



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES**

**OBSERVADOS CON GPS EN EL OCCIDENTE DE LA CUENCA DE MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**P R E S E N T A N:**

**Roxana López Dinorín**

**Marco Antonio Tentle Jiménez**

**TUTOR**

**Dr. Osvaldo Sánchez Zamora**





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.



---

## AGRADECIMIENTOS

*Luego de tanto trabajo, esfuerzo y dedicación, este trabajo representa uno de los pasos más importantes en mi vida, por dicha razón es un gran placer utilizar este espacio para expresar mi sincera gratitud a todas aquellas personas que desinteresadamente formaron parte de la conclusión de esta tesis y de mi formación profesional.*

*El apoyo y comprensión de mi gran familia y de mis más queridos amigos ha sido un soporte muy fuerte en momentos de desesperación. Es muy difícil mencionar a todas esas maravillosas personas, así que no se sientan ofendidos si olvido citar a alguna, en general saben que todos son especiales. Gracias alentarme para seguir adelante.*

*Primeramente debo dar un especial agradecimiento a mi director de tesis el Dr. Osvaldo Sánchez Zamora por ser un excelente guía y ejemplo.*

*Quiero dedicar este trabajo y rendir un tributo de profundo agradecimiento con todo el cariño de hoy y siempre para mis padres y hermanos, porque a pesar de no estar cerca físicamente, siempre están pendientes de mi bienestar y si no fuese por el esfuerzo realizado por ellos no hubiese sido posible concluir con esta etapa. Gracias a todos por creer y confiar en mí.*

*A mis padres: Mario y María, a mis hermanos Julio y Mario porque a pesar de la distancia, siempre los llevo en mi corazón, el ánimo, apoyo y alegría que me brindan me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante en todo lo que me propongo hacer. A mi hermana Elizabeth, mi abuelita Lichita, mi prima Yaz y mi tía Andrea, por ser un gran soporte en aquellos momentos de soledad.*

*A Osvaldo Barrón Parra por ser un gran amigo, compañero, ahora esposo y padre de mi primer hijo, un especial agradecimiento por su apoyo durante nuestra formación profesional, por su comprensión*



---

*en momentos de angustia, por transformar la tristeza en alegría, porque a su lado la soledad no existe y especialmente por su gran paciencia y amor. Te amo como no tienes idea.*

*Es de gran importancia para mí dar un agradecimiento muy sincero y especial a los sinodales que aceptaron guiarnos y apoyarnos en el cumplimiento de esta meta, pero sobre todo al Dr. Zoltan de Cserna de Gömbös y al M.C. Javier Francisco Lermo Samaniego por su especial participación, por ser grandes ejemplos a seguir, por su paciencia y tiempo brindado. Sus consejos e ideas enriquecieron mi formación profesional. Muchas pero muchas gracias.*

*Por último eh aquí los nombres de mis más preciados amigos, quienes de algún modo contribuyeron e influyeron al compartir tantos momentos especiales durante mi estancia en la facultad y ocuparon un lugar muy especial en mi corazón, con su apoyo y cariño ayudaron a que pudiera llegar a ser la persona que ahora soy, los quiero mucho a todos. Mil gracias a Eduardo G. Carmona, Ángel García, todos los Toños, Antonio Colín, J. Antonio Martínez, Antonio Murillo, Antonio Rojas, Marco Antonio etc., a Daniel Jiménez, Hugo René, a Moisés, Miguel A. Chora, Javier Bravo, Pancho y dado que mi memoria en ocasiones es bastante deficiente, a todos los que haya olvidado nombrar, también muchas gracias.*

*Roxana López Dinorín*



---

*Marco Antonio Tentle Jiménez*

*Dedicatoria*

*Gracias por estar conmigo siempre y brindarme todo su apoyo incondicional.*

*Gracias sobre todo por darme su cariño.*

*Gracias por confiar en mí siempre y alentarme a seguir adelante, a pesar de todos mis tropiezos.*

*Gracias por guiarme en todas las etapas de mi vida, fue difícil y sin ustedes me hubiera perdido, es por eso que les debo todos mis logros.*

*Gracias por el ejemplo y los valores que me enseñaron porque gracias a ustedes soy un mejor ser humano.*

*A mis padres:*

*Armando Tentle Juárez y Gloria Jimarez Fabián por todo el apoyo que recibí durante mi formación profesional.*



---

*Marco Antonio Tentle Jiménez*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi segundo hogar y sobre todo a la Facultad de Ingeniería todos mis respetos por el gran nivel de educación que ofrece.*

*Al Dr. Osvaldo Sánchez Zamora por ser mi guía en esta etapa de titulación.*

*A mis hermanos Noemí, Maricela, Armando y German por estar conmigo en todo momento, sin ustedes definitivamente no lo hubiera logrado.*

*A todos mis amigos que siempre me han acompañado.*

*A Tania Mariel Rosales Moreno, gracias por estar conmigo, eres la fuerza de mi vida. TE AMO*



---

---

## Contenido

<b>RESUMEN.....</b>	<b>8</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>II. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Funcionamiento del GPS .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Segmentos del Sistema GPS .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Tipos de Estaciones.....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Tipos de Levantamientos.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5 Tipos de receptores.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6 Tipos de Satélites.....</b>	<b>23</b>
<b>2.7 Tipos de Monumentos o Mojoneras.....</b>	<b>24</b>
<b>2.8 Errores en el Sistema GPS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.9 Aplicaciones del sistema GPS .....</b>	<b>29</b>
<b>2.10 Aplicaciones del Sistema GPS en el monitoreo de la deformación         tectónica de la Cuenca de México. ....</b>	<b>30</b>
<b>III. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS GPS .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Adquisición de Datos en Campo .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Análisis Preliminar de Datos .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 Procesamiento de Datos .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.1 Paquete GIPSY-OASIS II.....</b>	<b>36</b>
<b>IV. RED DE SISTEMA GPS EN LA CUENCA DE MÉXICO.....</b>	<b>40</b>
<b>V. GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE MÉXICO .....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Descripción General de la Cuenca de México.....</b>	<b>43</b>
<b>5.2 Geología Histórica .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3 Estratigrafía General.....</b>	<b>45</b>
<b>5.4 Zonificación de la Cuenca de México .....</b>	<b>47</b>
<b>VI. HUNDIMIENTO Y AGRIETAMIENTO EN LA CIUDAD DE MÉXICO .....</b>	<b>50</b>
<b>6.1 Breve Historia del Hundimiento y el Agrietamiento en la Ciudad de         México.....</b>	<b>50</b>
<b>6.2 Mecanismos de Generación y Propagación de Grietas.....</b>	<b>53</b>



---

6.3 Campos de Esfuerzos y Generación de Fallas. ....	58
6.4 Desplazamientos Horizontales .....	61
6.5 Desplazamientos Horizontales en la Cuenca de México .....	63
<b>VII. RESULTADOS.....</b>	<b>64</b>
7.1 Resultados de Desplazamiento Horizontal medidos con GPS.....	64
7.2 Análisis de resultados.....	68
7.3 Análisis de la Relación Tectónica Regional con las Mediciones de Desplazamiento Horizontal con GPS.....	85
<b>VIII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>93</b>



---

## RESUMEN

En este trabajo damos a conocer los resultados más recientes acerca de los desplazamientos horizontales y verticales (hundimiento) en el Occidente de la Cuenca de México, obtenidos a partir de mediciones con GPS geodésicos de alta precisión, en una red de 18 estaciones ubicadas en las tres zonas geotécnicas en las que se divide la Cuenca de México. Esta red ha estado activa desde el año 1995, con estaciones de ocupación temporal.

El análisis de los desplazamientos es de suma importancia ya que de esta forma es posible saber qué zonas son las que presentarán mayores problemas de desarrollo de fracturas, asentamientos o su posible relación con fallas preexistentes. Los desplazamientos horizontales nos proporcionan información acerca del proceso de deformación de la corteza debido al movimiento de las placas tectónicas que tiene su origen en la zona de subducción de las placas de Cocos y Rivera por debajo de la placa de Norteamérica.

La mayor parte de las estaciones se desplazan al SW, aproximadamente 10 mm por año. Estos resultados sugieren un comportamiento distinto dependiendo de la zona en la que se encuentra cada estación. Los vectores revelan que los desplazamientos horizontales, en su mayoría dirigidos hacia el suroeste pueden estar asociados con el sistema de fallas de cizalla inferido por de Cserna y colaboradores, (1988) y otros 2 sistemas de fallas que se orientan principalmente al este y al suroeste mencionados por Chavacán, (2007). El comportamiento de los vectores puede estar reflejando el movimiento irregular de bloques divididos por fallas originadas principalmente por una acumulación de esfuerzos generados por la subducción de la Placa de Cocos contra la Placa de Norteamérica.



## I. INTRODUCCIÓN

Los problemas causados por la deformación tectónica en el área metropolitana de la Cuenca de México (CM) han sido estudiados a lo largo de varios años debido a los riesgos que esto implica, como por ejemplo, el riesgo sísmico, los hundimientos, las fallas y fracturas, etc. En lo particular, los hundimientos se relacionan con fallas y fracturas, lo que nos lleva a involucrarnos con otro tipo de desplazamientos, como son los horizontales. Con la ayuda del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), estudiamos estos desplazamientos horizontales y sus implicaciones en la CM y este será el objetivo principal de esta tesis.

La CM abarca un área aproximada de  $9,600 \text{ km}^2$ , tiene una forma irregular en la dirección este-oeste, es muy ancha en la parte norte (casi 100 km), mientras que en la parte sur es más angosta (casi 50 km) y tiene una extensión aproximada de 90 km de norte a sur (Fig.1.1). Tiene una elevación media de 2,240 m al sur y al norte 2,390 m, aproximadamente (Santoyo, 2005).

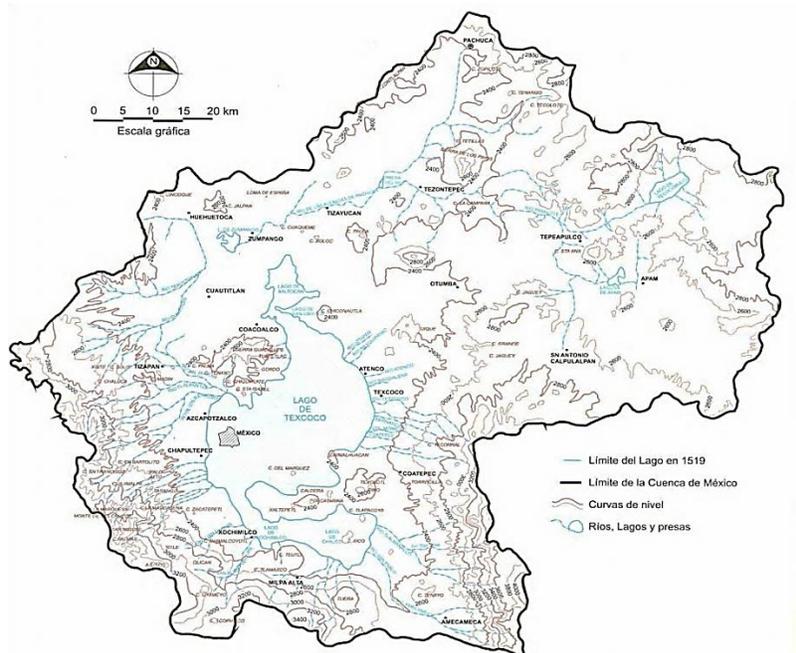


Fig. 1.1. Topografía e hidrografía de la Cuenca de México (Tomada de Santoyo, et al., 2005)



---

En la CM la principal causa de la deformación es el alto crecimiento de la población y la extracción del agua subterránea de los acuíferos del área que comenzó a mediados del siglo XIX, que ha ido aumentando en las décadas de 1940 y 1950 causando hundimientos en el centro de la ciudad, provocando severos daños a la infraestructura urbana (Carrillo, 1947; Marsal y Mazari, 1959). Como consecuencia, los problemas de desplazamientos horizontales, verticales y el desarrollo de fracturas en el terreno están concentrados en ciertas áreas de la CM. Estos desplazamientos pueden ser medidos con las herramientas GPS.

El sistema de GPS es una herramienta que ha sido ampliamente utilizada desde los años 90's para obtener información valiosa que nos permite establecer patrones que relacionan la deformación con hundimiento, desplazamientos, problemas de fracturas, fallas activas y otros rasgos tectónicos importantes.

En el territorio mexicano existen varias redes, tanto temporales como permanentes, que en los últimos años han sido empleadas para el análisis de los efectos causados por fenómenos sísmicos, la deformación de la corteza terrestre, subsidencia, etc.

En este trabajo se analizaron los resultados obtenidos en la CM acerca de la velocidad del hundimiento y el desplazamiento horizontal a partir de una red de 16 estaciones temporales y 2 permanentes ubicadas en los sitios que se mencionan a continuación: dos estaciones en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AIBJ y AIB2), el Autódromo Hermanos Rodríguez (AUHR), Hospital Balbuena (BALB), la Benemérita Escuela Nacional de Maestros (BENM), Centro Médico (CEME), Cerro de la Estrella (ESTR), Cuernavaca (CUEM), Rancho de la Facultad de Veterinaria (FVET), Lago Nabor Carrillo "Texcoco" (LTEX), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT1), Riachuelo Serpentino (SERP), Tlatelolco (TLAT), Catedral (CATE), UAM Iztapalapa (UAMZ), Benjamín Franklin (ULSA), Universum (UNIV) y Zócalo (ZOCA).



---

## II. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América durante los años de 1970 y 1980 desarrolló el Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés GPS (Global Positioning System) con el fin de determinar la posición ya sea en tierra, mar, aire o en el espacio, a partir de las posiciones conocidas de una constelación de satélites.

El GPS es un sistema de navegación basado en 24 satélites que proporciona la posición de un punto en la superficie terrestre en tres dimensiones (latitud, longitud y altitud), además velocidad y tiempo, las 24 horas del día a un número ilimitado de usuarios en cualquier parte del mundo.

### 2.1 Funcionamiento del GPS

La técnica del GPS consiste en medir el tiempo ( $\Delta t$ ) que tarda en llegar una señal emitida por un satélite, al receptor. La distancia entre el transmisor y el receptor puede calcularse multiplicando el  $\Delta t$  por la velocidad de propagación de la señal, o sea la velocidad de la luz, de esta forma obtenemos la distancia entre cada satélite y los receptores, por lo tanto la distancia define una esfera con centro en el satélite y la intersección de al menos 3 esferas nos da como resultado la posición del punto a través de sus 3 coordenadas tridimensionales (X, Y, Z). Sin embargo, debido a la dificultad para poder sincronizar los relojes de los receptores GPS con los relojes atómicos de los satélites GPS y que además la señal se retarda al atravesar la ionósfera y la tropósfera, los resultados obtenidos no son precisos, por lo tanto se les nombra pseudo-distancias ( $\rho^j$ ). Para determinar las coordenadas de una estación ( $R^j$ ) debemos obtener las cantidades observadas o pseudo-distancias ( $\rho^j$ ), conocer  $r^j$  y las efemérides, es decir la posición del satélite con respecto al centro de la Tierra (Fig. 2.1), cualquier error en este valor se verá reflejado en la obtención de  $R^j$ , por lo tanto utilizar órbitas precisas durante el post-proceso ayuda a mejorar la precisión de los resultados.

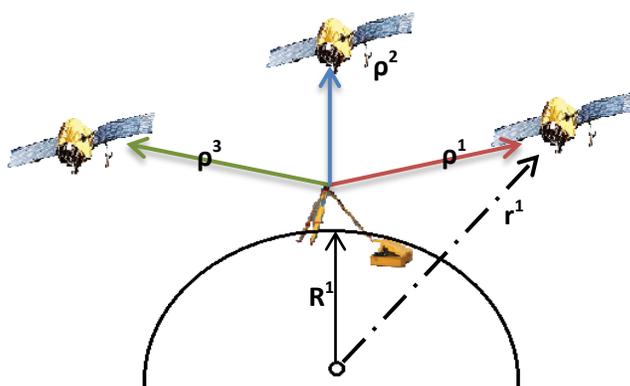


Fig. 2.1. Esquema de la determinación de las coordenadas de una estación GPS (Modificada de Wells *et al.*, 1987).

## 2.2 Segmentos del Sistema GPS

El sistema GPS está conformado por tres segmentos, el segmento espacial, segmento de control y el segmento de usuario.

1.-**Segmento Espacial:** este segmento en un principio constaba sólo de 18 satélites, pero a partir de 1992 aumentó a 24 satélites (constelación NAVSTAR) para garantizar que las 24 horas del día los receptores pudieran visualizar por lo menos 4 satélites en cualquier lugar del mundo y de esta manera calcular la deriva que existe entre el reloj del satélite y el del usuario, latitud, longitud y altura de un punto. Los satélites están distribuidos en 6 planos orbitales a 20,200 km de altura, con 4 satélites por plano. Sus órbitas son casi circulares y tienen una inclinación aproximada de  $55^\circ$  y un periodo de 12 horas (Jaramillo, Aristóteles, 2002).

2.-**Segmento de Control:** este segmento realiza el seguimiento continuo de los satélites, calcula su posición precisa, transmite los datos y realiza la supervisión necesaria para el control diario de todos los satélites del sistema NAVSTAR. Este segmento está compuesto por tres estaciones principales que son descritas a continuación:

a) *Estación de control maestra.* Está localizada en Colorado Springs (EUA), se encarga de reunir todos los datos obtenidos por las estaciones de monitoreo y calcula las efemérides



de cada uno de los satélites. Esta información se distribuye a una de las tres estaciones de control terrestres para guardar los datos.

*b) Estaciones de monitoreo o de seguimiento:* se encuentran distribuidas 4 estaciones en total de manera homogénea, en el océano Pacífico en Hawaii, en el atolón Kwajalein (Islas Marshall), al sur del océano Atlántico en la isla Ascensión y en el océano Índico en la isla Diego García (Fig. 2.2). Estas estaciones rastrean los satélites, determinan las efemérides que el satélite transmite (órbitas predichas), corrigen el tiempo del oscilador de los satélites y envían estos datos a la estación maestra de control.



Fig. 2.2. Distribución de las Estaciones de control (Modificada de Franco, 2009)

*c) Estaciones terrestres de control.* Existen 3 estaciones: la Ascensión, Kwajalein y la de Diego García, que son un conjunto de antenas terrestres que envían las órbitas y parámetros calculados en las estaciones de seguimiento a cada uno de los satélites, interactúan como ligas de comunicación con los satélites.

**3.- Segmento de Usuarios o Segmento Utilitario:** este segmento está formado por cualquiera que reciba señales GPS con un receptor, el software y el procesamiento necesario para conocer su posición y/o la hora. Este segmento está constituido por los siguientes elementos (Fig. 2.3):



a) *Antena*. Es una antena que convierte la energía electromagnética que recibe, en corriente eléctrica y la transmite al receptor. Se encarga de recibir y amplificar la señal recibida por los satélites, está conectada a través de un cable preamplificador al receptor, y es el elemento al cual viene siempre referido nuestro posicionamiento.

b) *Receptor*. Recibe las radiofrecuencias de la señal transmitida por los satélites y las decodifica para convertirlas en información legible.

c) *Terminal GPS o Unidad de Control*. En esta unidad se procesan los datos recibidos por el receptor para ser manejados por el usuario. La mayoría de los equipos cuentan con diferentes canales para seguir simultáneamente a varios satélites, un procesador interno con su correspondiente soporte lógico, una unidad de memoria para el almacenamiento de la información, teclado de control, pantalla de comunicación con el usuario con varias funciones y una fuente de alimentación interna o externa. Algunos cuentan con trípodes, cables especiales, equipos de control meteorológico y diverso material auxiliar.

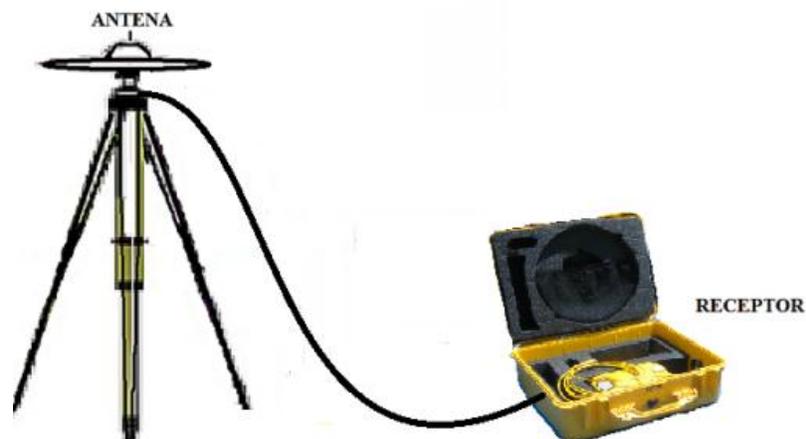


Fig. 2.3. Segmento de Usuarios.



---

## 2.3 Tipos de Estaciones

El sistema GPS es la técnica más utilizada en los últimos años para determinar la posición de un punto sobre la superficie terrestre, por lo tanto para estudiar áreas donde se manifiesta una deformación continua, es necesario realizar mediciones constantemente para determinar las variaciones espaciales que pueden presentar uno o varios puntos en un área determinada en un lapso de tiempo, por lo tanto, para realizar estos estudios se pueden emplear dos tipos de estaciones: temporales y permanentes.

*Estaciones permanentes:* hacen mediciones constantes que permiten registrar datos diariamente sin interrupción alguna, para tener una historia de las variaciones del sitio donde se encuentra instalada.

*Estaciones temporales:* como su nombre lo indica, son estaciones que se utilizan por temporadas, de forma periódica haciendo una toma de datos en lapsos que duran por lo menos 8 horas diarias durante 3 días consecutivos, por lo que no es posible tener un registro continuo del punto que se está midiendo, pero es posible determinar su variación en un periodo de observación y el siguiente, sin tomar en cuenta lo que pueda suceder mientras no se hacen mediciones. Este tipo de mediciones se pueden realizar con periodos de meses o hasta años, dependiendo del objetivo del estudio.

La combinación de los datos de estaciones permanentes y de estaciones temporales nos permite establecer o determinar modelos de deformación elástica.

En la CM se cuenta con estaciones temporales y permanentes que forman parte del proyecto del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México y que tiene como objetivo principal el estudio del hundimiento de la CM desde el año de 1995.



---

## 2.4 Tipos de Levantamientos

### Levantamiento Estático

El posicionamiento estático relativo es un método que involucra por lo menos 2 estaciones con receptores que registran datos de por lo menos cuatro satélites simultáneamente, durante sesiones de observación de 30 minutos a 2 horas. Para llevar a cabo este tipo de levantamiento es necesario que la antena del receptor GPS esté posicionada y calibrada, sobre el punto que se desea medir durante el tiempo que dure el levantamiento (Fig. 2.4).

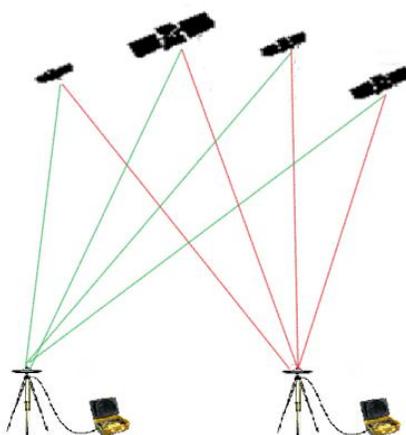


Fig. 2.4. Levantamiento Estático

El tiempo que debe durar el levantamiento es muy variable, ya que depende de los satélites disponibles, si el cielo está despejado, obstrucciones que puedan estar cerca como edificaciones, vegetación, fuentes de ruido, pero sobre todo el objetivo del estudio. Este tipo de levantamiento es el más utilizado debido a su gran precisión, pero requiere de un mayor lapso de tiempo que se traduce en mayor costo.

### Levantamiento Estático-Rápido (*Fast-static*)

Este levantamiento consiste en un receptor fijo (Base) que observa durante todo el levantamiento, y otro móvil, que se va posicionando en los diferentes puntos de interés por periodos entre 5 y 20 minutos (Van Sickle, 1996).



Este tipo de levantamientos es más corto en tiempo y su precisión dependerá de la distancia a la base, número de satélites que puedan ser observados y la geometría de los mismos. El receptor móvil, únicamente se ocupa de los puntos por periodos de 5 a 20 minutos; cinco minutos cuando la distancia del punto a la base es menor a 5 km y se están observando seis satélites o más, y 20 minutos si la distancia del punto a la base es mayor a 20 km o se observan solo cuatro satélites o menos. (Fig. 2.5).

