

## Estimación rápida de desplazamientos co-sísmicos mediante estaciones de Posicionamiento Satelital Global. Comparación con interferometría de radar

### *Quick estimation of co-seismic displacements with Global Navigation Satellite Systems. Comparison with radar interferometry*

Camisay, María Fernanda<sup>1,2</sup>; Rosell, Patricia Alejandra<sup>1,2,3</sup>; Mackern, María Virginia<sup>1,2,3</sup>; Mateo, María Laura<sup>1,2</sup>; Weidmann, Tomás<sup>1</sup>; Gonzalez Romo, Agustín<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Juan Agustín Maza. Facultad de Ingeniería. Mendoza. Argentina.

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ingeniería. Mendoza. Argentina.

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.

Contacto: fernandacamisay@gmail.com

Autor de correspondencia: Camisay, María Fernanda

Teléfono: 261 3361942

Dirección postal: Paso de Los Andes 271, Ciudad, Mendoza, Argentina

Palabras claves: GNSS, PPP, Desplazamientos co-sísmicos, UNAVCO, DinSAR

Keywords: GNSS, PPP, co-seismic displacements, UNAVCO, DinSAR

#### Resumen

Los sistemas de posicionamiento satelital, conocidos por la sigla GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), se han convertido en la técnica geodésica de densificación por excelencia. Sus posibilidades tanto técnicas como económicas y de instalación han permitido aumentar considerablemente la cantidad de puntos sobre la Tierra. Por otro lado, el análisis periódico de estas posiciones permite detectar deformaciones sobre la corteza en una zona determinada.

En este trabajo se presenta una metodología para estimar de manera rápida los desplazamientos producidos por eventos sísmicos, registrados por estaciones GNSS. Se toma como elemento de análisis el terremoto ocurrido en California el 6 de julio de 2019, de magnitud 7,1. Se cuantifican los desplazamientos observados en 5 estaciones GNSS ubicadas en un radio de 45 km del epicentro, mediante la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso.

Los resultados obtenidos se comparan con las series de coordenadas diarias de UNAVCO (University NAVSTAR Consortium Inc.) y con los desplazamientos calculados utilizando la técnica DinSAR (*Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

Se concluye que la metodología propuesta, aplicada a observaciones de alta frecuencia, proporciona una evaluación rápida y eficiente de los desplazamientos co-sísmicos.

#### Abstract

*Satellite positioning systems, known by the acronym GNSS (Global Navigation Satellite Systems), have become the best geodetic densification technique. Its technical, economic and installation possibilities have increased the number of points on the Earth's crust. On the other hand, the periodic analysis of these positions allows detecting crust deformations in a certain area.*

*This paper presents a quickly estimation of seismic displacements methodology, recorded by GNSS stations. The 2019 July 6th, California earthquake is taken as an element of analysis, with a magnitude of 7.1 and 8 km deep. The displacements observed in 5 GNSS stations located within a radius of 45 km from the epicenter have been quantified, using the Precise Point Positioning technique.*

*The results are compared with the UNAVCO (University NAVSTAR Consortium Inc.) daily coordinate series and with the DinSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar) technique.*

*It is concluded that the proposed methodology, with high frequency GNSS observations, provide a fast and efficient evaluation of the co-seismic displacements.*

## Artículo completo

## Ciencias Ambientales, Agroindustrias y de la Tierra

**Introducción**

Los sistemas de posicionamiento satelital, conocidos por la sigla GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), se han convertido en la técnica geodésica de densificación por excelencia. Sus posibilidades tanto técnicas como económicas y de instalación han permitido aumentar considerablemente la cantidad de puntos sobre la corteza de la Tierra.

A partir de estaciones GNSS de observación continuas es posible monitorear el comportamiento de las coordenadas para una serie de tiempo, permitiendo estimar los desplazamientos que experimenta el punto que materializa dicha estación. El análisis periódico de estas posiciones permite detectar deformaciones sobre la corteza en una zona determinada. Luego, al contar con posiciones periódicamente y/o continuas, puede realizarse un seguimiento de la deformación cortical, la que puede ser modelada a partir de las velocidades de desplazamiento conocidas [Mateo, 2011].

Existen numerosos antecedentes de la utilización de redes de estaciones GNSS permanentes en aplicaciones geodinámicas, como por ejemplo el monitoreo sísmico [Geng *et al.*, 2016; Kouba, 2003], la estimación de desplazamientos co-sísmicos [Allen and Ziv, 2011; Larson *et al.*, 2003], y su contribución a la localización de epicentros, fallas y estimaciones de mecanismos focales [Hohensinn *et al.*, 2018; Melgar *et al.*, 2015].

En la actualidad, Japón es uno de los países con mayor avance en esta temática. Posee una red muy densificada donde se combinan estaciones sismológicas y GNSS. En el Sismo Chuetsu-Niigata ocurrido en 2007 de magnitud 6.5, se han podido observar desplazamientos de hasta 40 cm en estaciones ubicadas a 20 km del epicentro [Larson, 2009]. Se observó también que el desplazamiento de la estación GNSS receptora no sólo está en función de la cercanía al epicentro, sino que también influye el acimut respecto a la dirección de ruptura. Si bien la sismología con GNSS es menos precisa que los instrumentos de movimiento fuerte (*strong motion*), se ha demostrado que puede medir con mayor precisión los desplazamientos producidos por grandes terremotos [Emore *et al.*, 2007].

En California también se han realizado estudios comparativos con redes GNSS en tiempo real y acelerómetros, donde se observa un muy buen acuerdo en fase y amplitud para las componentes horizontales, pero no así en la componente vertical [Allen and Ziv, 2011]. Sin embargo, la comparación de desplazamientos estimados por ambas técnicas es muy similar, sumado a que la técnica GNSS permite registrar grandes desplazamientos imposibles de detectar con instrumentos sísmicos de banda ancha donde se produce la saturación [Larson *et al.*, 2003].

