



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DEL MONITOREO DE LOS DESPLAZAMIENTOS REGISTRADOS EN
LA TORRE DEL CENTRO CULTURAL UNIVERSITARIO TLATELOLCO CON
GPS

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN ESTRUCTURAS

PRESENTA:

ING. PABLO HÉCTOR GALVÁN VARGAS

DIRECTORES DE TESINA: DR. DAVID MURIÀ VILA
DR. JOSÉ CAMARGO PÉREZ

MÉXICO, D.F.

MAYO 2015



Índice:

1. Introducción	3
2. Objetivos y alcances	3
3. Descripción de la Estructura	4
4. Instrumentación	8
5. Registros	10
5.1 Características de los registros GPS	10
5.2 Registros disponibles	12
6. Procesamiento de los registros obtenidos con los GPS (2011 a 2014)	14
6.1 Determinación de los valores de referencia	14
6.2 Determinación de los desplazamientos relativos y desplomos	16
6.3 Determinación de los desplazamientos en eventos sísmicos	20
7. Análisis de los registros obtenidos con los GPS (2011 a 2014)	21
7.1 Análisis de los desplomos de la torre del CCUT	21
7.2 Análisis de los desplazamientos en eventos sísmicos	32
Conclusiones	39
Referencias	40
Agradecimientos:	41

1. Introducción

El Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT) es un espacio que tiene el propósito de mostrar diversos proyectos culturales en el norte del Distrito Federal. El CCUT fue construido en los años 60 y consta de una torre de 22 pisos (fig 1) y tres cuerpos de baja altura con dos pisos cada uno.

En 1964, los cuerpos del CCUT empezaron a manifestar diversos problemas ya que la torre presentó hundimientos diferenciales y desplomos en la dirección suroeste, así como emersiones en los cuerpos bajos. Para poder controlar estos problemas se llevaron a cabo cuatro recimentaciones en diferentes años, así como el refuerzo de la estructura de la torre entre 2008 y 2009 (Murià-Vila *et al.*, 2013).

La torre del CCUT se encuentra instrumentada por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II UNAM), mediante una red de 28 acelerómetros uniaxiales de alta resolución ubicados en diferentes puntos del edificio, la cual opera desde diciembre de 2008. De igual forma en mayo de 2009 se instaló un sistema GPS compuesto de una estación de referencia y dos antenas que se encuentran ubicadas en la azotea de la torre, con el fin de monitorear la verticalidad de la torre (Murià-Vila *et al.*, 2013).

2. Objetivos y alcances

En este trabajo se presentan y analizan los desplazamientos y desplomos registrados por el sistema GPS en el periodo comprendido entre el 30 de octubre de 2011 y 31 de diciembre de 2014, con el fin de evaluar el desempeño del sistema GPS en la medición de los desplomos y determinar si la última recimentación y el refuerzo de la estructura han contribuido en el control de la verticalidad de la torre.

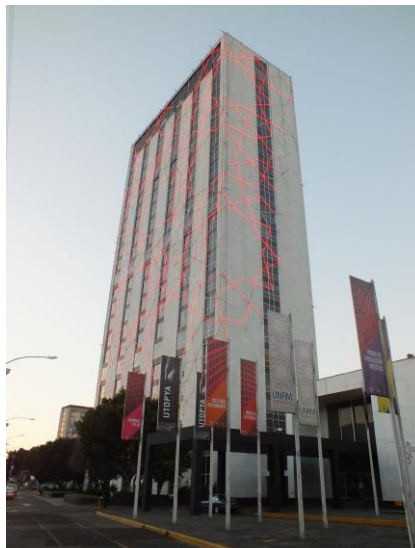


Figura 1. Vista del edificio CCUT

3. Descripción de la Estructura

El CCUT se encuentra ubicado sobre la avenida Ricardo Flores Magón y el eje Lázaro Cárdenas (fig 2) en la delegación Cuauhtémoc México D.F.



Figura 2. Localización del CCUT (google maps 2015)

El CCUT fue construido en un principio para alojar a la Secretaría de Relaciones Exteriores, por lo que el proyecto arquitectónico original contemplaba que la torre tuviera el uso de oficinas y los cuerpos bajos para la atención al público y presentación de conferencias. En el año de 2005 el conjunto ubicado en Tlatelolco fue puesto a disposición de la UNAM.

La torre cuenta con 41.87 m de largo en el sentido oeste-este (componente L), 18.35 m de ancho en la dirección norte-sur (componente T) y 86.3 m de altura.

La altura de entrepiso de la planta baja es de 6.2 m y la del entrepiso tipo (piso 2 al 21) es de 3.6 m, la torre cuenta con un sótano de dos niveles en el cual la altura de entrepiso es de 3 m cada uno (Ávila *et al.*, 2009).

En las fachadas norte-sur de la torre (ejes H y K) existen muros de concreto reforzado con 4.3 m de longitud (fig 3), los cuales presentan patines en sus extremos y en la parte central (fig 4), estos muros se encuentran ligados mediante traveses de concreto. En el lado este de la torre (eje 12) existen dos muros con una longitud de 7.15 m cada uno los cuales están ligados mediante traveses de concreto, por otra parte en el lado oeste de la torre (eje 6) existe un muro continuo de concreto con dos patines en su interior (figs 5 y 6) (Ávila *et al.*, 2009).

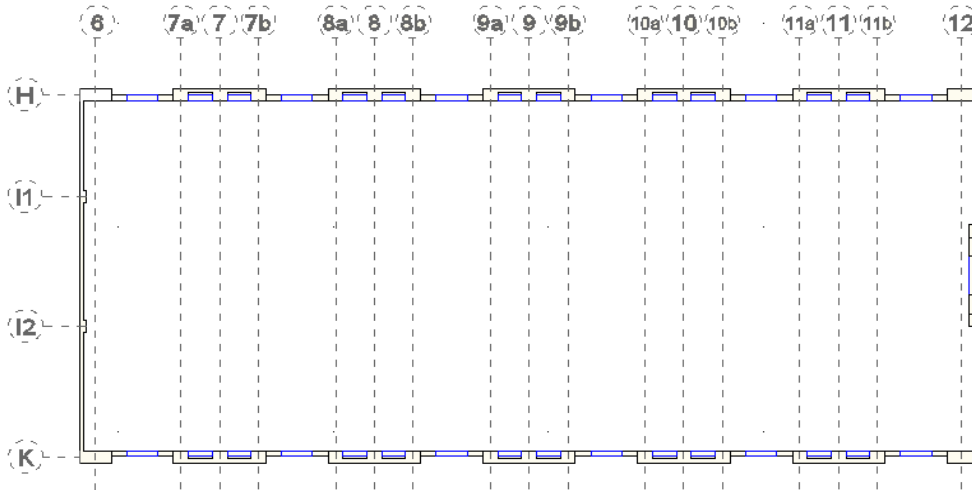


Figura 3. Vista en planta de la torre del CCUT.



Figura 4. Fachada Sur de la torre del CCUT



Figura 5. Vista oriente de la torre del CCUT

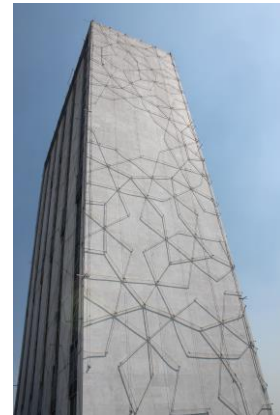


Figura 6. Vista poniente de la torre del CCUT

El sistema de piso de la torre está conformado por losas de 20 cm de concreto reforzado y se encuentra apoyada perimetralmente en traveses de acero de alma abierta las cuales salvan un claro libre de 17.15 m en el sentido transversal.

El CCUT se encuentra ubicado dentro de la zona sísmica IIIb (fig 7), según el mapa de zonificación de las NTC-Sismo del RCDF-04, en esta zona el periodo dominante del movimiento del suelo está entre 1.9 y 2.0 s, y la profundidad de los depósitos firmes cae entre los 30 y 40 m.

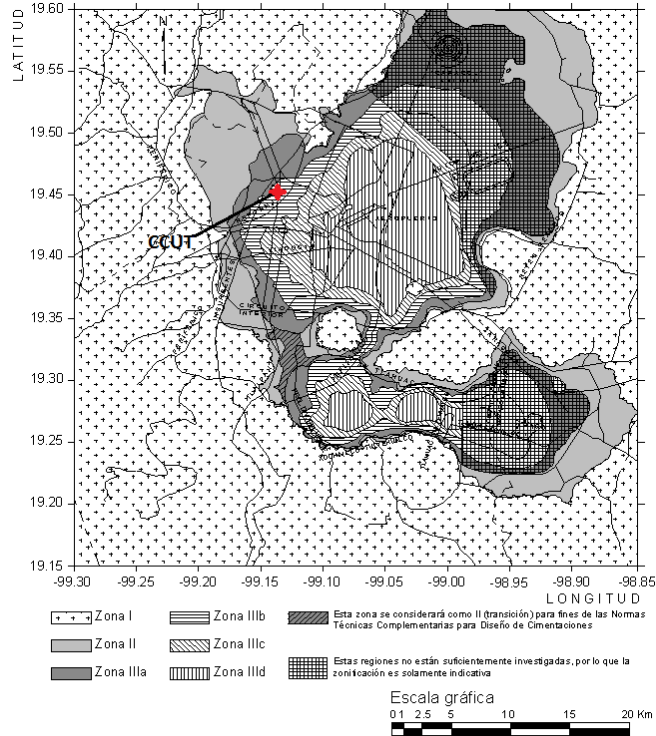


Figura 1.1. Zonificación del DF para fines de diseño por sismo

Figura 7. Localización del CCUT en el mapa de zonificación NTCS-04

La cimentación de la torre está ligada a la de los cuerpos bajos y está compuesta de muros perimetrales de 7.3 m de altura y una losa de cimentación a base de cascarones invertidos de 18 cm de espesor, con contratraveses de 3 m de peralte y 70 cm de ancho en el sentido transversal, y contratraveses en el sentido longitudinal de 1.3 m de peralte y 30 cm de ancho. El conjunto de estos elementos forman una cimentación tipo cajón la cual desde un inicio se encontraba apoyada sobre 156 pilotes de fricción de sección circular de 50 cm de diámetro, pero debido a los hundimientos diferenciales que presentó la torre se tuvieron que agregar 73 pilotes electro metálicos de acero de 2 pulgadas de diámetro y 52 pilotes de control (Ávila *et al.*, 2009).

Desde sus inicios en 1964 la torre presentó asentamientos diferenciales los cuales provocaron desplomos en la dirección suroeste y emersiones de los cuerpos bajos. Con el propósito de detener estos asentamientos se realizaron diferentes recimentaciones en la torre.

La primera de estas se realizó en octubre de 1964 cuando la torre todavía estaba en construcción, en la cual se colocaron lastres de arena en la parte este y norte de la cimentación, y 25 pilotes electrometálicos de acero de 2 pulgadas de diámetro en la zona suroeste, estos pilotes fueron hincados hasta la primera capa resistente (Ávila *et al.*, 2009).

El 30 de septiembre de 1965, cuando la torre estaba terminada y con todos sus recubrimientos de mármol ya colocados, la magnitud de los desplomos era de 32 cm en la esquina suroeste y de 29.2 cm en la esquina sureste, por lo que la segunda recimentación se realizó en octubre de 1965 en la cual se agregaron 48 pilotes similares a los de la primera recimentación.

A pesar de estas recimentaciones los hundimientos y desplomos en la torre continuaron por lo que la tercera recimentación se realizó en noviembre de 1983 en la cual se agregaron 52 pilotes de control a lo largo de la fachada sur y parte de la oeste.

La cuarta recimentación se llevó a cabo en mayo de 1987 después de que la estructura presentara algunos daños a causa del sismo de 1985, en la cual se realizaron las siguientes modificaciones:

- Se amplió el cajón de cimentación 6m de ancho por 42.05 m de longitud en el lado sur del edificio.
- Se colocó un muro de 30 cm de espesor en la dirección longitudinal y otro de 60 cm sobre los ejes 6 y 12 en la dirección transversal.
- Se reforzaron con estribos las contra trabes de los ejes 6 y 12 de igual forma se ampliaron 15 cm en los extremos.
- Se rigidizó con armaduras la ampliación del cajón de cimentación.

En enero de 1991 se implementó la operación de pozos de bombeo e infiltración con el propósito de controlar los asentamientos de la torre, las mediciones registradas indican que existieron hundimientos en la zona norte de la torre, propiciando así la disminución de los asentamientos en el lado sur. (Ávila *et al.*, 2009).

La última intervención en la torre se realizó en 2009 la cual consistió en rigidizarla con diagonales de acero en la dirección transversal y el reforzamiento de las vigas de acoplamiento con mallas de fibra de carbono, así como la colocación de 30 pilotes de control de concreto reforzado de 50 cm de diámetro en el lado sur de la torre (Murià-Vila *et al.*, 2013).

4. Instrumentación

Con el propósito de evaluar el comportamiento de la torre del CCUT ante cargas de servicio o algún evento sísmico, la torre cuenta con una red de 28 acelerómetros de alta resolución, los cuales fueron colocados en diferentes puntos de la torre como se muestra en la fig 8. Entre sus principales características destaca su capacidad de registrar movimientos de sismos intensos y de vibración ambiental. Así mismo, en mayo de 2009 se instaló un sistema de GPS que está compuesto por tres antenas GPS (GPS1, GPS2 y GPS3) para medir la evolución de los desplomos en la torre (Murià-Vila *et al.*, 2013). Las principales características del sistema GPS son:

- La obtención de los desplazamientos es de manera directa.
- La precisión indicada por el fabricante es de ± 5 y ± 10 mm en el plano horizontal y vertical respectivamente, cuando se realiza una captura continua de las coordenadas, y de ± 3 mm en el plano horizontal y ± 6 mm en el plano vertical cuando se realiza un promedio de las coordenadas.
- La información es capturada en forma continua y en tiempo real.
- Opera automáticamente con una tasa de muestreo de 20 Hz.
- Se puede llevar acabo de una manera continua el monitoreo de los desplomos.

