

ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE ESTRUCTURAS DINÁMICAS MEDIANTE EL USO DE GPS

Juan G. Serpas, Manuel Ramírez y Ricardo Colomer

Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia
Universidad Nacional

Email: jserras@una.ac.cr; mramire@una.ac.cr; rcolomer@una.ac.cr

RESUMEN

En la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia de la Universidad Nacional, se realizó una investigación sobre el uso del Sistema de Posicionamiento Global por Satélite (GPS) para la determinación del movimiento dinámico sobre estructuras civiles. Estas estructuras son diseñadas de forma que tengan un cierto grado de elasticidad, lo que permite un permanente movimiento, evitando así la fractura de la estructura misma. La actividad de investigación tuvo como fin el desarrollo y análisis de procedimientos y metodologías para determinar en una forma eficiente, económica y sencilla el movimiento de las estructuras, tanto en períodos cortos como largos. En el estudio se aplicaron técnicas espectrales para el análisis de los datos brindados por receptores GPS colocados sobre el puente del Río Tempisque, Costa Rica. El objetivo de dicho análisis es la determinación de la magnitud del movimiento sufrido por ese puente en períodos cortos y largos.

PALABRAS CLAVES: análisis de deformación, GPS, estructuras dinámicas, análisis espectral, puente Río Tempisque, espectro de Fourier.

ABSTRACT

The School of Topography, Cadastre and Geodesy of the Universidad Nacional, researched the use of the global positioning system (GPS) for the determination of movements on civil structures. These structures are designed in such a way to have a degree of elasticity to avoid possible

fractures. The research activity was aimed at the development and analysis of procedures and methodologies to determine in an efficient, simple, and economic way the determination of the movement of civil structures in different periods. Spectral techniques were applied to the data provided by a GPS receiver placed on the Tempisque river bridge. The magnitude of the movements of the bridge are investigated for long and short periods.

KEYWORDS: deformation analysis, GPS, dynamic structures, spectral analysis, Tempisque river bridge, Fourier spectrum.

INTRODUCCIÓN

El objetivo del estudio geodésico de desplazamientos es la determinación de los cambios en posición y forma con respecto al tiempo de estructuras hechas por el hombre como puentes, edificios, represas, etc., o áreas de la superficie terrestre como, por ejemplo, conos volcánicos, fallas geológicas, etc. El interés de monitorear dichas estructuras o áreas es prevenir o anticipar posibles daños de las estructuras debido a desastres naturales como deslizamientos o erupciones volcánicas. El estudio del movimiento es en general realizado a partir del análisis estadístico de las diferencias entre las coordenadas de los puntos de control en diferentes épocas de medición.

Las metodologías convencionales de medición, por ejemplo, distancias, ángulos, diferencias de alturas, etc., se establecen a partir de estaciones

de referencia en áreas consideradas estables cercanas al objeto de desplazamiento. Estas mediciones tienen que ser procesadas para eliminar errores groseros y deben ser reducidas para ser posteriormente usadas en los modelos particulares de ajuste para la determinación de los desplazamientos. Por otro lado, el uso de GPS, el cual proporciona posicionamiento tridimensional con alta exactitud, posee ventajas sobre los métodos convencionales, como la flexibilidad en la localización de las estaciones de monitoreo —no se necesita visual entre los puntos de observación—, se puede medir en cualquier condición climática, y el procesamiento y la colección de la información pueden ser automatizados, con la consecuente minimización de recursos humanos y financieros.

Además, los métodos convencionales no permiten la recolección continua de los datos necesarios para el análisis del movimiento de estructuras dinámicas con características elásticas. La frecuencia del desplazamiento de dichas estructuras requiere de metodologías especiales de análisis y medición, como por ejemplo, la incorporación de métodos espectrales para el análisis de la señal obtenida a partir de las mediciones en modo cinemático.

OBJETO DE ESTUDIO

El presente estudio se centra en el análisis de los desplazamientos del Puente de La Amistad sobre el Río Tempisque. Se escogió este puente por su ubicación en una zona de riesgo sísmico y por sus características físicas. El puente tiene una longitud de 780 m, está formado por dos bloques diferentes con la parte oeste y es de tipo colgante (ver figura 1).

ESTRATEGIA METODOLÓGICA

El análisis de los desplazamientos fue dividido en dos partes: el estudio de la zona aledaña al puente, y el estudio del puente mismo. Para el caso del estudio de la zona del puente se planteó la medición en dos épocas separadas

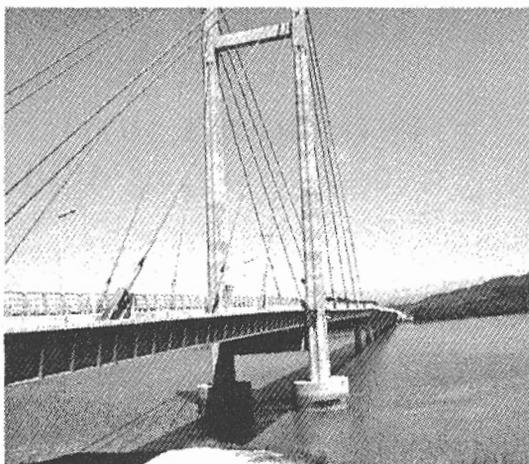


Figura 1. Puente de La Amistad sobre el Río Tempisque, Costa Rica.

aproximadamente seis meses, y se utilizó la modalidad de medición estática. En esas mismas épocas se planteó analizar los desplazamientos sufridos por puntos sobre el puente, pero en este caso considerando un enfoque de análisis de desplazamientos en modalidad cinemática.

