

## **Cálculo de coordenadas GPS con software libre, comercial y procesos online, utilizando órbitas rápidas en intervalos estáticos cortos y largos.**

Hydyn Santiago Jiménez<sup>1\*</sup>, Mauricio Breton González<sup>1</sup>, Juan José Ramírez Ruiz<sup>1</sup>, Héctor Medina<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Centro Universitario de Estudios e Investigaciones de Vulcanología, Universidad de Colima. <http://www.ucol.mx>

<sup>2</sup>GEONOMAD, <http://www.geo-nomad.com/>

\*[hydyn@ucol.mx](mailto:hydyn@ucol.mx)

### **Resumen**

En la última década han surgido organismos gubernamentales y privados que ofrecen servicios de procesamiento GNSS online (Global Navigation Satellite System, por sus siglas en inglés), que utilizan algoritmos rigurosos para realizar cálculos de coordenadas, así como herramientas de software libre. Los sistemas online y software libre han acortado la brecha entre un proceso de carácter científico y un procesamiento tradicional. En el software científico el uso de órbitas precisas es primordial. Estas son publicadas con 13 días de retraso, tiempo suficientemente amplio para realizar un uso rápido del dato GNSS. El tiempo de posicionamiento ideal de 24 horas de registro hace que los usuarios comunes declinen utilizar el proceso científico. En este trabajo se realizó un análisis con herramientas de procesamiento de datos GPS online, con tiempos de medición de 1 a 24 horas utilizando órbitas rápidas, con la finalidad de obtener tiempos óptimos para que usuarios GNSS puedan delimitar los rangos de posicionamiento estático de acuerdo al orden de precisión requerido.

Palabras clave: GPS, Orbitas rápidas, Tiempo, Precisión.

### **Abstract**

On the last decade, governmental and private agencies that offer processing GNSS (Global Navigation Satellite System) online emerged. They use rigorous algorithms to perform the calculations of coordinates. There also exist free software tools. Online and free software systems have shortened the have help traditional processing and scientific process.

In scientific software the use of precise orbits is critical. They are published with 13 days of delay, time enough to make a quick use of the data GNSS. 24 hours is required for positioning promoting common users to decline using the scientific process. It was conducted the analysis using online tools for GPS data processing using measurement times of 1 to 24 hours of fast orbits to obtain optimal times for GNSS users.

Key words: GPS, fast ephemerides, time, precision.

## Introducción

Desde el inicio del Sistema de Posicionamiento Global Satelital los usuarios han estudiado los distintos fenómenos que causan error en las coordenadas GPS. Para ello, el surgimiento de software científico ha mejorado la precisión en la obtención de coordenadas finales del GPS, sin embargo, lo complejo de estos paquetes de programación hace su uso difícil para los usuarios comunes del sistema GPS. A nivel mundial se destacan programas utilizados para la investigación concerniente a la geodinámica terrestre, tales como el BERNESE GNSS, multi-GNSS desarrollado en el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (AIUB). (<http://www.bernese.unibe.ch/>), el GIPSY-OASIS, o GIPSY, es el paquete de software de simulación del análisis de órbitas y del sistema de posicionamiento GNSS. GIPSY lo desarrolló el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL), y mantenido por el Near Earth Tracking Applications and Systems (<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>). En ambos existen las versiones de adquisición comercial y de investigación. La primera es usada por particulares u organismos gubernamentales y la segunda para fines de investigación científica, así como en las universidades con las cuales se han establecido convenios de licencia y colaboración. La segunda es el GAMIT/ GLOBK, que forman un conjunto completo de programas para analizar las mediciones de GPS principalmente para estudiar la deformación de la corteza. Desarrollado por el MIT, Scripps Institution of Oceanography, y Harvard University con el apoyo de la National Science Foundation, el software puede obtenerse con un acuerdo por escrito o con una tarifa de regalías por parte de universidades y agencias gubernamentales para fines no comerciales. (<http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>).

Estos paquetes son herramientas de procesamiento complejo a los que se les dedica mucho tiempo de ejecución, ya que un dato o un error en la gramática de los archivos detiene los

procesos, provocando desaliento en los usuarios que comienzan a procesar datos GPS.

Actualmente se pueden ejecutar los procedimientos necesarios para la obtención de coordenadas mediante organismos internacionales que ofrecen servicios de procesos de datos GPS y GNSS en forma gratuita, como es el caso del Sistema AUSPOS (Australian Surveying and Land Information Group's Online GPS Processing), que utiliza en su servicio el Bernese GNSS Software Version 5.2, el APPS The Automatic Precise Positioning Service of the Global Differential GPS (GDGPS) System quienes utilizan la versión 6.4 del Gipsy y Scripps Orbit and Permanent Array Center que utilizan el GAMIT/ GLOBK. Por problemas técnicos este último sistema de proceso en línea no fue tomado en cuenta para este análisis.

Además de estos sistemas, existen compiladores de gran calidad en línea:

El **CSRS-PPP** es una aplicación en línea para GNSS datos post-procesamiento. Utiliza las órbitas satelitales precisas para producir las coordenadas corregidas de una precisión constante. (<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications>).

**Opus** servicio de posicionamiento en línea para receptores GPS de doble frecuencia. (<http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/about.jsp>).

**Trimble RTX™** (Real Time eXtended) es una tecnología de corrección GNSS global de alta precisión que combina datos en tiempo real con innovadores algoritmos de posicionamiento y compresión que proporciona precisión de posicionamiento a nivel de centímetro. (<http://www.trimblertx.com/Home.aspx>).

**MagicGNSS** incluye un conjunto de herramientas GNSS y Servicios que han sido desarrollados y adaptados por el grupo empresarial internacional

GMV. Realiza determinación de la órbita precisa y sincronización de tiempo de GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou y QZSS. (<http://magicgnss.gmv.com/>).

**GAPS** proporciona a los usuarios información precisa de posicionamiento por satélite utilizando un único receptor GNSS tanto en modo estático como cinemático. (<http://gaps.gge.unb.ca/>).

Estos sistemas son online, por lo tanto se requiere acceso a internet. Existen herramientas libres para ser instaladas en computadoras personales que utilizan los sistemas operativos Linux y Windows. En este trabajo se utilizarán paquetes amigables con el usuario bajo el entorno Windows.

**Glab** es un conjunto de herramientas de software desarrollado bajo un contrato de la Agencia Espacial Europea (ESA) por el grupo de investigación de Astronomía y Geomática (GAGE) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Es un paquete educativo multiuso para procesar y analizar datos GNSS.

**RTKLIB** es un paquete de programas de código abierto para el posicionamiento estándar y preciso con GNSS. RTKLIB consiste en una biblioteca de programas portátil y varios puntos de acceso (programas de aplicación) que utilizan la biblioteca (<http://www.rtklib.com/>).