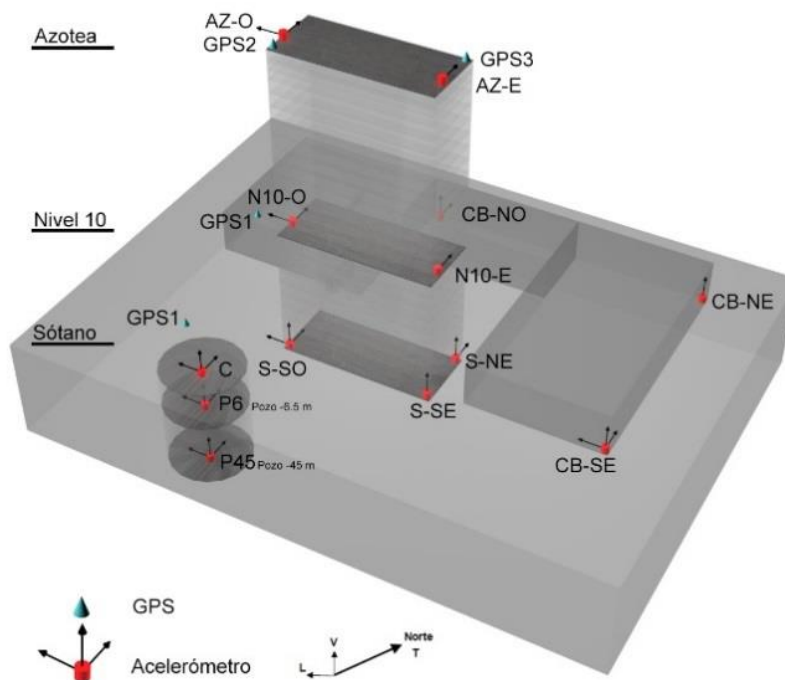


Figura 8. Instrumentación de la torre del CCUT

El equipo implementado en la torre para el monitoreo de los desplomos consta de receptores GPS GRX 1200 pro Leica (fig 9) y antenas tipo AT504 de bobina anular para el punto de referencia (fig 10) y AX1202 para los puntos móviles (fig. 11).

La antena GPS1 se encuentra en la azotea del cuerpo bajo que se ubica en el lado noroeste de la torre. Esta antena tiene la finalidad de ser usada como punto de referencia y así poder medir los desplazamientos relativos de la torre, esta puede ser trasladada al nivel de banqueta y así poder cambiar el punto de referencia.

Las antenas GPS2 y GPS3 se encuentran ubicadas en las esquinas suroeste y noreste del nivel de azotea de la torre del CCUT, estas antenas se denominan puntos de medición móviles y la variación en su posición inicial indican el desplazamiento que sufre la torre a lo largo del proceso de monitoreo (Murià-Vila *et al.*, 2009).



Figura 9. GPS GRX 1200 pro Leica



Figura 10. Antena AT504 (punto de referencia)



Figura 11. Antena AX1202 punto móvil (esquina suroeste de la torre)

La información que reciben las antenas pasa por un cable de fibra óptica que está conectado a una computadora en el sótano, en la cual se almacenan los datos, y estos son administrados por el programa de cómputo del sistema GPS.

La obtención de datos con este sistema se ha realizado desde el año 2009. En primeras ocasiones las capturas se realizaban de manera periódica durante lapsos de una a dos horas. Después se hizo posible la instalación permanente tanto de los GPS como del equipo de cómputo que permitiera la grabación continua de información y a partir de 2011 se ha logrado mantener el almacenamiento continuo de la información.

5. Registros

5.1 Características de los registros GPS

Los registros proporcionados por el programa de cómputo del sistema de GPS contienen diferente tipo de información, de la cual se seleccionan los siguientes parámetros para la determinación de los desplomos de la torre:

- Hora
- Fecha
- Coordenada este expresada en sistema UTM
- Coordenada norte expresada en sistema UTM
- Calidad de GPS
- Número de satélites
- Calidad de coordenada
- Coordenada de la altura expresada en sistema UTM

Cabe mencionar que las coordenadas registradas por el sistema GPS presentan ciertas incertidumbres en su valor, y para poder depurar las coordenadas cuyo valor pueden afectar el cálculo de los desplomos se deben escoger límites a los parámetros de calidad de coordenada y GPS.

La calidad de coordenada es un parámetro que muestra que tan desviada esta la posición del receptor de la posición registrada, por lo que podemos establecer que un valor bajo de la calidad de coordenada significa que el valor registrado tiende a ser exacto. El valor de este parámetro depende principalmente de la posición de los satélites usados por el receptor para calcular la coordenada. La configuración ideal para obtener valores bajos de la calidad de coordenada es cuando la posición relativa entre los satélites forme ángulos casi rectos (Langley 1999). Para calcular el valor de la calidad de coordenada es necesario formar la matriz A (ec. 1) compuesta por los vectores unitarios entre el receptor y cada uno de los satélites.

$$A = \begin{matrix} \frac{(X_{sat1}-X_{recep})}{D1} & \frac{(Y_{sat1}-Y_{recep})}{D1} & \frac{(Z_{sat1}-Z_{recep})}{D1} & 1 \\ \frac{(X_{sat2}-X_{recep})}{D2} & \frac{(Y_{sat2}-Y_{recep})}{D2} & \frac{(Z_{sat2}-Z_{recep})}{D2} & 1 \\ \frac{(X_{sat3}-X_{recep})}{D3} & \frac{(Y_{sat3}-Y_{recep})}{D3} & \frac{(Z_{sat3}-Z_{recep})}{D3} & 1 \\ \frac{(X_{sat4}-X_{recep})}{D4} & \frac{(Y_{sat4}-Y_{recep})}{D4} & \frac{(Z_{sat4}-Z_{recep})}{D4} & 1 \end{matrix} \quad \text{ec. 1}$$

Donde:

$$D_i = \sqrt{(X_{satelite\ i} - X_{receptor})^2 + (Y_{satelite\ i} - Y_{receptor})^2 + (Z_{satelite\ i} - Z_{receptor})^2} \quad \text{ec 2}$$

Una vez formada la matriz A se procede a calcular la matriz R (ec.3) de la siguiente manera:

$$R = (A^t A) = \begin{matrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} \end{matrix} \quad \text{ec. 3}$$

Por último, la calidad de coordenada se obtiene con ayuda de la ec. 4 y tiene unidades de m.

$$CQ = \sqrt{(R_{11}^2 + R_{22}^2 + R_{33}^2) * E^2} \quad \text{ec. 4}$$

Donde E es la media cuadrática de los errores de la señal entre los satélites y el receptor (Ayers, 2011).

La calidad de GPS muestra las condiciones en las cuales fue registrada la coordenada, esta puede tener diferentes valores dependiendo de si las distancias entre los satélites y el receptor fueron calculadas correctamente o no. En la tabla 1 se muestra los diferentes valores para este parámetro.

Tabla 1. Posibles valores para la calidad de GPS

0	No disponible
1	Posición registrada después del tiempo real
2	Posición en tiempo real, pero valor de distancias incierto
3	Posición en tiempo real y distancias calculadas correctamente

Por último, el número de satélites indica cuántos satélites fueron utilizados para calcular la coordenada.

5.2 Registros disponibles

Para el monitoreo continuo de los desplomos de la torre se cuentan con los registros del sistema GPS y los de la red acelerográfica.

Entre 2011 y 2014 con ayuda del sistema GPS y la red acelerográfica se registraron 14 eventos sísmicos con diferentes características, los cuales se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Eventos sísmicos

Evento	Fecha	Mw	A max en cm/s^2
1	25-feb-11	6	0.9
2	07-abr-11	6.7	1.6
3	10-dic-11	6.5	16.4
4	16-dic-11	4.5	0.4
5	20-mar-12	7.4	29.2
6	02-abr-12	6	5.4
7	11-abr-12	6.4	5
8	15-nov-12	6.1	6.1
9	21-abr-13	5.8	7.8
10	16-jun-13	5.8	20.6
11	21-ago-13	6	8.9
12	18-abr-14	7.2	30.0
13	08-may-14	6.4	29.4
14	10-may-14	6.1	8.5

Los eventos sísmicos más importantes en este periodo fueron los del 20 de marzo de 2012 y 18 de abril de 2014 ya que presentaron los máximos valores para la aceleración del terreno.

Además de los registros anteriores, el sistema GPS cuenta con registros continuos para determinar la evolución de los desplomos.

Entre 2011 y 2014 el sistema GPS operó adecuadamente en la captura de las coordenadas de los desplomos. Sin embargo, existieron fechas en las cuales se presentaron diversas fallas con el sistema o el programa de cómputo GPS.

En la tabla 3 se muestra una relación de los registros con los que se cuentan para el monitoreo de la verticalidad de la torre.

Tabla 3. Registros GPS disponibles

Dia	2011			2012												2013												2014	
	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic	ene-dic		
1																													
2																													
3																													
4																													
5																													
6																													
7																													
8																													
9																													
10																													
11																													
12																													
13																													
14																													
15																													
16																													
17																													
18																													
19																													
20																													
21																													
22																													
23																													
24																													
25																													
26																													
27																													
28																													
29																													
30																													
31																													

	Archivo disponible
ND	Falla de equipo
ND	Falla de programa de computo

6. Procesamiento de los registros obtenidos con los GPS (2011 a 2014)

6.1 Determinación de los valores de referencia

Para obtener los desplomos de la torre mediante el sistema GPS, se debe establecer los valores de referencia de los receptores GPS1, GPS2 y GPS3.

Para determinar estos valores se debe de realizar una medición durante 24 horas de las coordenadas de cada uno de los GPS, y después realizar el promedio de las coordenadas medidas en este lapso de tiempo.

Para los GPS implementados en la torre se realizaron mediciones los días 29 y 30 de octubre de 2011 y se obtuvieron las coordenadas de referencia, las cuales se expresaron en el sistema UTM y se presentan en la tabla 4 (Murià-Vila *et al.*, 2009).

Tabla 4. Coordenadas de referencia en UTM del 30 de octubre de 2011.

GPS2		
Este	Norte	Vertical
485537.09161	2150617.43202	2307.86150
GPS3		
Este	Norte	Vertical
485581.30132	2150623.07161	2308.23875

Para el cálculo de los desplomos en la torre (Murià-Vila *et al.*, 2013) como primer paso se deben de determinar las distancias ortogonales del punto de medición (GPS1) a las aristas 2 y 3 en la base de la torre como se muestra en la fig 12.

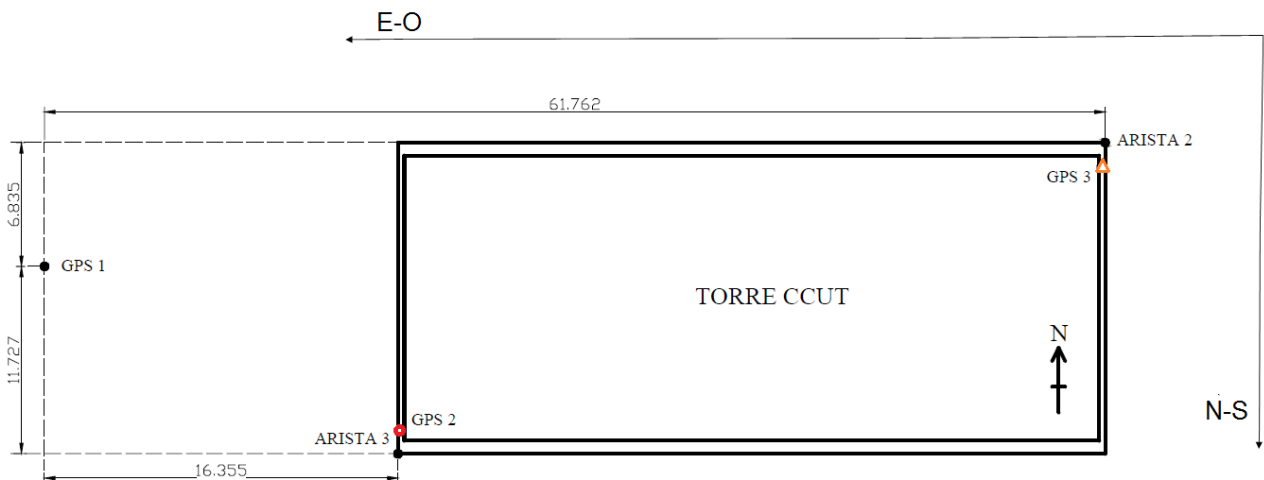


Figura 12. Distancias ortogonales entre el punto de referencia y la base de la torre del CCUT (aristas 2 y 3)

Después con las coordenadas de referencia determinadas para los GPS1, GPS2 y GPS3, se realiza la diferencia de los componentes este y norte entre los GPS de azotea (GPS2 y GPS3) y el GPS de referencia (GPS1). Esta diferencia es la distancia horizontal entre el punto de referencia y las antenas GPS de azotea.

Además se debe de tomar en cuenta que las antenas de los GPS de azotea no se ubican exactamente en la esquina, por lo que a la distancia entre los GPS de azotea y el de referencia se le debe de agregar la distancia de la antena a la esquina.

Por último, para determinar los desplomos en cada componente (L y T) de la torre se realiza la diferencia entre las distancias ortogonales y las determinadas con las coordenadas de referencia.

En la tabla 5 se muestran los desplomos correspondientes al 30 de octubre de 2011 los cuales se utilizarán como valores de referencia para el monitoreo de la torre.

Tabla 5. Desplomos en m del 30 de octubre de 2011

	GPS2	GPS3
L	0.271	0.310
T	1.017	1.020

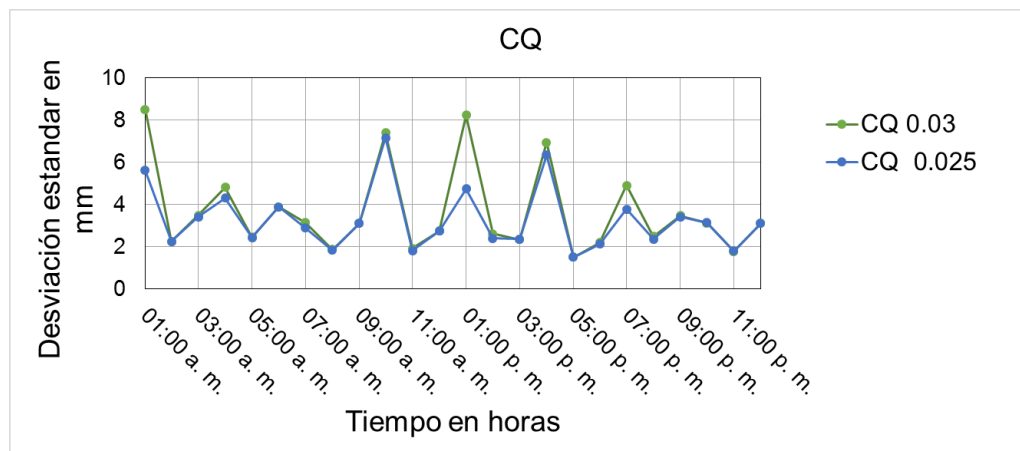
6.2 Determinación de los desplazamientos relativos y desplomos

Una vez definidas las coordenadas de referencia las cuales corresponden al 30 de octubre del 2011, se pueden obtener los desplazamientos y desplomos por componente (L y T) en la torre, para esto se propone el procedimiento siguiente:

- Como primer paso, establecer los límites para los parámetros de calidad de GPS y de coordenada.

