



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**INTRODUCCIÓN A LA DETERMINACIÓN DE LA TASA DE
SUBSIDENCIA Y DEFORMACIÓN HORIZONTAL EN LA ZONA
ORIENTE DEL DISTRITO FEDERAL HACIENDO USO DEL SISTEMA
DE POSICIONAMIENTO GLOBAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOMÁTICO

P R E S E N T A:

BRENDA IVETH MORENO HURTADO



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. OSVALDO SÁNCHEZ ZAMORA**

MÉXICO D.F.

MAYO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/172/14

Señorita
BRENDA IVETH MORENO HURTADO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. OSVALDO SÁNCHEZ ZAMORA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO GEOMÁTICO

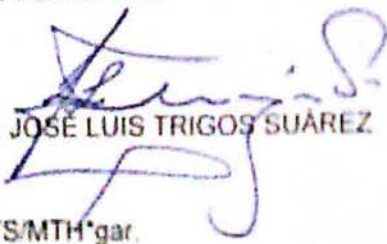
"INTRODUCCIÓN A LA DETERMINACIÓN DE LA TASA DE SUBSIDENCIA Y DEFORMACIÓN HORIZONTAL EN LA ZONA ORIENTE DEL DISTRITO FEDERAL HACIENDO USO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. LA PROBLEMÁTICA DE DEFORMACIÓN DEL TERRENO EN EL ORIENTE DEL DISTRITO FEDERAL
- III. TEORÍA DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL
- IV. IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS GEODÉSICO-ESPACIALES PARA MONITOREO DE DESPLAZAMIENTO
- V. PROCESADO DE DATOS GPS EN GEODINÁMICA
- VI. CONSIDERACIONES PARA GEODINÁMICA DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL
- VII. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 3 de diciembre del 2014.
EL PRESIDENTE


M. I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ
JLTS/MTH*gar.

El estado presente de la naturaleza, es evidentemente la consecuencia del estado que tuvo en el momento anterior, y si concebimos una inteligencia que, en un momento dado, conociera todas las relaciones entre las entidades del Universo, ésta podría determinar las posiciones respectivas, movimientos y efectos generales de todos esos elementos, en cualquier instante del pasado o del futuro.

(Pierre Simon Laplace)

Agradecimientos

Agradezco a todos los que han sido participes en mi formación académica, por el apoyo y dedicación que me brindaron a lo largo de estos años.

A mis padres y mi familia, a mis profesores y muy especialmente a la institución que me dio la oportunidad de formarme, la Facultad de Ingeniería.

Gracias por todo.

Introducción

Prólogo

Como parte de las líneas de investigación del Instituto de Geofísica UNAM en el Departamento de Sismología se investigan y resuelven problemáticas relacionadas con el movimiento del terreno. El programa al que me incorporé al realizar mi servicio social en esa dependencia tiene como finalidad la determinación y estudio constante de la subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal. Este es un problema con implicaciones sociales importantes ya que además de que este lugar tiene altas tasas de subsidencia es una zona densamente poblada.

Para implementar el monitoreo de subsidencia y deformación horizontal es necesario poseer conocimientos en el área de Geodesia para posteriormente aplicar dichos conocimientos y seguir una serie de pasos y procesos que se describen en el presente documento.

Primeramente como planteamiento es necesario describir el contexto geológico e hidrológico de la zona de estudio, en este caso el oriente del Distrito Federal, para fundamentar e identificar los fenómenos de subsidencia y deformación horizontal y establecer un método de monitoreo. Las modernas técnicas de medición con GPS son óptimas para dar solución a este tipo de problemáticas. En el capítulo 1 de este documento se explica con detalle lo planteado anteriormente.

Una vez que ha quedado establecido que el Sistema de Posicionamiento Global, GPS, será la herramienta para monitorear los procesos geodinámicos ocurridos en el oriente del Distrito Federal se debe hablar de su teoría, su historia, funcionamiento, estructura, etc., para entender qué es lo que se medirá y cómo se harán estas mediciones. La teoría del Sistema de Posicionamiento Global se desglosa en el segundo capítulo de esta tesis.

Pasando a la parte del desarrollo se debe describir la implementación de los métodos así como hacer la descripción de los insumos necesarios para el monitoreo. En el capítulo 3 se describe como realizar la instrumentación de una estación de observación y como elegir el lugar para establecer dicha estación, además de como hacer una elección adecuada de software para procesamiento de información.

Otra parte fundamental en el desarrollo es el procesamiento y tratamiento de la información obtenida para ser interpretada posteriormente. La información obtenida por métodos geodésico-espaciales debe ser sometida a un postproceso y para que esta información sea de utilidad en el monitoreo de fenómenos geodinámicos se describen ciertos pasos en el capítulo 4.

Existen conceptos que son indispensables para utilizar el GPS en Geodinámica, estas consideraciones están planteadas en el capítulo 5 y básicamente comparan el uso del GPS para aplicaciones geodésicas y aplicaciones geodinámicas.

El fin al que conlleva el desarrollo, y todas las observaciones y especificaciones expuestas, muestra resultados y en el capítulo 6 se explica que debe haber una continuidad en el proyecto para que los métodos de geodesia espacial implementados sigan contribuyendo a la solución del problema inicial.

Todo trabajo debe terminar en un análisis de lo que se hizo y cómo es que se cumplieron las metas establecidas en un principio. El capítulo 7 se discuten los argumentos necesarios para concluir con base a los objetivos y se reafirma que con los conocimientos y aplicaciones de Geodesia y del Sistema de Posicionamiento Global se monitorean los fenómenos geodinámicos ocurridos en el oriente del Distrito Federal.

Objetivo General

- Aplicar conocimientos y conceptos de Geodesia Espacial para implementar métodos de monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal y procesar información GPS de este lugar para describir los fenómenos geodinámicos.

Objetivos Particulares

- Lograr un interés en problemáticas geológicas y sociales con base en un proyecto científico.
- Evaluar el rendimiento y alcance del software utilizado y determinar si es adecuado para procesamiento de datos GPS de alta precisión.
- Poner en pleno funcionamiento los elementos software y equipo para el futuro y constante monitoreo del desplazamiento del terreno.
- Evaluar la ubicación estratégica de una Red Geodésica para apoyo geodinámico.
- Aplicar conocimientos de Geodesia al área de Geodinámica.
- Entender el modelo físico del funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global, su estructura, su instrumentación, sus métodos para proponer aplicaciones.
- Tener un amplio conocimiento de la Geodesia Espacial para emplear de la mejor manera el software y realizar con eficacia los procesos necesarios para obtener resultados.
- Informarse sobre otros proyectos similares para comparación y enriquecimiento.

ÍNDICE

Capítulos

1. La problemática de deformación del terreno en el oriente del Distrito Federal	1
1.1 Contexto geológico e hidrológico del oriente del Distrito Federal.....	1
1.2 Identificación del problema de subsidencia en el oriente del Distrito Federal.....	7
1.3 Monitoreo y seguimiento de la subsidencia y desplazamiento horizontal del terreno con técnicas GPS.....	11
2. Teoría del Sistema de Posicionamiento Global	15
2.1 Concepto de Sistema de Posicionamiento Global, segmentación, estructura y funcionamiento (modelo vectorial).....	15
2.2 Geodesia espacial y mecánica celeste.....	24
2.3 Observables, señales y códigos.....	25
2.4 Calculo por medida de fase y pseudorange.....	27
2.5 Los archivos RINEX.....	34
2.6 Correcciones ionosférica y troposférica.....	36
2.7 Efemérides, parámetros de rotación y carga oceánica.....	38
2.8 Instrumentación (mascara de elevación y multipath).....	42
2.9 Simples, dobles y triples diferencias. Solución de la ambigüedad.....	42
2.10 Métodos de posicionamiento, el método Estático aplicado a monitoreo de subsidencia.....	47
2.11 Aplicaciones del método Estático y ejemplos de proyectos.....	49
3. Implementación de métodos geodésico-espaciales para monitoreo de desplazamiento	50
3.1 Instrumentación adecuada en el lugar.....	50
3.2 Ubicaciones estratégicas geológica, meteorológica y socialmente adecuadas.....	51
3.3 Elección del software para procesar datos.....	55
3.4 GAMIT.....	57
3.5 Mantenimiento de las estaciones de monitoreo.....	61
4. Procesado de datos GPS en geodinámica	62
4.1 Selección del método adecuado (Estático).....	62
4.2 Tipos de procesado: interno y ligado.....	65
4.3 Orientación y escalamiento de la Red.....	67
4.4 Análisis de los ficheros necesarios para el proceso.....	68

5. Consideraciones para Geodinámica del Sistema de Posicionamiento Global	74
5.1 Información geodinámica y errores geodésicos.	74
5.2 Redes geodésicas con aplicaciones geodinámicas.	75
6. Continuidad del proyecto	82
6.1 Toma de datos en un lapso considerable para la obtención de series de tiempo.	82
7. Conclusiones	108

Apéndice

A. Manejo del sistema operativo Linux	110
A.1 Uso de este tipo de sistemas para trabajar y resolver problemas científicos.	110
A.2 Estructura y funcionamiento del sistema.	112
A.3 Comandos básicos.	113

Glosario	117
-----------------------	------------

Descripción de tablas y figuras	122
--	------------

Referencias	125
--------------------------	------------

Capítulo 1. La problemática de deformación del terreno en el oriente del Distrito Federal

1.1 *Contexto geológico e hidrológico del oriente del Distrito Federal.*

El conocimiento del marco geológico e hidrológico de la Cuenca de México establece las bases, a través de un conjunto de herramientas, para comprender la naturaleza, distribución y funcionamiento de los acuíferos que se encuentran en esta región. También nos permite comprender la razón del proceso de deformación que se presenta en esta zona. Al conocer la geología e hidrología se pretende lograr un aprovechamiento racional del agua subterránea así como prevenir contaminación antropogénica o natural de dichos acuíferos, entre otras cosas, y por lo tanto entender que si las medidas establecidas para evitar la sobre explotación de acuíferos no se cumplen, esto combinado con los movimientos asociados a fallas y fracturas que constantemente ocurren, se presentará un serio problema debido al hundimiento y a la deformación horizontal en el terreno. Consecuentemente existirá una serie de problemáticas sociales, de infraestructura y ambientales, principalmente, causadas por altas tasas de subsidencia. Este fenómeno comenzó hace algunos años en la zona oriente del Distrito Federal, que es la porción sureste de la Cuenca de México, y en el presente continúa, además actualmente representa un inquietante tema de investigación.

La Cuenca de México es una región fisiográfica con variadas características. Está situada en el centro de la Faja Volcánica Transversal que es una extensa franja E-W que atraviesa el centro de México, tiene una longitud de 950 km y una anchura de 110 km. El cinturón o faja es resultado de una actividad volcánica de tipo andesítico-basáltica del Terciario con derrames esporádicos de rocas riolíticas durante el Terciario Medio y andesitas-basálticas del Plioceno Tardío-Holoceno. La mayor parte de la actividad volcánica está alineada sobre fallas regionales con una orientación E-W, a la que se incorporan otros sistemas de fallas principales como el NW-SE en la parte oeste y el NE-SW en la parte este. Diversos episodios tectónicos produjeron una serie de fosas y pilares que son característicos en esta región y que han formado una sucesión de cuencas, a lo largo de la faja, cuyo relleno presenta una secuencia variable de sedimentos que alcanza un espesor superior a 500 m. [2].

Al encontrarse dentro de la Faja Volcánica Transversal, la Cuenca de México ha estado sometida a grandes esfuerzos tectónicos así como erupciones volcánicas desde principios del Terciario hasta épocas recientes.

La Cuenca de México es naturalmente endorreica, tiene una superficie aproximada de 9,600 km² y se encuentra delimitada por los siguientes relieves: Sierras de Pachuca y de

Tepozotlán al norte, Sierras de Calpulalpan, Río Frío y Nevada al oriente, Sierra de Chichinautzin al sur y Sierras de Las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo y Tolcayuca al poniente. Dentro de este límite existen elevaciones con diferente altitud que forman valles fluviales, sin embargo, todos los avenamientos convergen hacia la planicie lacustre de la cuenca. [2].

Aspectos Geológicos de la porción sureste de la Cuenca de México

La porción sureste de la cuenca, o bien el oriente del Distrito Federal, corresponde a una planicie cubierta por arcillas lacustres y limos en espesores de alrededor de 60m, que cubren a materiales aluviales del Cuaternario. Bajo estos materiales se llegan a encontrar horizontes de rocas ígneas del Terciario, que comprenden restos de volcanes estratificados, tobas, brechas, derrames de lava y depósitos laháricos, los cuales afloran en elevaciones topográficas circundantes en la zona. [20].

Cuando se formó la sierra de Chichinautzin, entre las sierras Nevadas y las Cruces, con lavas basálticas se cerró la Cuenca hacia el sur y esto permitió el relleno de la cuenca con materiales de acarreo y cenizas volcánicas transportados por aire o por corrientes de agua hacia las partes más bajas, posteriormente se formó una gran planicie que fue ocupada por lagos someros. [20].