ESTUDIO DE DESPLAZAMIENTOS DEL ÁREA DEL PUENTE

Para este análisis se planteó la medición de una red externa del puente con amarre a puntos fuera del área de influencia. Se planeó tomar un mínimo de tres puntos en el área circundante, desde donde posteriormente se efectuaría el análisis del puente. La red de control quedó establecida por los

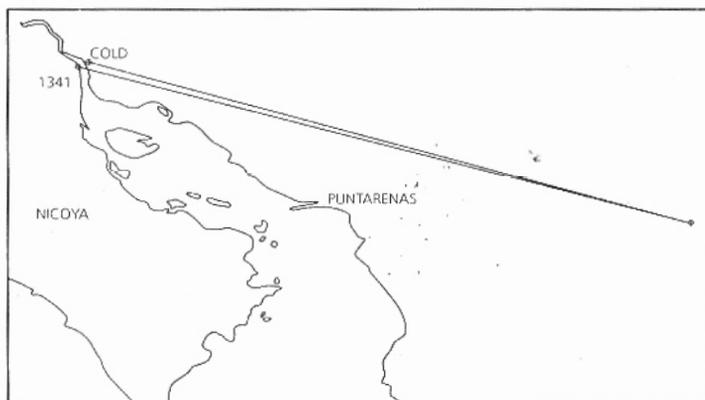


Figura 2. Red de control externo. Vista general.



Figura 3. Red de control externo.

puntos OLT, COLO y 1341, los cuales pueden ser observados en la figura 2 y en mayor detalle en la figura 3.

ANÁLISIS DE LA RED DE APOYO

Para el análisis de los desplazamientos se debe contar con al menos dos épocas que son comparadas entre sí. La diferencia en las coordenadas de ambas épocas es analizada mediante el uso de hipótesis estadísticas para determinar si la diferencia en coordenadas puede ser considerada significativa, tomando en cuenta las precisiones de los equipos utilizados. En el análisis se usa la información estocástica obtenida después del ajuste en cada época. Debido a que a priori ninguno de los puntos puede ser considerado fijo, los datos usados provienen de ajustes libres con minimización total de la traza para ambas épocas. La información estocástica de las coordenadas, una vez realizado el ajuste, se encuentra en la matriz de varianza covarianza de las incógnitas. El software de ajuste usado no proporciona información completa de la matriz de varianza covarianza. Al no contar con esta información, se utilizó un método simplificado, apoyado en un test de student, donde se calcula el valor de prueba con el vector de desplazamiento de cada punto y su desviación estándar. Para cada punto se calcula el valor de prueba como:

$$t = \frac{d}{s_d}$$

en donde la desviación estándar del parámetro d (s_d) se calcula por propagación de errores. Se determina

que existe desplazamiento significativo en el punto que le corresponde el máximo valor de prueba t , de todos los que superan el cuantil de la distribución $t(t_{f1+f2, 1-\alpha})$. El punto que se considera como desplazado se toma como nuevo en sucesivos ajustes y el proceso se itera hasta que no se detecten más puntos desplazados.

Los resultados de los ajustes libres de ambas épocas se describen a continuación.

Ajuste libre red externa época 1

Prueba del test global ($\alpha=95\%$): Pasó
Grados de Libertad: 3

Coordenadas de los puntos (Lambert CRN):

Nombre punto	Norte [m]	Error [m]	Este [m]	Error [m]
OLT	215076.701	0.005	526464.429	0.006
1341	247541.238	0.005	399413.546	0.006
COLO	248205.567	0.005	401609.599	0.005

Ajuste libre red externa época 2

Prueba del test global ($\alpha=95\%$): Pasó
Grados de Libertad: 3

Coordenadas de los puntos (Lambert CRN):

Nombre punto	Norte [m]	Error [m]	Este [m]	Error [m]
OLT	215076.701	0.005	526464.428	0.006
1341	247541.226	0.005	399413.547	0.005
COLO	248205.566	0.005	401609.611	0.005

Análisis de la red horizontal

La aplicación del test descrito determina que ninguno de los puntos de la red horizontal sufrió desplazamientos significativos al 95% de probabilidad. El valor de prueba en todos los casos no es mayor que el valor del cuantil $t = 2.45$.