Otros paquetes trabajan en el entorno computacional Matlab; tal es el caso del goGPS, GGMatlab, GPSTools. Son herramientas de proceso en donde se requiere que el usuario tenga conocimiento sobre el software y programación. Dado que uno de los objetivos de este trabajo es proporcionar a los usuarios mecanismos de fácil acceso, estas herramientas no fueron contempladas en este análisis.

La información sobre su funcionamiento puede ser consultada en sus respectivas páginas electrónicas y manuales correspondientes.

## Antecedentes

El sistema global de navegación por satélite (GNSS) pasó de ser de uso exclusivo del ejército de los Estados Unidos, a ser parte de la vida cotidiana. A partir de 1990 sus aplicaciones se han diversificado en forma exponencial. Sin embargo, la calidad en las mediciones y desconocimiento en las variables involucradas en la obtención de una buena precisión ha generado un manejo poco profesional en el establecimiento de vértices para obras de ingeniería.

En estudios científicos, las técnicas y metodologías utilizadas para estos estándares hacen que sea compleja su aplicación en mediciones de uso común. Durante varios años, los científicos han utilizado el GPS como herramienta fundamental en el estudio de velocidades de la superficie de la corteza. Un ejemplo son los resultados de las mediciones GPS que determinaron un desplazamiento de 4.7 a 3.2 mm/yr en la península Ibérica en periodos largos de observación durante varias campañas, haciendo uso del software científico GAMIT/GLOBK (Echeverría et al. 2012).

Otros estudios en los que se aplican mediciones GPS incluyen los desplazamientos cosísmicos. Tal es el caso del sismo ocurrido en el año 2003 frente a las costas de Colima, México, de magnitud entre 7.4 y 7.3 Mw, que provocó desplazamientos en la estación GPS COLI de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI, México, de -70.4 mm Este, -105.7 Oeste y -18.3 vertical (Schmitt et al., 2007). Todos los datos recolectados en las estaciones de la investigación de Schmitt et al. (2007) fueron procesados con el software GIPSY OASIS, utilizando la estrategia Punto Preciso de Posicionamiento (Zumberge et al., 1997) con sesiones de 12 a 24 horas.

Otra de las áreas en donde se aplican posicionamientos GPS es en el monitoreo de la deformación de las superficie de volcanes

activos (Lee et al., 2015). En casi todas las zonas volcánicas del planeta existen redes GNSS para detectar pequeños movimientos donde se pueda inferir el posible ascenso de magma.

No solo para cuestiones de investigación se utiliza el sistema GNSS. También en el control y monitoreo de estaciones de referencia para usos de agrimensura, ingeniería, geofísica (Herrada et al., 2010) y áreas afines, es de vital importancia.

En los últimos años, estudios comparativos de varios procesos online demuestran la calidad de estos servicios. La necesidad de usar herramientas libres para el proceso GNSS para usuarios con poca experiencia (Abd-Elazeem et al., 2011) ha originado que varios organismos gubernamentales y privados generen algoritmos para suplir esta necesidad creciente. Sin embargo, algunos desarrollos pueden carecer de la precisión requerida por lo que se debe tener cuidado en la elección de estas herramientas.

La obtención de coordenadas precisas requiere de tiempos de observación extensos y parámetros de orbitales precisos para los ajustes de datos GNSS. Muchos autores realizan recolección de datos en tiempos de registro de 24 horas y utilizan órbitas finales. Esto implica esperar un tiempo de 13 días a partir de la fecha de medición para la obtención de las órbitas exactas.

Las mediciones GNSS para estudios topográficos, geofísicos, tectónicos y monitoreo, requieren de diversos tipos de exactitudes. El dato más cercano al valor verdadero dará la certeza de las coordenadas calculadas en los posicionamientos realizados con equipos GNSS. Para lograr precisiones centimétricas, de acuerdo a los lineamientos de Instituto Nacional de Estadística y Geografía, un error por debajo de 5 cm se considera como vértice Geodésico de orden "A", aceptable para estudios de tectónica (Compendio de criterios y especificaciones técnicas para la generación de datos e información de carácter

fundamental, 07. Geodesia, 07.2 Estándares de Exactitud Posicional, INEGI, 2010). Sin embargo para la investigación con GPS, estos errores son grandes, por lo que en este tipo de estudios se utilizan parámetros y software complejos para la obtención de coordenadas más precisas.

La complejidad de estos paquetes de software, los tiempos prolongados para la obtención de parámetros de orbitales precisos (13 días para ser emitidos), que para cuestiones de mitigación de riesgo o trabajos técnicos no es muy adecuado por los costos- beneficio, y el acceso a los software científicos, Bernese, Gipsy y GAMIT/GLOBK, aleja a posibles usuarios, haciéndolos optar por el uso de programas comerciales, los cuales sólo se limitan a usar órbitas de navegación precisas y archivos de centro de fase de antenas.

En los últimos años han surgido muchos servicios de procesamientos GPS online. En la actualidad algunos cuentan con procesamiento de datos GNSS como: trimble rtx, GAPS, CSRS-PPP y Magic GNSS. Diversos estudios sobre estos métodos muestran comparaciones de sus ventajas y desventajas (Abd-Elazeem et al., 2011). Con estos procesamientos se pueden llegar a mejorar las precisiones, con mediciones de 24 horas en forma estática, utilizando los métodos PPP y/o diferencial con épocas de 15 segundos y el uso de efemérides precisas se pueden obtener desviaciones estándar entre 2 y 15 mm (Ocalan et al., 2013).

En el 2011, Abd-Elazeem et al. realizaron una investigación utilizando sesiones de medición de 60, 90 y 120 minutos con receptores de una sola frecuencia, utilizando efemérides precisas en sus ajustes. Los errores encontrados oscilan en los 20 cm. De acuerdo con su conclusión, la precisión obtenida es alta para la finalidad de su investigación.

Por otra parte, los resultados de Moya et al. (2015), muestran que el uso de procesamiento

GNSS en línea es una alternativa adecuada para ser usada en algunas de las tareas clásicas de la topografía y la geodesia, en las que se requieran precisiones del orden de los 10 mm a 15 mm. Sin embargo, en su análisis utiliza registros de 24 horas para su estudio, utilizando parámetros precisos y rápidos. Moya et al. (2015) hacen mención del uso de efemérides rápidas (IGR con tiempo de emisión de 17h) en periodos de registro de 24 horas como una buena alternativa. En el uso común de topografía, geodesia y probablemente geofísica sigue siendo, sin embargo, un rango de tiempo muy extenso ya que mantener un equipo en un periodo de registro largo requiere de alimentación externa adecuada.

La precisión de las coordenadas depende de la duración del registro de datos GPS (Beutler et al., 2007). Gómez et al. (2013) señalan que a partir de 3 horas se mejora la precisión, y que posterior a las 6 horas el uso de efemérides rápidas o precisas influye poco en los resultados; el rango de su trabajo consistió en sesiones de 20 minutos, 3, 6 y 12 horas, en modo estático y sus procesos mediante los métodos PPP y DGPS.