La deformación horizontal y hundimiento que se presentan actualmente dependen en gran medida también de la compactación de los depósitos de limos y arcillas que fueron depositados en el Cuaternario cuando la cuenca se cerró y también su asociación con la segunda capa de material aluvial depositado. [20].

Los depósitos aluviales (Qal) son material clástico fluvial acumulado junto con sedimentos lacustres y depósitos volcánicos del Cuaternario. Las características litológicas, la estratigrafía, y génesis de estos depósitos indican que es una sola unidad sedimentaria. La forma en la que afloran es como llanuras aluviales al norte y al sur de cuenca, en varias ubicaciones es particularmente importante el conocimiento de la geología por las tasas de subsidencia que se presentan en la actualidad. [20].

Los espesores máximos, que son alrededor de 500 m, se encuentran en el centro de las depresiones y se adelgazan hacia las márgenes de la llanura. Según estudios de perforación de pozos entre 80 m y 480 m existen arenas, limos y arcillas con interestratificaciones de tobas de grano fino y lapillicas. Es notorio que hacia la base de este intervalo de profundidad se encontraron margas y calizas lacustres con espesores de 40 m a 60 m de profundidad. En el subsuelo descansan ampliamente con discordancia encima de los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno, localmente de la misma forma sobre rocas volcánicas más antiguas y sedimentarias del Cretácico; probablemente debido a su edad cuaternaria se encuentran intercalados con los sedimentos lacustres. [20].

Geología superficial de la zona de estudio

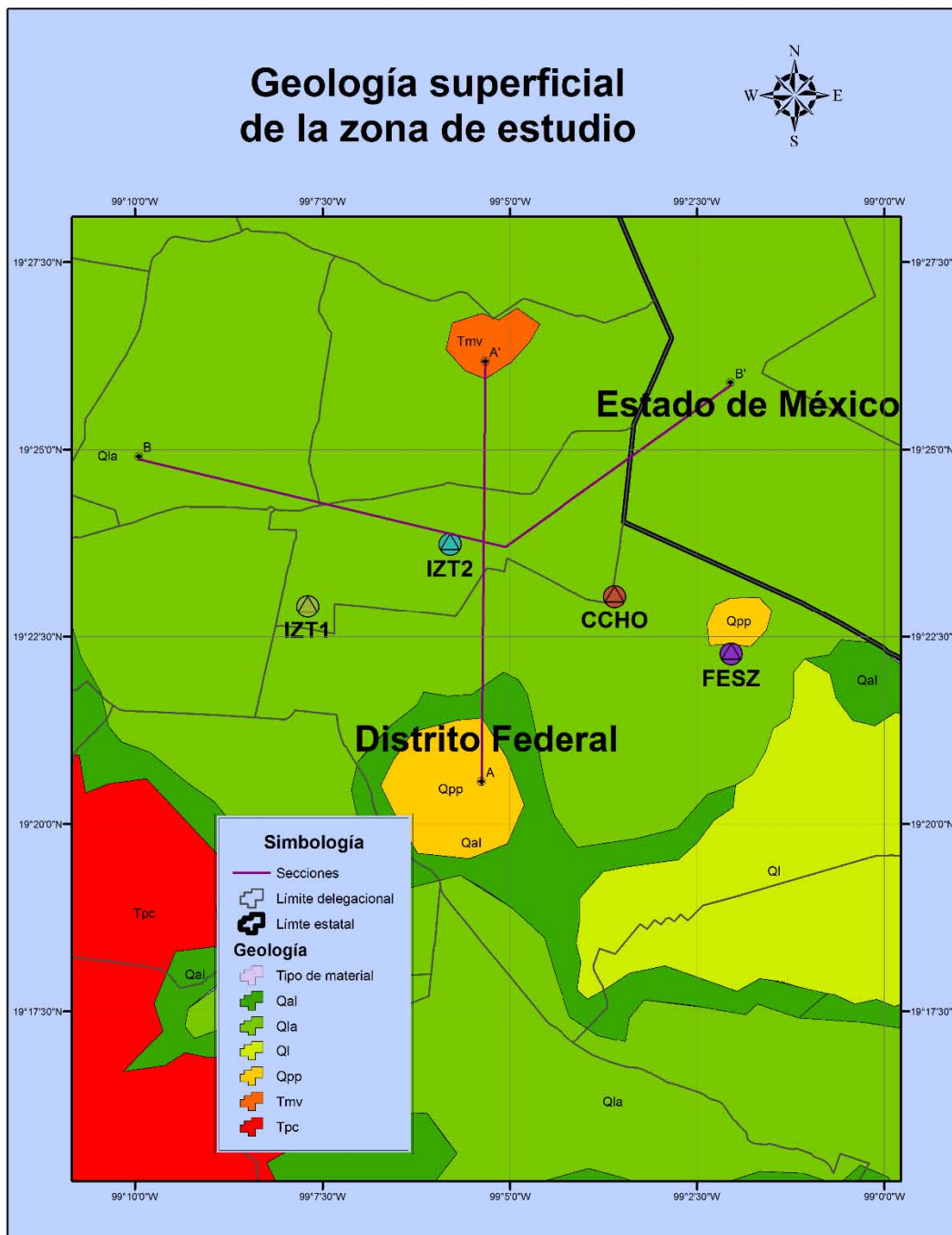


Fig. 1.1.1 Mapa geológico del oriente del Distrito Federal (zona de interés) donde se muestran las líneas de las secciones geológicas AA' y BB' así como la ubicación de las estaciones de monitoreo IZT1, IZT2, CCHO y FESZ. Las abreviaturas correspondientes a los materiales mostrados son: Qal-Aluvión con piroclastos; Qla-Sedimentos lacustres, arcillas, limos y arenas interdigitados con piroclastos; Ql-Sucesiones efusivas y derrames lávicos andesítico-basálticos; Qpp-Material basáltico-andesítico con ceniza y lapilli; Tmv-Rocas extrusivas: tobas, brechas y derrames mayormente andesíticas; Tpc-Sucesiones de composición andesítica con pómez y aluvión. [20].

Secciones geológicas que atraviesan la zona de estudio

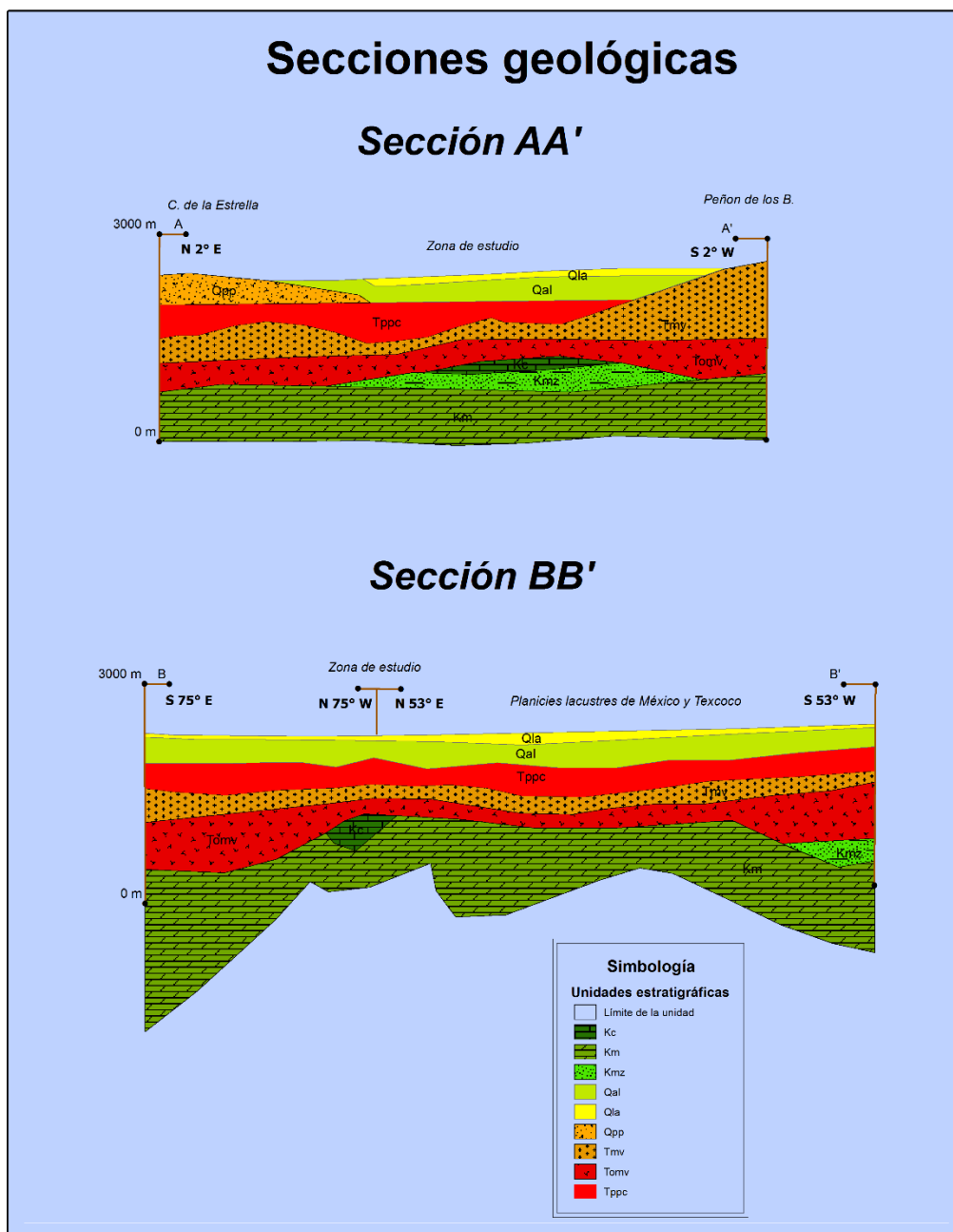


Fig. 1.1.2 Secciones geológicas AA' y BB' cuyas ubicación se representa en el mapa 1.1.1. Las abreviaturas correspondientes a los materiales mostrados son: Kc-Caliza de interstratificación gruesa con lutitas y limolitas; Km-Caliza y dolomía interstratificadas; Kmz-Arenisca, limolita y lutitas interstratificadas; Qal-Aluvión con piroclastos; Qla-Sedimentos lacustres, arcillas, limos y arenas interdigitados con piroclastos; Qpp- Material basáltico-andesítico con ceniza y lapilli; Tmv-Rocas extrusivas: tobas, brechas y derrames mayormente andesíticas; Tomv-Rocas volcánicas: brechas, tobas y derrames de tipo andesítico, se incluyen riolitas; Tppc-Depósitos piroclásticos y clásticos fluviales, margas y arcillas lacustres interdigitados con unidades volcánicas. [20].

Los depósitos lacustres (Q_{la}) son una agrupación de sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados a la actividad volcánica del estratovolcán Popocatepetl y de la Sierra de Chichinautzin, los cuales fueron depositados en un ambiente lacustre. Estos depósitos forman una gran altiplanicie lacustre extendida con una altitud promedio de 2200 m, desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec, los espesores varían entre 30 m y 300 m, los mayores espesores se presentan en los centros de las planicies. [20].

Cortes litológicos de pozos en el borde norte de la Sierra de Chichinautzin y alrededor de la Sierra de Santa Catarina muestran que los depósitos lacustres se encuentran intercalados con los depósitos aluviales. El tiempo de formación para los depósitos lacustres se calculó por el método de carbono-14 y este corresponde del Pleistoceno Tardío al Holoceno, lo cual es apoyado por la polaridad magnética normal en piroclastos de estos depósitos. El origen de los depósitos lacustres está íntimamente relacionado con la obstrucción definitiva del desagüe de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra de Chichinautzin. Por otro lado, la presencia de suelos, evaporitas y tobas consolidadas, sugiere climas húmedos y áridos. [20].

Aspectos hidrológicos de la porción sureste de la Cuenca de México

El relieve de cuenca endorreica, una dinámica hidrológica superficial de lluvias torrenciales en verano (precipitación media de 600 mm anuales) y la descarga de agua subterránea de sistemas locales (de baja salinidad y temperatura media) y regionales (con mayor salinidad y agua termal) permitió la formación de un sistema de lagos: Texcoco, Tenochtitlan, Xochimilco-Chalco, Xaltocan y Zumpango los cuales en períodos de mayor precipitación se fusionaron resultando en una amplia planicie lacustre. Estas condiciones hídricas prevalecieron hasta fines del siglo XVIII, época en que los lagos de Tenochtitlan y de Texcoco fueron prácticamente desaguados de manera artificial, iniciándose el desecado de los lagos de la Cuenca de México, con el Túnel de Tequisquiac y posteriormente con el Tajo de Nochistongo, ambos construidos a través del parteaguas norte. Dentro de los principales drenes secundarios construidos a cielo abierto en la ciudad destacan los de Chalco y Nacional, y dentro de los cauces naturales el más importante es el Río Churubusco que fue entubado a lo largo de su cauce y ahora constituye un importante drenaje de agua residual y pluvial. [16].

