



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“MONITOREO DE UN EDIFICIO ALTO CON EL USO DE UN  
SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL Y UNA RED  
ACELEROGRÁFICA”**

**T E S I S**

**PRESENTADA POR:**

**DANIEL BARRIOS RAMÍREZ**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR: M.I. GERARDO RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ**

**MÉXICO, D.F. 2012**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>OBJETIVOS Y ALCANCES.....</b>	<b>8</b>
<b>1. IMPORTANCIA DE LA TOPOGRAFÍA EN LA INGENIERÍA CIVIL.....</b>	<b>9</b>
1.1. PRINCIPALES ASPECTOS DE LA RELACIÓN ENTRE TOPOGRAFÍA E INGENIERÍA ESTRUCTURAL .	9
1.2. EJEMPLOS DEL USO DE LOS AVANCES MÁS RECIENTES EN TOPOGRAFÍA EN LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL.....	10
<b>2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS).....</b>	<b>13</b>
2.1. INTRODUCCIÓN.....	13
2.2. FUNCIONAMIENTO GENERAL .....	14
2.3. FUNDAMENTOS DE POSICIONAMIENTO CON GPS.....	17
2.4. SISTEMAS DE COORDENADAS DE REFERENCIA PARA GPS .....	24
2.4.1. <i>El sistema coordinado para el satélite.....</i>	<i>24</i>
2.4.2. <i>El sistema coordinado geocéntrico.....</i>	<i>25</i>
2.4.3. <i>El sistema coordinado geodésico.....</i>	<i>26</i>
2.4.4. <i>El sistema de proyecciones UTM.....</i>	<i>27</i>
2.5. MÉTODOS GPS CINEMÁTICOS EN TIEMPO REAL (RTK) .....	31
<b>3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UNA RED ACELEROGRÁFICA EN UNA ESTRUCTURA .....</b>	<b>32</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	32
3.2. FUNCIONAMIENTO GENERAL .....	33
3.3. MÉTODOS PARA IDENTIFICAR PARÁMETROS ESTRUCTURALES .....	36
3.4. OBTENCIÓN DE RESULTADOS .....	38
<b>4. APLICACIÓN DE UN SISTEMA GPS Y UNA RED ACELEROGRÁFICA EN UN EDIFICIO ALTO.....</b>	<b>39</b>
4.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO .....	39
4.2. PRINCIPAL PROBLEMÁTICA ESTRUCTURAL .....	43
4.3. DESCRIPCIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MONITOREO .....	46
4.3.1. <i>Monitoreo con el sistema de posicionamiento global GPS.....</i>	<i>48</i>
4.3.2. <i>Monitoreo con red acelerográfica.....</i>	<i>50</i>
<b>5. RESULTADOS DE LAS DOS OPCIONES DE MONITOREO .....</b>	<b>51</b>
5.1. RESULTADO DEL MONITOREO CON GPS.....	51
5.1.1. <i>Registros sísmicos con GPS.....</i>	<i>51</i>
5.1.2. <i>Monitoreo continuo de la verticalidad del edificio.....</i>	<i>56</i>
5.2. RESULTADOS CON EL MONITOREO CON RED ACELEROGRÁFICA .....	61
<b>6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DEL MONITOREO CON LAS DOS PROPUESTAS .....</b>	<b>67</b>
<b>7. COMENTARIOS FINALES .....</b>	<b>74</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>78</b>

---

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se exponen algunos de los aspectos más relevantes de los primeros resultados obtenidos en el monitoreo de un edificio de 22 niveles instrumentado de manera simultánea con una red de acelerómetros y un sistema GPS. El estudio se centra en la aplicación, métodos de procesamiento y análisis de información de cada sistema. Posteriormente se realiza una comparación y evaluación general de la estructura que se estudia, con base en la comparación y complemento de resultados obtenidos.

La importancia de este estudio reside en conocer más sobre el comportamiento de la estructura en estudio ante distintos tipos de solicitaciones. La red acelerográfica permitirá conocer la respuesta de la estructura ante solicitaciones dinámicas, como pueden ser las de un sismo, y de manera complementaria el sistema GPS ayudará a determinar la variación de la verticalidad de la estructura, la cual puede presentar variaciones importantes debido a la influencia de las condiciones que se tienen del suelo, tal como una deformación permanente o un hundimiento diferencial.

Sin importar que se tengan ya bastos reglamentos y normas para un adecuado diseño y una correcta construcción, en México se requiere de investigaciones que se realicen en condiciones climáticas y de suelos similares sobre las que se quiere diseñar y no únicamente añadir parte de la experiencia que se ha tenido con otras estructuras.

Las condiciones de suelo que se tienen en México han representado a lo largo del tiempo dificultades a muchísimas estructuras, como a la del presente estudio, pero más allá de hablar sobre las causas (extracción de agua, terreno arcilloso) de estas dificultades que provocan los hundimientos, se hará un enfoque evaluativo general sobre la estructura, a la par de presentar los métodos para el análisis aplicados a la instrumentación y a la exposición de resultados.

---

Un aspecto destacado en el ámbito de la instrumentación es que no existe información documentada sobre la aplicación de sistemas de GPS para el monitoreo de estructuras en América Latina, a pesar de que en algunos otros países como son E.U., Japón, China, Singapur, España, entre muchos otros, cuentan con investigaciones, estudios y documentación sobre la aplicación del sistema GPS desde hace ya más de una década.

Uno de los principales motivos de aplicación de la instrumentación ha sido el de detectar daños en estructuras. Al utilizar una red de acelerómetros o un sistema GPS, se está recurriendo a un método de detección de daños no destructivo, por lo que ha ganado buena atención en los últimos años y con gran ayuda en los avances tecnológicos. Uno de los principales logros que se tienen en este campo, es el poder realizar el procesamiento de resultados en tiempo real o casi tiempo real.

La instrumentación ha formado ya por varias décadas, parte importante en el campo de la investigación y en trabajos específicos de ingeniería civil en los que se requiere, entre otras cosas, conocer información detallada de la forma en que se está llevando la construcción en comparación al diseño realizado, una calibración a modelos gráficos o una medición para conocer las condiciones en las que se encuentra una estructura comparada a un tiempo pasado.

---

## ANTECEDENTES

El objetivo de medir los desplazamientos en estructuras se ha logrado al paso del tiempo mediante tecnologías como los strain-gages, acelerómetros, sensores de fibra óptica, sensores acústicos y técnicas de fotografía satelital, aérea, radar o de video. La incursión del GPS en esta área no es tan común como estas herramientas, pero su aceptación ha sido buena.

El acercamiento fundamental de tecnologías de medición considera la respuesta de estructuras en condiciones de carga naturales o de servicio y las medidas de esta respuesta normalmente se obtienen con sensores de aceleración. Como estas aceleraciones medidas son la segunda derivada de los desplazamientos de la estructura, los acelerómetros graban únicamente cambios en el desplazamiento y de ahí que nunca darán una posición absoluta de la estructura (KIJEWski-COREA, 2005)

La red de acelerómetros ha sido la elección en la instrumentación de estructuras durante mucho tiempo pero se ha demostrado por investigaciones importantes, que la aplicación de los sistemas de GPS es, más que una buena alternativa, un enorme complemento a los resultados que se dan con los acelerómetros.

Debido a que los acelerómetros no pueden realizar una medición en la deformación, se propuso el sistema de GPS como una excelente opción al monitoreo, si las posiciones absolutas se pueden medir, entonces la inclinación gradual y los asentamientos diferenciales de la estructura pueden ser observados en el tiempo, estos desplazamientos se conocen como estáticos. Las variaciones rápidas de posición debido al paso de vehículos o metro, cargas de viento o sismos, se conocen como desplazamientos dinámicos.

Los principales estudios centrados en la aplicación de un sistema GPS con el de una red de acelerómetros se han realizado en estructuras de gran tamaño y de periodos largos, en las que se logró la captura de desplazamientos en acciones de viento o sismo.

Estudios preliminares han probado la factibilidad técnica de usar GPS y acelerómetros en complemento para medir deformaciones debidas a viento, tráfico, sismos y eventos de cargas similares p.ej. Hong Kong (Ding et al, 2002), UK (ASHKENAZI AND ROBERTS, 1997), USA (KILPATRICK et al, 2003), Singapore (BROWNJOHN et al, 1998) and Japan (TAMURA et al, 2002).

---

## **OBJETIVOS Y ALCANCES**

Se presentan dos objetivos fundamentales, uno es el estudio y la comparación de la instrumentación con el sistema GPS y la red de acelerómetros, la cual se realiza con la descripción de métodos aplicados, análisis y la presentación de resultados obtenidos. Esto con el fin de conocer las ventajas y desventajas que presenta cada sistema en un ejemplo práctico que es el de un edificio alto.

La comparación se realiza con información obtenida durante actividad sísmica, se presenta para ambos casos los desplazamientos obtenidos y los espectros tanto para los GPS como para los acelerómetros.

Un segundo objetivo es el de, con ayuda de la información obtenida mediante la instrumentación a lo largo del tiempo, realizar una evaluación sobre las condiciones en que se encuentra el edificio en estudio, en comparación con las condiciones que tenía la estructura antes de comenzar con la instrumentación y comparada también en tiempos previos y consecutivos a registros de sismos de magnitud considerable (sismos de magnitud igual o mayor a 4.6 grados en la escala de Richter).

La información se recopiló en mismas condiciones para el GPS y los acelerómetros ya que se tomaron para el estudio lapsos de información en mismas horas y mismos días.

Ante el costo tan elevado de programas para el análisis se presentan métodos estadísticos alternativos que pueden aplicarse como método de procesamiento de información para su posterior análisis con los que se pueden llegar a buenos resultados. También mostrar cómo se realizó la ubicación de posibles errores de GPS y red con datos poco confiables para su filtrado.

## 1. IMPORTANCIA DE LA TOPOGRAFÍA EN LA INGENIERÍA CIVIL

### 1.1. Principales aspectos de la relación entre topografía e ingeniería estructural

Toda obra civil necesita desde su planeación, la mayor información posible sobre el espacio en que se va a construir. Dónde se ubican los límites de la obra y sus dimensiones, el nivel o altura de referencia, el relieve del terreno, las construcciones existentes en su cercanía, servicios públicos como energía eléctrica, drenaje y agua potable, entre otros. La topografía se encarga de estas mediciones y estudios preliminares para representarlos gráficamente de forma precisa. Son de gran importancia ya que depende de estos la puesta en obra del proyecto.

Los estudios topográficos no son de uso único durante la planeación de un proyecto, se requieren también durante de la construcción en replanteos de obra y niveles de referencia, y después de terminada la obra ya sea para mantenimiento o remodelación. De esto, que la topografía no sólo sea importante en la ingeniería civil, sino indispensable para la planeación, construcción y mantenimiento de infraestructura.

Para la ingeniería estructural, la importancia de la topografía ha crecido en últimas décadas. Esto, en parte, gracias a la precisión que requieren los equipos de medición. Es a causa de esta precisión requerida, que avances tecnológicos han tomado forma de instrumentos funcionales, prácticos y aunque no muy económicos, sí muy exactos, en la que gran parte del logro, es que el trabajo se encuentra ya automatizado. El uso que se da a estos equipos de levantamiento topográfico en la ingeniería estructural, es el mismo que en el área de la topografía, aunque la finalidad de su aplicación no es la misma.

Para el estudio del comportamiento de las estructuras se usan aparatos de medición que permitan la evaluación de las condiciones en las que se encuentra. Usualmente estas se realizan durante dos momentos en el tiempo, la segunda medición tiene por objetivo la comparación con la primera. En otros casos se puede realizar una única medición con el objeto de medir anomalías en estructuras como las que podrían ser inclinaciones o hundimientos.



## 1.2. Ejemplos del uso de los avances más recientes en topografía en la solución de problemas de ingeniería estructural

La estación total (Fig. 1.1), el cual es un instrumento que integra en un solo equipo las funciones realizadas por un teodolito eléctrico, un medidor electrónico de distancias y un microprocesador para realizar los cálculos que sean necesarios para determinar las coordenadas rectangulares de los puntos medidos. Entre las operaciones que realiza una estación total puede mencionarse la obtención de promedio de mediciones múltiples angulares y de distancias, corrección electrónica de distancias por constantes de prismas.

Los teodolitos robóticos o estación total robótica son una nueva generación de instrumentos geodésicos que pueden grabar automáticamente cambios de coordenadas de un punto en movimiento. Se han usado para monitoreo estático y medición de desplazamientos muy lentos. La limitación se tiene por las características del equipo que tienen una frecuencia de muestreo menor a los 2 Hz no constantes y resultados con mucho ruido en muestreo de altas frecuencias, aunque existe la posibilidad de aumentar esta frecuencia hasta los 4Hz con ayuda de programación. La precisión y la calidad de resultados son muy buenas en estos equipos para frecuencias bajas y decrece a medida que se aumentan las frecuencias. (Panos, 2007)

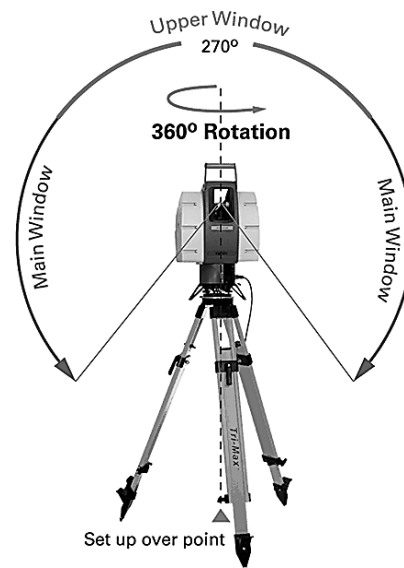


*Fig. 1.1 Estación total*

Otra herramienta diseñada para su aplicación en la topografía y provecho en la ingeniería estructural es el escáner laser (Fig. 1.2). Su función es la de crear una nube de puntos a partir de muestras geométricas en la superficie de un objeto del cual, se obtiene un modelo en el que se describe la posición en el espacio tridimensional de cada punto analizado.

El equipo rota 360 grados horizontalmente y un espejo deflece luz hacia arriba y hacia abajo. El rayo láser es usado para medir la distancia al primer objeto que encuentre su trayectoria. El Escáner se ha usado para dar seguimiento y monitoreo de estructuras, nubes de puntos comparadas en el tiempo permiten el análisis en 3D de deformaciones y cambios ocurridos en alguna estructura. Su aplicación incluye la ventaja de pasar su información a un formato CAD el cual es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten en el diseño.

Estos equipos permiten de manera eficiente, rápida y precisa, la medición donde difícilmente una persona podría realizarla. El manejo se puede hacer por una o dos personas lo cual es otra de sus ventajas. Su aplicación dentro de la ingeniería estructural es para poder medir deformaciones de elementos estructurales sometidos a pruebas dinámicas. Con una computadora se puede observar, en el caso del escáner láser, el objeto antes y después de alguna deformación.



*Fig. 1.2 Escáner Laser*

Sin duda, el mayor avance dentro del área de la topografía en los últimos años ha sido el de la implementación del sistema GPS para hacer levantamientos sin la limitante de necesitar una línea visual de lo medido, lo que permite hacer mediciones en largas distancias.

El GPS ha significado el desplazamiento de herramientas de medición topográficas como el teodolito eléctrico o la estación total, en trabajos de gran longitud. A diferencia de la estación total, el proceso de medición con un sistema GPS puede llevarse a cabo con una sola persona, logrando precisiones milimétricas y muy confiables.

Su aplicación dentro de la ingeniería estructural también ha sido de gran importancia en las últimas décadas en la función de medir deformaciones y monitoreo continuo de estructuras grandes. Aunque actualmente sólo se pueden usar para monitoreo a estructuras con rangos de frecuencia modal bajos.

El GPS puede proporcionar posición, características dinámicas y desplazamientos estáticos logrando mediciones a niveles milimétricos a través del tiempo con resultados tan buenos como los de una red de acelerómetros.



*Fig. 1.3 Receptor de sistema GPS*

## **2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)**

### **2.1. Introducción**

El sistema de posicionamiento global (GPS) abreviación de NAVSTAR GPS, es un sistema de posicionamiento que ha revolucionado e impulsado diversas actividades humanas gracias a sus múltiples ventajas, funcionalidad y bajo costo.

Fue diseñado y construido por el departamento de Defensa de Estados Unidos con fines militares como un sistema de navegación y guía global. Se comenzó en 1958 con el nombre de *Navy Navigation Satellite System (NNSS)*, también llamado *TRANSIT*. Funcionaba con el principio Doppler en el cual, se medían cambios de frecuencia de señales transmitidas por satélites a través de receptores en estaciones terrestres, este sistema estaba compuesto por 10 satélites, el primer satélite se lanzó en 1978 y la información que proporcionaba era en dimensiones de latitud y longitud.

El uso civil de este sistema comenzó en 1967 y luego del éxito de éste programa se comenzó el desarrollo de NAVigation Satellite Timing and Ranging (NAVSTAR) desarrollado para mejorar el sistema, con cobertura global, a cualquier hora del día y en cualquier medio, mar, aire o tierra. En diciembre de 1993 se hizo completamente operativo.

Con el paso del tiempo el tamaño y el costo de los receptores GPS han reducido mientras su precisión ha aumentado. Actualmente los campos en los que se aplica el sistema de posicionamiento global son muchos y cada día adquieren mayor importancia, algunos ejemplos donde se encuentran presentes son: deporte, ocio, geodesia geofísica, topografía, fotogrametría, hidrografía, sistemas de información geográfica, defensa, navegación e ingeniería. Y algunos de sus usos son: posicionamiento, localización, navegación, medición y determinación del tiempo.

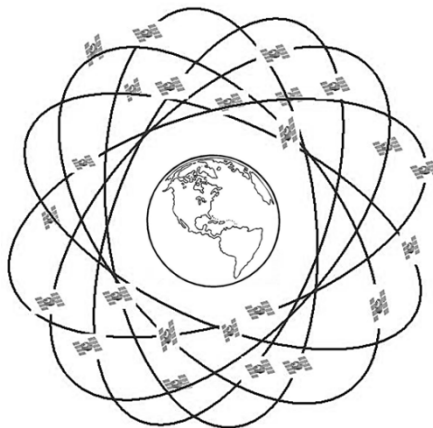
Existen al momento sistemas de navegación por satélite (GNSS) alternativos al GPS-NAVSTAR, el más similar es el Global Orbiting Navigation Satellite System (GLONASS). Ambos comparten los mismos principios de transmisión de información y método de posicionamiento. Su primer satélite fue lanzado en órbita en 1982. El sistema consiste en 21 satélites en tres planos orbitales, está a cargo del Ministerio de defensa de la Federación Rusa, fue puesto en marcha con fines militares pero tiene también usos civiles y cubre la totalidad del planeta.

---

China ha puesto en marcha su propio sistema de navegación por satélite Beidou-2/compass, aunque sus servicios al momento están limitados al territorio chino y regiones cercanas cubriendo mayor parte de Asia-Pacífico, el sistema no estará completado hasta alcanzar un total de 30 satélites.

La Unión europea a través de la Agencia espacial europea (ESA) desarrolla el proyecto GALILEO el que es diseñado para fines civiles, será independiente del GPS y GLONASS pero se espera que sea totalmente compatible con ambos. En 2011 se lanzaron los primeros satélites del programa y se espera que sea totalmente funcional para el 2019.

En la ingeniería estructural durante las últimas décadas se ha explotado su aplicación en el monitoreo de estructuras de grandes dimensiones, entre ellos, puentes, presas o edificios altos. Su aplicación presenta varias ventajas sobre otros tipos de sensores que se han utilizado a lo largo de la historia de la instrumentación que se comentarán más adelante.



*Fig. 2.1 Segmento espacial*

## **2.2. Funcionamiento general**

Se utilizan los satélites de la constelación como puntos de referencia precisa para determinar la posición de un receptor GPS. Se requiere la recepción de señales de un mínimo de cuatro satélites de los cuales se conoce la posición orbital exacta con respecto a la tierra y con el tiempo que tardan las señales en llegar de el satélite al receptor, dado que se conoce la velocidad de propagación de estas señales, se puede conocer la ubicación del receptor en la

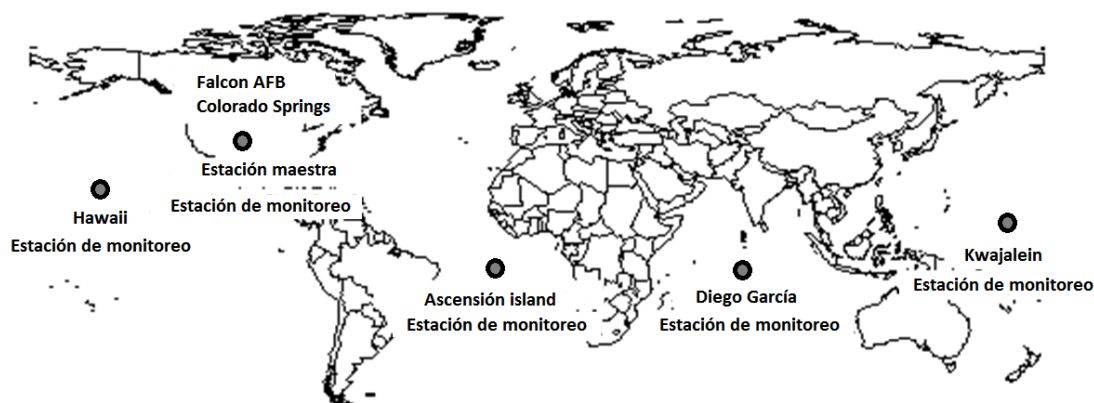
---

tierra por cálculos de triangulación. Se compone de tres segmentos: espacial, de control y de usuario.

El segmento espacial (Fig. 2.1) se compone de 24 satélites que operan en 6 planos orbitales con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie terrestre. Los de los planos orbitales están inclinados 55 grados, los nodos están separados equitativamente a 60 grados del Ecuador. Cada satélite emite de forma permanente señales con su posición orbital, hora de emisión de señales y posición de todos los otros satélites, viajan en órbitas casi circulares, tienen una altura media de 2,200 km por arriba de la Tierra y un periodo orbital de 12 horas sidéreas.

Para controlar el cronometraje de las señales que transmiten usan relojes atómicos precisos, continuamente se orientan para asegurar que los paneles solares apunten hacia el sol y sus antenas hacia la Tierra.

El segmento de Control (Fig. 2.2) está compuesto por una estación de control maestro (MCS) en la base aérea de Falcon Colorado, 5 estaciones de observación o monitoreo ubicadas en la isla de Ascensión (Atlántico Sur), la isla de Diego García (Océano Índico), en Kwajalein (Pacífico Occidental), en Hawaii (Pacífico Oriental) y Colorado Springs (EEUU), y 4 antenas de tierra distribuidas entre puntos cercanos al Ecuador que rastrean los satélites GPS, actualiza su posición al mismo tiempo que calibra y sincroniza sus relojes.



