicionamiento obtenido a través del receptor de bajo costo U-blox ZED-F9P de nueva generación con un receptor geodésico, realizando observaciones GNSS sobre un vértice geodésico mediante del método de Posicionamiento Puntual Preciso y relativo estático, con una distancia de 33 km a la estación de referencia. Esto, con la finalidad de probar la factibilidad de utilizar receptores de bajo costo de gama similares en trabajos topográficos-geodésicos. Para ello, se consideran cuatro escenarios; en el primer escenario, se aplicó la técnica relativo estático con el equipo de bajo costo, en el segundo escenario se procesó con un receptor geodésico en modo relativo estático; ambos mediante un software comercial. Para el tercer y cuarto escenario, se procesó modo Posicionamiento Puntual Preciso con el software RTKLIB. Los resultados muestran que para la técnica Posicionamiento Puntal Preciso la precisión lograda de 1 cm por el equipo de bajo costo es apta para realizar trabajos geodésicos. En el método relativo estático, la precisión lograda de 7 mm indica que es posible utilizar el equipo de bajo costo para trabajos topógrafos-geodésicos de alta precisión considerando una línea base ≤ 33 km, esto, según la normatividad del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Palabras Clave: GNSS, U-Blox ZED-F9P, Posicionamiento Puntual Preciso, Relativo Estático

Comparative Analysis Of The GNSS Positioning By Using U-Blox Dual-Frequency Low-Cost Receiver For Topographic-Geodetic Applications

Rosendo Romero-Andrade,

Juan L. Cabanillas-Zavala,

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Posgrado en Ciencias de la Información, Universidad Autónoma de Sinaloa

Daniel Hernández-Andrade,

Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Manuel E. Trejo-Soto,

Sergio A. Monjardin-Armenta,

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Posgrado en Ciencias de la Información, Universidad Autónoma de Sinaloa

Abstract

The new generation, low-cost U-blox ZED-F9P receiver was evaluated and statistically compared by GNSS observations on a geodesic monument, through both Precise Point Positioning and Static relative positioning techniques with a distance of 33 km from the references station. This was done with the purpose of checking the use feasibility of the low-cost receiver of similar gamma in topographic-geodesic works. To that end, four scenarios were considered: in the first scenario, the static relative positioning with the low-cost equipment was applied; in the second scenario, the static relative positioning with a geodetic receiver was applied. Both scenarios were processed with commercial software. The third and fourth scenarios were processed with Precise Point Positioning techniques through the RTKLIB software. The results show that Precise Point Positioning techniques get a precision of 1 cm through the use of low-cost equipment which is suitable to apply in geodetic works. In the static relative method, the precision obtained is 7 mm, indicating the possibility of using the low-cost equipment in both survey and geodetic high precision works, considering a line base ≤ 30 Km, according to the Instituto Nacional de Estadística y Geografía normative.

Keywords: GNSS, U-Blox ZED-F9P, Precise Point Positioning, Static Relative Positioning

Introducción

Hoy en día con el avance de la geodesia, específicamente con los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS), ha sido posible desarrollar nuevas metodologías y estudios, los cuales se avocan a la mejora continua de la precisión de posicionamiento sobre un punto sobre la superficie de la Tierra, por ejemplo: análisis ionosférico como precursor sísmico (Sharma et al. 2018), estudios de deformación de la corteza (Chen et al. 2014), meteorología (Cabral-Cano et al. 2018), por citar algunos. Sin embargo, este tipo de estudios requieren de receptores con características técnicas que los convierten en receptores geodésicos o científicos (con un elevado precio), logrando alcanzar precisiones al nivel milimétrico en función del tratamiento de la información generada.

Por otro lado, debido a los altos precios en los años noventa, surgen como alternativa los receptores de bajo costo (low-cost) (Tsakiri et al. 2017), los cuales, en un principio, lograban precisiones de metros, siendo usados para aplicaciones de mapeo y navegación terrestre (Zamora-Maciél et al. 2020). Con base en lo anterior, los equipos de bajo costo son también llamados de alta sensibilidad, que alcanzan en promedio de -160 dB (Tsakiri et al. 2018) a diferencia de los receptores geodésicos que utiliza en promedio -128.5 dB (Zamora-Maciél et al. 2020); lo cual, de acuerdo con Romero-Andrade et al. (2019); Zamora-Maciél et al. (2020) afecta en gran medida el posicionamiento, ya que recibe señales degradadas por objetos cercanos al receptor logrando alcanzar 10 m, debido al efecto de multitraectoria (Romero-Andrade et al. 2019).

Estrictamente para la geodesia, los equipos de bajo costo dependen del tipo de procesamiento, tratamiento de la información y software utilizado para lograr altas precisiones (Ferhat et al. 2015), no obstante, es posible aplicar el misma metodología a las observaciones generadas con los equipos de bajo costo que las de los equipos geodésicos. En el estado del arte, los trabajos que han empleado equipos de bajo costo suelen estar orientados al uso y prueba a través de métodos como el Diferencial GPS (DGPS) o Cinemático en Tiempo Real (RKT), así mismo, la precisión de los equipos de bajo costo ha sido evaluada en aplicaciones como agricultura moderna (Keskin et al. 2017), ciencias forestales (Tomaščík et al. 2017), sistema de prevención sísmica (Saunders et al. 2016), monitoreo de laderas (Cina y Piras 2015), evaluación del posicionamiento obtenido en RTK bajo las normas ISO (Garrido-Carretero et al. 2019; Tsakiri et al. 2017), evaluación de líneas base geodésicas (Zamora-Maciél et al. 2020), evaluación de la técnica PPP en sistemas embebidos

mediante software académico (Romero-Andrade et al. 2019), en costas para medir el nivel del mar (Knight et al. 2020), así como su rendimiento (Cina y Piras 2015; Guo et al. 2018).

En este sentido, se han llevado a cabo diversos estudios para probar la funcionalidad y rendimiento de los equipos de bajo costo en distintos ambientes. Dado lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es probar la factibilidad de utilizar los equipos de bajo costo en trabajos topógrafos-geodésicos, por ello, el receptor de bajo costo es evaluado bajo el método relativo estático y de Posicionamiento Puntal Preciso (PPP). Para esto, se tomó como referencia las coordenadas alcanzadas con el receptor geodésico, siendo así contrastados en los mismos términos acorde con las normas técnicas para levantamientos geodésicos que señala el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Marco teórico

Método de Posicionamiento Puntal Preciso y Relativo Estático

El posicionamiento relativo estático es comúnmente usado para llevar a cabo el procesamiento de las mediciones en los trabajos topógrafo-geodésicos, el cual consiste (para una línea base simple) en permanecer dos receptores (uno con coordenadas conocidas) estacionarios durante toda la medición. Este método está directamente relacionado con la longitud de la línea base, el tiempo de observación (la precisión es correlacionada con la longitud de la línea base y asciende a 1 por 0.1 ppm para líneas base de hasta unos 100 km, e incluso mejor para líneas base más largas), el número satélites visibles y su configuración geométrica, así como el número de frecuencias del receptor (Hofmann-Wellenhof et al. 2008). De acuerdo con Hofmann-Wellenhof et al. (2008); Vazquez et al. (2017) el método relativo estático para la combinación de la fase portadora resolviendo las dobles diferencias (DD) es dada por:

$$\Phi_{ij,12}^{kl} = \rho_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + \alpha_1 \lambda_1 N_1 + \alpha_2 \lambda_1 N_2 + \alpha_1 \varepsilon_{ij,1}^{kl} + \alpha_2 \varepsilon_{ij,2}^{kl} \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, \alpha_2 = -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2)$$

Dónde: i y j corresponden a los receptores; k y l corresponden a los satélites; ρ es la distancia geométrica entre el receptor y el satélite; 1 y 2 son las portadoras L_1 y L_2 involucradas en la combinación respectivamente; T es la DD para la refracción de la tropósfera; $\lambda_1 \approx 19$ cm y $\lambda_2 \approx 24$ cm son las longitudes de onda de las señales en la portadora L_1 y L_2 respectivamente; N_1 y N_2 son las ambigüedades enteras asociadas con las mediciones de fase en L_1 y L_2 respectivamente; ε es el ruido aleatorio DD de las mediciones observado en las fases en L_1 y L_2 en m.