Ha quedado claro que la porción sureste de la Cuenca de México, oriente del Distrito Federal, es una planicie lacustre que ha estado cubierta por cuerpos de agua y Tierras húmedas. Se presentan pequeños lagos como el de Texcoco, Zumpango y Chalco que fueron drenados, estos lagos junto con el sistema de canales de Xochimilco son vestigios del gran cuerpo de agua que existió.

El área de la zona metropolitana de la Ciudad de México es un área urbana densamente poblada con 21.6 millones de habitantes. [1]. Para satisfacer la necesidad de agua de esta cantidad de habitantes en el Distrito Federal y su zona conurbada ha sido necesario explotar los cuerpos subterráneos de agua de la Cuenca de México, sin embargo esto no se ha hecho

de la mejor manera a lo largo de la historia. Por el lado opuesto se tiene que para hacer habitable este lugar fue necesario desaguar de manera artificial los lagos de la cuenca.

Aparte de ser una planicie de 2200 m de elevación, la Cuenca de México está rodeada por montañas que exceden los 5000 m de altitud, esto provee una recarga natural de agua a la cuenca, esta localización característica de la ciudad ha propiciado la necesidad de implementar curiosas técnicas para el manejo hidráulico a lo largo de la historia desde la conquista española e incluso de la llegada de los primeros pobladores al ex - Lago de Texcoco.

Con la evolución de las técnicas para el desagüe artificial de la cuenca se ha reducido drásticamente la recarga natural de agua a la cuenca, esto aunado a otros diversos factores, y se provocado que infiltración de agua hasta ser retenida por capas no permeables de depósitos sea limitada.

La Ciudad de México consume más de 34 mil 430 litros de agua potable por segundo, lo equivalente a 220 mil pipas de agua por día y más del 70% proviene del acuífero de la cuenca. [1]. El consumo y explotación de agua a excedido la recarga natural del acuífero y esto propicia la compactación de los depósitos lacustres y por lo tanto se genera el proceso de subsidencia. [4].

Consolidación del suelo y surgimiento de subsidencia

Existen dos principales causas del hundimiento del suelo:

- I. Por condiciones naturales: influencia tectónica, respuesta sísmica, relación agua meteórica – material saturado.
- II. Por influencia antrópica: construcción de obras de ingeniería civil, y efectos relacionados con la extracción de petróleo, minerales o agua subterránea.

La extracción de agua subterránea puede provocar o activar varios impactos ambientales como son: extensión de fallas geológicas, agrietamiento y/o consolidación del suelo.

La consolidación del suelo es la compactación de una unidad de material geológico por pérdida del agua de saturación. En términos de mecánica de suelos es un cambio en la presión de poro (P_{poro}) que en cualquier punto de la zona saturada se refleja como una disminución de la presión hidráulica ($P_{hidráulica}$), ya que la presión total (P_{total}) en cualquier punto se mantiene constante, de acuerdo con la relación:

$$P_{total} = P_{poro} + P_{hidráulica}$$

Dado que la presión total se mantiene constante, al disminuir la presión hidráulica, aumentará la presión de poro, lo cual se manifiesta como una compactación o consolidación del volumen del material afectado, y esto se traduce a su vez como subsidencia o hundimiento del terreno. [2].

1.2 Antecedentes e identificación del problema de subsidencia en el oriente del Distrito Federal.

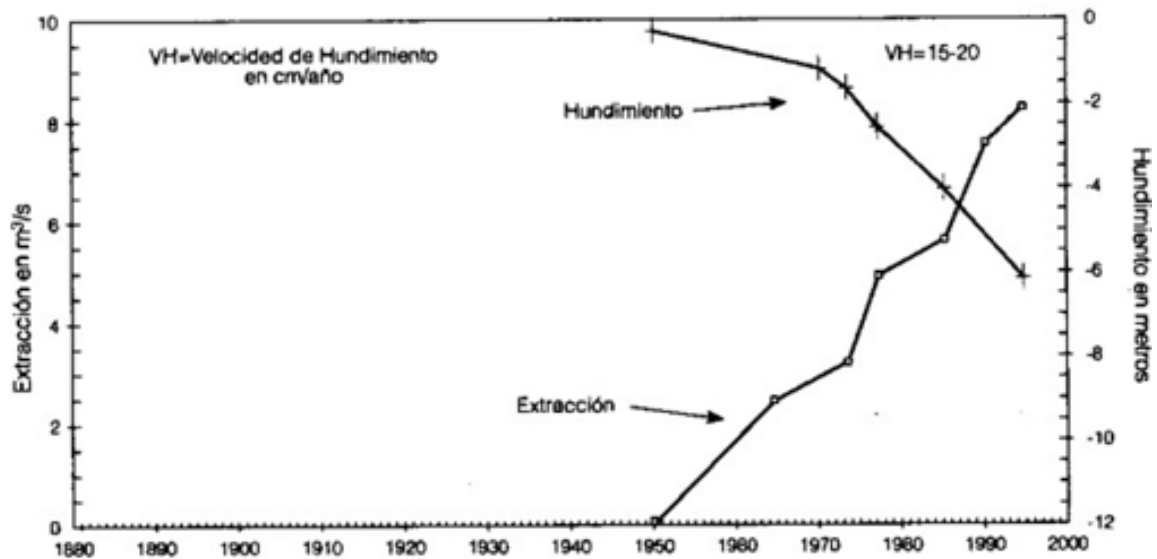
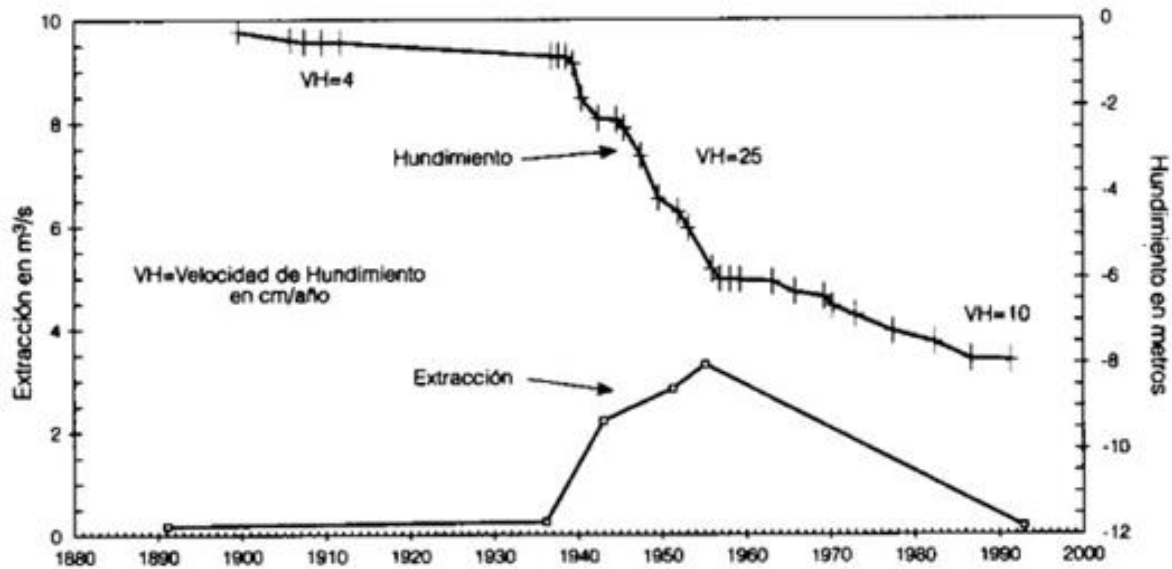
Con el repentino crecimiento de la población en la Ciudad de México comenzó la sobre explotación del acuífero de la Ciudad de México alrededor de 1850, sin embargo el fenómeno de subsidencia como manifestación de esto se consideró como un problema serio años después alrededor de 1925 (Gayol, 1925). [16].

Antecedentes: Hundimiento Histórico y extracción de agua subterránea

La Ciudad de México originalmente se abastecía de agua de un gran número de manantiales. Al incrementarse las demandas, se recurrió a la extracción de agua del subsuelo, primeramente con varios cientos de pozos someros (norias). Posiblemente el hundimiento de la Ciudad se inició en esas fechas. Nivelaciones realizadas de 1891 a 1895 ya registran hundimientos de 5 cm por año. En el periodo de 1936 a 1944, se perforaron los primeros 93 pozos profundos que provocaron hundimientos en el centro de la Ciudad de hasta 18 cm por año. Entre 1938 y 1948, continuó la perforación que fue extendiéndose intermitentemente hacia los alrededores del Centro Histórico. A partir de 1960 se inició la disminución de la extracción de agua en el centro de la Ciudad y a su vez inició la explotación acuífera en el Sur y Sureste de la Ciudad. [16].

Diversos estudios realizados con datos históricos manifiestan la relación hundimiento del terreno - extracción de agua del subsuelo. Por ejemplo en el centro de la Ciudad de México se observa que el mayor nivel tanto de hundimiento como de extracción de agua fue en los años cuarenta y cincuenta. A partir de los años sesenta la extracción disminuyó notablemente, sin embargo, el hundimiento continuo aunque en menor grado. En contraste a esto hacia el sur del Distrito Federal la extracción se inició prácticamente en la década de los años sesenta, y a partir de esta época hasta la actualidad se ha ido incrementando. Una observación importante es que la magnitud del hundimiento total del terreno está en relación con el espesor de las arcillas. Para esto en los estudios que se realizan es conveniente formar secciones geológicas a lo largo de los drenes de estudio, donde se ha confirmado la relación entre el hundimiento del terreno y el espesor de las arcillas lacustres. [16].

En las ilustraciones de la Figuras 1.2.1 y 1.2.2 se corrobora la relación hundimiento - extracción en el centro y sur de la Ciudad de México:



Existen varias citas históricas sobre nivelaciones en la Ciudad de México (Hiriart y Marsal, 1969). Es particularmente interesante el levantamiento topográfico de Roberto Gayol (Hiriart et al., 1969), realizado a fines del siglo pasado, a partir del cual se ha hecho una reconstrucción de la historia del hundimiento de la Ciudad de México. El primer dato encontrado en la recopilación efectuada en este trabajo corresponde a Humbolt, 1803.

Existen también citas del monumento a Enrico Martínez en 1862, del ingeniero Velázquez y Aldasoro en 1876 y del ingeniero Gayol en 1891. [16].

En relación con los hundimientos medidos, hacia el año de 1925 algunos ingenieros sostenían la teoría de que el lago de Texcoco se estaba azolvando. Posteriormente empezó a elucubrarse sobre el secado del lago como factor determinante del asentamiento de la Ciudad de México. Fue Nabor Carrillo quien llamó la atención en 1947 sobre la verdadera causa del proceso, al analizar la influencia de los pozos de bombeo en el hundimiento. (Hiriart et. al., 1969). [16].

En la gráfica de la Figura 1.2.3 se observa el hundimiento histórico de varios monumentos de la Ciudad de México de 1900 a 1996, en donde hacen notar que hasta el año de 1968 el hundimiento pasó por tres etapas. En la primera, de 1898 a 1937, el hundimiento es prácticamente lineal de 4 cm por año. La segunda fase del proceso se marca de 1937 a 1947, donde también es de tipo lineal con un hundimiento medio de 14 cm por año. De 1947 a 1996, se marcó ya una tercera etapa en la que se registran velocidades de hundimiento de 40 cm por año o mayores al inicio de la etapa y que tienden a disminuir en forma progresiva hasta llegar al final de la etapa a valores de 10 cm por año. Estas divisiones temporales o tres etapas de hundimiento coinciden con el aumento de la población en el Distrito Federal y con la creciente demanda de recursos hídricos propiciando mayor extracción de agua en cada etapa. [16].