Para establecer el límite de la calidad de coordenada se debe observar la variación del valor de las coordenadas para diferentes calidades, tratando de encontrar un valor de calidad que permita eliminar aquellas coordenadas cuyo valor es alto respecto al de toda la muestra, por otra parte el fabricante del equipo GPS (Leica geosystems) recomienda un valor de 0.03 m para la calidad de coordenada.

Después de atender las recomendaciones del fabricante y de observar el comportamiento de las coordenadas para diferentes calidades, se utilizó un valor de 0.025 m para la calidad de coordenada. En la fig 13 se muestra una comparación de la desviación estándar de las coordenadas con calidad de 0.03 y 0.025 m.



En la fig 13 las coordenadas con calidad de 0.03 m muestran mayor valor en la desviación que las de 0.025 m por lo que para este trabajo se usó un valor de 0.025 m para el procesamiento de las coordenadas.

Por otra parte el valor del límite para la calidad de GPS debe de ser igual a 3, ya que con este valor las distancias entre los satélites y el receptor son calculadas correctamente y la coordenada es registrada en tiempo real.

- Como segundo paso se procede a depurar las coordenadas que no cumplan con los criterios establecidos anteriormente.
- Después se realiza el promedio por hora de las coordenadas que cumplan con los criterios establecidos. Cuando en los datos de los registros, existan coordenadas que correspondan a las de un evento sísmico, estas deben de descartarse para no afectar el valor del desplomo promedio.
- Determinar los desplomos de cada componente de la torre (L y T) realizando la diferencia entre cada promedio por hora y la coordenada de referencia, y este resultado adicionarlo a los desplomos de referencia.

El procedimiento descrito anteriormente se programó en una hoja de cálculo en Excel y se utilizó para realizar el procesamiento de los registros. La hoja de cálculo estima la desviación estándar de las coordenadas y de la calidad de coordenada, además obtiene los valores mínimo y máximo registrado para la calidad de coordenada y número de satélites.

Para obtener los desplazamientos y desplomos de las fechas y hora deseadas con la hoja de cálculo de Excel se requiere indicar las calidades de GPS y de coordenada deseada, así como el número del GPS del que se quiera obtener esta información. Una vez establecidos estos límites se procede a seleccionar los registros que se desean procesar. Por último, la hoja de cálculo determinará los desplomos de los archivos seleccionados.

En las figs 14 y 15 se muestra el cálculo de los desplomos del componente L y T por hora, para el 20 de marzo de 2014 sin establecer límites para la calidad de coordenada y de GPS, así como el cálculo de estos mismos desplomos estableciendo un valor de 0.025 m para la calidad de coordenada y de 3 para la calidad de GPS. Se observa que si no se establecen límites para los parámetros de calidad de GPS y de coordenada los desplomos presentan en algunos casos incrementos bruscos en su valor y al establecer límites a estos parámetros el valor de los desplomos tiende a uniformizarse.

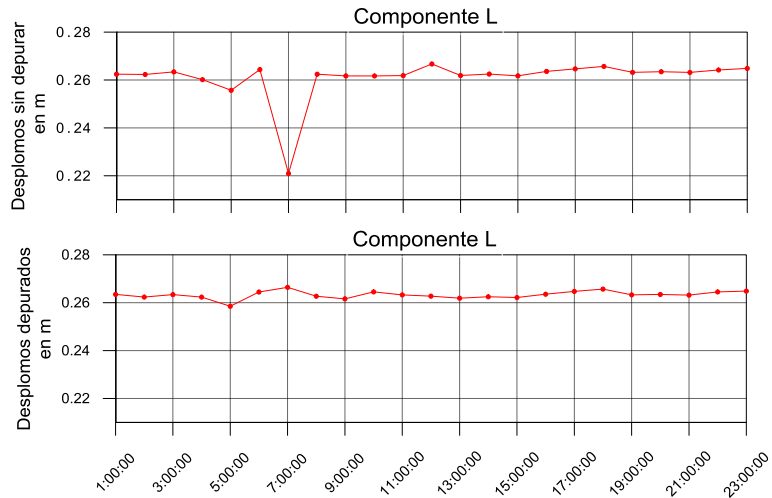


Figura 14. Comparación de los desplomos del 20 de marzo de 2014 sin depurar y depurados para el GPS2

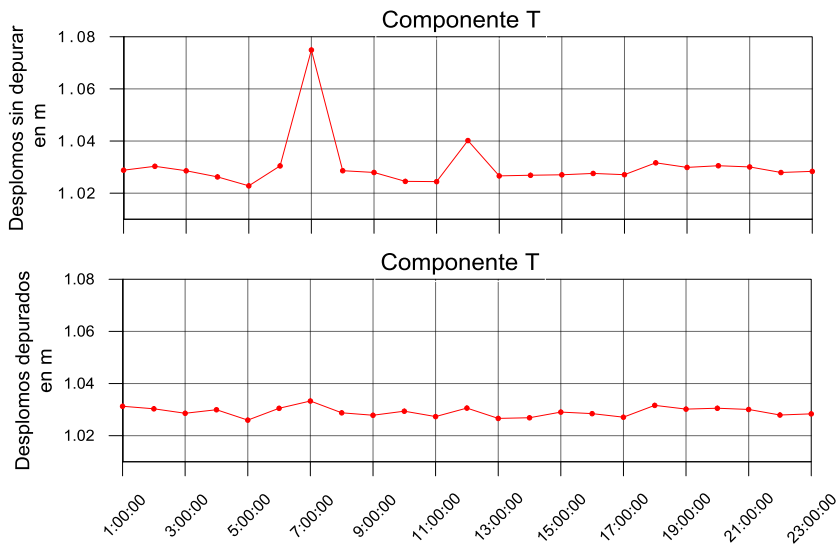


Figura 15. Comparación de los desplomos del 20 de marzo de 2014 sin depurar y depurados para el GPS3

Para comprobar la precisión del equipo GPS implementado en la torre se realizaron pruebas de medición, que consistieron en determinar las distancias entre dos puntos mediante el uso del equipo GPS y una cinta métrica. Los resultados obtenidos con estos dos instrumentos presentaron una diferencia promedio de 5 mm lo cual verifica la precisión proporcionada por el fabricante (Murià Vila *et al.*, 2009).

Por otra parte con el propósito de comparar los desplomos obtenidos con el sistema GPS y los medidos mediante levantamientos topográficos proporcionados por la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM (DGOC), en las tablas 6 y 7 se muestra la comparación de los desplomos de los componentes L y T, así como la resultante y su rumbo para diferentes fechas, y se observa que los valores medidos por estos dos sistemas son similares, cabe mencionar que la resultante de los desplomos se determinó con ayuda de la ec. 5.

$$\text{Desplomo resultante} = \sqrt{(\text{despl comp } L)^2 + (\text{despl comp } T)^2} \quad \text{ec. 5}$$

Tabla 6. Comparación de los desplomos resultantes GPS2 y la DGOC

Esquina noreste							
Fecha (GPS3)	L	L	Fecha (DGOC)	Fecha (GPS3)	T	T	Fecha (DGOC)
30/oct/2011	0.310	0.310	29/oct/2011	30/oct/2011	1.020	0.990	29/oct/2011
12/nov/2011	0.309	0.305	12/nov/2011	12/nov/2011	1.017	1.010	12/nov/2011
20/mar/2012	0.306	0.304	21/mar/2012	20/mar/2012	1.020	1.020	21/mar/2012
Esquina suroeste							
Fecha (GPS2)	L	L	Fecha (DGOC)	Fecha (GPS2)	T	T	Fecha (DGOC)
30/oct/2011	0.271	0.268	29/oct/2011	30/oct/2011	1.017	1.012	29/oct/2011
12/nov/2011	0.273	0.265	12/nov/2011	12/nov/2011	1.016	1.010	12/nov/2011
20/mar/2012	0.271	0.273	21/mar/2012	20/mar/2012	1.022	1.006	21/mar/2012

Tabla 7, Rumbo de la resultante de los desplomos correspondientes al GPS2 y DGOC

Esquina noreste									
Fecha (GPS3)	Resultante		Fecha (DGOC)	Fecha (GPS3)	Rumbo en grados				Fecha (DGOC)
30/oct/2011	1.066	1.037	29/oct/2011	30/oct/2011	S	16.9 °W	S	17.4 °W	29/oct/2011
12/nov/2011	1.062	1.055	12/nov/2011	12/nov/2011	S	16.9 °W	S	16.8 °W	12/nov/2011
20/mar/2012	1.064	1.064	21/mar/2012	20/mar/2012	S	16.7 °W	S	16.6 °W	21/mar/2012
Esquina suroeste									
Fecha (GPS2)	Resultante		Fecha (DGOC)	Fecha (GPS2)	Rumbo en grados				Fecha (DGOC)
30/oct/2011	1.052	1.047	29/oct/2011	30/oct/2011	S	14.9 °W	S	14.8 °W	29/oct/2011
12/nov/2011	1.052	1.044	12/nov/2011	12/nov/2011	S	15.0 °W	S	14.7 °W	12/nov/2011
20/mar/2012	1.058	1.042	21/mar/2012	20/mar/2012	S	14.9 °W	S	15.2 °W	21/mar/2012

6.3 Determinación de los desplazamientos en eventos sísmicos

Para la determinación de los desplazamientos en la torre del CCUT debidos a un evento sísmico se propone la siguiente metodología:

1. Como primer paso se debe establecer los límites para los parámetros de calidad de GPS y de coordenada, estos se determinan como se mencionó en la sección 6.2.
2. Después se procede a depurar las coordenadas que no cumplan con los criterios establecidos anteriormente.
3. Establecer un valor de referencia, el cual se determina realizando el promedio de cincuenta datos que se encuentren antes de que inicie el evento sísmico.
4. Realizar la diferencia entre el valor de referencia y las coordenadas que cumplieron con los límites establecidos en el punto 1.
5. El resultado de esta diferencia corresponde al desplazamiento de la torre durante el evento sísmico.

En las figs 16 y 17 se muestra el cálculo de los desplazamientos ocasionados por el evento sísmico del 18 de abril de 2014 sin establecer límites para la calidad de coordenada y de GPS, así como el cálculo de estos mismos estableciendo los límites mencionados anteriormente. Se observa que si no se establecen límites para los parámetros de calidad de GPS y de coordenada los desplazamientos presentan en algunos casos incrementos bruscos en su valor.

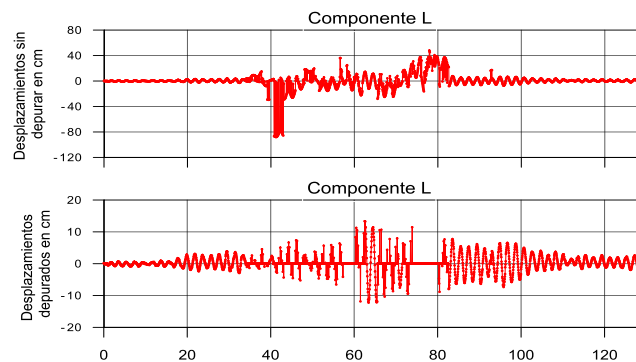


Figura 16. Comparación desplazamientos sin depurar y depurados GPS2

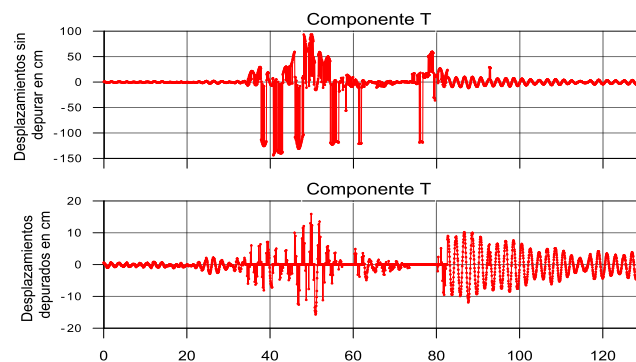


Figura 17. Comparación desplazamientos sin depurar y depurados GPS3

7. Análisis de los registros obtenidos con los GPS (2011 a 2014)

7.1 Análisis de los desplomos de la torre del CCUT

En la fig 18 se muestra la variación de la resultante de los desplomos (ec. 5) en cada esquina de la torre desde 1977 a 2005, así mismo se indican los eventos sísmicos que se presentaron en este periodo (López-Acosta y Ávila, 2007).

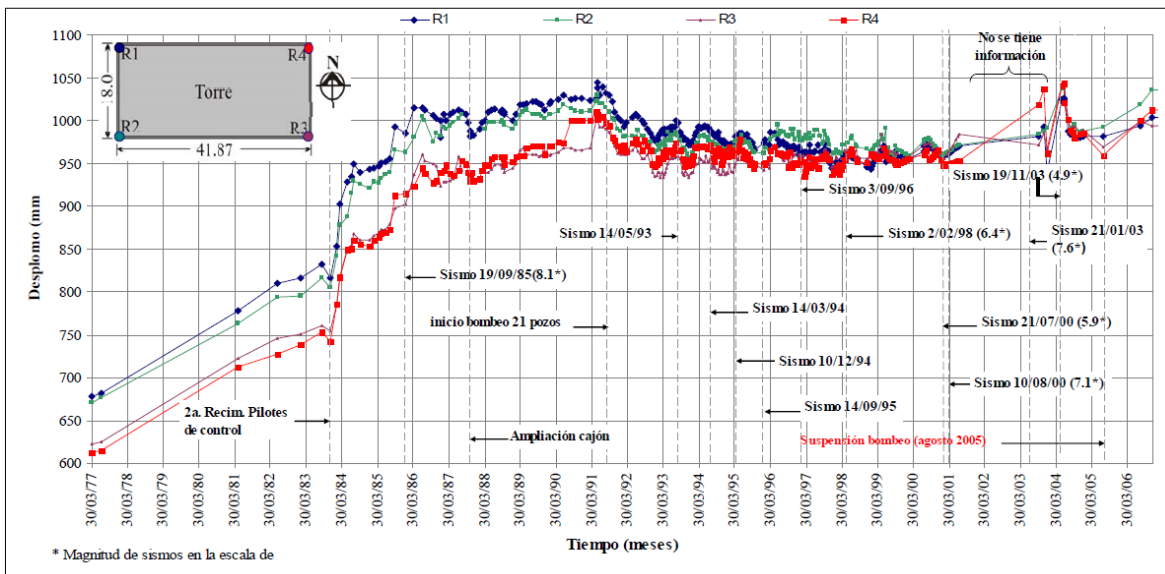


Figura 18. Historia de desplomos (resultante) de marzo 1977 a diciembre 2006 (López-Acosta y Ávila, 2007)

Con el propósito de seguir analizando el comportamiento de los desplomos, en las figs 19 y 20 se muestran los desplomos de los componentes L y T de las esquinas suroeste y noreste de la torre, en el periodo comprendido del 31 de octubre de 2011 al 31 de diciembre de 2014.