En Argentina no se han observado antecedentes de la utilización de redes combinadas GNSS y sismológicas. El organismo encargado de la prevención y registro sísmico es el INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). Sin embargo, los datos registrados por las estaciones INPRES no son de libre acceso, con lo cual no se pueden realizar estudios posteriores, implementar algoritmos de cálculo ni análisis de sismicidad local a partir de dichas estaciones. Por este motivo se realizó una búsqueda de eventos sísmicos en zonas donde fuese posible disponer de datos GNSS y sismológicos de libre acceso.

En la gran mayoría de estaciones GNSS instaladas con fines de georreferenciación, el intervalo de muestreo es 15 o 30 segundos, en zonas urbanas suelen estar configurados a 5 segundos. Con tales intervalos se han obtenido aportes muy significativos para el estudio de los sismos, sin embargo, es posible obtener mayor información sobre la llegada de las ondas y los movimientos durante el sismo, registrando observaciones con mayor frecuencia. Luego, los sistemas GNSS podrían mejorarse para aplicaciones sísmicas si sus frecuencias de muestreo aumentaran de 1 a 10 Hz [Larson, 2009].

Por otro lado, la técnica DinSAR (*Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*), también se utiliza en el análisis de deformaciones producidas por sismos. Es una técnica basada en la combinación de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés) con el principio físico de la interferencia de señales. Los SAR son sensores activos de visión lateral. La generación de una imagen se hace por medio de la recepción de energía electromagnética que es emitida desde el sensor. Esta interacciona con los elementos de la superficie terrestre y sólo una parte de ella regresa. Este eco está caracterizado por un valor de amplitud y frecuencia. La amplitud depende de las características dieléctricas del suelo, así como de la distribución y características de los elementos que se encuentran sobre él. La fase contiene información relativa a la distancia entre el suelo y el sensor. Si entre dos fechas distintas se generó algún desplazamiento del terreno, éste puede calcularse mediante la diferencia de fase entre la imagen anterior y la posterior al evento [Hanssen, 2002]. Como resultado, se obtiene una imagen llamada «interferograma diferencial» la cual contiene diferencias de altura, pixel a pixel, a lo largo de un área de estudio y con respecto a un píxel de referencia. Estos cambios pueden deberse a desplazamientos generados por terremotos, deslizamientos en laderas, subsidencias o solevamientos en pozos de petróleo, acuíferos o volcanes, entre otros [Chlieh *et al.*, 2011; Lau *et al.*, 2018; Pepe *et al.*, 2016; Rongier *et al.*, 2019; Schmidt & Bürgmann, 2003].

En este trabajo se seleccionó el terremoto ocurrido en Ridgecrest California, el 6 de julio de 2019, de magnitud 7,1 a 8 km de profundidad. Este sismo, ocurrió 34 horas después de otro evento en la misma región de una magnitud menor (6,4). Estos sismos han sido estudiados por numerosos autores, y se ha demostrado el gran aporte de las redes GNSS en la estimación de velocidades y desplazamientos co-sísmicos [Floyd *et al.* 2020]. Así mismo [Hodgkinson *et al.*, 2020] presentan la utilización de desplazamientos GNSS estimados a tiempo real, en el cálculo de magnitudes de momento ( $M_w$ ). El desempeño durante los terremotos de Ridgecrest de las redes GNSS a tiempo real, es una fuerte evidencia de la viabilidad y utilidad de estas estaciones como herramienta de monitorización [Melgar *et al.*, 2019].

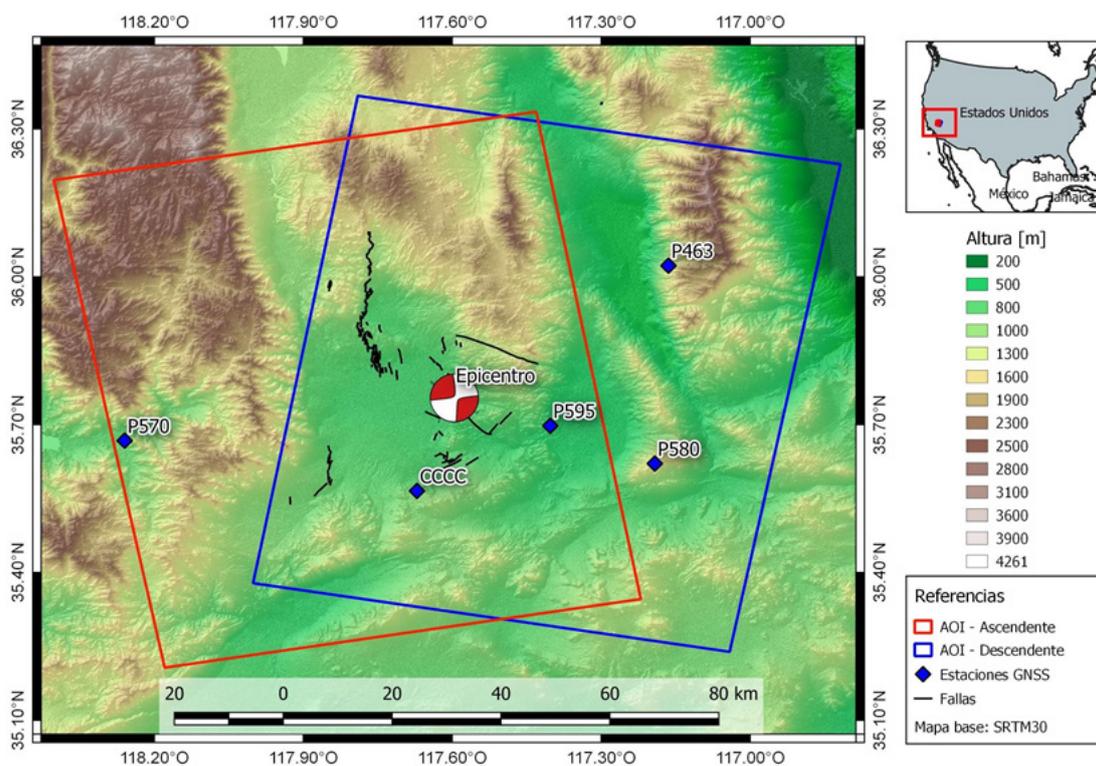
El objetivo principal o contribución de esta investigación, fue implementar y evaluar un algoritmo de cálculo, desarrollado para estimar el desplazamiento resultante o co-sísmico en cada estación GNSS, de manera rápida y pasible de ser aplicado a tiempo real. Se han cuantificado los desplazamientos observados en 5 estaciones GNSS ubicadas en un radio de 45 km del epicentro. Los resultados obtenidos se compararon con las series de coordenadas diarias de UNAVCO (University NAVSTAR Consortium Inc.) y con los desplazamientos calculados utilizando la técnica DinSAR (*Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