*Fig. 1.3 Segmento de control.*

*Control maestro y red de estaciones de monitoreo*

La posición de las estaciones de observación tiene un objetivo funcional y están regularmente espaciadas en longitud, las estaciones reciben señales con información necesaria de los satélites para obtener su ubicación precisa, los datos se envían a la estación de control maestro donde se procesan para calcular efemérides, estados de los relojes y toda la información que se tramiten a los satélites donde se almacena en su memoria y a la vez se transmite como parte de sus *mensajes transmitidos* que usan los receptores para pronosticar la posición de los satélites y errores sistemáticos como sesgos de reloj.

El segmento usuario está formado por todos los receptores GPS y algunas de sus funciones son sintonizar señales del satélite para presentar la información de la posición en la que se encuentra.

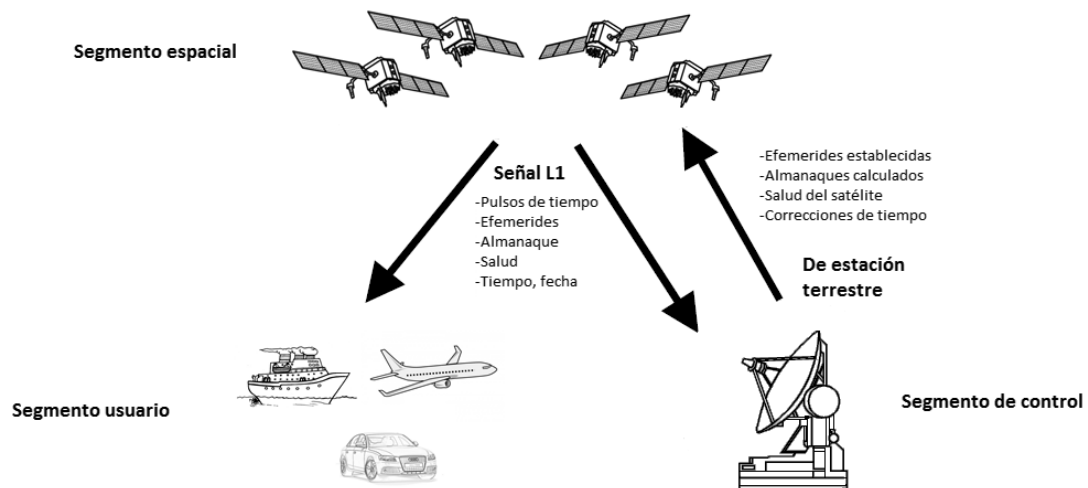
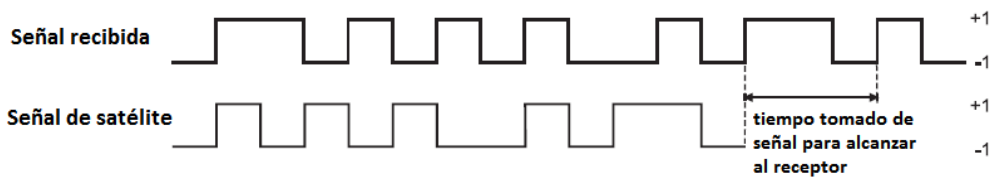


Fig. 2.3 Segmentos del Sistema de Posicionamiento Global

El GPS se diseñó para dos niveles de usuario, los que usan un servicio de posición estándar (SPS) y los que usan el servicio de posicionamiento preciso (PPS). El PPS tiene un uso militar y el SPS es para un uso civil. La diferencia entre estos dos servicios es la frecuencia en que se transmiten y la precisión que se puede conseguir. El SPS se suministra en la frecuencia portadora L1 a 1575.42 MHz, transmite los códigos C/A y P y el PPS puede transmitir en la frecuencia portadora L1 y L2. La frecuencia L2 transmite a 1227.60 MHz modulada en código P. Esta frecuencia solo está disponible para receptores que tengan claves criptográficas válidas, se reservan casi completamente para uso militar.

Para calcular el tiempo, la señal del satélite tiene dos códigos modulados, el código C/A y el código P. El código C/A se basa en el tiempo dado por un reloj atómico muy exacto. El receptor de GPS es capaz de hacer coincidir la correlación del código del satélite al código generado por el receptor.

El código C/a es digital y pseudoaleatorio. Tiene la apariencia de ser aleatorio aunque se repita mil veces cada segundo. Con ayuda de esto el tiempo de viaje de la señal del satélite al receptor se logra calcular.



*Fig. 2.4 Señales de receptor y satélite*

La estructura de un equipo receptor se compone de 3 partes principales, una antena en banda L que permite recibir la señal transmitida por el satélite, un radio PM (fase modulada) que pasa la señal a FI para realizar el procesamiento y de modulado del mensaje del satélite, y una unidad de control que permita la comunicación entre el usuario y el microprocesador del equipo receptor. El microprocesador tiene el control del procesamiento de programas y de todas las operaciones que realiza el receptor.

### 2.3. Fundamentos de posicionamiento con GPS

Para conocer la ubicación exacta del receptor GPS se hace una medición del tiempo que tarda en recorrer una señal desde el satélite hasta el receptor, basta con multiplicar este tiempo por la velocidad de transferencia de la señal que es la velocidad de la luz en el vacío para conocer el rango o la distancia que hay desde el satélite hasta el receptor. La ecuación es la siguiente:

$$r = c \times t \quad (2.1)$$

Donde  $r$  es el rango o distancia del satélite al receptor,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $t$  es el tiempo que tarda en viajar la señal del satélite al receptor.



Para determinar la distancia del satélite al receptor se pueden usar dos métodos que son, *mediciones de distancia por código* y *desviaciones de fase portadora*. A los que emplean el primer método se les conoce como receptores de grado de cartografía y a los que usan el segundo método, receptores de grado de levantamiento.

Para el método de *distancia por código* se puede aplicar la ecuación (2.1). Al conocer una distancia, la ubicación del receptor se encuentra en la superficie de una esfera que tiene de radio la distancia conocida. Si se tiene comunicación con dos satélites, la intersección de dos esferas es un círculo que es la representación de las posibles ubicaciones del receptor. Con un tercer satélite, la intersección de la esfera al círculo deja dos puntos que son la posible ubicación del receptor. Se utiliza una “posición semilla” que está a menos de cientos de kilómetros del receptor para poder eliminar rápidamente una de las dos opciones.

Para observaciones que se toman de tres satélites, el sistema de ecuaciones que podría usarse para determinar la posición de un receptor en la estación A es:

$$\begin{aligned}\rho_A^1 &= \sqrt{(x^1 - x_A)^2 + (y^1 - y_A)^2 + (z^1 - z_A)^2} \\ \rho_A^2 &= \sqrt{(x^2 - x_A)^2 + (y^2 - y_A)^2 + (z^2 - z_A)^2} \\ \rho_A^3 &= \sqrt{(x^3 - x_A)^2 + (y^3 - y_A)^2 + (z^3 - z_A)^2}\end{aligned}\tag{2.2}$$

Donde  $\rho_A^n$  son las distancias geométricas desde los satélites al receptor de la estación A,  $(X^n, Y^n, Z^n)$  son las coordenadas geocéntricas de los satélites en el instante de la transmisión de la señal, y  $(X_A, Y_A, Z_A)$  son las coordenadas geocéntricas del receptor en el instante de la transmisión. Observe que la variable  $n$  se refiere a los superíndices y adopta valores de 1, 2 o 3. (Wolf-Charles, 2008)

Las ecuaciones (2.2) son las fundamentales para el principio de operación, aunque se deben tomar en cuenta errores sistemáticos como el sesgo y refracción de onda que ocurre al atravesar la atmósfera. Para la correcta determinación matemática del sesgo de reloj es necesario un cuarto satélite de

observación al receptor para obtener su distancia. El sistema de ecuaciones para determinar la posición del receptor y el sesgo del reloj es:

$$R_A^1(t) = \rho_A^1(t) + c(\delta^1(t) - \delta_A(t)) \quad (2.3)$$

$$R_A^2(t) = \rho_A^2(t) + c(\delta^2(t) - \delta_A(t))$$

$$R_A^3(t) = \rho_A^3(t) + c(\delta^3(t) - \delta_A(t))$$

$$R_A^4(t) = \rho_A^4(t) + c(\delta^4(t) - \delta_A(t))$$

Donde  $R_A^1(t)$  es la distancia observada o pseudodistancia del receptor  $A$  a los satélites 1 a 4 en el instante  $t$ ,  $\rho_A^1(t)$  es la distancia geométrica como se define en la ecuación (2.2),  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $\delta_A(t)$  es el sesgo del reloj del receptor y  $\delta^1(t)$  es el sesgo del reloj del satélite. Los sesgos pueden modelarse usando coeficientes suministrados en el mensaje de transmisión. Estas ecuaciones se conocen como *ecuaciones puntuales de posicionamiento* o *modelo de pseudodistancias de código*.

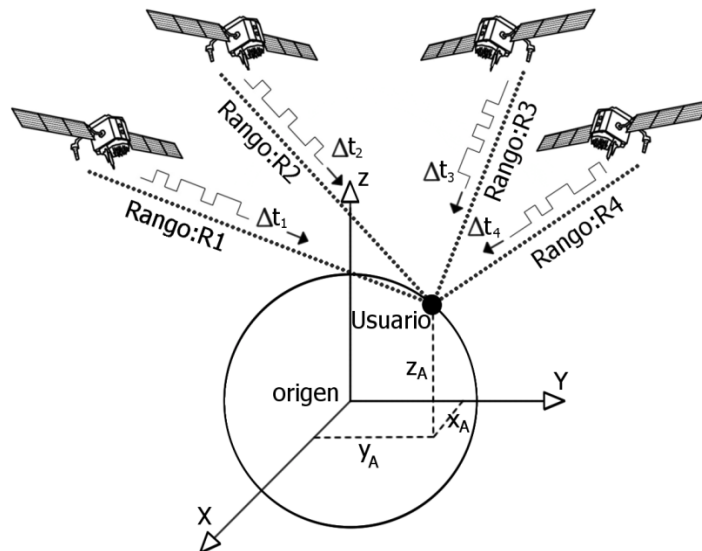


Fig. 2.4 Sistema coordinado tridimensional

En el método de *desviación de fase portadora* se puede obtener una mejor exactitud midiendo desviaciones de fase de la señal del GPS. Ésta observación se hace desde que la señal es transmitida por el satélite hasta que la recibe alguna estación terrestre. Con este método se arroja el ciclo fraccionario de la señal desde el satélite hasta el receptor (la desviación de fase se mide aproximadamente como un centésimo de un ciclo).

Para poder medir la desviación de fase portadora es necesario determinar la *ambigüedad* que es la cantidad de ciclos que hay en la señal desde el satélite al receptor. Para determinarla se necesita de observaciones de satélite adicionales.

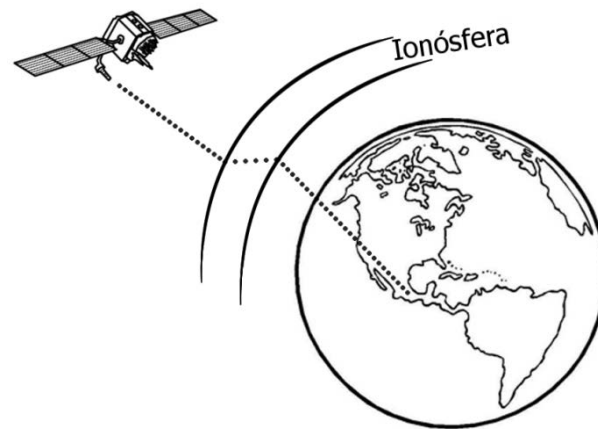
El modelo para la desviación de fase portadora, corregida en cuanto a los sesgos del reloj es:

$$\Phi_i^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_i^j(t) + N_i^j + f^j [\delta^j(t) - \delta_i(t)] \quad (2.4)$$

Donde  $\Phi_i^j(t)$  es la medición de desviación de fase portadora entre el satélite  $j$  y el receptor  $i$ ,  $f^j$  es la frecuencia de la señal transmitida generada por el satélite  $j$ ,  $\delta^j(t)$  es el sesgo del reloj para el satélite  $j$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal,  $\rho_i^j(t)$  es la distancia geométrica del satélite  $j$  al receptor  $i$ .  $N_i^j$  es la ambigüedad de la señal del satélite  $j$  al receptor  $i$ . y  $\delta_i(t)$  es el sesgo del reloj del receptor.

Existen en el uso de GPS diversas fuentes de error que pueden producir una imprecisión que pueden generar desde un par, hasta cientos de metros de diferencia en la ubicación del receptor. Algunas de las fuentes son las siguientes:

**Retrasos por Ionósfera y atmósfera.** La velocidad, a la que viajan las señales del satélite, sólo es constante en el vacío. Al pasar a través de la Ionósfera la velocidad de la señal se ve afectada por partículas cargadas y luego por vapor de agua lo que produce que la velocidad disminuya. Hay muchos factores que producen la cantidad de retraso causado por la Ionósfera por lo que éste, no es constante. El retraso puede aumentar o disminuir según la altura del satélite que envía información, un satélite con baja elevación tendrá mayor retraso en la velocidad que uno con mayor elevación. El motivo es que las distancias que recorren las señales por la ionósfera son mayores cuando el satélite se encuentra en una altura baja.



*Fig. 2.5 Retraso de señal por Ionósfera*

**Errores de reloj de satélite y receptor.** Los relojes que utilizan los satélites son muy precisos, sin embargo, no son perfectos. Pueden ocurrir diferencias mínimas que se transforman en errores de medición del tiempo que viaja la señal y producen pequeñas variaciones de posición o efemérides.

**Error Multipath.** Es un error por rebote de señal, ocurre cuando el receptor se encuentra ubicado cercano a superficies reflejantes como algún lago o edificio. La señal llega reflejada por un objeto cercano al receptor lo que genera medidas falsas. Se evita en antenas de receptores que incluyen “ground plane” un disco circular metálico de 2 pies de diámetro que previene de recibir señales de bajas elevaciones. Otra medida más efectiva es la antena “choke-ring”, tiene 4 o 5 anillos concéntricos alrededor de la antena que atrapa las señales

---

indirectas. El error multipath sólo afecta mediciones de alta precisión, receptores de navegación de mano no emplean estas técnicas.

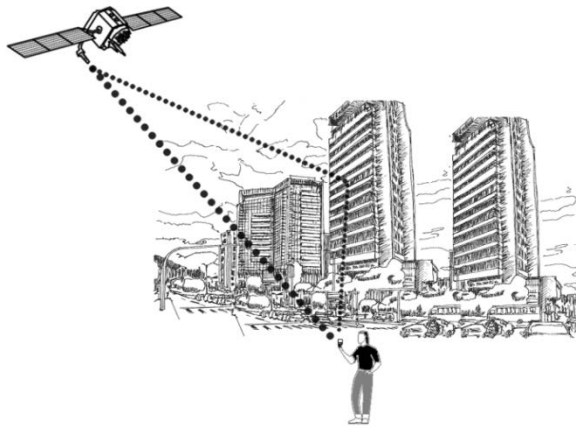


Fig. 2.6 Reflejo de señal Satélite-receptor



Fig. 2.7 Antena "choke-ring"

**Dilución de precisión DOP.** El rango al satélite es afectado por diversos factores, cuando los satélites se encuentran bien espaciados entre ellos al transmitir información, la posición se determina más efectivamente a diferencia de cuando se encuentran demasiado cerca entre ellos.

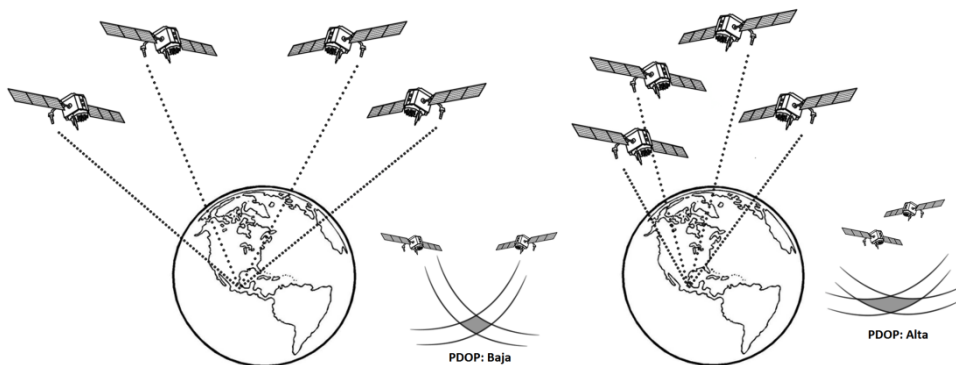
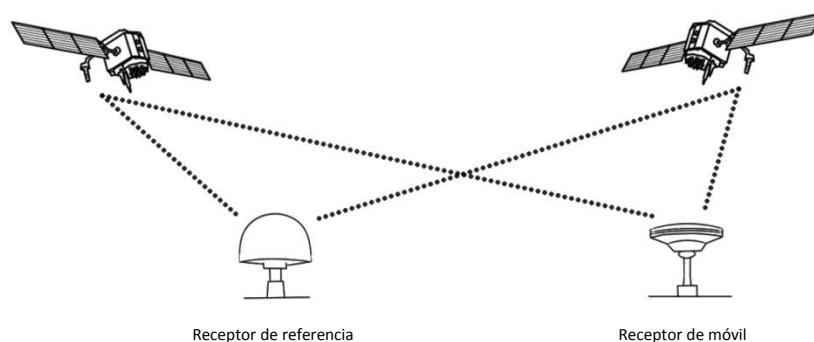


Fig. 2.8 Dilución de precisión DOP

Las diluciones pueden darse en diferentes tipos, vertical, horizontal, posicional, y geométrica. La más útil es la dilución para conocer es la geométrica que da la degradación de precisión en posición 3D y tiempo. La mejor manera de deshacerse de este error es la observación de tantos satélites como sea posible, la mejor precisión de posición se da cuando la dilución de posición geométrica (GDOP) es baja.

**GPS Diferencial.** Es la aplicación de dos o más receptores GPS basados en código. Se usa un receptor como estación base o de referencia y otro u otros receptores conocidos como vagabundos que deben encontrarse relativamente cerca. Varios de los errores que afectan las mediciones del satélite pueden ser completamente eliminadas o significativamente reducidas usando técnicas de medición diferencial.

La antena del receptor que se ubica en una posición previamente medida con coordenadas conocidas, se conoce como el receptor de referencia. Al estar en un punto conocido, el receptor de referencia puede estimar con alta precisión los rangos a los que los satélites pueden estar. El receptor de referencia es ligado vía radio para transmitir correcciones.



*Fig. 2.9 Arreglo de Sistema GPS diferencial*

Los receptores vagabundos tienen de igual forma, un radio adjunto que permite recibir información transmitida por los receptores de referencia, también calculan rangos al satélite por lo que aplican tanto correcciones de pseudodistancia como correcciones en la tasa de distancias para interpolar correcciones a las señales entre cada época. Con esta técnica de transmisión de información todas las fuentes de error de la sección anterior son minimizadas por lo que se consigue una mayor precisión.

Una variante mucho más efectiva del GPS diferencial es la doble diferenciación. En la doble diferenciación se toma la diferencia de dos diferencias individuales obtenidas de dos satélites es decir, dos receptores GPS realizando mediciones de dos satélites diferentes. La doble diferenciación elimina imperfecciones en las mediciones de reloj del receptor como del satélite.

## 2.4. Sistemas de coordenadas de referencia para GPS

Para la correcta localización de los puntos sobre la superficie de la tierra es necesario el trabajo con sistemas coordenados ya que el planeta no tiene una forma perfecta. Los más importantes para el GPS, son el sistema coordenado de referencia de un satélite que está definido por su órbita y los sistemas coordenados geocéntrico y geodésico. Estos son un Conjunto de parámetros que definen un sistema de coordenadas, con relaciones conocidas entre sí. Se definen por un sistema de ejes coordenados tridimensionales, elipsoide de revolución o esferoide y un origen. Los cambios de coordenadas entre los datos se conocen como cambio de referencia.

Para poder realizar un cambio de coordenadas entre un sistema coordenado y otro se tienen sistemas coordenados cartográficos mundiales que permiten localizar cualquier punto de la tierra (sin necesitar de otro de referencia) por medio de tres unidades dadas. WGS84 son las siglas en inglés de World Geodetic System 84 (Sistema Geodésico Mundial 1984). Se trata de un estándar en geodésica, cartografía, y navegación que data de 1984.

Los parámetros de WGS84 son:

Semieje Mayor a: 6, 378,137.0 m

Semieje Menor b: 6, 356,752.3142 m

Achatamiento f: 1/298.257223563

Producto de la Constante Gravitacional (G) y la Masa de la Tierra (M):  $GM = 3.986004418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$

Velocidad Angular de la Tierra  $\omega$ :  $7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

Estos datos son esenciales para la conversión de coordenadas posteriores en un sistema GPS basado en el WGS84.

### 2.4.1. El sistema coordenado para el satélite

Los satélites siguen una órbita elipsoidal con uno de sus dos focos en el centro de masa de la tierra. El movimiento del satélite dentro de la órbita está gobernado principalmente por la fuerza de gravedad de la tierra aunque también hacen acción fuerzas gravitacionales del sol y de la luna, lo que le impide seguir una trayectoria ideal. Se usa para la correcta descripción del movimiento que siguen los satélites de GPS. Esto es parte importante de la información que tienen los receptores GPS ya que calcular los tiempos y las distancias de forma rápida, se hace con ayuda de las coordenadas del satélite.

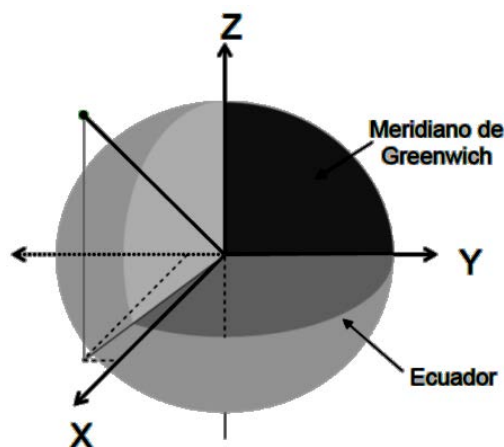
---

### 2.4.2. El sistema coordenado geocéntrico

Tiene como origen el centro de masa de la tierra, sus ejes horizontales pasan por el plano del Ecuador, estando uno sobre el meridiano de Greenwich y el eje vertical coincide con el polo terrestre convencional. Es un sistema de coordenadas cartesianas de tres dimensiones (x, y, z) y por lo tanto la coordenada z no indica la altitud del nivel de suelo.