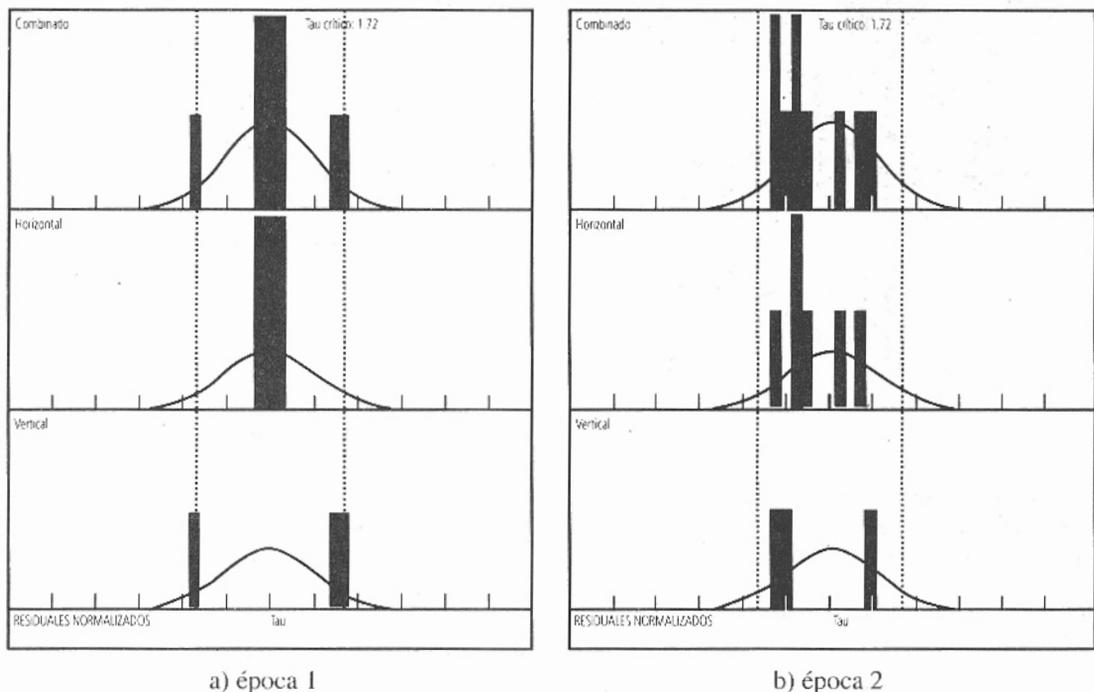


Figura 4. Histogramas de residuos normalizados para ambas épocas.

Se consideró que un análisis tridimensional no era conveniente, ya que el estadístico τ , para el caso de la primera época, en lo que corresponde a las observaciones de Δh está próximo a los límites de rechazo (ver figura 4), y aunque pasa el test, el uso de estos datos podría llevar a conclusiones erróneas.

ANÁLISIS DE PUNTOS SOBRE EL PUNTE

Para el análisis de los desplazamientos del puente en forma cinemática, se colocaron un receptor sobre el puente, registrando datos continuos, en modalidad cinemática, y otro receptor sobre un punto de la red de control, formando así, un único vector GPS.

Previo a la salida al campo se realizó un experimento para determinar la sensibilidad del equipo GPS con respecto a la detección del movimiento en la modalidad de medición.

El experimento consistió en desplazar la antena GPS en diferentes intervalos sobre la mira después de 2 minutos de observación, para comprobar el comportamiento en cada intervalo. La antena fue desplazada manualmente sobre distancias aproximadas correspondientes a 30, 15, 10, 5 y 2 cm, en especial en la dirección aproximada del Este.

En las figuras 6, 7 y 8, pueden observarse los resultados del movimiento de la antena sobre la mira en los sentidos Este, Norte y arriba.



Figura 5. Experimento control "sensibilidad" GPS.

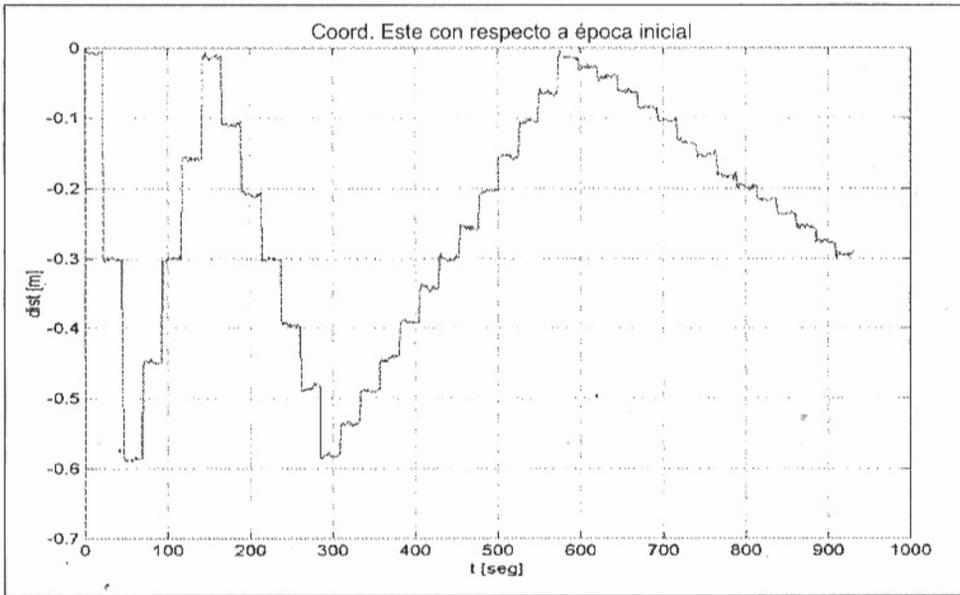


Figura 6. Cambio en la coordenada Este respecto del Este inicial.

