



Aplicación de GPS diferencial para el monitoreo de movimientos en el terreno

Differential GPS Application for the Monitoring of Movements of the Ground

*Simon Carranco¹ José Tuxpan² Jose Ramos³ Vsevolod Yutsis⁴ Sonia Torres⁵ Janete Moran⁶
Juan Carranco⁷ Oscar Almanza⁸ y Briseida López⁹*

Para citar este artículo: Carranco, S., Tuxpan, J., Ramos, J., Yutsis, V., Moran, J., Carranco, J., Almanza, O. y López, B. (2016). Aplicación de GPS diferencial para el monitoreo de movimientos en el terreno. *UD y la Geomática*, 11, 60-65.

Fecha de recepción: 17 de mayo de 2016

Fecha de aceptación: 02 de diciembre de 2016

RESUMEN

En los últimos años, el desarrollo de los global Navigation Satellite System (GNSS, por sus siglas en inglés) trae beneficios a los nuevos métodos de levantamiento con Global Positioning System (GPS, por sus siglas en inglés), se han desarrollado rápidamente y cuentan con nuevas técnicas de medición (estático, estático rápido, real time kinematic), mayor productividad, menor tiempo de medición y calidad en cuanto a precisión. Además, se puede trabajar bajo condiciones meteorológicas difíciles y no es necesario tener una línea de visión directa hacia el otro equipo GPS (estación base o móvil). El principal objetivo de este trabajo es evidenciar la deformación del terreno de los movimientos de fallas laterales que son casi imperceptibles pero que se pueden cuantificar de una manera eficaz mediante un monitoreo aplicando tecnología de GPS diferencial; el escrito presenta los resultados de la variación espacial y la tendencia de dirección en veinticuatro vértices GPS que cubren aproximadamente un área de 24km² sobre la zona de esfuerzos en la ciudad de Celaya, Guanajuato, los vértices se encuentran distribuidos dentro y fuera de la zona de falla, los resultados de los tres monitoreos nos permiten determinar una aproximación de la tasa anual de variación por zonas en el área de estudio.

Palabras clave: análisis vectorial, fallas activas, fallas laterales, GPS diferencial, monitoreo.

ABSTRACT

In recent years, the development of the Global Navigation Satellite System (GNSS) has brought benefits to new methods of surveying with Global Positioning System (GPS), they have developed rapidly and have new measurement techniques (static, rapid static, real- Time Kinematic), increased productivity, reduced time measurement and quality for accuracy. Also, you can work under difficult weather conditions and need not have a direct line of sight to the other GPS (base station or mobile) equipment. The main objective of this work is to make evident the ground deformation of the lateral movements that are almost imperceptible flaws but that can be quantified in a reliable manner by monitoring using differential GPS technology. In the paper are showed the results of the spatial variation and trend direction to 24 GPS vertices covering an area of approximately 24km² on stresses in the city of Celaya Guanajuato, the vertices are distributed inside and outside the fault zone, the results of

- 1 Instituto Potosino de Investigación Científica. Correo electrónico: simon.carranco@ipicyt.edu.mx
- 2 Instituto Potosino de Investigación Científica. Correo electrónico: jose.tuxpan@ipicyt.edu.mx
- 3 Instituto Potosino de Investigación Científica. Correo electrónico: jalfredo@ipicyt.edu.mx
- 4 Instituto Potosino de Investigación Científica. Correo electrónico: vsevolod.yutsis@ipicyt.edu.mx
- 5 Instituto Potosino de Investigación Científica. Correo electrónico: sonia.torres@ipicyt.edu.mx
- 6 Instituto Potosino de Investigación Científica. Correo electrónico: janete.moran@ipicyt.edu.mx
- 7 Instituto Politécnico Nacional, CECyT 17. Correo electrónico: jcarranco@ipn.mx
- 8 Instituto Potosino de Investigación Científica. Correo electrónico: oscar.almanza@ipicyt.edu.mx
- 9 COLSAN, México. Correo electrónico: blopez@colsan.edu.mx

three monitoring allow us to determine an approximation of the annual rate of change by areas in the study area.