Los ejes coordenados fijos utilizados sobre la tierra, de manera que las coordenadas de un punto, en principio serán siempre las mismas se toman en base a convencionalismos adoptados. El motivo para utilizar un sistema esférico para determinar la posición de los puntos en la tierra se debe a que nuestro planeta no tiene una forma perfecta de la cual se puedan adoptar

Es el sistema de coordenadas utilizado por los GPS y del cual se obtienen posteriormente mediante una transformación de coordenadas, las coordenadas geodésicas o coordenadas proyectadas, que sirven para un trabajo más apropiado en la mayoría de los casos.



*Fig. 2.10 Sistema coordenado Geocéntrico*

La dirección del eje de rotación terrestre cambia con el tiempo respecto a la propia superficie terrestre y, por tanto respecto al sistema de referencia geocéntrico. El polo describe a lo largo del tiempo una trayectoria libre que es una curva más o menos circular, este movimiento del polo afecta directamente a las coordenadas de los puntos sobre la superficie terrestre ya que el sistema de referencia irá cambiando. Lo más indicado es tomar como eje Z de referencia el origen o centro de los círculos de movimiento libre, quedando así determinado el eje Z de un modo convencional.



### 2.4.3. El sistema coordenado geodésico

Se determinan coordenadas de latitud, longitud y altura de un punto de la Tierra y están relacionados con las direcciones convencionales de Norte, Sur, Este y Oeste sobre la superficie de la tierra. La latitud geodésica es el ángulo que forma la vertical geodésica del punto con el plano ecuador geodésico y la longitud geodésica es el ángulo formado por el meridiano geodésico del punto de cálculo y el meridiano geodésico origen. Este sistema es el que se usa más comúnmente y está orientado localmente.

Se define geoide como una superficie en la que todos sus puntos experimentan la misma atracción gravitatoria, este es el equivalente a la experimentada al nivel del mar. Es decir, el centro del elipsoide coincide con el centro de masas de la Tierra. Por los diferentes minerales y densidades que se encuentran en distintas partes de la Tierra, la superficie geoide no es regular sino que presenta ondulaciones que pueden alterar cálculos de localizaciones y distancias.

Si la Tierra fuera perfectamente homogénea, su forma sería la de un elipsoide de revolución o un esferoide, por lo que al realizar un ajuste de tamaño del elipsoide de referencia y su posicionamiento, se hace una buena aproximación al geoide en una zona restringida de la tierra o bien de manera global. Un elipsoide se define por el tamaño del semieje mayor (a) y el tamaño del semieje menor (b). Su eje de revolución (semieje menor) coincide con la dirección del eje Z o dirección del Polo medio. Al alterarse los parámetros de semieje mayor y menor, se pueden obtener distintos elipsoides. El motivo de que exista más de un elipsoide de referencia es que no existe uno solo que se adapte completamente a todas las irregularidades del Geoide, aunque cada uno sí se puede adaptar razonablemente bien a una zona en concreto de la superficie terrestre.

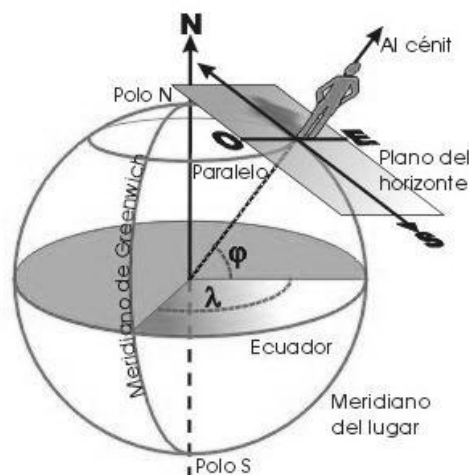


Fig. 2.11 Sistema coordenado Geodésico

Se define dátum como el conjunto de parámetros que definen la posición de un elipsoide respecto a la tierra. Para determinarlo hace falta conocer la geometría del elipsoide, su posición respecto al geocentro (coordenadas del centro del elipsoide respecto al geocentro), la orientación de los ejes del elipsoide respecto a los terrestres y la escala.

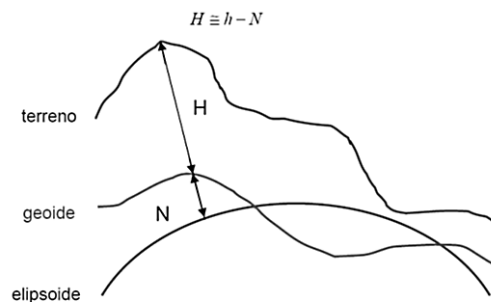


Fig. 2.12 Diferencia entre niveles de sistemas coordenados

#### 2.4.4. El sistema de proyecciones UTM

La dificultad que se tiene al trabajar con las coordenadas geocéntricas o geodésicas en el área de la topografía, la ingeniería civil, así también como en muchas otras áreas, se debe a que es poco práctico un centro de referencia tan lejano de la zona en estudio. Tener coordenadas de trabajo con un origen en el centro de la tierra, implica tener coordenadas de trabajo en tres dimensiones pero sin un plano tangente a la superficie de la tierra, lo cual es bueno si se trabajan con distancias tan grandes como es el caso de los satélites con receptores GPS alrededor de la tierra pero no es muy útil cuando las distancias que se trabajan no son muy grandes y la esfericidad terrestre no influye en la representación cartográfica, como es el caso de pequeños levantamientos o un monitoreo donde las diferencias entre coordenada y coordenada son de centímetros.

Se han desarrollado diferentes maneras de representar la tierra de manera plana, a estas formas se les conoce como proyecciones cartográficas, ninguna de las proyecciones es perfecta, todas tienen ventajas y desventajas. Hay algunas proyecciones equidistantes, conservan las relaciones entre las distancias pero no la forma y las dimensiones de los países o de las regiones que se representan, las equivalentes por otro lado si conservan el tamaño de las áreas representadas pero no su forma original, en las representaciones conformes si se mantiene la forma original del área representada pero su tamaño y la distancia entre los objetos no corresponden a las reales.

La proyección universal transversal mercator (UTM) es una representación cartográfica de la tierra en un sistema ortogonal de coordenadas X Y Z en el cual se puede medir ángulos, distancias y áreas sin problemas.

Queda dividida verticalmente por zonas o husos de  $6^\circ$  quedando limitados por dos meridianos separados y cada zona está dividida horizontalmente en 20 bandas desde la "c" hasta la "x", las bandas "C" a "M" están en el hemisferio sur y las bandas "N" a "X" están en el hemisferio norte.

La proyección UTM está basada en la proyección cilíndrica de mercator, sin embargo la posición del cilindro de proyección es transversal respecto al eje de la tierra. Conserva los ángulos pero distorsiona todas las superficies sobre los objetos originales así como las distancias existentes, está dentro de las proyecciones llamadas cilíndricas y esta toma como base la proyección mercator.

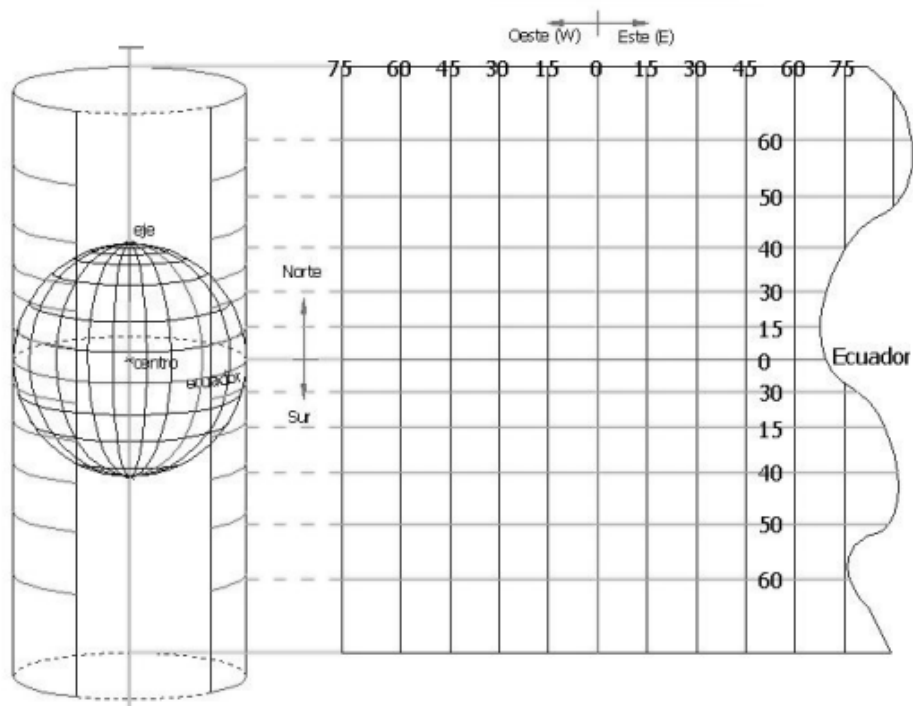


Fig. 2.13 Proyección cilíndrica de mercator

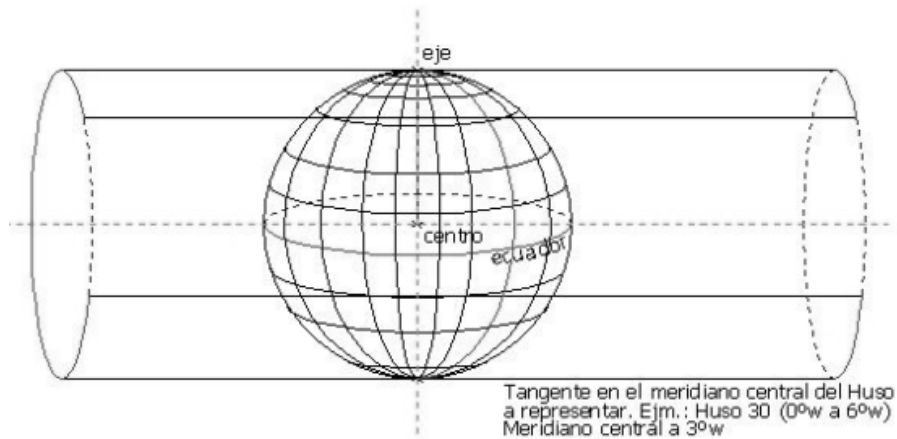


Fig. 2.14 Proyección cilíndrica transversal de mercator

Ventajas del sistema UTM frente a otros sistemas de proyección:

- conserva los ángulos
- No distorsiona las superficies en grandes magnitudes, por debajo de los 80° de latitud.
- Es un sistema que designa un punto o zona de manera concreta y fácil de localizar.
- Es un sistema empleado en todo el mundo, empleo universal, fundamentalmente por su uso militar.

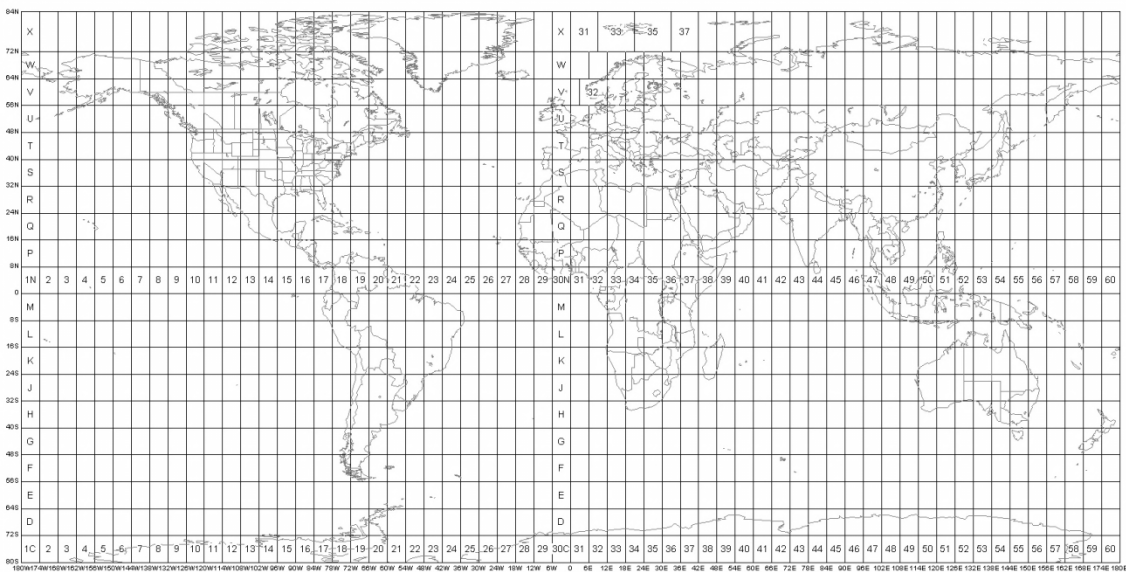


Fig. 2.15 Proyección UTM

El sistema localiza un punto por coordenadas del tipo:

X: 485537.0910

Y: 2150617.4314

Únicamente con estos datos el punto no queda definido ya que carece de los siguientes datos:

- Los datos no tienen Unidades; p.ej. metro, kilómetro.
- Los datos no localizan el hemisferio donde se encuentra.
- Los datos no localizan el Huso UTM de proyección.
- Los datos no localizan el Datum (Origen del sistema de coordenadas)

Para que el punto quede localizado perfectamente se debe detallar como sigue:

X: 485537.0910

Y: 2150617.4314

Huso: 14 Zona Q

Datum: WGS84

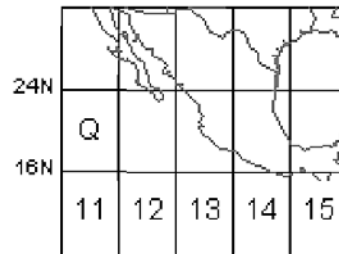


Fig. 2.16 Localización UTM

Se toma como coordenada Este (X) 500.000 metros, la misma que en el hemisferio norte y de coordenada Norte (Y) 10.000.00. No pueden existir coordenadas negativas en la coordenada situada en el hemisferio sur, ya que la mínima coordenada, situada en la latitud 80° S, sería como máximo de 9.328.380.

Todas las coordenadas “Y” UTM, estén situadas en el hemisferio sur o en hemisferio norte tienen un valor inferior a 10.000.000, empleándose para su designación menos de 8 dígitos.

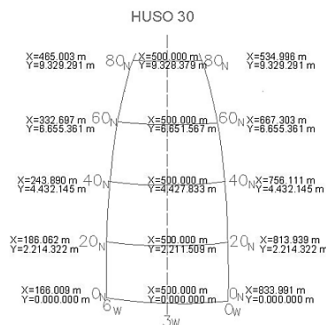


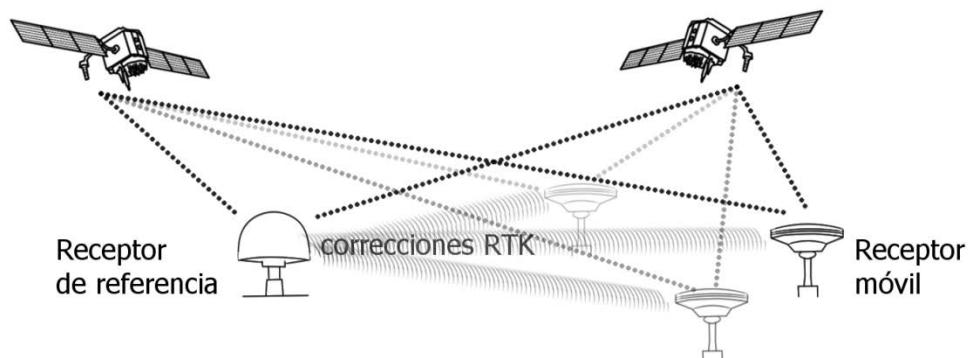
Fig. 2.17 Coordenadas de Huso 30 norte

## 2.5. Métodos GPS cinemáticos en tiempo real (RTK)

Existen distintas técnicas de medición que pueden ser usadas por los receptores de medición de GPS. El método de RTK es la aplicación de una vía de información por radio de un receptor de referencia que retransmite información que recibe de los satélites a un receptor vagabundo, este receptor también recibe información directamente de los satélites.

El objetivo es trabajar con los dos paquetes de información, procesarlos en un mismo tiempo para resolver ambigüedades y obtener una posición muy precisa relativa al receptor de referencia, todo en tiempo real. Cuatro de los satélites que transmitan información deben ser los mismos para los ambos receptores, también es importante que se mantenga el contacto entre los receptores o el vagabundo puede perder ambigüedades.

La mayoría de los sistemas de RTK-GPS usan módems UHF de radio, para optimizar la señal de radio entre los receptores se deben tener en cuenta: el poder de transmisión; la altura de la antena, a mayor altura se posiciona una antena es menos probable tener problemas por línea de vista y aumenta el rango de la comunicación del radio; frecuencia; tipo y ganancia del radio y la posición de la antena.



*Fig. 2.18 Método GPS cinemático en tiempo real RTK*

### **3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UNA RED ACELEROGRÁFICA EN UNA ESTRUCTURA**

#### **3.1. Introducción**

En general un sensor es un dispositivo que detecta un estímulo y transmite la información. El diseño del sensor le permite captar la información del estímulo y transformarla en forma de señales que pueda transmitir y ser entendida. La información que capta puede ser de distinto tipo, como distancia, aceleración, desplazamiento, inclinación, presión, fuerza, temperatura, sonido, luz. En la ingeniería civil los de mayor interés son los dispositivos mecánicos, estos transforman el dato del estímulo en una magnitud eléctrica.

Existen diferentes tipos de sensores. Sensores de posición (basados en la emisión de una señal luminosa). Sensores por contacto (se activan o desactivan al entrar en contacto con un objeto). Sensores de circuitos oscilantes (detectan un objeto al interrumpirse la oscilación) Sensores por ultrasonido (la señal va a un receptor y puede ser interrumpida por la presencia de un objeto). Sensores de movimientos (sea de deslizamiento, de velocidad o de aceleración).

Una red acelerográfica es el arreglo de dos o más instrumentos que permitan la medición de la aceleración y el posterior procesamiento y graficación de la información con ayuda secundaria de un equipo de cómputo. Los acelerómetros son transductores de energía, toman energía mecánica y la transforman en señales eléctricas para ser llevadas a otro transductor capaz de transformar nuevamente estos impulsos eléctricos en señales que permitan una visualización numérica.

Existen transductores capaces de medir desplazamientos, velocidades y aceleraciones, aunque desde cualquier tipo se puede llegar a las distintas mediciones derivando o integrando la información.

Para obtener las mediciones fiables y precisas hace falta tener en cuenta la selección del acelerómetro que sea el más adecuado para la medida que se quiere realizar y las posibles formas de montarse, ya que las características de la señal obtenida de alguna vibración pueden verse influenciadas por el tipo y la forma en que se realiza.

Los acelerómetros son instrumentos que se han utilizado en el monitoreo de estructuras por ya bastante tiempo y tienen gran aceptación en el campo. La respuesta que tienen los acelerómetros en la captura de señales de movimiento generado por sismos es excelente. La forma más adecuada para montar un transductor es por medio de tornillos. Entre más rígida sea la unión entre el acelerómetro, mejor es la respuesta y precisión de lectura.

---

El análisis de vibración de una estructura ofrece la reproducción de la aceleración en un entorno gráfico, pudiendo también obtenerse las velocidades y desplazamientos relativos de la captura. Dentro del área de la ingeniería estructural, se usan estos acelerómetros para capturar los desplazamientos obtenidos durante un periodo de tiempo, ya sea durante una vibración ambiental o una dinámica.

Algunos de sus usos más comunes dentro de la ingeniería estructural son: Medida de vibración, análisis modal, ensayos en estructuras, medición sísmica.



*Fig. 3.1 Acelerómetro*

### **3.2. Funcionamiento general**

Los acelerómetros son sensores con un transductor o bien, dispositivos que tienen la capacidad de convertir una energía de entrada a otra diferente en su salida, en este caso la energía de entrada es mecánica y la de salida es eléctrica. Estos transductores electromecánicos miden fuerzas de aceleración, estas fuerzas son dinámicas como las de cualquier movimiento o vibración. Los rangos de medición van desde las décimas de g, hasta los miles de g.

El funcionamiento de los transductores de aceleración depende de un sistema de masas y resortes. La tensión y la fuerza en resortes se describe con ayuda de la ley de Hooke que propone: “La cantidad de estiramiento o de compresión (cambio de longitud), es directamente proporcional a la fuerza aplicada”. Además de la ley de Hooke, los acelerómetros se basan también en la segunda ley de Newton. La aceleración genera una fuerza sobre una masa, que se denomina masa sísmica, al desplazarse deforma un muelle con la condición de que:

$$F = ma = kx \quad (3.1)$$



Así, la aceleración ocasiona el desplazamiento de una masa o viceversa. Si se observa el desplazamiento  $x$  se supone que la masa está bajo la acción de una aceleración:

$$a = \frac{kx}{m} \quad (3.2)$$

Este sistema aplica únicamente en aceleraciones a lo largo de la dirección del muelle o bien, acelerómetros de un eje. Existen sensores que pueden medir las aceleraciones en una sola dirección, que son los acelerómetros uniaxiales, también los hay triaxiales que permiten hacer mediciones simultáneas en las tres direcciones del espacio.

Cuando una fuerza se aplica a un acelerómetro, la masa sísmica carga al elemento. El acelerómetro proporciona una señal eléctrica variable y proporcional a la aceleración medida que viaja hasta almacenarse en memoria.

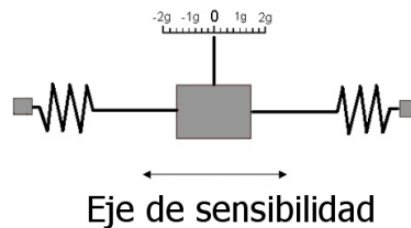


Fig. 3.2 Masa sujeta a muelles

Los acelerómetros son lineales en el sentido de la amplitud, lo que quiere decir que tienen un rango dinámico muy largo. Los niveles más bajos de aceleración que puede detectar son determinados únicamente por el ruido electrónico del sistema electrónico, y el límite de los niveles más altos es la destrucción del mismo elemento piezo eléctrico. Este rango de niveles de aceleración puede abarcar un rango de amplitudes de alrededor de 10, lo que es igual a 160 dB. Ningún otro transductor puede igualar esto.

La mayoría de los acelerómetros que hoy en día se usan en la industria son del tipo "PCI", lo que quiere decir que tienen un preamplificador interno de circuito integrado. Este preamplificador recibe su energía de la polarización de la corriente directa por el alambre de la misma señal, así que no se necesita alambrado suplementario. El aparato con que está conectado el aparato debe tener su fuerza de corriente directa disponible para este tipo de transductor. El acelerómetro PCI tendrá un límite de baja

frecuencia, debido al mismo amplificador y este se sitúa generalmente a 1 Hz para la mayoría de las unidades disponibles comercialmente. Algunas unidades fueron diseñadas especialmente para ir hasta 0, 1 Hz si se necesita datos de muy baja frecuencia.