En la fig 19 se observa que el valor de los desplomos del componente L disminuyó a lo largo de todo el periodo (2011-2014), por lo que la torre presentó una recuperación en este componente de 2.38 cm.

En la gráfica del componente T se aprecia que los desplomos tienden a disminuir de enero a junio y a incrementar de julio a diciembre en estos cuatro años, por ejemplo entre julio de 2012 y diciembre de 2012 los desplomos aumentaron en 2.1 cm, y en el periodo entre enero y junio de 2014 estos disminuyeron en 2.21 cm. La diferencia entre el valor del desplomo del componente T del 30 de octubre 2011 y el del 31 de diciembre de 2014 fue de 1.85 cm por lo que en este periodo de tiempo la torre presentó un aumento hacia el lado sur.

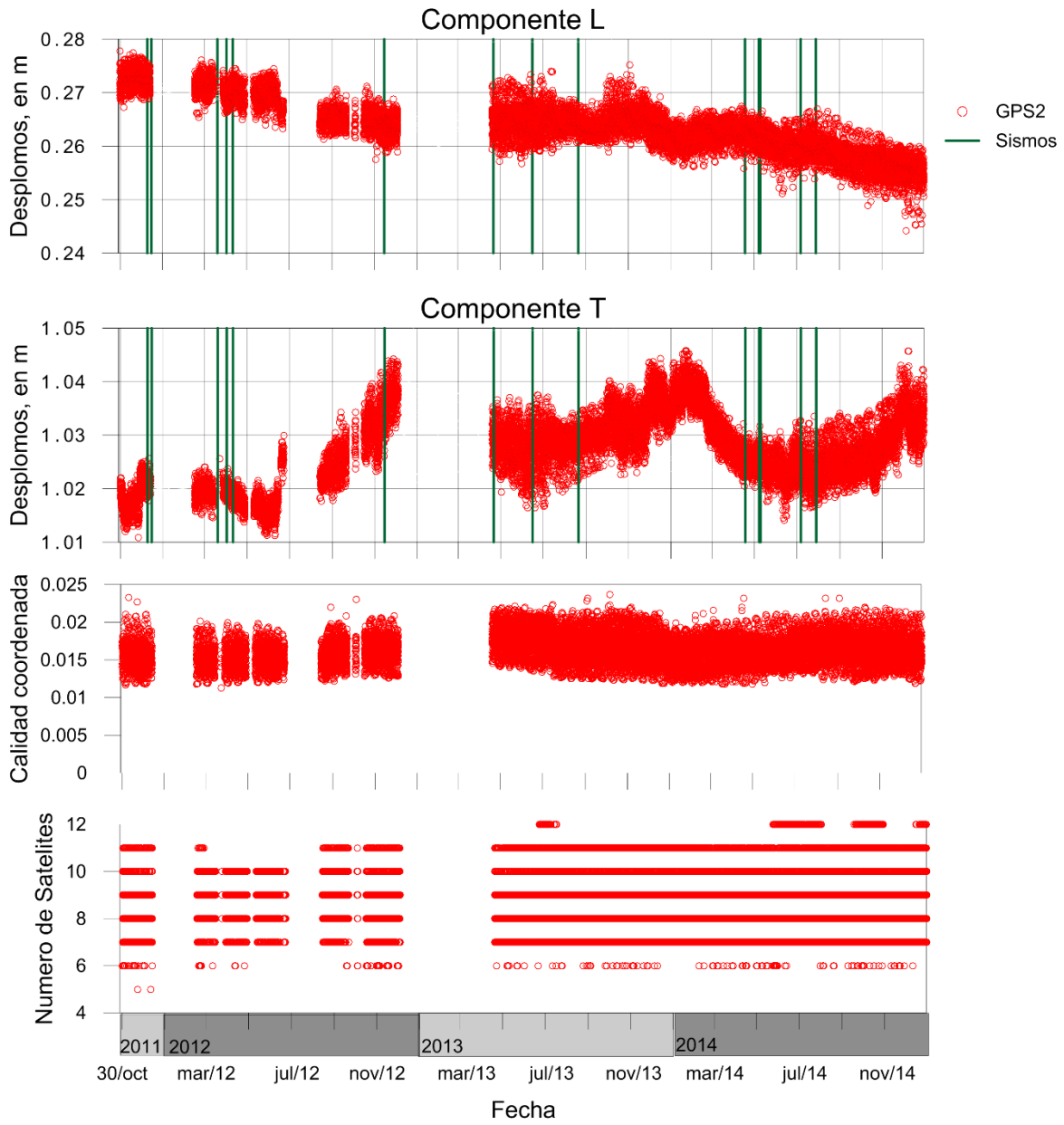


Figura 19. Desplomos en la torre GPS2

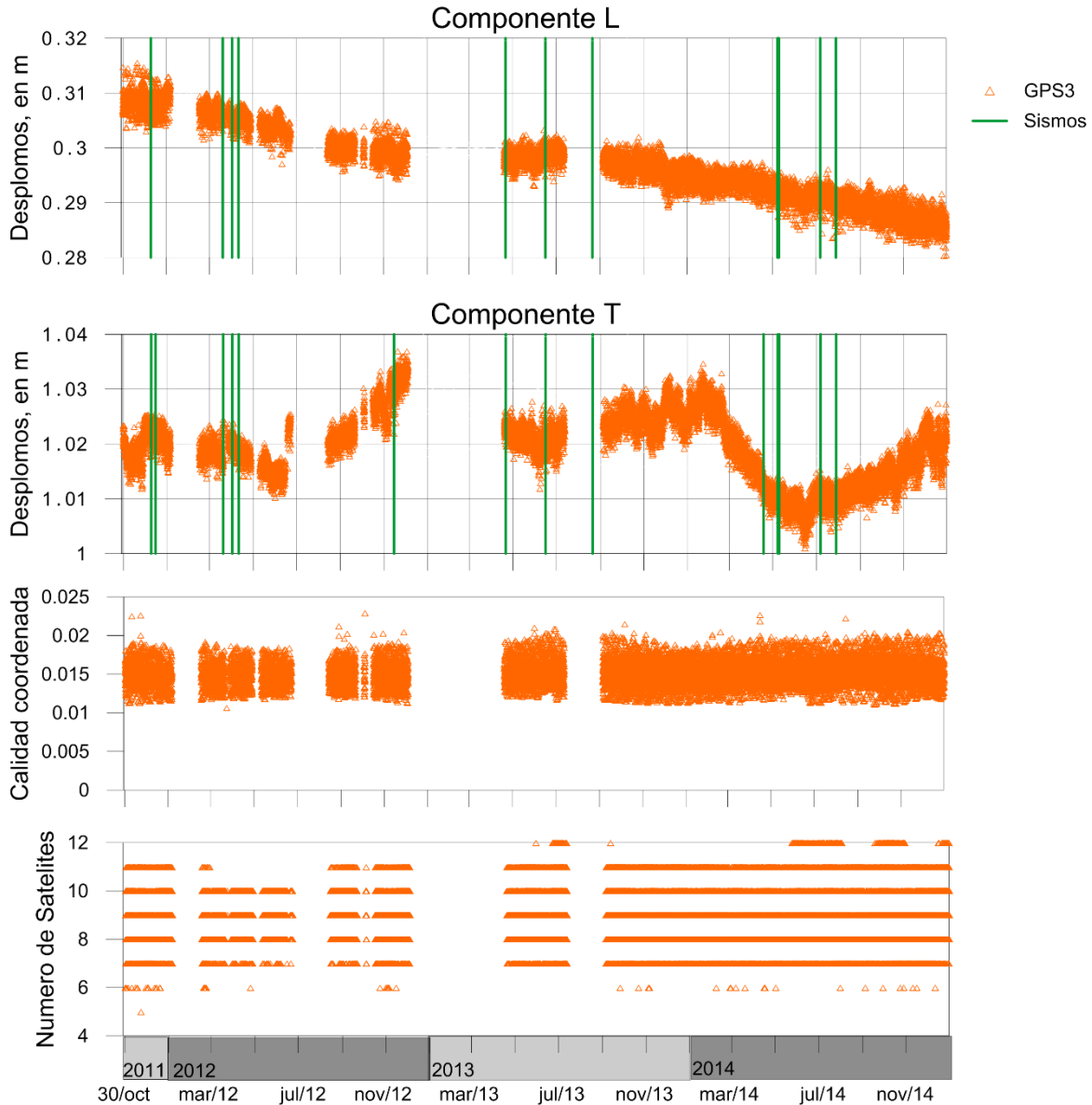


Figura 20. Desplomos en la torre GPS3

Los desplomos de los componentes L y T de la fig 20 presentan el mismo comportamiento que el de la fig 19. Los desplomos en el componente L marcan una tendencia a disminuir entre octubre de 2011 y diciembre de 2014 ,esta disminucion fue de 2.48 cm, debido a esto la inclinación de la torre mostró una ligera tendencia hacia el este.

Por otra parte el valor de los desplomos del componente T en este periodo presentó incrementos en su valor entre enero y junio , asi como la disminucion de estos entre julio y diciembre , un ejemplo de este comportamiento se muestra entre julio y diciembre de 2013, ya que los desplomos disminuyeron 1.1 cm.

La diferencia entre el desplomo del 30 de octubre 2011 y el del 31 de diciembre de 2014 fue de 0.2 cm, por lo que se observa que en este periodo a pesar de la fluctuación del valor de los desplomos, la inclinación de la torre al final de este periodo es prácticamente el mismo que el del 30 de octubre de 2011.

En la fig 21 se muestra los desplomos de los GPS2 y GPS3 en los componentes L y T. Se observa que el valor de los desplomos en el componente L del GPS2 y GPS3 disminuyen en todo el periodo y su comportamiento puede ser descrito por una recta de pendiente negativa. Por otra parte el valor de los desplomos del componente T fluctúa a lo largo de todo el periodo (2011 a 2014).

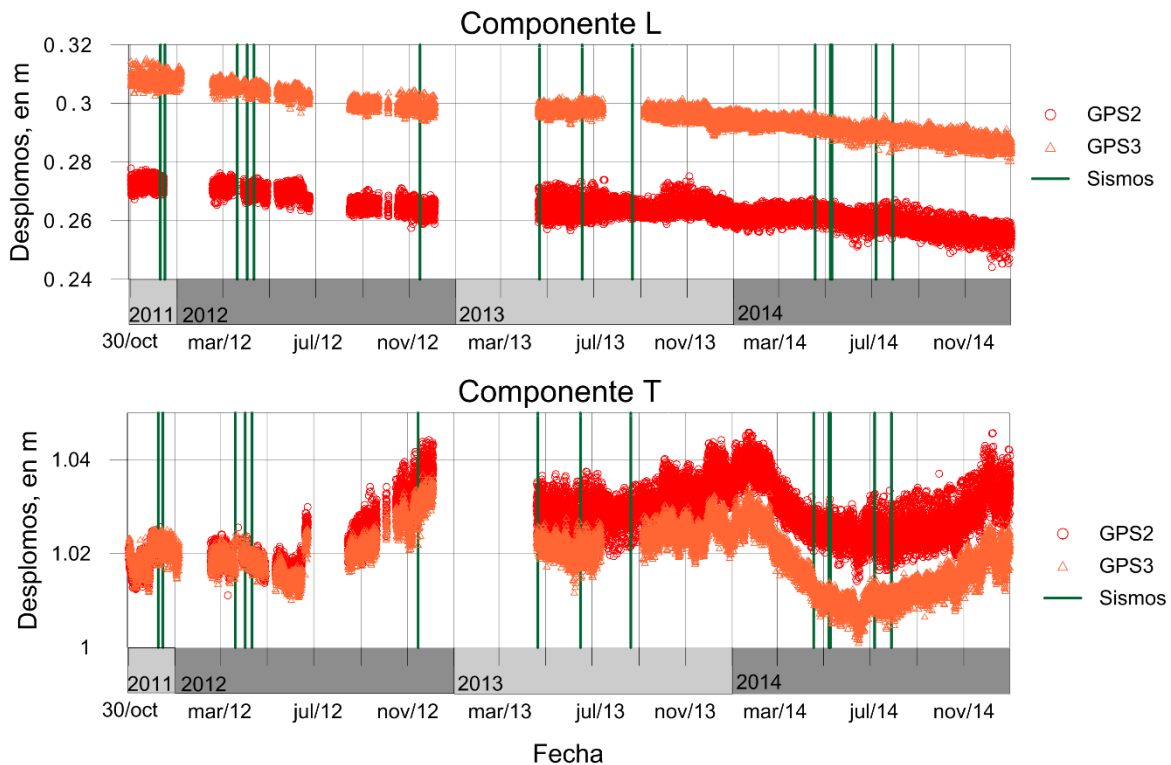


Figura 21. Comparación de desplomos L y T entre el GPS2 y GPS3

Con el fin de determinar la hora que presente el menor o mayor valor de los desplomos en la esquina suroeste (GPS2) de la torre, en la fig 22 se muestra los desplomos para diferentes horas del día. Se seleccionaron los valores registrados a las 12 a.m., 3 a.m. y 6 a.m. ya que alrededor de estas horas el número de personas que se encuentran en la torre es mínimo, por otra parte se escogieron las 3 p.m., 6 p.m. y 12 p.m. ya que en estas horas es cuando existe mayor movimiento alrededor de la torre, así mismo cabe mencionar que la temperatura es distinta entre las horas seleccionadas anteriormente.