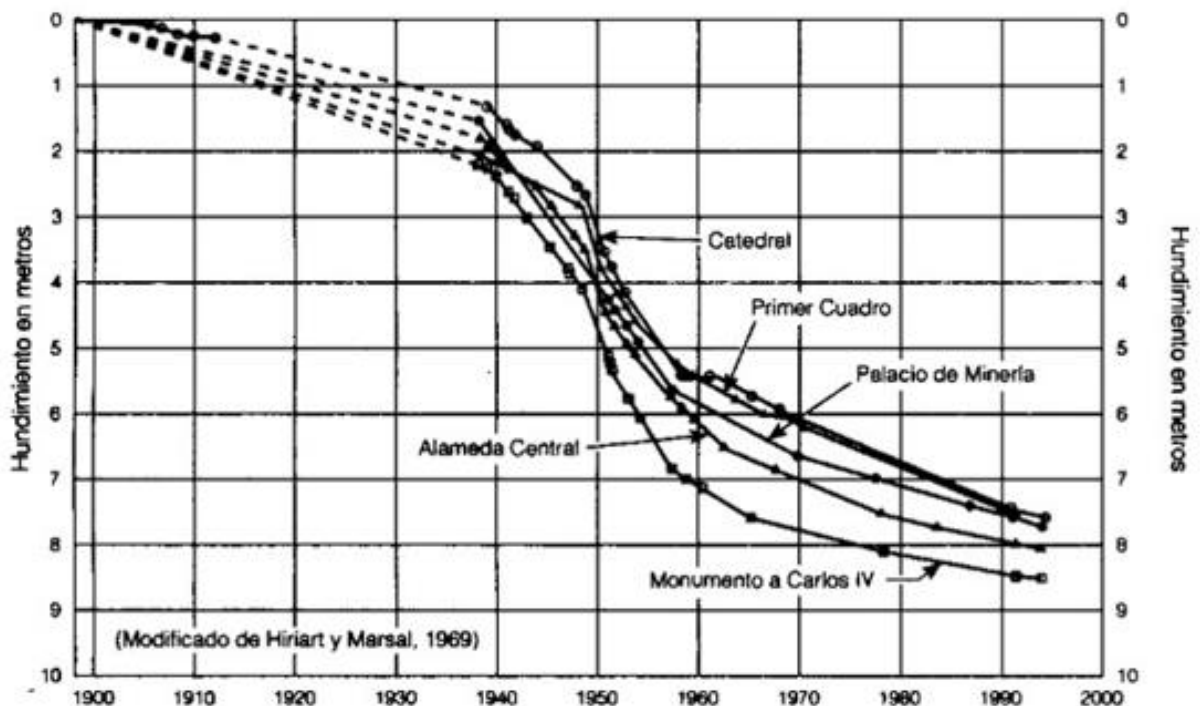


Fig. 1.2.3 Hundimiento de monumentos del Distrito Federal: Catedral, Alameda Central, Primer Cuadro, Palacio de Minería y Monumento a Carlos IV, de 1900 a 1996. [16].

La ilustración de la Figura 1.2.4 muestra el hundimiento acumulado del terreno de 1891 a 1994, observándose máximos de poco más de 10 cm en el centro de la Ciudad de México, hundimientos entre 6 y 7 m del centro hacia el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, hundimientos ligeramente mayores a 6 cm en el canal Nacional y en el canal de Chalco, el tramo donde se encuentra la batería de pozos Tlahuac-Neza, y hundimientos ligeramente mayores a 5 cm en el área de Tlahuac. Los hundimientos tienden a desaparecer hacia las elevaciones topográficas correspondientes a la Sierra de las Cruces al poniente, la Sierra de Chichinautzin al sur y el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina en el centro - este de la ciudad. Nótese que las mayores tasas de hundimiento se manifiestan en el oriente del Distrito Federal con un hundimiento acumulado de 6.8 m a 7.5 m.

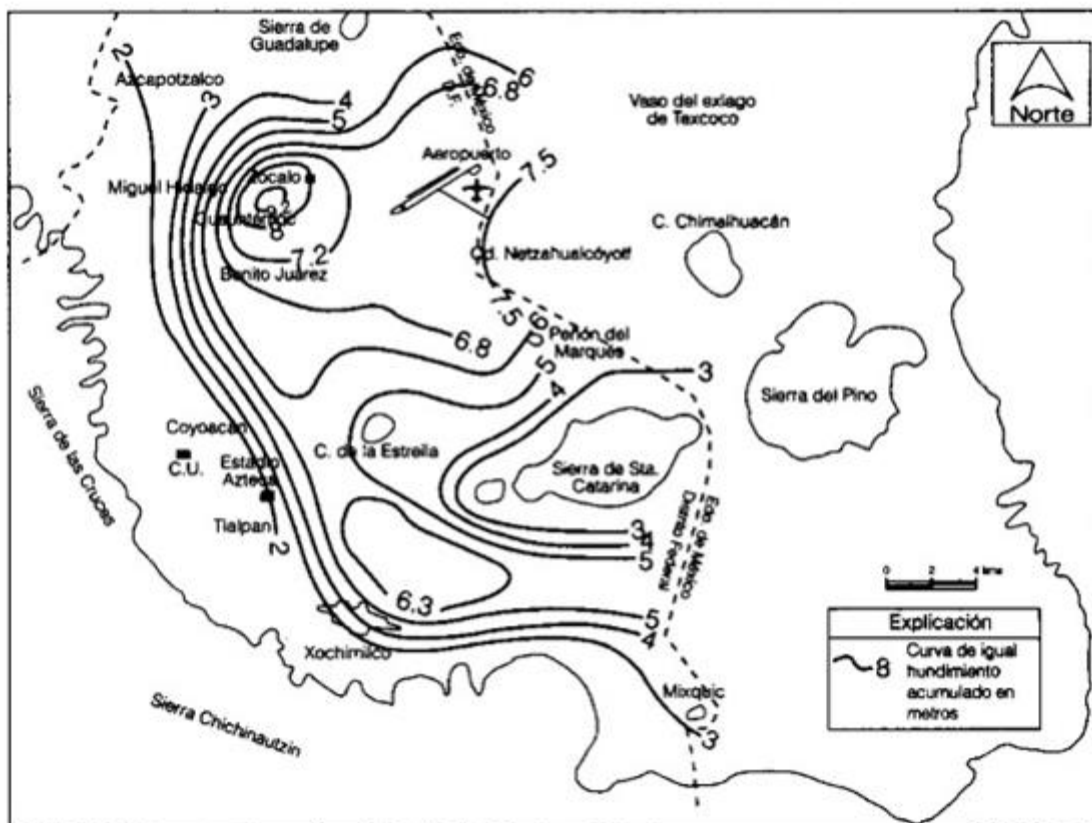


Fig. 1.2.4 Mapa de curvas de igual hundimiento acumulado desde 1891 a 1994. [16].

Identificación del problema de subsidencia en el oriente del Distrito Federal.

La relación entre la extracción de agua del subsuelo y la compactación de sedimentos lacustres, manifestada en la tasa de hundimiento, fue reconocida hasta la década de 1950. Los números y resultados que arrojaban diversos estudios en la década de los cincuenta representaban altos valores en la tasa de subsidencia. Sin embargo hasta después de 1965 hubo cierta conservación del acuífero y se tomaron medidas preventivas como extraer agua de otros lugares ya que las consecuencias del proceso de subsidencia son costosas. [4].

El Oriente de la Ciudad de México es tan solo una de las muchas zonas en el área metropolitana y dentro de la Cuenca de México que ha presentado desde hace ya algunos años atrás una alta tasa de subsidencia, esto se ha dado a notar a través del tiempo con notables daños a la infraestructura, entre esta están casas y construcciones, edificios, alumbrado público, sistema de drenaje, agua potable, cableado eléctrico y telefónico, espacios públicos y de recreación, y principalmente vías de comunicación, calles y avenidas.

Esto ha tenido a lo largo del tiempo fuertes implicaciones tanto sociales como económicas. También hay que resaltar la problemática hidrogeológica y ambiental para gestionar y regular el consumo y explotación de recursos hídricos en la Cuenca de México con el fin de mantener un equilibrio y evitar un impacto ambiental que pueda tener repercusiones nocivas para la vida.

En épocas actuales la extensión regional y la variación espacial de subsidencia así como las variaciones estacionales no están bien monitoreadas y aun totalmente estudiadas, documentadas y por lo tanto entendidas, es por eso que es conveniente empezar y darle continuidad a proyectos de monitoreo e investigación a este fin.

Aunque la deformación horizontal del terreno en esta zona no representa un problema significativo es conveniente también darle un seguimiento principalmente para planificar y controlar proyectos de desarrollo de infraestructura.

En el oriente del Distrito Federal se han implementado cuatro estaciones de observación de datos GPS para monitoreo de subsidencia y deformación horizontal y la ubicación general de estas está la mostrada en el mapa de la figura 1.2.5.

1.3 Monitoreo y seguimiento de la subsidencia y desplazamiento del terreno con técnicas GPS.

Una de las técnicas más utilizadas en la actualidad para determinar una posición sobre la superficie terrestre es a través del uso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Para el monitoreo y seguimiento de problemáticas donde se presentan procesos de deformación del terreno o subsidencia resulta muy conveniente hacer uso de estos modernos métodos, que cabe mencionar que han tenido un significativo y relativamente rápido avance en cuanto a desarrollo tecnológico, ya que tienen ventajas como la capacidad de proporcionarnos información continua en periodos de tiempo determinados, así podemos obtener grandes bloques de información para analizar y darle seguimiento a dichos procesos.

Ubicación general de las estaciones GPS para monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal

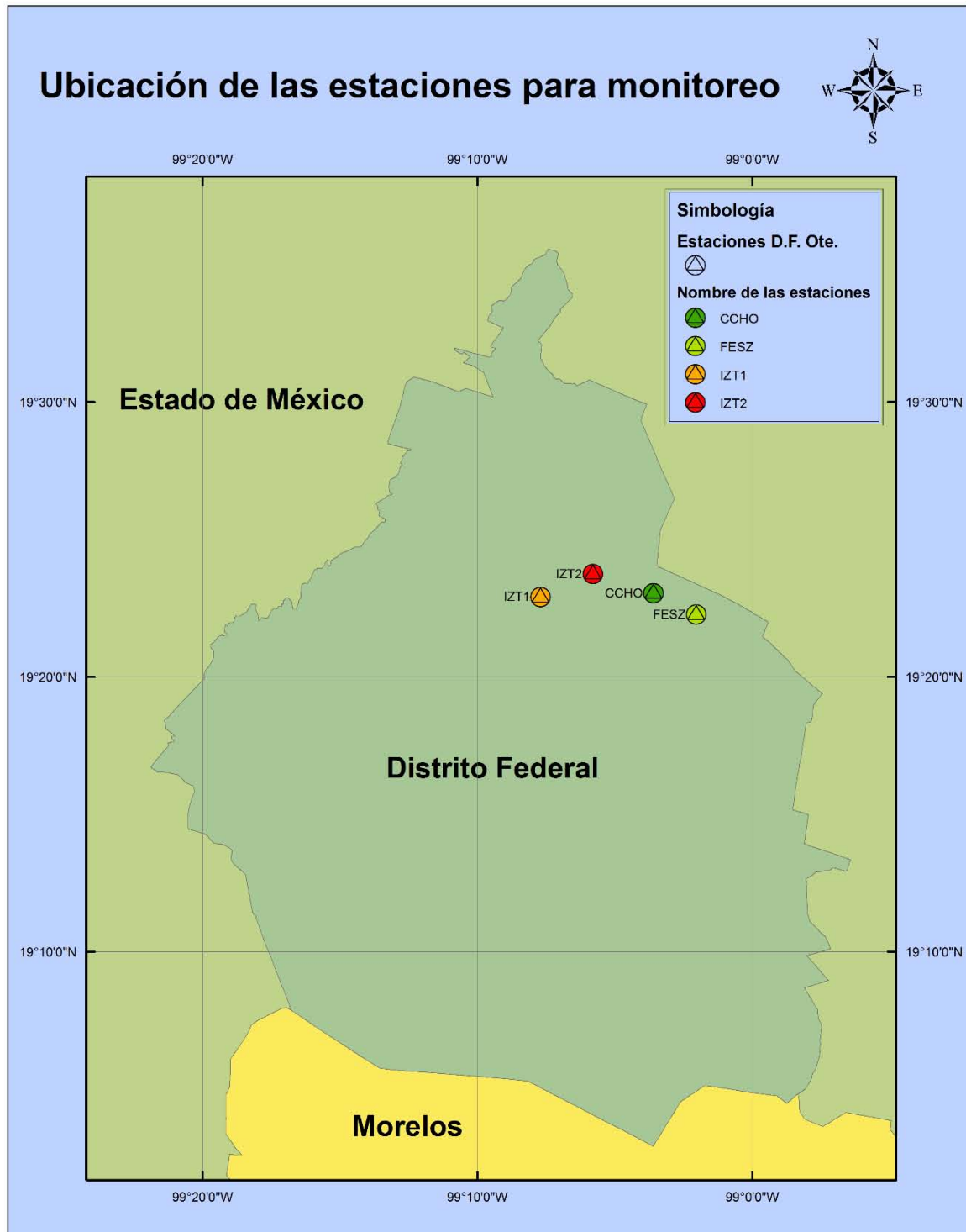


Fig. 1.2.5 Mapa de la ubicación general de las estaciones GPS: IZT1, IZT2, CCHO y FESZ, para monitorear subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal.

En el caso de movimiento, desplazamiento o bien el cambio de posición de algún rasgo del terreno el tener información continua representa una ventaja significativa e importante ya que finalmente interpretaremos el cambio de posición horizontal de varios puntos como deformación y en el caso del cambio en la altura como subsidencia.