Key words: Vector analysis, active faults, lateral faults, differential GPS, monitoring

Introducción

En las últimas décadas, la deformación del terreno ha tenido un mayor interés debido al impacto económico y social que ha ocasionado en zonas urbanas (López-Quiroz, *et al.*, 2009; Wei-Chia, *et al.*, 2010; Pacheco-Martínez, *et al.*, 2010; Julio-Miranda, *et al.*, 2012; Liu, *et al.*, 2015; Li, *et al.*, 2015), los efectos en el terreno se presentan de varias formas (agrietamiento, subsidencia, fallas normales, fallas laterales, deslizamiento de laderas, abultamiento del terreno, etc.) y cada uno de los fenómenos naturales afecta a la deformación de diferente manera. Las obras civiles (calles, viaductos, puentes, edificios, etc.) son sitios en donde se evidencia la deformación del terreno; desde su inicio, los Global Positioning System (GPS, por sus siglas en inglés) han tenido innumerables aplicaciones, esta metodología se basa en la trilateración con los satélites que orbitan a la tierra, lo cual permite una mayor precisión en las mediciones. Los trabajos de monitoreo con GPS han demostrado un gran potencial en los estudios relacionados

a la percepción de cambios espaciales en problemas de fallamiento y subsidencia.

Existen muchas metodologías para estudiar la deformación del terreno, tal es el caso de la subsidencia con Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR, por sus siglas en inglés); sin embargo, los movimientos horizontales no son detectados con esta metodología, en tanto que el GPS puede ser una herramienta con potencial para detectar también los movimientos horizontales sobre el terreno.

En este trabajo se tiene como principal objetivo cuantificar los movimientos horizontales y verticales del terreno, así como su razón de cambio en una zona con fallamiento activo utilizando GPS.

El área de estudio se ubica dentro del estado de Guanajuato (Figura 1), el municipio de Celaya, colinda al norte con los poblados de Comonfort, al este con los Apaseos y Queretaro, al sur con Salvatierra y al oeste Cortázar y Villagrán, cubriendo un área de aproximadamente 121.91 km² y el área de monitoreo de la zona de esfuerzos tiene una extensión de 24 km².

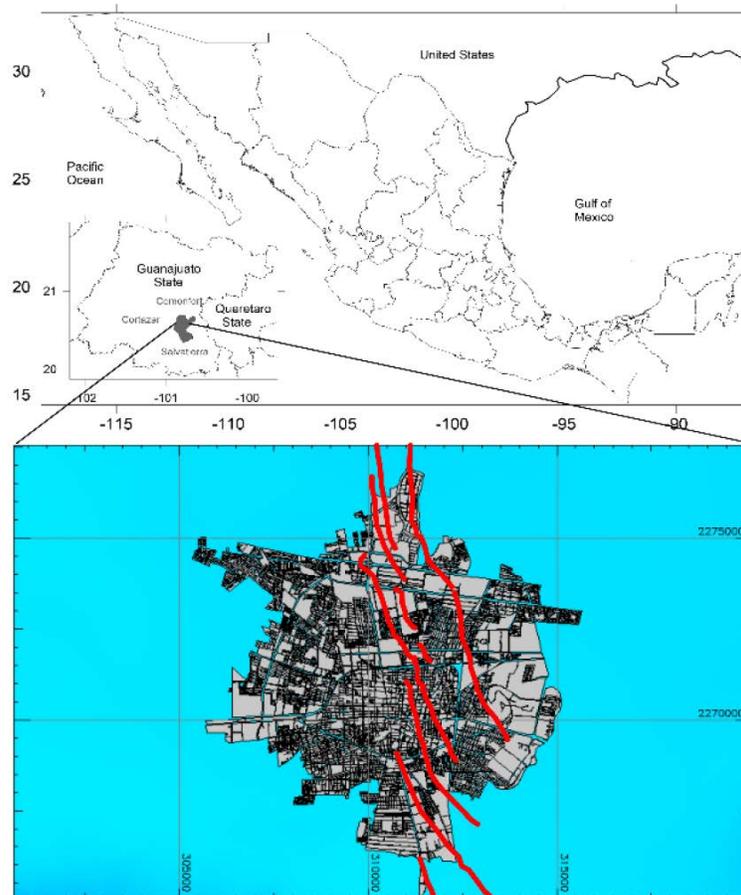


Figura. 1 La imagen muestra la ubicación del área de estudio y la distribución de las fallas geológicas en color rojo

Metodología

Equipo y procesamiento de datos

Los datos de GPS presentados en este estudio fueron adquiridos con un GPS Trimble R4, este cuenta con dos antenas, una para levantamientos estáticos (el equipo contiene un receptor adicional para operar como una estación base y un transmisor de radio) y otra para levantamientos móviles; el R4 facilita y agiliza el trabajo realizando en paralelo el levantamiento estático (GPS base) y cinemático con un GPS móvil en modo real time kinematic (RTK) para medir la red de monitoreo.