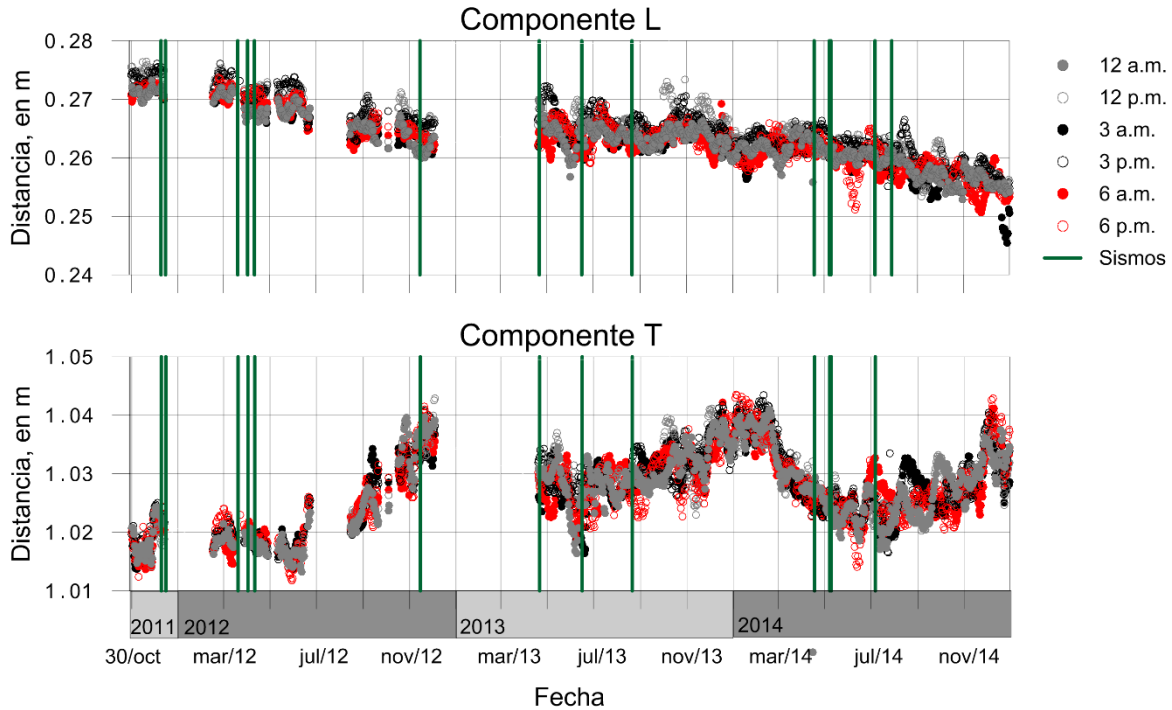


Figura 22. Desplomos GPS2

En el componente L de la fig 22 los desplomos de las 6 a.m. son los que presentan menor valor en gran parte del periodo de análisis y los de las 3 p.m. el mayor. Para el componente T es difícil de determinar qué hora es la que presenta mayor o menor valor de desplomos, ya que el valor de estos fluctúa en cada hora.

En las figs 23, 24 y 25 se muestran la comparación de los desplomos calculados antes del mediodía y los calculados después del mediodía en la esquina suroeste (GPS2), en las cuales los desplomos calculados antes del mediodía presentan un valor menor que el de los calculados después del mediodía.

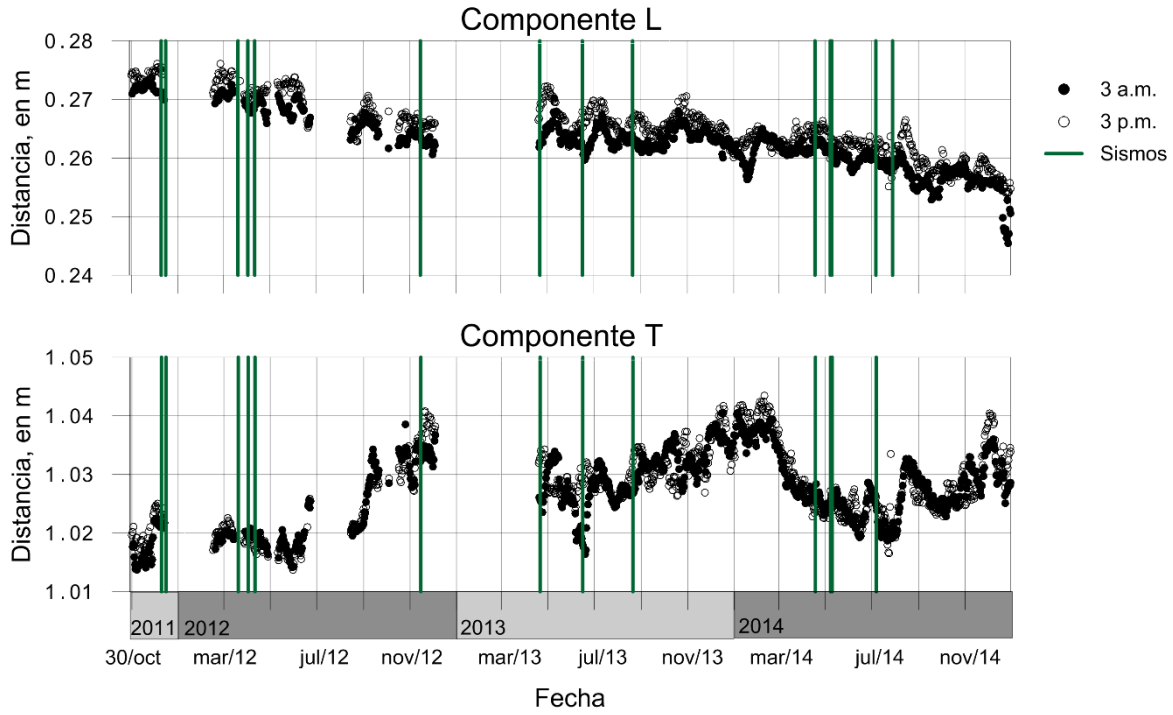


Figura 23. Desplomos GPS2

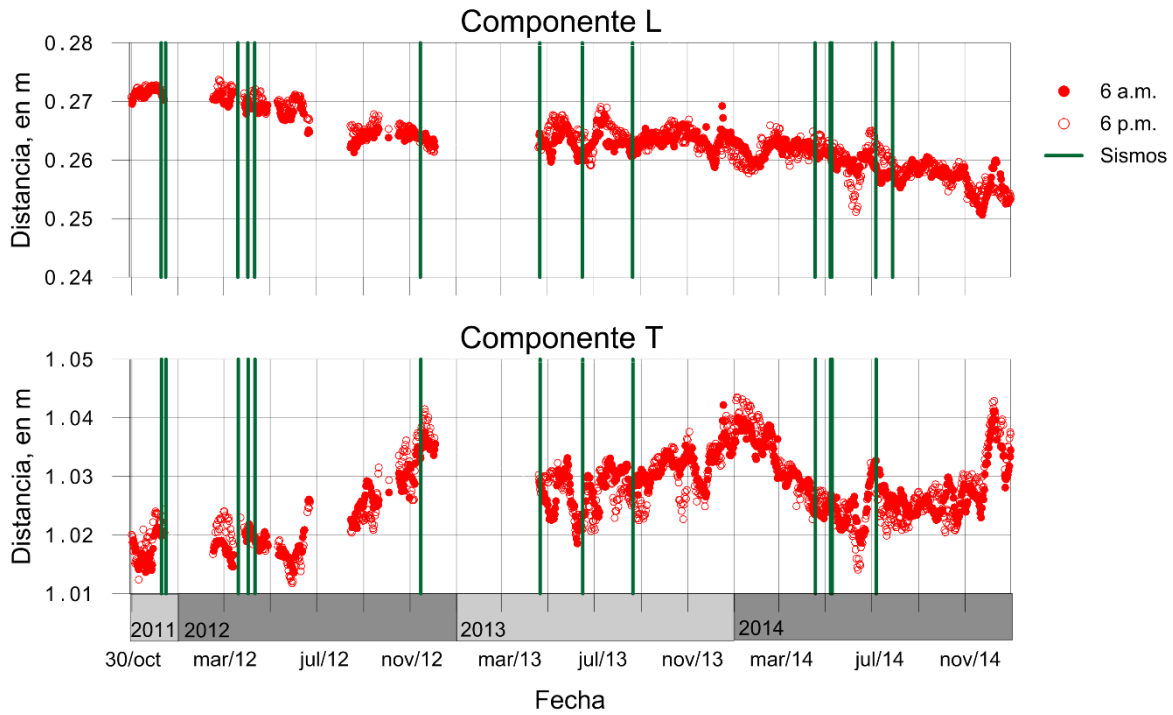


Figura 24. Desplomos GPS2

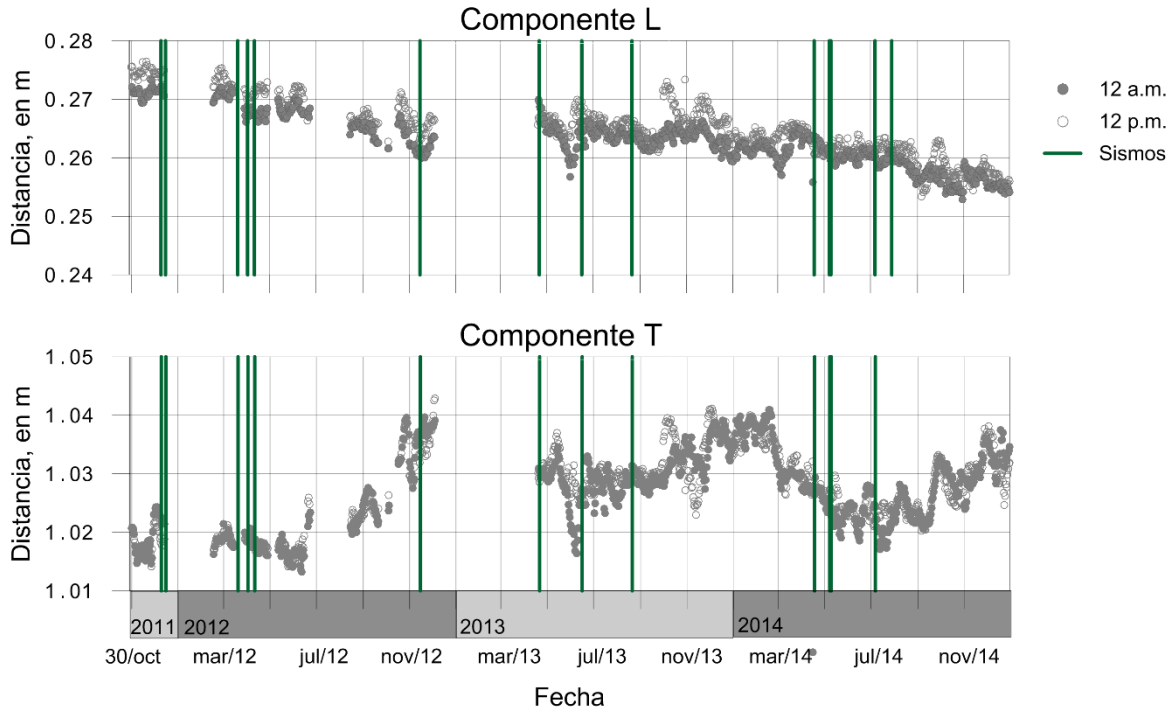


Figura 25. Desplomos GPS2

En la fig 26 se muestra el valor de los desplomos L y T para diferentes horas del día con el fin de determinar la hora que presente el menor o mayor valor de los desplomos en la esquina noreste (GPS3) de la torre.

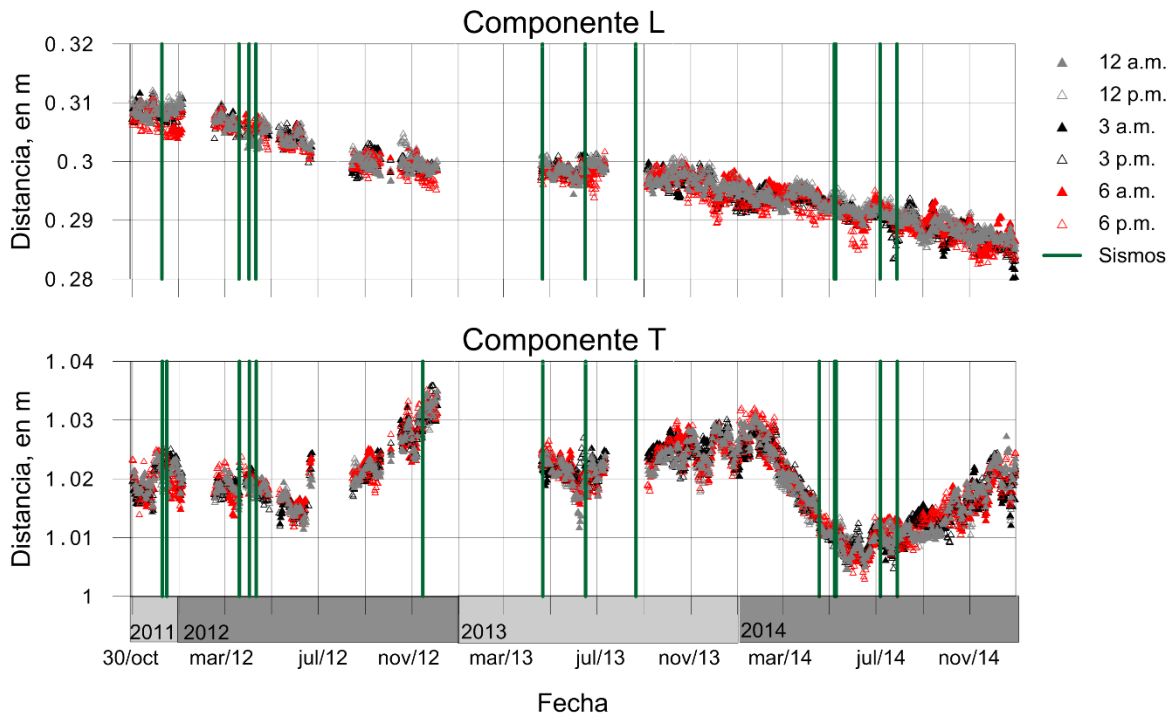


Figura 26. Desplomos GPS2

En el componente L de la fig 26 los desplomos de las 6 p.m. son los que presentan menor valor en gran parte del periodo de análisis y los de las 12 p.m. los que presentan el mayor para la esquina noreste de la torre.

En las figs 27, 28 y 29 se muestra la comparación de los desplomos calculados antes del mediodía y los calculados después del mediodía en la esquina noreste de la torre (GPS3).