El Sistema de Posicionamiento Global permite hacer mediciones continuas y por lo tanto obtener información durante periodos de tiempo prolongados además de que ha demostrado ser una herramienta poderosa, eficiente y confiable. Esto está basado en que se está usando y se ha usado en múltiples proyectos tanto nacionales como internacionales de diferente índole pero todos orientados a la determinación de desplazamientos milimétricos del terreno, como deformaciones causadas por eventos tectónicos o deformaciones provocadas por vulcanismo.

El uso de estas técnicas las podemos fundamentar ampliamente en la teoría del funcionamiento de este sistema y podemos respaldar que el procedimiento ofrece ventajas como fiabilidad, factibilidad, rapidez relativa en la adquisición de datos, buena precisión y certeza en que este método es ocupado por organismos de carácter científico a nivel mundial, ya sea instituciones educativas, industriales o bien de investigación.

Entonces el Sistema de Posicionamiento Global en ciertos de sus métodos ofrece precisiones milimétricas, esto es una buena base para garantizar que las mediciones que se hacen con este sistema y por tanto la determinación de la posición y desplazamientos tendrán buena calidad y resolverán la problemática de controlar y saber cuáles son físicamente las consecuencias del movimiento en determinados periodos de tiempo, y nos permitirán darle un buen seguimiento y monitoreo a la tasa de deformación o desplazamiento horizontal y subsidencia de la zona oriente del Distrito Federal por su geología, composición, estructura, hidrología, y por los procesos tectónicos y diversos fenómenos sociales a los que este lugar se encuentra sometido.

Se sabe por medio de estudios previos (anteriores a 1990) que la tasa de subsidencia en el sitio de interés es alta, a grandes rasgos y de manera rápida se puede señalar que se trata de alrededor de centímetros por año, entonces una precisión milimétrica garantiza estar dentro de márgenes de error aceptables.

Estudios mundiales diversos han demostrado que los resultados obtenidos con técnicas GPS son 95% veraces. Un problema que tal vez se podría presentar es el caso específico de determinación del cambio de altura de un punto del terreno ya que las mediciones de la coordenada vertical son las que presentan mayor error (por lo regular la mitad de la precisión de las coordenadas horizontales), sin embargo esto resulta ser poco significativo cuando la tasa de subsidencia como ya se mencionó se encuentra en el orden de centímetros, si bien esto no fuera suficiente una forma de aminorar el error es hacer mediciones por largos periodos para elaborar series de tiempo y por medio de métodos estadísticos asignar una calidad a los resultados obtenidos.

En este apartado lo que se pretendió es dar una base sólida para demostrar que el problema presentado y fundamentado geológica e hidrológicamente se puede monitorear y darle seguimiento con modernas técnicas aplicadas a fines científicos como los son el uso del

GPS pero debe de quedar claro que los capítulos que vendrán a continuación, en los que se tratará desde la historia y teoría del Sistema de Posicionamiento Global hasta cómo implementar el conjunto de herramientas para la obtención de datos, así mismo de como procesar datos para obtener posiciones precisas del terreno, están ligados a resolver o bien darle seguimiento al problema anteriormente mencionado.

Capítulo 2. Teoría del Sistema de Posicionamiento Global

2.1 Concepto de Sistema de Posicionamiento Global, historia, segmentación, estructura y funcionamiento (modelo vectorial).

Concepto de Sistema de Posicionamiento Global

Primeramente se debe hablar del Sistema Global de Navegación por Satélite, conocido por sus siglas en inglés como GNSS (Global Navigation Satellite System), que actualmente se refiere al conjunto de tecnologías que proveen posicionamiento geoespacial con cobertura global por medio de navegación satelital. Los orígenes del GNSS se sitúan en los años 70's con el desarrollo del sistema militar estadounidense GPS (Global Positioning System), destinado en una primera etapa para fines militares como el guiado de misiles o localización de objetivos y tropas. Por medio de una red de satélites, un receptor GNSS es capaz de determinar su posición en el espacio así como el tiempo en el que se encuentra. Los sistemas de navegación por satélite, actualmente, tienen una amplia variedad de aplicaciones tanto civiles como militares. [17].

Los usos profesionales, científicos y tecnológicos que hoy en día tienen los Sistemas de Navegación por Satélite son: [8]

- Navegación: permite la navegación, posicionamiento y seguimiento de rutas para vehículos terrestres, marítimos o aéreos en tiempo real.
- Sincronización: proporciona con disponibilidad global para que un reloj pueda ser usado como reloj maestro en una red de sincronización, lo que permite que los relojes de los diferentes elementos de una red de comunicaciones estén sincronizados.
- Servicios basados en localización (LBS): estos servicios disponibles por parte de algunas redes de telefonía celular, permiten localizar al usuario de un teléfono móvil dentro de una determinada celda, si este dispone de un dispositivo GPS (y también con otras técnicas si no dispone de él), lo que permite desde el envío de publicidad a dicho teléfono hasta el uso de esta capacidad por parte de los servicios de emergencia en caso de catástrofe.

- Topografía y Geodesia: los sistemas GNSS, actualmente los basados en GPS, se están empleando como sistemas de alta precisión para la toma de datos topográficos y geodésicos.
- Sistemas de Información Geográfica: en los SIG, siendo estos una colección de información geográfica organizada y hardware y software, que nos permite capturar, almacenar, manipular y analizar información geográfica con el fin de solucionar problemas complejos de planificación y gestión, es indispensable hacer uso de un posicionamiento geoespacial.
- Dispositivos de rastreo: destinados a la localización de personas o especies protegidas de animales, vehículos etc.

Las ventajas y los motivos por los que son usados los Sistemas de Navegación por Satélite son: [8]

- Cobertura Global: como su nombre lo dice todo GNSS debe tener cobertura en todo el mundo, es decir, una constelación de satélites que garantice el funcionamiento del sistema en cualquier parte del planeta.
- Disponibilidad: el sistema debe estar disponible en cualquier momento por lo tanto se deben contar con satélites sustitutos en caso de algún fallo.
- Precisión: se debe proporcionar un posicionamiento espacial y temporal preciso. Hablamos de un rango de metros en aplicaciones civiles, y de centímetros o milímetros en aplicaciones militares y de ingeniería.
- Rapidez: El sistema ofrece prácticamente resultados instantáneos, es decir en tiempo real, dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar.

Hasta hace poco el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) era el único GNSS y este tiene una vital importancia y desempeña un papel de importancia por ser el primer sistema que fue desarrollado. Secundariamente es importante porque muchos proyectos de topografía, geodesia y geodinámica están basados en observaciones a la constelación GPS, tal es el caso del monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal.

GPS es un sistema pasivo de navegación basado en satélites, es decir un GNSS, que permite conocer una posición sobre la superficie terrestre. Se calculan tres coordenadas espaciales en un instante del tiempo. La posición calculada está referida a una figura geométrica ficticia ajustada al geoide, que es el modelo físico que representa la verdadera forma de la tierra, y es llamando elipsoide de referencia. La posición obtenida está en un sistema de coordenadas cartesianas geocéntricas y a través de ciertos procesos y transformaciones la podemos transformar en coordenadas geodésicas: latitud, longitud y altura.

El Sistema GPS proporciona óptimas prestaciones en cuanto a productividad, tiempo de observación, fácil adquisición y procesados de datos y transporte de equipos receptores.

Historia

Es a partir de la década de los 50's cuando la generalización del uso de computadoras y el lanzamiento del primer satélite artificial, Sputnik, 1957, hacen que se produzca una auténtica revolución en la Geodesia y los métodos de posicionamiento terrestre. Los conceptos y técnicas geodésicas utilizadas, que hasta este momento estaban basados en observaciones terrestres (triangulaciones, nivelaciones, medidas gravimétricas) y en observaciones astronómicas (determinaciones de posiciones y azimutes), disponen ahora de unas marcas espaciales sometidas a la voluntad humana, los satélites espaciales. [17], [15].

El Sistema de Posicionamiento Global tiene sus orígenes en la era del Sputnik cuando un grupo de científicos pudo realizar el seguimiento de satélites con los cambios en su señal conocido como el Efecto Doppler. A mediados de la década de los 60's la marina de los Estados Unidos realizó varios experimentos de navegación monitoreada con satélite en submarinos que cargaban misiles nucleares. Con seis satélites orbitando los polos, los submarinos tuvieron la capacidad de observar los cambios del Efecto Doppler en el satélite y posicionarse es decir encontró su locación, esto en cuestión de minutos. [17].

A principio de la década de los 70's el Departamento de Defensa (DoD) de los Estados Unidos quiso garantizar que este nuevo sistema de navegación por satélite podría estar siempre disponible. Aprovechando las ideas y experimentos de los científicos de la Marina, en 1973 a partir de los proyectos TIMATION8 y 621B9, el DoD decidió usar los satélites para darle soporte a su sistema de navegación. Posteriormente después de varias investigaciones una nueva y excitante era del posicionamiento terrestre, el mar o en el espacio en general empezó con el lanzamiento del primer Sistema de Posicionamiento Global (GPS), o el primer Sistema de Navegación por Satélite, el 22 de Febrero de 1978. Se lanzaron los satélites de la constelación NAVSTAR (Navigation System with Timing and Ranging). El sistema constó de 24 Satélites y fue completamente operable en 1993. [17].

Hoy en día, El GPS, es regulado por el gobierno de los Estados Unidos y operado por la Fuerza Aérea del mismo país, esto para conocer la situación en materia de defensa, la seguridad civil, aspectos comerciales y necesidades científicas, desarrollo de obras de ingeniería, etc. El GPS también provee dos niveles de servicio: El servicio de posicionamiento estándar (SPS) el cual usa el código de adquisición aproximada (C/A) en frecuencia L1, y el servicio de posicionamiento preciso (PPS) que usa el código P(Y) en las frecuencias L1 y L2. El acceso al PPS se propuso restringido a las fuerzas armadas de los Estados Unidos así como a agencias federales, fuerzas armadas aliadas y sus gobiernos. El SPS se puso como disponible continuamente para todos los usuarios. Las capacidades y limitantes que provee el SPS están publicadas en diversos documentos que regulan el uso del Sistema de Posicionamiento Global. Estos documentos están disponibles en el sitio web de la NASA. [17].

Resumen cronológico de los primeros eventos del Sistema de Posicionamiento Global más destacados

Año	Evento
1978	Lanzamiento del primer satélite GPS.
1982	Prototipo de instrumento para medir distancias por medio de ondas de luz desarrollado por el MIT.
1983	Se ofrece el uso del GPS para todo el mundo.
1984	Desarrollo en la densificación de redes de apoyo GPS.
1985	Observación de dos bandas sin código. Levantamientos con GPS cinemático. Intercambio de antenas en las observaciones para solucionar la ambigüedad. Primer simposio internacional de posicionamiento preciso con GPS.
1986	Posicionamiento de aeronaves, a través de GPS, con precisión de 10 cm.
1987	JPL (Jet Propulsion Laboratory) aumenta precisión en líneas base.
1989	Lanzamiento del Bloque II de satélites GPS. Soluciones GPS OTF (GPS On The Fly). Surgimiento del GPSIC (Coast Guard GPS Information Center).
1991	Servicio de efemérides a través del NGS (National Geodetic Survey).
1992	Campaña de IGS (International GNSS Service) del 21 de Junio al 23 de Septiembre. Primeras soluciones al problema de seguridad y suplantación de identidad (anti-spoofing).
1993	Total operatividad del GPS. Aparece GPS RTK (GPS Real-Time Kinematic). Solución de la ambigüedad por el método LAMBDA.
1994	Inicio del IGS service. Implementación completa de Antispoofing. Propuestas de monitoreo de la atmósfera terrestre con GPS.
1995	Posicionamiento Puntual Preciso por JPL.
1996	Primera policía de GPS.

Tabla 2.1.1 Cronología de los eventos más destacados del GPS [15].

Segmentación

El GPS consta de tres partes principales: un segmento espacial, formado por satélites que transmiten señales en dos frecuencias moduladas a partir de relojes atómicos altamente estables instalados a bordo; un segmento de control, consistente en estaciones terrestres para el seguimiento del segmento espacial y actualización de sus señales; y un segmento usuario, formado por receptores pasivos que utilizan la señal de los satélites obteniendo posición, velocidad y tiempo.

El segmento espacial

Un satélite GPS es un vehículo espacial dotado esencialmente, de transmisores/receptores de radiofrecuencias, relojes atómicos, microprocesadores, equipos auxiliares, paneles solares y propulsores, que permiten operar al sistema. [3].

Las funciones básicas de estos satélites son: recibir y almacenar la información transmitida por la estación de control principal; procesar esta información con sus propios microprocesadores; mantener una escala de tiempo mediante dos relojes de rubidio y dos de cesio; transmitir información por medio de señales y realizar maniobras para ajustes orbitales controlando la estabilidad del sistema. [3].