Por otro lado, el PPP es un método donde se utiliza un solo receptor, el cual usa observaciones de doble frecuencia de pseudorange y de fase portadora, además de información GNSS de los relojes de los satélites y productos orbitales. En este sentido, PPP puede proveer precisión en modo estático en el orden del centímetro o decímetro (Alkan et al. 2020). De la misma forma, de acuerdo con Alkan et al. (2015); Cai et al. (2010), las ecuaciones (3 y 4) de observación para el modelo matemático PPP considerando las constelaciones GLONASS y GPS doble frecuencia (L_1 y L_2) son dadas por:

$$P_i^{gr} = \rho_{gr} + cdt^{gr} - cdT^{gr} + d_{orb}^{gr} + d_{trop}^{gr} + d_{ion/P_i}^{gr} + d_{mult/P_i}^{gr} + \varepsilon_{P_i}^{gr} \quad (3)$$

$$\Phi_i^{gr} = \rho_{gr} + cdt^{gr} - cdT^{gr} + d_{orb}^{gr} + d_{trop}^{gr} - d_{ion/\Phi_i}^{gr} + \lambda_i^{gr} N_i^{gr} + d_{mult/\Phi_i}^{gr} + \varepsilon_{\Phi_i}^{gr} \quad (4)$$

Donde: g y r corresponde a los satélites GPS y GLONASS respectivamente; P_i es el pseudorange en L_i en m; Φ_i es la fase portadora en L_i en m; ρ es verdadero rango geométrico en m; c es la velocidad de la luz en m por s; dt y dT es el error del reloj en el receptor y satélite en m respectivamente en m; d_{orb} es el error del satélite en m; d_{trop} es el retardo troposférico en m; d_{ion} es el retardo ionosférico en m; λ_i es la longitud de onda en L_i en m por ciclo; N_i es la ambigüedad de la fase entera en L_i en m por ciclo; d_{mult/Φ_i} es el efecto de multitrayectoria en la fase portadora L_i en m; d_{mult/P_i} es el efecto de multitrayectoria de pseudorange en la L_i en m; ε es el ruido en las mediciones en m.

Circulo de Error Probable

Como parte de la evaluación del posicionamiento obtenido a través del método PPP, se llevó a cabo el análisis de la precisión a través de la “Norma técnica de estándares de exactitud posicional” (INEGI 2010) implementada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en México, la cual permite evaluar la exactitud posicional horizontal (Circulo del Error Probable, CEP) (Ecuación 5) y vertical (Exactitud de Posicionamiento Vertical, EPV) (Ecuación 6) obtenida en un intervalo de confianza del 95%:

$$CEP = 1.2238(\sigma_\phi + \sigma_\lambda) \quad (5)$$

$$EPV = 1.9600(\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_N^2)^{1/2} \quad (6)$$

Donde: σ_ϕ y σ_λ es la desviación estándar de la latitud y longitud respectivamente, en metros; σ_{GNSS} es la desviación estándar del punto para la altura; σ_N es la desviación estándar del modelo de alturas geoidales. Según la norma, dependiendo de los requerimientos de exactitud de un levantamiento en particular se podrá catalogar un punto en un orden de exactitud. En este sentido, se establecen dos órdenes para alta precisión para el cálculo del CEP: orden de 5 centímetros, el cual deberá aplicarse a los trabajos encaminados a establecer un sistema geodésico de referencia nacional; orden de 1 decímetro,

se destinará a levantamientos geodésicos de densificación del sistema geodésico nacional básico. Para el caso del EPV, se considerará el criterio del CEP, ya que no se realizó una nivelación GNSS (circuitos), sin embargo, es importante ver el comportamiento de la componente vertical al introducir el modelo planteado por INEGI.

Transformación de coordenadas a la época oficial en México ITRF08 época 2010.0

De acuerdo a las normas vigentes en México en cuestión de procesamiento de datos GNSS, es necesario considerar las deformaciones del Marco Geodésico en el tiempo, esto considerando que el país de México es altamente sísmico (INEGI 2016). Por ello, se ha establecido que toda medición con equipo GNSS deberá ser referida al ITRF08 época 2010.0, esto para minimizar errores debido a la deformación del marco de referencia del ITRF. Actualmente, las coordenadas de las estaciones de las redes geodésicas nacionales o regionales se publican con respecto a un marco de referencia determinado, siendo válida únicamente para esa misma época. En este sentido, la norma nacional establece que toda medición deberá ser referida al ITRF08 época 2010.0, y, a su vez, aplicar el nuevo esquema de procesamiento y ajuste de datos. La metodología consta de tres etapas:

- *Antes del procesamiento y ajuste:* obtener las coordenadas en las estaciones de referencia en la época de medición de los datos a procesar.
- *Procesamiento y ajuste de los datos:* utilizando las coordenadas de las estaciones de referencia en la época de medición de los datos.
- *Después del procesamiento y ajuste:* llevar las coordenadas resultantes del ajuste, que están en la época de medición a la época 2010.0.

Con base en lo anterior, la Ecuación 7 será utilizada para llevar la estación de referencia a la época de las observaciones GNSS considerando sus velocidades; la Ecuación 8, será para transformar a la época oficial considerando el modelo de placas tectónicas ITRF08 PPM (Altamimi et al. 2012), ya que este modelo describe de manera adecuada las deformaciones de la corteza en gran parte del territorio mexicano; la Ecuación 9, será usada para calcular la diferencia entre la época de medición de los datos a procesar (época B) y la época del marco oficial (época A)

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \delta t \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_X \\ E_Y \\ E_Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \delta t \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_X \\ E_Y \\ E_Z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\delta t = \text{año} + (\text{doy}/365) \quad (9)$$

Donde: (X_A, Y_A, Z_A) son las coordenadas de la estación en la época de origen; (X_B, Y_B, Z_B) son las coordenadas en la época de destino; δt tiempo transcurrido entre la época A y B; *doy*, número de días del año transcurridos; (E_X, E_Y, E_Z) son los desplazamientos episódicos; (V_X, V_Y, V_Z) son las velocidades para la estación de referencia; $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ son los valores de rotación de Euler en correspondencia al vector de rotación del modelo de placas ITRF08 PPM (Altamimi et al. 2012).