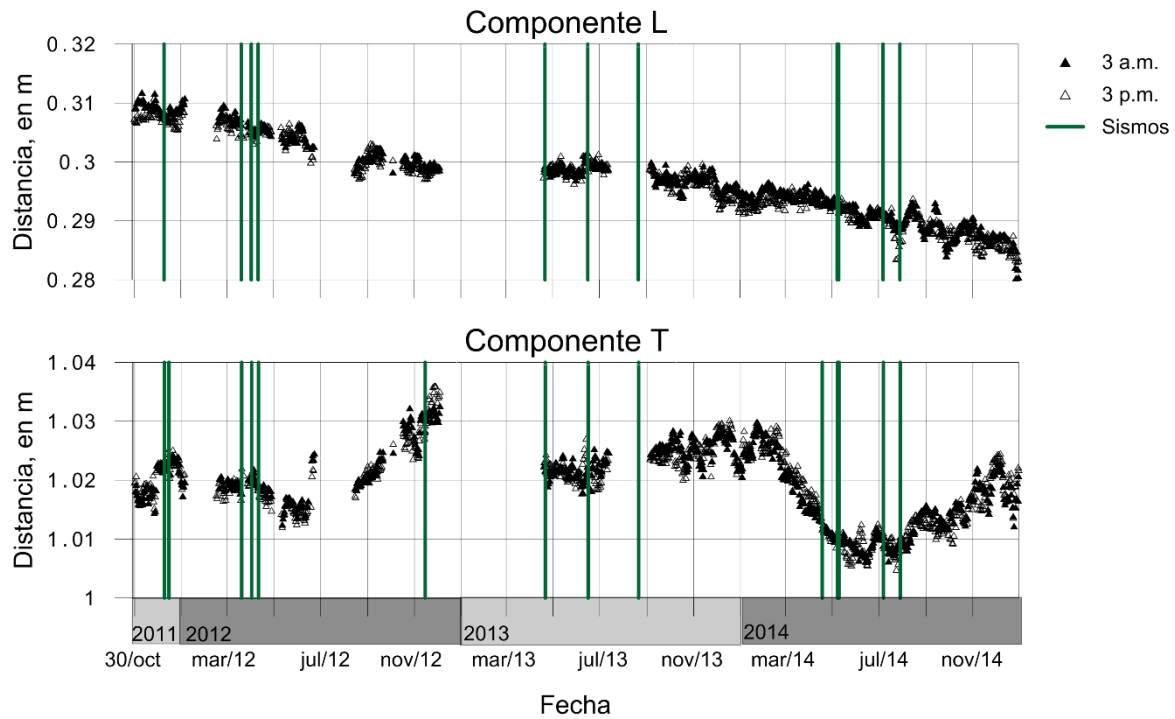


Figura 27. Desplomos GPS3

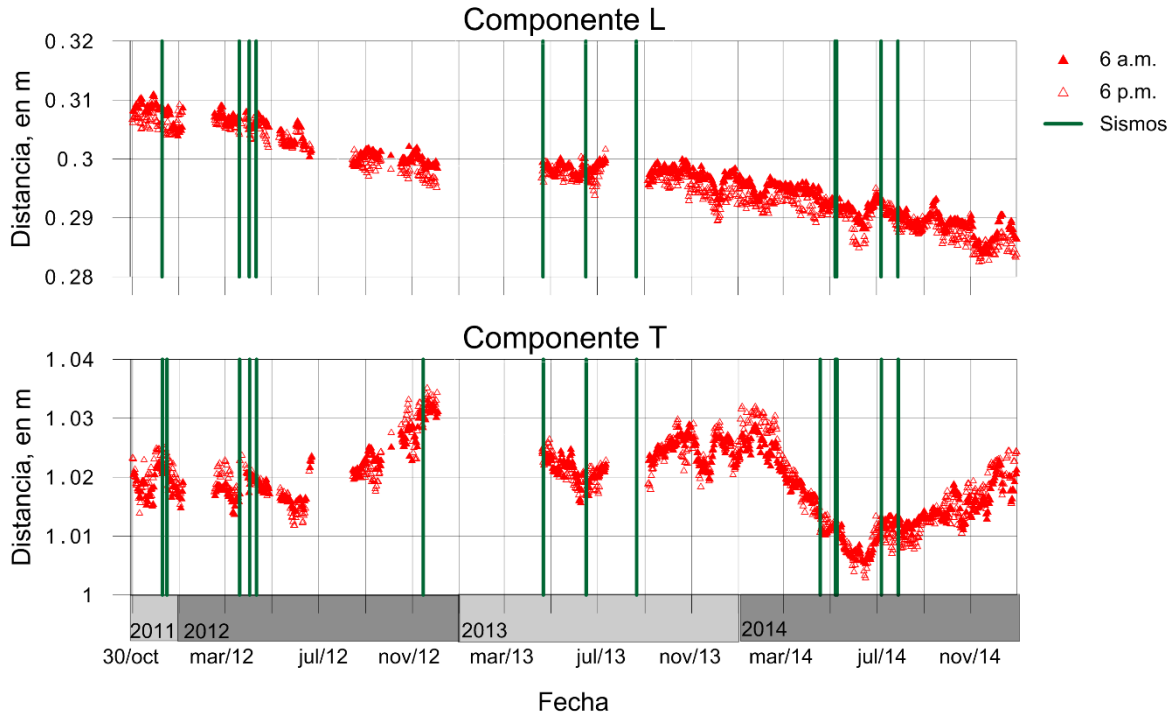


Figura 28. Desplomos GPS2

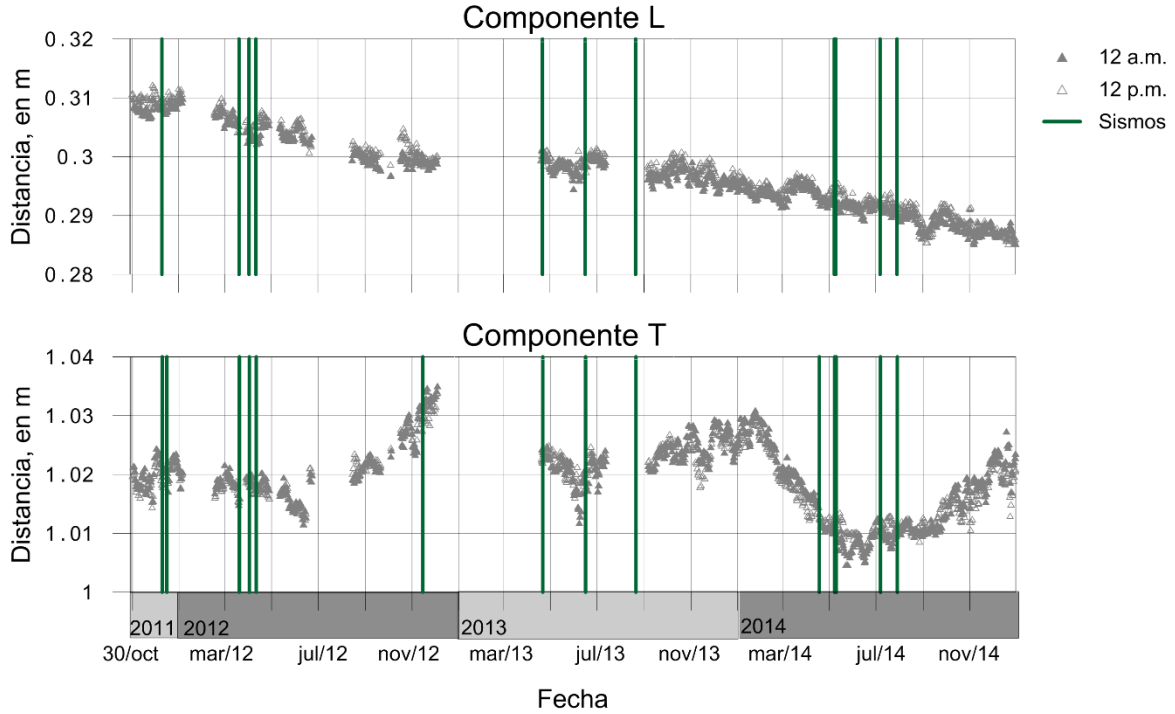


Figura 29. Desplomos GPS2

Para poder determinar si la última recimentación y el refuerzo de la estructura han contribuido en el control de la verticalidad de la torre, en la fig 30 se muestra la evolución de la resultante de los desplomos en las esquina suroeste y noreste de la torre de 1965 a 2014.

Se observa que el mayor incremento en el valor de los desplomos fue durante el periodo de 1965 a 1990, en este periodo la torre presentó una inclinación hacia la esquina suroeste de 72 cm, debido a esto en 1991 se inició la operación del sistema de bombeo e infiltración el cual ocasionó que disminuyeran los desplomos en este año, provocando que la inclinación al suroeste de la torre disminuyera. A partir de 1993 hasta 2006 los desplomos en la esquina suroeste de la torre oscilaron entre 0.975 y 1.036 m, así mismo en la esquina noreste los desplomos se mantuvieron en un rango de 0.964 y 1.012 m.

De 2006 a 2009 los desplomos presentaron un incremento de 6 y 5 cm en las esquinas noreste y suroeste de la torre respectivamente, mostrando una inclinación hacia el suroeste. Así mismo en 2009 se realizó la última intervención en la torre la cual consistió en rigidizarla con diagonales de acero en la dirección transversal y el reforzamiento de las vigas de acoplamiento con mallas de fibra de carbono, así como la colocación de 30 pilotes de control en la zona sur. A partir de octubre de 2011 hasta diciembre de 2014 los desplomos en la esquina suroeste mantuvieron su valor entre 1.052 y 1.071 m y los de la esquina noreste entre 1.061 y 1.075 m.

Cabe mencionar que los eventos sísmicos no tuvieron influencia sobre el aumento o disminución del valor de los desplomos en la torre.

Tabla 8. Desplomos en m

Desplomos en m						
Fecha	Esquina noreste			Esquina suroeste		
	L	T	Resultante	L	T	Resultante
18/may/1993 (SCT)	0.297	0.917	0.964	0.315	0.923	0.975
29/dic/2004 (GTEC)	0.283	0.944	0.986	0.284	0.946	0.988
01/dic/2006 (TGC)	0.262	0.978	1.012	0.269	1.000	1.036
10/jun/2009 (DGOC)	0.265	1.035	1.068	0.330	1.035	1.086
29/sep/2009 (DGOC)	0.245	1.030	1.059	0.323	1.041	1.090
22/feb/2010 (DGOC)	0.310	1.000	1.047	0.265	1.040	1.073
30/dic/2010 (DGOC)	0.302	0.998	1.043	0.262	0.997	1.031
30/oct/2011 (II UNAM)	0.310	1.020	1.066	0.271	1.017	1.052
12/nov/2011 (II UNAM)	0.309	1.017	1.062	0.273	1.016	1.052
20/mar/2012 (II UNAM)	0.306	1.020	1.064	0.271	1.022	1.058
29/nov/2012 (II UNAM)	0.299	1.033	1.075	0.264	1.038	1.071
20/abr/2013 (II UNAM)	0.299	1.023	1.066	0.265	1.029	1.063
24/oct/2013 (II UNAM)	0.298	1.023	1.065	0.265	1.030	1.063
16/mar/2014 (II UNAM)	0.294	1.020	1.061	0.262	1.030	1.063
31/dic/2014 (II UNAM)	0.286	1.022	1.061	0.255	1.035	1.066

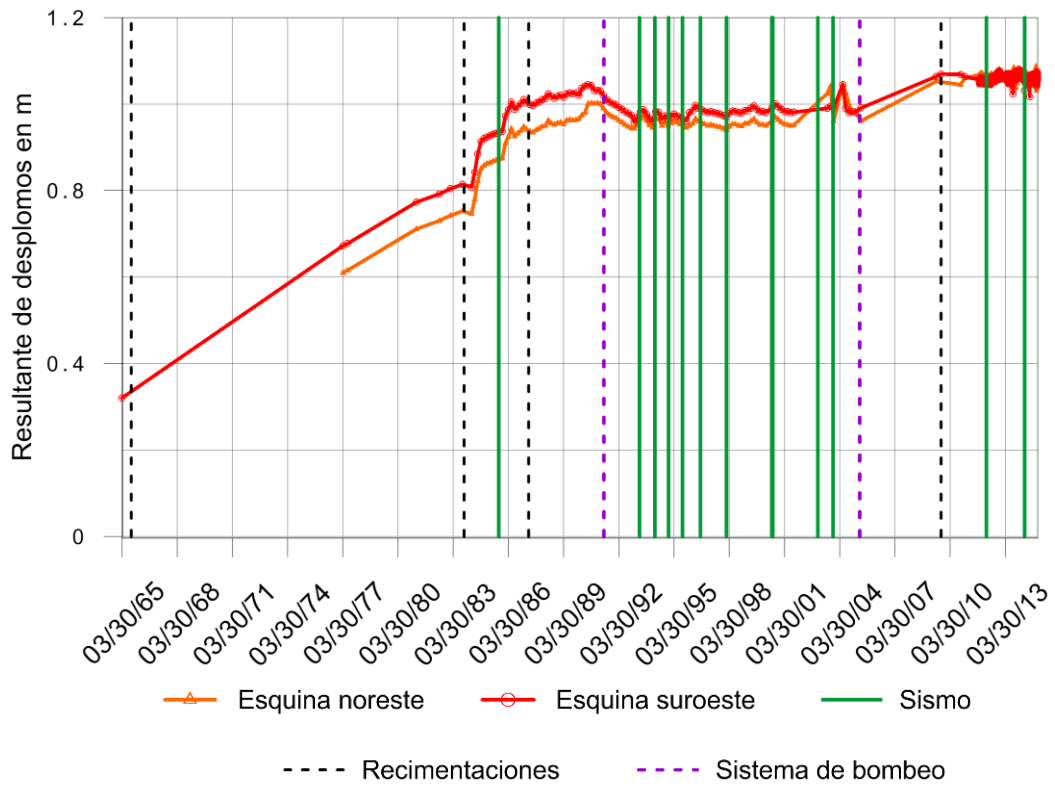


Figura 30. Historia de desplomos en las esquinas suroeste y noreste de la torre del CCUT

7.2 Análisis de los desplazamientos en eventos sísmicos

En el presente trabajo se analizan los desplazamientos de la torre de tres eventos sísmicos, de los cuales dos son los que presentaron mayor aceleración del terreno entre octubre de 2011 y diciembre de 2014.