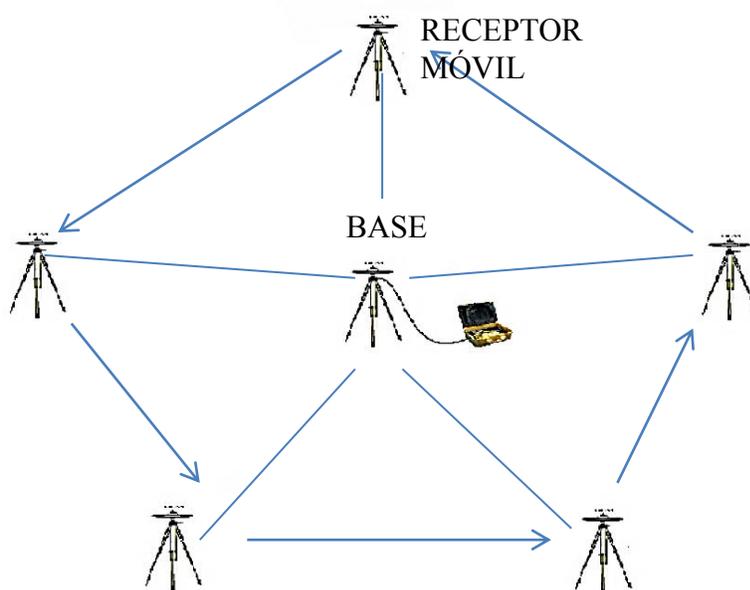
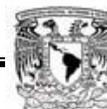


Fig. 2.5. Esquema del Levantamiento Estático-rápido

### Levantamiento Cinemático

Es un levantamiento rápido que necesita de por lo menos dos receptores, el estático de referencia y el receptor que está en movimiento. Consiste en poner el receptor en movimiento sobre los puntos de trabajo y se detiene en cada punto momentáneamente alrededor de dos minutos o menos (Van Sickle, 1996) y los datos obtenidos proveen vectores entre sí mismos y el receptor de referencia (Fig. 2.6). Se seleccionan dos puntos: el de referencia y el final, para después establecer una configuración poligonal con inicio y final en el cierre con los demás puntos, los receptores realizan un registro continuo de fase desde el inicio al final de la observación, mínimo de cuatro satélites con seguimiento



común y bien distribuidos. El tiempo de observación en cada punto varía entre uno y dos minutos, y la precisión máxima que se puede obtener oscila entre los 10 y 20 cm.

Existen otras variantes del método cinemático y se seleccionan basándose en las características del terreno en donde se encuentra el objetivo. Por ejemplo, la técnica de Leapfrog es una variación que involucra dos receptores (Van Sickle, 1996), los dos receptores se van moviendo, pero solo uno a la vez, primero el receptor A es la base y el receptor B se mueve y posteriormente el receptor B se convierte en la base mientras el receptor A se mueve, pero no se mueven ambos al mismo tiempo.

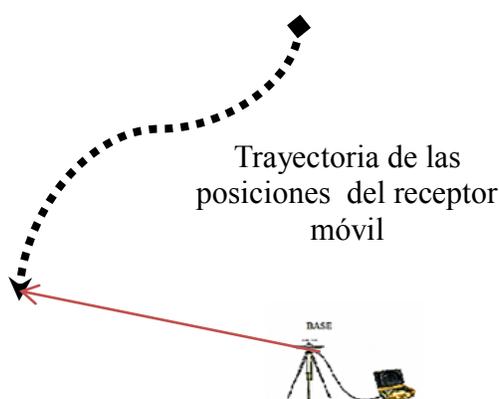


Fig. 2.6. Esquema del levantamiento cinemático

### **Levantamiento Pseudoestático o Pseudocinemático**

Los datos obtenidos a partir de este método son parecidos a los que se obtienen con la técnica estática rápida, este se realiza en dos sesiones de pocos minutos cada uno, aproximadamente 10 minutos (Chris Rizos, 1999), y se deja transcurrir como mínimo una hora antes de iniciar otra sesión.

En este método se coloca un receptor en un punto que se tomará como base, mientras el otro receptor se mueve sobre todos los puntos de interés permaneciendo estático por un periodo de tiempo muy corto y después se mueve al siguiente punto, y así sucesivamente hasta terminar de medir todos los puntos de interés, este mismo receptor volverá a medir todos los puntos por segunda vez, unas horas más tarde para terminar el levantamiento en dos sesiones (Fig. 2.7).



Una de las ventajas de esta configuración es que nos permite incrementar las mediciones con la repetición de los puntos observados, el receptor no necesita estar prendido entre la primera y segunda sesión, y tampoco es necesario que observe la misma constelación de satélites en ambas sesiones.

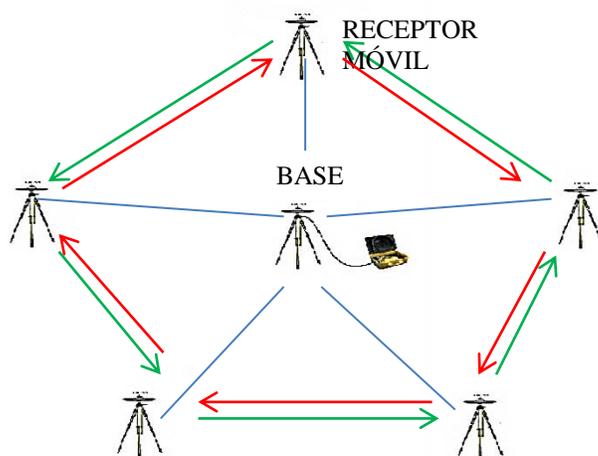


Fig. 2.7. Esquema del levantamiento Pseudocinemático

## 2.5 Tipos de receptores

En la actualidad existe una gran variedad de receptores debido a las necesidades que tienen los usuarios y las utilidades que se les puede dar dependiendo del trabajo que se va a realizar. Los receptores se clasifican de acuerdo con sus características físicas, sus elementos de señal GPS y por su exactitud, estas características incrementan o disminuyen sus costos.

Los receptores los podemos clasificar en tres tipos:

- **Receptores Secuenciales.** Estos receptores son muy baratos, pero son muy lentos, además de que su precisión es menor que la de los otros tipos de receptores. Se utilizan principalmente en aplicaciones que no necesitan de tanta precisión como en navegación terrestre, navegación marina, etc. Sólo cuentan con un canal que sigue secuencialmente a los diferentes satélites visibles. El receptor permanece sincronizado



---

con cada uno de los satélites al menos un segundo, durante este tiempo adquiere la señal y calcula el retardo temporal, una vez calculado el retardo de sólo cuatro satélites calcula la posición. Los satélites que elige son aquellos que tienen mejor SNR (relación señal-ruido).

- **Receptores de Canales Multiplexados.** Estos receptores también cuentan con un solo canal físico (hardware), la diferencia radica en que el software permite visualizar y dar seguimiento a cuatro o más satélites a la vez. El receptor muestrea todos los satélites asignados a dicho canal en un tiempo igual o menor a 20 milisegundos (que es la duración de un bit del mensaje de navegación), para que los mensajes de los satélites sean leídos simultáneamente.
- **Receptor Contínuo o Multicanal.** Estos receptores disponen de al menos 4 canales, a cada canal se le asigna el código de un satélite para que se sincronicen y se pueda calcular el retardo con ese satélite, estos retardos son medidos simultáneamente. Una ventaja que tienen este tipo de receptores es que son más rápidos que los secuenciales a la hora de calcular la posición, además su precisión es mejor que la de un receptor secuencial, es por esta razón que se recomiendan para aplicaciones como aeronáuticas, aquellas que requieren de un posicionamiento más preciso o de datos de buena calidad. Los receptores de una frecuencia o navegadores (Fig. 2.8), son ligeros y portátiles, pueden trabajar con 12 canales o más y consumen poca de energía. Tienen poca exactitud ya que su precisión oscila entre los 10 m y 15 m, por lo que éstos receptores resultan muy útiles, prácticos y económicos para ciertas aplicaciones que no requieren gran precisión como para deportistas, alpinistas, o personas que necesitan una ubicación rápida y aproximada de algún punto. Las principales marcas que comercializan este tipo de receptores son: GARMIN, MAGELLAN, DSNP, TRIMBLE, entre otros.



Fig. 2.8. Receptor de mano Trimble Juno ST (Tomada de Technology & More, 2008-2)

Los receptores de doble frecuencia (L1 y L2, dual-frequency) o receptores geodésicos son de gran precisión alrededor de 2 cm. El costo de este tipo de receptores es elevado debido a las múltiples funciones con las que cuenta y a la gran precisión que tienen, son muy utilizados para fines profesionales tales como el del estudio de la deformación de la corteza terrestre, investigaciones de movimiento de placas tectónicas, sismicidad, etc. Generalmente cuentan con una antena receptora, un mástil o trípode y el receptor GPS (Fig. 2.9), pueden manejar más de 12 canales simultáneamente.



Fig. 2.9. Equipo Trimble 5700 con antena Zephyr Geodetic.



---

El número de canales disponibles en un receptor y su frecuencia son importantes ya que entre más satélites pueda observar continuamente el receptor, la solución será mejor en menor tiempo, los receptores de una sola frecuencia son los más utilizados para colocarse a distancias menores a 25 km entre cada receptor, y los de doble frecuencia tienen la capacidad de eliminar algunos efectos atmosféricos y se pueden colocar a distancias mayores a los 25 km entre receptores.

Debido al gran avance que ha tenido la tecnología en los últimos años, los receptores ofrecen al usuario una amplia variedad de información dependiendo del modelo y tipo de equipo (Fig. 2.10), tal como:

- Información del software interno
- Selección manual de los satélites requeridos
- Satélites localizados
- Satélites en seguimiento
- Azimut de cada satélite en seguimiento
- Elevación de cada satélite en seguimiento
- Condición de cada satélite
- Semana GPS, día de la semana y tiempo GMT
- Posición actual
- Dirección y velocidad del movimiento
- Odómetro
- Opción de observación elegida (Estática, Dinámica, Cinemática)
- Nombre y número de sesión de la estación



- Nombre y longitud del archivo en el que se están almacenando los datos
- Estado de la fuente de alimentación o batería
- Puertos de comunicación elegidos
- Entre otras

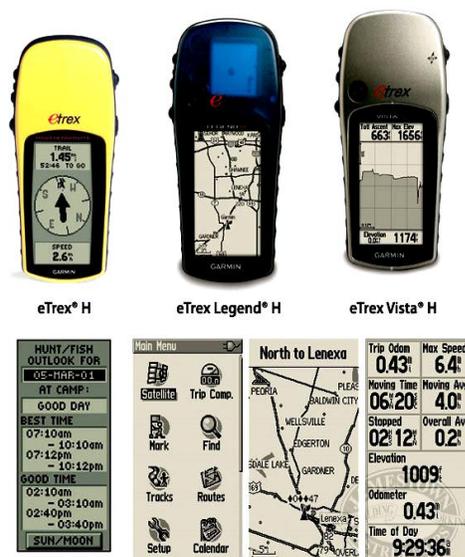


Fig. 2.10. Se muestran algunos modelos de GPS Garmin y algunas de sus funciones (Tomada de [www.garmin.com](http://www.garmin.com)).

## 2.6 Tipos de Satélites

Los sistemas satelitales han adquirido una gran importancia a través de los años ya que tienen una gran diversidad de aplicaciones como las que ya se han mencionado anteriormente, incluso diferentes de las que fueron diseñadas originalmente, como: Posicionamiento, Vigilancia, Comunicaciones, Meteorología, Geodesia, Astronomía, Geofísica, Agricultura. Los satélites pueden ser pasivos o activos:

**Satélites pasivos.** Carecen de cualquier mecanismo y de emisiones propias; sólo pueden devolver la energía que en ellos incida, por simple reflexión con prismas reflectores, es decir, se limitan a reflejar la señal recibida sin llevar a cabo ningún otro tipo de proceso sobre ella; se comportan como una especie de espejo en el que rebota la señal.



**Satélites activos.** Se encargan de amplificar las señales que reciben antes de volver a enviarlas hacia la Tierra, pueden contar con luces pulsantes de alta intensidad, repetidores de microondas, transmisores radioeléctricos, radioaltímetros, sensores remotos, etc., poseen baterías para almacenar la energía eléctrica, celdas fotovoltaicas o paneles solares para producir su propia energía.

## 2.7 Tipos de Monumentos o Mojoneras

Los monumentos que se construyeron para la red de GPS de la CM son de tres tipos: tipo fosa, tipo plancha de concreto y naturales.

Las características principales de un *monumento tipo fosa* es que para construirlo se hace una excavación de 1x1m, en el centro se coloca un tubo de albañal de 90 cm de largo y 25 cm diámetro y se fija con una plancha de concreto de 1x1m y 30cm de espesor. El tubo es relleno de concreto y en la parte central se clava una varilla de acero inoxidable de 1.58 cm de diámetro (5/8") y 50 cm de largo con una marca en el centro que es nuestro punto de interés, y finalmente la excavación se rellena totalmente con el material que se extrajo de la misma (Fig. 2.11).

Este tipo de mojoneras fueron construidas en las estaciones del Aeropuerto, Zócalo, Tlatelolco, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Cuemanco, Centro Médico, Balbuena, UAM Iztapalapa, Autódromo Hermanos Rodríguez y Lago de Texcoco.

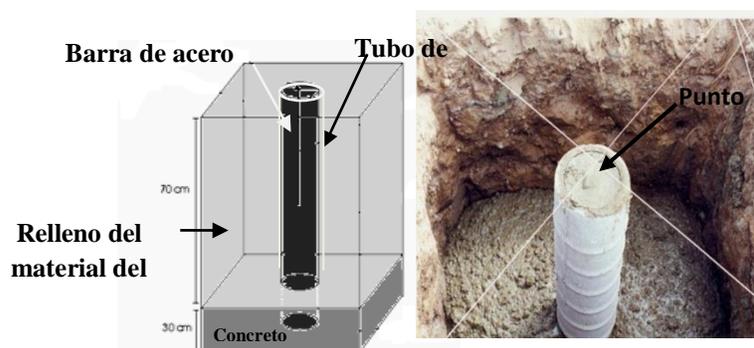


Fig. 2.11. Monumento tipo fosa construido en el Hospital Balbuena.



**Monumento tipo plancha de concreto:** el punto se coloca en una plancha o losa de concreto, que ya existe. Se hace una perforación, de 21 cm de largo por 1.58 cm de diámetro en la plancha de concreto con un taladro industrial y se pone pegamento plástico de alta resistencia para insertar una barra de acero inoxidable que también tiene una marca en el centro (Fig. 2.12).

Las estaciones con este tipo de mojoneas son: Benemérita Escuela Nacional de Maestros, Cerro de la Estrella, Riachuelo Serpentino (Tláhuac) y Rancho de la Facultad de Veterinaria (Chalco).

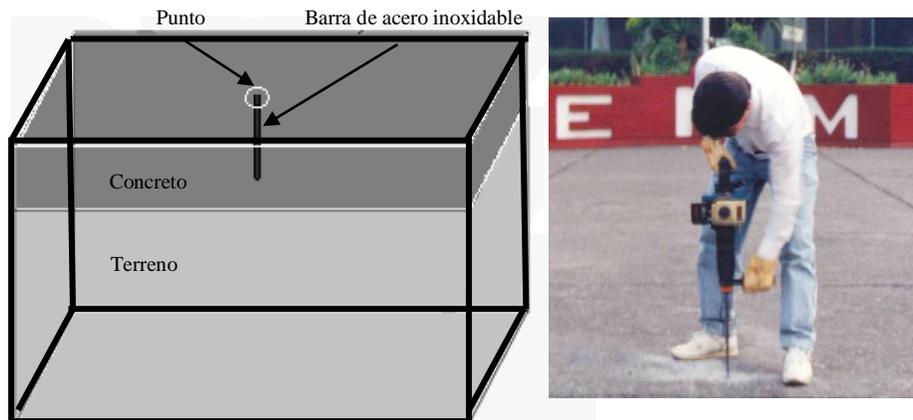


Fig. 2.12. Mojonea tipo plancha de concreto en la Benemérita Escuela Nacional de Maestros.

**Monumento natural:** para este tipo de monumentos es necesario encontrar un afloramiento rocoso en el que se coloca una barra de acero inoxidable de la misma forma que en las mojoneas tipo plancha (Fig. 2.13)

En este estudio, solamente el sitio en UNIVERSUM es de este tipo y se encuentra en Ciudad Universitaria, a un costado del museo UNIVERSUM.

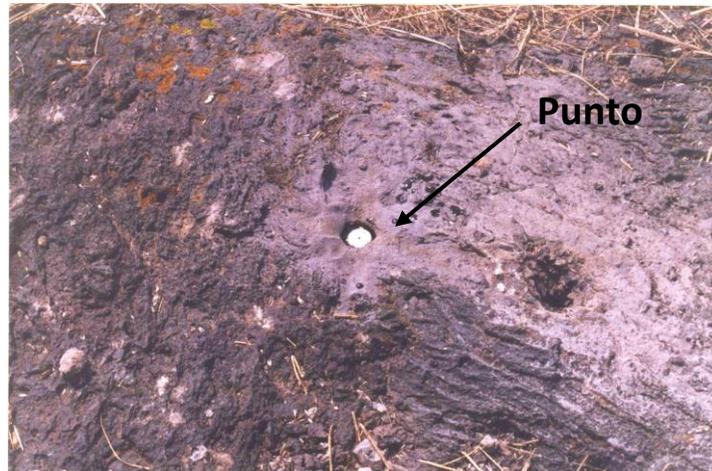


Fig. 2.13. Monumento natural ubicado en UNIVERSUM, Ciudad Universitaria.

### **Estabilidad de los Monumentos**

De acuerdo con un análisis previo realizado por Aristóteles H. Jaramillo (2002), para cada tipo de mojonera, se llegó a la conclusión de que los asentamientos en cada estación varía muy poco dependiendo de su tipo. Las mojoneras naturales no se consideraron para este análisis ya que el asentamiento es propio de la zona, por lo que solo se llevaron a cabo los cálculos para mojoneras artificiales tipo fosa y tipo plancha.

Para analizar la consolidación que presentan los monumentos artificiales se tomó en cuenta que la Ciudad de México se encuentra construida sobre arcillas, por lo que se tomaron valores promedio de las arcillas típicas de la ciudad de México y se propuso un estrato de arcilla compresible de 30m de espesor. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Para el monumento tipo fosa se concluyó que el hundimiento total debido al peso y la geometría de este tipo de monumento es de 0.07 cm, mientras que para un monumento tipo plancha de concreto (losa), el hundimiento total debido al peso y su geometría es de 0.05 cm. Por lo tanto, podemos decir que ambos tipos de monumentos (fosa y losa) presentan un asentamiento milimétrico que se considera prácticamente nulo, es decir, los hundimientos registrados en el estudio son propios de cada terreno, y no son causados por la compactación el terreno por las mojoneras instaladas.



---

## 2.8 Errores en el Sistema GPS

Existen varios tipos de errores que afectan los datos GPS y que pueden ser modelados para eliminarse al procesar los datos; sin embargo, para algunos casos sólo se pueden reducir. Estos errores se clasifican dependiendo al tipo de fuente en tres grupos principales: debidos a los satélites, a la propagación de la señal y debidos a los receptores.

### **Errores debidos a los satélites**

**Errores de órbitas:** es la diferencia que existe entre la posición transmitida (predicha) y la posición verdadera en el momento de la transmisión de la señal debido a que las efemérides no pueden estar actualizadas a cada instante. La magnitud máxima que se puede esperar debido a errores de las órbitas es de 80 m.

**Errores debidos a los relojes:** se presentan porque los relojes deben de ser extremadamente precisos y aunque éstos tengan pequeños errores, se pueden traducir en errores en las distancias medidas entre el satélite y el receptor. Por ejemplo una diferencia de 10 nanosegundos ( $1 \times 10^{-8}$  segundos) entre los relojes causa un error de 3 m en la distancia medida. La máxima magnitud de este error es de 300 m (Wells *et al.*, 1987).

**Geometría de los satélites.** Es la “disolución de la precisión” (DOP), es decir, es la disposición relativa de los satélites en el momento que están siendo utilizados por un receptor, por lo tanto, se considera que tienen una posición ideal si los satélites están distribuidos uniformemente en el cielo, al menos uno justo en el cenit, y tres sobre el horizonte, separados  $120^\circ$  de azimut, pero tienen una geometría pobre si los satélites están muy cercanos entre sí (Fig. 2.14).

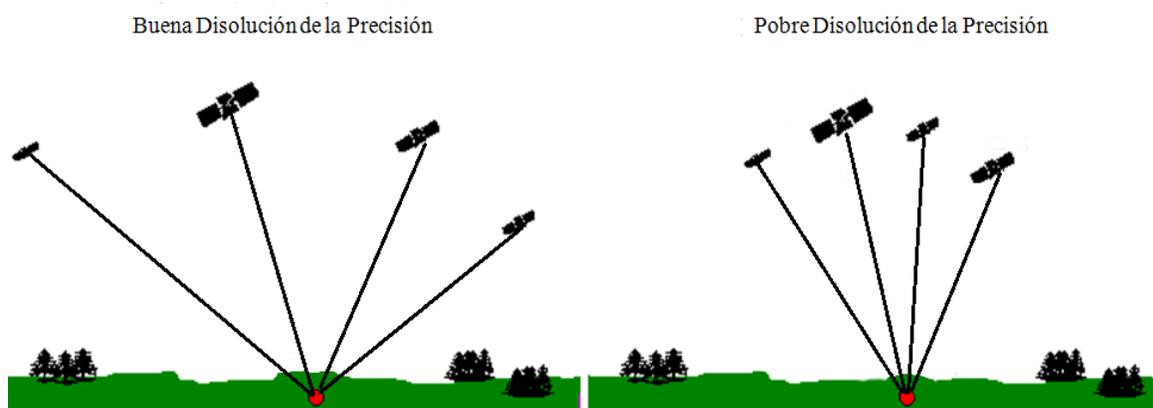


Fig. 2.14. Se muestra la geometría de los satélites, buena y pobre Disolución de la Precisión (DOP)  
(Modificada de Corvallis Microtechnology Inc.).

Los DOP varían dependiendo de sus coordenadas y de las combinaciones con las que se esté evaluando la precisión, por ejemplo:

- **VDOP** es la precisión en la componente vertical
- **HDOP** es la precisión en la componente horizontal
- **PDOP** es la precisión en las tres componentes
- **TDOP** es la desviación estándar del tiempo
- **HTDOP** es la precisión en la componente horizontal y el tiempo
- **GDOP** es la precisión en las tres dimensiones y el tiempo

### **Errores generados por el medio de propagación de la señal**

Los *retrasos ionosféricos y troposféricos* ocurren cuando la señal es desviada y retrasada al atravesar la ionósfera y la tropósfera. La ionósfera dispersa las ondas por las partículas ionizadas y la tropósfera crea un efecto de refracción de la señal porque se divide en dos componentes: seca y húmeda, un 90% de la refracción troposférica ocurre en la componente seca y el resto en la componente húmeda. El retraso que sufre la señal se debe al vapor de agua presente en la atmósfera, a la altitud, al ángulo de elevación de la señal y otros factores.



## Errores relacionados con los receptores

*Errores de multi-trayectorias o multipath:* ocurre cuando la señal GPS choca o se refleja antes de llegar a la antena, en superficies que se encuentran cerca de ella, y provoca un incremento en el tiempo de recorrido de la señal y se puede traducir en hasta 5 cm de error en la posición.

FUENTE	EFEECTO
Satélite	Relojes Órbitas Geometría de los satélites
Propagación de la señal	Retraso ionosférico Retraso troposférico
Receptor	Variación del centro de fase de la antena Reloj Multi-trayectorias

Tabla 1. Algunos de los errores relacionados con el tipo de fuente.

## 2.9 Aplicaciones del Sistema GPS

El sistema GPS ha alcanzado una gran popularidad debido a la gran diversidad de aplicaciones que tiene en el campo terrestre, marítimo, aéreo y espacial. Algunas de las aplicaciones de este sistema son:

- Posicionamiento de un punto en cualquier lugar del planeta con un error de precisión mínimo.
- Navegación y determinación de un recorrido.
- Topografía: determinación de puntos de referencia, lugares con ciertas características geográficas o infraestructuras, etc.
- Sincronización de tiempos: cuenta con un sistema que permite determinar momentos en los que suceden o sucederán determinados eventos, sincronizarlos y unificar horarios.
- Establecimiento y densificación de redes geodésicas.



- 
- Monitoreo de deformación terrestre.
  - Aplicaciones en cartografía.
  - Agricultura: para determinar con precisión los acres de campo para los clientes.
  - Sistema de control geodésico para ferrocarriles.
  - Posicionamiento de cámaras de fotogrametría.
  - Determinación y localización de cualquier tipo de obra.
  - Estudio de evolución de cuencas fluviales.
  - Levantamientos batimétricos.
  - Actualizaciones de Sistemas de Información Geográfica (SIG).
  - Situación continua e instantánea de un vehículo sobre cartografía digital.
  - Navegación en tiempo real con gran precisión.
  - Determinación de dirección, velocidad y aceleración de cualquier vehículo.
  - Guía vehicular sobre trayectorias prefijadas.
  - Localización y control de flotas de vehículos.
  - Inventario de redes viales.

## **2.10 Aplicaciones del Sistema GPS en el Monitoreo de la Deformación Tectónica de la Cuenca de México.**

Como consecuencia del gran desarrollo urbano en la Ciudad de México en los últimos años nos hemos visto en la necesidad de estudiar ciertos fenómenos que se han ido manifestando con mayor frecuencia. Son de gran importancia y preocupación por los problemas de hundimiento, desarrollo de fracturas, fallas, deslizamientos, acompañados por una serie de daños en el funcionamiento de las instalaciones y serios problemas de estabilidad a las construcciones de toda índole. El sistema de desagüe hasta ahora no ha funcionado correctamente por la alteración de sus pendientes y es causa de inundaciones en distintas zonas de la urbe, además de otros problemas.