Análisis de calidad de las observaciones

Como parte importante de cualquier trabajo topógrafo-geodésico, el análisis de las observaciones GNSS generadas durante el posicionamiento es una de las principales consideraciones a tomar, principalmente en términos de: integridad, efecto multitrayectoria, relación señal ruido y pérdida de saltos de ciclo. La calidad de la estación no solo depende de circunstancias del receptor o de la antena, sino también de la estabilidad de la localización (Herrada et al. 2010; Souto 2014). En este sentido, el control puede ser llevado a cabo implementando el software TEQC (Estey et al. 1999) que son encontrados en su archivo de calidad:

- *Efecto multitrayectoria*: acorde con Vázquez et al. (2013); Souto (2014); Wang et al. (2017); uno de los principales efectos que degrada la señal GNSS es el efecto de multitrayectoria (MP), el cual es causado por la señal reflejada de los objetos que rodean la antena GNSS. Igualmente, este efecto se calcula mediante una combinación lineal de fase y pseudorange en L_1 y L_2 en m; esto teniendo como valores comunes de entre 20 y 30 cm en L_1 y L_2 respectivamente.
- *Integridad*: teóricamente es posible calcular el porcentaje de las observaciones reales que la estación ha realizado (integridad), esto, considerando las observaciones completadas respecto a las observaciones posibles (Souto 2014).
- *Salto de ciclo*: este análisis es considerado como fundamental, ya que representa la capacidad del receptor para permanecer en enlace con el satélite. Esto es calculado a través de la fase observada: cuando se realiza el seguimiento de la fase, esto genera un número entero de ciclo que está asociado a cada satélite (ambigüedad inicial), si la señal se pierde o se interrumpe genera una nueva ambigüedad inicial en la señal medida (*Cycle slip*). Este indicador es calculado mediante los valores proporcionados por TEQC y la relación $CSR = \frac{1000}{o/slips}$ (Xiao et al. 2020); donde “o/slips” es el número de observaciones entre saltos de ciclo.
- *Relación señal ruido*: es un parámetro que influye en el rendimiento y el estado operativo del sistema (receptor, antena, señal), sin embargo las variaciones son principalmente por la potencia de la señal satelital, la

ganancia de la antena, estado del receptor y efecto multitraectoria (Xiao et al. 2020); siendo este último inversamente proporcional a la relación señal ruido (Kamatham 2018); generalmente, en el exterior el valor normal oscila entre 35 a 55 dBHz.

Materiales y métodos

El proceso de experimentación se llevó a cabo a través de las etapas expuestas en la Figura 1.

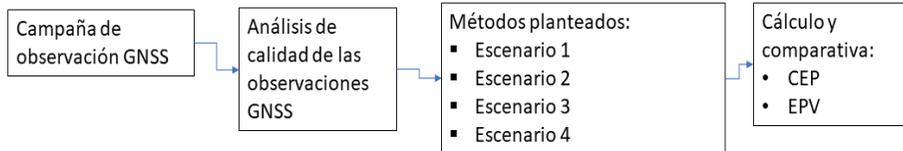


Figura 1. Metodología propuesta para el análisis de las observaciones GNSS

Como fase inicial, se planteó un lugar con horizonte despejado, evitando obstrucciones en la antena, para ello, los equipos se colocaron sobre un vértice geodésico de centrado forzoso en la comunidad de Sanalona, en Sinaloa, México (Figura 2 y 3b).



Figura 2. Localización del vértice geodésico utilizado en Sinaloa, México.

Consecuentemente, se realizó una campaña de observación con el equipo de bajo costo (16 de junio de 2020) y el receptor geodésico (20 de diciembre de 2019), esto, con la finalidad de tener soluciones independientes, y a su vez, no dependientes de los mismos parámetros orbitales (ya que al procesar en cualquier época considerando los mismos modelos, teóricamente se obtendría resultados similares). Una vez obtenidas las observaciones GNSS, se llevó a cabo el análisis de calidad. Con base en lo anterior y con el objetivo de comparar el desempeño de la precisión que es posible obtener a través del método relativo estático y PPP, se plantearon los siguientes escenarios:

- *Escenario 1:* Procesado en modo relativo estático con la estación CULC y un receptor de bajo costo, considerando una distancia aproximada de 33 km.
- *Escenario 2:* Procesado en modo relativo estático con la estación CULC y un receptor geodésico, considerando una distancia aproximada de 33 km.
- *Escenario 3:* Procesado en modo PPP estático con un receptor geodésico.
- *Escenario 4:* Procesado en modo PPP estático con un receptor de bajo costo.

De acuerdo con lo anteriormente descrito, se realizó una comparativa entre las precisiones obtenidas de cada escenario a través del CEP, EVP y de las coordenadas geodésicas transformadas a la época oficial en México ITRF08 época 2010.0, esto debido a las diferentes fechas en la recolección de los datos GNSS.



Figura 3. Equipos GNSS en vértice geodésico de centrado forzado. Figura a) Antena y receptor de bajo costo. Figura b) Vértice geodésico de centrado forzado. Figura c) Receptor geodésico.

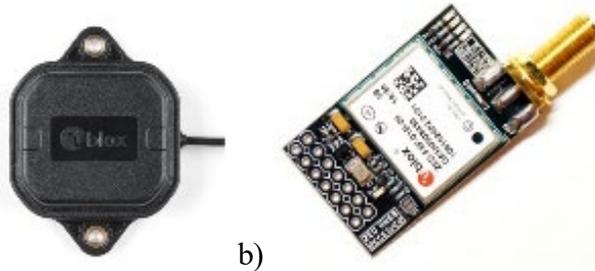
Receptor GNSS de bajo costo

Se empleó un receptor de bajo costo (*low-cost*) de la marca U-blox (Tabla 1 y Figura 4b) de alta sensibilidad (acorde con el fabricante), mismo que fue utilizado con una antena ANN-MB *multi band* activa (Tabla 1 y Figura 4a). El receptor de bajo costo fue operado por medio del software RTKLIB (Takasu 2013) en Windows para llevar a cabo las observaciones. Una vez generadas, fueron convertidas del formato RAW a U-blox, para posteriormente transformarlas a RINEX 2.11 (Gurtner 1994), lo cual se realizó con el software RTKLIB.

Tabla 1. Características del receptor de bajo costo y antena

Receptor: ZED-F9P			Antena: ANN-MB
Tipo de receptor	Tiempo de convergencia	Sensibilidad	
184 canales, U-blox F9 GPS L1C/A L2C, GLO L1OF L2OF, GAL E1B/C E5b, BDS B1I B2I,	RTK < 10 s Adquisición de inicio frío (24 s) Reacción (2 s)	Seguimiento y navegación -167 dBm Inicio frío -148 dBm Inicio caliente -157 dBm	Multibanda (L1, L2/E5b). Sistemas GPS, GLONASS, GALILEO y BeiDou

QZSS L1C/A L2C		Reacción -160 dBm	
----------------	--	-------------------	--



a) b)
Figura 4. Equipo de bajo costo U-blox. Figura a) antena ANN-MB Multi-Band.
 Figura b) Receptor ZED-F9P RTK.