- 20 de marzo de 2012

Magnitud	A max en cm/s^2
7.4	29.2

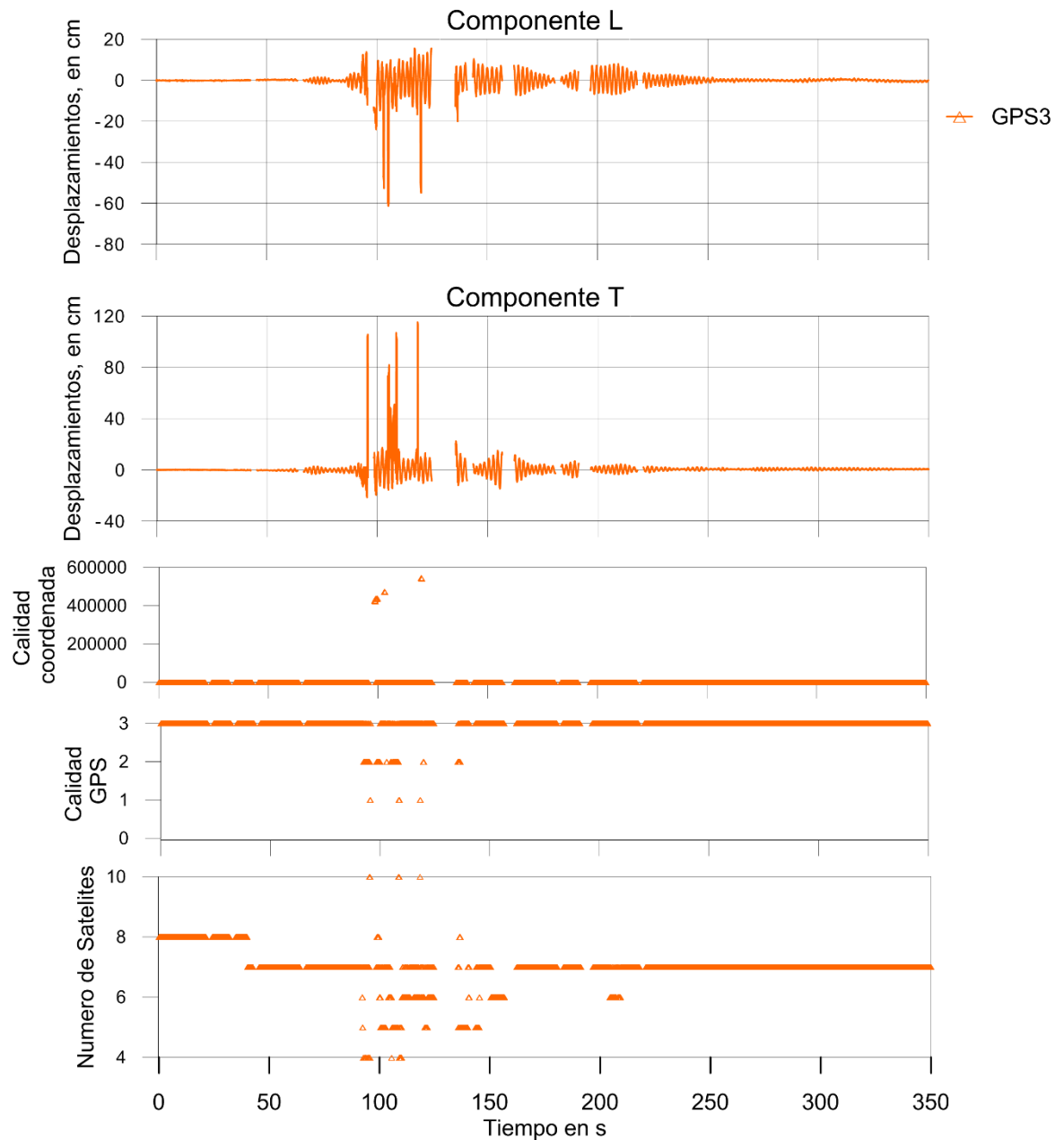


Figura 31. Desplazamientos no depurados de la esquina noreste (GPS3) de la torre correspondientes al sismo del 20 de marzo de 2012

En la fig 31 durante el evento sísmico hubo variaciones en la calidad de GPS la cual llegó a disminuir a un valor de uno, así mismo los valores de la calidad de coordenada permanecieron por arriba de 0.025 m debido a esto una parte de los desplazamientos registrados no pueden ser tomados en cuenta ya que arrojan valores de desplazamiento incorrectos. Por ejemplo el desplazamiento máximo registrado para el componente T fue de 115.2 cm y para el componente L de 61.3 cm lo cual no es correcto.

Por otra parte se determinó la gráfica de los desplazamientos para este evento sísmico depurando los desplazamientos con calidad de GPS menor a 3 y calidad de coordenada mayor a 0.025 m la cual se muestra en la fig 32. Como se puede observar ahora el desplazamiento máximo para el componente L fue de 15.57 cm y para el componente T de 15.98 cm.

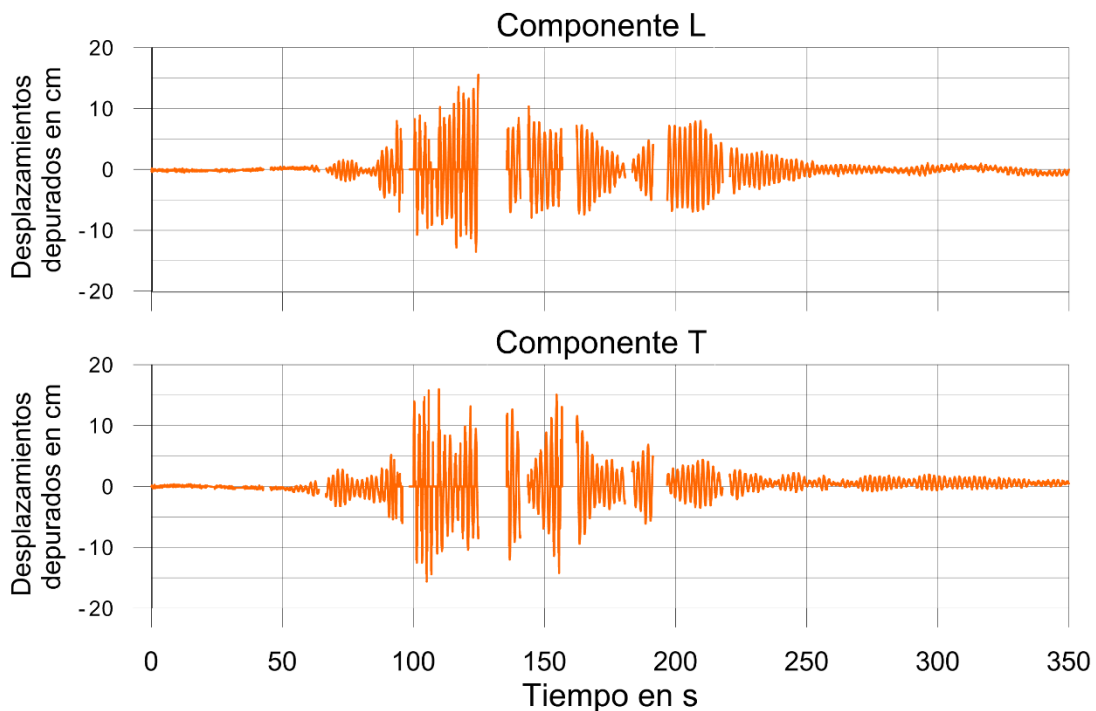


Figura 32. Desplazamientos depurados de la esquina noreste (GPS3) de la torre correspondientes al sismo del 20 de marzo de 2012

- 18 de abril de 2014

Magnitud	A max en cm/s^2
7.2	30.0

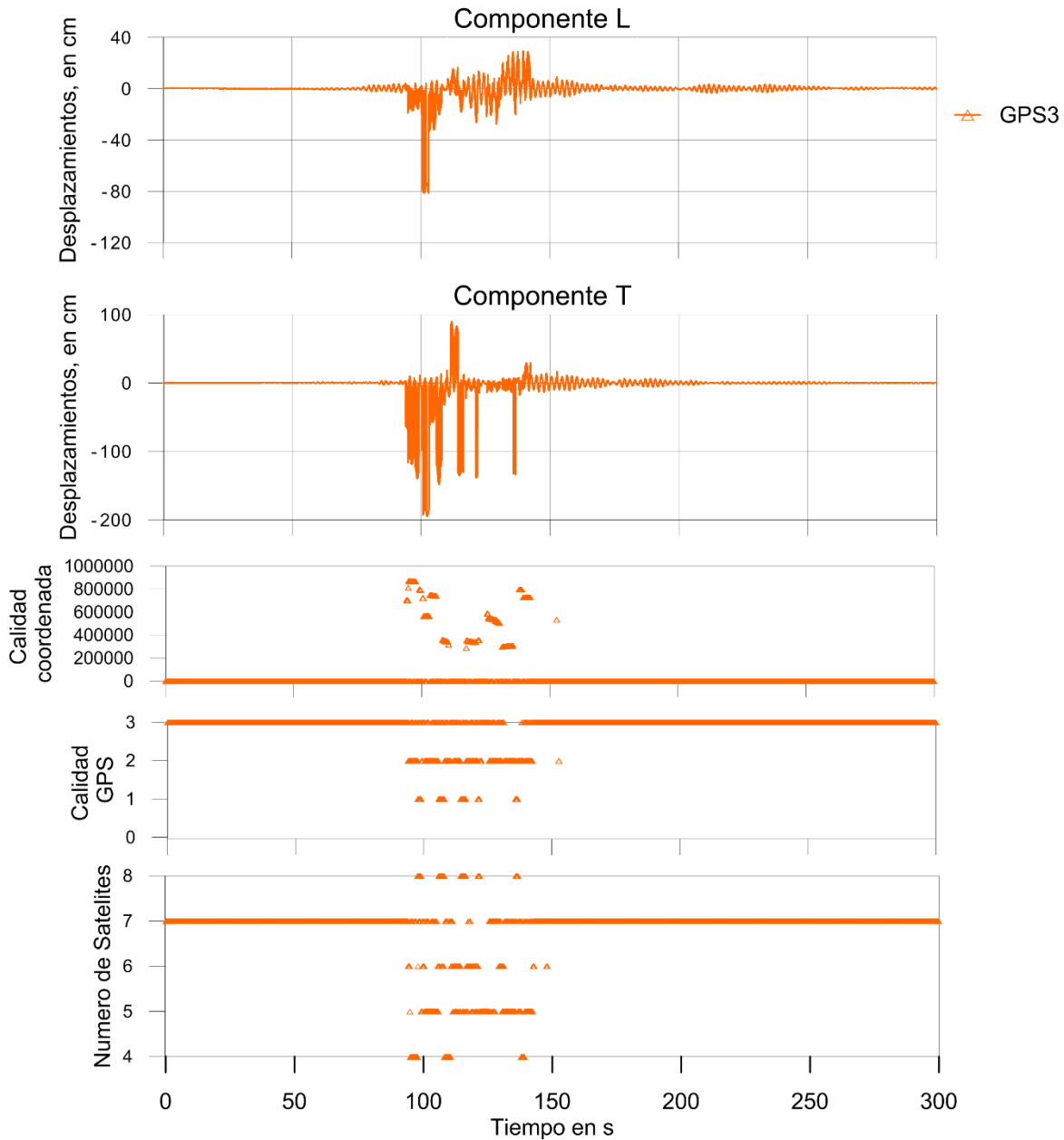


Figura 33. Desplazamientos no depurados de la esquina noreste (GPS3) de la torre correspondientes al sismo del 18 de abril de 2014

En la fig 33 los desplazamientos presentan un comportamiento similar al de la fig 31 ya que durante el evento sísmico hubo variaciones en la calidad de GPS la cual llego a disminuir a un valor de 1, de igual forma los valores de la calidad de coordenada permanecieron por arriba de 0.025 m debido a esto una parte de los desplazamientos registrados fueron depurados.

En la fig 34 se muestran los desplazamientos para este evento sísmico depurando los desplazamientos con calidad de GPS menor a 3 y calidad de coordenada mayor a 0.025 m. El desplazamiento máximo registrado para el componente L fue de 13.5 cm y para el componente T de 21.3 cm.

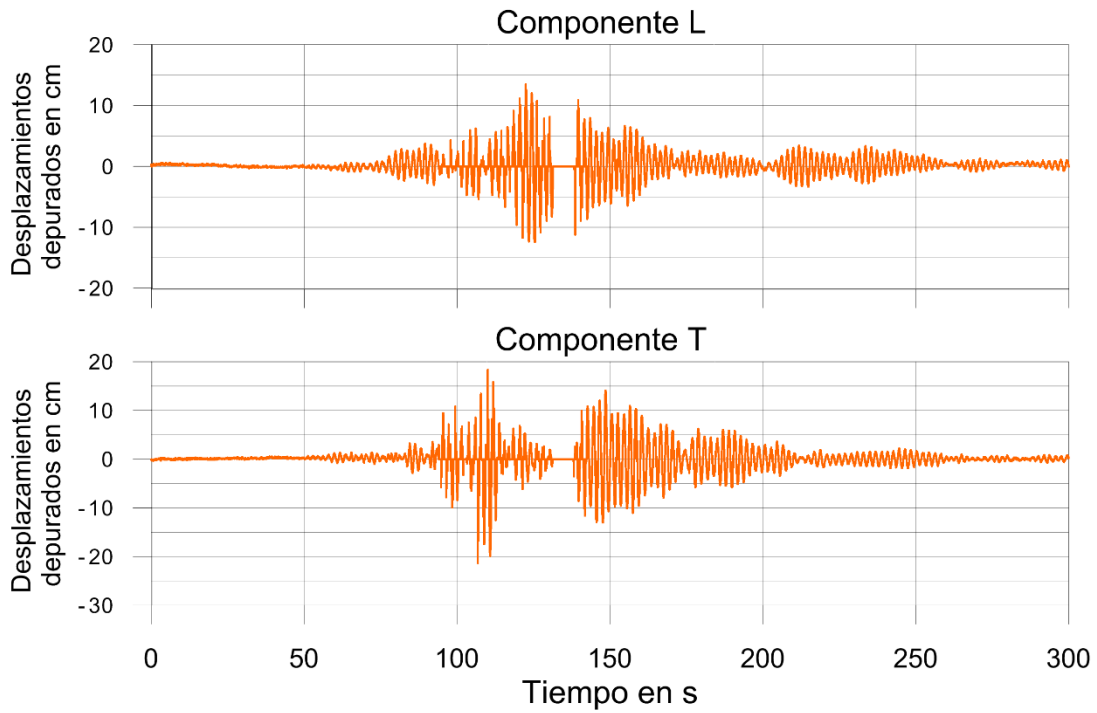


Figura 34. Desplazamientos depurados de la esquina noreste (GPS3) de la torre correspondientes al sismo del 18 de abril de 2014