Cuando se usa un acelerómetro PCI se debe tener cuidado de no exponerlo a niveles de aceleración donde el voltaje de salida rebasará varios voltios. Si no, se sobrecargará el preamplificador interno y el resultado será una distorsión.

Cuando se conecta un acelerómetro PCI a la fuente de energía, el amplificador necesita unos segundos para estabilizarse. Durante este tiempo cualquier dato que la unidad recogerá será contaminado por las lentas variaciones del voltaje. Por esa razón, los recopiladores de datos deben de tener un retraso integrado, para asegurar que la unidad está en condición estable. Si el retraso es demasiado breve, la forma de onda de tiempo tendrá una rampa de voltaje en forma exponencial superpuesta sobre los datos y en el espectro se verá una característica creciente de muy baja frecuencia a veces llamada **bajada de eski**. Este se debe evitar, ya que compromete el rango dinámico de la medición.

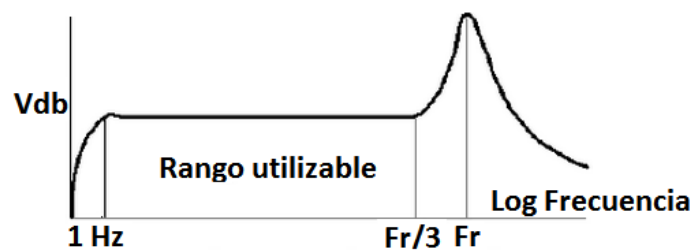


Fig. 3.3 Respuesta de frecuencia del acelerómetro

Acelerómetros más utilizados en la industria son

**Piezoeléctrico.** Se basa en el principio de que cuando se comprime un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada. Se fabrican tanto en tecnología convencional con salida en carga como en tecnología ICP. Existe una amplia gama desde sensores miniatura (masa menos a 1g) hasta modelos más grandes, de muy alta sensibilidad usados para ensayos sísmicos y de obra civil, pasando por diferentes formatos para aplicaciones industriales.

**Servo acelerómetros.** Estos acelerómetros tienen muy altas prestaciones debido a su funcionamiento en "bucle cerrado". Se componen de un galvanómetro en forma de péndulo y un sensor óptico, por ello tienen alta estabilidad ante cambios de temperatura, estabilidad a largo plazo del cero y son inmunes a vibraciones.

**De fibra óptica.** Un acelerómetro incluye una viga y por lo menos una fibra óptica fijada a un lado de la viga de tal manera que la deflexión de la viga cambia una longitud de la fibra óptica; medios para detectar el cambio en longitud de la fibra óptica están funcionalmente acoplados a por lo menos una fibra; un sistema de sensor sísmico incluye por lo menos dos acelerómetros, orientados de tal manera que sus ejes sensibles están por lo menos parcialmente alineados a lo largo de direcciones mutuamente ortogonales

**Capacitivo diferencial.** Utiliza un circuito de acondicionamiento integrado dentro de un chip. Es un condensador diferencial compuesto por placas fijas y móviles unidas a un eje central que se mueve en respuesta a la aceleración. La señal procedente de la placa móvil se conecta a un buffer. La salida de éste va a un demodulador síncrono con la señal de excitación cuadrada. Finalmente la salida modulada se lleva a un amplificador.

**Efecto hall.** Se sirven de una masa sísmica donde se coloca un imán y de un sensor de efecto hall que detecta cambios en el campo magnético.

**MEMS.** Acelerómetros microeléctricomecánicos con circuito de control de cancelación de resonancia como un Estado de inactividad.

### 3.3. Métodos para identificar parámetros estructurales

El monitoreo de una estructura se puede realizar mediante pruebas dinámicas en las que se inducen deformaciones o mediante pruebas de vibración ambiental en las que no se induce ni se altera de ninguna forma el comportamiento cotidiano de la estructura. Ambas pruebas hacen una buena aportación para estudiar el comportamiento de una estructura, por medio de su condición de trabajo típica o también por una acción que pudiera considerarse como extraordinaria o accidental sea inducida o no.

El objetivo de estas pruebas de vibración es obtener el comportamiento de una estructura en determinadas condiciones y realizar una valoración de la misma. La evaluación que se tiene luego de las pruebas puede ser comparada también con eventos pasados o condiciones distintas con el fin de investigar el comportamiento estructural.

Al realizar una prueba de vibración, ya sea dinámica o ambiental, uno de los aspectos más importantes para la correcta obtención de resultados se basa en medir puntos en la estructura que permitan mediante un procesado y posterior análisis conocer el periodo fundamental de vibrar tanto del suelo como de la estructura,

---

El análisis se logra mediante la transformada rápida de Fourier, la cual es una aplicación que hace corresponder a una función  $f$ , con valores complejos y definidos en la recta, con otra función  $g$  definida de la siguiente manera.

Otro parámetro que se busca obtener es la interacción suelo-estructura mediante el cociente de mediciones obtenidas en el suelo con otras que se encuentran en la estructura, principalmente las que se tienen en puntos con mayores desplazamientos.

Se busca lograr determinar las formas modales de las frecuencias de traslación más significativas en las direcciones transversal y longitudinal y en caso que se presente, la de torsión.

El procedimiento de análisis modal es apropiado para calcular la respuesta de estructuras complejas de varios grados de libertad a movimientos sísmicos. La respuesta estructural es modelada como la máxima respuesta de un número de oscilaciones de un simple grado de libertad, cada uno representando un modo específico de vibración de la estructura real. Combinando la respuesta de los modos individuales se obtienen las fuerzas externas equivalentes, la cortante basal y el cortante de piso, que pueden usarse de la misma forma como en el procedimiento de fuerza lateral estática. El procedimiento de análisis modal tiene la ventaja de determinar la distribución real de las fuerzas laterales, de las masas y una distribución de rigideces a lo largo de la altura de una estructura irregular, que puede diferir apreciablemente de la distribución lineal simplificada asumida en el método de la fuerza lateral estática. Además, considera los efectos de los modos más altos de la respuesta de una estructura, alguno de los cuales puede contribuir significativamente en la respuesta global de la estructura.

Las fases necesarias en el procedimiento del análisis modal se basan en seleccionar un espectro de respuesta sísmica apropiado, aplicando una técnica de análisis dinámico para un modelo matemático de la estructura, combinando la respuesta de un número suficiente de modos para asegurar de que por lo menos el 90% de la masa participante de la estructura esté incluido en el cálculo de respuesta para cada dirección horizontal principal.

### 3.4. Obtención de resultados

Teniendo almacenada nuestra información digital es conveniente una supervisión visual de forma rápida por medio de la graficación de los datos obtenidos, donde en el eje de abscisas tenemos al tiempo y en el eje de ordenadas tenemos la aceleración, ya que en ocasiones pueden llegar a existir errores de distinto tipo en las mediciones que provocan una alteración en la señal, la saturan o simplemente no se guarda. De existir algún error en una o más de las señales se considerará el repetir la prueba o trabajar con la información que se pueda filtrando las señales alteradas. Siempre considerando los mismos lapsos de tiempo entre señales medidas de un punto a otro.

Luego de obtener la mayor información provechosa de las pruebas de campo, se tienen dos parámetros los cuales son el tiempo y la aceleración, con algunas herramientas de cómputo se pueden utilizar éstos parámetros para una mejor apreciación del comportamiento de la estructura. Para poder facilitar la interpretación de resultados, se puede recurrir a la integrar los datos de la aceleración en función del tiempo para visualizar mediante gráficas, las velocidades y los desplazamientos relativos que se tienen en los puntos de medidas. Si se tienen suficientes puntos de medición se puede realizar una comparación entre distintos puntos de la estructura en sus direcciones más convenientes.

Un método de análisis muy usado para la interpretación de los resultados en pruebas de vibración es mediante la transformada de Fourier, que nos permite entre otras cosas, hacer una comparación tiempo-frecuencia o espectro de la señal de vibración. El análisis de espectros, que se define como la transformación de una señal de la representación en el dominio del tiempo hacia la representación en el dominio de la frecuencia, nos ayuda directamente a conocer el periodo de vibración.

A los periodos que se obtuvieron de una forma práctica se pueden comparar los periodos de diseño o a otros periodos obtenidos también de forma práctica en tiempos pasados, para realizar un juicio sobre la estructura y la condición en que se encuentra luego de un siniestro, como el caso de un sismo, conocer el comportamiento que tiene a través de pasado algún tiempo o como una supervisión en una construcción reciente a los periodos de diseño.

## 4. APLICACIÓN DE UN SISTEMA GPS Y UNA RED ACELEROGRÁFICA EN UN EDIFICIO ALTO

### 4.1. Descripción del edificio

El edificio en estudio se ubica en la Ciudad de México y su construcción concluyó en 1966. Se encuentra sobre la Avenida Ricardo Flores Magón y el Eje Lázaro Cárdenas en la Delegación Cuauhtémoc.

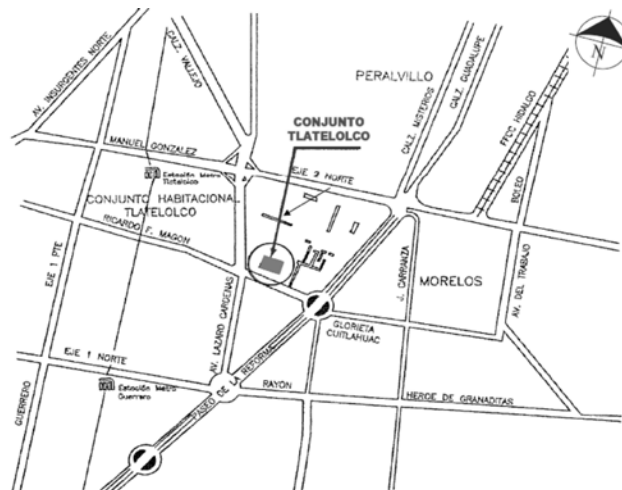


Fig. 4.1 Ubicación del edificio

Forma parte del conjunto el cual cuenta con una torre y tres cuerpos bajos.

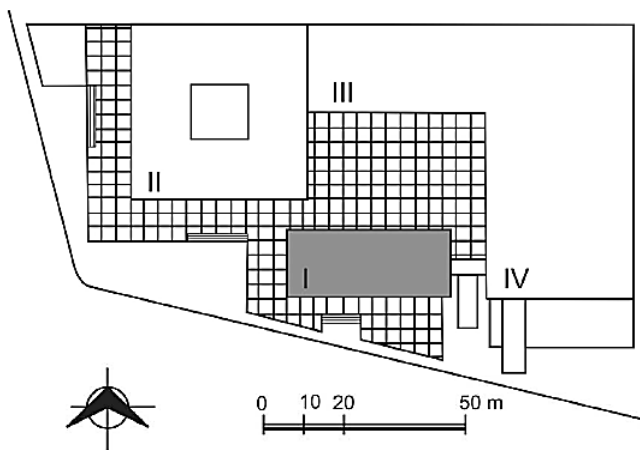


Fig. 4.2 Planta del conjunto

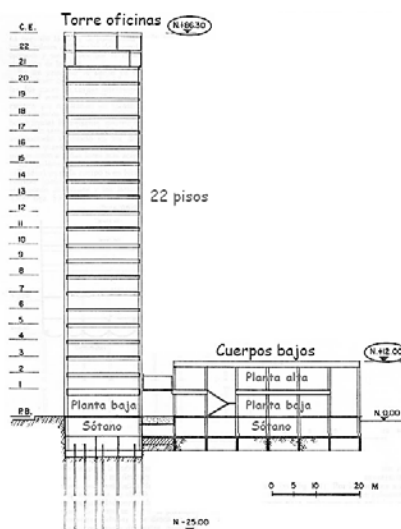
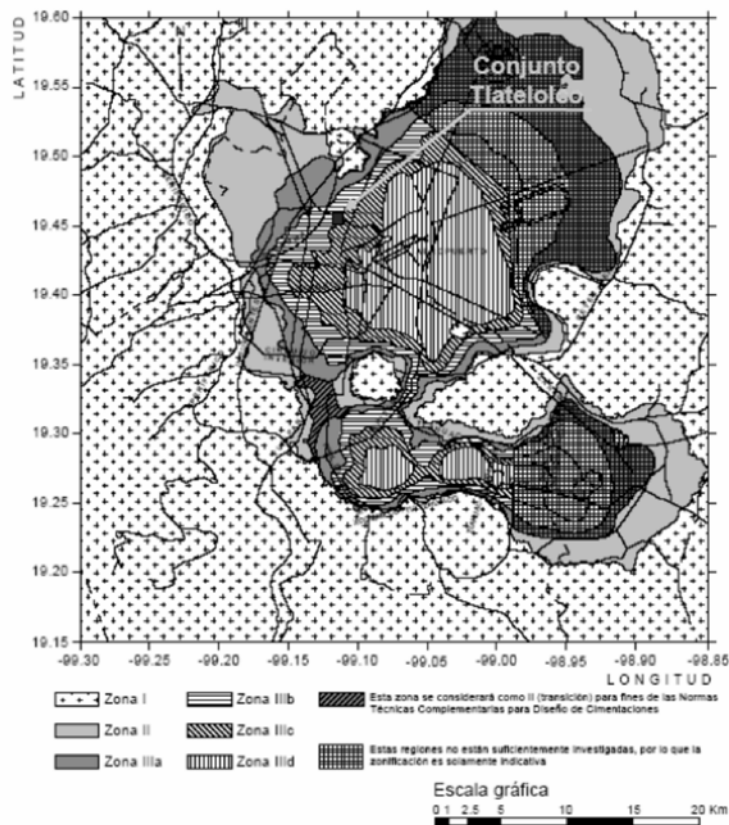


Fig. 4.3 Corte transversal del conjunto

La torre tiene una altura de 86.3 m y 22 niveles de 18.35 x 41.87 m, cada nivel con superficie útil de 570 m<sup>2</sup>. Comparte sótano de 7800 m<sup>2</sup> de superficie y 3.6 m de profundidad con los cuerpos bajos, los cuales tienen 12 m de altura y dos plantas.

La ubicación de la torre en la zonificación sísmica es zona IIIc Lacustre, que se caracteriza por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla.



*Fig. 4.4 Mapa de zonificación geotécnica sísmica de la ciudad de México*

El suelo del sitio se compone por un estrato de arcilla blanda, altamente compresible que subyace a una costra endurecida superficial de espesor variable (6 a 10m) y que descansa hasta una profundidad de 30m sobre la capa dura, conformada en su mayoría por limo y arena. En este primer bloque de arcilla (serie arcillosa superior) se localizan intersticios rellenos de arena, arcilla de secado y ceniza volcánica de elevada resistencia pero de pobre espesor. Debajo de la capa dura se desprende otro estrato potente de arcilla (serie arcillosa inferior) que, aunque con mucho menor que el primero, conserva las mismas propiedades. Éste avanza hasta los 45 m de profundidad para encontrarse finalmente con los depósitos profundos. (Ramírez, Asael 2009)

La estratigrafía del sitio sigue en forma general la configuración siguiente: un estrato de arcilla blanda, altamente compresible, que subyace a una costra endurecida superficial de espesor variable (6 a 10 m) y que descansa a una profundidad de 30 m sobre una capa dura, conformada en su mayoría por limo y arena. En este primer bloque de arcilla (serie arcillosa superior) se localizan intersticios rellenos de arena, arcilla de secado y ceniza volcánica de elevada resistencia pero de pobre espesor.

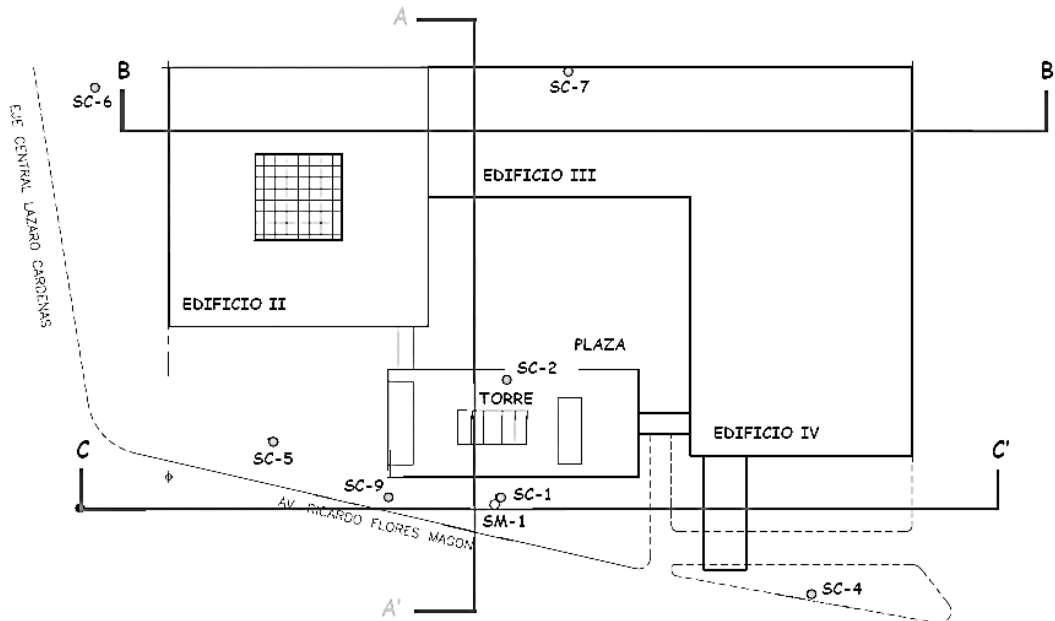


Fig. 4.5 Secciones para perfiles estratigráficos

Debajo de la capa dura se desprende otro estrato potente de arcilla (serie arcillosa inferior), que, aunque con menor espesor que el primero, conserva casi las mismas propiedades. Éste avanza hasta los 45 m de profundidad para encontrarse finalmente con los depósitos profundos (Ramírez, Asael 2009).



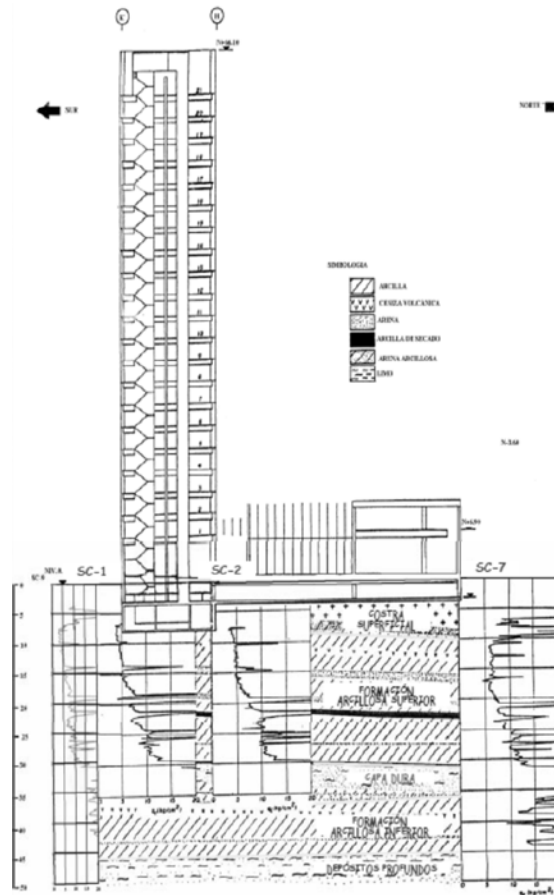


Fig. 4.6 Secciones para perfiles estratigráficos

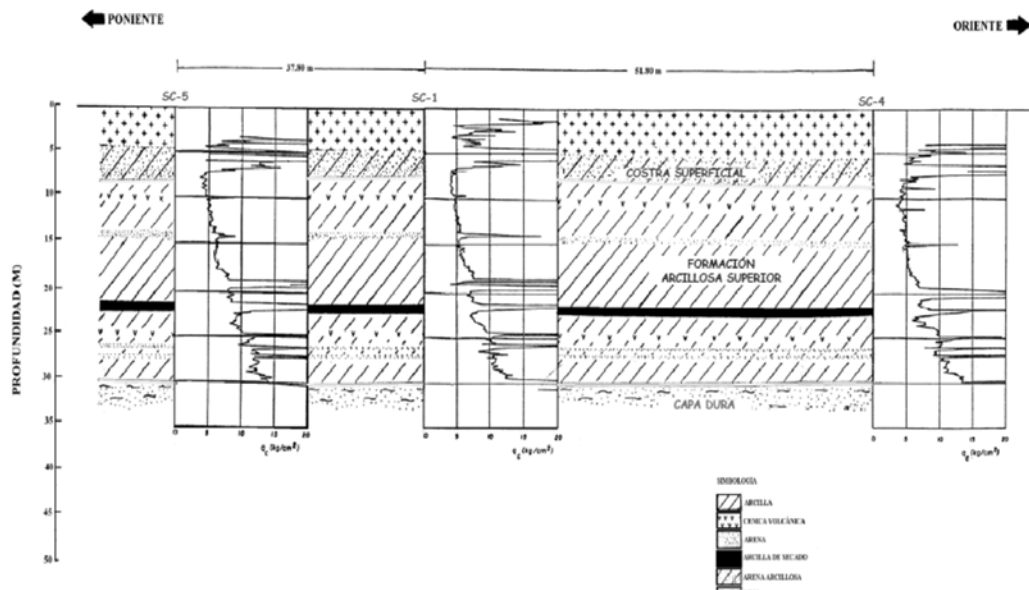


Fig. 4.7 Corte estratigráfico C-C'

El diseño de la superestructura se constituye por columnas ligadas de concreto en la parte longitudinal y muros de carga en la parte transversal en las fachadas norte y sur, muros de concreto en las fachadas oriente y poniente, y por núcleos rígidos que alojan las circulaciones verticales y los servicios. Las traveses son de acero y de alma abierta, salvan claros de 18m en el sentido norte-sur.