**Materiales y métodos**

**Datos GNSS y procesamiento rápido de coordenadas**

Como se mencionó, se seleccionó para este estudio el terremoto ocurrido en California, el 6 de julio de 2019, a las 3:19:53 (hora UTC). Se eligió este evento por su importante magnitud y por contar con datos disponibles tanto de estaciones GNSS con registro de alta frecuencia (*high-rate*), como de estaciones sismológicas. Se utilizaron 5 estaciones GNSS permanentes ubicadas en las cercanías del epicentro (Figura 1). Sus observaciones se descargaron del servidor de UNAVCO [ftp://data-out.unavco.org/pub/highrate/].

Se procesaron mediante la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) [Zumberge *et al.*, 1997], 3 horas de observación con intervalos de registro de 5 Hz (0,2 segundos), desde las 2 a las 5 hs UTC, lo cual permitió obtener para cada estación sus coordenadas (en sus tres componentes) para cada observación. El procesamiento se realizó con el servicio *on-line* canadiense de PPP, CSRS-PPP [https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php].



**Figura 1:** Sismo California (6/7/2019). Ubicación del epicentro, estaciones GNSS utilizadas y áreas de interés de cada órbita Din SAR (ascendente en rojo, descendente en azul).

**Cálculo de desplazamientos co-sísmicos**

A partir de las coordenadas estimadas con PPP, se calcularon en un sistema horizontal geodésico, con respecto a la coordenada de control de cada estación (IGS08), los desplazamientos en las tres componentes (Norte, Este y Altura o *Up*). Observando los desplazamientos en las coordenadas, fue posible identificar en cada estación la amplitud máxima del movimiento producido por el sismo y cuantificar la deformación co-sísmica resultante (Figuras 3 a 6).

Luego se aplicó un algoritmo de cálculo desarrollado para la detección rápida de desplazamientos resultantes (DR) producidos por eventos sísmicos. El programa, desarrollado en Matlab, determina el mayor desplazamiento registrado (entre épocas sucesivas). Calcula un promedio de las posiciones previas y el promedio de las posiciones posteriores a este «salto o discontinuidad». Luego de la diferencia entre ambas posiciones promediadas (previa y posterior), calcula el desplazamiento resultante en cada estación, producto del evento. En esta experiencia, se consideraron 2 minutos previos y posteriores al mayor desplazamiento detectado por el programa, para el cálculo de los promedios.

El resultado del algoritmo es un archivo de texto (ASCII) que contiene los desplazamientos en las tres coordenadas para cada estación analizada. La Figura 2 esquematiza el procedimiento para obtener estos desplazamientos resultantes (DR), desde el archivo de observaciones GNSS en formato estándar RINEX.

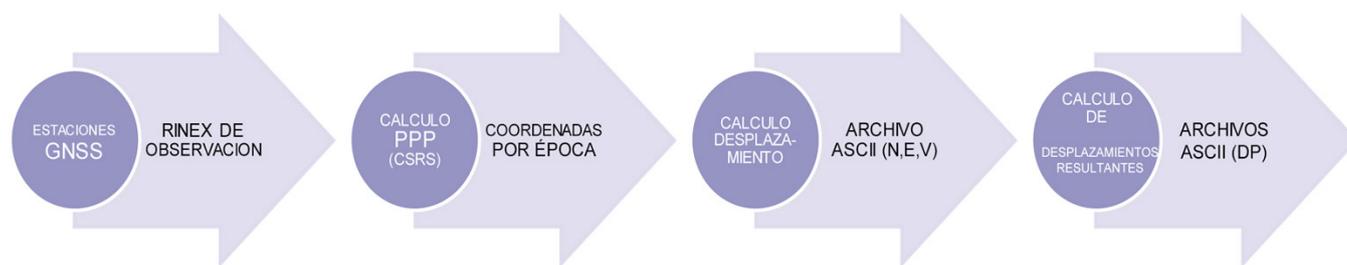


Figura 2: Procedimiento para obtener desplazamientos resultantes (DR) en estaciones GNSS.

Los DR fueron comparados con los desplazamientos N,E,*Up* obtenidos de las soluciones diarias de UNAVCO y con los desplazamientos estimados por DinSAR.