El Instituto de Geofísica de Universidad Nacional Autónoma de México desarrolló un proyecto con el fin de medir los hundimientos en la CM, al que nombraron “Monitoreo del Hundimiento de la Cuenca de México usando GPS de Alta Precisión”. A través de este proyecto se han efectuado mediciones desde el año de 1995 hasta el presente año en 18



---

sitios distribuidos en el occidente de la CM, utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS); sin embargo, el proyecto no sólo se ha empeñado en estudiar el hundimiento, sino que también ha comenzado el análisis de los desplazamientos horizontales para asociarlos con procesos geotectónicos en la CM.



---

### III. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS GPS

#### 3.1 Adquisición de Datos en Campo

Para llevar a cabo la adquisición de datos GPS en campo es necesario:

- 1) Instalar el equipo y programar el receptor GPS de acuerdo con los requerimientos del proyecto. El equipo geodésico utilizado para este proyecto cuenta con un receptor, una antena, un trípode para montar la antena, una base nivelante, brújula, plomada, baterías y los cables necesarios para hacer las conexiones. Para instalar el quipo GPS primeramente se localiza el punto o la marca de la que deseamos conocer su posición, se coloca el trípode de tal manera que esté fijo con ayuda de costales rellenos de arena de tal forma que no se mueva para garantizar una buena toma de datos y el punto debe quedar perfectamente centrado ayudándonos de la plomada y la base nivelante (Fig. 3.1).

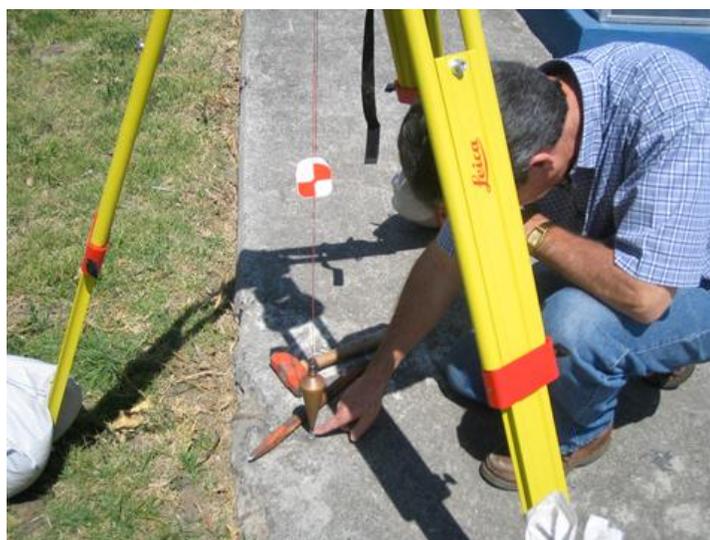


Fig. 3.1. Instalación y nivelación del equipo.

- 2) Una vez que el GPS se encuentra bien instalado medimos la altura inclinada con la varilla metálica graduada, o con el instrumento de medición que proporcione el fabricante.



- 3) Posteriormente una vez realizados los pasos anteriores, se hacen las conexiones necesarias entre el receptor, antena y baterías para programar el equipo y comenzar con la adquisición de los datos (Fig.3.2)



Fig. 3.2. Instalación completa de un equipo GPS Trimble5700.

- 4) La programación del receptor GPS es diferente para cada marca de equipos GPS, por lo tanto cada equipo cuenta con un software diferente y un manual de programación, el cual será necesario leer para seguir las instrucciones de programación y asegurar que el equipo sea programado correctamente de acuerdo al tipo de receptor y levantamiento que se llevará a cabo.

El equipo utilizado para el análisis geodésico que se realizó en el occidente de la Cuenca de México fue el GPS Trimble 5700, cuenta con distintas funciones de programación para los diferentes tipos de levantamientos, en este caso un levantamiento estático.

- 5) Cuando el equipo ya está programado, se define el periodo o el tiempo de adquisición de los datos. Durante el periodo de la adquisición de los datos es necesario cuidar el equipo para evitar que alguien lo mueva y revisar constantemente que no le falte corriente.
- 6) Finalmente el equipo GPS es desinstalado y se almacenan los datos. Cuando el receptor haya terminado de grabar datos se guardan en un archivo, se apaga el



---

receptor y verificamos que la antena, la base nivelante y el trípode estén colocado exactamente igual que cuando se instaló, con ayuda de la brújula se verifica que la antena éste orientada hacia el norte geográfico, la altura inclinada debe ser la misma que se midió en un principio y se corrobora que los niveles estén centrados. Cuando hay alguna anomalía con la adquisición de los datos es necesario tomar nota y considerarlo al momento de procesar los datos. Al terminar se guarda el equipo y se transfieren los datos a una computadora para evitar que la memoria del equipo se sature, y sobre todo para tener un respaldo de los datos.

### **3.2 Análisis Preliminar de Datos**

Las estaciones permanentes necesitan de un análisis preliminar con el fin de verificar diariamente que funcionen correctamente y que estén transmitiendo datos continuamente, para observar cambios o anomalías en los datos que pueden provocados por perturbaciones del sitio, mal funcionamiento en los equipos, etc. El análisis se lleva a cabo por medio de un archivo que contiene información del tiempo en que inician y se terminan las observaciones, las horas de duración de la sesión, el total de satélites observados, número de observaciones, etc.

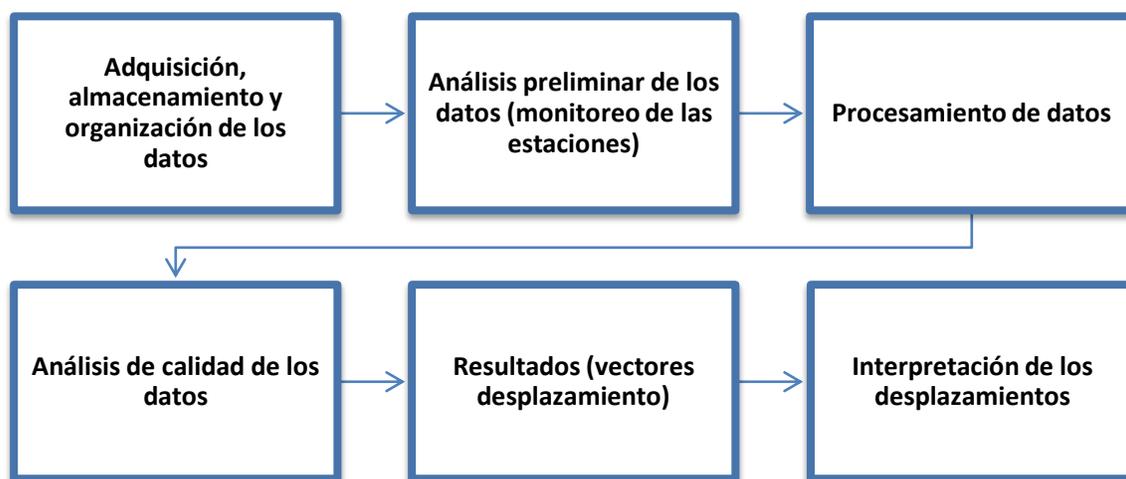
Para las estaciones temporales, el análisis consiste en revisar que el equipo no haya sufrido ningún cambio en su posición al término de la sesión ya que es responsabilidad del operador el manejo del equipo y el almacenamiento de los datos en un archivo, además es necesario hacer una inspección visual de los datos, es decir, que los datos tengan un comportamiento constante ya que un salto repentino podría indicar una perturbación local y/o mal funcionamiento del equipo para ambos tipos de estaciones.

### **3.3 Procesamiento de Datos**

El periodo de observación de la red de GPS es a partir del año de 1995 en estaciones temporales y para estaciones permanentes desde el año 2006 para la primera estación y una segunda estación desde el 2008. El procesamiento de los datos para poder obtener la



posición de un punto lleva una secuencia que se desarrolla básicamente como se muestra en el siguiente esquema:



Esquema de procesamiento de datos.

Los datos obtenidos en campo a partir del sistema GPS proporcionan información sobre la posición de un punto, pero con margen de error que se corrige por medio de un post-proceso realizado con un software especializado.

Existe una gran variedad de paquetes comerciales para procesar datos GPS y también paquetes desarrollados por la comunidad científica. Algunas de las compañías que se especializan en desarrollar estos paquetes se basan principalmente en un procesamiento diferencial por ejemplo: Trimble, Leica, Garmin, Magellan, por mencionar algunas; sin embargo, no todos trabajan con la precisión deseada si la base se encuentra a más de 20 km, además requieren de por lo menos dos receptores para trabajar en el modo diferencial.

Algunas instituciones desarrollan paquetes que utilizan algoritmos muy complejos creados por la comunidad científica que trabajan con órbitas precisas y estaciones de referencia ajenas al levantamiento de campo, para brindar al usuario mayor exactitud en el procesamiento diferencial y no es necesario que los receptores trabajen al mismo tiempo ya que la paquetería utilizada para el procesamiento actualiza automáticamente la base de datos de la información acerca de las estaciones de referencia necesarias.



---

Los datos utilizados para fines de esta tesis fueron procesados con GIPSY elaborado en el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) del Instituto Tecnológico de California (CalTech). A continuación damos una breve descripción del procesamiento utilizando el paquete GIPSY-OASIS II ya que es uno de los más utilizados para procesar datos GPS.

### 3.3.1 Paquete GIPSY-OASIS II

El paquete GIPSY, por sus siglas en inglés GPS Inferred Positioning System-Orbital Analysis and Simulation Software, fue desarrollado en el Jet Propulsion Laboratory (JPL), del *California Institute of Technology* para procesar posiciones precisas de GPS para cualquier modelo, desde el estático hasta el cinemático. La versión utilizada para realizar el procesamiento de los datos fue GIPSY-OASIS II.

Para poder utilizar GIPSY-OASIS II los datos de entrada deben tener un formato especial llamado RINEX (Receiver INdependent EXchange format). Hay varios programas que transforman los datos que se obtienen del receptor al formato RINEX.

El procesamiento de los datos debe atravesar por una serie de etapas o programas para llegar a la solución deseada, estas etapas se ilustran por medio de un diagrama de flujo (Fig.3.3) y son descritas brevemente a continuación.

Para iniciar con el procesamiento de los datos se utiliza el programa *ninja*, éste se encarga de leer el archivo RINEX, lo reordena y lo traduce a un archivo binario, estos datos son enviados a un sub-módulo llamado *turbo-edit*, el cual automáticamente borra las posiciones que se encuentran fuera de rango (outliers), además detecta y repara las discontinuidades en la señal (cycle slips) en un 99%.

Después los datos son guardados en archivos binarios para cada satélite y luego agrupados en los archivos *.qm* que son los archivos de salida generados por este proceso.

Una vez que ya se tienen editados los datos, la agrupación de los archivos *.qm*, por medio del programa *merg\_qm* se lee la lista de los archivos *.qmy* los agrupa en un sólo archivo llamado *QMfile*.



---

Posteriormente se aplican los modelos físicos para determinar los parámetros que relacionan la localización del receptor, el movimiento de la Tierra y los relojes del transmisor y el receptor, por medio del programa *qregres*. Este programa aplica dos tipos de modelos, los *modelos terrestres* que sólo consideran lo relacionado a la Tierra, tales como efectos de las mareas, la rotación, precesión, etc. y los *modelos de observación* que incluyen la relación entre los datos que registra el receptor y el segmento de usuario, por ejemplo, la variación del centro de fase de la antena, los efectos troposféricos, entre otros (Gregorius 1995). *qregres* integra en un archivo nombrado *rgfile*, las órbitas de las observaciones y la salida.

Luego de aplicar los modelos se procede a realizar el filtrado de los datos para ello es necesario pre-filtrar los datos por medio del subprograma *preprefilter* para obtener un archivo de entrada llamado *prefilter.txt*.

A partir de *prefilter* el usuario crea el archivo que contiene los eventos aleatorios como: el ruido blanco del reloj, caminos aleatorios (*randomwalk*) ocurridos en la troposfera, ruido por radiación solar, etc. y genera un archivo de salida tipo *batch.txt*. *prefilter* lee el *rgfile* y ordena los datos de tal manera que éstos son dependientes de los eventos aleatorios de un grupo de datos que más o menos ocurrieron al mismo tiempo. En caso de existir *cycle slips* en los datos contenidos en el *rgfile*, *prefilter* a partir de un algoritmo restaura la señal para obtener una señal completa.

El filtrado de los datos se realiza con el programa *filter*, es un algoritmo llamado *Square Root Information Filter* (SRIF), el cual es numéricamente estable porque es una modificación de un filtro *Kalman* utilizado para conocer la posición y la velocidad de un objeto que se encuentra en un sistema relacionado con el tiempo.

*filter* lee los datos del archivo *rgfile* y los revisa para detectar ruido aleatorio de un evento específico y corregirlo, también recopila los atributos de las señales aleatorias y su estructura. *filter* genera cinco archivos de salida que contienen los coeficientes de la solución suavizados, sólo tres de estos archivos son los que generalmente se usan: *accume.nio*, *smooth.nio*, *uinv.nio*.



---

Después de filtrar los datos se utiliza el programa *smapper* para calcular y mapear la covarianza, la sensibilidad y la solución de los parámetros del proceso, arroja cuatro tipos de archivos de salida: *smsol*, *niosmcov*, *niosmsig*, *nioy APVALSOUT* que son los archivos de entrada para el siguiente proceso llamado *postfit*. En caso de estar presente el archivo *smooth*, *nio*, *smapper* suaviza la covarianza y la solución.

*postfit* es un programa que busca los archivos de salida de *smapper* y *rgfile* para generar dos archivos, uno de puntos que contiene datos de las estaciones y otro de pre-ajuste que lleva información de los residuales llamado *postfit.nio* que proviene de *postfit*.

El comando *postbreak* lee el archivo *postfit.nio* para localizar discontinuidades en los residuales (*cycle slips*) que hubieran pasado desapercibidos por *Ninja*. En caso de encontrarse algún *cycle slip*, el archivo QM se modifica y se vuelve a ejecutar todo el proceso por medio del programa *qregres*. Cuando solo se tienen errores por órbitas y no por estaciones terrestres basta con modificar el archivo *batch.txt* y ejecutar *filter*, *smapper* y *postfit*.

*edtpnt2* es un programa que agrega y borra datos de puntos de la solución filtrada para poder actualizar los filtros y remover los *outliers*, luego de correr este programa es necesario volver a ejecutar *smapper* y *postfit*, para evaluar los residuales y decidir si algún punto tiene que ser rechazado, en este caso, el archivo *postfit.nio* se modifica y se corre de nueva cuenta *smapper* y *postfit*, de lo contrario, se puede continuar con el proceso.

La herramienta *stacov* incluye los sub-programas: *stacov*, *heighfix*, *stamrg*, *statistics* y *transform*. *stacov* extrae las coordenadas de la estación del archivo *smcov.nio* para traducirlas en un archivo comprensible para el usuario, mientras que el subprograma *heighfix* se encarga de actualizar la altura de la antena para cada día de observación y *stamrg* estima la posición y las velocidades de la estación con lo cual se pueden graficar las soluciones para cualquier época. *Statistics* es una herramienta que calcula las coordenadas, las componentes de la línea de base y su equivalencia en varios sistemas coordenados y *transform* transforma de un sistema de referencia a otro a partir de ciertos parámetros. *stacov* transforma los resultados en un archivo de salida en un formato de texto que contiene las coordenadas de las estaciones y sus correspondientes errores.





#### IV. RED DE SISTEMA GPS EN LA CUENCA DE MÉXICO

Los desplazamientos laterales y verticales en la CM son un problema que se ha estudiado durante muchos años debido a los grandes problemas que provocan principalmente en la zona urbana de la ciudad de México, por tal motivo se instaló una red de estaciones GPS distribuida en la parte occidental de la cuenca que ha hecho mediciones desde el año de 1995 hasta la fecha, se cuenta tanto con estaciones temporales y estaciones permanentes (Fig. 4.1).

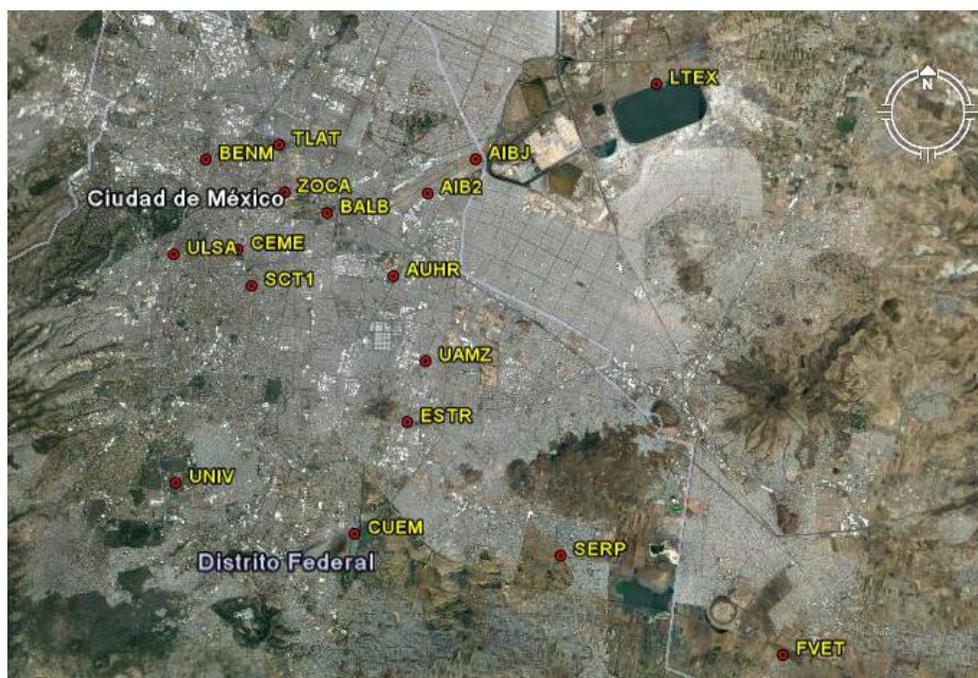


Fig. 4.1. Distribución de estaciones GPS en la Cuenca de México (Google Earth)

Las redes temporales se instalan por períodos de 8 horas diarias o más, durante tres días, en todos los puntos periódicamente. Las estaciones o puntos con los que se cuenta son los siguientes:



<b>ESTACIÓN</b>	<b>Coordenadas Geográficas (Latitud, Longitud y Altura)</b>
Aeropuerto Benito Juárez (AIBJ): se encuentra dentro del Aeropuerto Internacional Benito Juárez, a unos 300m de la Vía Tapo.	Latitud: 19.446 N Longitud: 260.950 E Altura: 2225.1101 m
Aeropuerto Benito Juárez (AIB2): se encuentra dentro del Aeropuerto Internacional Benito Juárez frente a la Torre de Control.	Latitud: 19.432 N Longitud: 260.929 E Altura: 2221.8041 m
Autódromo Hermanos Rodríguez (AUHR): se encuentra instalada dentro del Autódromo Hermanos Rodríguez a un costado de la pista de carreras.	Latitud: 19.398 N Longitud: 260.914 E Altura: 2227.3968 m
Balbuena (BALB): se localiza dentro de las instalaciones del Hospital General de Balbuena en la colonia Aeronáutica Militar, Delegación Venustiano Carranza.	Latitud: 19.424 N Longitud: 260.885 E Altura: 2226.0707 m
Benemérita Escuela Nacional de Maestros (BENM): se encuentra en las instalaciones de la Benemérita Escuela Nacional de Maestros a un costado del metro Normal, Delegación Cuauhtémoc.	Latitud: 19.446 N Longitud: 260.832 E Altura: 2231.0407 m
Catedral Metropolitana de la Ciudad de México (CATE): se encuentra ubicada en el atrio de la Catedral, en el Centro Histórico de la Ciudad de México.	Latitud: 19.434 N Longitud: 260.866 E Altura: 2224.2645 m
Centro Médico (CEME): se encuentra dentro de las instalaciones del Centro Médico Nacional Siglo XXI en la colonia Doctores, a un costado del metro Centro Médico.	Latitud: 19.409 N Longitud: 260.846 E Altura: 2226.6324 m
Cuemanco (CUEM): se encuentra a un costado de la Pista Olímpica Virgilio Uribe (Lado norte) en Canal de Cuemanco, delegación Xochimilco.	Latitud: 19.292 N Longitud: 260.897 E Altura: 2229.1984 m
Cerro de la Estrella (ESTR): se encuentra ubicada a un lado del panteón civil "San Nicolás Tolentino" en la delegación Iztapalapa, dentro de la planta tratadora de aguas negras de la DGCOH.	Latitud: 19.338 N Longitud: 260.920 E Altura: 2246.5664
Rancho de la Facultad de Veterinaria (FVET): se encuentra ubicada a un costado de la carretera Chalco-Mixquic en el Rancho	Latitud: 19.242 N



San Francisco de la Facultad de veterinaria.	Longitud: 261.084 E Altura: 2237.0416 m
Lago de Texcoco (LTEX): se encuentra ubicada a 20m de la Placa conmemorativa del Dr. Carrillo, sobre la carretera México-Texcoco en el lago Dr. Nabor Carrillo.	Latitud: 19.477 N Longitud: 261.029E Altura: 2228.1287 m
Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT1): se encuentra ubicada en la explanada de la S.C.T., ubicada en la delegación Benito Juárez.	Latitud: 19.394 N Longitud: 260.852 E Altura: 2230.4 m
Riachuelo Serpentino (SERP): se encuentra en el estacionamiento de la planta de rebombeo Riachuelo Serpentino, delegación Tláhuac D.F.	Latitud: 19.283 N Longitud: 260.987 E Altura: 2231.2436 m
Tlatelolco (TLAT): se encuentra ubicada en la Plaza de las Tres Culturas en Tlatelolco, delegación Cuauhtémoc.	Latitud: 19.452 N Longitud: 260.864 E Altura: 2228.6896 m
UAM Iztapalapa (UAMZ): se encuentra dentro de las instalaciones deportivas de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, ubicada en La Purísima esquina con avenida Jalisco, en la delegación Iztapalapa.	Latitud: 19.363 N Longitud: 260.928 E Altura: 2227.1817 m
Pozo Benjamín Franklin (ULSA): se encuentra a un costado de la Universidad la Salle, sobre el Eje 4 Sur Benjamín Franklin, colonia Condesa.	Latitud: 19.407 N Longitud: 260.818 E Altura: 2238.3908 m
UNIVERSUM (UNIV): se encuentra en la Universidad Nacional Autónoma de México campus Ciudad Universitaria, en la delegación Coyoacán, a un costado del museo UNIVERSUM.	Latitud: 19.363 N Longitud: 260.819 E Altura: 2304.0749 m
Zócalo (ZOCA): se encuentra ubicada en la Plaza de la Constitución en el Centro Histórico, frente a las oficinas del Gobierno del Distrito Federal, a un costado de la calle 16 de septiembre.	Latitud: 19.432 N Longitud: 260.867 E Altura: 2224.7537 m



---

## V. GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE MÉXICO

### 5.1 Descripción General de la Cuenca de México

En este capítulo se darán a conocer las principales características geológicas, el origen y la distribución de los distintos tipos de suelo que conforman la CM. Para fines prácticos, las estaciones utilizadas para el estudio de esta tesis se encuentran distribuidas en la parte occidental de la CM.

La Cuenca de México es una cuenca endorreica que se encuentra asentada sobre una planicie aluvial que anteriormente era un sistema de antiguos lagos, abarca parte del Estado de México y el Distrito Federal. La CM. se compone básicamente de rocas volcánicas y sedimentos lacustres. Las rocas volcánicas se encuentran como secuencias alternadas de derrames lávicos, piroclastos y cenizas alrededor de las sierras, mientras que los sedimentos lacustres están distribuidos principalmente en la parte central de la CM.

La cuenca tiene una altitud promedio de 2240 m sobre el nivel de mar y un área aproximada de 9600 km<sup>2</sup> de los cuales, 2400 m<sup>2</sup> corresponden al área urbana. Se encuentra limitada al norte por la Sierra de Pachuca y la Sierra de Tezontlalpan, al sur por la Sierra de Chichinautzin, al este por la Sierra Nevada, la Sierra Calpulalpan y la Sierra de Tepozán, y al oeste por la Sierra de Monte Bajo y la Sierra de las Cruces (Fig. 5.1).