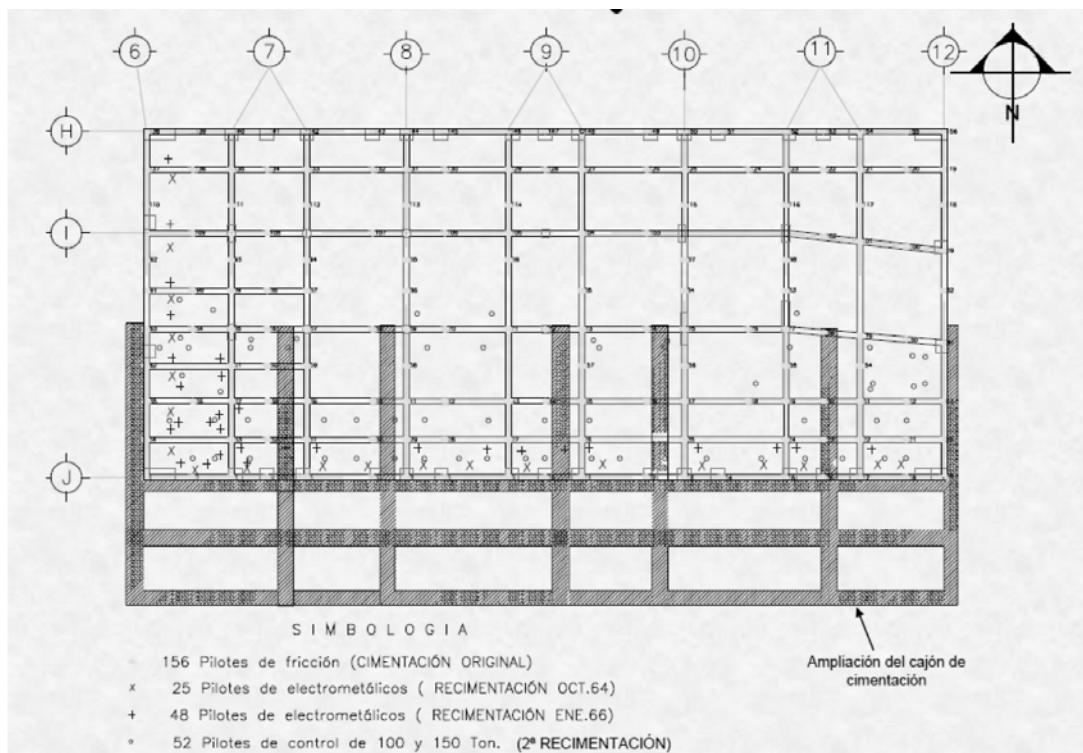
El cuerpo bajo I está construido a base de columnas de concreto, con losas reticulares de entrepiso y azotea también de concreto, mientras que los cuerpos bajos II y III, se construyeron a base de columnas y traveses de acero, con losas de concreto en entrepisos y azotea (Uribe, 2005).

#### **4.2. Principal Problemática estructural**

Dadas las condiciones del suelo en la Ciudad de México y los hundimientos ocasionados por la extracción de agua de pozos en mantos acuíferos, los daños ocasionados a estructuras son notorios. Las medidas tomadas en el diseño y la construcción de algunas estructuras para evitarse asentamientos diferenciales en ocasiones no son suficientes y se requiere de un mantenimiento preventivo, predictivo, o correctivo.

La Torre se encuentra en una de las zonas más desfavorables y susceptibles a los hundimientos, desde su construcción se hicieron visibles hundimientos y desplomes en la estructura, a su vez hubo emersiones de los cuerpos bajos lo que ocasionó que se hicieran rectificaciones a la verticalidad de la torre arriba del octavo piso y recimentación de toda la estructura en los primeros años y en algunos sucesivos.

En una primera recimentación se colocaron 25 pilotes electromecánicos de 2" de diámetro desplantados a 30m de profundidad (1964) y 48 pilotes electromecánicos de 2" a 30m de profundidad y se retira lastre de la parte suroeste de la torre (1965). En 1983 se colocan 52 pilotes de control de 50cm de diámetro desplantados a 30m de profundidad. En 1987 se realiza una ampliación de cajón de 6m de ancho y 4m de profundidad en el extremo sur de la torre (para aumentar el área de contacto y alojar a los pilotes que se podrían instalar posteriormente, además colocación de lastre en los cuerpos bajos. En 1991 se instalan 21 pozos de extracción y 13 de infiltración para contrarrestar en lo posible hundimientos.



*Fig. 4.8 Planta de cimentación de la Torre*

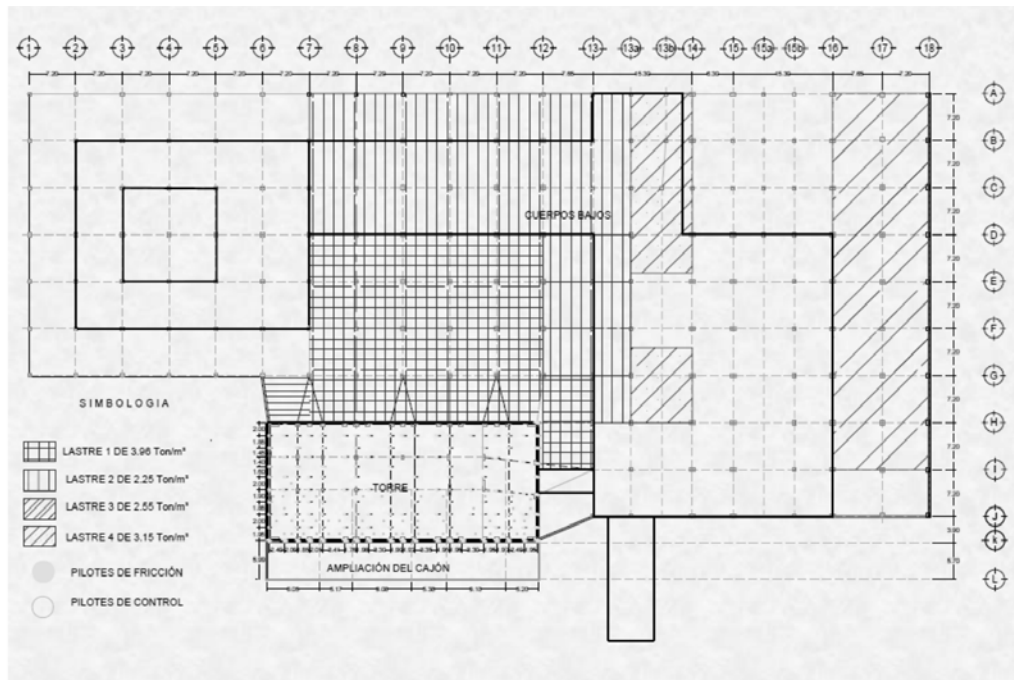


Fig. 4.9 Localización de lastre en el complejo

Después de realizar trabajos de recimentación, se continuó con mantenimiento en pozos de bombeo y de infiltración, en pilotes y se continuó con medición de desplomes. El funcionamiento de estos pozos se suspendió en agosto de 2005.

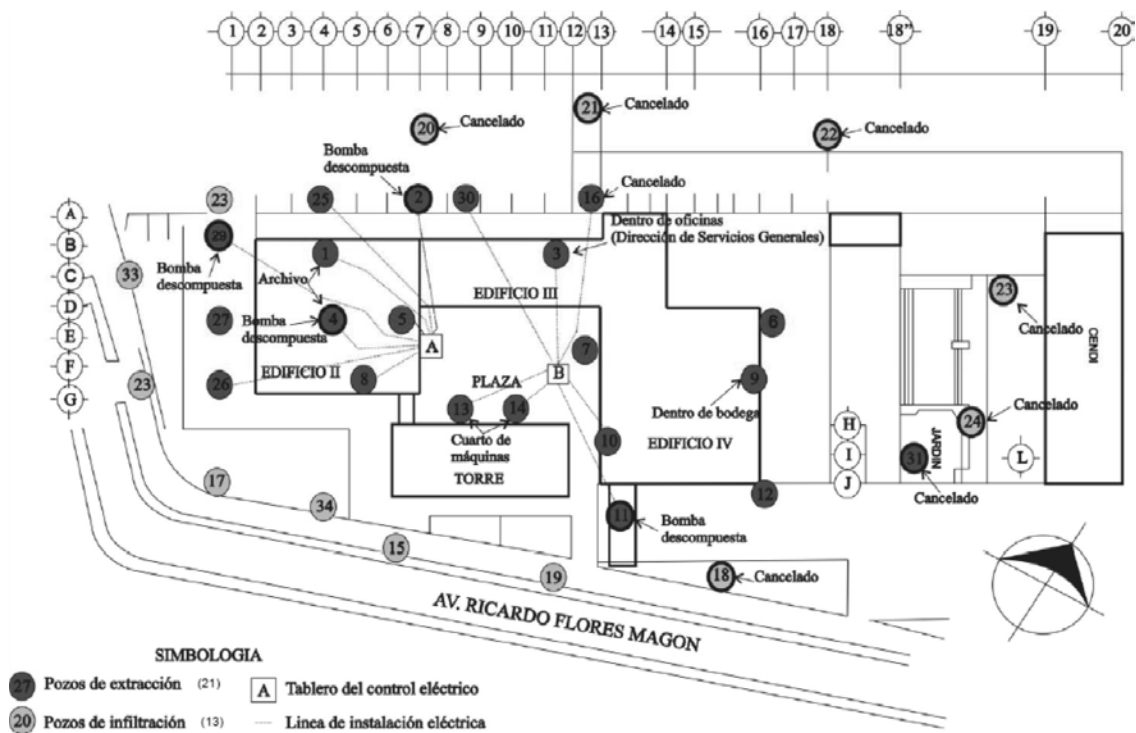


Fig. 4.10 Planta de localización de pozos de extracción e infiltración

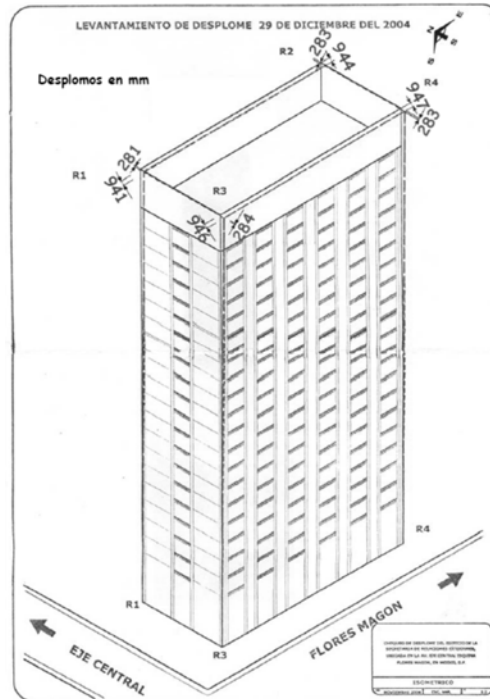


Fig. 4.11 Desplomes en Torre

### 4.3. Descripción de las propuestas de monitoreo

En el monitoreo estructural se busca la captura de datos de una estructura a través de una red sensorial para su análisis. El objetivo es obtener indicadores que permitan detectar el estado o presencia de daños para realizar la evaluación de una estructura. La captura de los datos se puede realizar en un periodo de tiempo o de manera continua, las capturas continuas deben hacerse junto con mantenimiento e inspecciones periódicas.

Se debe tener en cuenta el equipo apropiado para adquirir, almacenar y transmitir datos y el tiempo en que se realizan estas tareas. Para la comparación adecuada de los datos, hace falta que estos sean de condiciones similares o de lo contrario no serían directamente comparables. Se tienen que conocer las causas que puedan provocar la variación de la información y separar datos que se quieran estudiar de otros que se califiquen como ruidos para el sensor. Distinguir ruidos controlables o que se puedan eliminar estadísticamente como el ruido blanco de otros que no sean predecibles. Es necesario filtros que ayuden a determinar los datos que serán transmitidos y formas para comprobar que algún sensor esté o no funcionando bien, a la aplicación de técnica de procesamiento de señales.

Por la problemática estructural que se ha presentando en el edificio alto, se ha llegado a la necesidad de monitorear las condiciones en las que se encuentra de manera continua la estructura. Para ello se ha instalado una red acelerográfica y un sistema de GPS los cuáles funcionan actualmente de manera permanente e independiente. Se describen a continuación.

Para definir la ubicación de los instrumentos se hizo una inspección visual del edificio y se basó en las previas experiencias y estudios para la obtención de los mejores resultados de las pruebas de vibración ambiental, a su vez también para poder realizar cocientes de medición y trabajar con parámetros de comparación que reflejen indicativos de la interacción suelo-estructura.

De ambas pruebas se logró obtener varios registros sísmicos los cuales también se comparan en desplazamientos y en espectros de forma gráfica y numérica.

A partir de las mediciones continuas guardadas luego de instalar los sistemas de forma permanente, se lograron recopilar registros durante periodos de tiempo importantes. Para el actual estudio se utilizará únicamente información guardada por el servidor a partir del mes de Noviembre de 2011 y hasta Abril de 2012.

La información que se guardó de forma continua se procesará mediante promedios diarios con los cuales se hará un promedio mensual que servirá para monitorear los desplazamientos históricos del edificio mes con mes. Esta comparación nos ayudará a determinar los desplomes actuales de la estructura con ayuda de estudios que se han hecho anteriormente sobre su inclinación.

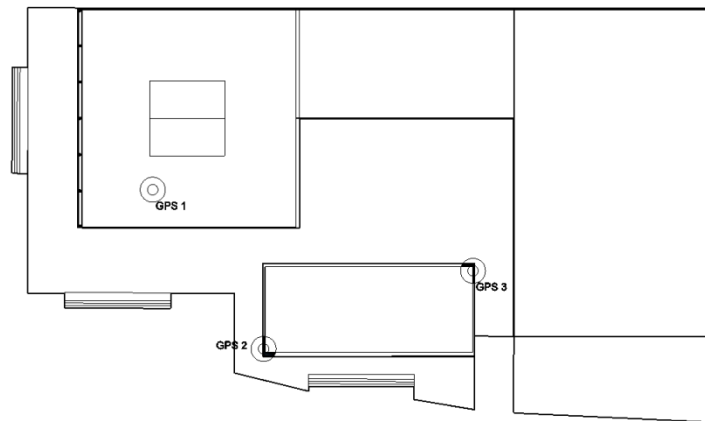
Durante el respaldo de la información de los meses que se estudian se presentó actividad sísmica de magnitud importante, las fechas de las que se tiene datos almacenados con actividad de este tipo se presenta en la siguiente tabla.

Evento	Localización	Fecha GMT	Hora GMT	Magnitud Me	Coordenadas		Distancia epicentro (km)
					Latitud N	Longitud E	
111210	53 km al NOROESTE de ZUMPANGO DEL RIO, GRO	2011-12-11	01:47:25	6.5	17.84	-99.98	58
120320	29 km al SUR de OMETEPEC, GRO	20/03/2012	12:02:50	7.4	16.42	-98.36	15
120402	45 km al OESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX	02/04/2012	12:36:42	6	16.27	-98.47	10
120411	79 km al OESTE de LA MIRA, MICH	11/04/2012	17:55:10	6.4	17.9	-103.06	16

*Tabla 4.1 Eventos sísmicos registrados*

### 4.3.1. Monitoreo con el sistema de posicionamiento global GPS

Se compone de 3 receptores de GPS de los cuales, uno hace la función de un receptor de referencia y los otros dos funcionan como receptores vagabundos o móviles. Los dos receptores móviles que se denominarán en adelante como GPS2 y GPS3 se ubicaron en la azotea del edificio, en su parte Suroeste y Noreste respectivamente (Fig. 4.12). El receptor de referencia o GPS1 se ubica sobre la azotea del cuerpo bajo II y tiene la posibilidad moverse de ubicación en caso de ser requerida una medición sobre el terreno. La información que se recibe en los receptores pasa por una conexión de fibra óptica hasta una computadora en la parte del sótano donde se almacena la información.



*Fig. 4.12 Posición de receptores GPS en edificio*

El equipo se compone por GPS GRX 1200 pro Leica, antenas tipo AT504 de bobina anular para el punto de referencia (GPS1) y dos del tipo AX1202 para los puntos móviles (GPS2 y GPS3).



*Fig. 4.13 Receptores GPS*

La gestión de información se realiza con el programa GNSS Spider, donde se obtienen 20 muestras por segundo de la cual se puede disponer de los datos en formato rinx, en \*.rtk o \*.ppt, según el propósito que se tenga, la conveniencia de usar uno u otro. Opera sobre el sistema de referencia WGS 1984 y se extraen con un formato de mensaje:

Formatos de Mensaje NMEA		GPS1200	1338
<b>F.12</b>	<b>LLQ - Posición Local Leica y Calidad</b>		
<b>Sintaxis</b>	\$-LLQ,hhmss.ss,mmdyy,eeeeee.eee,M,nnnnn.nnn,M,x,xx,x,x,x,x,M*hh<CR><LF>		
<b>Descripción de los campos</b>	<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>	
	\$-LLQ	Encabezado, incluyendo ID del transmisor	
	hhmss.ss	Tiempo UTC de la posición	
	mmdyy	Fecha UTC	
	eeeeee.eee	Este de cuadrícula en metros	
	M	Unidades para el Este de cuadrícula, como texto fijo M	
	nnnnn.nnn	Norte de cuadrícula en metros	
	M	Unidades para el Norte de cuadrícula, como texto fijo M	
	x	Calidad GPS 0 = Fija no disponible o no válida 1 = Sin posición en Tiempo Real, Fija de navegación 2 = Posición en Tiempo Real, ambigüedades sin fijar 3 = Posición en Tiempo Real, ambigüedades fijas	
	XX	Número de satélites empleados en el cálculo	
	x.x	Calidad de coordenada	
	x.x	Altitud de la posición del marcador sobre/debajo del nivel medio del mar en metros. En caso de no disponer de valores de altura ortométrica, se exportará la altura elipsoidal local.	

*Fig. 4.14 Formato de mensaje de programa GPS*

La adquisición de datos con este equipo se ha realizado desde el año 2009. En primeras ocasiones las capturas se realizaban de manera periódica durante lapsos de 1 a 2 horas. Después se hizo posible la instalación permanente tanto de los GPS como del equipo de cómputo que permitiera la grabación continua de información. Es a partir del año de 2011 que se ha logrado mantener interrumpidamente el almacenamiento de la información.



### 4.3.2. Monitoreo con red acelerográfica

La red cuenta con 16 sensores de aceleración, 6 triaxiales y 10 uniaxiales, los que en conjunto pueden realizar 28 mediciones. Se usan con 5 registradores digitales de 6 canales cada uno. El sistema está funcionando permanentemente desde diciembre de 2008.

Algunas de las características de la red de acelerómetros son las siguientes:

-Muestras por segundo: 100

-Registradores digitales

Debido al tiempo que se ha tenido habilitada la red de acelerómetros es que se ha logrado hacer la captura de sismos de magnitud importante.

En el diagrama siguiente se muestra la posición en que se ubican los receptores GPS y la distribución de la red de acelerómetros.

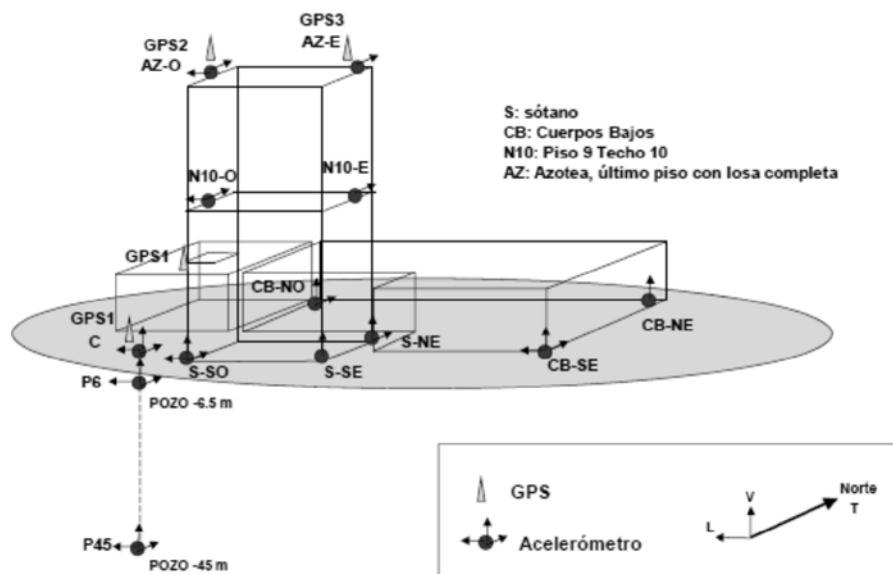


Fig. 4.15 Distribución de acelerómetros y GPS

De la red de acelerómetros se utilizarán únicamente los sensores de azotea para hacer la comparación directa contra los receptores GPS. Los sensores son uniaxiales y se dispone con solo tres, dos se posicionan en la parte Suroeste con direcciones longitudinal y transversal, del sensor que se puso en la parte Noreste se cuenta con información de aceleraciones en dirección transversal a la estructura.

## **5. RESULTADOS DE LAS DOS OPCIONES DE MONITOREO**

### **5.1. Resultado del monitoreo con GPS**

Los resultados que se obtuvieron a partir de las mediciones continuas en el edificio recopila la información almacenada durante las fechas de Noviembre 2011 a Abril 2012 y se presentan en promedios por mes donde se comparan las diferencias de cada uno con el pasado, a la vez que se presentan los desplazamientos máximos medidos de cada mes luego de ser presentadas gráficamente.

Para la comparación se tomó toda la información obtenida a partir del primero de Noviembre de 2011 hasta el último día de Abril de 2012. De estas fechas existen momentos en los que por razones variables no se tiene registro alguno o por la cantidad de satélites que observan los puntos, se tienen calidades bajas y/o con ambigüedades sin fijar, por lo que se descartan como observaciones confiables para la obtención de los promedios.

#### **5.1.1. Registros sísmicos con GPS**

Se presentan los registros que se almacenaron durante actividad sísmica gráficamente con desplazamientos y el espectro procesado. A estas tablas se agregan los máximos valores registrados y en caso de los espectros, la frecuencia en que se presenta.

Las bases de datos guardadas para el estudio, comprendidas por seis meses, se almacenaron con el formato de mensaje de salida del programa spider GPS, por lo que se tenían valores sumamente grandes, en metros, de las coordenadas UTM variables de cada receptor. Para poder hacer la graficación se hizo la diferencia entre cada coordenada con la coordenada promedio con el propósito de tener una línea base cercana al cero y se pasaron a unidades de centímetro.

Por motivos desconocidos, el sistema de respaldo no pudo recuperar los archivos del sismo del 20 de marzo del receptor GPS3 relativo al GPS 1 y en gráficas relativas a la fecha se exponen solo los datos que se tienen del GPS2 en sus direcciones longitudinal y transversal.

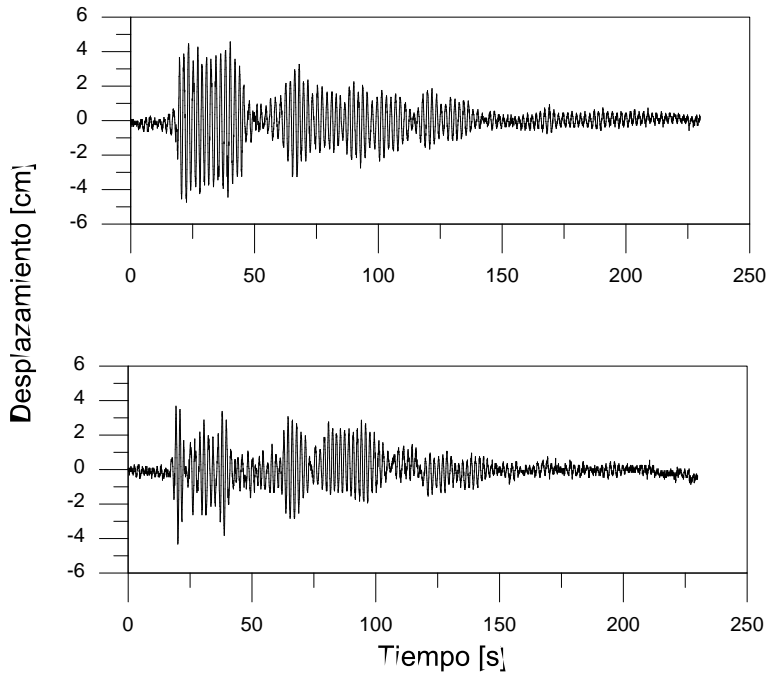
Las gráficas que se presentan a continuación muestran la forma del desplazamiento en centímetros en función de del tiempo en segundos, para cada receptor GPS se muestran cuatro gráficas, para el receptor GPS2 que se encuentra en la azotea esquina SO en dirección Transversal y Longitudinal; y para el GPS3 que se encuentra en la azotea esquina NE en dirección Transversal y Longitudinal.