**Variación de coordenadas determinadas por UNAVCO (University NAVSTAR Consortium Inc.)**

Como se mencionó las estaciones GNSS utilizadas pertenecen a la red NOTA (*Network of the Americas*) gestionada por UNAVCO [<https://www.unavco.org/>]. Dichas estaciones son procesadas por los centros de análisis de datos que conforman el proyecto GAGE (*Geodesy Advancing Geosciences and EarthScope*) y se dispone diariamente de la solución de coordenadas de todas las estaciones de la red [<ftp://dataout.unavco.org/pub/products/positions>]

La solución diaria es el resultado de una combinación de dos soluciones independientes: una se basa en el Posicionamiento Puntual Preciso, producido con el software GYPSI/OASIS en la Universidad Central de Washington (CWU) y la otra es una solución de red a partir de postprocesamiento de dobles diferencias, realizada con el software GAMIT, en el Instituto de Minería de Nuevo México y Tecnología (NMT). Ambas soluciones son generadas a partir de productos rápidos del IGS (efemérides, parámetros de orientación y relojes satelitales), razón por la cual tienen una latencia de aproximadamente 24 hs [Herring *et al.*, 2016].

Las coordenadas diarias de las 5 estaciones GNSS fueron extraídas de la solución final del centro de análisis CWU, referidas al marco de referencia ITRF2014. Se realizó el cálculo de los desplazamientos producidos por el terremoto, considerando en cada punto las coordenadas promedio de dos días previos al sismo y dos días posteriores (Tabla 1).

Tabla 1: Coordenadas previas y posteriores al sismo de California (Fuente: coordenadas diarias ssss.cwu.final\_igs14.pos, publicadas por UNAVCO).

Estación	Xprevio	Yprevio	Zprevio	Xpost	Ypost	Zpost
P463	-2358354.976	-4595829.857	3730988.422	-2358354.966	-4595829.883	3730988.405
P570	-2456509.110	-4569864.795	3698741.092	-2456509.147	-4569864.770	3698741.090
CCCC	-2412475.997	-4600711.919	3689538.417	-2412475.992	-4600711.787	3689538.593
P580	-2372609.840	-4618139.918	3695056.938	-2372609.660	-4618140.018	3695056.913
P595	-2386904.674	-4604247.818	3701367.054	-2386904.255	-4604248.245	3701366.878

**Determinación de los desplazamientos co-sismicos con DinSAR**

Se utilizaron imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*) del satélite Sentinel-1A de la *European Space Agency* (ESA) en sus dos órbitas: ascendente y descendente, cubriendo un área de interés (AOI) que abarque la mayor cantidad de estaciones GNSS analizadas (Figura 1). El uso de estas órbitas permite determinar deformación desde dos puntos de vista distintos, a lo largo del ángulo de visión del satélite (LOS, *line-of-sight*), permitiendo calcular las componentes Este y Vertical de la deformación total [Mastro *et al.*, 2020]. Debido al azimut de las órbitas, el sensor no es sensible a las deformaciones en sentido Norte-Sur, por lo que el cálculo de esta componente resulta limitada si se utiliza un único sensor, además de presentar los mayores errores en su determinación [Hu *et al.*, 2014; Pawluszek-Filipiak & Borkowski, 2020]. Por lo tanto, para este trabajo sólo fueron analizados los desplazamientos en la componente este y en la altura.

Con el fin de obtener el valor de la deformación generada por el terremoto, se calculó un interferograma por órbita utilizando las imágenes inmediata anterior y posterior al evento (Tabla 2). Los interferogramas generados fueron filtrados por coherencia, es decir, se eliminaron píxeles cuyas características no se mantuvieron iguales durante la adquisición de ambas imágenes. Por otro lado, a fin de disminuir los efectos atmosféricos presentes, se aplicaron mapas de retardo cenital troposférico obtenidos gratuitamente por medio del *Generic Atmospheric Correction Service* (GACOS - <http://ceg-research.ncl.ac.uk/v2/gacos/>) [Yu *et al.*, 2017, 2018]. La diferencia de fase, fue transformada a desplazamiento y se extrajo el valor de deformación en LOS para cada estación y epicentro. Finalmente, siguiendo a Mastro *et al.*, (2020), se calculó la componente Este y Vertical sólo para las estaciones comprendidas en ambos interferogramas (cccc y P595).

Tabla 2: Fechas de las imágenes Sentinel disponibles utilizadas en cada interferograma.

Órbita	Previas al terremoto	Posteriores al terremoto
Ascendente	28/06/2019	10/07/2019
Descendente	04/07/2019	16/07/2019

## Resultados

### Desplazamientos observados en las estaciones GNSS (procesamiento PPP)

Con las coordenadas obtenidas de PPP en las 5 estaciones GNSS en estudio, se graficaron las series temporales en sus tres componentes. Se determinaron movimientos instantáneos superiores a 40 cm en las estaciones más cercanas al epicentro.

En la Figura 3, se muestra la serie temporal de la estación CCCC y en la Figura 4, la estación P595, estaciones más cercanas al epicentro. En ambas figuras se puede apreciar el desplazamiento producido por el sismo, fundamentalmente en las coordenadas horizontales (Norte y Este).

La estación CCCC, ubicada a 25 kilómetros al oeste de la zona de fallamiento, muestra un desplazamiento resultante horizontal hacia el Nor-Oeste (20 cm) y un leve ascenso (2 cm), mientras que la estación P595, ubicada a 20 kilómetros al este de la zona de fallamiento, muestra un desplazamiento resultante horizontal hacia el Sur-Este (58 cm) y un ascenso más significativo (5 cm).