La configuración de la estación base fue de una medición cada cinco segundos y la antena móvil era el mismo intervalo, el propósito de esta configuración es sincronizar nuestros GPS con estaciones GPS de INEGI y, posteriormente, realizar el procesamiento de datos de la estación base. La información adquirida con GPS contiene datos en los tres ejes (X, Y, y Z).

Distancia euclidiana

$$distance = \sqrt{(lat2 - lat1)^2 + (lon2 - lon1)^2} \quad (1)$$

Supuesto: se toma a la tierra como plana.

$$d = R * 2 \arcsin * \left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{dlat}{2}\right) + \cos(lat1) * \cos(lat2) * \sin^2\left(\frac{dlon}{2}\right)} \right) \quad (2)$$

Donde:

D= distancia

R= radio de la tierra

$$dlat = lat2 - lat1$$

$$dlon = lon2 - lon1$$

lat1, lat2, lon1, lon2 están en radianes.

Supuesto: la tierra es esférica, pero incluye una corrección para aplanar el algoritmo de Vincenty (1975),

El algoritmo de Vincenty es la fórmula más precisa para calcular la distancia entre dos coordenadas geográficas. Basado en evidencias empíricas, se ha demostrado una precisión de 0,5 mm; sin embargo, el algoritmo de Vincenty es un algoritmo iterativo, por tanto, en comparación con cualquier fórmula anterior se tarda más tiempo.

Supuesto: la Tierra es elipsoidal.

En este trabajo se calcula la distancia euclidiana del deslizamiento de tierra debido a que la distancia entre los puntos es relativamente pequeña y el área de interés puede considerar un plano. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 2 y 3.

Una característica de especial interés para nuestro estudio y la comprensión del fenómeno es la dirección de deslizamiento de tierra, nos basamos en el gradiente de operador (3) para calcular el campo de direcciones.

El gradiente de una función de dos variables, F (lat, lon), se define como:

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial lat} \hat{i} + \frac{\partial F}{\partial lon} \hat{j} \quad (3)$$

Puede ser considerado como un conjunto de vectores que apuntan en la dirección de aumento de los valores de F.

El gráfico obtenido por el operador gradiente, se muestra en la Figura 4

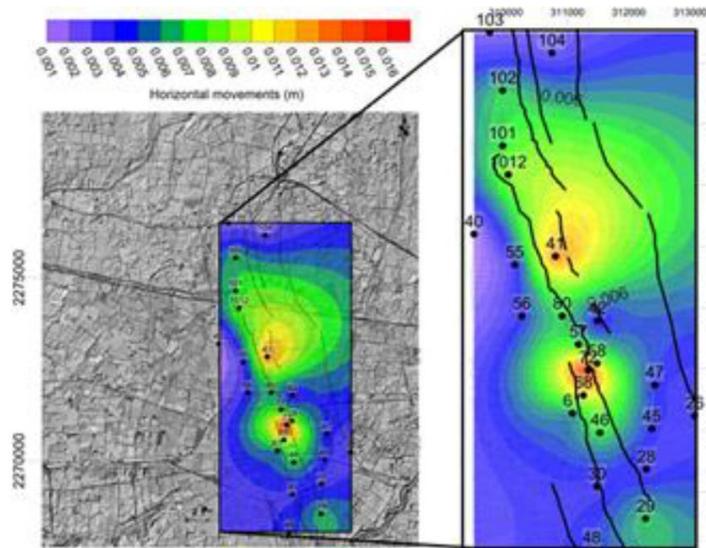


Figura 2. Se muestra la distribución espacial de los desplazamientos horizontales en la zona de esfuerzos