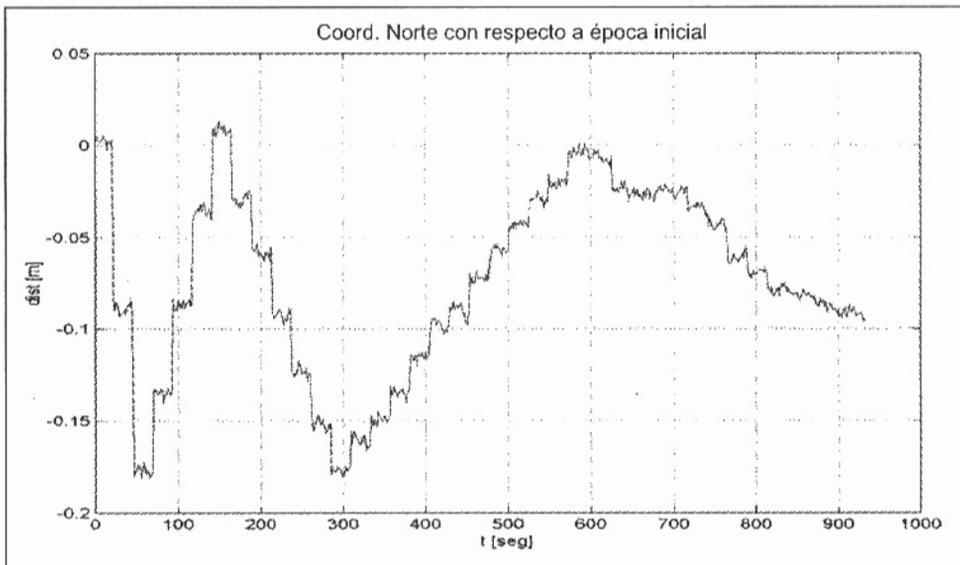


Figura 7. Cambio en la coordenada Norte respecto del Norte inicial.

En la figura 9, se presentan los resultados de los cambios de la distancia horizontal. Como se detalla en esta figura, el GPS detecta los cambios descritos con cierta incertidumbre. Esta incertidumbre está en el rango de ± 5 mm para cada

intervalo analizado, como lo señala la figura 10, donde pueden ser observados detalles de la figura 9.

De lo anterior podemos concluir que para el estudio de movimientos horizontales se pueden

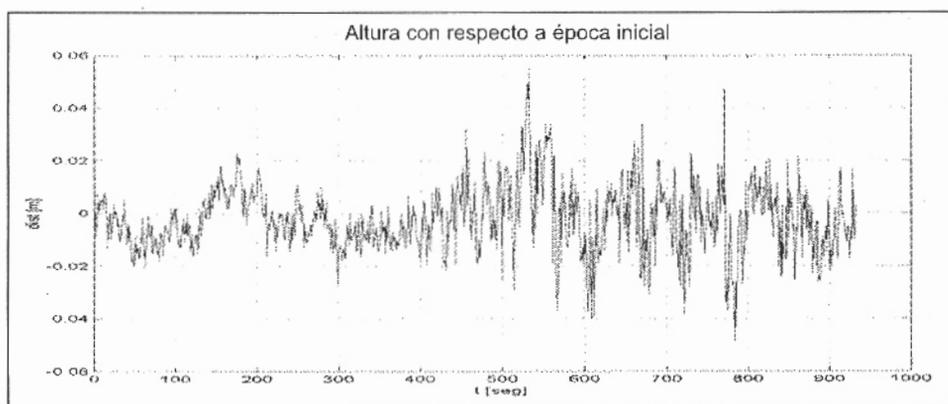


Figura 8. Cambio en la altura respecto de la altura inicial.

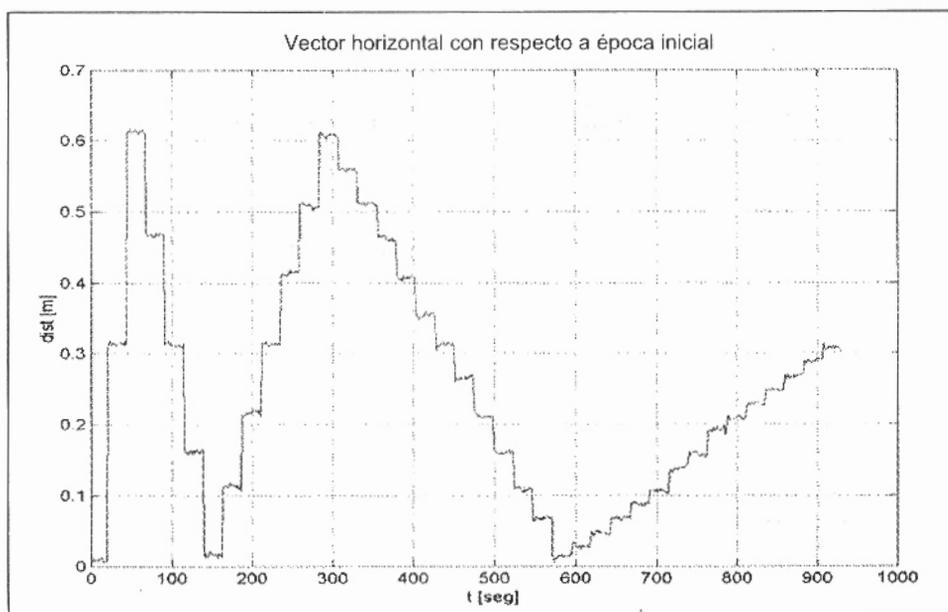


Figura 9. Cambio en el vector horizontal al valor inicial.

detectar 2 cm de cambio en la posición con una incertidumbre en cada determinación de ± 5 mm. Estos resultados son válidos para el análisis en donde la estación base está cercana a los puntos de interés. Por ser la distancia entre la estación base y el rover muy corta, los efectos de ionosfera y multipath pueden ser ignorados (BRZEZINSKA 2003). Aunque estudios sobre el efecto del multipath en distancias cortas, por ejemplo, utilizando técnicas de diferencia de días sidéreos (WUBBENA et al.