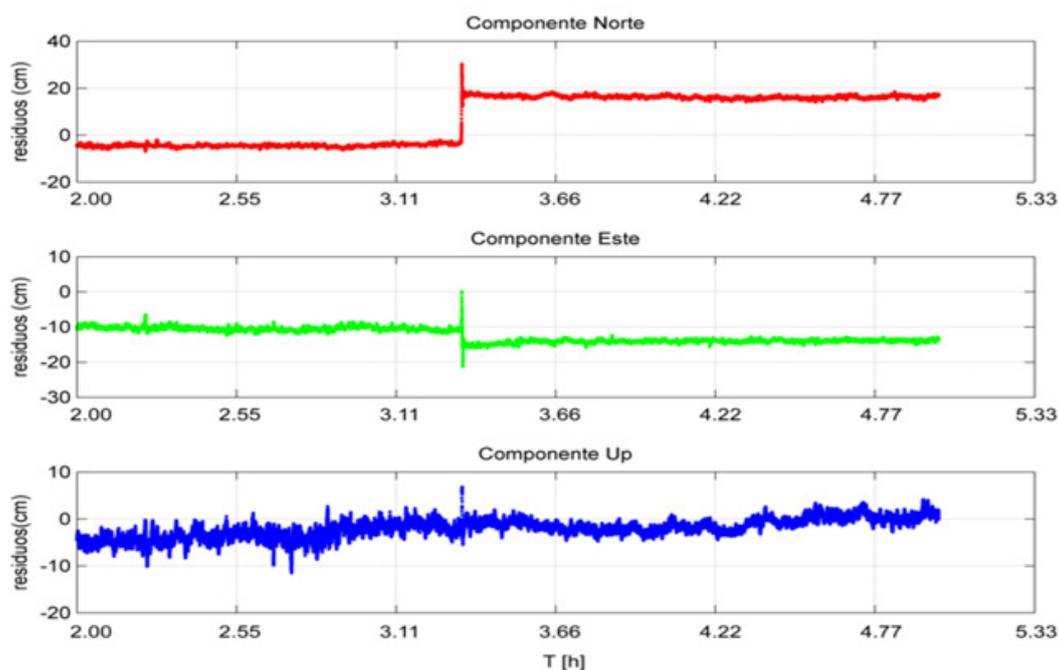


Figura 3: Serie temporal estación CCCC, ubicada a 25 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC).

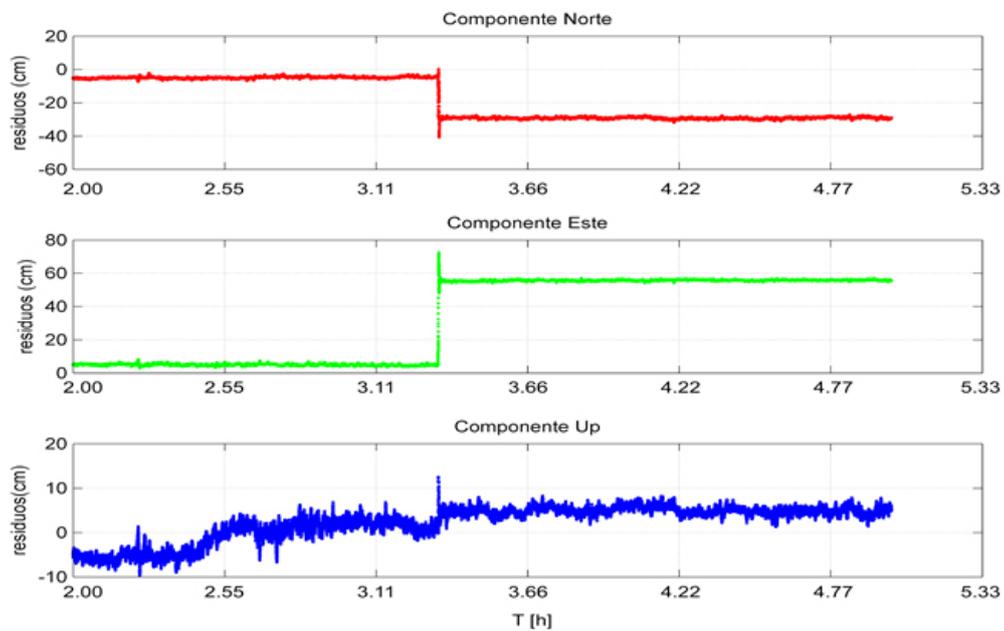


Figura 4: Serie temporal estación P595, ubicada a 20 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC).

Algo semejante se observa en la Figura 5 y 6, correspondientes a las estaciones P570 y P580 respectivamente. Dichas estaciones si bien se encuentran más alejadas del epicentro, muestran una respuesta similar de desplazamiento. La estación P570, ubicada a 60 km al oeste del epicentro y al oeste de la zona de fallamiento, presenta un desplazamiento en sentido Nor-Oeste, mientras que la estación P580, ubicada a 45 km al este del epicentro y al este de la zona de fallamiento, se desplaza en sentido Sur-Este.