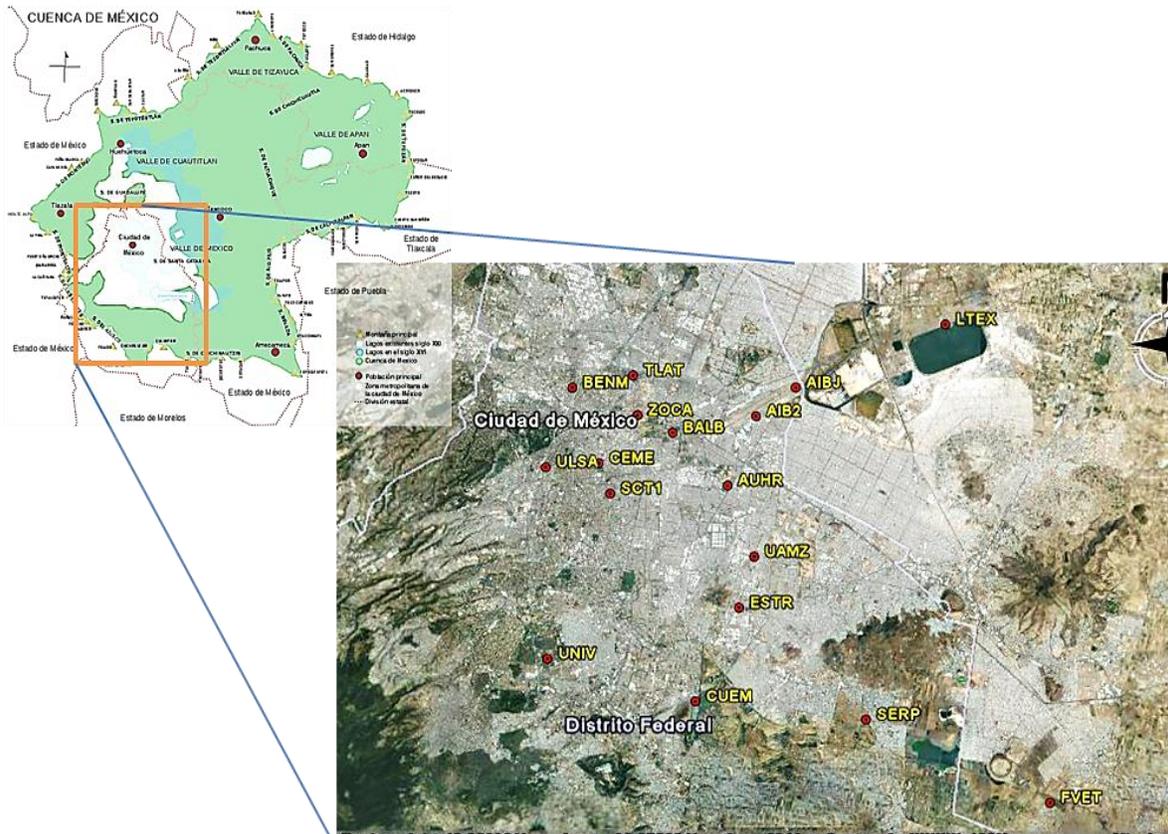


Fig. 5.1. Ubicación de la Cuenca de México y área de estudio.

## 5.2 Geología Histórica

Los principales acontecimientos que dieron origen y transformación a la CM sucedieron en los últimos 25 millones de años aproximadamente. La cuenca donde se encuentra actualmente en principio fue parte del mar somero, luego se convirtió en una planicie costera, después en una zona de subducción y finalmente una cuenca lacustre. Estos eventos tuvieron lugar durante el Mioceno, Plioceno y Pleistoceno. A continuación se describen brevemente los principales eventos sucedidos que dieron origen a la CM.

La región donde se encuentra actualmente la Cuenca de México resultó de una intensa actividad volcánica y tectónica que inició en la época del Mioceno. El basamento volcánico del Terciario Medio fue afectado por fracturas y fallas de la corteza terrestre provocando hundimientos y formando algunas fosas tectónicas. Posteriormente durante el Mioceno tardío el material volcánico formó estructuras principalmente en la parte oriente y poniente



---

del valle, obstruyendo y desviando los ríos existentes, en esta época se forma la Sierra de Guadalupe. Antes del Pleistoceno los ríos existentes dentro de la cuenca drenaban hacia el Sur.

En el Plioceno la actividad volcánica caracterizada por potentes derrames de andesitas basálticas produce el cierre de la cuenca en la parte norte (Mooser, 1975), en esta época surge la Sierra de las Cruces al poniente. A finales del Plioceno se producen fracturas con orientación W-E, por las cuales se tuvieron grandes efusiones de basalto que crearon la Sierra de Chichinautzin. Durante esta etapa se forman pequeños cuerpos de agua que posteriormente dan origen a los diferentes lagos en la cuenca, este sistema de lagos provoca el surgimiento de grandes abanicos aluviales sobre los flancos poniente y oriente de la cuenca conocidos ahora como Formación Tarango.

Con la formación de la Sierra Chichinautzin se formó una represa natural que obstaculizó el drenaje de la cuenca en la parte Sur delimitando el sistema fluvial, ocasionando que el agua se estancara dando origen primero a pequeños cuerpos de agua y después a grandes lagos, los que ahora se conocen como el sistema compuesto por: Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco. Los lagos se formaron sobre depresiones, es decir, solo permanecían durante la época de lluvia, pero en época de sequía se formaban zonas áridas, dando origen a sedimentos fluvio-lacustres interestratificados.

### **5.3 Estratigrafía General**

La CM en su mayoría está compuesta por rocas volcánicas y sedimentos de tipo lacustre. Las rocas volcánicas se originaron de los diferentes periodos de actividad tectónica y volcánica, los sedimentos lacustres provienen del sistema de lagos surgidos después del cierre de la cuenca. A continuación se hará una breve descripción de la estratigrafía generalizada de la CM, se trata una estratigrafía típica ya que existen versiones diferentes realizadas por distintos autores que varía dependiendo de la zona.

Como ya se mencionó anteriormente, los lagos en la CM fueron formados por la acumulación de agua en depresiones y alimentados por agua de lluvia de temporada, sin embargo solo permanecían algún tiempo desapareciendo después a causa de la filtración y



---

la evaporación ocasionada por el cambio en el clima. Estas condiciones climáticas originaron una acumulación de arenas, limos, arcillas, cenizas, además de clastos derivados de la acción de ríos, arroyos, glaciares y volcanes relleno la parte central de la cuenca. Actualmente los estratos en la cuenca son limo-arenosos, limo-arcillosos, clásticos y existen capas de cenizas y pómez producto de las erupciones volcánicas que sucedieron en el último millón de años.

Los sedimentos depositados por los lagos resultaron en un perfil de capas dispuestas horizontalmente sobre la cuenca. A continuación se describe un perfil estratigráfico que trata de caracterizar el área urbanizada de la Cuenca de México. (Fig. 5.2).

En las zonas altas de la cuenca se encuentran mantos de lava y material piroclástico, existen grandes depósitos de basalto sobre todo en la zona Sur. Al pie de las sierras se localizan grandes depósitos aluviales de composición muy variable, debido a la forma en cómo se depositaron los clastos fluviales y aluviales se produjo una intercalación con las arcillas. En las partes bajas, entre las sierras y principalmente en la región central de la cuenca, existen depósitos lacustres constituidos por ceniza volcánica con intercalaciones de pómez, arenas finas y limos. Entre estos depósitos se encuentran intercalados estratos de origen aluvial, o bien, se encuentran en contacto con las formaciones de las zonas altas. Las formaciones lacustres alcanzan un espesor de hasta 80 m, disminuyendo en algunos lugares, por ejemplo debajo del Zócalo existe un espesor de unos 60 m y desaparece al pie de las Lomas de Chapultepec. Entre las arcillas lacustres aparece una capa dura de entre 30 y 40 m la cual va desapareciendo hacia el centro de Texcoco.

Finalmente, en la estratigrafía de la cuenca aparece la Formación Tarango, compuesta en la parte superficial de arena cementada con carbonato de calcio, un poco de limo en las capas superiores y con grava en las capas inferiores. Hasta el momento se tiene conocimiento sólo de los primeros 150 m pero con poco detalle y exactitud (Santoyo, 2007).

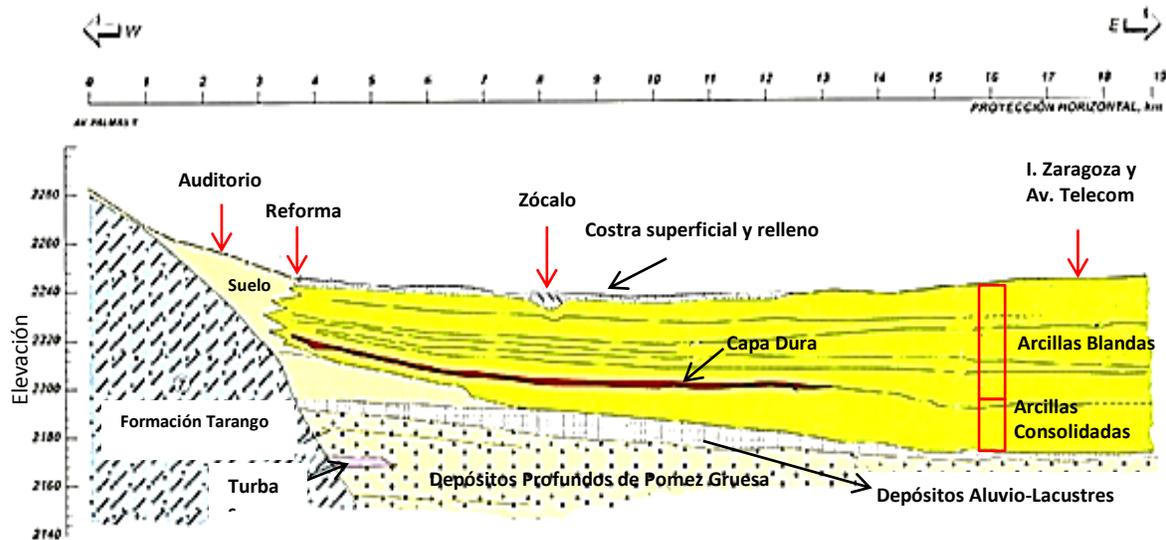


Fig. 5.2. Sección de la secuencia estratigráfica deducida en común por ingenieros geotécnicos y geólogos, para las arcillas y el relleno aluvial debajo de la Ciudad de México (Modificada de Santoyo, 2007).

## 5.4 Zonificación de la Cuenca de México

Para efectos de construcción, existe un mapa de zonificación geotécnica que está basado en los criterios establecidos en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. En el mapa se ha dividido la CM en tres grandes zonas (Lomas, Transición y Lago) (Fig. 5.3). Se trata de una zonificación generalizada planteada por Marsal y Mazari en 1959, aunque se sabe que la estratigrafía local cambia y no se parece a lo que se considera típico en el mapa de zonificación.

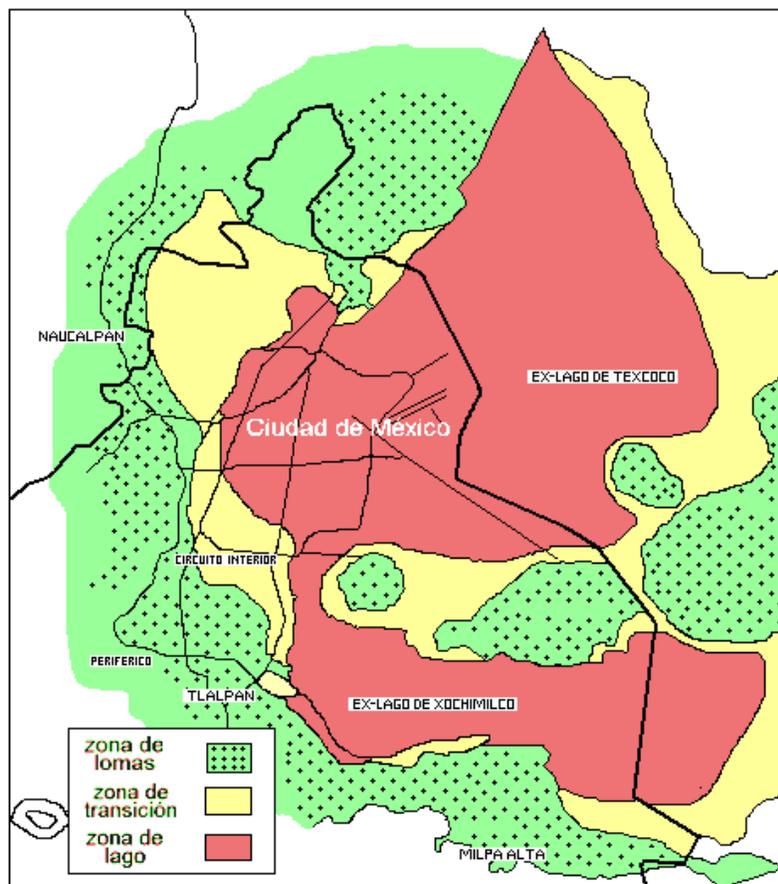


Fig. 5.3. Zonificación Geotécnica de la Cuenca de México (Tomada del SSN).

### Zona de Lomas.

Se le llama de esta forma debido a que se localiza en las partes más altas de la CM. Con los deshielos a finales de los periodos glaciares surgieron ríos y arroyos caudalosos los cuales generaron grandes depósitos fluviales que se reconocen en diferentes puntos de esta zona. La mayoría del suelo en esta zona está constituido por mantos de lava y material piroclástico, principalmente en la parte sur donde sus espesores son de gran tamaño. Los suelos de esta zona son muy resistentes por lo tanto poco deformables.

En el sur, la Zona de Lomas abarca desde las faldas de la Sierra de Chichinautzin hasta la Cuenca de Chalco, y al norte, abarca el Peñón de los Baños, la Sierra de Guadalupe, el Cerro del Chiquihuite, el Cerro del Tigre, el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina.



---

### **Zona de Lago**

Se le conoce de esta forma porque se localiza en las regiones donde antiguamente existían lagos, en este caso en la Cuenca de México los lagos de Texcoco y Xochimilco. El suelo en esta zona es de tipo lacustre, constituido por una secuencia de arcillas muy blandas con alto contenido de agua.

### **Zona de Transición**

Es una combinación entre la Zona de Lomas y la Zona de Lago. Al pie de la Zona de Lomas se reconocen abanicos aluviales formados a causa de los deshielos a finales de los periodos glaciales.

Son depósitos que dividen la Zona del Lago de la Zona de Lomas caracterizados por deltas poco extensos que se introdujeron en la zona del lago. Debido a la forma en cómo se depositaron los clastos fluviales y aluviales se produjo una intercalación con las arcillas.

El fenómeno de hundimiento se presenta sólo en la Zona de Lago y Zona de Transición debido a las características del suelo, por lo tanto en la Zona de Lomas no es significativo porque esta zona compone de suelo firme.



---

## **VI. HUNDIMIENTO Y AGRIETAMIENTO EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

### **6.1 Breve Historia del Hundimiento y el Agrietamiento en la Ciudad de México**

En los últimos años el hundimiento y el agrietamiento en la CM son fenómenos que han sido estudiados debido a las consecuencias que han traído consigo desde que se comenzó a construir la Ciudad de México, principalmente por la baja capacidad de resistencia del suelo, la sobreexplotación de los acuíferos y la escasa concientización que se le ha dado al problema.

Los fenómenos del hundimiento y el agrietamiento comenzaron a ser estudiados gracias al Dr. Nabor Carrillo quien fuera rector de la UNAM, comenzó a estudiar más a fondo la Mecánica de Suelos y estableció las bases para poder definir sus causas. Posteriormente se puso énfasis en el estudio de casos ocurridos principalmente en la Ciudad de México y en el Lago de Texcoco, donde se realizaron varios estudios que fueron documentados para poder explicar el fenómeno. También fueron identificados casos similares en otras partes del mundo como en la zona de Eloy-Picacho y en el oeste del Condado de Pinal en el estado de Arizona, USA, en donde el hundimiento y las fracturas se atribuyeron al abatimiento del agua subterránea usada para el riego, entre otros casos.

La CM experimenta actualmente un hundimiento considerable de hasta 30 cm por año en algunas zonas de área metropolitana. Este fenómeno se presenta desde hace más de un siglo y en los últimos años ha ido incrementando principalmente a causa de la intensificación del bombeo de los acuíferos para el abastecimiento de agua potable ya que se tiene calculado que tan solo en el DF se consumen  $33 \text{ m}^3/\text{seg}$  de agua potable, esto se traduce como una sobreexplotación de los acuíferos de unos  $10 \text{ m}^3/\text{seg}$  aproximadamente provocando el abatimiento de la presión hidrostática en las arcillas y esfuerzos de tensión en el agua que causan compresión en las tres direcciones ortogonales en la estructura del suelo, esto es debido a que en temporada de lluvias el agua forma una lámina delgada sobre el estrato que disipa tensión.



---

No solo la extracción del agua del subsuelo provoca hundimientos, sino también de cualquier material del subsuelo como petróleo, gas o azufre también son capaces de ocasionar el hundimiento de la superficie deformándola no solo verticalmente sino también horizontalmente, este es un fenómeno importante ya que algunas estructuras son mucho más sensibles a los movimientos laterales que a los verticales.

Las grietas pueden o no estar asociadas al hundimiento del suelo; sin embargo, hoy se sabe que el agrietamiento se hace más frecuente durante fuertes lluvias, ya que incrementa la presión de poros lo que causa esfuerzos de tensión del agua al suelo. La mayoría de las grietas se forman a profundidad y luego se propagan hacia arriba; sin embargo, existen varios mecanismos propuestos por distintos autores que pueden explicar su origen tales como: las deformaciones horizontales asociadas al hundimiento diferencial, las fuerzas de filtración que generan tensión en la estructura, la tensión provocada por la contracción horizontal de la zona donde se extrae el agua, etc.

En la Cuenca de México el fenómeno del agrietamiento está directamente relacionado con el hundimiento regional de la cuenca debido al bombeo del agua de estratos del subsuelo. Aproximadamente en el año de 1847, se comenzaron a utilizar los pozos artesianos para abastecer de agua a la ciudad; sin embargo, la necesidad de abrir nuevos pozos se hizo cada vez mayor y con el tiempo se agotaron muchos de los manantiales que se tenían en ese entonces. Como consecuencia los hundimientos se empezaron a hacer notables en la superficie del suelo y muchas estructuras fueron dañadas, varios edificios, el sistema de drenaje, casas, etc.

Es importante realizar el estudio del hundimiento, el agrietamiento y los desplazamientos o deformaciones laterales que sufre el suelo de la CM ya que estos están provocando problemas no solo económicos por los daños que causan directamente sobre la infraestructura urbana, sino también traen consigo problemas sociales y legales debido al riesgo que conlleva habitar zonas donde estos fenómenos están latentes y además son capaces de provocar inundaciones en donde se han registrado pérdidas humanas. Estudios demuestran que el abatimiento de 30m o un hundimiento de 30 cm son suficientes para que se comiencen a formar grietas en el suelo (Molina, 1957)



Debido a los grandes daños ocasionados por el hundimiento y el agrietamiento en la Ciudad de México, principalmente en distintos lugares de Iztapalapa, Netzahualcóyotl, Chalco, Tláhuac, Xochimilco, el Centro Histórico, entre otros, el estudio de estos fenómenos se ha ido acrecentando con el paso de los años. La delegación Iztapalapa en el año de 1999 propuso rellenar diversas fracturas con una mezcla de cemento-bentonita-tepetate con el fin de mitigar el problema del agrietamiento, además implementó diversas normas para reducir el riesgo de hundimiento y la generación de grietas a causa de la extracción del agua en áreas de riesgo. En septiembre del 2007 puso en marcha el Centro de Monitoreo de desarrollo de Fracturas del Subsuelo con la colaboración del Centro de Geociencias de la UNAM. Este centro cuenta con una base de datos (Fig. 6.1) y una página web donde se le permite al público en general consultar información del fenómeno del agrietamiento y además de reportar algún problema.

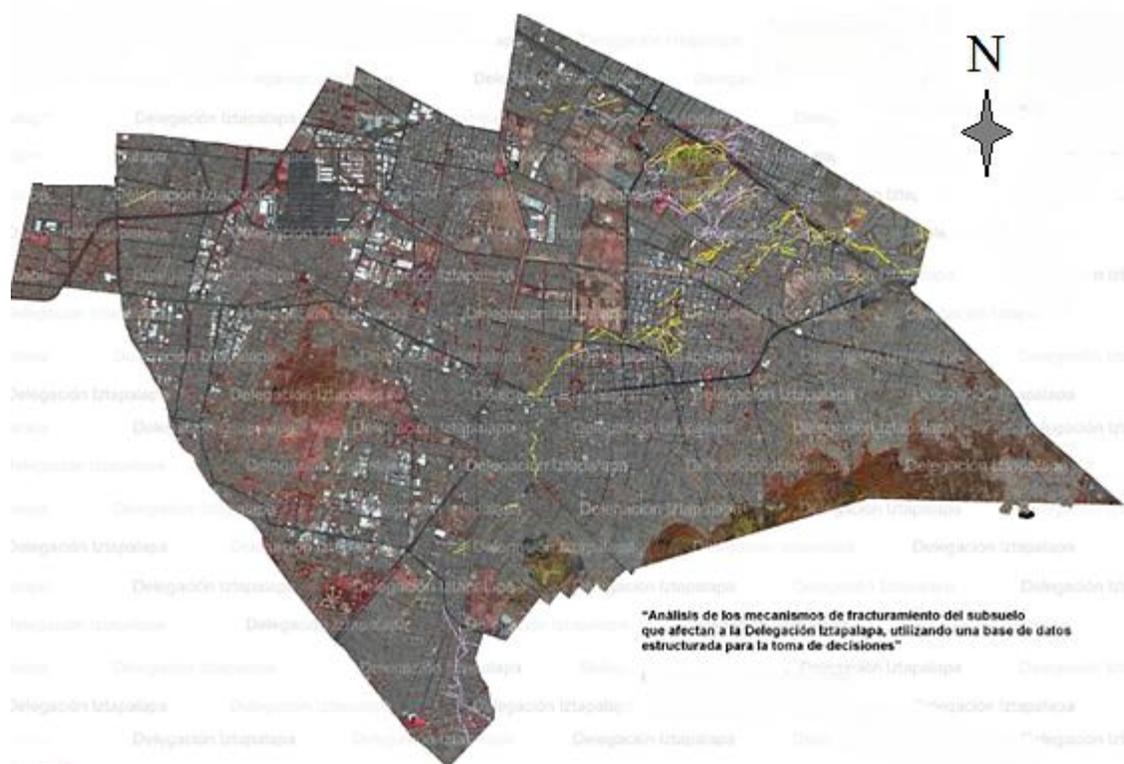


Fig. 6.1. Mapa de fracturas cartografiadas en la Delegación Iztapalapa actualizada hasta el 2007 (Modificada de CMFS).



---

Para estudiar el hundimiento y el agrietamiento del suelo es importante conocer la geología y la ubicación de cada zona para poder determinar la gravedad del problema y sus implicaciones económicas y sociales. Actualmente el Instituto de Geofísica de la UNAM también realiza trabajos de GPS para la observación y el monitoreo de estas grietas en la ciudad de México para poder construir una base de datos.

## **6.2 Mecanismos de Generación y Propagación de Grietas**

Las grietas son planos de separación o rotura presentes en una formación rocosa y que pueden variar desde unos cuantos centímetros hasta varios metros de tamaño, están relacionadas con procesos tectónicos o con procesos de hundimiento diferencial del suelo. Cualquier cuerpo sólido puede experimentar una deformación que genera grietas cuando se somete a fuerzas externas y pierde continuidad entre dos o más de sus partes.

Estudios realizados acerca del comportamiento mecánico y la fracturación del sistema lacustre de la CM (Orozco y Figueroa, 1991) señalan que las fracturas solo aparecen en zonas de transiciones estratigráficas laterales y en zonas que tienen un alto nivel de hundimiento. La mayoría de estas fracturas se inician a profundidad y se propagan hacia la superficie, pero existen otros factores geológicos que determinan la susceptibilidad a la fracturación tales como:

- Las características de una secuencia sedimentaria, como el ambiente de depósito y estructuras pre-existentes en el basamento.
- Los cambios verticales y horizontales en la granulometría de la formación sedimentaria.
- La permeabilidad del terreno que condiciona el comportamiento mecánico de los materiales.
- La interacción de factores geológicos que actúan como aceleradores que rompen el equilibrio mecánico del sistema.
- La variación del espesor de los sedimentos y la humedad determinan la forma de las fracturas, su evolución y lo que sucede a sus alrededores.



- La variación mineralógica en el material arcilloso se puede traducir en movimientos de compresibilidad y fracturación por efecto de la deformación diferencial.

Holzter y colaboradores (1976) afirman que las grietas se presentan en puntos de máxima curvatura donde se presenta el hundimiento y que la topografía de la roca basal es un factor importante. Larson (1983) propuso una lista de lugares en donde comúnmente la aparición de las grietas es más susceptible debido al abatimiento del agua subterránea (Fig. 6.2)

- Sobre el eje del lomo de un talud.
- En la orilla de un talud o un frente móvil de hundimientos.
- Sobre el lomo de un talud sepultado.
- Sobre el contacto de dos facies sedimentarias de distinta compresibilidad.