2001), podrían ser profundizados a través de investigaciones posteriores.

ANÁLISIS CINEMÁTICO SOBRE EL PUENTE

A continuación se describe el proceso de cálculo y análisis de las mediciones cinemáticas realizadas sobre el puente. Se midió usando solamente dos receptores GPS, uno de los cuales se

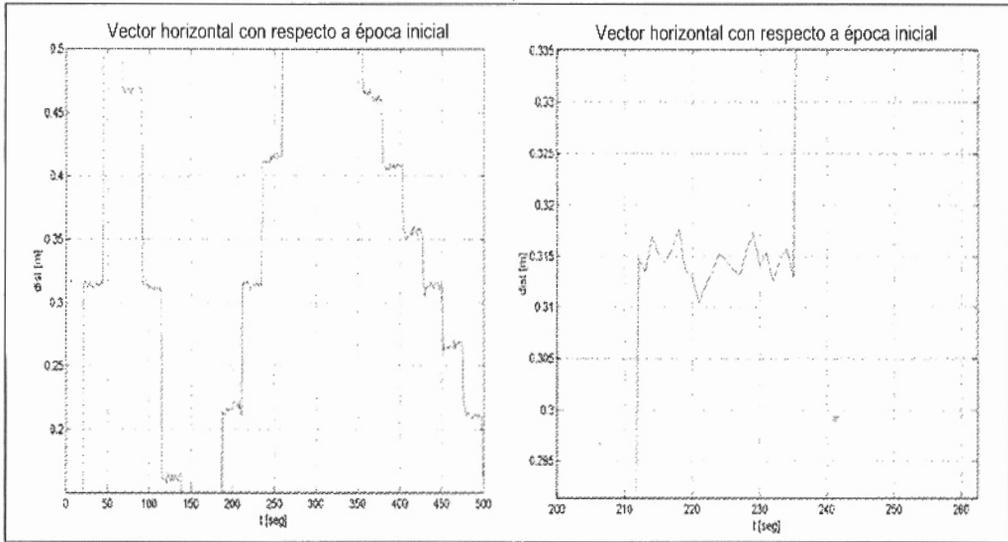


Figura 10. Detalles del cambio en el vector horizontal al valor inicial.

colocó sobre el punto de control llamado 1341 (figura 2), el cual se consideró como fijo y se encuentra fuera de la estructura del puente. El segundo receptor fue colocado sobre puntos objeto sobre el puente. Se cuenta, entonces, para cada época, con solamente un vector GPS. Dichos vectores fueron procesados utilizando el software Trimble Geomatics Office®, mediante modalidad cinemática.

La precisión reportada por el software para cada componente del vector GPS, en general, para cada vector, es como sigue:

$$\begin{aligned}\sigma_{\Delta \text{ Norte}} &= \sigma_{\Delta \text{ Este}} = 0.016\text{m} \\ \sigma_{\Delta \text{ altura}} &= 0.058\text{ m}\end{aligned}$$

Lamentablemente, el software no provee los valores de grados de libertad en la determinación de los vectores.

Nótese que lo anterior corresponde tres veces a la desviación determinada empíricamente, con el experimento de la estadia (+/- 5 mm).

Se tomó como estrategia de análisis determinar las diferencias en las componentes de los vectores GPS respecto de las componentes del vector inicial dentro del período de análisis. Los respectivos desplazamientos en las tres componentes con respecto a la época inicial durante este período son representados como series de tiempo en las figuras 11, 12 y 13.

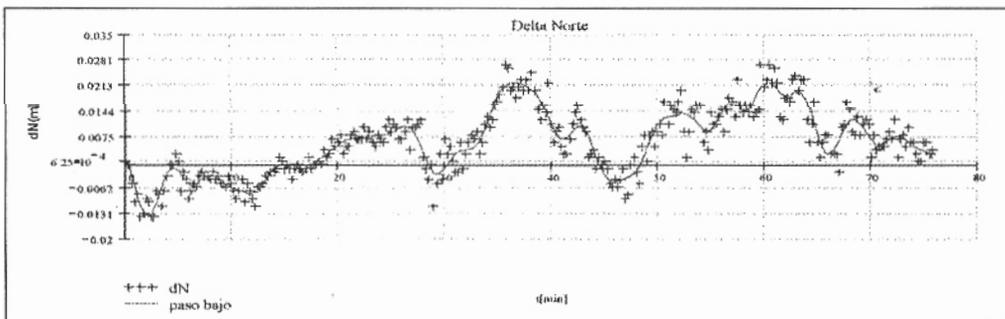


Figura 11. Desplazamiento en la Coordenada Norte respecto de la primera época.