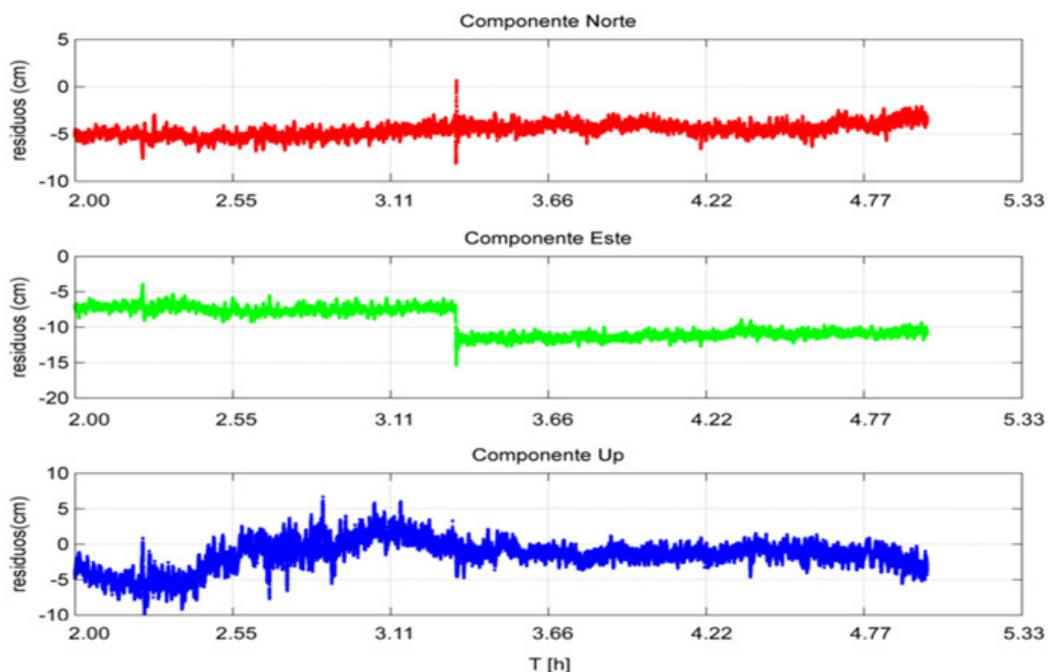


Figura 5: Series temporal estación P570 ubicada a 60 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC).

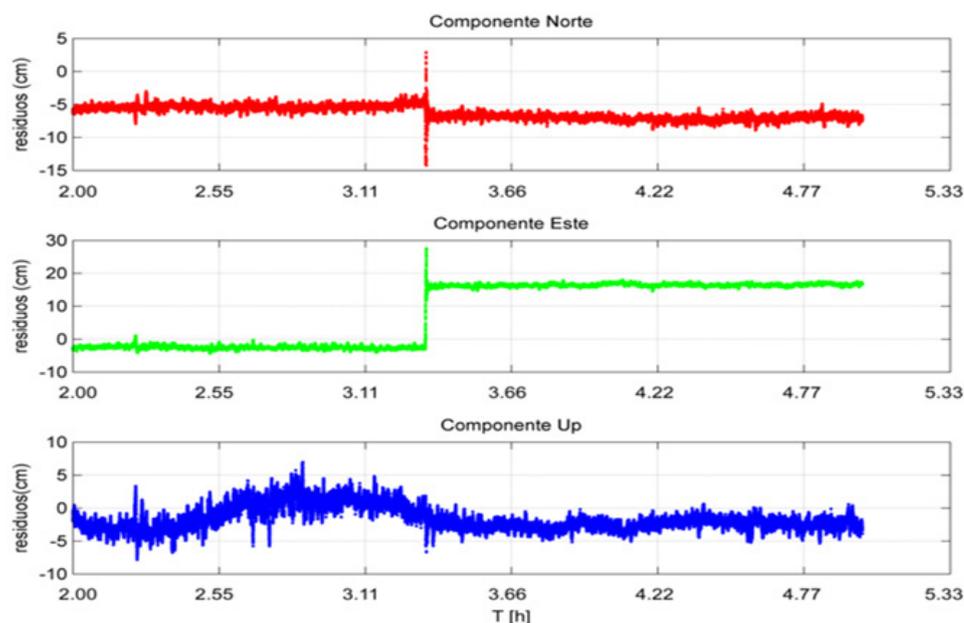


Figura 6: Series temporal estación P580 ubicada a 45 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC).

**Estimación rápida de desplazamientos resultantes (DR) mediante algoritmo desarrollado**

Una vez obtenidas las series temporales de coordenadas de cada una de las estaciones analizadas y sus correspondientes variaciones, se obtuvieron los desplazamientos resultantes con el algoritmo de cálculo mencionado (Tabla 3).

Tabla 3: Desplazamientos Resultantes Terremoto California [cm] 06/07/2019 03:19:53 utc (intervalo considerado: 2 minutos previos y posteriores al mayor desplazamiento registrado en cada estación GNSS).

Estación	N	E	Up
P463	-2.352	1.573	0.919
P570	0.037	-3.278	-0.595
P580	-1.801	16.378	-1.642
P595	-23.871	45.772	2.602
CCCC	18.927	-4.604	0.745

Cabe destacar que los DR pueden ser estimados muy rápidamente. Una vez obtenidas las series de tiempo de coordenadas PPP, la ejecución del algoritmo es inmediata. Si las estaciones GNSS transmiten sus datos a tiempo real, se puede calcular la serie PPP también a tiempo real y se podrían estimar los DR en forma casi inmediata (en este caso con 2 minutos de latencia).

**Comparación de los DR con respecto a los de UNAVCO**

En la Figura 7, se aprecian las diferencias de coordenadas, para cada estación. Donde la primera barra corresponde a los desplazamientos resultantes estimados por la estrategia desarrollada y la segunda es la calculada con las coordenadas publicadas en UNAVCO. Se observa una buena correspondencia entre ambas series. Los puntos P595, P580 y P463 (puntos localizados al este de la zona de falla) sufren un desplazamiento al sur y al este, disminuyendo con la distancia al epicentro. En los puntos CCCC y P575 que están al oeste de la zona de falla, se observa un desplazamiento al norte y al oeste.

De la validación con respecto a las coordenadas estimadas por el servicio UNAVCO, se obtuvo una diferencia promedio de -1.079 cm.



Figura 7: Validación DR con respecto a las series UNAVCO.

**Desplazamientos estimados mediante DinSAR**

Los interferogramas calculados se observan en la Figura 8, estos permiten visualizar desplazamiento de toda el área de estudio, en comparación con GNSS que sólo permite establecer la deformación puntualmente.