Datos GNSS y esquema de procesamiento

Como parte de la experimentación se presentan las características de las observaciones (Tabla 2) considerando ambas técnicas (relativo estático y PPP). Para la técnica relativo estático se empleó la estación de referencia CULC que es operada por INEGI, la cual está a un intervalo de muestreo de 15 s, con una distancia aproximada de 33 km al vértice de nombre AZUL utilizado para la experimentación. Por otro lado, los datos recabados con el receptor de bajo costo, fueron configurados a 2 segundos con un ángulo de elevación de 15° (libre de obstrucciones para la antena), con un mayor tiempo de observación, el cual, acorde con Choy et al. (2017) se necesita medir >60 min para lograr una precisión de 5 cm (horizontal) en la técnica PPP; a su vez, el receptor geodésico fue configurado a un intervalo de muestreo de 1 s, con motivo de reducir el tiempo de observación y comprobar la convergencia del método PPP. Para el caso del método relativo estático, las observaciones en ambos casos (azul1 y azul2) se llevaron a un muestreo 15 s conforme a la estación de referencia continua CULC mediante el software TEQC (Translate/Edit/Quality Check) (Estey et al. 1999).

Tabla 2. Características de las observaciones GNSS

Parámetro	Equipo de bajo costo	Receptor geodésico	Estación de referencia
Nombre	Azul1	Azul2	CULC
Intervalo de muestreo	2 s	1 s	15 s
Ángulo de elevación	15°	15°	15°
Constelación	GPS+GLONASS + GALILEO+BEID-OU	GPS+GLONASS+ GALILEO	GPS+GLONASS + GALILEO
Tiempo de observación	2.044 h	1.268 h	24 h

Fecha de observación	16 de junio de 2020	20 de diciembre de 2019	Mismas fechas para el método relativo estático
----------------------	---------------------	-------------------------	--

El procesamiento de las observaciones GNSS para el método PPP se realizó a través del software RTKLIB en su versión 2.4.2 considerando los parámetros expuestos en la Tabla 3. Para llevar a cabo el procesado con PPP las observaciones de fase y código fueron usadas considerando un ángulo de elevación de 15° (los valores típicos para la máscara de elevación son entre 10° y 15°) (Leick et al. 2015) a 2 s y 1 s para la estación azul1 y azul2 respectivamente. Para el efecto ionosférico se aplicó el modelo libre de ionosfera mediante una combinación lineal de L₁ y L₂ implementado en RTKLIB. Asimismo, se empleó el modelo de Saastamoinen para la Troposfera (Saastamoinen 1973). Adicionalmente, se usó el IGS08.atx para la corrección del centro de fase de la antena fue utilizada en conjunto con las efemérides finales del IGS (“sp3”) y archivos de efemérides transmitidas (“n”). Se aplicó la corrección debido al avance de la fase y el retraso por la rotación relativa entre el receptor y la antena del satélite (*phase windup correction*), así como la corrección de las mareas terrestres considerando la convención del IERS 2010 (Luzum y Petit 2010). Finalmente para la resolución de la ambigüedad, se consideró el parámetro continuo, esto acorde con Takasu (2013); las ambigüedades de la fase portadora flotantes pueden resolverse en valores enteros para mejorar la precisión y el tiempo de convergencia.

Tabla 3. Parámetros de procesamiento aplicados en el software RTKLIB

Observaciones	Fase y código
Frecuencia	Doble
Modo	Estático
Ángulo de elevación	15°
Órbita de satélites	IGS finales (“.sp3”), y archivos transmitidos (“.n”)
Modelo ionosférico	L ₁ y L ₂ , libre de ionosfera implementado en RTKLIB.
Modelo troposférico	Saastamoinen
Marco de referencia	ITRF14 a la época de las observaciones y transformado a la referencia oficial ITRF08 2010.0
Resolución de ambigüedades	Continuas
Corrección de las mareas terrestres	Sólida
Corrección de la fase “windup”	Aplicada
Corrección del centro de fase	IGS08.atx

Por otro lado, para el procesado de la información mediante el software comercial, los parámetros considerados se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de procesamiento aplicados en el software comercial

Observaciones	Fase y código
Frecuencia	Doble
Modo	Relativo estático
Ángulo de elevación	15°
Tipo de producto	IGS finales “.sp3” y archivos de efemérides transmitidas “.n”
Estación de referencia	CULC

Para el cálculo de las alturas, se implementó el geoide gravimétrico mexicano en su versión 2010 (GGM10), con una resolución de 2.5 min de arco (aproximadamente 4.5 km), que representa las alturas geoidales medidas en dirección vertical, esto acorde con la normatividad de INEGI con la transformación al ITRF08 época 2010.0, lo cual fue realizado mediante el software SIAG10 proporcionado por INEGI (disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/geoide/default.html#Herramientas>).

Resultados

Análisis de calidad de las observaciones GNSS

La Tabla 5 presenta los cuatro escenarios evaluados; los primeros dos, son las estadísticas de la estación de referencia CULC utilizada para el método relativo estático. De acuerdo con el International GNSS Service (2015), solamente los valores de integridad y saltos de ciclo en ambos escenarios están dentro de lo recomendado, siendo la integridad mayor al 95%, a su vez, los saltos de ciclo son menores a 1 por cada mil observaciones. No obstante, los valores de multitrayectoria están por encima de lo recomendado, siendo mayores a 0.30 m para ambos escenarios. Respecto a la relación señal ruido (SNR), para ambas bandas se presenta con señales fuertes, estando por encima de los 36 dB-Hz, lo que refleja una correcta recepción de las señales (Xiao et al. 2020). Tanto las constelaciones, muestreo y tiempo de observación se mantienen constantes para ambos escenarios, caso contrario para el total de satélites, disminuyendo en dos satélites.

El tercer escenario denominado Azul2 se apega en gran medida a los estándares internacionales a excepción del porcentaje de integridad, al ser menor del 95%, no obstante, presenta valores bajos de efecto multitrayectoria y recepción de señales fuertes, así como pocos saltos de ciclo. El cuarto escenario corresponde a Azul1 presentando señales fuertes en ambas bandas, no obstante, supera el medio metro de efecto multitrayectoria, y un porcentaje de integridad del 64% así como una cantidad considerable de saltos de ciclo, sin embargo, es el único receptor que observó BEIDOU a diferencia de los otros receptores solo con GPS, GALILEO y GLONASS.

Tabla 5. Resultados del análisis de calidad para las observaciones generadas.

Estación	Tiempo de	Intervalo de	Integridad (%)	MP 1 (m)	MP 2 (m)	SNR 1	SNR 2	CRS	Número de satélite
----------	-----------	--------------	----------------	----------	----------	-------	-------	-----	--------------------

	observación (h)	muestreo (s)				(dB-Hz)	(dB-Hz)		
CULC1	24	15	96	0.35	0.39	46.27	42.48	0.351	76
CULC2	24	15	100	0.38	0.41	46.65	42.25	0.551	74
Azul1	2.044	2	64	0.58	0.62	39.68	37.4	4	46
Azul2	1.268	1	80	0.09	0.11	41.93	41.38	0.067	19

En este sentido, la Figura 5 representa los valores del efecto multitrayectoria para las estaciones, donde las CULC y Azul1 superan los valores recomendados por el IGS (línea roja, con un valor de 0.30 m), sin embargo, Azul2 presenta una respuesta baja en los valores del efecto multitrayectoria.