En este trabajo será analizado el uso de efemérides precisas en su formato IGR en cálculos de 1 a 24 horas de posicionamiento en modo estático utilizando los ajustes Precise Point Positioning (Zumberge et al., 1997) y DGPS. No se pretende determinar cuál es mejor. La intención es dar un panorama amplio de los errores respecto al tiempo de observación para mediciones en forma estática de GNSS.

## Metodología

El procesamiento de mediciones de precisión, como las realizadas en este trabajo, requiere de un tratamiento riguroso de los datos, la aplicación de un modelo matemático de mínimos cuadrados y un modelo estocástico que permitan una estimación de parámetros con la mayor calidad posible.

En este estudio se utilizaron los datos de la estación COL2 perteneciente a la red geodésica nacional activa del INEGI. Esta estación se encuentra sobre un pilar de concreto en donde se ubica la antena Zephyr Geodetic con ID IGS TRM41249.00, que tiene como recolector un receptor Trimble 5700 de doble frecuencia con sistema GPS. La ventana de tiempo de observación comprendió las semanas GPS 1880, 1881, 1882 y 1883 (días del año 2016 del 17 al 44). En este periodo las velocidades generadas por los desplazamientos de la corteza terrestre en la estación COL2 es mínima, siendo  $V_x = -0.0047$ ,  $V_y = -0.0011$  y  $V_z = -0.0008$  m/año calculado por el DGFI, Instituto de Geodesia de Alemania (Manual y software ITRF08PR 2016).

Los datos fueron analizados por el software libre TEQC de UNAVCO (University NAVSTAR Consortium), para encontrar algún tipo de anomalía, se analizaron un total de 28 sesiones de 24 horas. Como la idea principal de este trabajo es procesar en intervalos desde 1 hasta 24 horas, se procedió a dividir los archivos originales con WinTEQC Editor versión 2016 (<http://teqc.silkwerks.com/>). Se generaron 672 archivos en total. Cada paquete de datos se envió para su procesamiento en los sistemas online que utilizan los métodos Punto Preciso de Posicionamiento "PPP" (Zumberge et al., 1997) y "DGPS" Diferencial GPS. El método PPP es usado por CSRS PPP, APPS, GAPS y MAGIC GNSS (Ocalan et al., 2013), también TRIMBLE RTX utiliza este método, mientras que el proceso DGPS es usado por OPUS, AUSPOS (Ocalan et al., 2013); los software libres para pc gLAB y RTKLIB ajustan mediante PPP y este último también realiza los cálculos mediante DGPS de la misma forma que el Software comercial Leica Geo Office.

Los parámetros de ajuste varían con cada sistema. Los más utilizados son órbitas de satélites (archivos con extensión sp3), efemérides de tiempo "clk" (ambas pueden ser descargadas en sus versiones "IGS" órbitas precisas), "IGU" efemérides

UltraRápidas, “IGR” efemérides rápidas (usadas en este trabajo) disponibles 17 horas posterior al día de observación. El archivo de rotación “ERP” (Earth Rotation Parameter) se obtiene de ([https://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods\\_cb.html](https://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html)), la carga oceánica “blq” se calcula acorde a la posición gps, por Onsala Space Observatory (<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>). La carga de ionosfera “ion” proporcionado por (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>) y archivo de calibración de antenas “atx” (<ftp://igs.prg/pub/station/general/>).

El procesamiento se realizó dentro de las dos semanas previas a la emisión de órbitas precisas finales. Los servicios online recuperan las órbitas y parámetros disponibles en la fecha de solicitud, mientras que el reenvío de la información procesada se realiza generalmente vía correo electrónico, a excepción del APPS, el cual permite la recuperación directa desde el servidor una vez realizado el proceso. Se enviaron un total de 24 archivos por día a cada servicio de procesamiento GNSS online. Por problemas técnicos los días del año (doy) 20, 21, 22 y 23 no fueron procesados online, por lo que se enviaron 576 archivos para cada servidor, haciendo un total de 4032 procesamientos. Sumando a esto los procesos con el software freeware disponibles para PC y el Leica Geo Office, fueron un total de 2016 archivos (con estos programas se procesaron todos los días utilizados en este trabajo) y un total de 6048 procesamientos.

## Resultados

Los resultados obtenidos por los diferentes servicios están referidos al ITRF 08 época 2016 (Xc, Yc, Zc). La comparación se realizó utilizando las coordenadas cartesianas geocéntricas de la estación COL2, emitidas por el INEGI en diciembre de 2013, en el marco de referencia ITRF08 época 2010; esta posición fue ajustada al ITRF 08 época 2016 (XR, YR, ZR) para estar acorde a las soluciones obtenidas en los diferentes

procesamientos online. Para actualizar las coordenadas de la estación COL2 a la fecha actual, se utilizó el software ITRF08PR, el cual toma en consideración los desplazamientos en el tiempo de las estaciones que comprenden la Red Geodésica Nacional del INEGI (*ITRF08PR Herramienta de apoyo para el procesamiento de datos GNSS V. 2016.59*).

Los valores de sigma se calcularon obteniendo el valor de la media con respecto a la coordenada calculada Xc, Yc y Zc por cada hora de medición a partir del día 17 al 44, menos la coordenada real de vértice XR, YR y ZR, (1). Obteniendo la media hasta llegar a 24h.

Para X:

$$\bar{x}_X = \frac{(X_{c_{doy17}} - X_R) + (X_{c_{doy18}} - X_R) + (X_{c_{doy19}} - X_R) + \dots + (X_{c_{doy44}} - X_R)}{n} \quad (1)$$

Para Y:

$$\bar{x}_Y = \frac{(Y_{c_{doy17}} - Y_R) + (Y_{c_{doy18}} - Y_R) + (Y_{c_{doy19}} - Y_R) + \dots + (Y_{c_{doy44}} - Y_R)}{n} \quad (2)$$

Para Z:

$$\bar{x}_Z = \frac{(Z_{c_{doy17}} - Z_R) + (Z_{c_{doy18}} - Z_R) + (Z_{c_{doy19}} - Z_R) + \dots + (Z_{c_{doy44}} - Z_R)}{n} \quad (3)$$

Las desviaciones se calcularon mediante las siguientes expresiones:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{doy=17}^{n=44} |X_{c_{doy}} - \bar{x}_X|^2}{(n-17)+1}} \quad 4$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{doy=17}^{n=44} |Y_{c_{doy}} - \bar{x}_Y|^2}{(n-17)+1}} \quad 5$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{\sum_{doy=17}^{n=44} |Z_{c_{doy}} - \bar{x}_Z|^2}{(n-17)+1}} \quad 6$$

Después de 6 horas los errores por órbitas son mínimas (Gómez *et al.*, 2013). Durante la primera hora de medición la desviación estándar máxima de las diferencias entre las coordenadas calculadas ( $X_c, Y_c, Z_c$ ) con respecto a la coordenada obtenida mediante el modelo de deformación del INEGI con el programa ITRFPR08 ( $X_R, Y_R, Z_R$ ), muestran valores de  $\sigma_x = 60$  cm,  $\sigma_y = 20$  cm y  $\sigma_z = 35$ cm (Figura 1). A partir de la segunda hora de medición la mayoría de los procesos están debajo de los 5 cm (Figura 1).