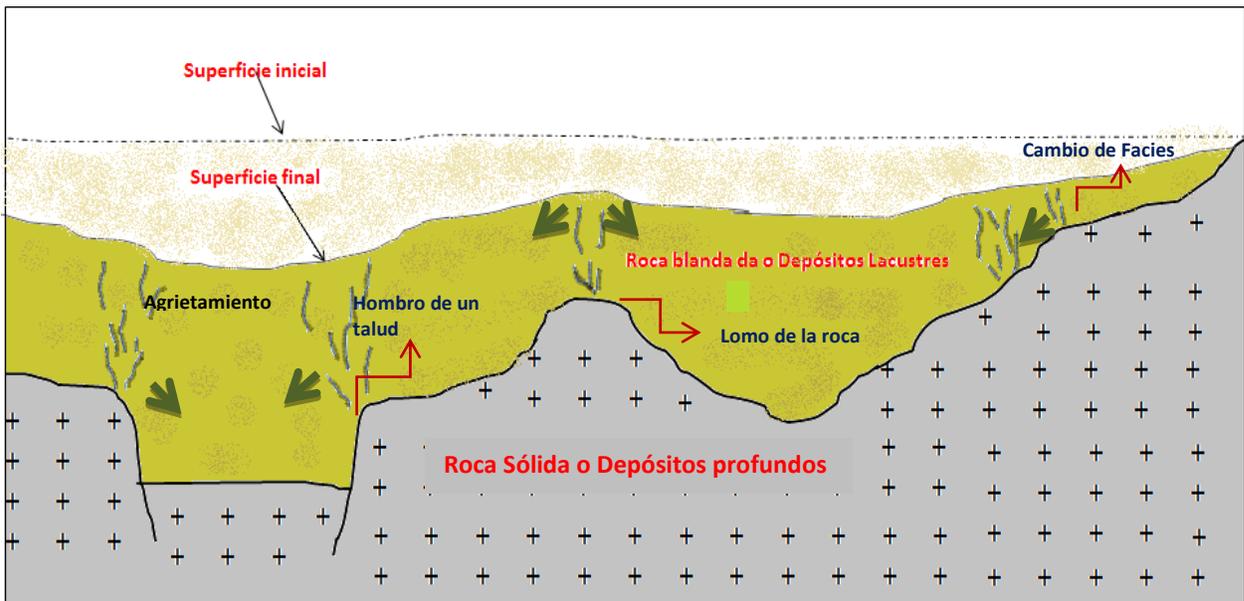


Fig. 6.2. Lugares Susceptibles para la aparición de grietas (Modificado de Pacheco, 2007).



---

## Mecanismos de generación de grietas.

Varios autores propusieron algunos mecanismos de agrietamiento del suelo, pero no todos fueron aceptados por la comunidad científica; a continuación mencionaremos algunos de ellos:

1. Las deformaciones horizontales asociadas a hundimientos diferenciales (Feth, 1951)
2. Fuerzas de infiltración que generan tensión (Lofggren, 1972)
3. Tensión provocada por la contracción horizontal en la zona donde se extrae agua subterránea (Holtzer and Davis, 1976)

Uno de los principales factores generadores de grietas en sedimentos lacustres es el desequilibrio mecánico causado por la alteración de las propiedades físicas del sistema en tiempos muy cortos. Existen fenómenos naturales que actúan como mecanismos generadores de fracturas, como son la actividad sísmica y las inundaciones causadas por lluvias torrenciales; sin embargo, los mecanismos más importantes son los procesos provocados por actividades humanas.

Las grietas han sido clasificadas en tres grupos principales de acuerdo con las causas externas o el mecanismo por el cual son generadas:

- *La variación del contenido de agua de la formación:* el agrietamiento comienza cuando una variación del contenido de agua produce un cambio en forma rápida en el estado de esfuerzos en las formaciones arcillosas, las fuerzas de tensión son provocadas por la evaporación. En el primer ciclo de secado del suelo se generan fracturas provocando grietas muy cercanas entre si y en un ciclo posterior se genera otro agrietamiento con separaciones mayores e irregulares.

Las grietas por variación del contenido de agua son tradicionales en el Lago de Texcoco, generalmente son de trazo irregular con una separación hasta de cientos de metros, normalmente tienen una dirección preferencial, aparecen durante la temporada de lluvias, su abertura puede ser de unos cuantos centímetros hasta



---

medio metro. Aparecen repentinamente y se azolvan en pocos meses con arcillas y limos transportados por el viento y los escurrimientos.

Este tipo de grietas generalmente se encuentran rellenas por material fino o por arena con incrustaciones de caliche y tequesquite. Estas grietas no atraviesan construcciones importantes ya que generalmente solo se aproximan a las construcciones y desaparecen cerca de estas.

- *El asentamiento diferencial provocado por el hundimiento regional:* debido al hundimiento regional se manifiestan grietas generadas por la tensión que se produce, generalmente este tipo de grietas sigue trayectorias semejantes a las curvas de nivel topográfico o el contorno de alguna formación subterránea con mayor rigidez que las formaciones arcillosas. Su longitud es superior a 100 metros, generalmente existe un desnivel entre las grietas, quedando el más alto hacia la zona en que aumenta la elevación del terreno. Se presentan en cualquier época del año, aunque las lluvias favorecen su aparición y en ocasiones se manifiestan periódicamente en la misma zona.
- *La rápida variación de esfuerzos horizontales:* es provocado por excavación o por la aplicación de cargas horizontales; por ejemplo, las excavaciones requeridas por plantas de tratamiento para la construcción de estructuras de concreto para tanques de 30 o 40 m de diámetro y profundidades de 4.5 m, aproximadamente, la perforación de pozos, el hincado de pilotes, etc. (SMMS, 1991 ).

### **Propagación de grietas.**

Los principales factores que determinan la propagación de grietas son el desequilibrio mecánico producido por sobrecarga estática y dinámica y la despresurización del medio geológico debido a la extracción de los recursos naturales del subsuelo como agua, petróleo o gas (SMMS, 1991).



Las grietas pueden desarrollarse o propagarse de tres distintos modos:

*Por tensión:* este tipo de grietas se generan cuando un esfuerzo de tensión separa entre sí las caras de la grieta, es decir, se observa una abertura simétrica con desplazamiento relativo entre las caras correspondientes perpendicular a la superficie de la fractura, se aplica tensión normal al plano de fractura (Fig. 6.3).

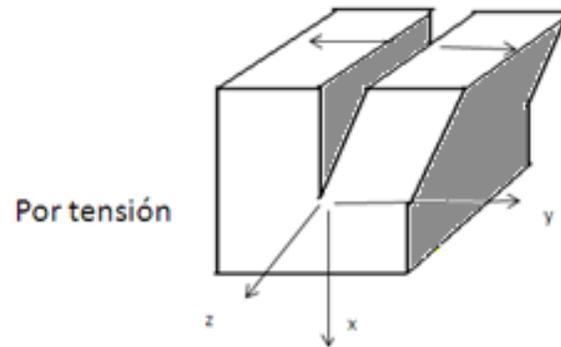


Fig. 6.3. Propagación de grietas por tensión (Modificada de Agrietamiento de Suelos, SMMS, 1991)

*Por tensión cortante o deslizamiento:* las caras de las grietas se deslizan una sobre la otra en dirección perpendicular a su vértice por la separación asimétrica por lo que se presenta un desplazamiento tangencial y perpendicular al frente de la grieta denominándose falla a causa del movimiento ocurrido (Fig. 6.4).

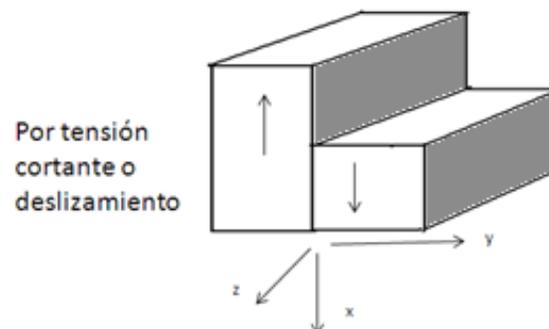


Fig. 6.4. Propagación de grietas por tensión cortante o deslizamiento (Modificada de Agrietamiento de Suelos, SMMS, 1991).



*Por rotura transversal o por tensión cortante y torsión:* las caras de las grietas se deslizan una sobre la otra pero con un desplazamiento paralelo al frente de la grieta y ocasionado por la inducción de un esfuerzo de torsión (Fig. 6.5).

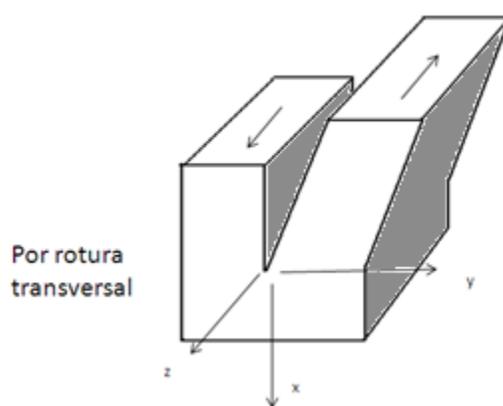


Fig. 6.5. Propagación de grietas por rotura transversal o por torsión cortante y torsión  
(Modificada de Agrietamiento de Suelos, SMMS, 1991).

En general el agrietamiento de un cuerpo se puede generar por cualquiera de los modos descritos o por la combinación de ellos, las grietas pueden ser controladas si se modifica el estado de esfuerzos en la masa del suelo por medio del uso de rellenos aplicados progresivamente para reducir los esfuerzos de tensión en el vértice de la grieta.

### **6.3 Campos de Esfuerzos y Generación de Fallas.**

En esta sección se describen los campos de esfuerzos existentes en la Cuenca de México documentados gracias a distintos estudios geológicos realizados por diferentes autores como Mooser (1975), de Cserna y colaboradores (1988), Huesca(2008), entre otros, donde establecen las posiciones geográficas de las fallas, su cinemática y el campo de esfuerzos que las generan. Los esfuerzos en la CM generan tres principales sistemas de fallas en direcciones NE-SW, SE-NW y E-W.

En la teoría de la Tectónica de Placas se dice que las placas son bloques rígidos en movimiento y que solo se deforman en los bordes, en la parte que se encuentra en contacto con otra placa; sin embargo se ha comprobado que dentro de las placas existen grandes



zonas de deformación. Por medio de la Geodesia se sabe que la deformación en las placas tectónicas no solo sucede sus límites, ya que una parte del movimiento sucede a distancias considerables de los límites. Este caso sucede en el sur de México donde existe una gran zona de deformación que proviene del movimiento convergente de las placas tectónicas.

La Placa de Norteamérica se encuentra cabalgando sobre la Placa de Cocos y sobre la Placa de Rivera como se muestra en la figura 6.6, debido a este fenómeno existe una zona en movimiento muy grande, desde la trinchera en las costas del Pacífico hasta el centro del país que provoca la deformación en toda esa región, además de la formación de sistemas de fallas en diferentes direcciones. El área deformada es muy extensa, abarca en el norte el Eje Neovolcánico, en el sur la costa del Océano Pacífico, en el este hacia Oaxaca y Chiapas, al oeste hasta Jalisco.

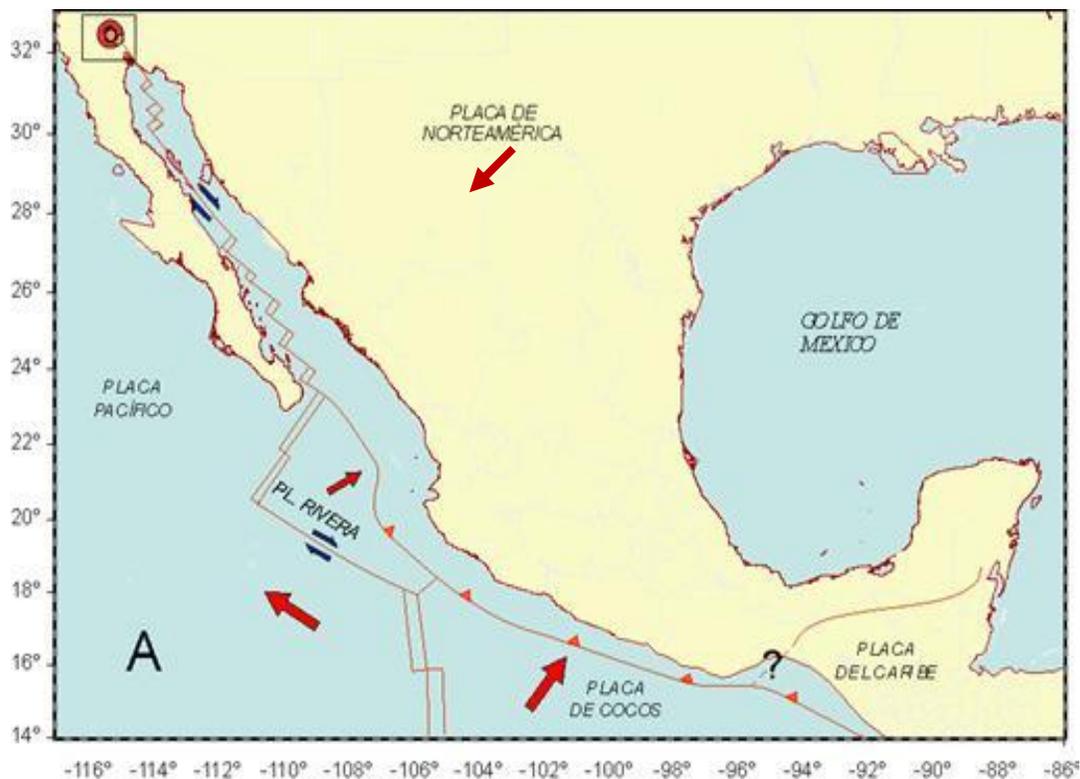


Fig. 6.6. Movimiento de las placas tectónicas que influyen en México (Modificada de SSN).



---

Es importante recordar que debido al movimiento de las Placas tectónicas, la CM se encuentra en una zona de alta sismicidad, por esta razón la mayoría de los estudios que se han realizado van enfocados a la evaluación del riesgo sísmico; sin embargo nos enfocaremos en el análisis de la deformación de CM provocada por la convergencia entre dos placas oceánicas y una continental que hacen que la placa cabalgante se someta a un campo de esfuerzos extensivos y compresivos. La deformación en el centro de México se denomina por extensión y cizalla, este fenómeno no es muy común en los procesos de subducción ya que se esperaría que la placa cabalgante estuviera sometida a un campo compresivo orogénico con fallamiento inverso como sucede en la mayoría de los procesos de subducción activos.

La forma en la que sucede la deformación en el centro de México es muy particular y por lo tanto haciendo un análisis tectónico regional de la estructura geológica de la cuenca, se puede inferir que los lineamientos tienden a reflejar la presencia de sistemas de fallas (Chavacán, 2007) con orientación NE-SW (A), SE-NW (B) y E-W(C) (Fig.6.7). Las fallas orientadas al NE corresponden a un desplazamiento lateral o cizallamiento horizontal (de Cserna y colaboradores, 1988).

La zona de cizallamiento necesariamente implica un movimiento diferencial de dos bloques continentales mayores de México, cuyo motor es la subducción oblicua que se está efectuando a lo largo de la fosa México-Mesoamericana con un vector de movimiento cercano a  $45^\circ$  E y velocidad de 5 a 7 cm por año (de Cserna y colaboradores, 1988).





---

deformaciones con métodos tradicionales. Por esta razón recurrimos a hacer mediciones utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para poder llevar a cabo el estudio de los movimientos horizontales y así poder encontrar su relación con la geodinámica de la cuenca.

La importancia de este capítulo radica en la breve descripción de los principales mecanismos que participan en el comportamiento de una superficie. A continuación se describen algunas de las principales características de los desplazamientos horizontales:

- a) El espesor de la secuencia estratigráfica que conforma el relleno de la cuenca debe ser muy significativo.
- b) Es esencial la existencia de hundimientos diferenciales en el área.
- c) En el punto de máximo hundimiento no hay desplazamientos horizontales ni a distancias grandes de la zona de hundimientos, es decir que la máxima deformación horizontal de la superficie se presenta en los puntos de menor subsidencia, en la dirección del campo de esfuerzos horizontales principales, esto es, el punto de máximo movimiento corresponde con el punto de mayor pendiente del perfil de subsidencia vertical, la tensión horizontal de este punto es cero.
- d) Los desplazamientos horizontales se dirigen hacia la zona del hundimiento.
- e) El máximo desplazamiento horizontal se presenta en el punto de máxima pendiente de la zona de hundimiento.
- f) En el centro de la zona de hundimiento, la deformación horizontal es de compresión y en las orillas la deformación es de extensión.
- g) Se presentan principalmente en zonas donde hay estructuras geológicas activas, por ejemplo una falla o una superficie de contacto, que pueden provocar hundimientos ya que están presentes planos de discontinuidad que se convierten en superficies con movimiento horizontal del suelo.



---

## 6.5 Desplazamientos Horizontales en la Cuenca de México

Como ya se ha mencionado anteriormente, una de las principales causas de subsidencia en la CM es la extracción de agua subterránea. Sin embargo, cuando se hace una extracción de cualquier tipo de material del subsuelo, ya sean sólidos, líquidos o gases, se presenta una deformación de la superficie, pero no solo en dirección vertical, sino también lateralmente, es decir, los movimientos horizontales y los campos de velocidad vertical son complementarios entre sí.

La subsidencia en la CM es muy variable, podemos encontrar territorios en los que existe un gradiente de velocidad muy pequeño en dirección vertical y otros sitios que se caracterizan por gradientes de alta velocidad, lo mismo sucede con los movimientos horizontales.

Las características de los distintos tipos de suelo que conforman la CM influyen directamente en el origen de los desplazamientos horizontales. La Cuenca de México está consolidada sobre una cuenca hidrográfica antigua, profundamente disectada, que drenaba hacia el sur (antiguo Río Amacuzac), que quedó bloqueada por la Sierra de Chichinautzin hace unos 500000 años. Los sedimentos lacustres del sitio son considerados altamente compresibles y generan demasiados problemas en la cimentación para cualquier construcción que se desea hacer en la ciudad de México (Díaz-Rodríguez, 1998).

Los sedimentos lacustres son de origen volcánico y tienen propiedades mecánicas muy singulares que no están dentro de los patrones de comportamiento de la mayoría de suelos, Su comportamiento mecánico resulta muy complejo tanto en lo estático como dinámico porque es en tres dimensiones. El análisis de la componente horizontal de los movimientos tectónicos es de vital importancia; sin embargo, en la CM los suelos no pueden considerarse dentro de una clasificación simple, debido a que los sedimentos que la componen son heterogéneos, volcánicos, lacustres con una proporción y variedad de microfósiles que forman parte de la microestructura del suelo (Díaz-Rodríguez, 1998).



## VII. RESULTADOS

### 7.1 Resultados de Desplazamiento Horizontal medidos con GPS

Las mediciones de GPS se han realizado en diferentes campañas desde el año de 1995 con estaciones de ocupación temporal, y los datos fueron procesados con GIPSY-OASIS II. Posteriormente se calcularon velocidades de desplazamiento horizontal como se muestra en la figura 7.1. A las velocidades resultantes, se les aplicó una corrección en la que se resta la velocidad de desplazamiento de la Placa de Norteamérica que va de 5 a 7 cm/año, quedando solamente el movimiento interno de la placa. De esta manera, las velocidades están referidas a la Placa de Norteamérica, es decir, las velocidades que se muestran en la Tabla 2 son velocidades de deformación interna de la zona de estudio.

$$V_d[\text{mm/año}] = \sqrt{E^2 + N^2} \quad \text{donde: } V_d: \text{Velocidad de desplazamiento horizontal}$$

E: Velocidad de desplazamiento E-W

N: Velocidad de desplazamiento N-S

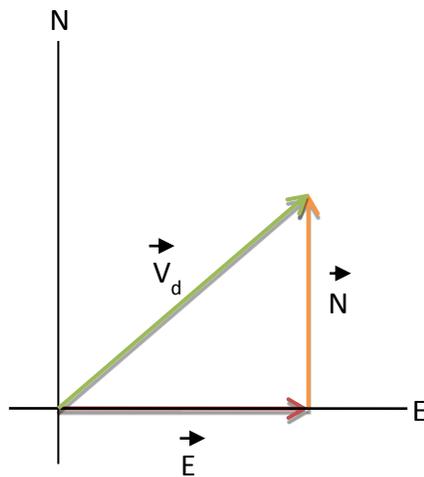


Fig. 7.1. Componentes en la velocidad de desplazamiento horizontal.



Estación	Velocidad de desplazamiento horizontal (mm/año)
AIB2	0.51039201
AIBJ	0.63126856
AUHR	8.40931032
BALB	10.4485836
BENM	9.88777022
CATE	17.1043445
CEME	11.2596714
CUEM	10.437241
ESTR	10.2076932
FVET	24.6362862
LTEX	10.3423402
SCT1	6.11709899
SERP	15.764219
TLAT	7.66329564
UAMZ	8.29179112
ULSA	11.8084758
UNIV	8.56028621
ZOCA	8.30918167

Tabla 2. Velocidades de desplazamiento horizontal de las estaciones GPS.



De acuerdo con el análisis de los datos de las 18 estaciones GPS se puede observar a partir de un histograma (Fig. 7.2) que la mayor parte de ellas se encuentra dentro de un rango de velocidad de desplazamiento horizontal que va de 6 a 10 mm/año, por lo tanto, pocas estaciones tienen desplazamientos inferiores a los 5 mm anuales o superiores a los 15 mm anualmente.

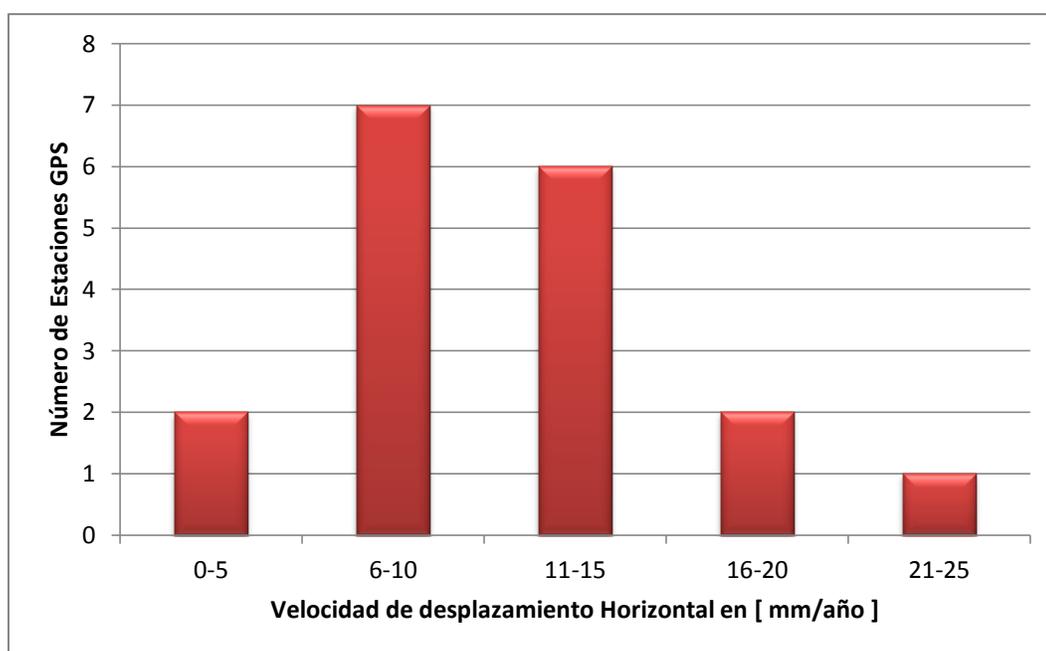
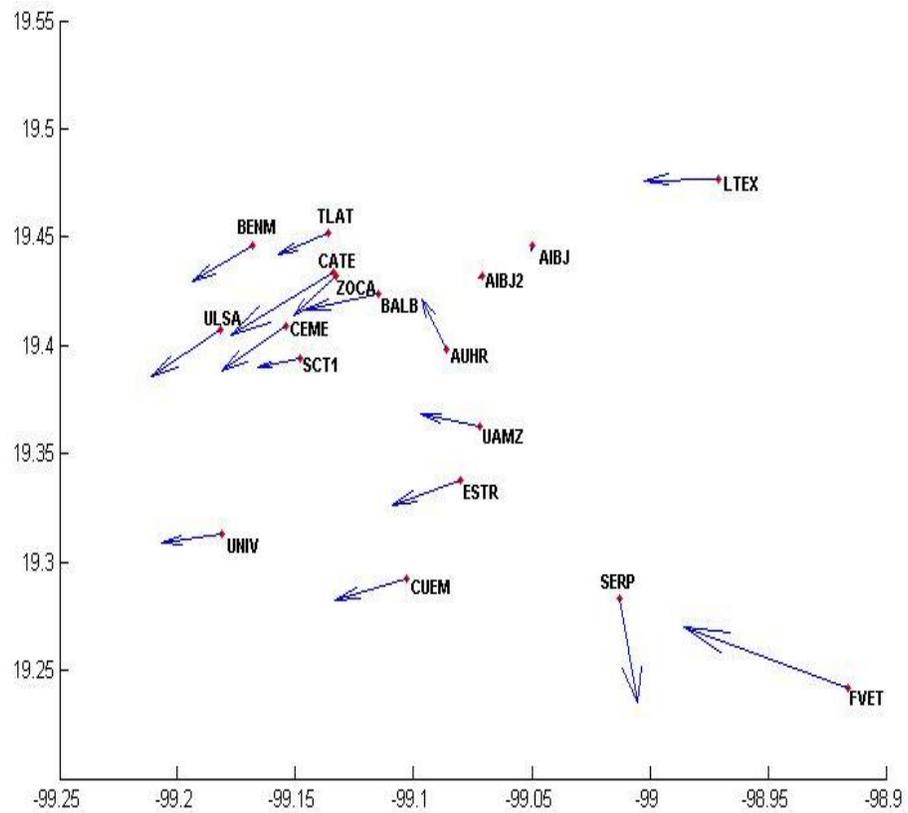


Figura 7.2. Histograma de rangos de velocidades de desplazamiento horizontal de las 18 estaciones GPS.