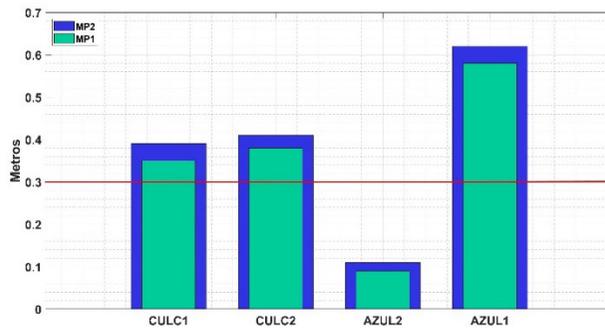


Figura 5. Efecto multitrayectoria de MP1 y MP2. Línea roja: valor de 0.30 m máximo para el efecto multitrayectoria (International GNSS Service 2015).

La Figura 6, muestra el resultado de la relación señal-ruido, los cuales se encuentran en un rango de 37.4-46.6 dBHz teniendo una buena calidad según Xiao et al. (2020). Según Kamatham (2018) presenta que la relación señal ruido es inversamente proporcional al efecto de multitrayectoria; cuando la señal recibida es débil, el efecto multitrayectoria es alto, esto es visto en el receptor geodésico (Azul2); no obstante, los resultados para el receptor de bajo costo presentan una relación señal ruido fuerte superando los 36 dBHz, sin embargo, el valor del efecto multitrayectoria es alto. Los valores presentados en las Figuras 5-6, pueden estar relacionados con el tipo de antena utilizado para la experimentación, ya que no cuenta con equipamiento para reducir el efecto multitrayectoria.

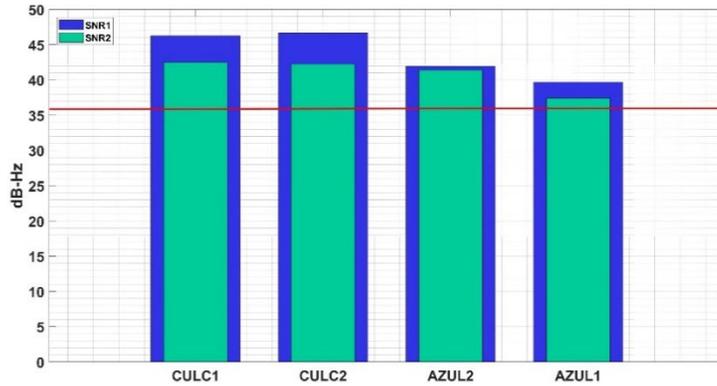


Figura 6. Relación señal ruido (SNR). Línea roja: 36 dB-Hz según Xiao et al. (2020)

Con respecto a los saltos de ciclo, se espera que por cada 1000 observaciones se pierda una, para las estaciones de CULC, Azul2 no superan el valor del estándar, sin embargo, para la estación Azul1 presenta un valor elevado de saltos de ciclo (Figura 7). Esto mismo impacta en la integridad de las observaciones (Figura 8), la cual muestra un desempeño bajo superando el 50% de las observaciones durante toda la campaña.

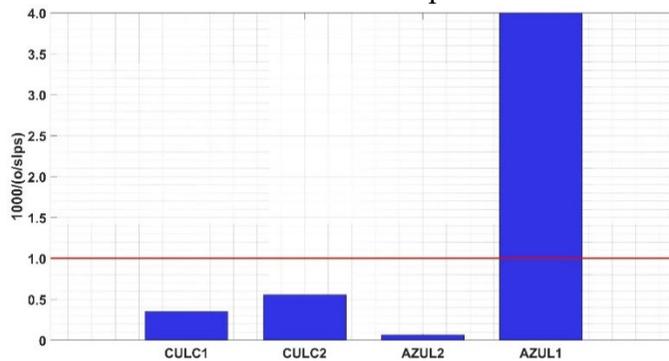


Figura 7. Saltos de ciclo por cada 1000 observaciones. Línea roja: $1000/(o/slips) < 1$ CSR

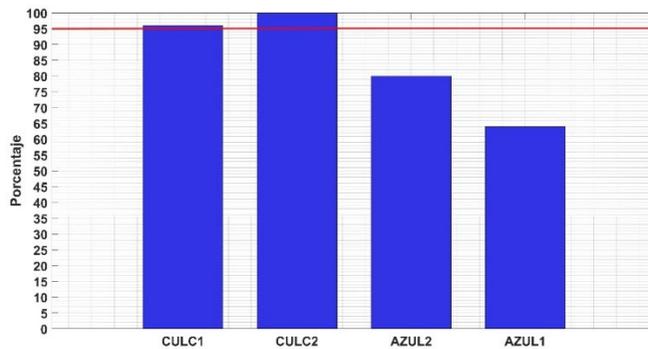


Figura 8. Porcentaje de integridad. Línea roja: 95% integridad.

Evaluación del Circulo del Error Probable (CEP)

En la Tabla 6 y Figura 9, se presenta el resultado de evaluar el CEP y EPV para la técnica PPP a un intervalo de confianza de 95%, en las cuales, se encuentra que, para el caso del receptor de bajo costo, es posible aplicarlo para un establecimiento de un sistema geodésico, esto debido a que los valores son <5 cm para el CEP. Por otro lado, con base en el cálculo del EPV, se muestra que en ambos casos siguen siendo valores de baja calidad, ya que supera considerablemente el valor de 1 dm. Esto puede ser afectado dado que, el modelo implementado GGM10 cuenta con una desviación estándar de 20 cm, lo cual está relacionado con el cálculo del EPV, así mismo, de considerar la altura elipsoidal, la altura obtenida puede ser utilizable para el caso de los receptores de bajo costo a través de la técnica PPP.

Tabla 6. Cálculo del CEP y EPV de Posicionamiento Puntual Preciso conforme a la norma técnica expuesta por INEGI.

Estación	σ_{ϕ}	σ_{λ}	σ_h	CEP ₉₅	EPV ₉₅
Azul1	0.0159	0.0183	0.0134	0.04185	0.393
Azul2	0.005	0.008	0.005	0.01652	0.392

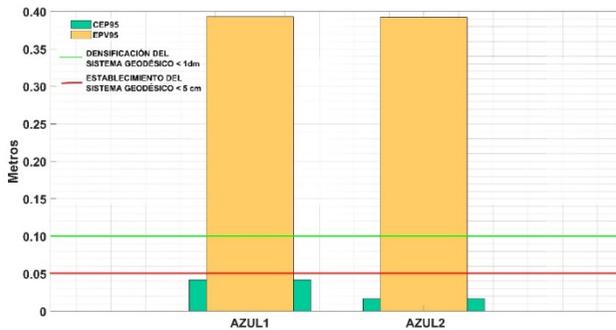


Figura 9. Diferencias del Circulo del Error Probable y Exactitud de Posicionamiento Vertical de PPP conforme a la norma técnica expuesta por INEGI, con relación a la Tabla 7.