De la Figura 1 se pueden determinar los tiempos que están dentro del rango de error de 5 cm (Tabla 1). Los servicios CSRS PPP CANADIAN y TRIMBLE RTX con observaciones de 1 hora cumplen con la precisión de 5 cm; los servicios online Auspos, GAPS, APPS y Magic PPP requieren de un tiempo mínimo de 2 horas para que sus dispersiones estén dentro del rango de 5 cm, mientras que para Leica GeoOffice y OPUS se requiere de 3 horas. Este último no procesa tiempos menores a 2 horas; gLAB requiere de 8 horas y RTKLIB muestra que para la coordenada X con 5 horas se encuentra dentro del rango, mientras que para la coordenada Y su rango es superior a los 5 cm, aunque se mantiene con una buena dispersión en el rango de 7 y 9 cm con respecto a la coordenada base.

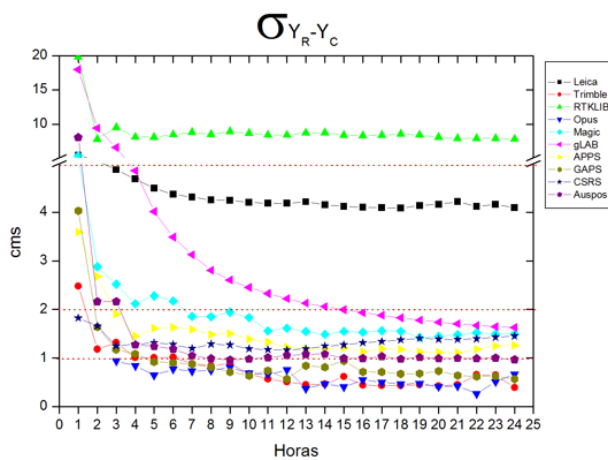
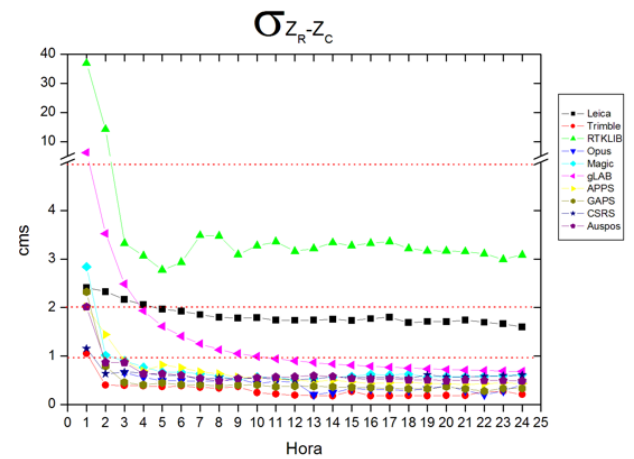
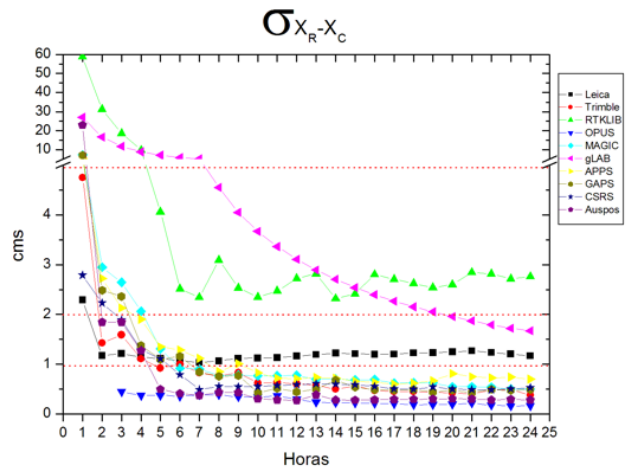


Figura 1.- Desviaciones de los procesos para GPS con respecto a los tiempos de medición.

Tabla 1.- Tiempo requerido para desviaciones menores a 5 cm.

Proceso	$\sigma_x < 5\text{cm}$ / T (h)	$\sigma_y < 5\text{cm}$ / T (h)	$\sigma_z < 5\text{cm}$ / T (h)
Auspos	2	2	1
CANADIAN	1	1	1
GAPS	2	2	1
APPS	2	1	1
gLAB	8	4	2
Magic PPP	2	2	1
OPUS	3	3	3
RTKLIB	5	$\sigma_y > 5\text{cm}$	3
TRIMBLE	1	1	1
Geo Office	1	3	1

Los valores de las desviaciones indican la precisión de la diferencia entre los datos calculados y el real, mostrando a partir de qué tiempo de observación se obtienen coordenadas finales con precisión menor a 5 cm cumpliendo con los requisitos de los lineamientos de Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Un error por debajo de 5 cm se considera como vértice Geodésico de orden "A", aceptable para estudios de tectónica (Compendio de criterios y especificaciones técnicas para la generación de datos e información de carácter fundamental, 07. Geodesia, 07.2 Estándares de Exactitud Posicional, INEGI, 2010).

La Tabla 1 proporciona, con base en los datos procesados, los rangos de tiempo para obtener una precisión menor a 5 cm. Sin embargo al realizar un análisis de la serie de datos de cada procesamiento online, se puede determinar un rango de tiempo para precisiones de órdenes de posicionamiento "sin equivalencia  $\leq 1\text{cm}$ " y "AA  $\leq 2\text{cm}$ " (*Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional, DOF 23 de diciembre de 2010*).

Para calcular estos rangos de cada servicio online y software libre usados en este trabajo, se analizan por separado las coordenadas horizontales (X, Y) y la coordenada vertical Z ya que se manejan diferentes estándares para precisiones horizontales y verticales.

En las coordenadas finales calculadas existen valores atípicos (outliers), que pueden ser discriminados utilizando la mediana de las diferencias entre las coordenadas de referencia (XR, YR, ZR) y las calculadas (XC, YC, ZC), delimitando de esta manera el rango de 5 cm.

La Figura 2, muestra que el sistema online Magic PPP tiene outliers en el lapso de las 24 horas y que después de la cuarta hora los valores atípicos disminuyen teniendo una  $\sigma_x = 10.9\text{ mm}$  y  $\sigma_y = 19.6\text{ mm}$  hasta la decimosegunda hora donde el error es del orden de 2 cm con una  $\sigma_x = 6.8\text{ mm}$

y  $\sigma_y = 15.7\text{ mm}$ .

En esta misma Figura 2 se muestra el proceso Trimble RTX, que a partir de la quinta hora no se visualizan outliers. Después de la decimosegunda hora, los rangos de variación oscilan dentro de los 2 cm con una  $\sigma_x = 4.7\text{ mm}$  y  $\sigma_y = 4.6\text{ mm}$ .