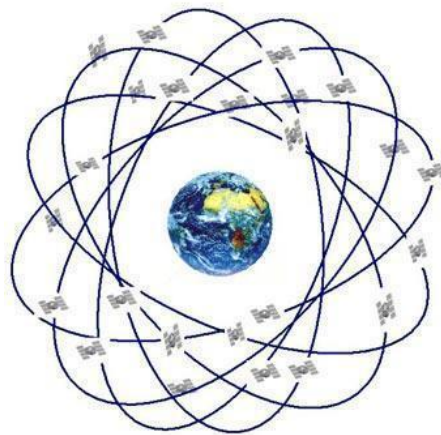


Fig. 2.1.1 Constelación GPS

La constelación NAVSTAR/GPS está compuesta por 24 satélites distribuidos en seis planos orbitales. Los satélites describen órbitas cuasicirculares, con inclinación de 55 grados, semieje mayor de 26.000 kms., y período de 12 horas, aproximadamente. El período del movimiento orbital del satélite está sincronizado, exactamente, a un día sidéreo para asegurar que la visibilidad de cada satélite desde cualquier lugar de la Tierra se repita día a día con cuatro minutos de retraso, volviendo a su posición inicial de observación al cabo de

un año. Esta configuración proporciona en cualquier lugar de la Tierra visibilidad simultánea de al menos cuatro satélites con 15 grados de elevación sobre el horizonte. [3]. Existen diversas nomenclaturas para designar los satélites GPS según secuencia de lanzamiento, posición orbital, catálogo NASA, identificación internacional y asignación PRN, que es el ruido pseudoaleatorio y es único para cada satélite. Las dos formas identificativas más utilizadas son el número de secuencia de lanzamiento (#NAVSTAR) y un número relacionado con la firma de cada satélite (#PRN). [3].

El segmento control

El Segmento de Control es responsable del funcionamiento y operatividad del Sistema GPS. Está formado por una estación principal de control, MCS, localizada en Colorado Springs y otras cuatro estaciones situadas en Hawaii, Isla Ascensión, Isla Diego García y Kwajalein, cabe destacar que estas estaciones se encuentran estratégicamente cerca del Ecuador. Las cinco estaciones realizan un seguimiento de todas las señales GPS con el objeto principal de controlar las órbitas de dichos satélites y predecir sus efemérides. Están dotadas de receptores de dos frecuencias, L1 y L2, equipados con osciladores de cesio. También registran datos meteorológicos para evaluar diferentes modelos troposféricos.

Las posiciones geodésicas de estas estaciones son conocidas con un elevado grado de precisión. Todos estos datos son procesados en la estación principal calculando las efemérides y las correcciones de los relojes de los satélites GPS. La estación principal es responsable de posibles maniobras orbitales o sustitución de los satélites GPS.

Tres estaciones de seguimiento (I. Ascensión, I. Diego García, Kwajalein) están dotadas de antenas capaces de transmitir a los satélites las nuevas efemérides y las correcciones actualizadas de sus relojes.

Existen otras redes de seguimiento, que aunque no ejerzan control sobre los satélites GPS, sí efectúan seguimientos precisos del sistema a fin de elaborar efemérides de precisión utilizables a posteriori para aplicaciones geodésicas y geodinámicas.



Fig. 2.1.2 Ubicación de las estaciones de control del GPS.

Segmento usuario

El Segmento Usuario NAVSTAR consiste en los diferentes y múltiples tipos de equipos receptores de las señales GPS. Dada la diversidad de aplicaciones del Sistema GPS (navegación aérea, terrestre, marítima y espacial, establecimiento de escalas de tiempo, geodesia, geofísica) el diseño de los equipos receptores GPS será sustancialmente diferente según la utilización del mismo.

Un equipo receptor GPS es un entorno integrado de elementos diseñado para recibir y procesar señales de satélites de la constelación NAVSTAR de forma simultánea o secuencial. Básicamente consta de una antena con preamplificador, un procesador de la señal recibida con el software correspondiente, dispositivos de almacenamiento de datos, sensores meteorológicos y oscilador atómico interno o externo.

A pesar de la diversidad de receptores existentes en el mercado, se pueden realizar dos clasificaciones: según la arquitectura de construcción o según el tipo de observable que adquiere. Así, según su arquitectura existen receptores multicanales paralelos, secuenciales, asignándose un canal para cada satélite y multiplexados, donde la asignación de cada canal es compartida entre varios satélites; y basados en los observables, los equipos receptores se dividen en tres grupos: pseudodistancia con código C/A, fase de la portadora con código C/A y fase de la portadora con código P.



Fig. 2.1.3 Equipos GPS, receptores.

Estructura y funcionamiento

El sistema de posicionamiento global tiene como uno de sus objetivos principales la asignación de coordenadas a estaciones con vértices geodésicos, a partir de observaciones

de satélites artificiales especializados. Las coordenadas de estas posiciones pueden estar referidas respecto a un sistema de referencia terrestre, habitualmente geocéntrico, respecto a otra estación o respecto a un conjunto de varias estaciones, sin ser excluyentes entre sí. La posición de una estación con respecto a un sistema geocéntrico terrestre se denomina posicionamiento puntual o absoluto; mientras que si está referida a otro punto que materializa un sistema de referencia local el posicionamiento se dice relativo. El posicionamiento geodésico espacial aplica estos dos conceptos estableciendo inicialmente unas estaciones dotadas de coordenadas absolutas, red geodésica de orden superior, a partir de las cuales y mediante posicionamientos relativos se determinan las coordenadas absolutas de otras estaciones. Las estaciones con posición absoluta conocida a priori se denominan estaciones de control y materializan, a su vez, sistemas de referencia locales a los cuales se refieren las coordenadas relativas de otras estaciones. Para la determinación de las coordenadas absolutas geodésicas de estaciones, los métodos de Geodesia Espacial utilizan medidas de distancia, de diferencias de distancia, de direcciones o combinaciones de estas medidas. En el posicionamiento absoluto, además de estas medidas, se necesitan conocer las coordenadas precisas del satélite observado, para poder resolver el modelo vectorial conformado por el origen del sistema terrestre considerado, la estación y el satélite. La incógnita geodésica de este modelo vectorial es el vector geocéntrico de la estación de observación. [3].

El GPS proporciona un marco de referencia espaciotemporal con cobertura global, independiente de las condiciones atmosféricas, de forma continua en cualquier lugar de la Tierra o en sus proximidades, y disponible para cualquier número de usuarios. Aunque inicialmente concebido como sistema de navegación, el tratamiento interferométrico de la señal emitida por un mismo satélite proporciona un posicionamiento relativo de alta precisión entre las diferentes estaciones que, simultáneamente, reciben dicha señal. Esta aplicación, no prevista, del GPS hizo que en 1983, el DoD dictaminase la desclasificación parcial del sistema, posibilitando su utilización para usos no militares, principalmente geodésicos y geofísicos. [3].

Para el cálculo de la posición se deben tomar en cuenta básicamente dos parámetros que son la posición del satélite y el reloj del mismo. Dicha información es recogida en la señal enviada por el satélite hasta el receptor, siendo el proceso de cálculo el siguiente:

1. La situación de los satélites es conocida por el receptor con base en las efemérides, parámetros que son transmitidos por los propios satélites.
2. El equipo receptor mide su distancia a los satélites, y usa esa información para calcular su posición. Esta distancia se puede obtener de diferentes maneras dependiendo el tipo de precisión deseada.
3. Cada satélite indica que el receptor se encuentra en un punto en la superficie de la esfera con centro en el propio satélite y de radio la distancia total hasta el receptor.

4. Son necesarios al menos cuatro satélites para obtener la posición, con tres satélites somos capaces de calcular la posición en tres dimensiones, mientras que el cuarto nos permite eliminar los errores de sincronización en los relojes del receptor y del satélite.

Podemos resumir esto en el siguiente sistema de ecuaciones:

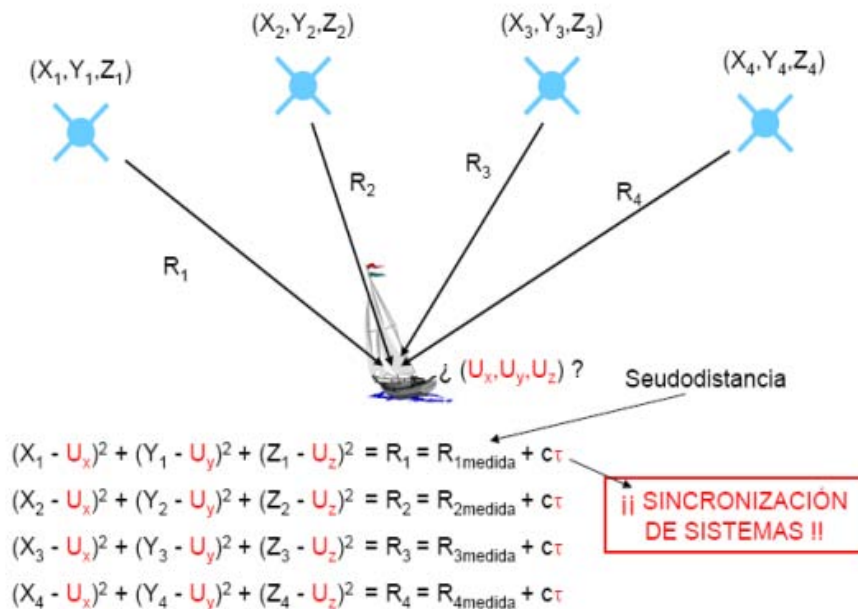


Fig. 2.1.4 Cálculo de la posición por medio de GPS y el sistema de ecuaciones formado

Lo anterior se resume como un modelo vectorial donde las distancias entre el receptor y los satélites son vectores y existen tantos sistemas como mediciones en el tiempo se hagan.

Es lógico que las mediciones efectuadas se encuentren afectadas por algunos errores por lo que el modelo en tres dimensiones y con cierto grado de precisión es el de la Figura 2.1.5.

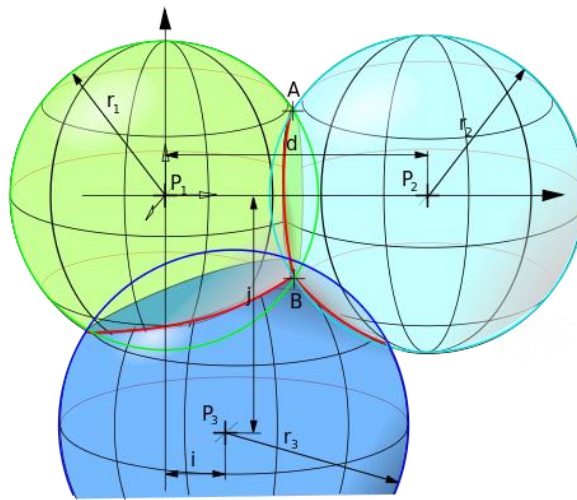


Fig. 2.1.5 Modelo en tres dimensiones de la posición y precisión estimada por GPS.

2.2 Geodesia espacial y mecánica celeste

Todos los fenómenos que son estudiados y que se desarrollan en la Tierra o en el espacio, necesitan sistemas de coordenados a los cuales referir, con precisión y exactitud, tanto los datos observados como los resultados obtenidos. La disciplina que se ocupa del establecimiento de estos sistemas espaciales es la Geodesia. [3].

La Geodesia tiene como su objetivo primordial el estudio de la forma y dimensiones de la Tierra, así como del campo gravitatorio externo y sus variaciones temporales, además establece sistemas de referencia y su relación entre ellos. La Geodesia proporciona la medida de los desplazamientos que experimenta cualquier fenómeno que ocurra en la Tierra, esto mediante diversos métodos.

La Geodesia Espacial es de reciente aparición y se basa en la observación de satélites artificiales sometidos a la acción gravitatoria de la Tierra, obteniéndose cada vez con mayor precisión modelos geopotenciales a partir de las perturbaciones producidas en las órbitas de dichos satélites y permitiendo realizar triangulaciones espaciales de carácter global, regional o local según diferentes técnicas. [3].

Comparada con la Geodesia Clásica, la Geodesia Espacial posee varias ventajas, una de ellas es no necesitar intervisibilidad entre estaciones ya que adquiere un carácter global, además establece un marco de referencia mundial definido por las estaciones principales de seguimiento de las diferentes técnicas geodésicas espaciales utilizadas. Las aplicaciones de la Geodesia Espacial son ilimitadas estando sujetas únicamente a la imaginación humana. Por su indudable importancia se pueden destacar las siguientes utilidades: [3].