---

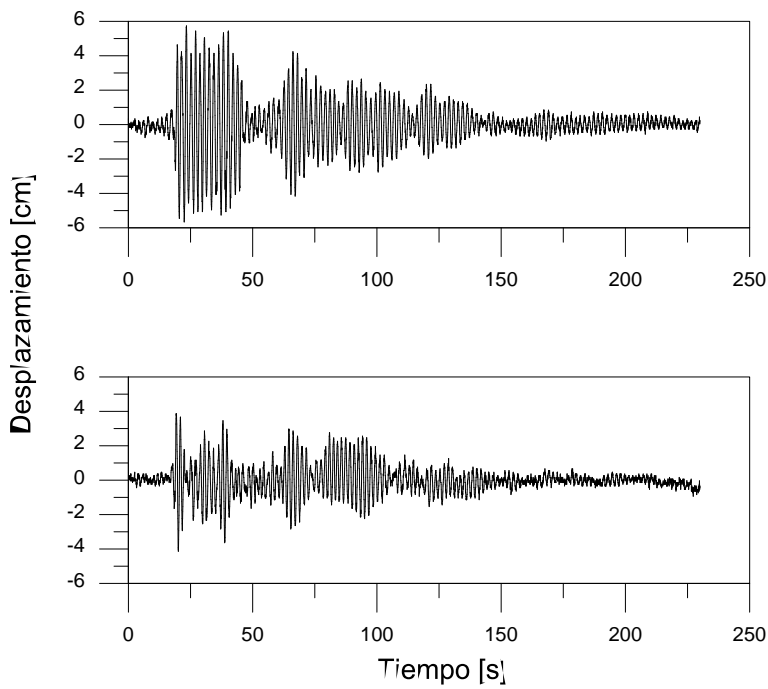
SISMO 11 DE DICIEMBRE DE 2011

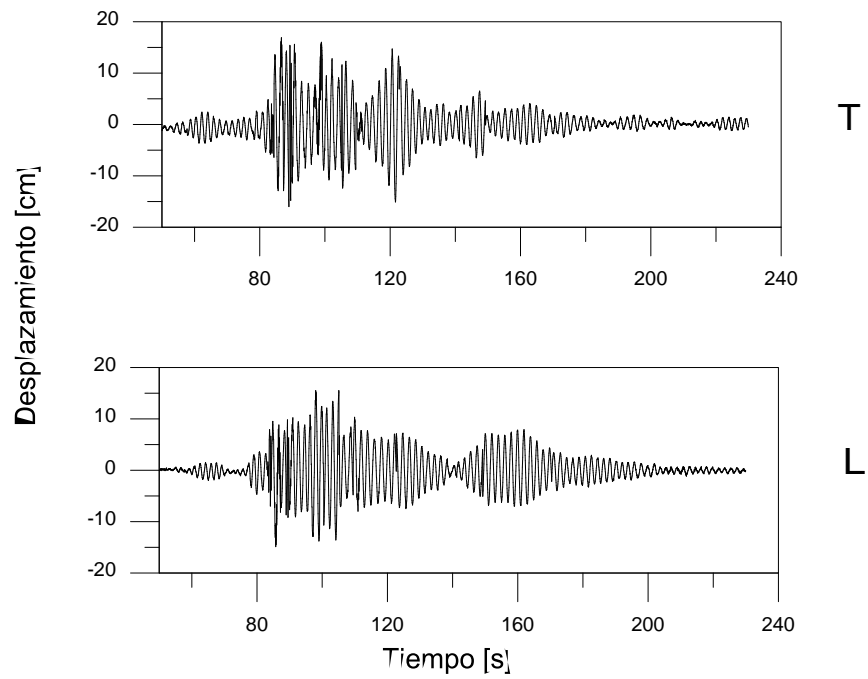
DESPLAZAMIENTOS GPS

Azotea Esquina SO



Azotea Esquina NE

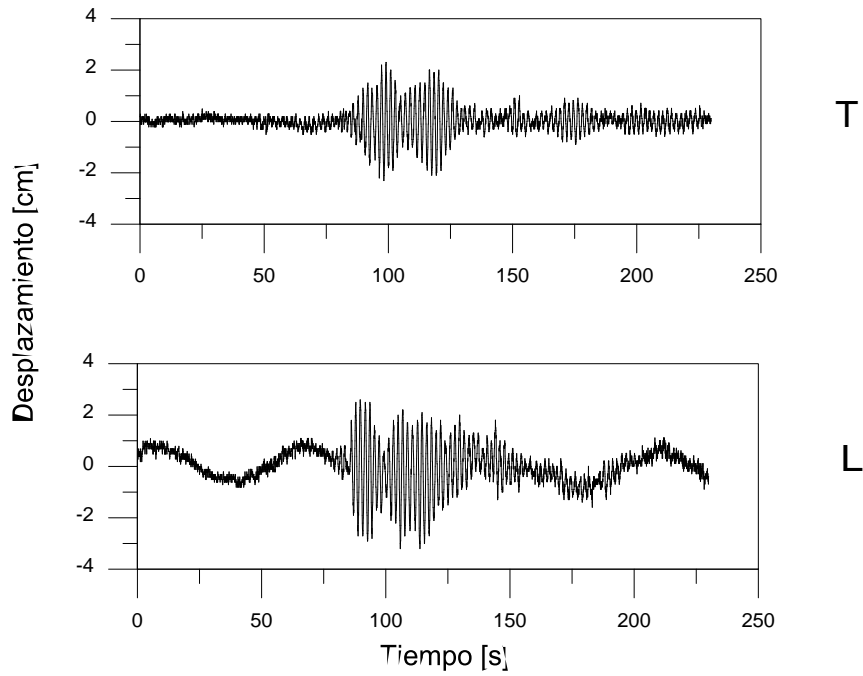


**SISMO 20 DE MARZO DE 2012****DESPLAZAMIENTOS GPS****Azotea Esquina SO**

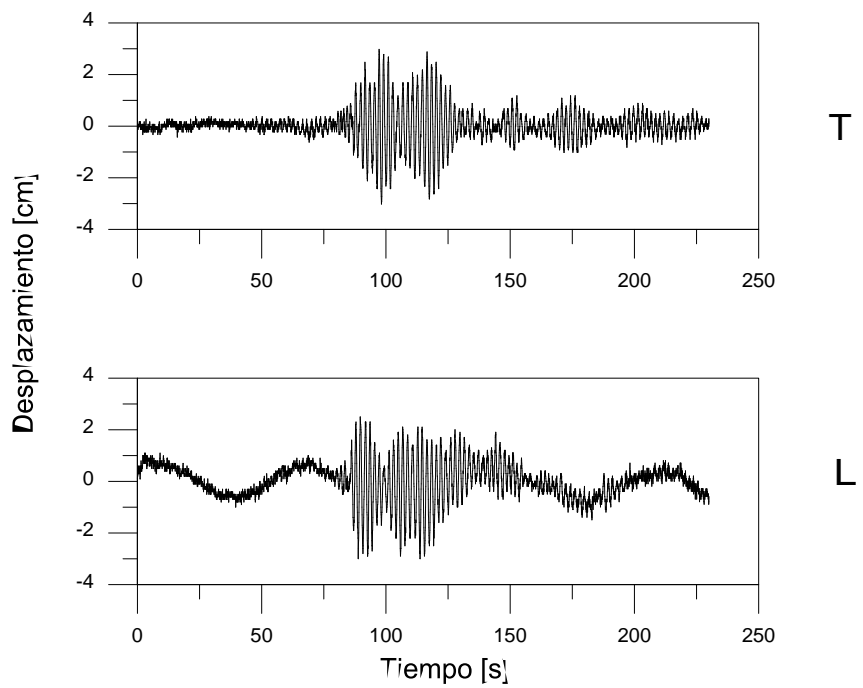
SISMO 02 DE ABRIL DE 2012

DESPLAZAMIENTOS GPS

Azotea Esquina SO



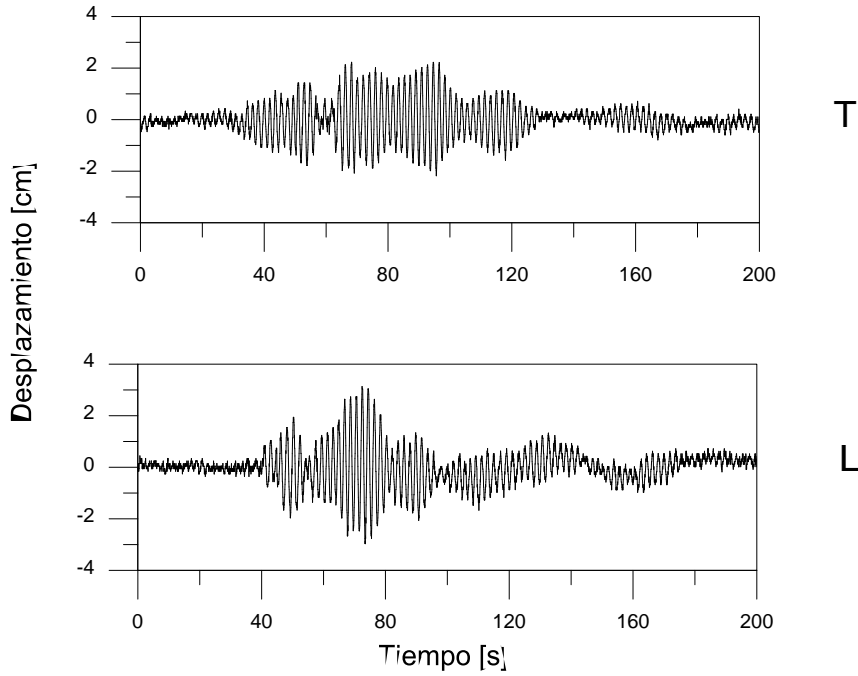
Azotea Esquina NE



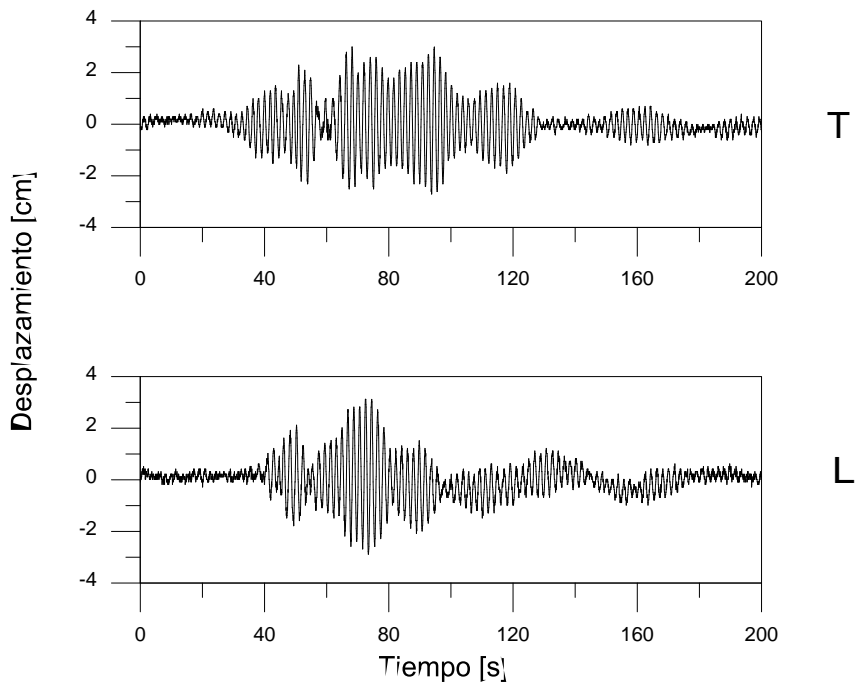
SISMO 11 DE ABRIL DE 2012

DESPLAZAMIENTOS GPS

Azotea Esquina SO



Azotea Esquina NE



### 5.1.2. Monitoreo continuo de la verticalidad del edificio

Para obtener la verticalidad del edificio se realizó la comparación de promedios obtenidos de los GPS 2 y 3 en referencia al GPS1, se realizaron promedios por hora de cada día durante los meses mencionados de las coordenadas UTM de cada receptor. De la tabla se muestran los promedios de las coordenadas UTM obtenidos por cada mes de los receptores GPS 2 y 3.

año	mes	Coordenadas UTM					
		GPS 2			GPS 3		
		E	N	A	E	N	A
2011	Noviembre	485537.0910	2150617.4314	2307.8654	485581.3033	2150623.0689	2308.2407
	Diciembre	485537.0889	2150617.4340	2307.9049	485581.3038	2150623.0727	2308.2425
2012	Enero	485537.0890	2150617.4355	2307.8834	485581.3023	2150623.0720	2308.2457
	Febrero	485537.0914	2150617.4332	2307.8695	485581.3037	2150623.0697	2308.2447
	Marzo	485537.0921	2150617.4338	2307.8705	485581.3037	2150623.0698	2308.2475
	Abril	485537.0942	2150617.4323	2307.8693	485581.3049	2150623.0699	2308.2488

Tabla 5.1 Coordenadas UTM de GPS 2 y 3

Se obtuvieron los desplazamientos con las diferencias entre coordenadas de cada mes en centímetros.

año	mes	Desplazamientos por mes en cm					
		GPS 2			GPS 3		
		E	N	A	E	N	A
2011	Noviembre	0	0	0	0	0	0
	Diciembre	-0.2071	0.2617	3.9456	0.0472	0.3813	0.1826
2012	Enero	0.0089	0.1498	-2.1479	-0.1502	-0.0694	0.3146
	Febrero	0.2344	-0.2275	-1.3925	0.1475	-0.2382	-0.0995
	Marzo	0.0700	0.0515	0.1032	-0.0020	0.0104	0.2810
	Abril	0.2167	-0.1452	-0.1178	0.1197	0.0134	0.1354

Tabla 5.2 Promedios de desplazamiento de GPS 2 y 3

La suma de estos desplazamientos nos da por resultado el desplazamiento que se tiene de noviembre de 2011 a abril de 2012.

Desplazamiento desde Noviembre de 2011 a Abril de 2012 en cm					
GPS 2			GPS 3		
E	N	A	E	N	A
0.3229	0.0902	0.3906	0.1622	0.0975	0.8142

Tabla 5.3 Sumatoria de desplazamientos de GPS 2 y 3

De forma conveniente se obtienen los desplazamientos con respecto al eje longitudinal y transversal del edificio y los desplazamientos que se observaron desde noviembre 2011 a abril 2012.

año	mes	Desplazamientos por mes en cm					
		GPS 2			GPS 3		
		X	Y	Z	X	Y	Z
2011	Noviembre	-	-	-	-	-	-
	Diciembre	-0.1429	0.2084	3.9456	0.1318	0.3822	0.1826
2012	Enero	0.0424	0.1480	-2.1479	-0.1620	-0.1014	0.3146
	Febrero	0.1772	-0.1690	-1.3925	0.0901	-0.1989	-0.0995
	Marzo	0.0798	0.0660	0.1032	0.0004	0.0097	0.2810
	Abril	0.1785	-0.0928	-0.1178	0.1196	0.0399	0.1354

Tabla 5.4 Promedio de desplazamientos de GPS 2 y 3

Desplazamiento desde Noviembre de 2011 a Abril de 2012 en cm					
GPS 2			GPS 3		
X	Y	Z	X	Y	Z
0.3349	0.1605	0.3906	0.1800	0.1315	0.8142

Tabla 5.5 Desplazamientos de GPS 2 y 3

Las distancias que se tienen entre el GPS 2 y GPS 3 se obtienen a partir de sus coordenadas para la dirección longitudinal y transversal del edificio, también se presenta la distancia total entre los receptores y las diferencias entre las distancias.

año	mes	Distancia entre GPS 2 - GPS 3 en metros						
		X	Y	Z	Horizontal	Total	$\Delta$ [cm]	$\Sigma\Delta$ [cm]
2011	Noviembre	41.8110	15.4386	0.3753	44.5703	44.5719		
	Diciembre	41.8132	15.4404	0.3376	44.5729	44.5742	0.2373	0.2373
2012	Enero	41.8121	15.4379	0.3623	44.5711	44.5726	-0.1663	0.0711
	Febrero	41.8113	15.4376	0.3752	44.5702	44.5718	-0.0768	-0.0057
	Marzo	41.8107	15.4370	0.3770	44.5695	44.5710	-0.0750	-0.0808
	Abril	41.8094	15.4383	0.3795	44.5687	44.5703	-0.0741	-0.1549

Tabla 5.6 Distancias entre Receptores GPS



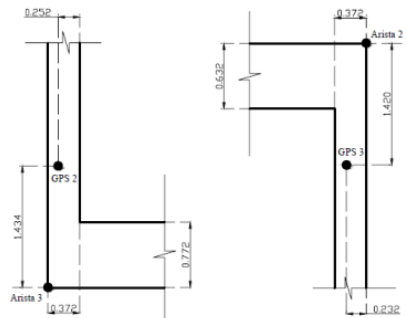


Fig. 5.1 Distancias entre receptores GPS 2 y 3 a las aristas 2 y 3

Las coordenadas de posición dadas por el GPS durante los meses de noviembre de 2011 a abril de 2012 se considera que tienen una buena precisión por haber sido constantes contra desplazamientos observados con los acelerómetros. En base a estas coordenadas se hizo un modelo gráfico simplificado de la torre visto en planta en el cual se graficaron distancias relativas entre los puntos del GPS 2 y 3 con el fin de obtener el ángulo que se tiene entre la dirección transversal de la torre y el Norte geográfico. El ángulo respecto al Norte se utilizó para pasar los desplomes de aristas de puntos cardinales a las direcciones Transversal y Longitudinal de la Torre.

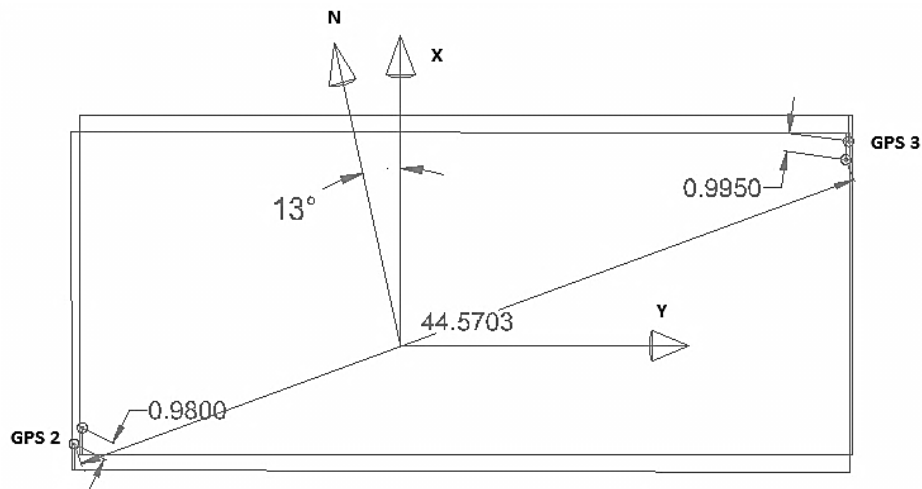


Fig. 5.1 Distancias entre receptores GPS 2 y 3

Al observar la tabla de desplazamientos obtenidos desde noviembre 2011 a abril 2012, se puede notar que aunque mínimos, los desplazamientos favorecen al edificio por presentarse hacia la dirección de posición original.

Cabe resaltar que estos desplazamientos no son los máximos observados, sino el promedio de los meses que podría considerarse como un desplazamiento histórico en el monitoreo del edificio. Los desplazamientos máximos se han presentado bajo las acciones de cargas dinámicas como lo ha sido los sismos y se presentan más adelante.

De la tabla 5.8 se tiene mayor información de la que se muestra dentro de las tablas resumen, sin embargo, el análisis de las muestras mediante el post proceso o la observación, revela la falta de precisión de algunas pruebas por lo que se omiten en la comparación.

Para la realización de los cálculos de desplomes se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones: Los desplazamientos que presentan los receptores de GPS en conjunto son absolutos. Para poder medir los desplomes hace falta medir los desplazamientos relativos de los GPS 2 y 3 en relación al GPS1 por tanto, se igualan coordenadas GPS1 entre medición y medición. Se consideró que el GPS1 se ubica en un punto donde no se han presentado desplazamientos relativos a través del tiempo.

Para el cálculo del desplome total se tomaron como puntos de partida las mediciones topográficas hechas por Ottawa s.a. de c.v. en la fecha que se tuvieron las mediciones GPS tomadas el 12 de noviembre de 2011 y se sumaron ambas para obtener el desplome a la fecha de la estructura.

año	mes	Desplome Total en torre	
		X	Y
2011	Noviembre	1.0100	1.0100
	Diciembre	-1.0114	-1.0079
2012	Enero	-1.0110	-1.0064
	Febrero	-1.0092	-1.0081
	Marzo	-1.0084	-1.0075
	Abril	-1.0067	-1.0084

*Tabla 5.7 Desplome total en la torre*

Los promedios se tienen por procesamiento de cada hora de archivos guardados en tiempo real. De esos promedios se obtuvo un promedio del mes para poder hacer la línea histórica y un promedio diario a fin de expresar el desplazamiento promedio que se tenía por cada 24 horas.

En la tabla 5.8 se muestran los valores máximos de desplazamiento de un día promedio de cada mes, es decir, los valores presentes en la tabla hacen referencia al desplazamiento promedio máximo por un día del mes. El promedio mayor se observa en la columna de las altitudes donde se llegan a presentar desplazamientos de 10 centímetros y en los desplazamientos horizontales a la superficie se tienen valores no mayores a 1.5 centímetros.