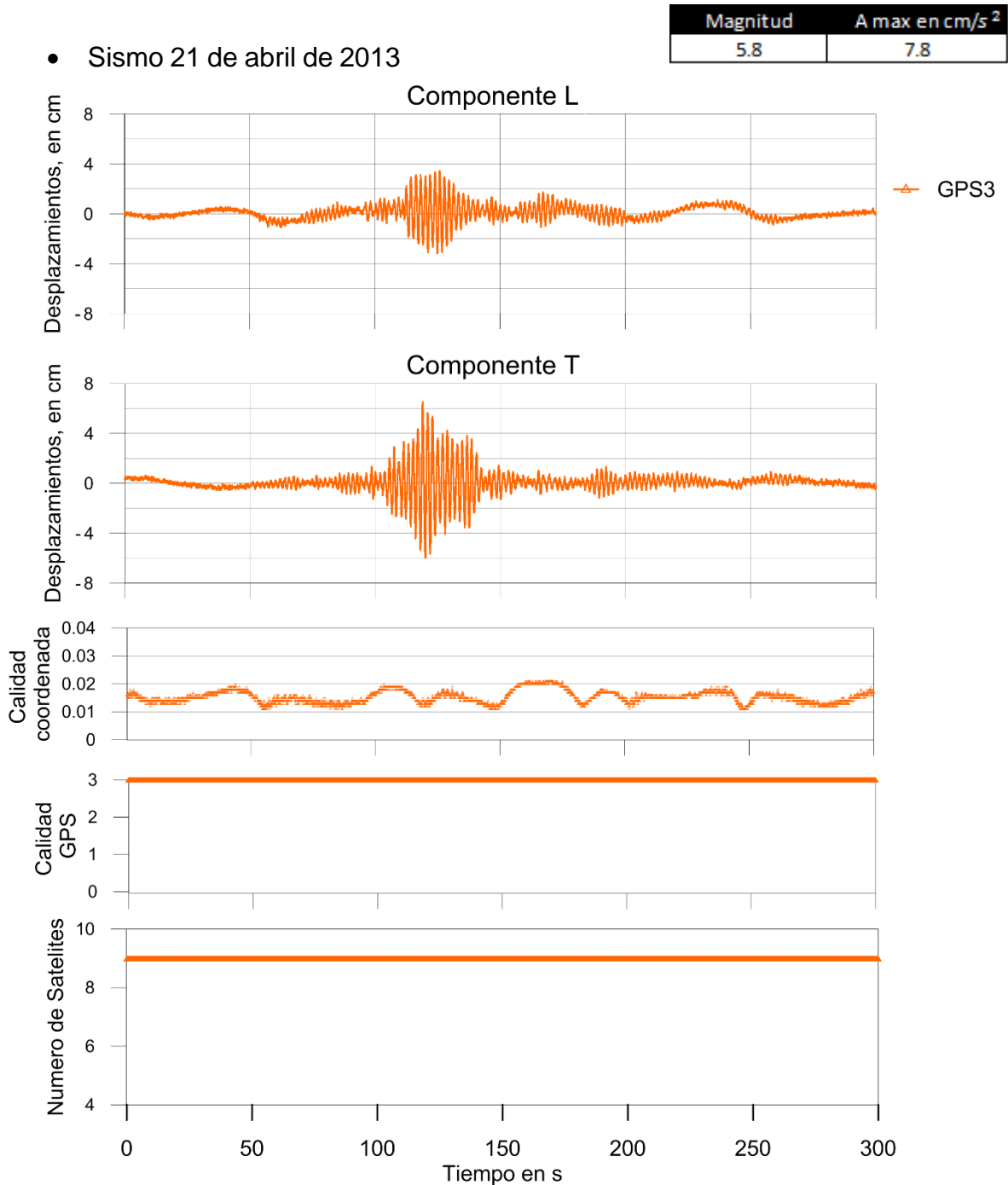


Figura 35. Desplazamientos de la esquina noreste (GPS3) de la torre correspondientes al sismo del 20 de marzo de 2012

Los desplazamientos mostrados en la fig 35 presentan una calidad de GPS igual a tres la cual se mantuvo durante el evento sísmico, así como una calidad de coordenada por debajo de 0.025 m, por lo que los desplazamientos registrados no necesitan ser depurados. También se puede observar que el desplazamientos máximo para el componente L fue de 3.4 cm y de 6.5 cm para el componente T.

Con el fin de comparar los desplazamientos obtenidos con el sistema GPS y los estimados con la red acelerográfica en las figs 36 a 38 se muestran los desplazamientos correspondientes al sismo de 20 de marzo de 2012 ,18 de abril de 2014 y 21 de abril de 2013, así mismo en la tabla 8 se presentan los desplazamientos máximos registrados y se observa que los desplazamientos mostrados por ambos sistemas son similares. Por otra parte en determinados eventos sísmicos el sistema GPS ha presentado dificultades en la medición de los desplazamientos debido a problemas con las señales entre los satélites y el receptor, pero estos han sido determinados correctamente con ayuda de la red acelerográfica.

Tabla 9. Comparación de los desplazamientos GPS y acelerómetros.

Fecha	Desplazamientos en cm							
	Esquina noreste				Esquina suroeste			
	Acelerómetro		GPS3		Acelerómetro		GPS2	
	L	T	L	T	L	T	L	T
20/03/2012	16.3	14.6	15.6	16.0	16.3	14.6		
18/04/2014	15.1	17.4	13.6	21.4	14.0	14.9	13.4	15.9
21/04/2013	3.5	5.7	3.4	6.5	3.9	4.5	3.4	5.2

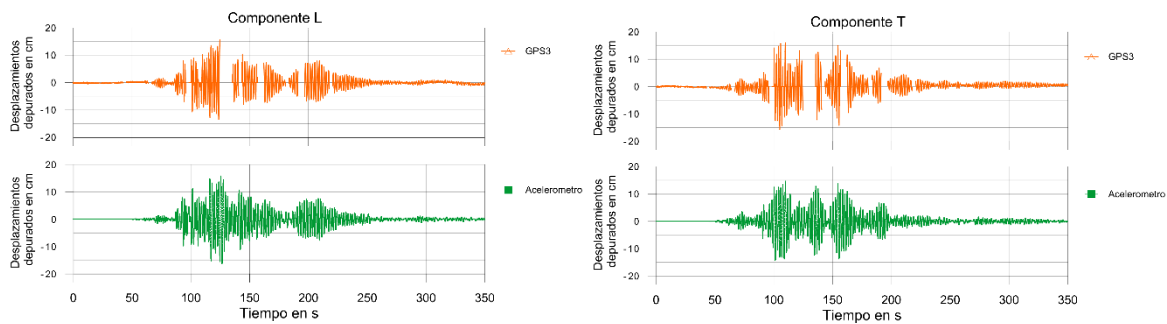


Figura 36. Comparación GPS vs acelerómetro sismo 20 de marzo de 2012

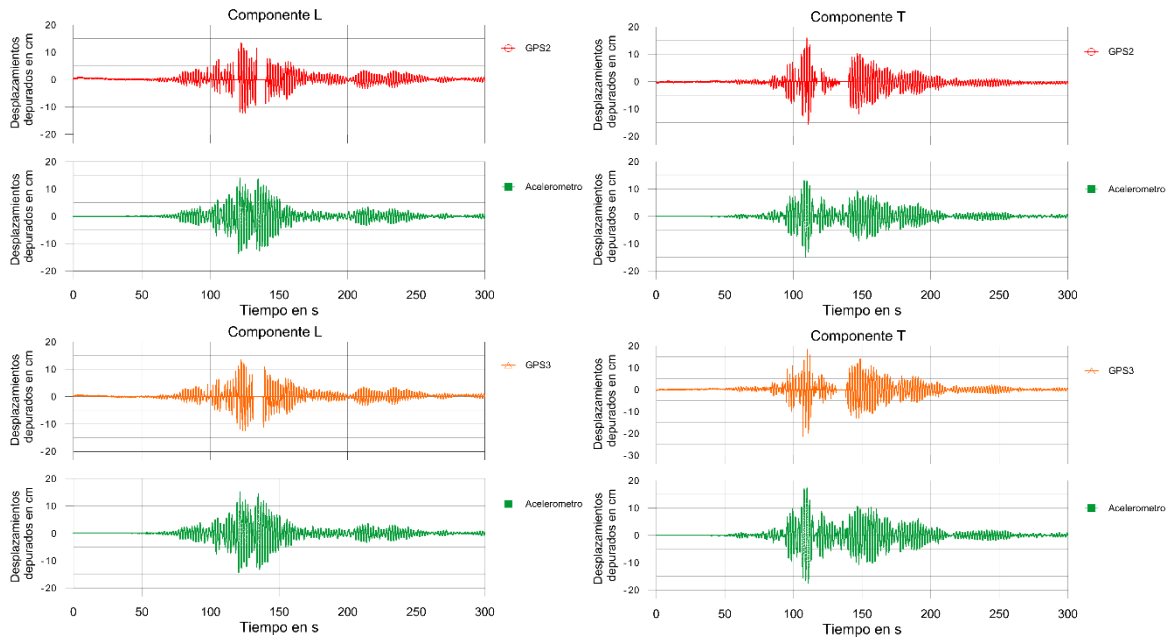


Figura 37. Comparación GPS vs acelerómetro sismo 18 de abril de 2014

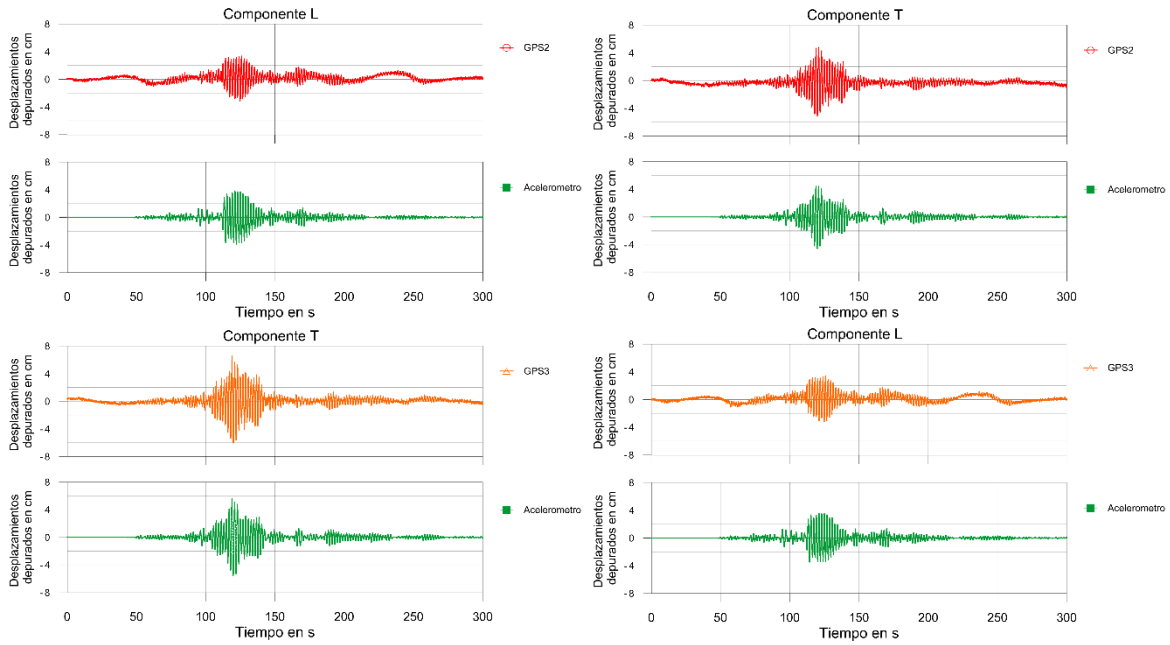


Figura 38. Comparación GPS vs acelerómetro sismo 21 de abril de 2013

Conclusiones

La instrumentación a base de acelerómetros y GPS ha ayudado estos años a la evaluación de la salud estructural de la torre del CCUT, en especial en el periodo comprendido del 30 de octubre de 2011 al 31 de diciembre de 2014 el sistema GPS ha contribuido al monitoreo de la verticalidad, los resultados obtenidos indican que estos últimos cuatro años el valor de la resultante de los desplomos se ha mantenido en un intervalo de 1.052 a 1.071 m para la esquina suroeste y de 1.061 a 1.075 en la esquina noreste.

La diferencia que han tenido los desplomos desde el 30 de octubre de 2011 hasta el 31 de diciembre de 2014 fue de 1.4 cm, lo cual sugiere que el refuerzo de la torre y la última recimentación han contribuido a que las variaciones de estos se mantengan pequeños respecto a los presentados en el periodo de 1965 a 1990, de igual forma el valor de estos no se vio afectado por los diferentes eventos sísmicos.

En general el valor de los desplomos en el componente L de las esquinas suroeste y noreste (GPS2 y GPS3) disminuye de octubre de 2011 a diciembre de 2014 y su comportamiento puede ser descrito por una recta de pendiente negativa, así mismo los desplomos muestran una variación de 0.6 cm por año en este periodo, siendo menor al presentado en 2009 el cual fue aproximadamente de 1.1 cm por año. Por otra parte los desplomos del componente T presentan fluctuación en su valor a lo largo del periodo de 2011 a 2014, ya que los desplomos tienden a disminuir de enero a junio y a incrementarse de julio a diciembre.

Así mismo en el componente L de la esquina suroeste (GPS2), los desplomos correspondientes a los de las 6 a.m. y de las 3 p.m. son los que presentan menor y mayor valor en gran parte de octubre de 2011 a diciembre de 2014, de igual forma las 6 p.m. y 12 p.m. son las horas en las cuales se presentan el menor y mayor valor de los desplomos para la esquina noreste (GPS3). Para el componente T no fue posible establecer una hora representativa para el menor y mayor valor de los desplomos debido a la fluctuación de su valor en todo el periodo.

Por otra parte con las gráficas de los eventos sísmicos registrados con el sistema GPS y la red acelerográfica se muestra que los valores de los desplazamientos estimados con cada sistema son similares. Así mismo, en determinados eventos sísmicos el sistema GPS ha presentado dificultades en la medición de los desplazamientos debido a problemas con las señales entre los satélites y el receptor.

Con la comparación de los desplomos obtenidos de mediciones topográficas y los obtenidos con el sistema GPS se muestra que las diferencias entre éstos son del orden de milímetros, por lo que el sistema GPS ha demostrado un buen desempeño en el monitoreo de la verticalidad de la torre.

Referencias

Ávila, J.A., Torres, J.C., Loera, S., Alcocer, S. y Meli R. (2009), "Revisión de los aspectos generales estructurales del proyecto de rehabilitación del Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT), ciudad de México", XVII, Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla.

Ayers H. (2011), "GNSS (GPS and GLONASS) Positioning used in Land Surveying and Engineering" Leica Geosystems Manitoba, Canada.

Çelebi M. y Sanli A. (2001), "GPS Successfully Monitoring Dynamic Response of a Tall Building in San Francisco: Implications". Proceedings of the 33rd Joint Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources Panel on Wind and Seismic Effects.

Langley R. (1999), "Dilution of Precision", GPS World, University of New Brunswick.

López-Acosta, N.P. y Ávila, J.A. (2007), Anexo 6.13 del Libro Blanco del Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT): Proyecto de rehabilitación de la estructura y cimentación de la Torre del CCUT, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Murià-Vila D., Rodríguez G., Mendoza M., Aldama B., Loera S., Camargo J., Ávila J.A., Meli R. y Cruz C. (2009), "Instrumentación del Centro Cultural Universitario Tlatelolco", Gobierno del Distrito Federal, proy. 7524.

Murià-Vila. D., Camargo J., Aldama B., Rodríguez G., Aguilar L., Ayala M. (2013), "Monitoreo de la salud estructural de un edificio instrumentado con acelerómetros y GPS". Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Boca del Rio, Veracruz.

Nickitopoulou A., Protopsalti K. y Stiro S. (2006), "Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises", Geodesy and Geodetic Applications Lab., Department of Civil Engineering, University of Patras.

Zogg J. (2002), "GPS Basics– Introduction to the System Application Overview", U- Blox ad.

Agradecimientos:

Quisiera antes que nada dar gracias a dios y a mi familia por el apoyo que me han brindado a lo largo de toda mi vida. Así mismo quisiera agradecer al Dr. David Murià Vila por haberme brindado su apoyo y conocimiento en la elaboración de este trabajo, de igual forma quisiera agradecer al Dr. José Camargo Perez a quien considero un amigo, por su apoyo y sus consejos para el desarrollo del presente trabajo.