Una vez calculada la velocidad de desplazamiento horizontal de cada una de las estaciones se graficaron sus vectores tal y como se muestra en la figura 7.3 obtenida a partir de un código sencillo en Matlab, en donde cada vector representa la velocidad de desplazamiento horizontal.



**Escala: 10 mm/ año** →

Fig. 7.3. Velocidades de desplazamiento horizontal

Luego de graficar las velocidades de desplazamiento horizontal se obtuvo un gráfico de roseta (Fig. 7.4) en el que se pueden observar los rangos de la orientación preferencial del desplazamiento de cada estación, la cual es en su mayoría entre los 211 a los 220 grados, es decir, preferencialmente al SW.

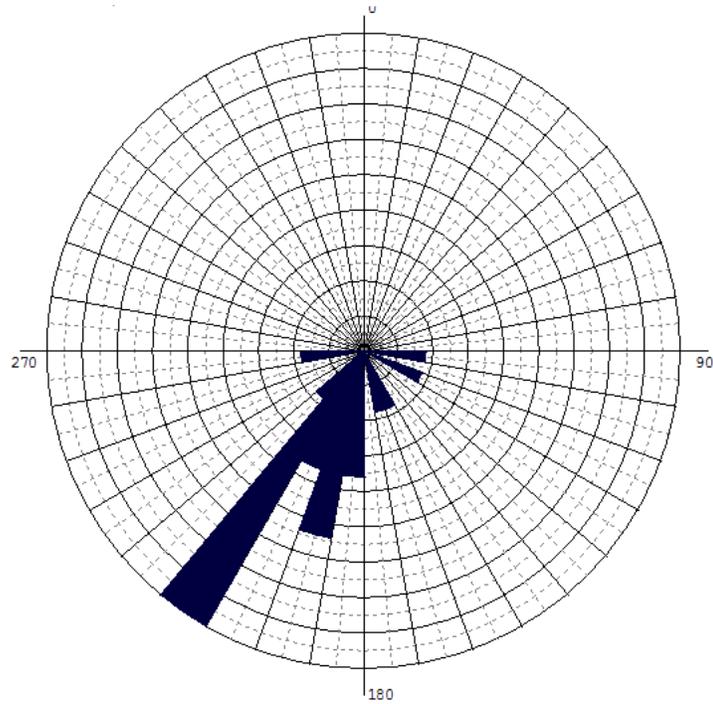


Figura 7.3. Gráfica de roseta que muestra la orientación preferencial del vector de desplazamiento horizontal.

### **Error en las mediciones**

En la siguiente tabla (Tabla 3) se muestran la velocidad de desplazamiento de cada una de las estaciones en las dos direcciones N-S y E-O, además el error  $\pm n$  que existe en cada una de sus componentes y la cantidad de mediciones hechas. Como se puede observar los datos con menos mediciones tienen un error más grande, por lo tanto son menos confiables. Esto nos sirve al hacer un análisis detallado de cada estación porque debemos considerar ese error al hacer alguna conclusión.



<b>Estación</b>	<b>Velocidad de desplazamiento horizontal (mm/año) y error <math>\pm</math> n. Dirección N-S</b>	<b>Velocidad de desplazamiento horizontal (mm/año) y error <math>\pm</math> n. Dirección E-O</b>	<b>Número de Mediciones</b>
<b>AIB2</b>	$-0.3 \pm 2.9$	$-0.4 \pm 6.5$	2
<b>AIBJ</b>	$-0.6 \pm 1.2$	$0.0 \pm 1.9$	5
<b>AUHR</b>	$7.7 \pm 8.7$	$-3.5 \pm 26.1$	2
<b>BALB</b>	$-2.5 \pm 3.3$	$-10.1 \pm 3.3$	4
<b>BENM</b>	$-5.3 \pm 1.7$	$-8.4 \pm 3.4$	3
<b>CATE</b>	$-9.5 \pm 5.4$	$-14.2 \pm 7.3$	2
<b>CEME</b>	$-6.9 \pm 1.5$	$-8.9 \pm 1.9$	4
<b>CUEM</b>	$-3.1 \pm 1.6$	$-10.0 \pm 1.9$	4
<b>ESTR</b>	$-3.8 \pm 1.8$	$-9.5 \pm 2.6$	3
<b>FVET</b>	$9.2 \pm 1.4$	$-22.8 \pm 1.6$	5
<b>LTEX</b>	$-0.2 \pm 7.8$	$-10.3 \pm 10.7$	2
<b>SCT1</b>	$-1.4 \pm 1.4$	$-6.0 \pm 2.6$	4
<b>SERP</b>	$-15.5 \pm 1.4$	$2.6 \pm 1.5$	5
<b>TLAT</b>	$-3.2 \pm 1.3$	$-6.9 \pm 2.1$	5



<b>UAMZ</b>	$1.6 \pm 1.4$	$-8.1 \pm 1.8$	4
<b>ULSA</b>	$-7.0 \pm 2.4$	$-9.5 \pm 4.0$	4
<b>UNIV</b>	$-1.4 \pm 0.6$	$-8.4 \pm 0.6$	5
<b>ZOCA</b>	$-5.9 \pm 1.5$	$-5.8 \pm 1.9$	4

Tabla 3. Velocidad de desplazamiento y error en las dos componentes.

Se puede ver que el error en algunas estaciones es bastante grande por lo que se sugeriría descartar algunos datos, sin embargo el movimiento existe y esto ya es un resultado del cual se puede hacer alguna conclusión.

## 7.2 Análisis de resultados

En el capítulo VI se describen los distintos mecanismos del comportamiento de una superficie y las principales características de los movimientos horizontales. Sin embargo, destacaremos los puntos que se consideran más importantes debido a los resultados obtenidos a partir de nuestro estudio.

En la Cuenca de México existe una gran cantidad de sitios donde se han manifestado hundimientos diferenciales muy importantes y que son los principales motivos por los que se comenzó a hacer el análisis de subsidencia en la CM. Cabe destacar que las mediciones realizadas por las estaciones de GPS utilizadas en esta tesis, en un principio fueron para analizar el fenómeno de subsidencia y posteriormente para análisis de desplazamiento horizontal.

Varias de las estaciones se encuentran en sitios donde se han presentado en los últimos años problemas de subsidencia provocada principalmente por el abatimiento de los acuíferos; sin embargo, existen otras causas que pueden haber provocado el hundimiento del suelo y por consiguiente el desplazamiento lateral de las estaciones.



---

Para comenzar el análisis de los desplazamientos horizontales, partimos de un modelo geológico que explica el comportamiento de una zona en la cual existe hundimiento sin importar que lo provoque. En cualquier sitio en el que se manifiesten hundimientos diferenciales los desplazamientos horizontales se dirigirán hacia la zona de mayor hundimiento, ocasionando que el máximo desplazamiento horizontal se presente en el punto de máxima pendiente. Para ejemplificar este fenómeno se trató de encontrar una relación entre nuestros resultados y la información acerca de las fracturas cartografiadas por el Centro de Monitoreo de Desarrollo de Fracturas del Subsuelo (CMFS) de la Delegación Iztapalapa (Fig. 6.1). Los resultados que obtenemos, no nos permiten comprobar esta teoría, ya que los vectores de desplazamiento horizontal parecen más bien tener un comportamiento regional, y por otro lado la información de la Delegación Iztapalapa está muy localizada, lo cual es de esperarse, y nuestros puntos de observación con GPS no cubren de manera exhaustiva la zona de esta delegación: por lo tanto no se puede generalizar para la cuenca. Los datos obtenidos con GPS muestran que la mayor parte de las estaciones no tienen relación con dicho fenómeno, llegando a la conclusión de que las fracturas cartografiadas por el CMFS son debidas aparentemente a un fenómeno local, por lo cual sería necesario contar con un mayor número de estaciones GPS en esa área para monitorear las zonas que presentan mayores problemas de agrietamiento.

Sin embargo en el mapa de hundimiento que se muestra a continuación (Fig. 7.4) se puede observar que el desplazamiento de algunas de las estaciones como: LTEX, AIBJ, SERP Y FVET, si se dirigen en dirección al hundimiento; aunque no necesariamente hacia la zona de máximo hundimiento, a excepción de AIBJ. A continuación se muestra información valiosa del hundimiento de la CM de los resultados obtenidos a partir de mediciones GPS mostradas en la Tabla 3 y como ya se ha mencionado, son mediciones que cubren el período 1995-2004, aunque no todas las estaciones siguen midiendo hasta la actualidad, por lo que algunas cuentan con un buen número de mediciones y algunas otras con información escasa por lo cual es necesario llevar a cabo un análisis de error para saber el grado de confiabilidad de cada una de ellas.

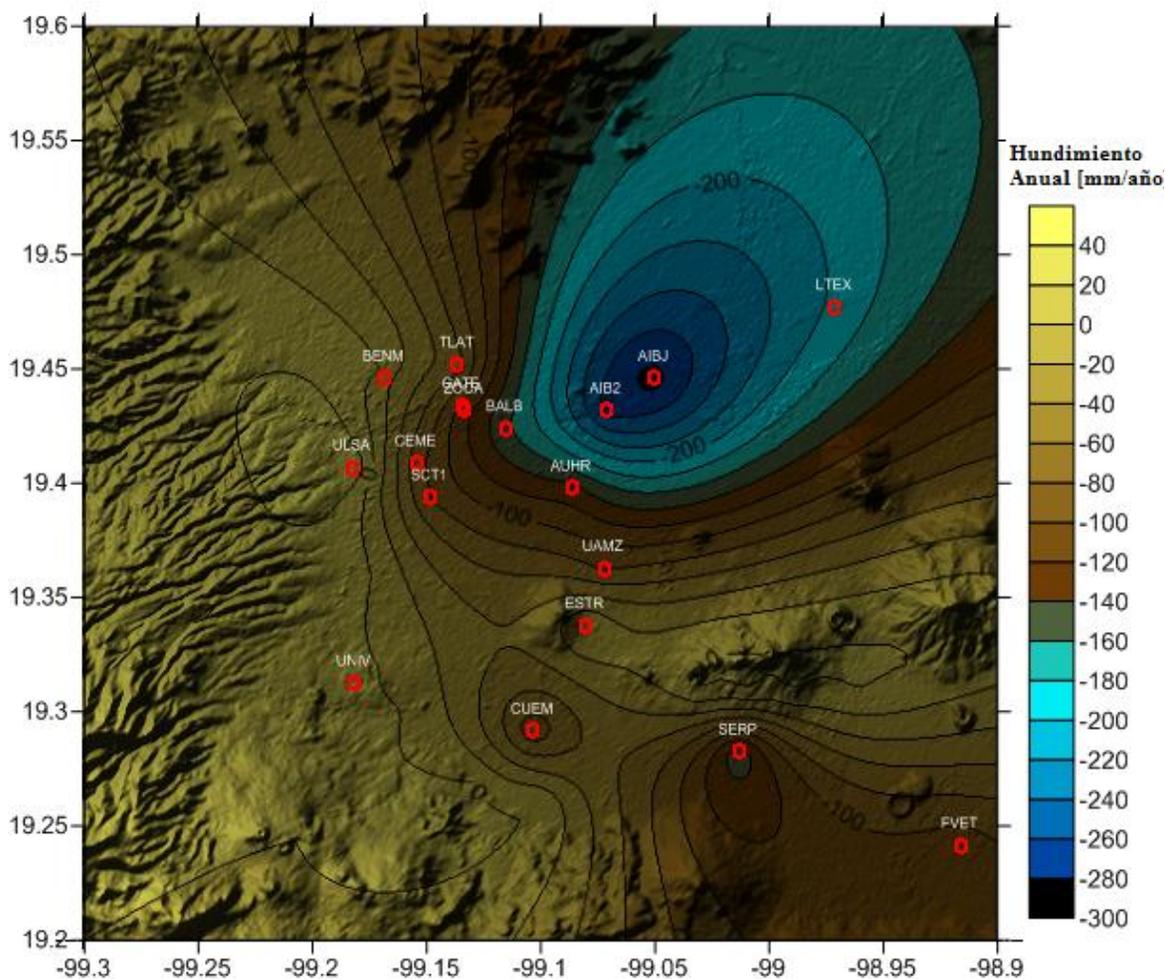


Fig. 7.4. Mapa que muestra el hundimiento registrado a partir de 1995-2004.

Un aspecto interesante es la observación del desplazamiento que presentan las estaciones que se encuentran en la zona de mayor hundimiento (AIBJ y AIB2) que es de hasta casi 30 cm/año (Jaramillo-Rivera, 2002) ya que son las que tienen el menor desplazamiento horizontal (Tabla 4).



Estación	Velocidad de desplazamiento horizontal (mm/año)	Velocidad de hundimiento (mm/año)
AIB2	<b>0.51039201</b>	<b>-265.53</b>
AIBJ	<b>0.63126856</b>	<b>-287.56</b>
AUHR	8.40931032	-131.25
BALB	10.4485836	-156.25
BENM	9.88777022	-16.74
CATE	17.1043445	-105
CEME	11.2596714	-71.81
CUEM	10.437241	-95.75
ESTR	10.2076932	0.06
FVET	24.6362862	-111.59
LTEX	10.3423402	-196.15
SCT1	6.11709899	-80.18
SERP	15.764219	-154.52
TLAT	7.66329564	-51.34
UAMZ	8.29179112	-82.85
ULSA	11.8084758	38.37
UNIV	8.56028621	0.63
ZOCA	8.30918167	-115.39

Tabla 4. Velocidades de desplazamiento horizontal y hundimiento anual de cada estación GPS.



Para poder estudiar el desplazamiento horizontal, se analiza a continuación la relación que guarda la distribución de las estaciones y la geología de las diferentes zonas geotécnicas de la cuenca: Zona de Lomas, Zona de Transición y Zona de Lago (Fig. 7.5).

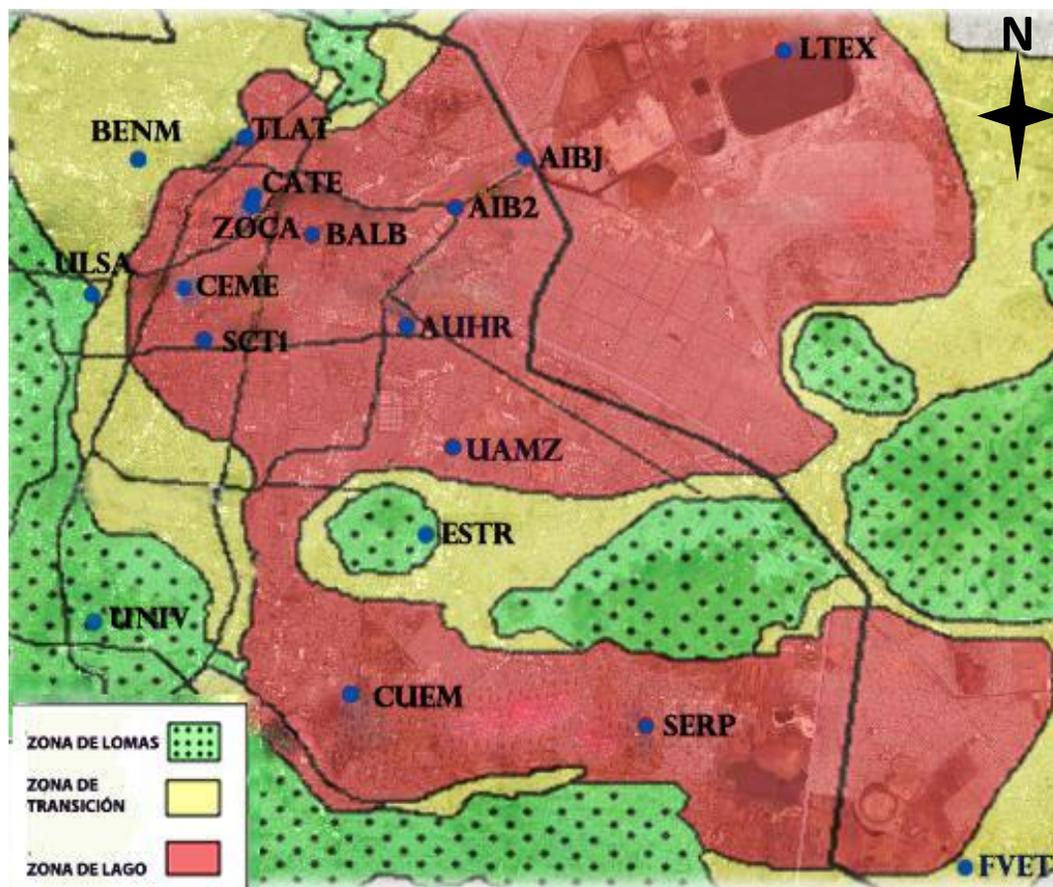


Fig. 7.5. Distribución de estaciones GPS en las diferentes zonas del área de estudio (Modificada del SSN).

A continuación se lleva a cabo un análisis de las 18 estaciones existentes en el occidente de la Cuenca de México, y se señala la posible relación que guarda con el tipo de zonificación en la que se encuentra cada una de ellas. El área de estudio se divide en dos principales zonas que son: la Zona del Lago de Texcoco y la Zona del Lago de Xochimilco porque aunque las dos zonas tienen historias geológicas similares, su historia de cargas y la mineralogía de sus sedimentos pueden tener diferencias importantes relacionadas con las condiciones de depósito. En el área de la Zona del Lago de Texcoco se encuentran 15 estaciones y en la Zona del Lago de Xochimilco se encuentran solo 3 estaciones.



**Zona de Lomas:** En esta zona se encuentran monitoreando las estaciones del Cerro de la Estrella (ESTR) y la de Universum (UNIV) (Fig. 7.6): la estación del Cerro de la Estrella se encuentra sobre roca basáltica en los primeros 50 m y en los siguientes metros una intercalación de basalto con tezontle y basalto hasta los 200 m, (DGCOH diseños constructivos de pozos, 2000), la estación Universum se ubica sobre una geología similar; la estratigrafía consta de roca basáltica en los primeros 10 a 25 metros, la cual descansa sobre la Formación Tarango, (Vázquez y Jaimes, 1989). En la estación Cerro de la Estrella (ESTR) ubicada en la delegación Iztapalapa se presenta un hundimiento de 0.06 mm/año, y la estación Universum (UNIV) que se encuentra en Ciudad Universitaria en la delegación Coyoacán existe un hundimiento de 0.63 mm/año. El desplazamiento horizontal calculado fue de 10.21 mm/año y 8.56 mm/año, respectivamente, en dirección suroeste, por lo que el desplazamiento en estos puntos es muy parecido. Cabe destacar que estos resultados no están relacionados completamente con el fenómeno de subsidencia ya que se esperaría que los vectores estuvieran en dirección al noreste hacia la zona de mayor hundimiento, sin embargo no es así, ya que sucede lo contrario.

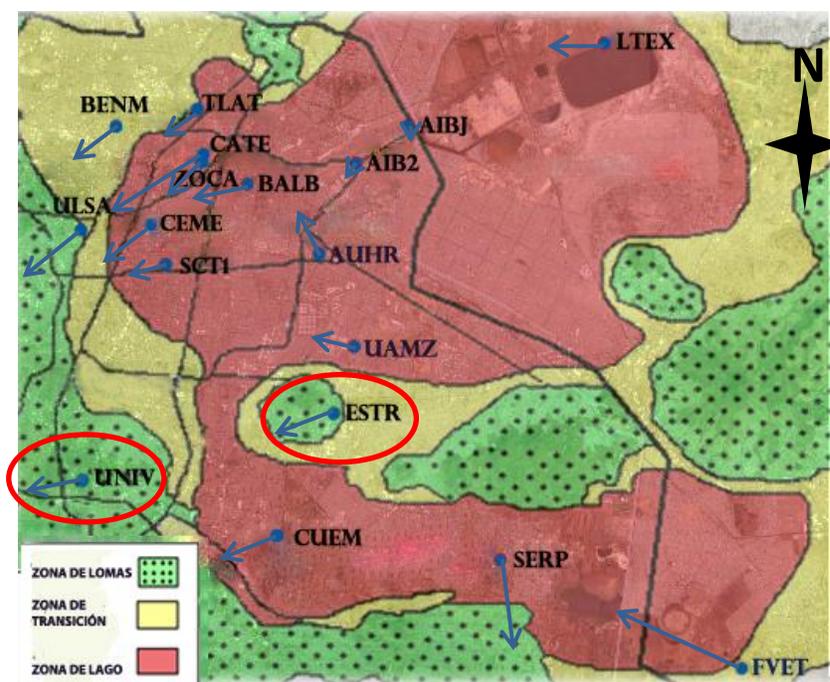


Fig. 7.6. Se muestran los vectores de desplazamiento (Flechas azules) de las estaciones UNIV y ESTR circuladas en rojo de la Zona de Lomas.



**Zona de Transición:** En esta área, pero dentro de la zona de lago de Texcoco, solo se encuentran dos estaciones, las estaciones de Benemérita Escuela Nacional de Maestros (BENM) en la delegación Cuauhtémoc y la estación Pozo Benjamín Franklin (ULSA) (Fig. 7.7) en la delegación Miguel Hidalgo. La estación Pozo Benjamín Franklin se localiza en los límites de la Zona de Transición al pie de la Zona de Lomas. La estación Benemérita Escuela Nacional de Maestros (BENM) presenta un desplazamiento horizontal de 9.89 mm/año y la estación Pozo Benjamín Franklin (ULSA) se desplaza horizontalmente 11.81 mm/año en dirección al suroeste, nótese que la orientación de su desplazamiento también es muy parecido al de las estaciones que se encuentran en la Zona de Lomas.

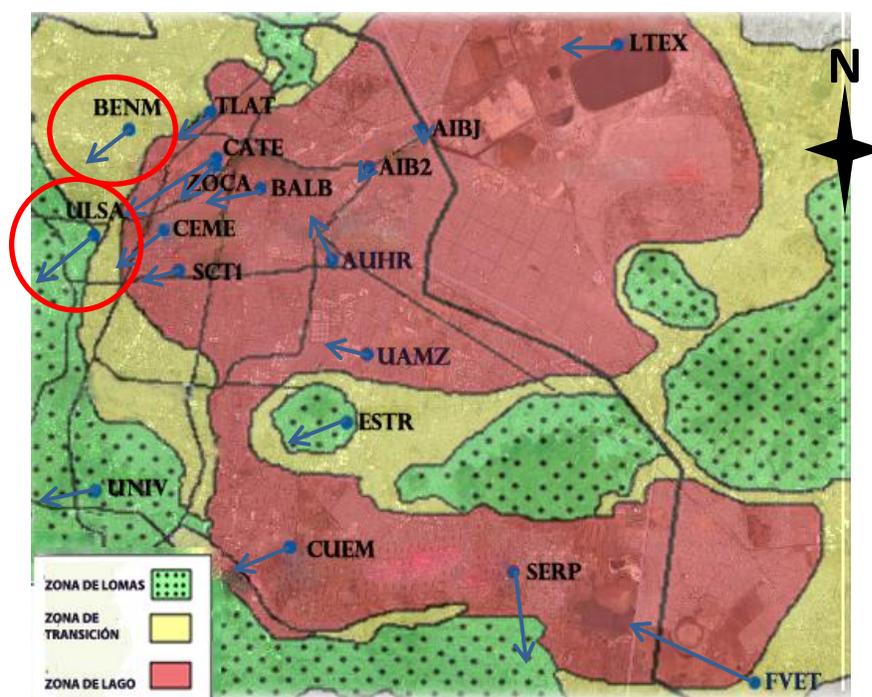


Fig. 7.7. Se muestran los vectores de desplazamiento (Flechas azules) de las estaciones ULSA y BENM circuladas en rojo de la Zona de Transición.

En estos puntos la velocidad de hundimiento coincide con la zona, ya que no es muy grande comparada con los demás puntos, en la estación Benemérita Escuela Nacional de Maestros (BENM) es de 16.64 mm/año y en la estación Pozo Benjamín Franklin (ULSA) es de 38.37 mm/año, sin embargo se esperaría que el vector de desplazamiento horizontal fuese más grande y que se dirigiera hacia la zona de mayor hundimiento; sin embargo, nos damos cuenta que tampoco cumplen con ese comportamiento.