- En Geodesia Global, estudio de la forma de la Tierra y su campo de gravedad, las dimensiones del elipsoide medio terrestre, establecimiento de un sistema de referencia terrestre global, determinación del geoide, conexión entre diferentes datums geodésicos globales y entre datums nacionales y globales.
- En Geodesia Regional y Local, establecimiento de estaciones de control para redes nacionales, instalación de redes tridimensionales homogéneas, enlaces geodésicos entre islas y continentes y densificación de Redes geodésicas ya existentes.
- En Geodinámica, establecimiento de marcas de referencia para movimiento de placas, subsidencia, movimiento del Polo, rotación de la Tierra y mareas terrestres.
- En Cartografía y Topografía, apoyo al posicionamiento de los Sistemas de Información Geográfica, redes de control para ingeniería, marcas fiduciales en tierra para levantamientos fotogramétricos y posicionamiento de la cámara fotogramétrica en vuelo.
- En Navegación y Geodesia Marina, navegación restringida en vías terrestre, aérea y marítima, posicionamiento preciso de cartas náuticas, hidrografía y oceanografía y conexión de mareógrafos para unificación de los diferentes sistemas de altitudes.

- En otros campos afines, como por ejemplo, en la determinación de posición y velocidad de fenómenos geofísicos (gravimetría, magnetismo y sismología) o determinación del movimiento de glaciares.

El termino mecánica celeste se refiere a el movimiento de astros y cualquier ente que se encuentre fuera del sistema Tierra. Para el caso de satélites artificiales su mecánica está programada y calculada con anterioridad al lanzamiento de éstos y depende ampliamente del propósito que tengan estos satélites, si son de comunicación, observación o bien posicionamiento como es nuestro caso de estudio.

La mecánica celeste para los satélites GPS está controlada por el segmento control de este sistema ya que las estaciones de control son las encargadas de posicionar los satélites, es decir corrigen la posición de éstos debido a diferentes factores, o bien la posición no se corrige más bien el mensaje de la posición en la que se encuentran es corregido para que después se pueda hacer geodesia espacial cuando éstos brinden la posición de acuerdo a los diversos métodos de posicionamiento.

Cuando se obtiene una posición sobre la Tierra mediante un receptor se habla de Geodesia Espacial, mientras que cuando los satélites son cuidadosamente posicionados por las estaciones de control se trata de Mecánica celeste.

2.3 Observables, señales y códigos.

Señales y códigos

Los satélites GPS emiten señales en la banda L en dos frecuencias distintas, Link 1 (L1) y Link 2 (L2), obtenidas de una frecuencia fundamental $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$ generada por los osciladores a bordo de cada satélite y cuya estabilidad es de 10^{-13} , mediante multiplicaciones enteras, 154 y 120 respectivamente; así, $L1 = 1575.42 \text{ MHz}$ y $L2 = 1227.60 \text{ MHz}$. La longitud de onda de la señal L1 es de 19.05 cm. y la de L2 de 24.43 cm. Esta señal en la banda L se emite en dos frecuencias distintas para corregir el retardo ionosférico producido en la propagación de la señal. Ambas señales están moduladas por dos códigos consistentes en una secuencia binaria (+1, -1). Esta modulación se consigue realizando un cambio de 180° en la fase de la señal portadora. Son ruidos pseudoaleatorios (PRN) generados artificialmente. [3].

El código C/A, también denominado SPS, es emitido con una frecuencia según la fórmula:

$$\frac{f_0}{10} = 1.023 \text{ MHz}$$

Éste código se repite cada milisegundo indistintamente para cada satélite.

El código P(Y), también denominado PPS, se emite con una frecuencia $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$, repitiéndose al cabo de 267 días. Este código es individual para cada satélite y se inicializa una vez por semana en la medianoche del sábado al domingo considerándose por ello, la semana como unidad de tiempo GPS. El tiempo GPS se agrupa en semanas y estas se enumeran ascendentemente desde que el sistema empezó a funcionar; a su vez los días de la semana se enumeran del 0 al 6 siendo el día domingo el cero y el día sábado el día 6.

Cada uno de los códigos sirve para determinar la distancia entre el satélite y el receptor a partir del tiempo de vuelo de la señal. Este tiempo se obtiene comparando la estructura adquirida del correspondiente código del satélite con una réplica generada por el receptor.

La portadora L1 está modulada por los dos códigos mientras que L2 contiene solamente la modulación producida por el código P. Además de estos códigos, las portadoras L1 y L2 están moduladas por el mensaje de navegación, que es emitido por los satélites a 50 bps durante 30 segundos, comenzando un nuevo mensaje cada 1500 bits. [3].

Mensaje de Navegación.

El mensaje de navegación, dividido en cinco subestructuras, proporciona información al usuario sobre las efemérides predichas para los satélites, efemérides emitidas, correcciones modelizadas para corregir el efecto atmosférico en la propagación de la señal, error del reloj y estado de funcionamiento de cada satélite. Esta información se agrupa en tres bloques de datos, subestructuras 1, 2, 3 y 5, más un bloque reservado para mensajes especiales, subestructura 4. [24].

Cada subestructura de datos se inicia con una palabra telemétrica, TLM, y una palabra clave, HOW, que se utiliza para pasar del código C/A al código P. Cada seis segundos se repite este hecho. Los ocho bits iniciales de TLM contienen un preámbulo que facilita la adquisición del mensaje de datos. El resto contiene información que será utilizada por el Segmento de Control para establecer la precisión con que se actualizarán diariamente las efemérides de los satélites. Los seis últimos bits de cada palabra del mensaje de navegación, P_6 , son bits de paridad; existiendo 2 bits previos para el cálculo de dicha paridad en las palabras TLM y HOW en la última palabra de cada subestructura. [3].

Observables

Hay dos tipos de observables de interés para los usuarios, uno de ellos es el pseudorange el cual iguala la distancia entre el satélite y el receptor más los pequeños términos correctivos debido a los errores entre los relojes del satélite y el receptor, el impacto de la ionosfera y la troposfera en la propagación de la señal y el multipath. Dadas las posiciones geométricas de los satélites como función del tiempo y las efemérides de los satélites, 4 pseudoranges son

en principio suficientes para calcular la localización del receptor y la corrección de su reloj. [3].

Es decir tendremos un sistema con 4 ecuaciones y 4 incógnitas que en este caso son las componentes espaciales x , y , z y la variable temporal.

Los pseudorángos son la medida del tiempo de viaje de los códigos C/A o P(Y).

La segunda observable es la fase portadora, que es la diferencia entre la fase recibida y la fase del oscilador receptor en la época de la medición. Los receptores están programados para hacer observaciones de fase en el mismo igual espaciado de épocas. Adicionalmente los receptores permiten grabar el número completo de ciclos recibidos desde el inicio de la medición. La salida actual es la fase observable acumulada en las épocas pre establecidas. [3].

2.4 Cálculo por medida de fase y pseudorango.

Pseudorango

El pseudorango o pseudodistancia es la medida de la distancia entre el satélite y el receptor en la época de transmisión y recepción de las señales, obtenida a partir del tiempo de vuelo de la señal multiplicado por la velocidad de la luz. El tiempo de vuelo de la señal se obtiene mediante el alineamiento del código PRN generado por el receptor y el idéntico emitido por el satélite. Como se mencionó en el tema anterior, los códigos generados por el receptor se obtienen de su propio oscilador y los generados en los satélites a partir de los relojes instalados a bordo. Ambos osciladores, receptor y satélites tienen errores debido a los cuales, además de la trayectoria no rectilínea, la distancia geométrica será diferente de la distancia medida, de aquí el nombre de pseudorango. En la medida de la pseudodistancia pueden aplicarse tanto el código C/A como el código P. La precisión media en la medida de la distancia con el código P es de 30 *cm*. mientras que con el código C/A es de 3 *m*. [3], [15].

La pseudodistancia es el observable GPS básico para la resolución del problema de navegación, establecimiento de la escala de tiempo GPS y determinación del movimiento orbital de los satélites GPS. Está afectada por los retrasos troposféricos e ionosféricos.

Calculo del pseudorango (p): [3]

Sea $t(\tau_a)$ el instante de emisión de la señal desde un satélite GPS referido a la escala de tiempo propia de dicho satélite y τ_a el mismo instante en la escala de tiempo GPS. De igual modo, sea $T(\tau_b)$ el instante de recepción de la señal en la escala de tiempo del receptor y τ_b el tiempo GPS en que es recibida la señal (figura 2.4.1). Teniendo en cuenta la degradación,

inevitable, de los osciladores del satélite y receptor, existirán unos retardos dt y dT , respectivamente, en ambas escalas con respecto al tiempo GPS, verificándose:

$$\tau_a = t(\tau_a) + dt, \quad \tau_b = T(\tau_b) + dT.$$

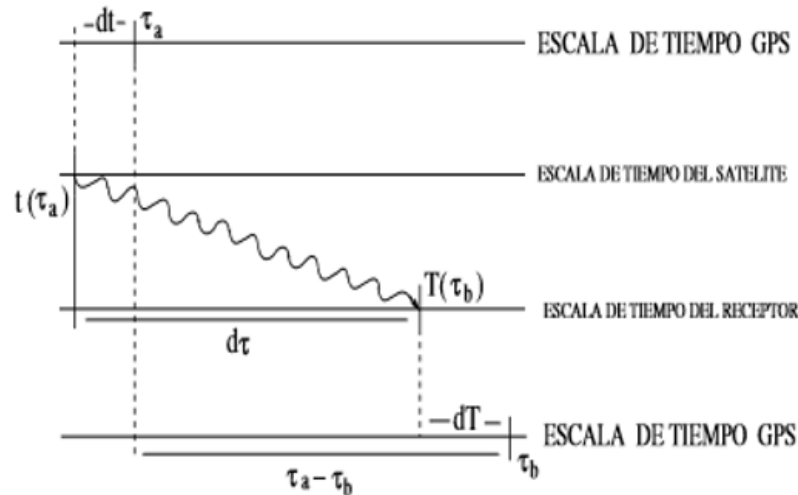


Fig. 2.4.1 Tiempos y retardos en GPS

La señal emitida por los satélites GPS se propaga por la atmósfera, que debido a su carácter dispersivo producirá un retardo en la llegada de la señal al receptor. La presencia de cuerpos reflectantes en las proximidades de la estación receptora produce un aumento en la trayectoria de la señal que se materializa en un retardo en el tiempo de propagación de dicha señal. Estos retardos habrán de ser tenidos en cuenta en la medida del tiempo de vuelo de la señal, a partir de la cual se determina el observable pseudodistancia y que físicamente se obtiene mediante una correlación entre los códigos recibidos de cada satélite y la correspondiente réplica generada por el oscilador del receptor. Otros retardos temporales son los producidos por el recorrido de la señal desde el centro de la antena hasta el dispositivo de correlación y por la propia electrónica del receptor.

Aunque se suele decir que el observable básico del sistema GPS es la pseudodistancia, en realidad, el receptor realiza medidas del tiempo de vuelo de la señal que se convierte en distancia, simplemente, multiplicando por la velocidad de la luz.

Con estas condiciones el tiempo medido de la señal vendrá dado por:

$$dT = T(\tau_b) - t(\tau_a) + dt_{ATMOSFERA} + dt_{REFLEXION} + dt_{RECEPTOR}$$

$$d\tau = \tau_b - \tau_a + dt - dT + dt_{RETARDOS}$$

Multiplicando por la velocidad de la luz:

$$c = 299792458 \text{ m/s}$$

Se obtiene:

$$c \, d\tau = c (\tau_b - \tau_a) + c (dt - dT) + c \, dt_{RETARDOS}.$$

Finalmente, el modelo funcional para la pseudodistancia queda de la forma:

$$p = \rho + c (dt - dT) + d_{ATMOSFERA} + \epsilon_p$$

Donde:

p	... observable pseudodistancia
ρ	... distancia real estación – satélite
dt, dT	... correcciones de las escalas de tiempo.
$d_{ATMOSFERA}$... efecto en distancia debido a la atmósfera
c	... velocidad de la luz en el vacío
ϵ_p	... corrección en distancia de carácter aleatorio (reflexión de la señal).

Las coordenadas de la estación, objeto de la resolución del problema geodésico, están implícitas en la distancia real satélite-receptor.

Fase Portadora

La medida de la fase de la portadora resulta de la comparación de la fase de la señal portadora recibida en el receptor y la generada por el oscilador de dicho receptor.

Las mediciones geodésicas de alta precisión efectuadas con GPS hacen uso de la fase portadora. La fase puede ser medida con suficiente precisión, llegando hasta milímetros. La fuente de error dominante se debe a la mala sincronía entre los relojes del satélite y del receptor. [3].

La alta precisión que ofrece esta observable es debida a la mayor frecuencia de la portadora con relación a los códigos emitidos, permite mayor precisión en la medida de la distancia receptor-satélite que la pseudodistancia aunque la medida de la fase está afectada por el desconocimiento del número de ciclos emitidos por el satélite hasta que el receptor adquiere la señal. Este número de ciclos desconocidos se denomina ambigüedad y es distinguible de la pérdida de ciclos producida por una interrupción en el seguimiento de la señal una vez ésta ha sido adquirida. Así, la medida de la fase total de la portadora emitida en un cierto instante consta de un número entero de ciclos, una parte fraccional de ciclo y la

mencionada ambigüedad. Teóricamente la fase total multiplicada por la correspondiente longitud de onda proporciona la distancia receptor-satélite y la ambigüedad habrá de ser resuelta para poder calcular las coordenadas del receptor. [3].