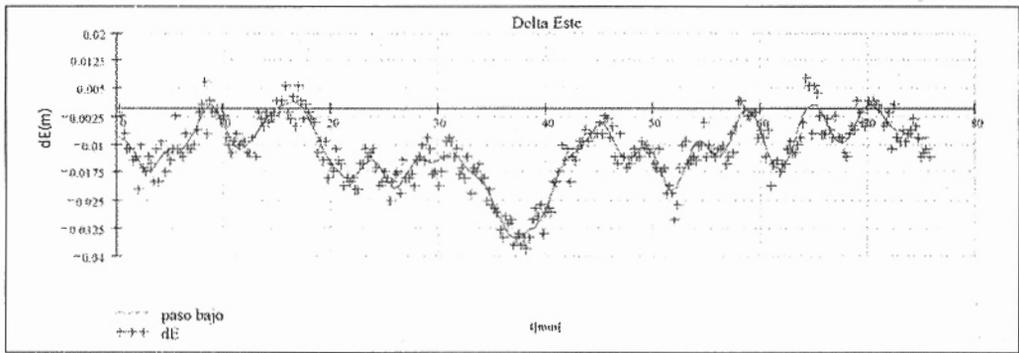


Figura 12. Desplazamiento en la Coordenada Este con respecto a la primera época.

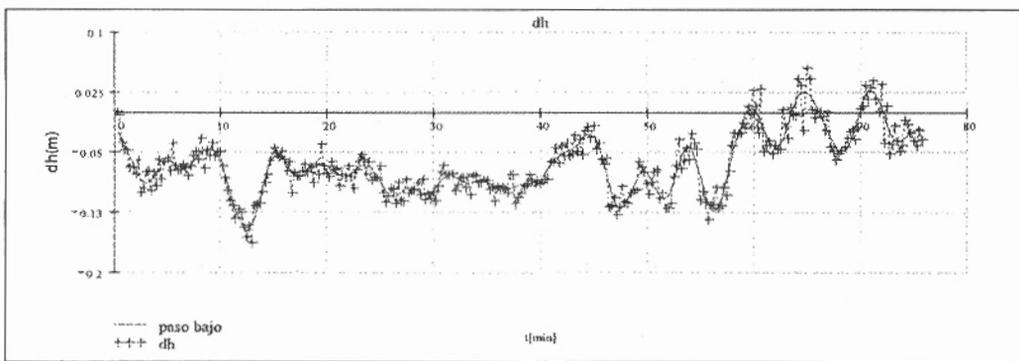


Figura 13. Desplazamiento de la altura respecto de la primera época.

En los gráficos anteriores se aplicó un filtro de paso bajo, donde frecuencias correspondientes a períodos menores de 3 minutos fueron eliminadas. Esto se realizó para poder observar la tendencia del movimiento. El filtrado se efectuó removiendo altas frecuencias del espectro, usando análisis de Fourier.

El espectro de las componentes horizontales y verticales fue calculado y puede observarse en las figuras 14-a y 14-b.

En esas figuras se puede identificar un período dominante común para ambas componentes y éste corresponde a frecuencias correspondientes a períodos de 15 minutos. No se pudieron determinar las fuentes de las posibles causas de dicho período. Un estudio más completo es necesario con observaciones adicionales de temperatura y tiempos de medición más largos.

Para determinar si los desplazamientos son significativos se necesita la aplicación de un test estadístico. Debido a que los resultados del procesamiento de vectores GPS no proveen información suficiente para la aplicación de un test más estricto, un test estadístico simple fue aplicado al vector de desplazamiento, donde el valor de prueba es calculado asumiendo que la varianza es teórica, ya que no se cuenta con información sobre los grados de libertad. El test consiste en hacer una comparación con el valor del cuantil de la distribución normal al 95% de probabilidad.

El test anterior es una forma muy simplificada para determinar si los desplazamientos son significativos o no. Este método es usado por el US Army Corps of Engineers 2002, pp. 2-4 a 2-6, para la detección de deformaciones, sin embargo, consideramos que más investigación es necesaria en este sentido para identificar mecanismos de deformaciones más apropiados.

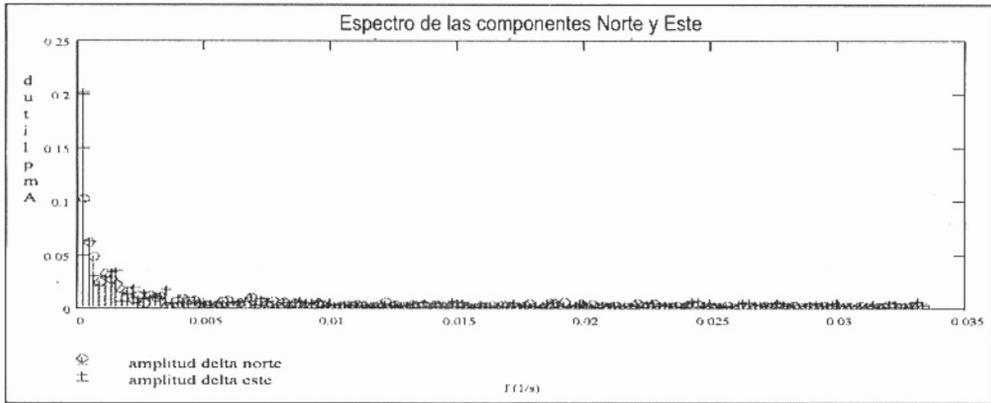


Figura 14-a. Espectro de Fourier de las componentes Este y Norte.