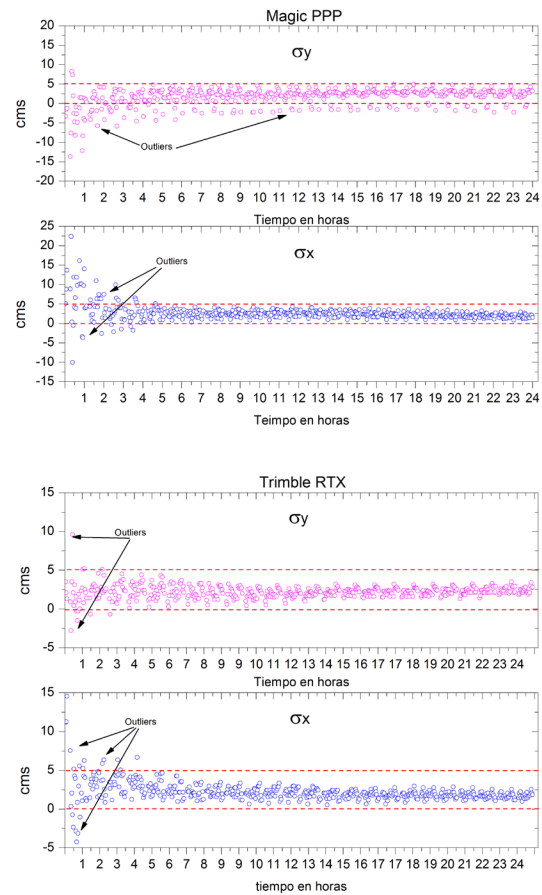


Figura 2.- Variaciones de los procesamientos GPS Magic PPP y Trimble RTX, con respecto al tiempo.

Los datos obtenidos por el cálculo con el sistema Auspos muestran que a partir de la tercera hora la información es estable y que después de la octava hora los rangos oscilan en los 2 cm con  $\sigma_x = 1.6\text{ mm}$  y  $\sigma_y = 4.4\text{ mm}$  y, posterior a la decimoquinta hora, los datos se encuentran dentro del rango de 1 cm con una  $\sigma_x = 1.2\text{ mm}$  y  $\sigma_y = 4.1\text{ mm}$  (Figura 3).

En la Figura 3, el software freeware gLAB, contiene valores atípicos en su procesos dentro de las 24 horas; a partir de la decimosegunda hora la información es más estable, después de este tiempo el porcentaje de outliers disminuye, y en este caso no se puede determinar rangos menores a 2 cm en la serie de datos.

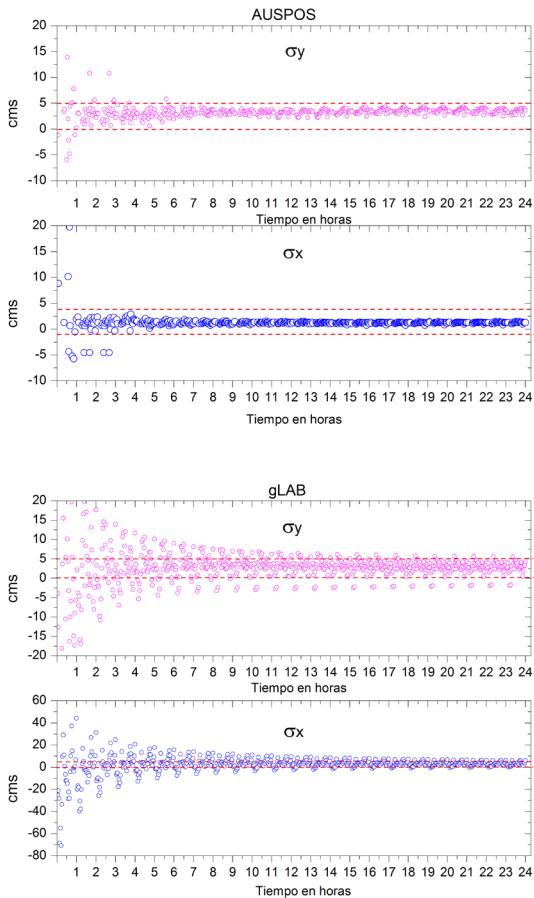


Figura 3.- Variaciones de los procesamientos GPS, Auspos y gLAB con respecto al tiempo.

En el proceso online APPS que utiliza el software Gipsy, a partir de la decimoquinta hora los valores se localizan dentro de los 2 cm con  $\sigma_x = 7.0$  mm y  $\sigma_y = 6.1$  mm (Figura 4).

Con los resultados del programa comercial Leica Geo Office no se puede determinar los rangos de 1 y 2 cm (Figura 4).

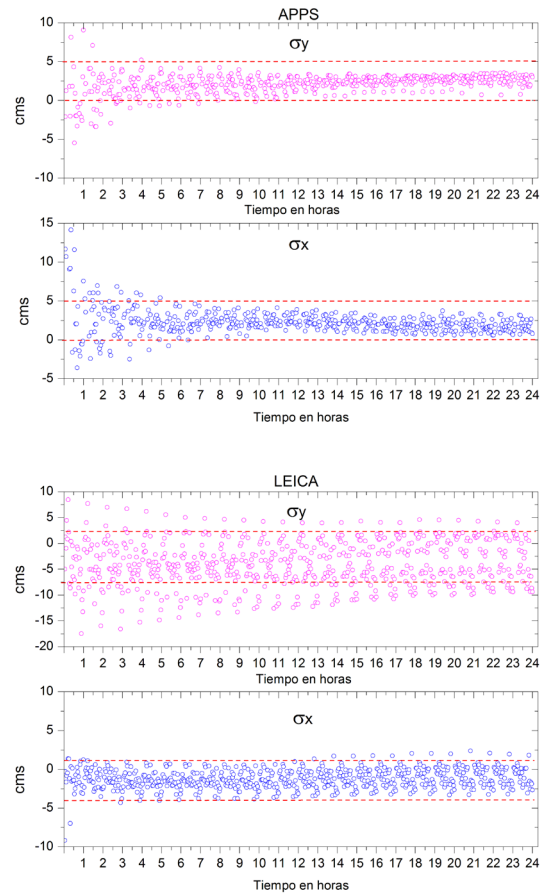


Figura 4.- Variaciones de los procesamientos de GPS con APPS y Leica Geo Office con respecto al tiempo.

A partir de novena hora los cálculos online con el servicio OPUS están dentro de los 2 cm con una  $\sigma_x = 3.4$  mm y  $\sigma_y = 7.2$  mm y a partir de la decimosegunda están en el orden de 1 cm con una  $\sigma_x = 2.1$  mm y  $\sigma_y = 5.0$  (Figura 5).