Por otro lado, en la Tabla 7 y Figura 10, se presentan los resultados obtenidos para CEP y EPV para el método relativo estático. Según los valores calculados, en ambos casos (receptor bajo costo y geodésico), pueden ser utilizados para trabajos geodésicos de alta precisión. Asimismo, y con base a los valores calculados para el equipo de bajo costo, se encuentra un mejor desempeño del equipo de bajo costo para la técnica relativo estático, ya que, existe una diferencia absoluta de 0.0025 entre los valores del CEP obtenidos para el receptor de bajo costo y el receptor geodésico (Tabla 8); considerando el cálculo del EPV, no es recomendable utilizar en ambos casos la altura, no obstante, esto será en función de los requisitos del proyecto. Para el caso de

no considerar el modelo GGM10, ambos casos son recomendables para establecer una base geodésica.

De acuerdo a las diferencias presentadas entre los valores del CEP₉₅ para azul1 y azul2, y, debido al mejor desempeño del receptor de bajo costo que muestran los resultados, esto es en consecuencia de que el receptor de bajo costo (azul1) tiene un tiempo de observación mayor (0.776 h), derivado de la finalidad de probar la convergencia para el método PPP; así mismo, al no contar con parámetros de calibración de antena, fue necesario realizar un mayor tiempo de observación, esto acorde con Gezgin et al. (2016) ayuda a mejorar la precisión, sin embargo, en algunos casos puede estar sujeto al valor de la dilución de la precisión. En este mismo sentido, el receptor de bajo costo está configurado para recibir información de más constelaciones (BEIDOU) a diferencia de la estación de referencia (CULC) y del receptor geodésico (azul2).

Tabla 7. Cálculo del CEP y EPV de relativo estático conforme a la norma técnica expuesta por INEGI.

Estación	σ_ϕ	σ_λ	σ_h	CEP ₉₅	EPV ₉₅
Azul1	0.007	0.007	0.018	0.0171332	0.394
Azul2	0.008	0.007	0.016	0.0195808	0.393

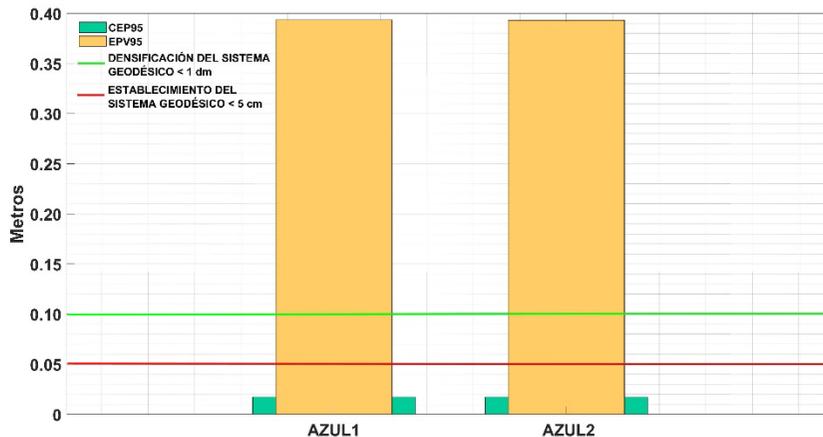


Figura 10. Diferencias del Circulo del Error Probable y Exactitud de Posicionamiento Vertical de relativo estático conforme a la norma técnica expuesta por INEGI, con relación a la Tabla 7.

En la Tabla 8, se presentan las diferencias absolutas del cálculo del CEP y EPV entre las obtenidas mediante el método relativo estático y los dos receptores; así mismo, las diferencias absolutas del CEP y EPV entre los métodos relativo estático y PPP.

Tabla 8. Diferencia absoluta del CEP y EPV para el Posicionamiento Puntal Preciso y el Relativo Estático.

Estación	Relativo Estático		Posicionamiento Puntal Preciso		Diferencia absoluta entre ambas técnicas	
	CEP ₉₅	EPV ₉₅	CEP ₉₅	EPV ₉₅	CEP ₉₅	EPV ₉₅
Azul1	0.0171	0.394	0.042	0.393	0.025	0.001
Azul2	0.0196	0.393	0.017	0.392	0.026	0.001
Diferencia absoluta entre la misma técnica	0.0025	.001	0.025	0.001	-	

Como se mencionó con anterioridad, se tomó como referencia los valores obtenidos con el receptor geodésico en ambos métodos; esto debido a que comúnmente los trabajos realizados de índole topógrafo-geodésicos son realizados con este tipo de receptores. En el método relativo estático, el receptor de bajo costo tuvo un desempeño comparable con el receptor geodésico. Sin embargo, para el caso de la técnica PPP, existió una diferencia considerable de 2 cm. Asimismo, la diferencia absoluta entre ambas técnicas es mínima considerando los valores como referencia los obtenidos con el receptor geodésico. En ambos casos, para cuestiones de nivelación GNSS, los valores del EPV son elevados, sin embargo, es posible utilizarlos tomando en cuenta las exigencias del proyecto. Por otro, sin considerar el modelo planteado GGM10, ambos receptores presentan valores precisos para el EPV.

Análisis del posicionamiento puntal preciso y relativo estático en equipo de bajo costo

Respecto a la normatividad de INEGI, las coordenadas deberán estar en el marco y época oficial de referencia, siendo así el ITRF08 época 2010.0. Al emplear el método de PPP las coordenadas están referidas a la época de las observaciones, en este caso en correspondencia con el ITRF14. Por ello, fue necesario realizar la transformación al ITRF08 época 2010.0 siguiendo el procedimiento oficial. Una vez llevadas las coordenadas a la época oficial, se contrastaron las coordenadas geodésicas obtenidas en modo PPP y relativo estático (Tabla 9-10, respectivamente).

Tabla 9. Coordenadas geodésicas obtenidas mediante PPP expresadas ITRF08 época 2010.0.

Vértice	Φ	λ	H	σ_{ϕ} (m)	σ_{λ} (m)	σ_h (m)	h ortométrica
Azul1	24° 48' 57.41687''	107° 8' 40.62949''	130.16 91222	0.015 9	0.01 83	0.01 34	157.11
Azul2	24° 48' 57.41293	107° 8' 40.57007''	129.12 33141	0.005	0.00 8	0.00 5	156.06
Diferencia absoluta	0.00394	0.05933	1.0458 079	0.010 9	0.01 03	0.00 84	1.05

Tabla 10. Coordenadas geodésicas obtenidas mediante relativo estático expresadas ITRF08 época 2010.0.

Vértice	ϕ	λ	H	σ_{ϕ} (m)	σ_{λ} (m)	σ_h (m)	h ortométrica
Azul1	24° 48' 57.41591''	107° 8' 40.61409''	129.21 61886	0.007	0.00 7	0.01 8	159.15
Azul2	24° 48' 57.40555''	107° 8' 40.59929''	128.57 01791	0.008	0.00 6	0.01 6	155.51
Diferencia absoluta	0.01036	0.0148	0.6460 095	0.001	0.00 1	0.00 2	3.64

Como es mencionado en secciones anteriores, el tiempo juega un papel clave en la obtención de coordenadas precisas, al igual que los productos satelitales. Con base a esta afirmación, se presenta una alta precisión para el receptor de bajo costo obtenida para la técnica PPP (Tabla 10), ya que, la desviación estándar presentada para la componente horizontal y vertical es de ≈ 1 cm en un tiempo de observación >2 h; asimismo, acorde con Choy et al. (2017) es necesario un tiempo de observación de 1 h para obtener una precisión aproximada de 5 cm, lo cual fue comprobado. Por otro lado, la diferencia absoluta de las coordenadas en cm, existe una diferencia significativa, ya que para la latitud se encuentra en el orden de 12 cm, siendo considerablemente más grande para la longitud donde es >1 m. No obstante, en cuestión de tiempo, el receptor de bajo costo llevó a cabo observaciones GNSS durante un tiempo mayor a dos horas, en contraste, el receptor geodésico un tiempo menor; donde este último logró una mejor precisión en un menor tiempo. Este hecho, puede estar correlacionado a que la antena utilizada con el receptor de bajo costo no cuenta con parámetros de calibración, no logrando hacer una corrección del centro de fase, además de ser altamente afectado por el efecto de multitrayectoria. Aún con la falta de calibración de la antena, los resultados del método PPP en el equipo de bajo costo, resulta ser aceptado para aplicaciones o trabajos topógrafo-geodésicos.