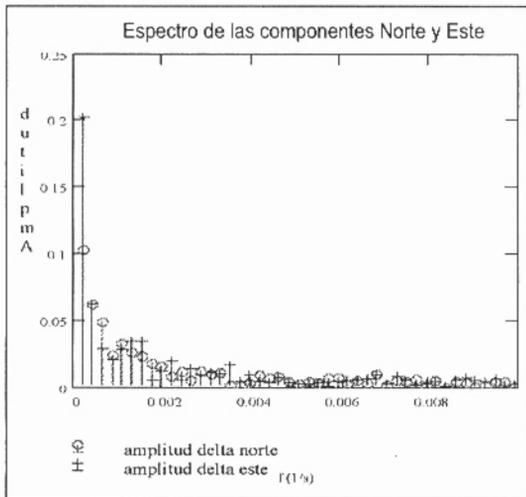


Figura 14-b. Detalle del espectro de Fourier de las componentes Este y Norte.

Como ejemplo, en la figura 15 se muestra el vector de diferencias para cada época con respecto a la época inicial, tanto para la distancia horizontal (2D) como para la distancia espacial (3D). Este gráfico representa los valores reportados por el TGO.

El gráfico anterior muestra los resultados de la medición continua durante una hora y 15 minutos aproximadamente, sobre un punto objeto ubicado en el puente. Se puede notar que el vector espacial está muy influenciado por la determinación de las alturas, posiblemente porque los errores en su determinación, no nos proporcionan una confiabilidad suficiente. También se muestran en el gráfico los vectores filtrados (filtro 2D y filtro 3D) para períodos correspondientes a 3 minutos. Esto se realizó con el objetivo de reducir el ruido en los

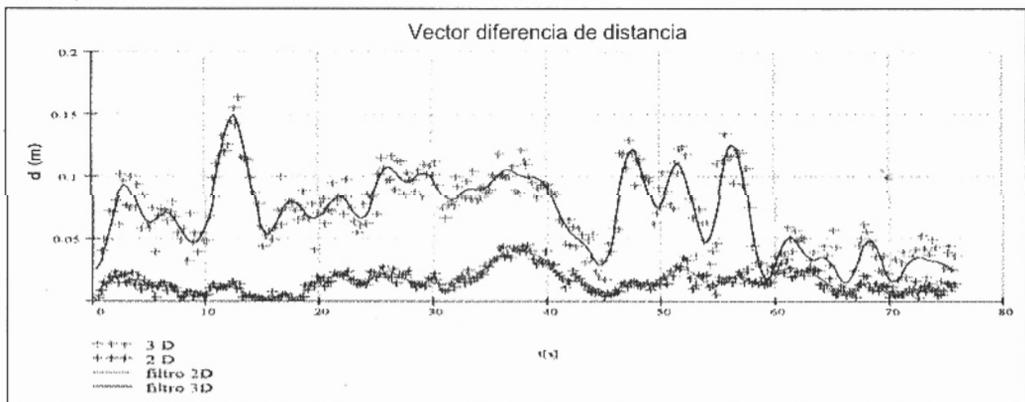


Figura 15. Vectores diferencia de distancia sobre puntos en el puente.

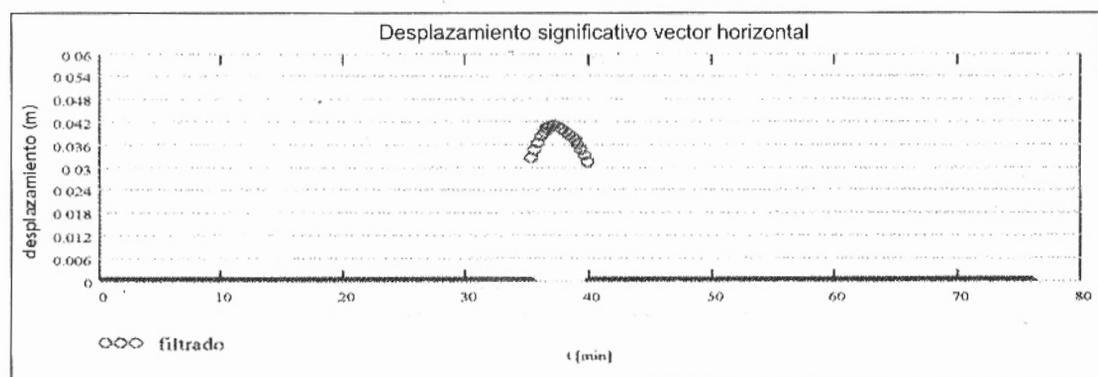


Figura 16. Test para el vector de desplazamiento horizontal.