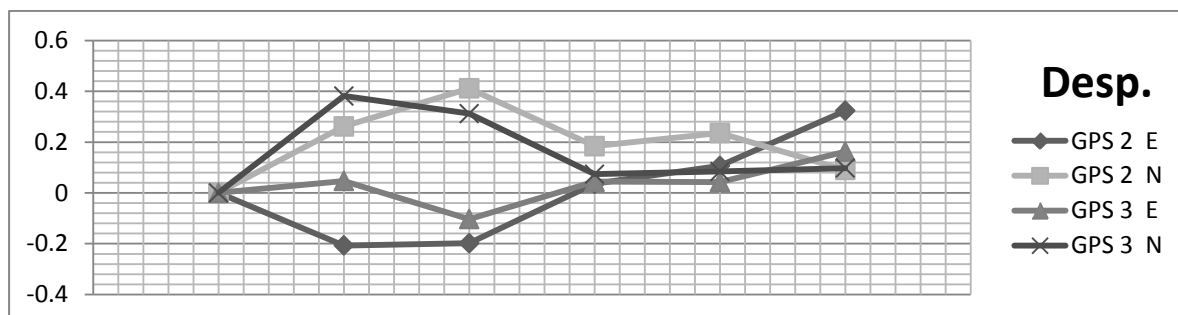
La medición se considera como una noticia positiva en el sentido de que desplazamientos de 1.5 centímetros en un edificio alto son de desplazamientos pequeños dentro de lo permisible y que de ninguna forma se pueden presentar como amenazantes para la estructura.

En cuanto al desplazamiento promedio de 10 centímetros para los meses de diciembre y enero se consideraría algo un tanto anormal, sobre todo para el mes de enero en el cual no se presentó ninguna actividad sísmica o condiciones extraordinarias, pero se conoce por aclaración del fabricante de los receptores que las precisiones medidas verticalmente no son tan buenas como para la medición milimétrica como se presume en las mediciones horizontales y por lo tanto se acepta como un valor tolerable.

año	mes	Promedio máx. de desplazamientos por hora en cm					
		GPS 2			GPS 3		
		E	N	A	E	N	A
2011	Noviembre	0.5261	0.8899	0.5948	0.2030	0.5954	0.3283
	Diciembre	1.0263	1.4758	9.9241	0.3769	0.4224	0.6958
2012	Enero	1.0069	0.6249	10.0599	0.4226	0.6542	1.1112
	Febrero	0.5812	0.3951	0.9339	0.4390	0.5096	0.5884
	Marzo	0.1281	0.1596	0.5290	0.8644	0.2914	0.8138
	Abril	0.2900	0.6000	0.9576	0.5346	0.2493	1.1065

*Tabla 5.8 Promedios máximos de desplazamientos por hora*

El movimiento del vértice de la esquina NE en dirección transversal, lleva una trayectoria similar al vértice de la esquina SO en la misma dirección aunque no la misma exactamente. Para las mismas esquinas en dirección longitudinal del edificio la conclusión es la misma. El motivo de diferencias mínimas entre estas trayectorias se puede deber a deformaciones internas de la estructura.

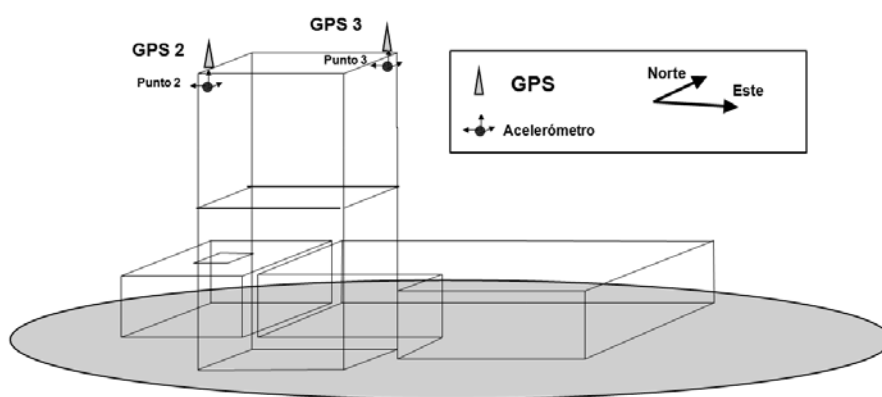


*Desplazamientos en función del tiempo, en meses*

## 5.2. Resultados con el monitoreo con red acelerográfica

De la red de acelerómetros que se encuentra instalada de forma permanente se logró almacenar durante Noviembre de 2011 a Abril de 2012, los mismos eventos sísmicos de magnitudes mayores a los 4.9 grados en la escala Richter que los presentados con el sistema GPS.

De estos eventos se obtuvieron, mediante la doble integración, los desplazamientos ocurridos en los puntos de medición de la red, los desplazamientos máximos y las frecuencias sobre las cuales se encontraban estos desplazamientos.



*Fig. 5.1 Posición de acelerómetros y receptores GPS*

De toda la red de sensores de aceleración instalada en el conjunto de edificios y terreno, se hizo la extracción de archivos trabajados por los sensores de la azotea a fin de hacer la comparación directa contra los receptores de GPS.

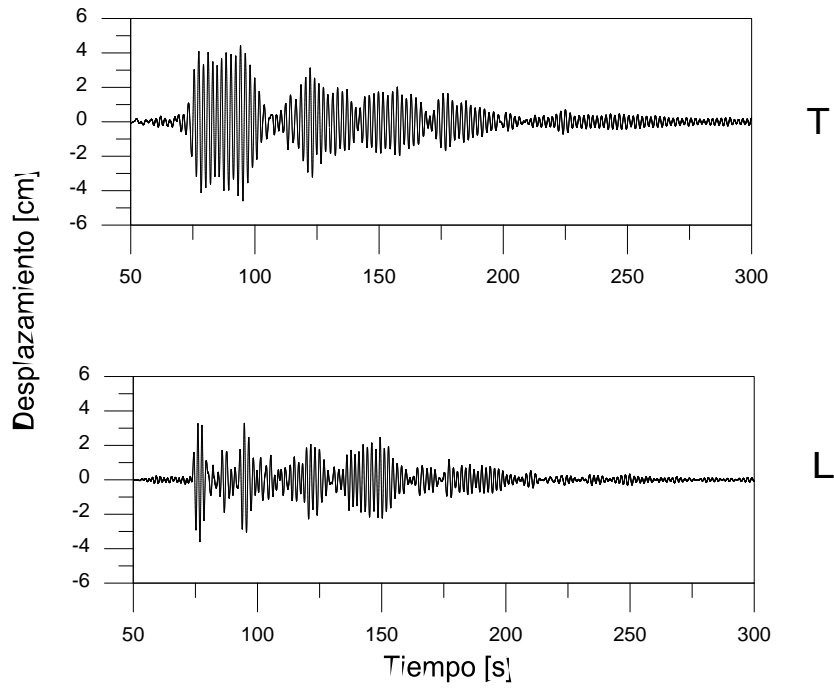
Las posiciones de los sensores uniaxiales son en apariencia las mismas pero los receptores GPS (2 y 3) están en el punto más alto del edificio expuestos a la intemperie y los sensores de aceleración se encuentran dentro del edificio en los últimos pisos.

Para el punto 2 se cuenta con dos sensores y se tienen direcciones Longitudinal y transversal aunque en el punto 3 se cuenta solamente con un sensor uniaxiales en dirección transversal.

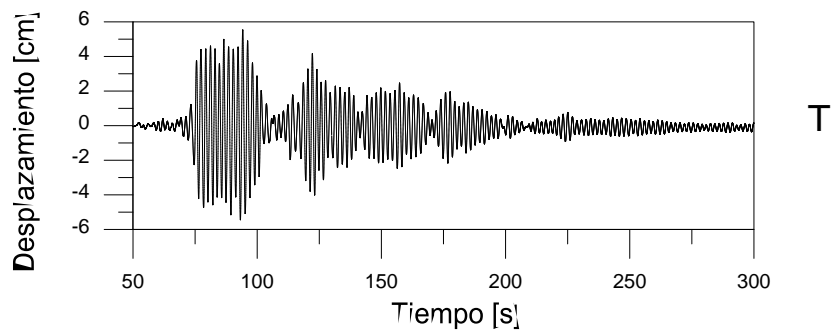
**SISMO 11 DE DICIEMBRE DE 2011**

**DESPLAZAMIENTOS DE ACCELERÓMETROS**

**Azotea Esquina SO**

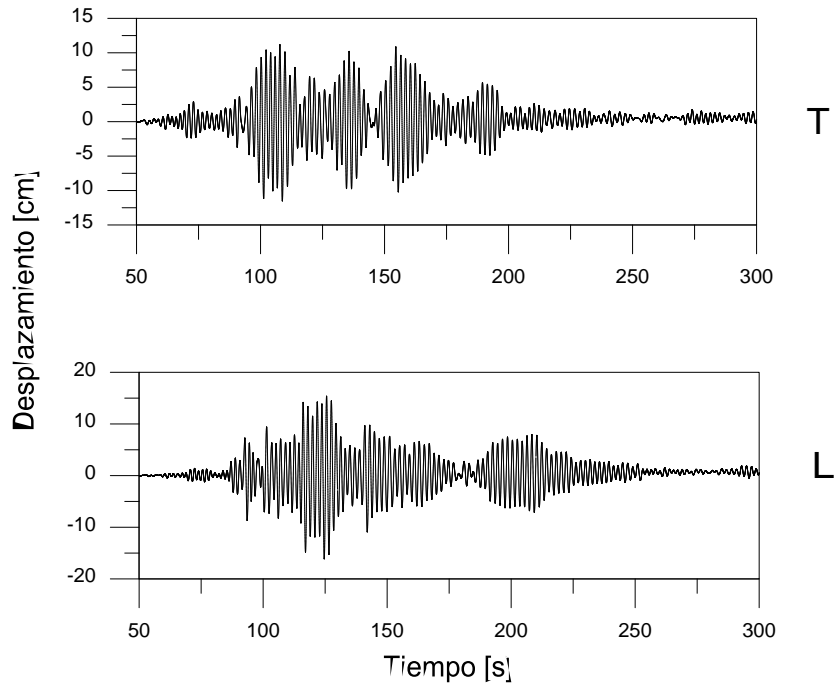


**Azotea Esquina NE**

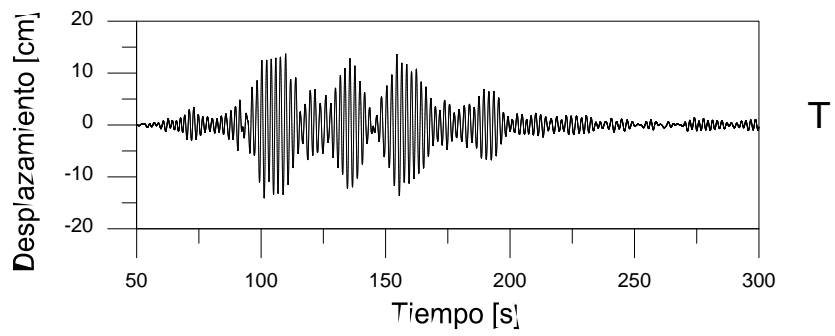


**SISMO 20 DE MARZO DE 2012**  
**DESPLAZAMIENTOS DE ACCELERÓMETROS**

**Azotea Esquina SO**



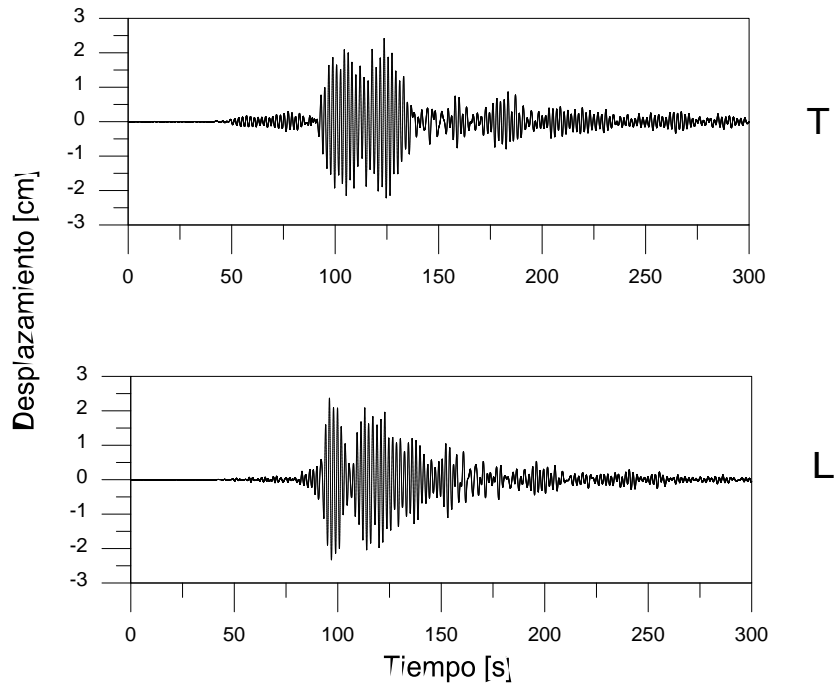
**Azotea Esquina NE**



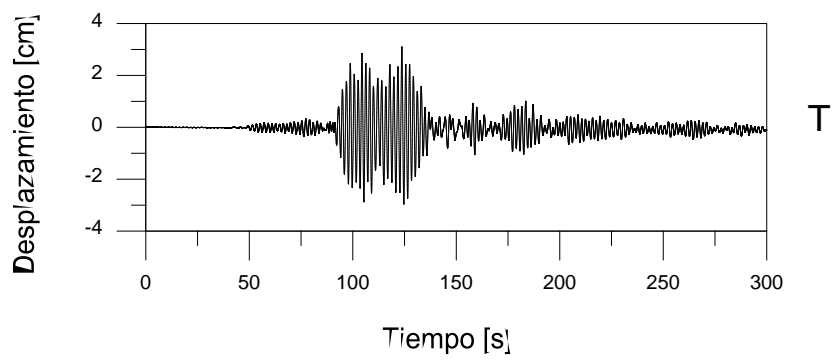
SISMO 02 DE ABRIL DE 2012

DESPLAZAMIENTOS DE ACCELERÓMETROS

Azotea Esquina SO



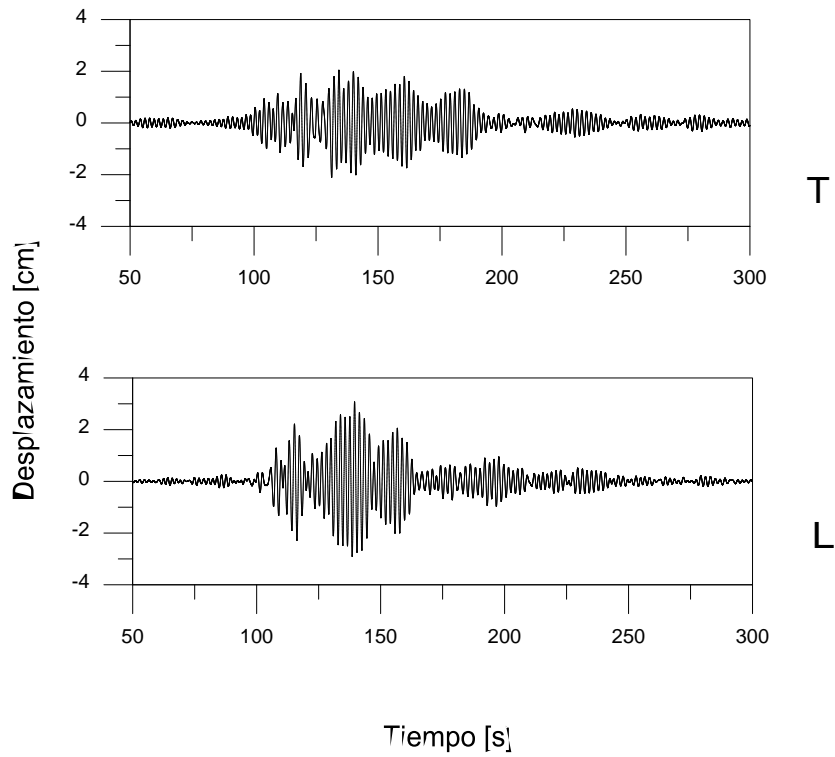
Azotea Esquina NE



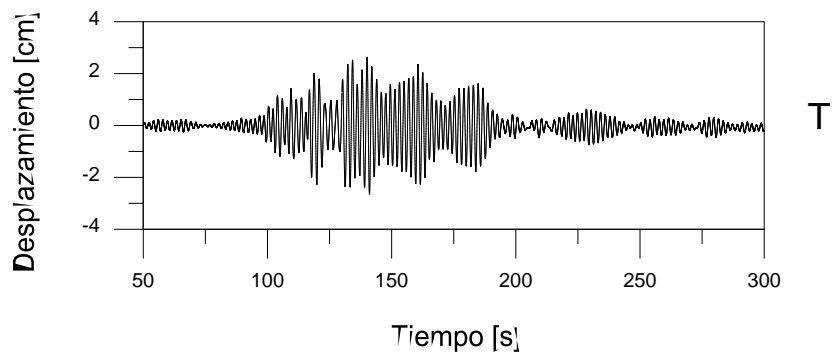
**SISMO 11 DE ABRIL DE 2012**

**DESPLAZAMIENTOS DE ACCELERÓMETROS**

**Azotea Esquina SO**



**Azotea Esquina NE**





Los desplazamientos que se consiguieron directamente del sistema GPS y los desplazamientos a los que se llegaron de forma metodológica mediante una doble integración aplicada a los datos guardados de la red de acelerómetros durante los eventos sísmicos refleja de forma gráfica por su forma, la buena precisión que se tienen en ambos sistemas.

No hay una forma directa de establecer las diferencias exactas entre ambas mediciones pero un buen indicativo puede ser los desplazamientos máximos que se tienen.

De los desplazamientos máximos, las variaciones más significativas entre sistemas está en los valores del 20 de marzo en el que para el sensor A SO en dirección transversal tiene un desplazamiento máximo de 11.65cm y para el GPS2 tiene uno de 16.91cm, que son 5.26cm de diferencia que es en porcentaje un 30 a 45 %. De esa misma fecha si se mira la esquina opuesta su medición es de 16.35cm, por lo tanto se puede deducir que el error se debe tal vez por motivos de la integración o alguna falta de calibración entre sensores de aceleración, ya que deberían coincidir de mejor forma los desplazamientos obtenidos entre una esquina y otra con un mismo sistema de medición.

Fuera del caso con el sensor A NE con dirección transversal las mediciones son muy cercanas y las diferencias son de un orden menor al 10%.

año	mes	día	Desplazamientos máximos [cm]						
			A NE	A SO	A SO	GPS2		GPS3	
			T	T	L	T	L	T	L
2011	Diciembre	11	3.59	4.586	5.554	4.731	4.317	5.74	4.137
2012	Marzo	20	16.35	11.65	14.04	16.91	15.53		
	Abril	02	2.365	2.412	3.134	2.315	3.216	3.027	3.003
		11	3.073	2.103	2.643	2.233	3.145	2.991	3.118

*Tabla 6.1 Desplazamientos máximos durante sismos*

## **6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DEL MONITOREO CON LAS DOS PROPUESTAS**

Se comprueba mediante el uso de del sistema de GPS que a partir de las primeras mediciones hechas no ha existido algún incremento de los desplomes de la torre de Tlatelolco a pesar de la situación en la que se encontró en tempos pasados. Luego de la rehabilitación hecha en 2006 la torre se puede evaluar como estable y en buenas condiciones de servicio.

A pesar de haberse presentado sismos de magnitud considerable de los cuales se registró información antes, durante y después del mismo, no se han encontrado cambios considerables de periodo fundamental de la estructura. Esta es una noticia excelente ya que nos proyecta una condición estable de la Torre.

Por la parte comparativa entre los dos distintos sistemas de monitoreo se deduce lo ya antes expuesto por varios autores de distintos países que han realizado investigaciones sobre sistema de GPS y red de acelerómetros. El GPS presenta resultados sobresalientes y con una precisión muy buena a pesar de los 20Hz con los que se hicieron las pruebas se ha demostrado claramente las grandes aportaciones que se hicieron con ayuda del sistema en la evaluación de la estructura. Por su parte la red de acelerómetros ha servido por su larga trayectoria en el campo de la instrumentación como un estándar con el cual comparar el sistema GPS.

Los resultados obtenidos son similares antes después y durante los registros almacenados.

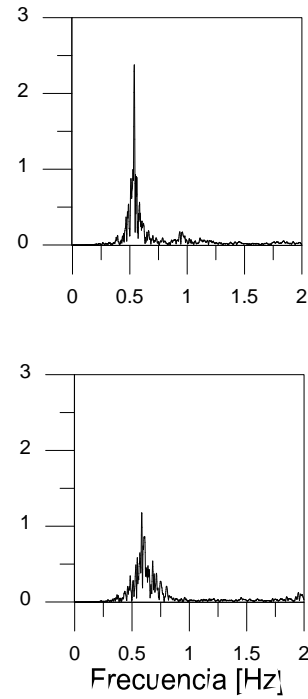
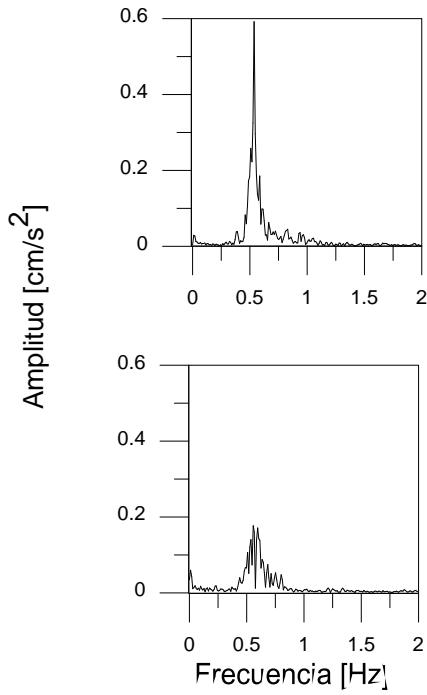
Estos sistemas son complementarios entre sí, excelentes respuestas en frecuencias altas y desplazamientos relativos aportados por la red de acelerómetros se ayudan por las frecuencias bajas y desplazamientos estáticos y cuasi estáticos, obtenidos con GPS, para combinarse en resultados más completos que terminan elaborando una evaluación mejor y más completa de lo que se podría hacer el uso de un solo sistema de instrumentación.