Para la técnica relativo estático el equipo de bajo costo presenta un desempeño apto al igual que la precisión alcanzada con PPP, siendo más precisa con el relativo estático. Las coordenadas obtenidas, presentan una desviación similar, sin embargo, existe una diferencia de 30 cm entre las coordenadas obtenidas con el receptor de bajo costo y el receptor geodésico. En este mismo sentido, se prueba la factibilidad de utilizar un receptor de bajo costo en modo relativo estático para líneas base que superan los 30 km.

En cuestión de la altura, se presenta una desviación estándar de un centímetro como máximo, sin embargo, al considerar el modelo GGM10 (conforme a la norma), la altura calculada es afectada, no logrando entrar en los valores recomendados por INEGI para el EPV. Igualmente, es posible usarla de acuerdo con las exigencias del proyecto. La altura ortométrica con

mayor diferencia es la presentada por el método relativo estático, teniendo una discrepancia de 3.64 m, teniendo un mejor comportamiento mediante la técnica PPP; lo anterior, considerando como referencia el receptor de bajo costo (azull).

Discusión

Las coordenadas resultantes para el método relativo estático utilizando el receptor de bajo costo, representa una mejor precisión, esto, considerando la desviación estándar alcanzada. Sin embargo, considerando como referencia el receptor geodésico, se estima una diferencia de 40 cm en el posicionamiento obtenido. Esta diferencia es significativa, lo cual es recomendable utilizar el receptor de bajo costo para trabajos de posicionamiento y no para control de obras de ingeniería debido a la diferencia presentada considerando que los valores se encuentran lejos de los que son tomados como referencia (los obtenidos por el receptor geodésico).

Por otro lado, tomando en cuenta la técnica PPP, el posicionamiento obtenido (tomando como referencia el receptor geodésico), la diferencia mínima es de 2 cm. En estos términos, la técnica PPP considerando precisiones alcanzadas la hace recomendable para el monitoreo de estructuras como las presentadas en Tang et al. (2017); Vazquez et al. (2017) donde es posible aplicar filtros para encontrar la probabilidad de falla.

Por otro lado, es importante realizar pruebas de calibración y establecimiento de líneas base geodésicas donde la distancia sea comparada con el cálculo con referencia entre dos puntos obtenidos con GNSS y mediciones de distancia con una estación total en modo relativo estático, tomando como base los resultados expuestos por Garrido-Carretero et al. (2019) bajo la técnica RTK.

Para el caso del cálculo de la altura ortométrica conforme a la normatividad de INEGI, resultó que en todos los casos al introducir el modelo GGM10 redujo la precisión alcanzada, esto debido a que cuenta con una precisión de 20 cm. Asimismo, es posible utilizar el receptor de bajo costo sin considerar el modelo, es decir, únicamente con la altura elipsoidal. En este sentido, en ambas técnicas, resultó que es posible alcanzar altas precisiones. Tomando como referencia el receptor geodésico, se presentó una diferencia absoluta >1 m, lo cual sigue siendo un reto realizar una nivelación con GNSS con ambos equipos, aun cuando sea tomado como referencia el receptor geodésico.

Conclusiones

En cuestión del posicionamiento en tiempo real con un receptor de bajo costo, Garrido-Carretero et al. (2019) prueba que es factible utilizar un receptor de bajo costo con una frecuencia, ya que alcanza posicionamiento en el orden del centímetro considerando distancias cortas; determinando que es

óptimo para agricultura de precisión y aplicaciones catastrales. En este mismo sentido, al probar el equipo de bajo costo de doble frecuencia en modo relativo estático, se confirma que a distancias ≤ 33 km el equipo de bajo costo es comparable con un receptor de doble frecuencia geodésico, siempre y cuando se considere un tiempo mayor de observación.

Con base en lo anterior, Zamora-Maciél et al. (2020) prueba la factibilidad para el uso de equipos de bajo costo considerando una línea base corta de aproximadamente 10 km en relativo estático, lo cual muestra que es posible utilizarlos para trabajos topógrafo-geodésicos en distancias cortas; de la misma forma, los resultados presentados confirman que es posible utilizarlos en distancias de aproximadamente 33 km en este mismo modo.

Evidentemente, sigue siendo un reto encontrar el uso de los receptores geodésicos en cuestiones altimétricas, esto es reflejado de igual forma para los receptores de bajo costo, ya que, la precisión decrece en función del modelo GGM10 implementado conforme a la normatividad. Por otro lado, de no considerar el modelo, los resultados muestran que se pueden obtener precisiones comparables con el receptor geodésico.

En cuestión de tiempo, con el receptor de bajo costo se comprueba lo expuesto por (Choy et al. 2017), necesitando un tiempo >1 h para lograr una precisión de 5 cm considerando los parámetros pertinentes mediante la técnica PPP, pero de igual manera sigue siendo una alternativa óptima a los receptores geodésicos. En este sentido, queda la factibilidad de probar la solución alcanzada por los equipos de bajo costo utilizando la resolución de ambigüedad PPP-AR, lo cual, podría mejorar la solución.

Finalmente, se comprueba que es factible el uso del equipo de bajo costo para aplicaciones topógrafo-geodésicas para trabajos relativos a la componente horizontal, en lo correspondiente a la componente vertical es posible considerar el modelo GGM10 y utilizar el receptor, si y solo si, los requisitos del proyecto lo permitan.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado fue llevado a cabo mediante el apoyo económico (CVU: 429125 y 817394) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) en México.