Utilizando la configuración para el método PPP recomendada por los desarrolladores del software libre RTKLIB, muestra que después de la cuarta hora las dispersiones son altas teniendo  $\sigma_x = 60.1$ mm y  $\sigma_y = 87.8$  mm, lo que impide determinar los rangos de error de 1 y 2 (Figura 5).

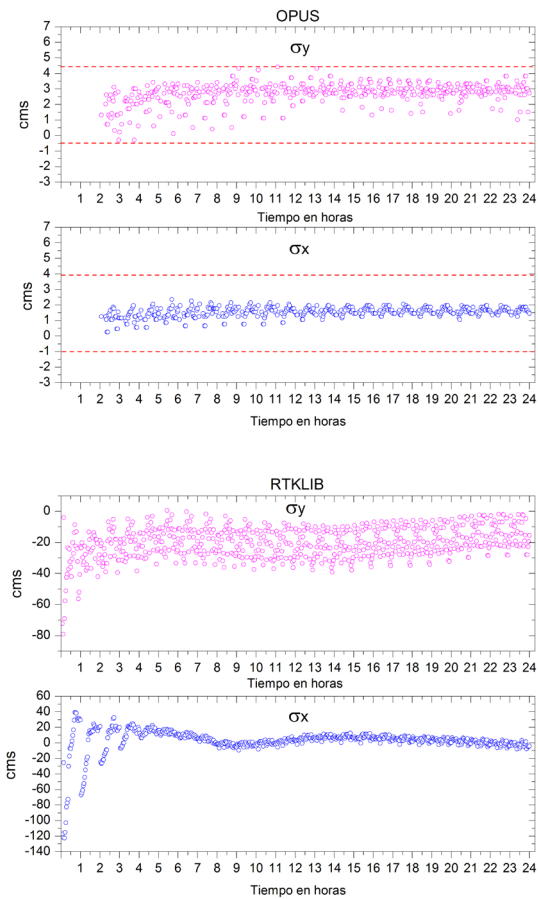


Figura 5.- Variaciones de los procesamientos GPS con Opus y RTKLIB con respecto al tiempo.

Los cálculos resultantes del servicio canadiense CSRS muestran que a partir de la decimosegunda hora los valores están dentro de los 2 cm con una  $\sigma_x = 5.8$  mm y  $\sigma_y = 13.4$  mm (Figura 6).

El servicio de procesamiento GAPS, no soporta el envío continuo de datos por lo que se obtuvieron menos resultados que los procesos utilizados en este trabajo. GAPS muestra que a partir decimosegunda hora el error se encuentra dentro de los 2 cm con  $\sigma_x = 5.4$  mm y  $\sigma_y = 6.8$  mm (Figura 6).

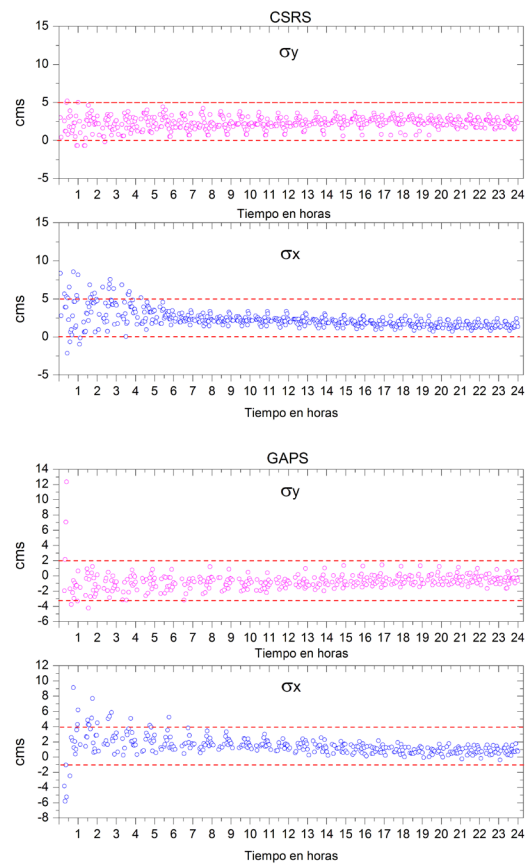


Figura 6.- Variaciones de los procesamientos GPS con CSRS y GAPS con respecto al tiempo.

Con la información generada determinamos que en el lapso de las semanas GPS 1880, 1881, 1882 y 1883 utilizadas para este trabajo, los tiempos de observación mínimos en los cuales las coordenadas calculadas con procesos online están dentro del rango de error de 5 cm, van desde 1 hora hasta 4 horas. El software freeware gLAB después de 8 horas puede determinar la exactitud de 5 cm, RTKLIB y el programa comercial Leica Geo Office no logran llegar a este margen.

En el rango de 8 a 15 horas se tienen exactitudes de 2 cm, exceptuando en este grupo a gLAB, Geo Office y RTKLIB, mientras que para Auspos y OPUS después de 15 y 12 horas respectivamente, los datos oscilan en el error de 1 cm (Tabla 2).

Tabla 2.- Tiempos requeridos para exactitudes en X, Y de orden 5, 2 y 1 cm.

PROCESO	$[(XR, YR)-(XC, YC)] \leq 5\text{cm}$	$[(XR, YR)-(XC, YC)] \leq 2\text{ cm}$	$[(XR, YR)-(XC, YC)] \leq 1\text{cm}$
Trimble	1 h $\sigma_x = 17.8\text{ mm}, \sigma_y = 11.6\text{mm}$	12 h $\sigma_x = 4.7\text{ mm}, \sigma_y = 4.6\text{mm}$	NA
Magic PPP	4 h $\sigma_x = 10.8\text{ mm}, \sigma_y = 19.6\text{mm}$	12 h $\sigma_x = 6.8\text{ mm}, \sigma_y = 15.7\text{mm}$	NA
Auspos	3 h $\sigma_x = 9.3\text{ mm}, \sigma_y = 12.2\text{ mm}$	8 h $\sigma_x = 1.6\text{ mm}, \sigma_y = 4.4\text{ mm}$	15 h $\sigma_x = 1.2\text{ mm}, \sigma_y = 4.1\text{ mm}$
gLAB	8 h $\sigma_x = 22.9\text{ mm y } \sigma_y = 18.7\text{mm}$	NA	NA
Geo Office	NA	NA	NA
APPS	4 h $\sigma_x = 10.8\text{ mm}, \sigma_y = 10.3\text{mm}$	15 h $\sigma_x = 7.0\text{ mm y } \sigma_y = 6.1\text{ mm}$	NA
RTKLIB	NA	NA	NA
OPUS	3 h $\sigma_x = 4.1\text{ mm}, \sigma_y = 8.4\text{ mm}$	9 h $\sigma_x = 3.4\text{ mm}, \sigma_y = 7.2\text{ mm}$	12 h $\sigma_x = 2.1\text{ mm}, \sigma_y = 5.0\text{ mm}$
GAPS	2 h $\sigma_x = 14.7\text{ mm y } \sigma_y = 10.9\text{ mm}$	12 h $\sigma_x = 5.4\text{ mm}, \sigma_y = 6.8\text{ mm}$	NA
CSRS	4 h $\sigma_x = 9.5\text{ mm}, \sigma_y = 12.5\text{ mm}$	12 h $\sigma_x = 5.8\text{ mm}, \sigma_y = 13.4\text{ mm}$	NA

En tiempo de posicionamiento estático de 1 a 4 horas, con varios servicios de procesamiento GNSS online, se pueden tener datos de orden A. Con mediciones de 8 hasta 15 horas el orden de precisión estará en AA y de 12 a 15 horas tendremos un orden de precisión “sin equivalencia” de acuerdo a la Norma técnica sobre estándares de exactitud y posicionamiento del INEGI.