SISMO 11 DE DICIEMBRE DE 2011

ESPECTROS GPS

ESPECTROS DE ACELERÓMETROS

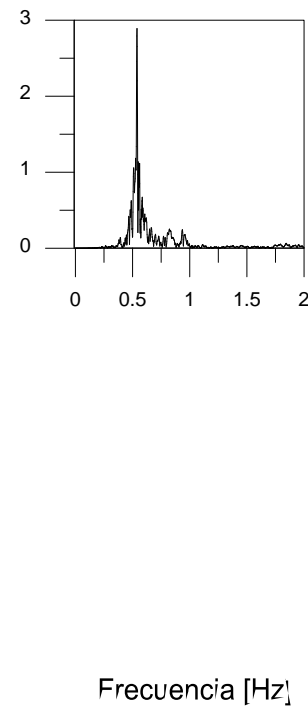
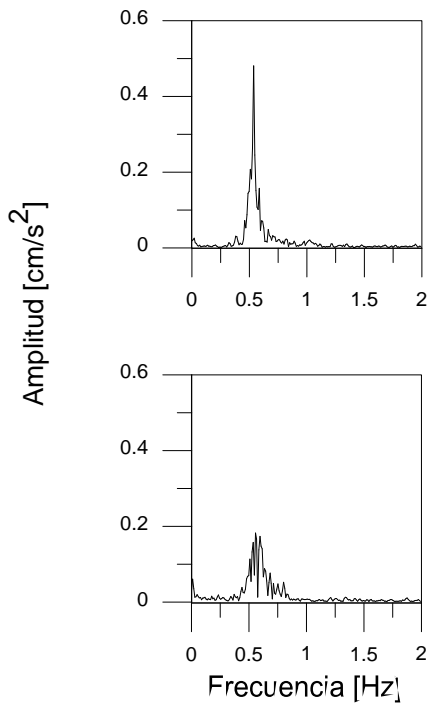
Azotea Esquina SO



T

L

Azotea Esquina NE



T

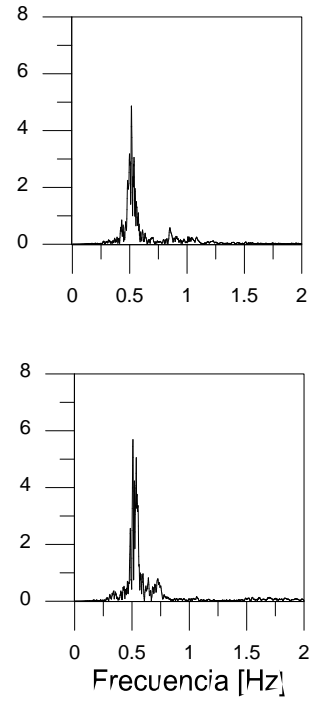
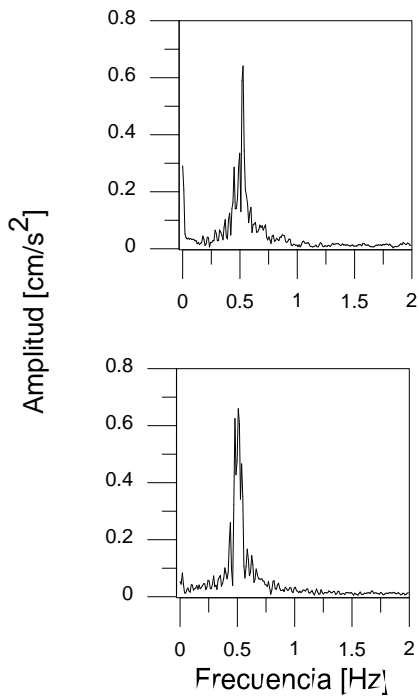
L

SISMO 20 DE MARZO DE 2012

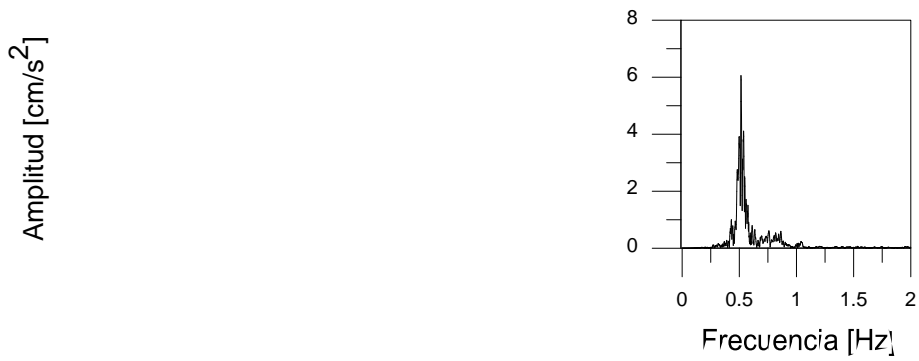
ESPECTROS GPS

ESPECTROS DE ACELERÓMETROS

Azotea Esquina SO



Azotea Esquina NE

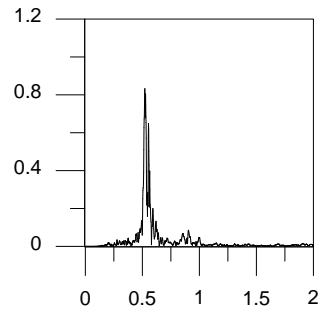
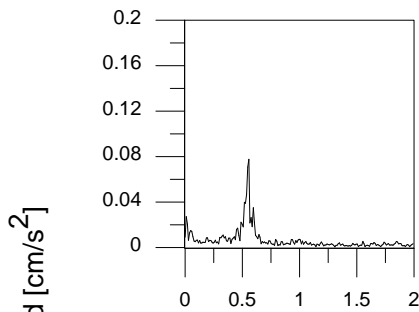


SISMO 02 DE ABRIL DE 2012

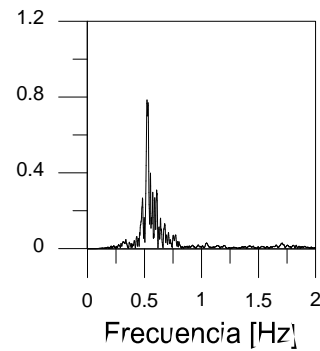
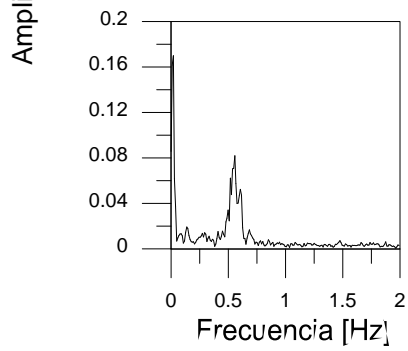
ESPECTROS GPS

ESPECTROS DE ACELERÓMETROS

Azotea Esquina SO

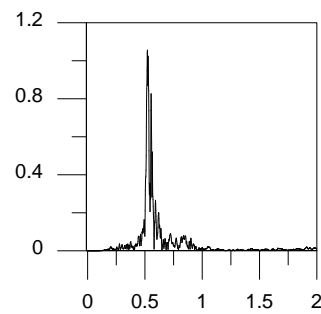
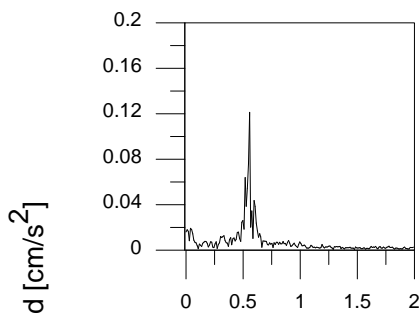


T

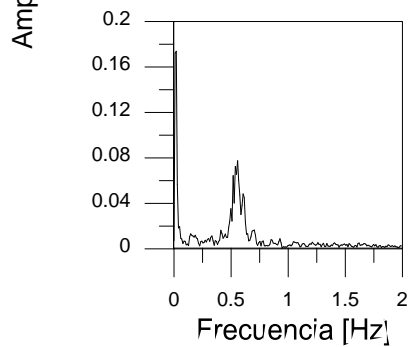


L

Azotea Esquina NE



T



Frecuencia [Hz]

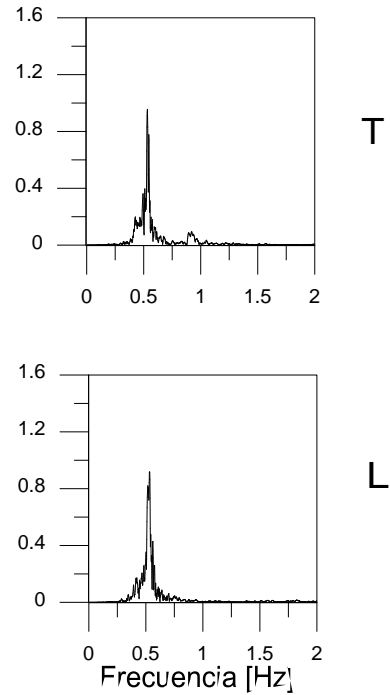
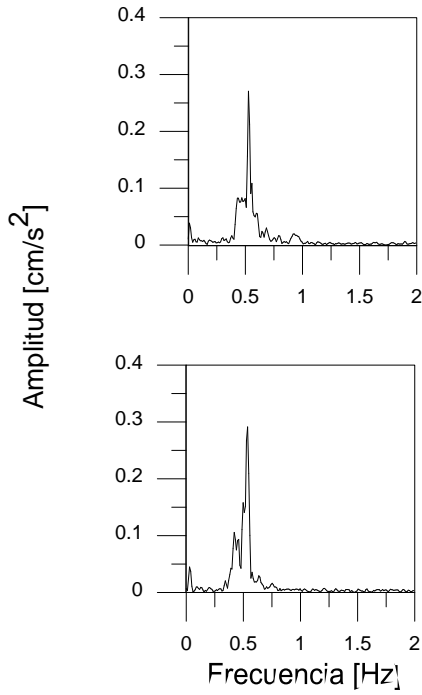
L

SISMO 11 DE ABRIL DE 2012

ESPECTROS GPS

ESPECTROS DE ACELERÓMETROS

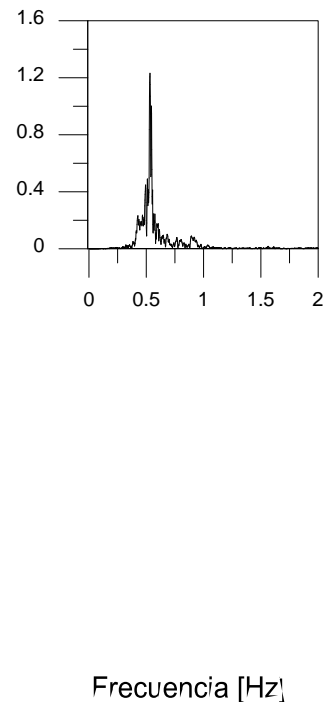
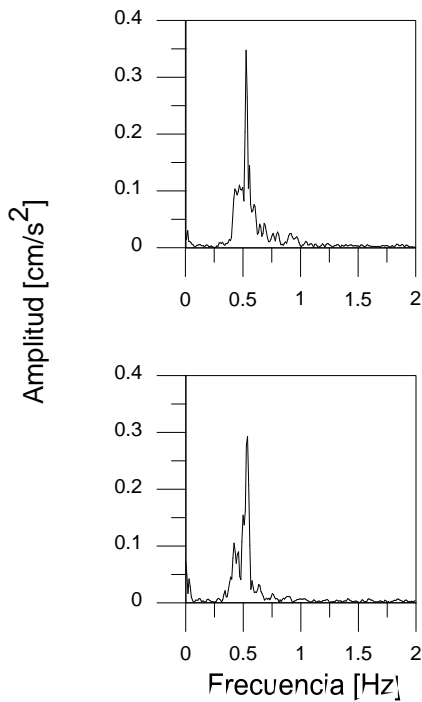
Azotea Esquina SO



T

L

Azotea Esquina NE



T

L

En la *tabla 6.2* se presentan las frecuencias naturales medidas de la estructura, con un color atenuado se indican frecuencias de amplitud importante y con un color más intenso las frecuencias en la que se presenta la amplitud máxima.

Las frecuencias en las que se encuentran las amplitudes mayores son muy similares entre los acelerómetros y los GPS. En algunos casos se observa que la frecuencia de amplitud máxima es diferente, pero si se comparan las frecuencias tanto para las amplitudes máximas como para las amplitudes apreciables, se encuentra la similaridad entre los resultados. Por ejemplo si consideramos la frecuencia principal en la fecha 20 de marzo en dirección transversal que es de 0.5198Hz de los acelerómetros y de 0.5563Hz en los GPS se puede considerar una diferencia importante, ahora si se considera la frecuencia con una amplitud considerable de los acelerómetros la cual es de 0.5525Hz y se vuelve a comparar con la frecuencia 0.5563Hz medida por los GPS, se deduce una diferencia despreciable.

año	mes	día	Frecuencias con amplitudes máximas [Hz]						
			A NE	A SO	A SO	GPS2		GPS3	
			T	T	L	T	L	T	L
2011	Diciembre	11	0.5400	0.5362	0.5840	0.5349	0.5563	0.5362	0.5563
							0.5953		0.5953
2012	Marzo	20	0.5135	0.5123	0.5072	0.5261	0.5060		
			0.5362	0.5374	0.5349		0.5349		
	Abril	02	0.5198	0.5198	0.5198	0.5563	0.5563	0.5563	0.5563
			05	0.5525	0.5525	0.5500		0.5173	0.5173
		11	0.5324	0.5312	0.5324	0.5249	0.5374	0.5249	0.5362

*Tabla 6.2 Frecuencias con amplitud máxima durante sismos*

En caso comparativo de variaciones, ahora no entre sistemas sino al paso del tiempo, muestran una condición de cambio de las frecuencias, no obstante esta variación no presenta en ningún momento un cambio brusco significativo y si se considera la primera medición de la última, que representa el cambio del antes y después de las mediciones hechas, se tiene una diferencia de 0.05Hz en el caso más desfavorable que en el periodo de la estructura indica una variación de 0.166 segundos. Los resultados reflejan el buen comportamiento de los sistemas GPS y de la red de acelerómetros en la instrumentación y monitoreo de las estructuras, y también de la estabilidad que demuestra la estructura de estudio.

Luego de obtener frecuencias otra forma de analizar los resultados, quizás de forma un poco más clara, es con la comparación de los periodos de vibrar del edificio. Es una forma alternativa a la comparación de frecuencias. Sacando el inverso de la frecuencia en Hz se tiene el periodo natural de vibrar en segundos, este es un parámetro que nos puede servir para medir la rigidez de la estructura.

Los periodos naturales en dirección transversal como en la longitudinal son valores muy cercanos, según los registros en mes de marzo los periodos son los mismos para ambas direcciones y por lo tanto se tienen una igualdad de rigideces

año	mes	día	Periodos de vibración [s]						
			A NE	A SO	A SO	GPS2		GPS3	
			T	T	L	T	L	T	L
2011	Diciembre	11	1.852	1.865	1.712	1.869	1.798	1.865	1.798
							1.680		1.680
2012	Marzo	20	1.947	1.952	1.971	1.901	1.976		
			1.865	1.861	1.869		1.869		
	Abril	02	1.924	1.924	1.924	1.798	1.798	1.798	1.798
			1.810	1.810	1.818		1.933	1.933	1.933
		11	1.878	1.883	1.878	1.905	1.861	1.905	1.865

*Tabla 6.3 Periodos de vibración de estructura durante sismo*



---

## 7. COMENTARIOS FINALES

A partir de los resultados y los análisis a los que se llegan mediante las mediciones de instrumentación, con ayuda de parámetros estructurales, las conclusiones sobre las condiciones de la estructura son, desde todas las perspectivas, positivas.

Referente a los desplomos que históricamente se tienen almacenados y en los cuales se ha llegado a medir hasta más de un metro hacia una dirección, los resultados obtenidos por el sistema de GPS indican desplazamientos milimétricos, que aunque mínimos son hacia la posición inicial que tenía el edificio.

La semejanza en los periodos naturales de vibración en las direcciones transversal y longitudinal de la estructura es posiblemente consecuencia de algunos de los trabajos de rehabilitación del edificio para rigidizarla, como la inclusión de trabes cruzadas en dirección transversal que van de lado a lado y que en definitiva han sido buena ayuda estructural.

Los desplazamientos casi estáticos mínimos, la permanencia de los periodos dentro de un rango pequeño y los desplazamientos máximos aceptables durante los eventos sísmicos son indicativos de la estabilidad actual de la estructura y por tanto, la seguridad que representa para el personal que presta servicios dentro del inmueble. Esta estabilidad se ha logrado gracias a los trabajos de rehabilitación continuos.

---

## 8. CONCLUSIONES

Sobre los instrumentos de medición...

El RTK-GPS en comparativa con otros instrumentos de medición tiene ventajas realmente importantes aunque también limitantes que impiden su aplicación en cualquier situación que se pueda presentar. Algunas de sus ventajas son que no se necesita de la visibilidad entre puntos medidos. Puede usarse a cualquier hora del día, cualquier día del año, sin importar si es de día o de noche y sin importar el clima. Los resultados son muy precisos. El trabajo se puede realizar con una sola persona y en un menor tiempo o incluso dejar el sistema operando de forma permanente con visitas de recopilación de información y chequeo de configuración.

La principal limitación de las mediciones con un sistema GPS es la necesaria visibilidad de los receptores usados a al menos 4 satélites. La restricción impide que se puedan realizar mediciones en lugares bajo techo o lugares con características que limiten la visibilidad al cielo como pueden ser, centros de ciudad donde existan edificios altos que puedan bloquear las señales o mediciones bajo tierra.

Por otra parte, los acelerómetros pueden cubrir esas limitaciones presentes en los sistemas de GPS y las mediciones que se logran con estos aparatos ya se ha demostrado que son muy buenas. La desventaja principal de los sensores de aceleración está en la falta de habilidad para captar sucesos casi estáticos. Los desplazamientos se logran a partir de la doble integración, lo que significa que pueden presentar diferencias mínimas con los desplazamientos reales por la constante de integración, son desplazamientos relativos y carecen de posibilidad de medir desplazamientos permanentes. Limitación que cubren los GPS al medir los desplazamientos directamente.

En conclusión ambos sistemas se complementan y funcionan de forma excelente. Tanto en el resguardo de información como en el procesamiento de la misma, donde los acelerómetros son mejores midiendo frecuencias altas de vibración y no tanto para las frecuencias bajas, lo que es contrario para los sistemas GPS que miden mejor las frecuencias bajas que las altas. En caso de tener que recurrir a algún sistema para trabajar de forma solitaria, tendría que realizarse una valoración sobre los objetivos, condiciones de medición y la estructura misma que se busca instrumentar para poder optar por alguno de los dos métodos.

---

Sobre la instrumentación...

El monitoreo de salud estructural tiene un propósito preventivo, con el fin de tomar las medidas correctivas oportunas. De ahí que se tenga información histórica que sirva para establecer parámetros de conformidad y tendencias, que faciliten la identificación de algún daño o en su caso, algún sistema de alerta.

Son muy importantes las investigaciones sobre el monitoreo estructural, es cierto que las inversiones iniciales que se deben hacer al adquirir equipos de instrumentación son muy elevadas, pero se compensa en parte el no tener que recurrir más que a mantenimientos de bajo costo en periodos no muy cortos y en el costo que se generaría por operación, ya que el personal que se necesita para la implementación de estos equipos puede ser muy reducido y luego de ser puestos en marcha, la operación la puede realizar incluso una sola persona. Los tiempos que se ganan son grandes y los beneficios son más grandes todavía.

Ya sea para realizar un mantenimiento, una calibración de algún modelo, supervisar la construcción de algún diseño, la detección de daños en las estructuras o la investigación al comportamiento dinámico de las estructuras, la red de acelerómetros y el sistema GPS han demostrado ser de gran utilidad para todos los países del mundo en que se han implementado.

Con los grandes avances que se han tenido al paso del tiempo, en especial en las últimas décadas, estos sistemas de monitoreo estructural prometen ser aún más provechosos a futuro, tanto para la ingeniería civil, como para todos los ciudadanos a los que se les brinda seguridad con ayuda de estos y las posibilidades de aplicarlos a conveniencia en distintas formas y en complemento a distintas aplicaciones, abren las puertas al área de la investigación para encontrar beneficios prácticos, eficientes, provechosos y rentables.

---

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia y a mis padres por su cariño, por el esfuerzo y constante apoyo que me han dado para que yo pueda alcanzar esta meta.

Al Director de esta tesis M.I. Gerardo Rodríguez Gutiérrez, por su enorme aportación, apoyo y paciencia en la realización de este trabajo. Gracias por todos los conocimientos compartidos y su valioso tiempo.

Al M.I. Daniel Aldama por su importante aportación y ayuda en la aplicación de programas de cómputo para el procesamiento de información.

Al Instituto de Ingeniería y a la UNAM, por todos los apoyos otorgados que me permitieron formarme profesionalmente. Estaré siempre orgulloso de haber pertenecido a estas grandes instituciones.

A todos los profesores de la facultad de ingeniería por su dedicación y compromiso, en especial a mis sinodales por su amable aceptación, por el tiempo y las recomendaciones.

Y a todos los amigos que me apoyaron y ayudaron en el trayecto de la carrera.

---

## BIBLIOGRAFÍA

D. MURIÀ VILA, G. RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ. 2009. Instrumentación del centro cultural universitario Tlatelolco.

PAUL R. WOLF –CHARLES D. GHILANI. 2008. Topografía. 11a. Edición.

TRACY KIJEWski-COREA. 2005. GPS: A new tool for structural displacement.

TRACY KIJEWski-COREA. 2007. Monitoring the wind-induced response of tall buildings: GPS performance and the issue of multipath effects.

URIBE CASTAÑEDA. 2005. Algunas consideraciones sobre el conjunto de edificios de la secretaría de relaciones exteriores en Tlatelolco.

PANOS A. PSIMLOULIS-STATHIS C. STHIROS. 2007. Measurement of deflections and oscillation frequencies of engineering structures using robotic theodolites (RTS).

GUOCHANG XU. 2007. GPS theory, algorithms and applications.

P. OCHOA, M. VILLEGAS. 2001. piezocomposites metal-cerámica como elementos activos en acelerómetros.

WAN AZIZ W.A. 2004. Monitoring high-rise building deformation using Global Positioning System.

WAN AZIZ W.A. 2005. Tall structures deformation monitoring using RTK-GPS.

WAN AZIZ W.A. 2005. The deformation study of high building using RTK-GPS: A first Experience in Malaysia.

M. CELEBI, A.SANLI. GPS Successfully monitoring dynamic response of a tall building in San Francisco.

Y. TAMURA, M. MATSUI. 2002. Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS.

J. CYCON. 2008. Design and validation of a real-time structural health monitoring system interfacing through a local area network.

M. FRAPOLLI, L. MANETTI. 2002. Integrating GPS and traditional measuring instruments for large structure monitoring.

A.KNECHT, L.MANETTI. 2000. Using GPS in structural health monitoring.

JEAN-MARIE\_ZOGG.2002.GPS Basics, Introduction to the system, application overview.

CLEMENT OGAJA. 1997. A framework in support of structural monitoring by real time kinematic GPS and multisensory data.

S.GREWAL, R WEILL. 2001. Global positioning systems, Inertial navigation and integration.

ASAEL M. RAMÍREZ DIAZ. 2009. Estudio de la cinemática de una torre y tres cuerpos bajos a instrumentar en la Cd. De México. UNAM.