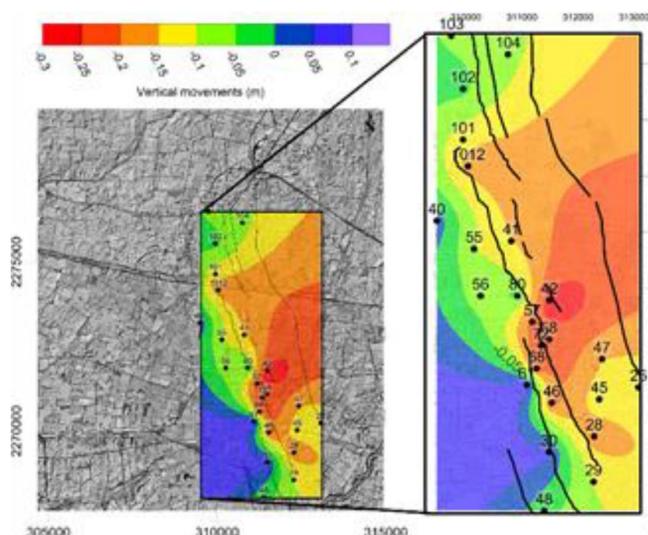


Figura. 3 La imagen muestra las zonas con mayores hundimientos en colores de azul al purpura

Monitoreo de datos con GPS diferencial

El análisis se realiza a partir de la base de datos de vértices GPS de la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya (Jumapa) y el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT); la primera medición fue en 2001, este levantamiento se llevó a cabo bajo el marco de referencia terrestre internacional (ITRF

92, por sus siglas en inglés), época 1988. La segunda medición se llevó a cabo en 2012 en virtud de la época 2010.0 ITRF 2008. La última encuesta de monitoreo vértices GPS se llevó a cabo en 2015 bajo el mismo marco ITRF 2008 época 2010.0.

La topografía con GPS y procesamiento de los datos adquiridos depende de los modelos y especificaciones de las normas internacionales para la exactitud posicional (Altamimi,

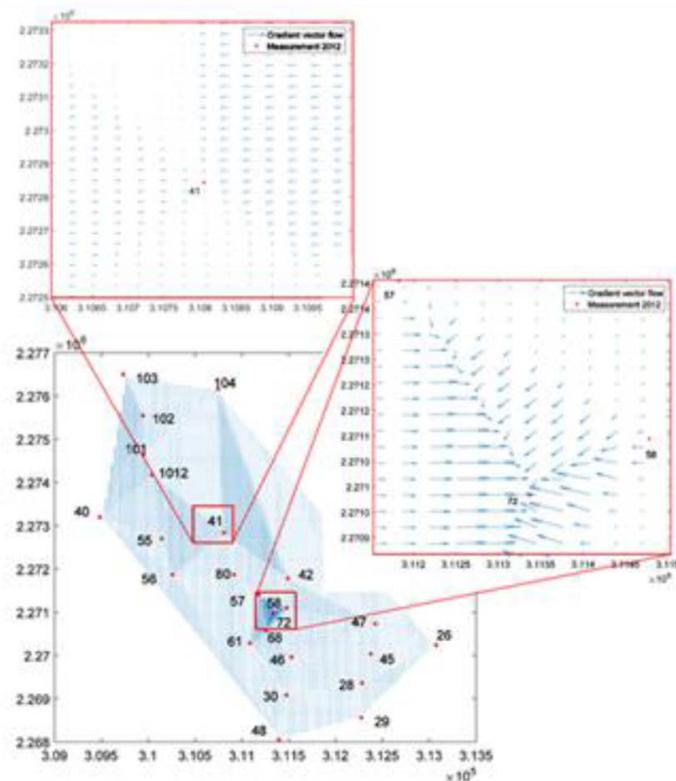


Figura 4. La imagen muestra la tendencia de movimiento en los tres ejes las ventanas muestras un zoom de las zonas de compresión

et al., 2007; Doberstein, 2012), de acuerdo con lo anterior, en México se publicó en 2010 la norma técnica de las normas internacionales de exactitud posicional, menciona en los artículos 1 y 5 que cualquier levantamiento GPS que se realice debe ajustarse a las normas y marco de referencia vigente; bajo el contexto convencional que tenemos de la tierra como un ente en movimiento, y para datos tomados con el marco de referencia ITRF 92 época 1988, se realiza el ajuste de estos datos al marco vigente. Teniendo en cuenta las consideraciones legales se hizo la medición estándar de veinticuatro vértices GPS distribuidos en la zona de falla.