Para la coordenada Z las variaciones son más estables que las posiciones X, Y. Los cálculos realizados por Trimble TX en la primeras 2 horas están dentro del rango de 2 cm con una  $\sigma_Z = 7.9$ . Posterior a éste tiempo la información está en el rango de 1 cm con una  $\sigma_Z = 2.5\text{ mm}$ . Desde la primera hora Magic con  $\sigma_Z = 8.8\text{ mm}$ . Auspos con  $\sigma_Z = 6.9\text{ mm}$  desde la primera hora sus datos están dentro del margen de los 2 cm y a partir de la séptima hora no se observan outliers. Entre la hora 1 y 4, Gipsy está dentro de los 5 cm con  $\sigma_Z = 13.4\text{ mm}$ , entre las 5 y 11 horas dentro del margen de los 2 cm con  $\sigma_Z = 6.2\text{ mm}$  y de las 12 a 24 horas en 1 cm con  $\sigma_Z = 4.7\text{ mm}$ . Opus con  $\sigma_Z$

$= 4.1$ , la información oscila en el rango de los 2 cm desde la tercera hora. Gaps con  $\sigma_Z = 6.4\text{ mm}$ , desde la primera hora los valores están dentro del orden de 1 cm con un porcentaje mínimo de outliers. En el orden de los 5 cm CSRS con  $\sigma_Z = 6.3\text{ mm}$  desde la primera hora, y gLAB a partir de la cuarta hora con una  $\sigma_Z = 9.5\text{ mm}$  (Figura 7). Los resultados de Leica son dispersos pero desde la primera hora de procesamientos la mayoría de sus datos está dentro del rango de los 5 cm con una  $\sigma_Z = 18.6\text{ mm}$  (Figura 7) y por último, RTKLIB con una  $\sigma_Z = 87.3\text{ mm}$  no puede determinarse un tiempo para estar dentro de los rangos (Figura 7).

Actualmente en la reglamentación del INEGI, de los estándares verticales para GNSS la especificación técnica recomienda utilizar la formula  $EPV = 1.9600 (\sigma^2_{GNSS} + \sigma^2_N)^{1/2}$  (Norma técnica, DOF, Diciembre 2010), donde  $\sigma^2_N =$  Desviación estándar del modelo de alturas geoidales para México y su valor es de 20 cm (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/ggm>). Tomando como  $\sigma_z = 2.6\text{ cm}$  de todas las series el valor de EPV = 10.13 cm, el

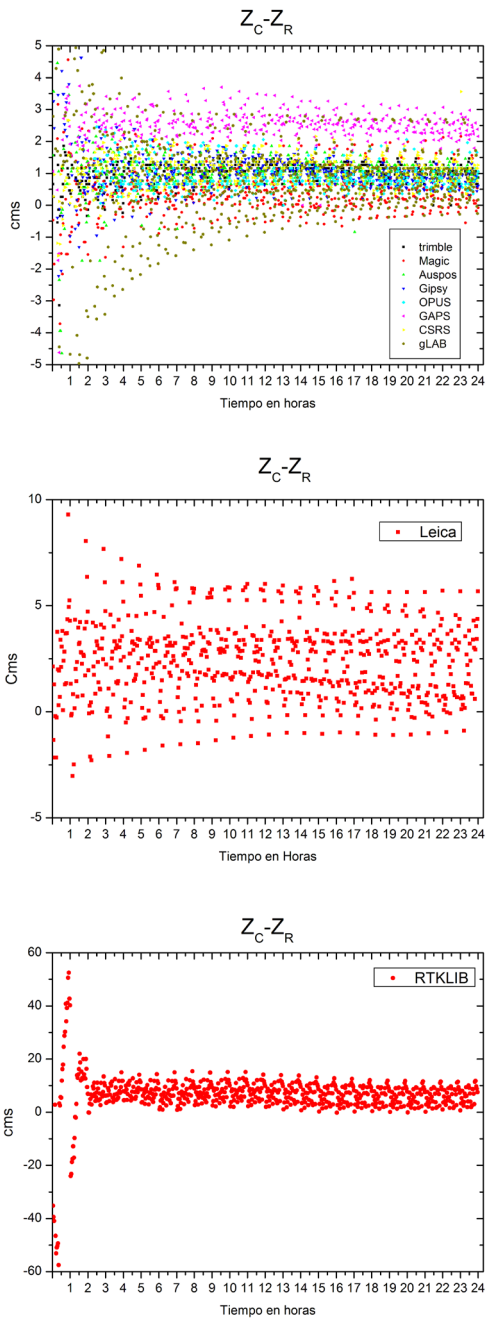


Figura 7.- Graficos de Variaciones en la coordenada Z

dato es muy superior a los errores esperados en una nivelación mediante GPS, de acuerdo a las especificaciones técnicas de los equipos GPS, por eso no es correcto su uso.

En este trabajo solamente se consideraron las estimaciones horizontales.

En el software freeware gLAB después de 4 horas de registro se obtienen valores con un rango de 5 cm, mientras que el mismo resultado se obtiene para Leica Geo Office con 1 hora, igualmente para los servicios GNSS online Magic PPP, APPS y CSRS. En el rango de 2 cm se encuentran los cálculos realizados por Trimble TX y Auspos con 1 hora, APPS con 5 horas y OPUS con 3 horas de registro. Finalmente en el rango de 1 cm GAPS con 1 hora, Trimble TX con 3 horas y APPS con 12 horas (Tabla 3). El único proceso que no cumplió con los parámetros establecidos en Z fue el software freeware RTKLIB.