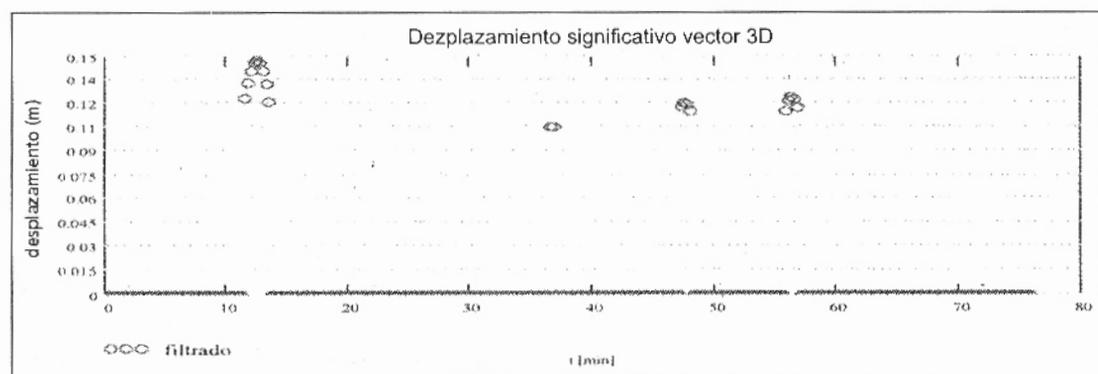


Figura 17. Test para el vector de desplazamiento espacial.

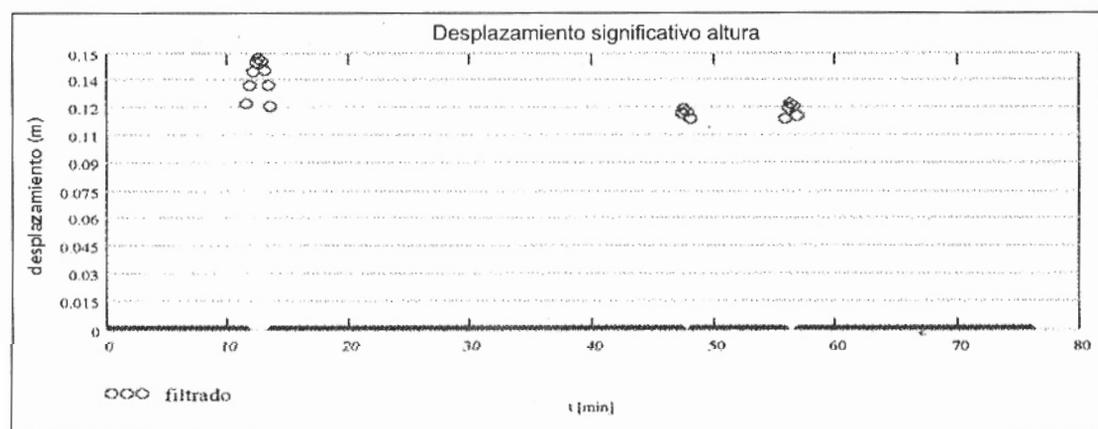


Figura 18. Comparación test para la altura original contra filtrado.

resultados del cálculo cinemático. Cabe destacar que el ruido, por su naturaleza, tiene características de alta frecuencia, por lo que un filtro de paso bajo ayuda a reducir su efecto.

En las figuras 16, 17 y 18 se observan resultados que muestran, de acuerdo con el test aplicado, si existen desplazamientos significativos al 95% de probabilidad, tanto horizontal como espacialmente. El procedimiento fue desarrollado usando MathCad, donde se implementó un algoritmo para la realización del test. El test es aplicado a cada época de observación y a los datos filtrados, si el resultado del test indica que existe desplazamiento significativo su valor es representado en el gráfico, de lo contrario un valor de cero es asignado.

Se puede observar en las figuras anteriores que al utilizar los valores provenientes del filtro, existen épocas donde el test detecta posibles desplazamientos significativos. Debemos resaltar nuevamente, que el método es válido siempre y cuando un test estadístico apropiado sea utilizado.

CONCLUSIONES

Es posible mediante el uso de mediciones GPS en modo cinemático, determinar desplazamientos significativos de estructuras que tienen un comportamiento dinámico. Se ha preparado una metodología en la que se usan solamente dos receptores GPS, lo cual reduce costos en cuanto al equipo necesario para realizar tales tareas del control de estructuras. Creemos que la metodología puede ser mejorada usando promedios de 2 o más minutos en las series de tiempo, pero esto debe ser un tema que requiere más investigación. Otro punto que debe ser más analizado es la utilización de nuevas técnicas espectrales para el análisis de datos como, por ejemplo, técnicas de correlación, uso de wavelets, análisis de periodogramas normalizados, etc., para lo cual se sugiere revisar el trabajo de Phytarouli, S., Kontogianni, V., Psimoulis, P. y Stiros, S. 2004. Además se debe investigar cómo mejorar la calidad de las mediciones cinemáticas mediante filtrados de paso bajo, para disminuir el ruido en la determinación de posiciones en modo cinemático.

BIBLIOGRAFÍA

- Brzezinska, D. 2003. *Surveying with satellites*. Class notes. Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University.
- Phytarouli, S., Kontogianni, V., Psimoulis, P., Stiros, S. 2004. Spectral analysis techniques in deformation analysis studies. *INGEO2004 and FIG Conference*. Bratislava, Slovakia, November 11-12, 2004.
- US Army Corps of Engineers. 2002. *Engineering and Design, Structural Deformation Surveying*, EM 1110-2-1009. Department of the Army, US. Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Wubben, G., Bagge, A., Boettcher, G., Schmitz, M. 2001. Permanent object monitoring with GPS with 1 millimeter accuracy. *Proceedings of the IONGPS*. Pp.1000-1008. Salt Lake City, Utah.