El último monitoreo en 2015, se llevó a cabo con el método estático y el método RTK, el método estático se incluye en los métodos de levantamiento con sistema global de navegación por satélite (GNSS), el posprocesamiento y corrección de mediciones GPS son reportados por diversos autores (Leick, 1995; Josep, et al. 2000; Hofmann-Wellenhof, et al. 2001; Doberstein, 2012). El levantamiento estático fue elegido estratégicamente un vértice GPS cercano a la zona de interés (punto 61), el vértice se midió durante aproximadamente seis horas continuas para obtener una mejor triangulación con los satélites que orbitan de manera que puedan leer la trayectoria observable del ciclo. Si es posible, se recomienda que el levantamiento se ejecute de forma continua durante las veinticuatro horas del día para obtener una mejor triangulación.

En el levantamiento RTK se toma como base el vértice que se está midiendo con el método estático, desde la base en coordenadas arbitrarias se propaga la señal de radio para obtener coordenadas en tiempo real en el móvil; con la modalidad RTK se miden los veintitrés vértices restantes, cada vértice se deja midiendo tres minutos para tener una mejor precisión y eliminar los errores por pérdida de señal e inicialización del GPS.

El vértice levantado con la antena R4 base con método estático requiere un posproceso que se lleva a cabo en la oficina, los vértices levantados con RTK no necesitan posproceso, basta con corregir el punto base para que estos se reajusten, este último proceso se puede realizar en el software trimble business data versión 2.70.

Resultados

Utilizando la diferencia entre los datos del monitoreo con GPS del 2012 y del 2015, puede observarse el movimiento vertical y horizontal de los puntos de monitoreo en la zona urbana de Celaya (Figura 2); en esta distribución de desplazamientos horizontales y verticales se puede observar las zonas con mayor movimiento y la razón de cambio en estos sitios.

Para obtener el cambio de posición espacial del mismo punto en el tiempo, se aplicó la relación de distancia entre dos puntos en sus dos ejes, para evitar obtener el valor absoluto de las diferencias de dos puntos ubicados en su mismo eje.

Variaciones horizontales

Las fallas y hundimientos del Valle de Celaya se han estudiado durante muchos años y siempre han sido asociados con la subsidencia que es la extracción de agua; sin embargo, pocos investigadores han detectado el movimiento horizontal en las fallas.

Con la metodología GPS puede mostrar la magnitud y el desplazamiento del suelo.

Desde un punto de vista estructural en el área de estudio se pueden agrupar tres zonas (Figura 4).

En primer lugar, la zona semiestable; esta zona no muestra cambios significativos y se presenta en la figura con color lila (violeta), en escala al turquesa, el desplazamiento en tres años transcurridos entre la segunda y la tercera medición da un promedio de 0,003 mm y una tasa de variación de 1 mm / año.

Por otro lado, la zona central de empujes situada en la parte central de la zona de esfuerzos se muestra en la figura de colores del naranja al rojo y tiene un movimiento promedio de 1,35 cm en tres años, la tasa de variación es 4,5 mm/año.

Por último, la zona de distensión, que es el área que rodea a la zona de los esfuerzos centrales, se presenta con la gama de colores de verde a amarillo en la Figura 4, la media de los tres años transcurridos es de 8 mm y la tasa de variación anual es 2 mm/año.

Variaciones vertical

El desplazamiento vertical ha sido previamente reportado en muchos estudios, la Figura 3 muestra los desplazamientos de la componente vertical en la zona afectada por las fallas. Los resultados absolutos de la componente vertical se cuantifican mediante el cálculo de la diferencia entre la lectura 2015 GPS menos 2012 (Figura 3), las diferencias con signo negativo indican que la magnitud es en profundidad o se hunde en estas áreas.

El área con una variación vertical menor se produce al norte y al sur de la ciudad, estos sitios están relacionados con el lento crecimiento de la expansión urbana; no hay asentamientos generalizados de las casas y en los tres años que han transcurrido es inferior a 4 cm y la velocidad de deformación de 1,3 cm / año.

En la Figura 3, con los colores de naranja a rojo, se encuentra la zona donde se produce un mayor desplazamiento y coincide con la zona de los esfuerzos de compresión; es aquí donde la media de tres años es de 25 cm y con una tasa de variación de 8 cm / año. Esta área es la más profunda reportada y medida en este estudio y coincide con la alineación de un pequeño graben que está situado en el centro de la zona de tensiones.