Tabla 3- Tiempos requeridos para exactitudes en Z de orden 5, 2 y 1 cm

Proceso	(ZR-ZC) < 5cm	(ZR-ZC) < 2 cm	(ZR-ZC) < 1 cm
Trimble	NA	1 h $\sigma_z = 7.9$ mm	3 h $\sigma_z = 2.5$ mm
Magic PPP	1 h $\sigma_z = 8.8$ mm	NA	NA
Auspos	NA	1 h $\sigma_z = 6.9$ mm	NA
gLAB	4 h $\sigma_z = 9.5$ mm	NA	NA
Geo Office	1 h $\sigma_z = 18.6$ mm	NA	NA
APPS	1 h $\sigma_z = 13.4$ mm	5 h $\sigma_z = 6.2$ mm	12 h $\sigma_z = 4.7$ mm
RTKLIB	NA	NA	NA
OPUS	NA	3 h $\sigma_z = 4.1$ mm	NA
GAPS	NA	NA	1 h $\sigma_z = 6.4$ mm
CSRS	1 h $\sigma_z = 6.3$ mm	NA	NA

## Conclusiones

El procesamiento de datos GPS en línea, por sus características técnico-científicas, ofrece una buena alternativa en los cálculos de posicionamientos GPS. De acuerdo con los resultados de los procesadores en línea, se pueden utilizar tiempos de observación desde 1 hasta 24 horas de posicionamiento utilizando órbitas rápidas, obteniendo coordenadas del orden de ~5 cm. Las coordenadas de la estación que se utilizó para este trabajo, fueron calculadas con órbitas precisas. La comparación de las coordenadas calculadas con órbitas rápidas de los procesamientos de datos GPS en línea con las finales de la estación, muestran datos confiables para los análisis de cualquier proyecto que tenga mediciones GPS. Con tiempos de observación cortos, sin necesidad de esperar los parámetros precisos que en su emisión tardan 13 días, los resultados finales tienen una certidumbre aceptable. Las características científicas de estos paquetes y la calidad de sus resultados hacen que su aplicación en estudios de geofísica y topográficos sea aceptable. Los datos utilizados en este trabajo son GPS; en mayo de 2016 la estación fue actualizada a GNSS; en la actualidad los servicios de procesamiento en línea están migrando al GNSS, lo que debe mejorar las precisiones. Gráficamente es visible que las variaciones entre periodos de observación de pocas horas (2 a 4) con respecto a observaciones prolongadas (más de 12 horas) se van minimizando; el usuario del sistema de posicionamiento global puede obtener coordenadas geocéntricas precisas con la utilización de software libre y procesamientos GPS online.

## Agradecimientos:

La realización de este trabajo se completó gracias al apoyo y revisión de dos árbitros anónimos y editores de la revista quienes, con sus observaciones, enriquecieron la estructura de este escrito. Así mismo agradecemos al Dr.

Luis Alberto Delgado Argote por su tiempo y dedicación en la revisión de este artículo. También agradecemos al INEGI por el acceso libre a los datos GPS y GNSS de la estación COL2 a través del sistema CORS.

## Referencias

- Abd-Elazeem, M., Farah, A., and Farrag, F. (2011). Assessment study of using online (CSRS) GPS-PPP Service for mapping applications in Egypt. *Journal of Geodetic Science*, 1(3), 233-239.
- Australian Government Geoscience Australia (2012). AUSPOS - Online Processing: Australia. Recuperado de <http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl>
- Beutler G, Bock, R. Dach, R. Fridez, A. Gade, U. Hugentobler, A. Jaggi, M. Meindl, L. Mevart, L. Prange, Schaer, T. Springer, C. Urschl and P. Walser (2007). Bernese GPS Software versión 5.0, Astronomical Institute, University of Bern, 2007. Tomado de <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU50.pdf>.
- Diario Oficial de la Federación (2010). Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional 23 de Diciembre de 2010. Recuperado de [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5172208&fecha=23/12/2010](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5172208&fecha=23/12/2010).
- Echeverría A., Khazaradze, G., Asensio, E, Garate, J. y Suriñach, E. (2012). Deformación cortical de las Béticas orientales observada mediante GPS y su relación con el terremoto de Lorca, *Física de la Tierra*, vol. 24, pp. 113-127.
- gACE, Research Group of Astronomy and Geomatic (2016). GLAB. Tomado de <http://gage.upc.edu/gLAB>

- GAPS, GNSS Analysis and positioning software: Canada (2007). Tomado de <http://gaps.gge.unb.ca/>
- Gómez, M.E., Del Cogliano, D., Lahitte, C., Rodríguez-Tello, M.N. (2013). Análisis de la performance de tres servicios de posicionamiento gps online en Argentina, *Geoacta* Vol.38 (2), pp 95-106.
- Herrada, A., Miranda, S., Fuentes, C., Torres-Lobato, O., Pintos, H., Smalley Jr., R. (2010). Monitoreo de la calidad de datos gps continuo: la estación unsj. (San Juan, Argentina), *GEOACTA*, Vol. 35, pp 55-62.
- INEGI (2010). Compendio de criterios y especificaciones técnicas para la generación de datos e información de carácter fundamental, 07. Geodesia, 07.2 Estándares de Exactitud Posicional, Tomado de [http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/6-%20estandares\\_de\\_exactitud\\_posicional.pdf](http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/6-%20estandares_de_exactitud_posicional.pdf).
- INEGI (2016). Procesamiento de datos GPS considerando deformaciones del Marco Geodésico en el Tiempo, procedimiento para la minimización de errores debido a la deformación del marco de referencia ITRF. En: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825295561.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825295561.pdf)
- JPL (Jet Propulsion Laboratory) (2016). The Automatic Precise Positioning Service of the Global Differential GPS System: California USA. Recuperado de <http://apps.gdgps.net/>.
- Lee, S. W., Yun, S. H., Kim, D. H., Lee, D., Lee, Y. J., and Schutz, B. E. (2015). Real-time volcano monitoring using GNSS single-frequency receivers. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), 8551-8569.
- MAGIC GNSS (2016). Tomado de <http://magicgnss.gmv.com/>
- Moya-Zamora, J., Bastos-Gutiérrez, S. (2015). Procesamientos GNSS en línea como potenciales alternativas a diferentes aplicaciones geodésicas. *Uniciencia*, Vol. 29 (2), pp. 1-14.
- National Geodetic Survey (2016). OPUS: Online Positioning User Service: USA. Tomado de <https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>
- Natural Resources Canada (2016). Canadian Spatial Reference System-PPP. Recuperado de <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.
- Ocalan, T., Erdogan, B., and Tunalioglu, N. (2013). Analysis of web-based online services for GPS relative and precise point positioning techniques. *Boletim de ciencias geodesicas*, 19(2), 191-207.
- Software Leica GeoOffice (2008). Recuperado de [http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Geo-Office\\_4611.html](http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Geo-Office_4611.html)
- Software RTKLIB (2014). Recuperado de <http://www.rtklib.com/>
- Schmitt, S. V., DeMets, C., Stock, J., Sánchez, O., Márquez-Azúa, B., and Reyes, G. (2007). A geodetic study of the 2003 January 22 Tecoman, Colima, Mexico earthquake. *Geophysical Journal International*, 169(2), 389-406.

Trimble (2014). CenterPoint RTX Post-Processing: USA. Tomado de <http://www.trimblertx.com/UploadForm.aspx>.

Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., and Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of geophysical research: solid earth*, 102(B3), 5005-5017.

Recibido: 11 de diciembre de 2017

Recibido corregido por el autor: 16 de agosto de 2018

Aceptación: 29 de agosto de 2018