---

Dentro de la Zona de Transición del Lago de Xochimilco se localiza la estación Rancho San Francisco de la Facultad de Veterinaria (FVET) que se encuentra ubicada a un costado de la carretera Chalco-Mixquic.

La estación Rancho San Francisco (Fig.7.8) de la Facultad de Veterinaria (FVET) se localiza en la Zona de Transición pero muy cercana a la Zona de Lago, su desplazamiento horizontal es de 24.64 mm/año en la dirección noroeste y la velocidad de hundimiento es de 111.59 mm/año. La zona de la Cuenca de Chalco actualmente es uno de los lugares más estudiados por diferentes autores por lo que existe bastante información y muy detallada del área. La secuencia estratigráfica en este lugar es de un estrato de color pardo oscuro y rojizo, con lentes arenosos hasta los 3 metros de profundidad, de 3 a 6 metros existe un estrato de color negro donde se observan varios lentes de ceniza-arena con una capa gruesa de material piroclástico a los 4 metros, de los 6 a 9 metros de profundidad se encuentra un estrato de color pardo oscuro con capas delgadas de color pardo amarillento y zonas enriquecidas de materia orgánica, de los 9 a los 15 metros se localiza un estrato de color gris oliva con algunos horizontes de materia orgánica o de arena (Caballero y Ortega, 1998).

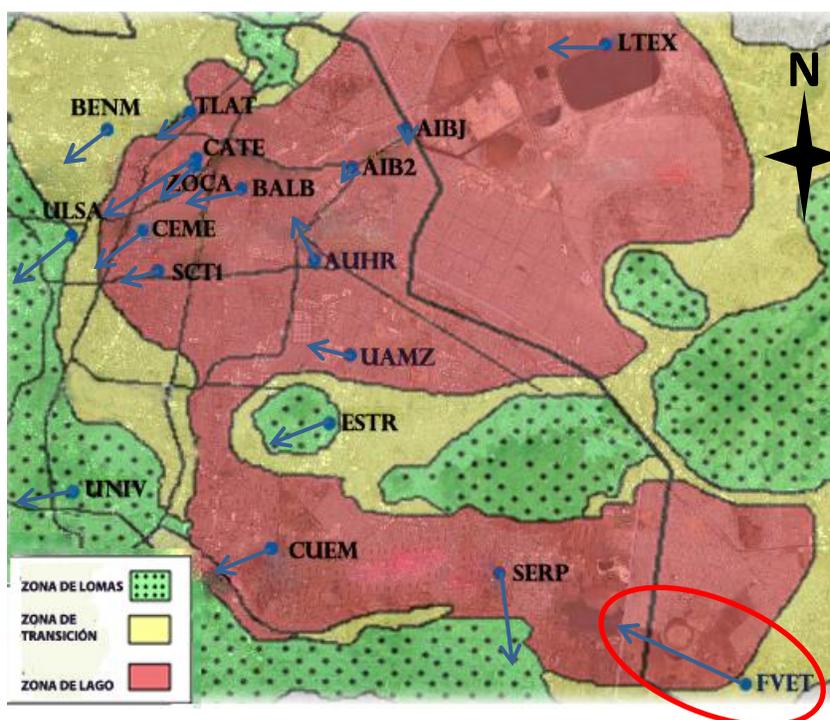


Fig. 7.8. Se muestra el vector de desplazamiento de la estación FVET circulado en rojo de la Zona de Transición.

Los factores geológicos que afectan a esta zona ocasionan que el desplazamiento horizontal y el hundimiento en la estación sean diferentes a los de las demás estaciones. Los sistemas de fallas existentes en el área condicionan el comportamiento del punto, ya que en esta zona se localizan fallas en diferentes direcciones de las cuales se hablará a detalle más adelante.

**Zona de Lago:** En esta área se encuentran 11 estaciones, en las cuales se tiene una velocidad de desplazamiento horizontal de 0.5 mm/año a 17 mm/año. En el Aeropuerto Internacional Benito Juárez se localizan dos estaciones de monitoreo (Fig. 7.9). El desplazamiento horizontal en estos puntos es mínimo en comparación con el de la estación AUHR con un desplazamiento de 8.4 mm/año. El resultado en AUHR, hay que tomarlo con mucha reserva, ya que esta estación solamente se midió en 2 ocasiones por lo que la calidad de los datos no es de lo mejor. La estación Aeropuerto Internacional Benito Juárez (AIBJ) tiene un desplazamiento de 0.63 mm/año y la estación 2 del Aeropuerto Benito



Juárez (AIB2) tan solo 0.51 mm/año, además AIBJ tiene una dirección al sur, distinta a la que tienen la mayor parte de las estaciones.

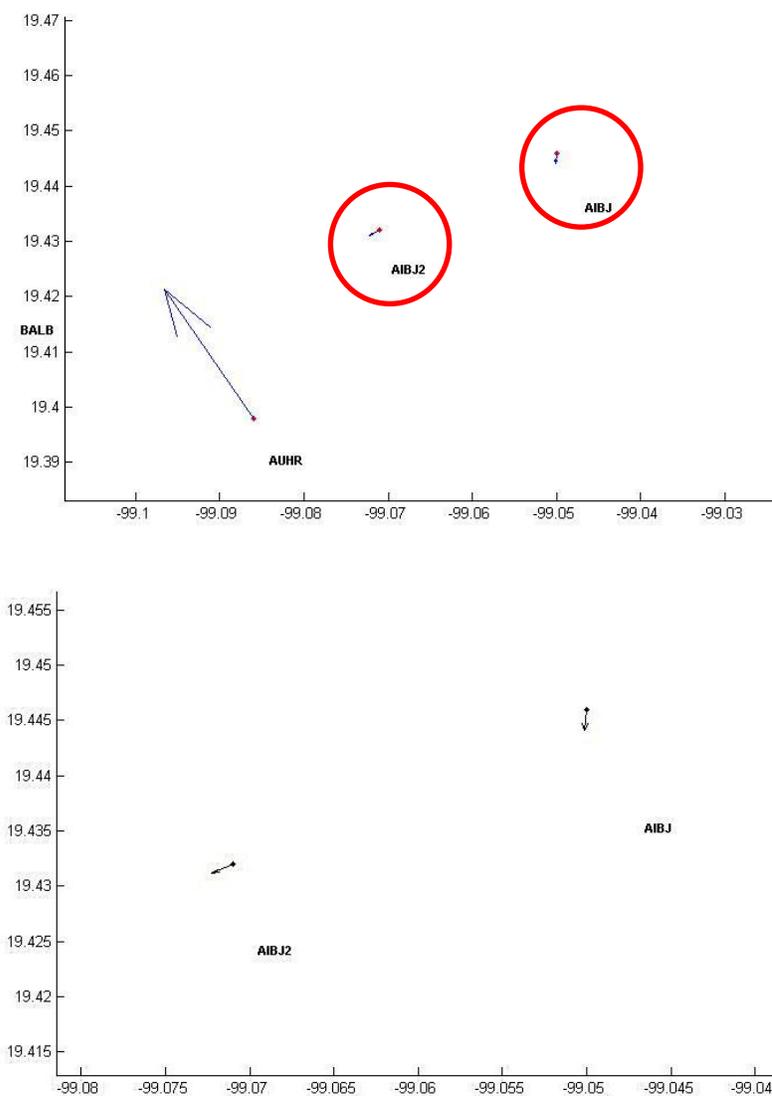


Fig. 7.9. Comparación de magnitudes de desplazamiento horizontal de las estaciones del Aeropuerto Internacional de México (AIBJ y AIB2).



---

En esta zona existen factores que provocan que el desplazamiento horizontal sea muy pequeño, es la zona en la que se tiene mayor hundimiento con  $-287.56$  mm/año en AIBJ y con  $-265.53$  mm/año en AIB2. Su desplazamiento horizontal es mínimo, las características geológicas del lugar son importantes ya que se tiene una capa de 38 metros de sedimentos arcillosos de alta compresibilidad, este sitio prácticamente era el centro del Lago de Texcoco. Además su dirección indica que efectivamente se desplazan hacia la zona de mayor hundimiento en la Cuenca de México.

Las estaciones Balbuena (BALB), Autódromo Hermanos Rodríguez (AUHR) y Lago de Texcoco (LTEX) son las tres estaciones más cercanas a las del aeropuerto (Fig. 7.10). En Balbuena (BALB) el desplazamiento horizontal es de  $10.45$  mm/año en dirección suroeste, en Autódromo Hermanos Rodríguez (AUHR) de  $8.41$  mm/año en dirección noroeste y en Lago de Texcoco (LTEX) de  $10.34$  mm/año casi horizontal en dirección oeste. El hundimiento en estos sitios es de  $-156.25$  mm/año,  $-131.25$  mm/año y  $-196.15$  mm/año respectivamente. La geología en estos lugares se conforma principalmente de sedimentos lacustres arcillosos saturados de alta compresibilidad, intercalados con algunos horizontes limo-arenosos con muy pocos metros de espesor. Nótese que la estación AUHR tiene una dirección completamente distinta a las anteriormente descritas, esto puede deberse a que se hicieron muy pocas mediciones y por lo tanto este punto no es muy confiable, por otro lado puede tener la dirección correcta y por lo tanto indicar que está en una zona diferente, pero serían necesarias más mediciones para poder corroborarlo.

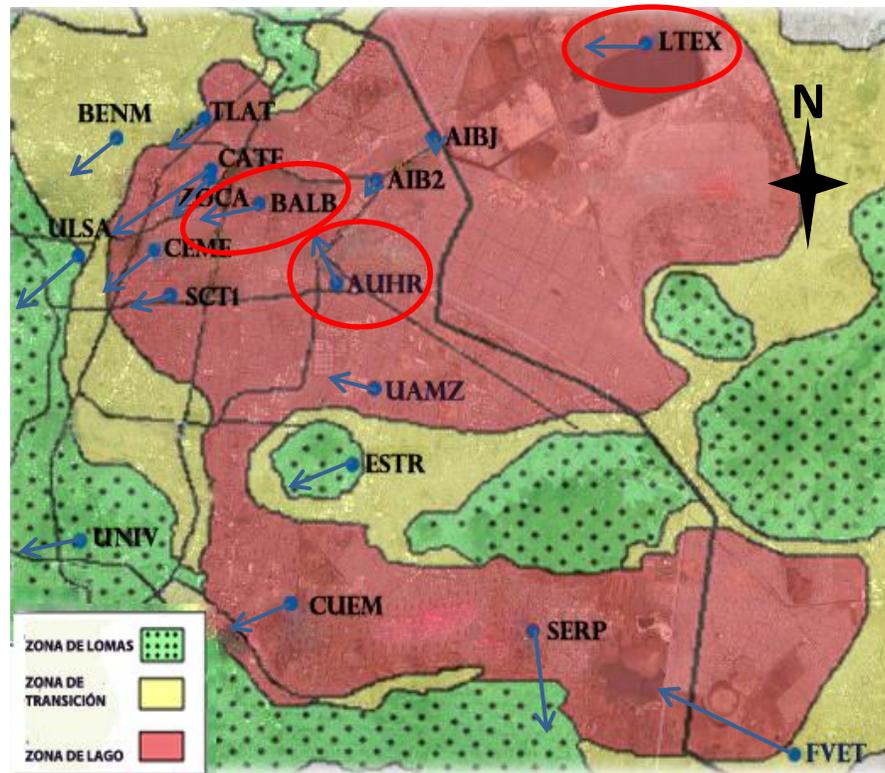


Fig. 7.10. Desplazamiento horizontal de las estaciones Balbuena (BALB), Autódromo Hermanos Rodríguez (AUHR) y Lago de Texcoco (LTEX).

En las estaciones Zócalo (ZOCA) (Fig. 7.11) ubicada en la Plaza de la Constitución en el Centro Histórico, a un costado de la calle 16 de septiembre, el desplazamiento horizontal es de 8.31 mm/año en dirección suroeste y Catedral Metropolitana de la Ciudad de México (CATE) se encuentra ubicada frente en el atrio de la Catedral, el desplazamiento horizontal es de 17.1 mm/año en dirección suroeste. Con respecto a la estratigrafía de la zona, en los primeros 5 metros de espesor se encuentra la costra superficial compuesta de materiales de rellenos, gravas, arena y tierra, después hasta los 10 metros hay una capa limo-arcillosa con materia orgánica, de 10 a 33 metros existe arcilla de alta plasticidad de compresibilidad media a alta con intercalaciones de estratos pequeños de limo-arenoso, de 33 a 37 metros se encuentra la capa dura (SMMS, 2008).

Las estaciones del Centro Histórico generaron datos con direcciones muy parecidas pero las magnitudes son muy diferentes a pesar de estar a tan solo unos metros de distancia. Esto puede deberse a que en la estación (CATE) se realizaron muy pocas mediciones, lo que sugiere que los resultados de la escasez de datos son poco confiables. En la estación



(ZOCA) el hundimiento registrado es de  $-115.39$  mm/año y en la estación (CATE) el hundimiento es de  $-105$  mm/año, esto es un claro ejemplo de hundimiento diferencial.

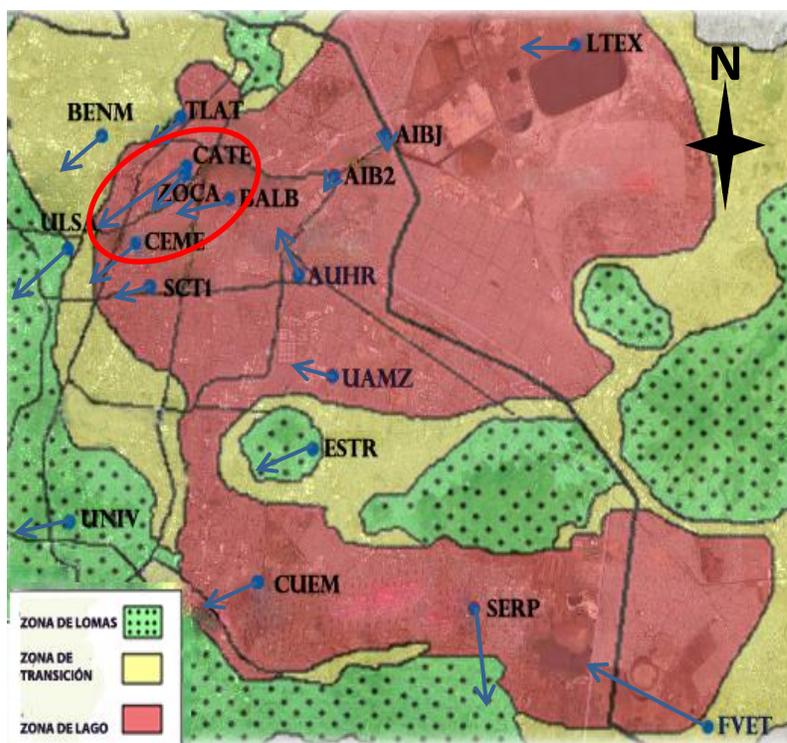


Fig. 7.11. Se muestran los vectores de desplazamiento (Flechas azules) de las estaciones ZOCA y CATE en la zona de Lago circuladas en color rojo.

Las estaciones Tlatelolco (TLAT) ubicada en la plaza de las tres culturas, Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT1), Centro Medico (CEME) en la Colonia Doctores y la UAM Iztapalapa (UAMZ), tienen un desplazamiento horizontal de  $7.66$  mm/año,  $6.12$  mm/año,  $11.26$  mm/año,  $8.29$  mm/año respectivamente; además, todas en dirección suroeste (Fig. 7.12). Estas estaciones tienen en común que se encuentran muy cerca de la zona de transición. Por lo tanto la estratigrafía de la zona consta de sedimentos arcillosos lacustres de alta compresibilidad intercalados con horizontes limo-arenosos y la capa dura se encuentra a unos  $22$  a  $30$  metros de profundidad.

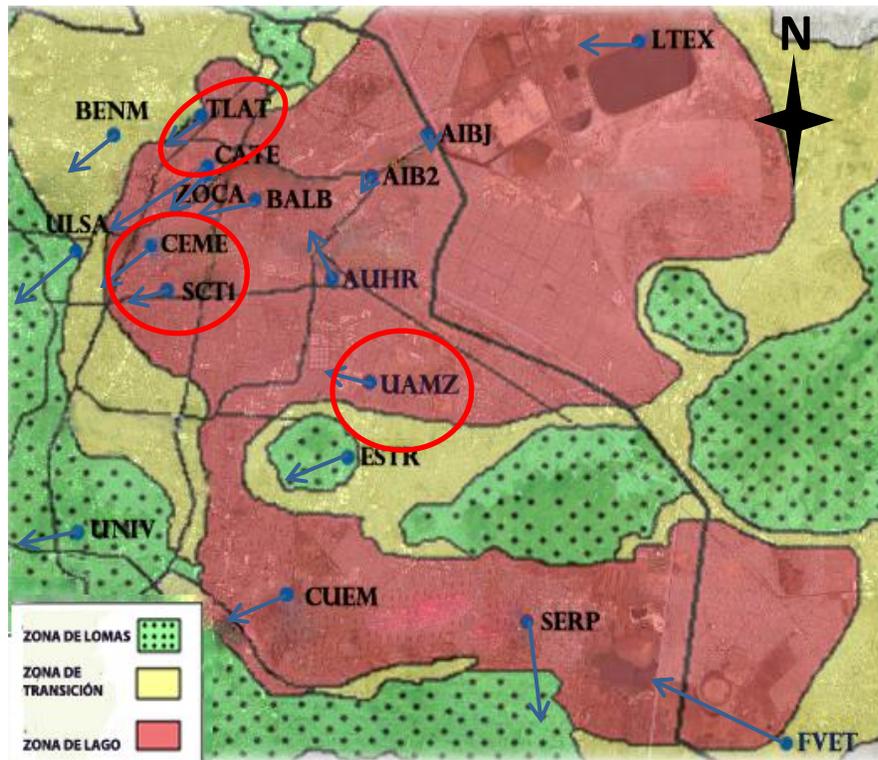


Fig. 7.12. Se muestran los vectores de desplazamiento (Flechas azules) de las estaciones TLAT, SCT1, CEME Y UAMZ circuladas en rojo.

El desplazamiento horizontal de esta zona es muy parecido a las demás zonas estudiadas. Los datos nos indican que el movimiento de esta área es hacia el suroeste y su velocidad varía entre 6 y 11 mm/año, lo que nos hace pensar que los datos obtenidos no están reflejando un comportamiento local, sino un comportamiento regional en el cual la Cuenca de México se desplaza lateralmente hacia el suroeste.

En la región del Lago de Xochimilco se encuentran las estaciones, Cuemanco (CUEM) ubicada en la delegación Xochimilco y Riachuelo Serpentino (SERP) en la delegación Tláhuac (Fig. 7.13).

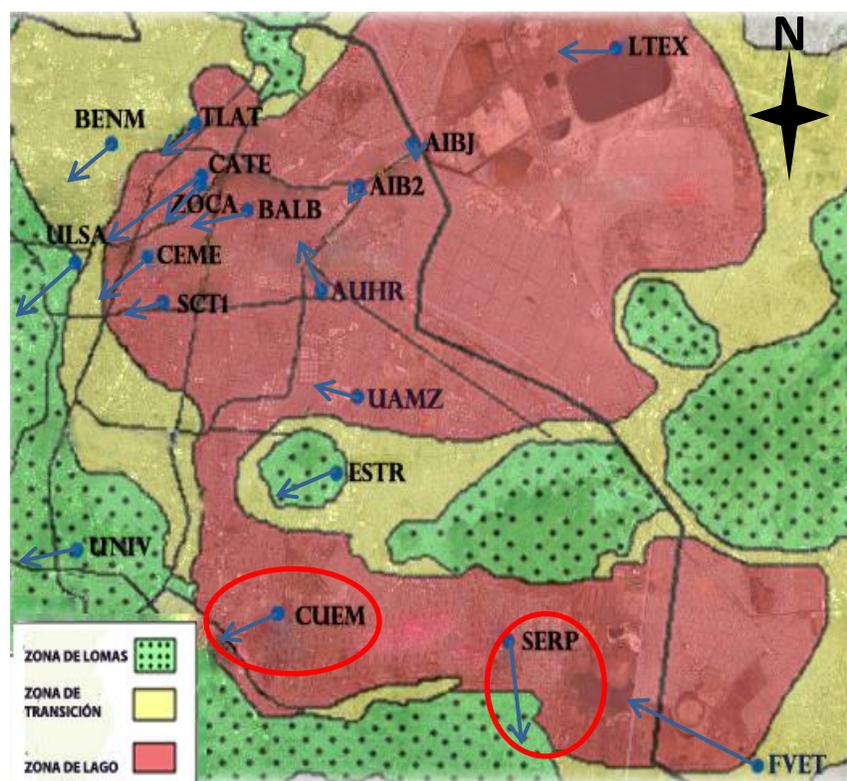


Fig. 7.13. Se muestran los vectores de desplazamiento (Flechas azules) de las estaciones CUEM y SERP circuladas en rojo.

En la estación Cuemanco (CUEM) el desplazamiento horizontal es de 10.44 mm/año en dirección suroeste. La estratigrafía de la zona está formada por 2 metros de arena-limosa, de 2 a 5 metros de limos con arena fina de consistencia dura; de los 5 a los 12 metros existen horizontes limo-arcillosos de compresibilidad media con intercalaciones de arena arcillosa (Carreón, 2006). En este punto el hundimiento es de 95.75 mm/año, lo que concuerda con la geología de la zona, ya que básicamente se compone de arcillas con algunas intercalaciones de capas de cenizas, diatomita y lapilli, por eso se esperaba que el desplazamiento horizontal sucediera en una dirección diferente, hacia el centro del lago de Xochimilco, sin embargo nos damos cuenta que es muy parecido al de las demás estaciones, hacia el suroeste a pesar de que se encuentra en diferente zona.

En la estación Riachuelo Serpentino (SERP) el desplazamiento horizontal es de 15.76 mm/año en dirección hacia el sur, la secuencia estratigráfica de la zona está formada por 15



---

metros de arcillas con poca arena, de los 15 a 17 metros una capa de arena-limosa no muy compacta y poco consolidada, de 17 a 38 metros se encuentra una capa limo-arenoso, de 38 a 55 metros una capa de arcilla-limosa (Carreón, 2006) En este punto existe una velocidad de hundimiento muy grande de 154.52 mm/año, lo que coincide con la geología de la zona, ya que prácticamente se encuentra entre el la región del lago de Xochimilco y la Cuenca de Chalco; sin embargo, el desplazamiento horizontal es muy diferente al de los demás puntos, porque en este la dirección es hacia el sur y la magnitud es muy grande, lo que nos indica que existen otros factores que están afectando el comportamiento tectónico de la zona.

Los principales factores que pueden afectar a la estación Riachuelo Serpentino (SERP) son por ejemplo las construcciones civiles cercanas al punto, además de que existe un gran número de pozos de extracción de agua muy cercanos al lugar y las fallas existentes en la zona.

### **7.3 Análisis de la Relación Tectónica Regional con las Mediciones de Desplazamiento Horizontal con GPS**

La importancia de las mediciones de desplazamiento horizontal realizadas en la CM radica principalmente en poder encontrar una relación entre los desplazamientos observados con GPS y las características estructurales de la geología de la Cuenca.

El estudio de las principales características de la estructura geológica de la CM ha sido de vital importancia y es por ello que diversos autores han contribuido en realizar distintos estudios, algunos relacionados con las zonas sísmicas en la Cuenca.

El trabajo realizado por de Cserna y colaboradores (1988) describe un sistema de fallas en dirección NE-SW (Fig. 7.14), sin embargo, sabemos que no es el único. En la figura se puede observar la presencia de una zona de cizallamiento en donde el bosquejo de las fallas y fracturas que se observan como líneas tienen una orientación predominantemente NE-SW que indican un desplazamiento lateral y otras con una orientación totalmente distinta que corresponde a un mecanismo de tensión.



Fig. 7.14. Mapa que muestra los lineamientos principales en la Cuenca de México (Modificada de de Cserna y colaboradores, 1988).

De acuerdo con Chavacán, (2007), existen tres sistemas de falla, uno correspondiente a lo descrito anteriormente por de Cserna y colaboradores, (1988) en dirección al NE-SW, otro al SE-NW y en dirección E-W (Fig. 7.15).