Tendencias y vectores de flujo

La zona de convergencia en el punto 41, en la Figura 4, muestra el área con vectores hacia el este, oeste y norte en menor medida; en este punto se midió una variación horizontal de 1,3 cm en un período de tres años (4,3 mm/año). La zona de convergencia en el punto 72, en la Figura 4, muestra el área con vectores en tres direcciones, dirección de la fuerza de empuje suroeste (SW), noroeste (NW) y el más alto en magnitud mostrado hacia el este.

En este punto se midió una variación horizontal de 1,6 cm en el período de tres años (5,3 mm/año).

Conclusiones

Se puede concluir que con los levantamientos con GPS se obtiene una buena precisión, también concluimos que la calidad de la medición aumenta realizando levantamiento estático de seis horas de lectura continua durante tres días, así se eliminan el error por falta de triangulación en los satélites que orbitan.

El tiempo óptimo para las mediciones de los vértices medidos con RTK fue de tres minutos y se eliminó con esto los errores por inicialización del equipo y pérdida de señal.

Los movimientos horizontales en el Valle de Celaya con periodo de tres años oscilan de 1 mm a 16mm y un promedio de 8.5 mm, y su tasa de variación para el área de estudios es de 3 mm/año. Dentro de la zona de falla el promedio es de 1.3 cm en los tres años.

Los movimientos verticales en el Valle de Celaya con periodo de tres años oscilan de 0.08 cm a 28 cm y un promedio de 18 cm y su tasa de variación para el área de estudios es de 6 mm/año. Dentro de la zona de falla el promedio es de 8 cm en los tres años.

Realizando un análisis más afondo sobre los datos obtenidos del levantamiento y la tendencia con vectores de flujo se llega a las siguientes conclusiones: se identifican dos zonas de convergencia, las zonas de convergencia son el punto 72 y el punto 41; estos puntos pertenecen a una noncoaxial strain, con el análisis de dirección de los vectores demostramos que los movimientos en la horizontal y vertical pertenecen a esfuerzos de cizalla.

El general el uso de GPS diferencial ha demostrado ser una excelente herramienta para el monitoreo de movimientos sobre la superficie del terreno, este equipo en comparación sobre las técnicas tradicionales de medición aporta nuevas ventajas, una de las ventajas más relevantes es que pudieron cuantificar los movimientos horizontales que antes no habían sido reportados.

Referencias

- Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., and Boucher C. (2007). A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *J. Geophys. Res.*, 112, B09401.
- Doberstein D. (2012). *Fundamentals of GPS Receivers. A Hardware Approach.* Springer.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (2001). *Global Positioning System. Theory and Practice.* New York: Springer, Wien.
- Julio-Miranda P., Ortiz-Rodríguez A.J., Palacio-Aponte A.G., López Doncel R., Barbosa-Gudiño R. (2012). Damage Assessment Associated with Land Subsidence in the San Luis Potosi-Soledad de Graciano Sánchez Metropolitan Area, Mexico, elements for risk. *Natural Hazards*, 64(1), 751-765.
- Josep A. G., Jordi C., Joan R. (2000). Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55(3), pp 167-192.
- Leick A. (1995). *GPS Satellite Surveying.* New York: Wiley.
- Li Y., Qu C., Shan X., Song Xi., Zhang G., Gan W. and Wang-Zh Sh. (2015). Deformation of the Haiyuan-Liupanshan fault zone inferred from the denser GPS observations. *Earthquake Science*, 28(5), 319-331.
- Liu S., Wang H., Huang J., Wu L. (2015). High-resolution remote sensing image-based extensive deformation-induced landslide displacement field monitoring method. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2(3), 170-177.
- López-Quiroz P., Marie-Pierre D., Tupin F., Briole P., Jean-Marie N. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 69, Pages 1–15.
- Pacheco-Martínez J., Arzate-Flores J. A., López-Doncel R., Barboza-Gudiño R., Mata-Pérez-Venzor J. A., Aranda-Gómez J. J., McDowell F., Solorio-Munguía J. G. (1996). "Geología del Volcán Palo Huérfano", Guanajuato, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Vol. 13, num 2, pp 174-183.
- Vincenty, T. (April 1975). Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations. *Survey Review*, 22-23(176), 88–93. doi:10.1179/sre.1975.23.176.88. Retrieved 2009-07-11
- Wei-Chia Hung, Cheinway Hwang, Chung-Pai Chang, Jiun-Yee Yen, Chih-Hsi Liu, Wan-Huei Yang, (2010) Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui River Alluvial Fan. *Environ Earth Sci*, 59, 1535-1548.