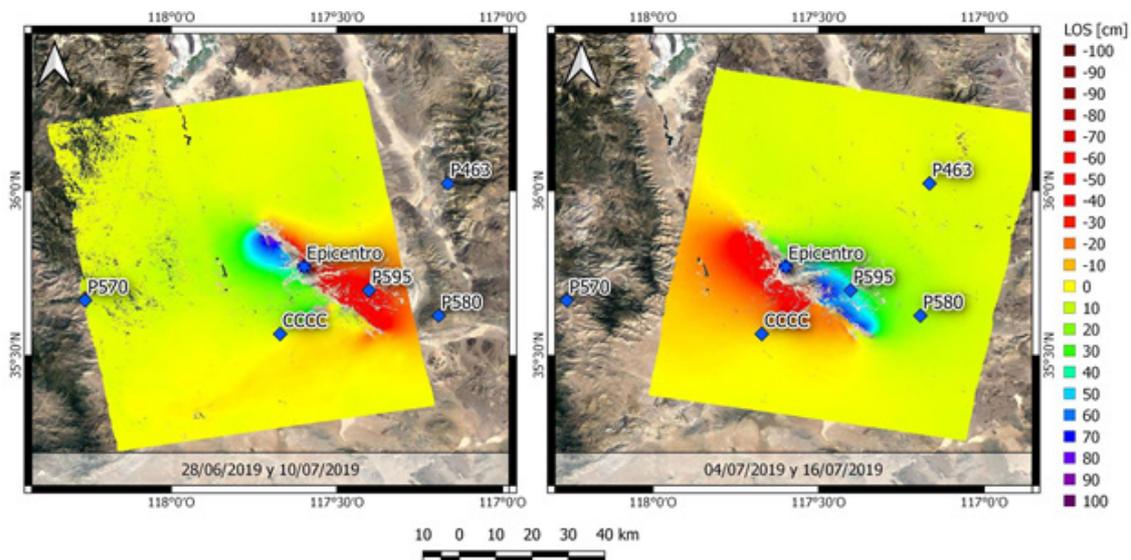


Figura 8: Desplazamientos en LOS. Izquierda: órbita ascendente. Derecha: órbita descendente.

Como las deformaciones se muestran a lo largo de ambos ángulos de visión del satélite, éstas se combinaron para calcular los desplazamientos en la dirección este-oeste y en altura (Tabla 4).

Dichas deformaciones, fueron comparadas con la variación de coordenadas calculadas por UNAVCO, considerando la diferencia de coordenadas diarias, correspondiente a la fecha de la primera y última imagen DinSAR (Tabla 2).

**Tabla 4:** Desplazamientos en componentes Este y Up estimados por DinSAR y comparados con UNAVCO. Unidades expresadas en centímetros (intervalo considerado: 28/06/2019 - 16/07/2019).

Estación	E (DinSAR)	E(UNAVCO)	Up (DinSAR)	Up (UNAVCO)
CCCC	-8.663	-8.380	-0.971	1.559
P595	64.434	62.839	7.928	5.940

Los resultados encontrados muestran una correspondencia en los desplazamientos estimados por ambas técnicas, teniendo en cuenta las precisiones que se pueden alcanzar con cada una de ellas. La precisión de DinSAR es subcentimétrica, pero debido a errores atmosféricos, ionosféricos y/u orbitales, puede alcanzar varios centímetros [Zebker *et al.*, 1997]. En la componente este se observó una diferencia promedio de 0.656 cm, mientras que en la componente altura, las diferencias fueron mayores (cercanas a 2 cm en valor absoluto).

Cabe mencionar que los desplazamientos estimados por DinSAR consideran un período de 18 días, durante los cuales se produjeron dos sismos de importante magnitud, uno el día 4 de julio de 6.4 Mw y el sismo seleccionado en este trabajo para evaluar la metodología de estimación rápida de desplazamientos (6/07/2019). Por tal motivo, los desplazamientos expuestos en la Tabla 3, difieren de los estimados con DinSAR (Tabla 4), por tratarse de intervalos diferentes y habiendo ocurrido varios eventos sísmicos en el período considerado por las imágenes del radar.

**Discusión y Conclusiones**

Concluimos que las observaciones GNSS de alta frecuencia analizadas con la estrategia propuesta proporcionan una evaluación rápida y eficiente de los desplazamientos co-sísmicos. La comparación con respecto a las series UNAVCO resultó muy satisfactoria y acorde a lo obtenido en [Melgar *et al.*, 2019].

Cabe aclarar que en Argentina, no se dispone de un servicio de cálculo de coordenadas diarias para las estaciones GNSS, con lo cual, una estimación rápida de los desplazamientos co-sísmicos podría contribuir al conocimiento de la dinámica local, en caso de ocurrencia de sismos. Pudiendo brindar un aporte significativo mediante la cuantificación de los desplazamientos en las zonas de influencia, en pocos minutos, donde se encuentre operando una estación GNSS. Se estima que se puede lograr el cálculo de desplazamientos con una latencia cercana a 2 minutos, con lo cual se podría contribuir con los sistemas de alertas tempranas de terremotos y tsunamis, siempre que se optimice el tiempo de procesamiento PPP necesario para conocer el movimiento instantáneo de cada coordenada.

La comparación de los desplazamientos resultantes con la técnica DinSAR y con GNSS (diferencia promedio 0.193 cm) también fue alentadora, considerando la precisión citada. Si bien los resultados obtenidos con la técnica DinSAR se corresponden con GNSS, el uso de un único par de imágenes puede no ser adecuado para determinar la magnitud de la deformación. Por ello, el uso de series de tiempo de imágenes SAR resulta más conveniente, no sólo para disminuir errores sino también para analizar la dinámica de la deformación y su comportamiento en un periodo de tiempo más amplio.

Se resalta la complementariedad de las técnicas utilizadas. Las observaciones de GNSS en alta frecuencia, aplicando una estrategia de procesamiento adecuada, brindan información de los desplazamientos puntualmente y de manera muy precisa. Por otro lado, DinSAR ofrece un mapa de deformaciones para toda la región cubierta por el par de imágenes, siempre y cuando se disponga de un registro anterior y otro posterior al evento monitoreado.