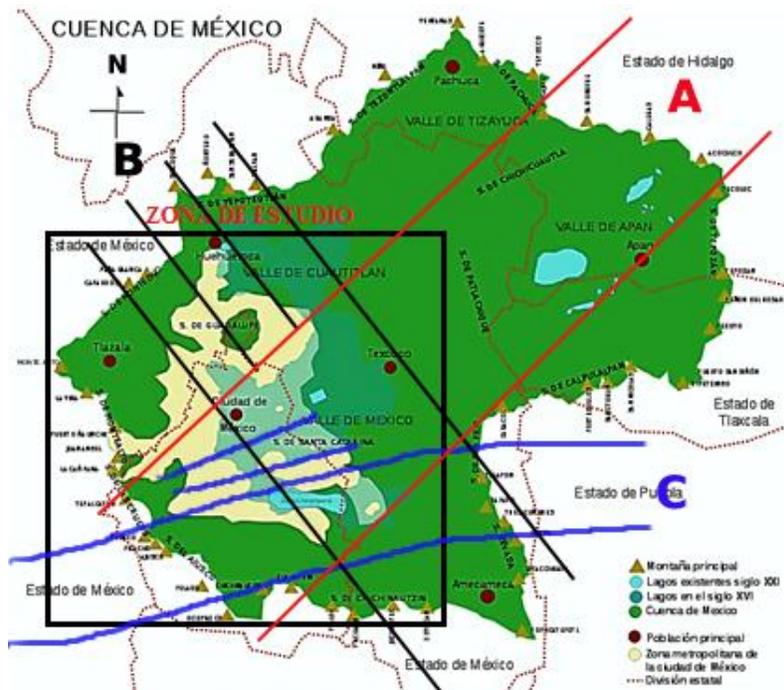


Fig. 7.15. Direcciones de los principales sistemas de fallas en la CM. A: esencialmente en dirección al NE-SW; B: en dirección al SE-NW y C: en dirección al E-W (Modificada de Chavacán, 2007).



Además dicho autor a partir de mecanismos focales obtiene un mapa (Fig. 7.16) en el que describe estos mecanismos y las fallas asociadas dentro de la CM y que podrían estar relacionadas con los vectores de desplazamiento obtenidos con GPS.

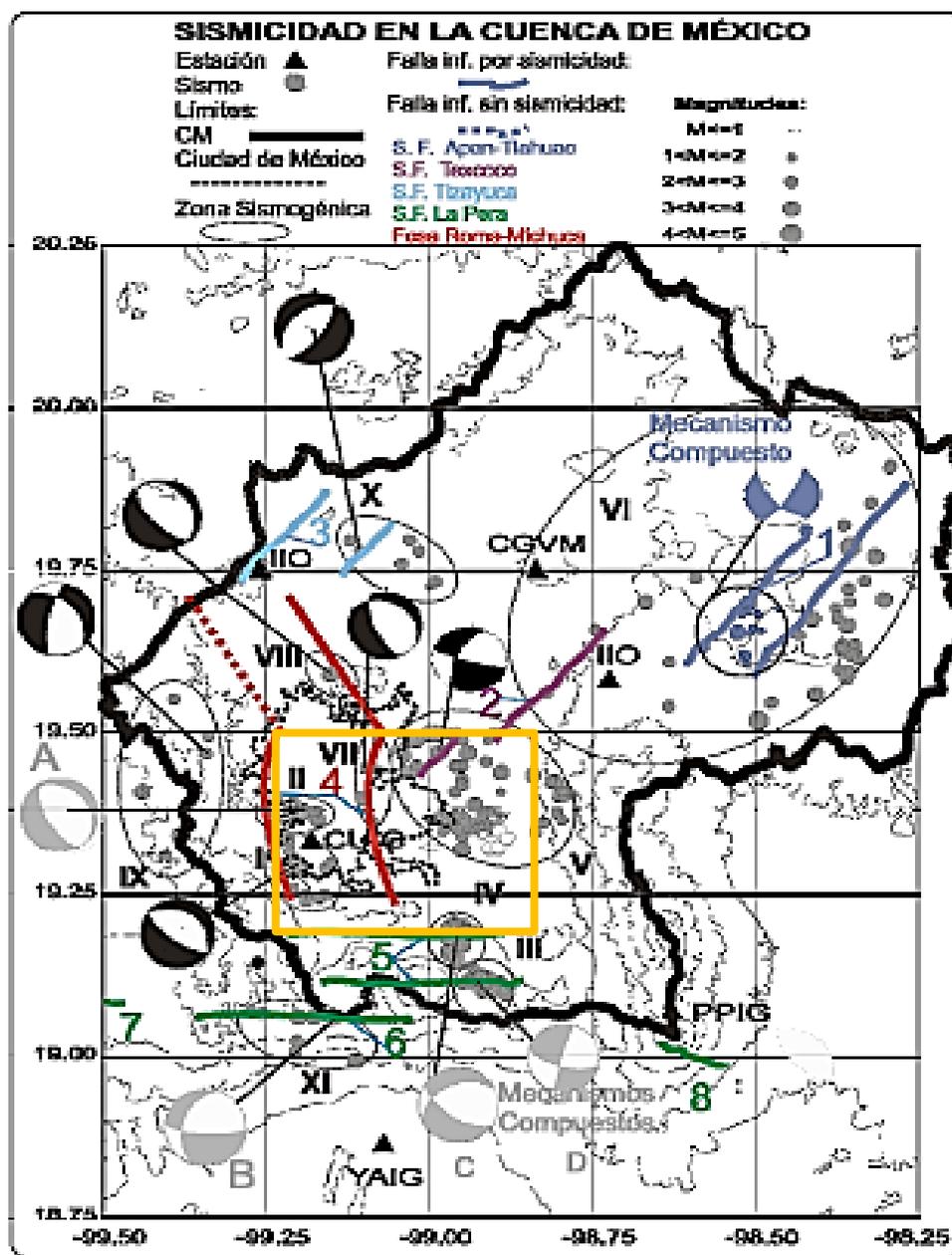


Fig. 7.16. Mecanismos focales y fallas asociadas (líneas en color rojo, verde y azul) en la CM y área en la que se localizan las estaciones GPS (recuadro amarillo) (Modificada de Chavacán, 2007).



La sismicidad en la CM está regida principalmente por los tres sistemas mencionados con anterioridad. En este trabajo se trata de en dar una probable explicación a los desplazamientos horizontales obtenidos con GPS y que de acuerdo con las fallas localizadas e inferidas podrían estar representando el movimiento de bloques que se desplazan hacia distintas direcciones.

Debido a que las estaciones GPS no cubren la totalidad de área de la CM, solo se propone una posible explicación a la gran diferencia que existe entre los vectores de estaciones que están relativamente cercanas (Fig. 7.17).

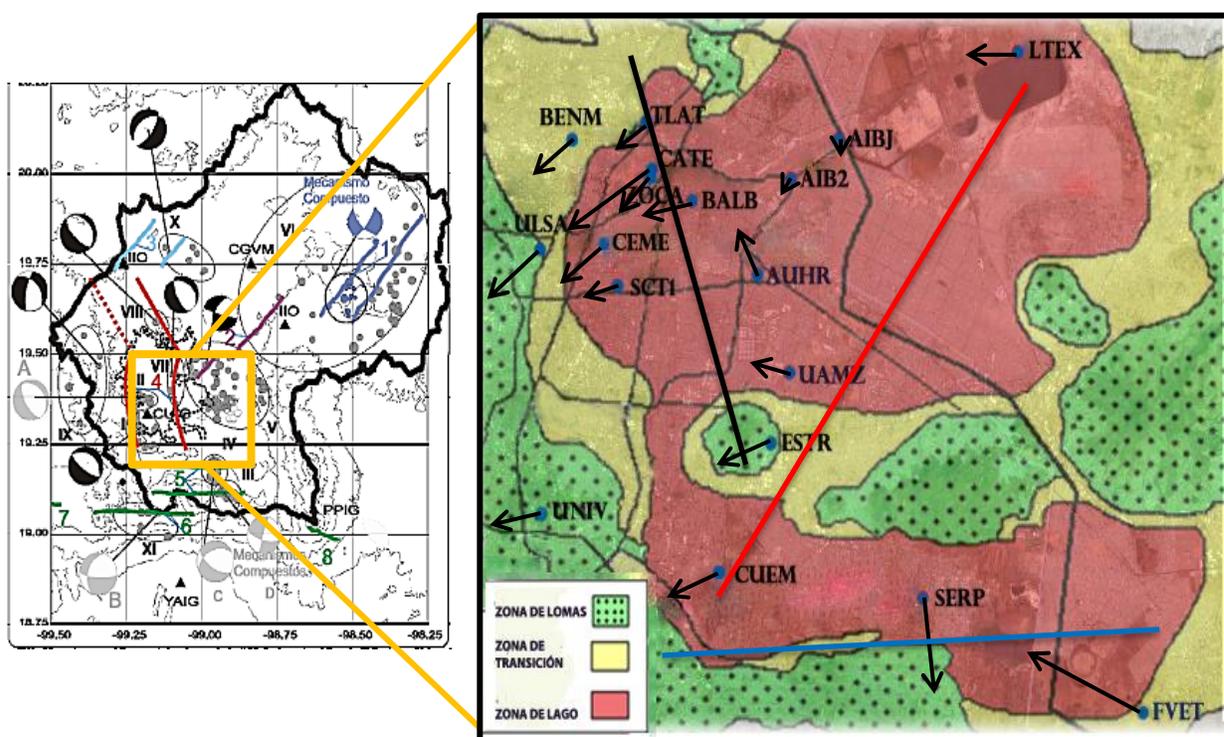


Fig. 7.17. Mecanismos focales y los principales sistemas de sistemas de fallas A, B Y C (Líneas roja, negra y azul respectivamente) que influyen en los resultados de las estaciones GPS (Modificada de Chavacán, 2007).

Los vectores que llaman la atención a simple vista son los de las estaciones FVET y SERP debido a que a pesar de estar tan cercanas una de la otra, son completamente diferentes, al comparar con el mapa de obtenido por Chavacán, (2007) y tratar de encontrar una relación entre las fallas que él infiere, podemos proponer la existencia de una falla probablemente activa que atraviesa entre estas dos estaciones, como ilustra la línea en color azul, y que corresponde también con fallas inferidas por otros autores. Lo mismo puede estar



---

ocurriendo con las otras estaciones, por ejemplo el sistema de fallas A (línea roja) podría estar influyendo en los resultados que se obtuvieron con las estaciones CUEM, ESTR, UAMZ Y UNIV, mismas que describen un comportamiento muy parecido y que están relativamente cerca.

El sistema B (Línea negra) de la figura 7.17 puede describir una falla en la que el movimiento de dos bloques, uno con dirección preferentemente al suroeste y correspondiente con la gran mayoría de las estaciones que se encuentran al NW de la CM, y otro bloque que se podría decir que tiene cierta rotación al norte y que es que describe el vector obtenido con las mediciones de la estación AUHR. Cabe hacer notar que en este caso, no se puede asegurar con certeza, pues como ya se ha mencionado con anterioridad, algunas estaciones tienen mayor incertidumbre, y este es el caso de AUHR. Este es un sitio donde se recomienda realizar más mediciones para poder verificar su comportamiento.

Información cartografiada con anterioridad ha permitido identificar varias estructuras aledañas a la CM que influyen directamente en su comportamiento debido al proceso de subducción a lo largo de la costa meridional de México y los eventos de sismicidad que en ella influyen. La CM está sometida a una acumulación de esfuerzos a lo largo de la zona de cizallamiento y que es mayor en la región frontal de la subducción. Dichos rasgos se pueden observar en la figura 7.18, que indican las direcciones de estos esfuerzos.

La energía de los esfuerzos acumulados a lo largo de la zona de cizallamiento se liberan en forma de sismos locales y someros que han permitido identificar varias de las trazas de fallas que están cartografiadas en el mapa, algunas otras han sido identificadas a partir de anomalías obtenidas por métodos gravimétricos y otras por medio de datos geológicos anteriormente publicados (Huesca Pérez, 2008).

Las fallas originadas por un desplazamiento lateral han sido inferidas a partir de datos estratigráficos y estructurales, se extienden desde la vertiente oriental de la Sierra de las Cruces hasta la región costera de Guerrero (de Cserna y colaboradores, 1988) y revelan que se dirigen hacia la zona urbana. Los rasgos volcánicos de la CM han sido resultado de fracturas de extensión que se orientan generalmente al NE-SW ya que el cizallamiento, provocó el ascenso de material magmático.



Haciendo un análisis de los resultados obtenidos con las mediciones de GPS se realizó la siguiente figura que muestra los mecanismos de desplazamiento de los vectores, las principales fallas y fracturas cartografiadas e inferidas por de Cserna y colaboradores (1988), como resultado de la deformación de la Placa de Norteamérica que está cabalgando sobre la Placa de Cocos tal y como se describe en la sección 6.3.

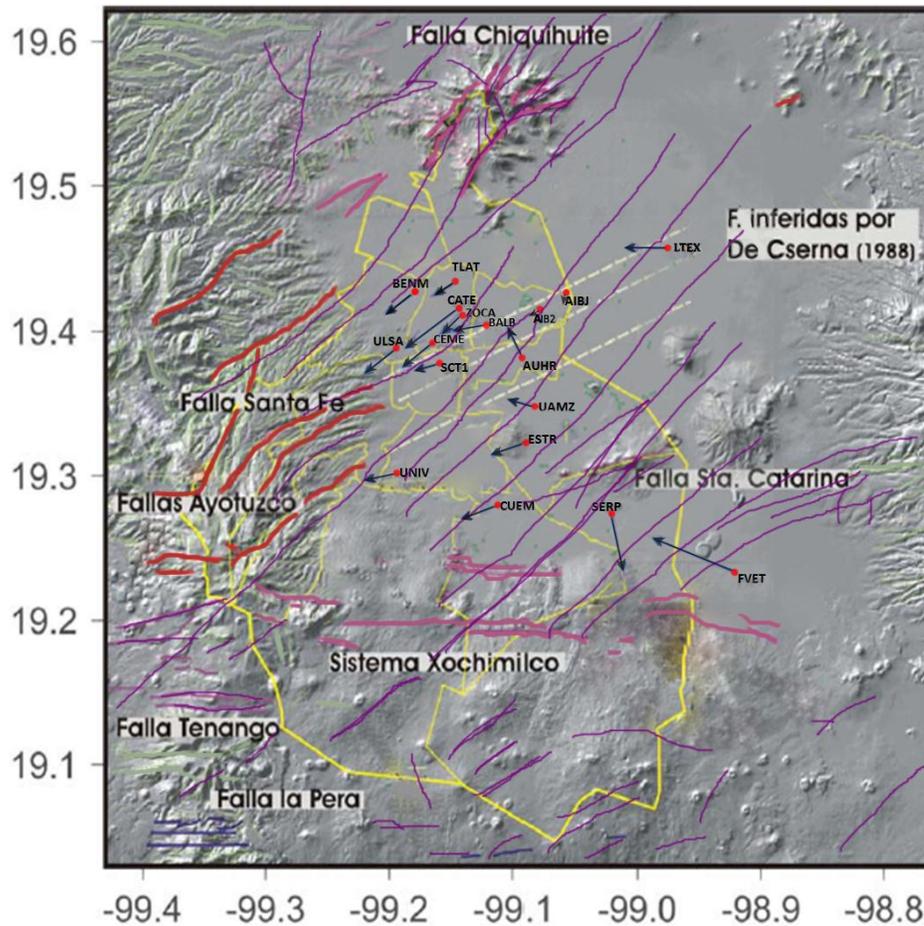


Fig. 7.18. Mapa que muestra la relación entre desplazamientos horizontales medidos con las estaciones GPS, fallas inferidas por de Cserna y colaboradores (1988) (líneas moradas), y por otros autores (Modificada de Huesca Pérez, 2008).



---

## VIII. CONCLUSIONES

- De acuerdo con la teoría antes descrita en donde se menciona que los desplazamientos horizontales se dirigen hacia la zona de mayor hundimiento, se observó en las mediciones obtenidas que la mayor parte de los vectores de desplazamiento horizontal no cumplen con dicha teoría, por lo tanto, podemos decir que dicha deformación no está asociada al fenómeno del hundimiento, por lo tanto se puede pensar que las estaciones están registrando una deformación más regional que afecta a toda la Cuenca de México y que proviene del movimiento de las placas tectónicas, específicamente de la fricción ocasionada por el choque de la Placa de Norteamérica con la Placa de Cocos y la Placa de Rivera.
- El hundimiento la CM ha sido generalmente asociado al abatimiento de los acuíferos; sin embargo, con estudios realizados posteriormente se ha encontrado que estos desplazamientos no necesariamente están relacionados exclusivamente con dicho fenómeno, ya que existen otros factores que podrían estar influyendo en las mediciones tales como la presencia de fallas activas cercanas a una estación, y las características geológicas del área donde se estén tomando las mediciones.
- Debido a la complejidad de la geología de la CM y a la todavía escasa información que tenemos, los resultados obtenidos no son definitivos para afirmar o negar la relación que puedan tener con el desarrollo de fracturas y de fallamiento. Aunado a esto, al hacer un análisis de la calidad de los datos para cuantificar su confiabilidad, encontramos que hay al menos un par de estaciones donde el error es considerable, por lo que será necesario volver a medir en esos sitios y proponer nuevos puntos de medición para poder corroborar el movimiento de bloques en distintas direcciones.
- Las estaciones GPS revelan que los desplazamientos horizontales, en su mayoría, se dirigen hacia el suroeste y que pueden estar asociados con el sistema de fallas de cizalla inferido por de Cserna y colaboradores, (1988); sin embargo, otras estaciones se comportan de manera distinta.



- 
- El desplazamiento irregular de los vectores sugiere que pueden estar influyendo otros 2 sistemas de fallas que se orientan principalmente al este y al suroeste, cartografiadas en el mapa obtenido a partir de mecanismos focales por Chavacán, (2007), y que ambas son originadas principalmente por una acumulación de esfuerzos generados por la subducción de la Placa de Cocos contra la Placa de Norteamérica.
  - Los desplazamientos horizontales de las estaciones GPS generalmente se dirigen al SW y se desplazan en promedio 10 mm anualmente; sin embargo, unas se mueven con tendencia más hacia el E-W, de tal manera que podemos dividir al menos en cuatro grupos, dos donde los vectores son más o menos homogéneos y otras dos que son irregulares.



---

## REFERENCIAS

- Aguilar Pérez L. Antonio, Ortega Guerrero M. Adrián, Lugo Hubp José, Ortiz Zamora Dalia del C. Análisis Numérico Acoplado de los Desplazamientos Verticales y Generación de Fracturas por Extracción de Agua Subterránea en las Proximidades de la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 23, Número 3, 2006. UNAM. México, Querétaro. pp. 247-261.
- Caballero Miranda M. and B. Ortega Guerrero, 1998. *Lake Levels since about 40,000 years ago at Lake Chalco, near Mexico City*. *Quater. Res.*, 50, pp. 69-79.
- Carreón Freyre Dora C., Hidalgo Moreno Claudia M., Hernández Marín Martín. Mecanismos de Desarrollo de Fracturas de Depósitos Arcillosos en Zonas Urbanas. Caso de Deformación Diferencial en Chalco, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Número Especial de Geología Urbana. Tomo LVIII, núm. 2, 2006, pp. 237-250.
- Carrillo, N., 1947, *Influence of Artesian Wells in the Sinking of Mexico City*, en Volumen Nabor Carrillo; El hundimiento de la Ciudad de México y Proyecto Texcoco: México, D.F, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica, Anuario 1969, 47, 7–14.
- Centro de Monitoreo de Fracturamiento del Subsuelo (CMFS), Delegación Iztapalapa.
- Chavacán A., Marcos R. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias: Catálogo de Sismicidad Local para la Cuenca de México, 2007. Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM.
- De Cserna, Zoltan, de la Fuente–Duch, M, Palacios–Nieto, M., Triay, L., Mitre–Salazar, L.M., Mota–Palomino, R., 1987, Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, 104, 71 p.
- Díaz Rodríguez Jorge Abraham. Los Suelos Lacustres de la Ciudad de México, 2006. *Revista Internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*. vol. 6(2) 113.



- 
- Evaluación y Control de Riesgos Geotécnicos en la Zona Metropolitana del Valle de México. Estudio para la Secretaria de Obras del Gobierno del Distrito Federal, 2007. Instituto de Ingeniería. UNAM
  - Feth, J. H., *Structural reconnaissance of the Red Rock quadrangle, Arizona, open file report, U.S. Geological Survey.*, Tucson, Ariz., 1951. 32p.
  - Franco Sánchez Sara Ivonne. Tesis de Doctorado: Redes GPS y su Aplicación en la Sismotectónica, 2009. Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM. pp. 1-34.
  - Gregorius T. 1996. GIPSY-OASYS II, How it Works. Department of Geomatics. University Newcastle upon Tyne. October 1996. pp. 1-8.
  - Holzer, T. L. and Davis, S. N., 1976. *Earth fissures associated with watertable declines (abs.). Geological Society of America.* 8(6): 923-924.
  - Huesca Pérez Eduardo. Tesis de Maestría: Sismicidad y el Campo de Esfuerzos en la Cuenca de México, 2008. Instituto de Geofísica. UNAM. pp. 11, 86-101.
  - Jaramillo Rivera, Aristóteles Homero. Tesis de Licenciatura: El sistema de posicionamiento global GPS, como herramienta para cuantificar los hundimientos en la Cuenca de México, 2002. Facultad de Ingeniería, UNAM. 108 p.
  - Larson, M. K., 1983, *Fissure Prediction: Geologic Models and Applications, in Second Arizona Symposium on Subsidence, Phoenix, 1983. (Land Subsidence: Designs and Solutions, Arizona Consulting Engineers Association: Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Special Paper).*
  - Lofgren, B. E., 1972: *Structural reconnaissance of the basing deposits to regional stress changes; Geol. Soc. America.* V.5 N°7, pp. 715-716.
  - López Hurtado Luis Fernando. Tesis de Licenciatura: Recimentación de la Catedral Metropolitana, 2004. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. IPN. pp. 1-17.
  - Marsal J., Raúl J. y Sainz Ortiz Ignacio. Breve Descripción del Hundimiento en la Ciudad de México, 1956. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 19, No. 2, 1956. 26 p.
  - Marsal J. Raúl y Mazari Marcos, 1959. El subsuelo de la Ciudad de México: México, D.F., Facultad de Ingeniería, UNAM, vol. I y II, 505p.



- 
- Méndez S. Edgar, Auvinet Gabriel G., Lermo S. Javier. Avances en la Caracterización Geotécnica del Agrietamiento del Subsuelo de la Cuenca de México. XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, Ags. “Los nuevos retos de la Ingeniería Geotécnica en el Siglo XXI” vol. 2 SMMS, 2008.
  - Méndez S. Edgar, Juárez C. Moisés, Pérez C. Diego, Auvinet G. Gabriel. Evolución del Hundimiento Regional en la Cuenca de México. XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, Ags. “Los nuevos retos de la Ingeniería Geotécnica en el Siglo XXI” vol. 2 SMMS, 2008.
  - Molina Berbeyer Rafael. Hundimiento de la Ciudad de México y su Relación con los Estudios de Mecánica de Suelos, Geoquímicos, Geofísicos y Geológicos de las Aguas del Subsuelo de la Cuenca del Valle de México, 1957. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 20, No. 2. 1957.
  - Mooser, F. 1975. Historia geológica de la Cuenca de México. En “Memorias de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal”. DDF. Tomo I: 7-38.
  - Orozco, J. M. y Figueroa V., G., 1991. Descripción Cronológica del Desarrollo de los Conocimientos sobre el Agrietamiento de Terrenos. Agrietamiento de suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1-12.
  - Pacheco Martínez Jesús. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra. Modelo de Subsistencia de la Cuencade Querétaro y Predicción de Agrietamientos Superficiales, 2007. Centro de Geociencias, UNAM campus Juriquilla, Querétaro. pp. 7-41.
  - Santoyo Villa Enrique, Ovando Shelley Efraín, Federico Mooser y León Plata Elvira. Síntesis geotectónica de la Cuenca de México, 2005. TGC Geotecnia, México. D.F., 2005. 171 p.
  - SMMS. (1991). Agrietamiento de Suelos. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
  - Technology& more, 30 Años de GPS. Número 2008-2
  - Thierry Gregorius. GYPSI-OASIS II. How it Works...Department of Geomatics. University of Newcastle upon Tyne. 1996. pp. 1-12



- 
- Van Sickle, J. 1996. GPS for Land Surveyors: Chelsea, Michigan, Ann Arbor Press, 209 p.
  - Wells D., Lindlohr W., Schaffrin B. & Grafarend E., 1987: GPS design: undifferenced carrier beat phase observations and the fundamental differencing theorem, UNB Tech. Report No.116, Fredericton, Canada.

## **REFERENCIAS DE INTERNET**

- Chris Rizos, “Stop and go” GPS Surveying Techniques 1999.  
[http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps\\_survey/chap5/554.htm](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/chap5/554.htm)
- Comisión Nacional del Agua  
<http://www.cna.gob.mx>
- Corvallis Microtechnology, Inc. 1996. Introduction to the Global Positioning System for GIS and TRAVERSE.  
<http://www.cmtinc.com/gpsbook>
- **GOOGLE EARTH**
- Julio Cesar Murúa, Servicio Técnico de Instrumental Topográfico y Geodésico.  
<http://www.jcminstrumental.netfirms.com/index.html>
- López Doval Agustín, Introducción al GPS, 2000  
[http://www.al-top.com/al\\_top/Gps-art.htm#intro](http://www.al-top.com/al_top/Gps-art.htm#intro)
- [http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/informeclimatologico/05capitulo1\\_2005.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/informeclimatologico/05capitulo1_2005.pdf)
- [http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/region\\_sismica\\_mx.jsp](http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/region_sismica_mx.jsp)
- [www.iztapalapa.df.gob.mx/cmfs/0402080708\\_2008.html](http://www.iztapalapa.df.gob.mx/cmfs/0402080708_2008.html)