References:

1. Alkan, R. M., İlçi, V., Ozulu, I. M., & Saka, M. H. (2015). A comparative study for accuracy assessment of PPP technique using GPS and GLONASS in urban areas. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 69, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.012>
2. Altamimi, Z., Métivier, L., & Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate

- motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(7), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2011JB008930>
3. Cabral-Cano, E., Pérez-Campos, X., Márquez-Azúa, B., Sergeeva, M. A., Salazar-Tlaczani, L., DeMets, C., ... Miller, M. (2018). TLALOCNet: A continuous GPS-met backbone in Mexico for seismotectonic and atmospheric research. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 373–381. <https://doi.org/10.1785/0220170190>
 4. Cai, C., & Gao, Y. (2010). Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations. *Journal of Global Positioning Systems*, 6(1), 13–22. <https://doi.org/10.5081/jgps.6.1.13>
 5. Chen, C. Y., Lee, J. C., Chen, Y. G., & Chen, R. F. (2014). Campaigned GPS on Present-day crustal deformation in northernmost Longitudinal Valley preliminary results, Hualien Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 25(3), 337–357. [https://doi.org/10.3319/TAO.2013.12.25.01\(TT\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2013.12.25.01(TT))
 6. Choy, S., Bisnath, S., & Rizos, C. (2017). Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS Solutions*, 21(1), 13–22. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0545-x>
 7. Cina, A., & Piras, M. (2015). Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 497–514. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.889046>
 8. Duong, V., Harima, K., & Rizos, C. (2020). Multi-frequency Multi-GNSS PPP : A Comparison of Two Ambiguity Resolution Methods. (February).
 9. Estey, L. H., & Meertens, C. M. (1999). TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, 3(1), 42–49.
 10. Ferhat, G., Malet, J.-P., & Ulrich, P. (2015). Evaluation of different processing strategies of Continuous GPS (CGPS) observations for landslide monitoring. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 17, 10582.
 11. Garrido-Carretero, M. S., de Lacy-Pérez de los Cobos, M. C., Borque-Arancón, M. J., Ruiz-Armenteros, A. M., Moreno-Guerrero, R., & Gil-Cruz, A. J. (2019). Low-cost GNSS receiver in RTK positioning under the standard ISO-17123-8: A feasible option in geomatics. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 137, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.045>
 12. Gezgin, C., & Acar, M. (2016). Investigation of effect of GNSS observation time to baseline solution. *International Scientific Conference on Applied Sciences*.

13. Guo, L., Jin, C., & Liu, G. (2018). Evaluation on measurement performance of low-cost GNSS receivers. 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications, ICC 2017, 1067–1071. <https://doi.org/10.1109/CompComm.2017.8322706>
14. Gurtner, W. (1994). INNOVATION: RINEX--THE RECEIVER INDEPENDENT EXCHANGE FORMAT. *GPS World*, 5(7), 48–53.
15. Herrada, A., Miranda, S., Fuentes, C., Torres Lobato, O., Pintos, H., & Smalley (Jr), R. (2010). Monitoreo de la calidad de datos GPS continuo: la estacion UNSJ (San Juan, Argentina). *Geoacta*, 35(1), 55–62. Retrieved from http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1852-77442010000100006
16. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS Global Navigation Satellite System GPS, GLONASS, Galileo and more*. Springer Wien New York.
17. INEGI. Norma técnica de Estándares de Exactitud Posicional. , (2010).
18. INEGI. (2016). *Procesamiento de Datos GPS Considerando Deformaciones del Marco Geodésico en el Tiempo*. México.
19. International GNSS Service. (2015). *Current IGS Site Guidelines*. Retrieved from <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>
20. Kamatham, Y. (2018). Estimation, analysis and prediction of multipath error for static GNSS applications. 2018 Conference on Signal Processing And Communication Engineering Systems, SPACES 2018, 62–65. <https://doi.org/10.1109/SPACES.2018.8316317>
21. Keskin, M., Sekerli, Y. E., & Kahraman, S. (2017). Performance of two low-cost GPS receivers for ground speed measurement under varying speed conditions. *Precision Agriculture*, 18(2), 264–277. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9453-x>
22. Knight, P. J., Bird, C. O., Sinclair, A., & Plater, A. J. (2020). A low-cost GNSS buoy platform for measuring coastal sea levels. *Ocean Engineering*, 203, 107198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107198>
23. Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons.
24. Luzum, B., & Petit, G. (2010). *IERS Technical Note; No. 36*.
25. Romero-Andrade, R., Zamora-Maciel, A., Uriarte-Adrián, J. de J., Pivot, F., & Trejo-Soto, M. E. (2019). Comparative analysis of precise point positioning processing technique with GPS low-cost in different technologies with academic software. *Measurement*, 136, 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.100>
26. Saastamoinen, J. (1973). *Contributions to the theory of atmospheric*

- refraction. *Bulletin Géodésique* (1946-1975), 107(1), 13–34.
27. Saunders, J. K., Goldberg, D. E., Haase, J. S., Bock, Y., Offield, D. G., Melgar, D., ... Mattioli, G. S. (2016). Seismogeodesy using GPS and low-cost MEMS accelerometers: Perspectives for earthquake early warning and rapid response. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(6), 2469–2489. <https://doi.org/10.1785/0120160062>
 28. Sharma, G., Champati ray, P. K., & Mohanty, S. (2018). Morphotectonic analysis and GNSS observations for assessment of relative tectonic activity in Alaknanda basin of Garhwal Himalaya, India. *Geomorphology*, 301, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.11.002>
 29. Souto, M. S. (2014). Análisis de calidad y preprocesamiento de datos GNSS de la estación permanente UCOR (Córdoba, Argentina). *Revista de La Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 1(1), 91. Retrieved from <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/6971>
 30. Takasu, T. (2013). RTKLIB 2.4.2 Manual. Retrieved from http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf<http://www.rtklib.com/rtklib.htm>
 31. Tang, X., Roberts, G. W., Li, X., & Hancock, C. M. (2017). Real-time kinematic PPP GPS for structure monitoring applied on the Severn Suspension Bridge, UK. *Advances in Space Research*, 60(5), 925–937. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.010>
 32. Tomaščík, J., Saloň, Š., & Piroh, R. (2017). Horizontal accuracy and applicability of smartphone GNSS positioning in forests. *Forestry*, 90(2), 187–198. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw031>
 33. Tsakiri, M., Sioulis, A., & Piniotis, G. (2018). The use of low-cost, single-frequency GNSS receivers in mapping surveys. *Survey Review*, 50(358), 46–56. <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1222344>
 34. Tsakiri, Maria, Sioulis, A., & Piniotis, G. (2017). Compliance of low-cost, single-frequency GNSS receivers to standards consistent with ISO for control surveying. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2017006>
 35. Vazquez B., G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Bennett, R., Guzman-Acevedo, G. M., & Gaxiola-Camacho, I. E. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the Juarez Bridge using GPS technology. *Measurement*, 110, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.026>
 36. Vázquez, G. E., Bennett, R., & Spinler, J. (2013). Assessment of Pseudorange Multipath at Continuous GPS Stations in Mexico. *Positioning*, 04(03), 253–265. <https://doi.org/10.4236/pos.2013.43025>
 37. Wang, D., Meng, X., Gao, C., Pan, S., & Chen, Q. (2017). Multipath

- extraction and mitigation for bridge deformation monitoring using a single-difference model. *Advances in Space Research*, 60(12), 2882–2895. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.007>
38. Xiao, Y., Yao, M. H., Tang, S. H., Liu, H. F., Xing, P. W., & Zhang, Y. (2020). Data Quality Check and Visual Analysis of Cors Station Based on Anubis Software. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W10, 1295–1300. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w10-1295-2020>
39. Zamora-Maciel, A., Romero-Andrade, R., Moraila-Valenzuela, C. R., & Pivot, F. (2020). Evaluación de receptores GPS de bajo costo de alta sensibilidad para trabajos geodésicos . Caso de estudio : línea base geodésica Evaluación de receptores GPS de bajo costo de alta sensibilidad para trabajos geodésicos . Caso de estudio : línea base geodé. *Ciencia Ergo-Sum*, 27, 0–17.