**Bibliografía**

- Allen, R. M. y A. Ziv (2011). Aplicación de GPS en tiempo real a la alerta temprana de terremotos, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L16310, doi: 10.1029 / 2011GL047947.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avouac, J. P., Remy, D., Nocquet, J. M., Rolandone, F., Bondoux, F., Gabalda, G., & Bonvalot, S. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(12). <https://doi.org/10.1029/2010JB008166>.
- Emore G, Haase J, Choi K, Larson KM, Yamagiwa A (2007). Recovering absolute seismic displacements through combined use of 1-Hz GPS and strong motion accelerometers. *Bull Seism Soc Am* 97(2):357-378. doi:10.1785/0120060153
- Floyd, M., G. Funning, Y. Fialko, R. Terry, and T. Herring (2020). Survey and Continuous GNSS in the Vicinity of the July 2019 Ridgecrest Earthquakes, *Seismol. Res. Lett.* XX, 1-8, doi: 10.1785/0220190324.
- Geng, J., Y. Bock, D. Melgar, B. W. Crowell, and J. S. Haase (2013), A new seismogeodetic approach applied to GPS and accelerometer observations of the 2012 Brawley seismic swarm: Implications for earthquake early warning, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 2124-2142, doi:10.1002/ggge.20144.
- Geng, T., X. Xie, R. Fang, X. Su, Q. Zhao, G. Liu, H. Li, C. Shi, and J. Liu (2016). Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015 Mw7.8 Nepal earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 161-167, doi:10.1002/2015GL067044.
- Hanssen, R. F. (2002). *Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis*.
- Herring, T. A., T. I. Melbourne, M. H. Murray, M. A. Floyd, W. M. Szeliga, R. W. King, D. A. Phillips, C. M. Puskas, M. Santillan, and L. Wang (2016). Plate Boundary Observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products, *Rev. Geophys.*, 54, doi:10.1002/2016RG000529
- Hodgkinson, K. M., D. J. Mencia, K. Feaux, C. Sievers, and G. S. Mattioli (2020). Evaluation of Earthquake Magnitude Estimation and Event Detection Thresholds for Real-Time GNSS Networks: Examples from Recent Events Captured by the Network of the Americas, *Seismol. Res. Lett.* XX, 1-18, doi: 10.1785/0220190269.
- Hohensinn, R.; Geiger, A (2018). Stand-Alone GNSS Sensors as Velocity Seismometers: Real-Time Monitoring and Earthquake Detection. *Sensors* 2018, 18, 3712
- Hu, J., Li, Z. W., Ding, X. L., Zhu, J. J., Zhang, L., & Sun, Q. (2014). Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*, 133, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.02.005>
- Kouba, J. (2003). Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS, *Stud. Geophys. Geod.*, 47(4), 741-755.
- Larson, K. M., P. Bodin, and J. Gombert (2003). Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake, *Science*, 300(5624), 1421-1424
- Larson K. (2009). GPS Seismology, *J. Geod.*, 83, 227-233, doi:10.1007/s00190-008-0233-x.
- Lau, N., Tymofeyeva, E., & Fialko, Y. (2018). Variations in the long-term uplift rate due to the Altiplano-Puna magma body observed with Sentinel-1 interferometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 491(June), 43-47. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.03.026>
- Mateo M.L. (2011). *Determinación precisa de velocidades en las estaciones GNSS de medición continua de América Latina (red SIRGAS)*. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina
- Mastro, P., Serio, C., Masiello, G., & Pepe, A. (2020). The Multiple Aperture SAR Interferometry (MAI) Technique for the Detection of Large Ground Displacement Dynamics: An Overview. *Remote Sensing*, 12(7), 1189. <https://doi.org/10.3390/rs12071189>
- Melgar, D., B. W. Crowell, J. Geng, R. M. Allen, Y. Bock, S. Riquelme, E. M. Hill, M. Protti, and A. Ganas (2015). Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 5197-5205, doi:10.1002/2015GL064278.
- Melgar, D., T. I. Melbourne, B. W. Crowell, J. Geng, W. Szeliga, C. Scrivner, M. Santillan, and D. E. Goldberg (2019). Real-Time HighRate GNSS Displacements: Performance Demonstration during the 2019 Ridgecrest, California, Earthquakes, *Seismol. Res. Lett.* XX, 1-9, doi: 10.1785/0220190223
- Pawluszek-Filipiak, K., & Borkowski, A. (2020). Integration of DInSAR and SBAS techniques to determine mining-related deformations using Sentinel-1 data: The case study of rydułtowy mine in Poland. *Remote Sensing*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/rs12020242>
- Pepe, A., Bonano, M., Zhao, Q., Yang, T., & Wang, H. (2016). The use of C-/X-band time-gapped SAR data and geotechnical models for the study of Shanghai's ocean-reclaimed lands through the SBAS-DInSAR technique. *Remote Sensing*, 8(11), 1-18. <https://doi.org/10.3390/rs8110911>
- Rongier, G., Rude, C., Herring, T., & Pankratius, V. (2019). Generative Modeling of InSAR Interferograms. *Earth and Space Science*, 6(12), 2671-2683. <https://doi.org/10.1029/2018EA000533>
- Schmidt, D. A., & Bürgmann, R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B9), 1-13. <https://doi.org/10.1029/2002jb002267>

- Yu, C., Penna, N. T., & Li, Z. (2017). Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations. *Journal of Geophysical Research*, 122(3), 2008-2025. <https://doi.org/10.1002/2016JD025753>
- Yu, C., Li, Z., Penna, N., & Crippa, P. (2018). Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS). *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 20(August 2017), 11007.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., & Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research*, 102(B4), 7547-7563. <https://doi.org/10.1029/96JB03804>
- Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, 102(B3), 5005-5017, doi:10.1029/96JB03860