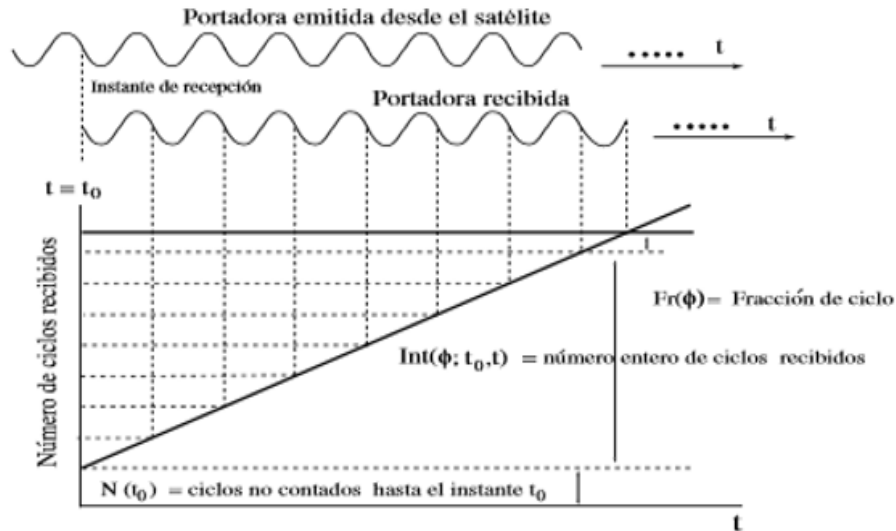


Fig. 2.4.2 Transmisión de la portadora en el tiempo.

Cálculo de la fase portadora (Φ): [3]

La señal emitida por los satélites GPS es una señal sinusoidal generada por el oscilador de dicho satélite. La frecuencia f de una señal de este tipo es la derivada de la fase ϕ de la señal y recíprocamente, la fase de la señal es la integral de la frecuencia:

$$f(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}, \phi(t) = \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau + \phi(t_0)$$

Siendo $\phi(t_0)$ la fase inicial, en ciclos, de la señal en el instante t_0 . El tiempo obtenido a partir de la fase medida de un oscilador vendrá dado por la función:

$$\Psi(t) = \frac{\phi(t) - \phi(t_0)}{f_0}$$

Donde f_0 es la frecuencia nominal del oscilador del satélite, es decir, la frecuencia no afectada por el efecto Doppler ni efectos relativistas producidos por el movimiento orbital del satélite.

Si la frecuencia del oscilador es constante e igual a su frecuencia nominal, entonces:

$$\phi(t) - \phi(t_0) = \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau = f_0(t - t_0)$$

De donde:

$$\Psi(t) = t - t_0 \Leftrightarrow t = \Psi(t) + t_0$$

Siendo t el tiempo exacto de la escala GPS y $\Psi(t)$ el tiempo calculado a partir de la fase medida. Si t_0 no fuese conocido, la función temporal Ψ definiría una escala relativa de tiempo GPS.

Veamos a continuación como podemos calcular el tiempo verdadero considerando que la frecuencia del oscilador no es constantemente igual a la frecuencia nominal, esto es, existirá una desviación Δf de la frecuencia con respecto a la frecuencia nominal:

$$f(t) = f_0 + \Delta f(t)$$

Por tanto:

$$\Psi(t) = \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau = \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t (f_0 + \Delta f(\tau)) d\tau = t - t_0 + \int_{t_0}^t \frac{\Delta f(\tau)}{f_0} d\tau.$$

La desviación de la frecuencia inducirá una desviación en el tiempo medido, que será:

$$\Delta\Psi(t) = \int_{t_0}^t \frac{\Delta f(\tau)}{f_0} d\tau,$$

Obteniendo, finalmente, una relación entre la escala de tiempo del oscilador y la escala de tiempo GPS:

$$\Psi(t) = t + \Delta\Psi(t) - t_0$$

Así pues, el tiempo que se obtiene a partir de la medida de la fase de un oscilador es igual a la suma del tiempo verdadero de la escala de tiempo, de un término correspondiente a la desviación frecuencia del oscilador con respecto a la frecuencia nominal del mismo y otro término que representa el efecto del desfase inicial, fase inicial no cero. Agrupando los dos últimos sumandos en un único término denominado error del oscilador, $d\Psi(t)$, podemos expresar que:

$$\Psi(t) = t + d\Psi(t)$$

Donde, al igual que en el caso anterior, $\Psi(t)$ es la escala de tiempo GPS definida por la medida de la fase del oscilador, t es la escala exacta y $d\Psi(t)$ es el error del oscilador. A efectos de notación, cuando consideremos el oscilador de un satélite k expresaremos:

$$t^k(t) = t + dt^k(t)$$

Y cuando sea el receptor i mediante:

$$t_i(t) = t + dt_i(t)$$

La fase total de la portadora consta de un número entero de ciclos:

$$Int(\varphi, t_0, t)$$

Contados desde el instante en que se recibe la señal t_0 hasta el instante t , una parte fraccional, $Fr(\varphi)$, referida al instante de adquisición de la señal y un número entero de ciclos, $N(t_0)$, desconocido correspondiente al intervalo de tiempo transcurrido desde que la señal fue emitida hasta que se adquiere en el receptor. Este número de ciclos desconocido, denominado ambigüedad inicial, es propio de cada satélite y cada receptor:

$$\varphi_{total} = Fr(\varphi) + Int(\varphi; t_0, t) + N(t_0)$$

Debido a la imposibilidad de saber el valor de la ambigüedad, la observable medida de la fase de la portadora es:

$$\varphi_{medida} = Fr(\varphi) + Int(\varphi; t_0, t)$$

Por tanto:

$$\varphi_{total} = \varphi_{medida} + N(t_0)$$

La fase de la portadora observada $\varphi_{medida} = \varphi_i^k$ se define como la diferencia entre la fase, φ_i , generada por el oscilador del receptor i en el instante de recepción de la señal y la fase, φ^k , de la señal generada por el satélite k en el instante de transmisión de dicha señal. En esta diferencia, denominada fase comparada, aparecerá en el instante de adquisición de la señal solamente la parte fraccional de la fase, y a partir de este instante se contará el número entero de ciclos que ocurren hasta que se produce el correspondiente cambio de frecuencia, efecto Doppler, debido al movimiento relativo del satélite con respecto a la Tierra. Así

$$\varphi_{medida} = \varphi_{ki} = \varphi_i(t) - \varphi^k(t - \tau_{ik})$$

estando ambas fases expresadas en ciclos y siendo φ_i la fase de la portadora generada en el receptor i -ésimo en el instante t y φ^k la fase generada en el k -ésimo satélite en el instante de transmisión $t - \tau_{ik}$, donde τ_{ik} es el tiempo que tarda la señal en recorrer la distancia satélite-receptor.

Teniendo en cuenta las expresiones anteriores:

$$\varphi_i(t) = f_0 t_i(t) + \varphi_i(t_0) = f_0(t + dt_i(t)) + \varphi_i(t_0), \quad \varphi^k(t - \tau_{ik}) = f_0(t - \tau_{ik} + dt^k(t - \tau_{ik})) + \varphi^k(t_0)$$

Por tanto, la fase de la portadora medida viene dada:

$$\varphi_i^k = f_0[\tau_{ik} + dt_i(t) - dt^k(t - \tau_{ik})] + [\varphi_i(t_0) - \varphi^k(t_0)]$$

Multiplicando por la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{c}{f_0}$$

Obtenemos la ecuación correspondiente a la fase medida de la portadora en unidades de longitud:

$$\lambda\phi_i^k = c\tau_i^k + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + \lambda[\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)]$$

De forma análoga al caso de la pseudodistancia, los términos $c\tau_i^k$ y $c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)]$ representan la distancia recorrida por la señal desde el satélite al receptor y el error existente en dicha magnitud correspondiente a los errores de los osciladores del receptor y del satélite, respectivamente. El término $\lambda[\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)]$ es la distancia que corresponde a la fracción de fase medida en el instante de recepción de la señal.

El índice de refracción para la ionosfera es:

$$n_\phi = 1 - \alpha \frac{D_e}{f^2},$$

Donde α es una constante, D_e es la densidad electrónica y f es la frecuencia de emisión.

Integrando esta expresión a lo largo del camino recorrido tenemos:

$$\rho_\phi^{ion} = \int (1 - \alpha \frac{D}{f^2}) ds = \rho^{ion} - d_{ion}.$$

Por tanto podemos sustituir en la expresión el término correspondiente a la distancia recorrida por la señal, obteniendo:

$$\lambda\phi_i^k = \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) - d_{ion} + d_{trop} + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + \lambda[\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)].$$

Consecuentemente, la ecuación de observación para la fase total de la portadora viene dada por:

$$\Phi_i^k(t) = \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) - d_{ion} + d_{trop} + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + \lambda[\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)] + \lambda N_i^k.$$

Realizando las siguientes consideraciones:

$$\Phi = \Phi_i^k(t)$$

$$\rho = \rho_i^k(t, t - \tau_i^k)$$

$$c(dt - dT) = c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)]$$

La ecuación de observación admite la expresión simplificada:

$$\Phi = \rho + c(dt - dT) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \epsilon.$$

Esta expresión es directamente comparable con la ecuación de observación obtenida para la pseudodistancia. Así, ρ es la distancia entre el satélite y el receptor, dt y dT son los errores de los osciladores del satélite y receptor, respectivamente.

2.5 Los archivos RINEX

Cuando se realiza una sesión de observación GPS por medio de los diversos receptores utilizados se arrojarán archivos de diferente tipo dependiendo la marca de estos, cada fabricante tiene su archivo nativo para depositar las mediciones u observaciones que registro el receptor durante la sesión de observación. Estos archivos nativos son también llamados archivos crudos o raw data.

Para unificar el formato de los datos obtenidos en una sesión de observación GPS se idearon e implementaron los archivos RINEX que son ficheros de texto donde se almacenan y ordenan estandarizadamente las medidas proporcionadas por el receptor.

Existen diferentes paquetes de software para convertir archivos nativos a archivos del formato RINEX.

Las siglas RINEX tienen el significado de Receiver INdependent EXchange, en inglés.

Hay tres tipos de extensiones para los tres diferente tipos de archivos RINEX. Los archivos de observación se denotan con la extensión .o y en estos se deposita la información de las señales recibidas. La extensión .n corresponde a archivos de navegación en donde encontramos datos orbitales e información sobre el satélite. Los archivos meteorológicos, a los que se les asigna la extensión .m son menos comunes, sin embargo, cuando son usados en el procesamiento tienden a mejorar la precisión, en estos archivos encontramos datos atmosféricos, principalmente ionosféricos y troposféricos.

Los tres tipos de archivos constan de una cabecera en donde se encuentran datos sobre la estación o vértice que se midió, el programa de compilación y la fecha en la que ocurrió la medición.

Los archivos RINEX de observación .o son de especial cuidado ya que en ellos se depositan todas las mediciones realizadas, y es de gran importancia entender e interpretar que

contiene o a que se refiere cada una de sus columnas. También es necesario poner especial atención en la cabecera. Estas dos recomendaciones son de gran utilidad al momento de comenzar con el procesamiento de los datos para obtener posiciones.

En la cabecera de los archivos .o encontramos el programa de compilación, el tipo de archivo, las señales que midió, la hora y fecha de inicio y fin de la sesión de observación, las coordenadas a priori del lugar, el nombre que se le asignó a la estación, el tipo y modelo de receptor con el que se recopilaron los datos, el tipo y modelo de antena que viene con el equipo de recepción y la altura de dicha antena.

En las columnas se encuentran la fecha, hora y las épocas de observación y en cada una de ellas, los satélites que fueron observados y la medición correspondiente de la señal.

```

      2
L2R2      Observation Data
bogo/     Leica Inc.           Mon 31 Aug 2009

1744257.4248 -6116115.3577 512481.9504
      0.0000      0.0000      0.0000
      1          1
      4          L1      C1      L2      P2
      10
2007      3      14      23      59      0.000000
2007      3      15      23      58      50.000000
      30
      1      2127      2127      2122      2122
      2      3147      3147      3146      3146
      .
      .
      .
      30      3419      3419      3417      3417
      31      3165      3165      3163      3163
      .
      .
      .
07 3 14 23 59 0.0000000 0 10 5 7 12 14 18 21 22 24 30 31
116817708.11308 22229666.966 91026767.17808 22229659.677
124434962.95707 23679184.651 96962296.52207 23679182.807
121895954.38408 23196023.983 94983837.92208 23196016.081
123369252.20307 23476379.668 96131872.77307 23476371.735
110063659.53709 20944415.612 85763864.62209 20944406.692
112398761.50708 21388776.392 87583414.41508 21388768.738
114391727.09609 21768014.715 89136381.62908 21768004.754
127163892.11306 24198494.627 99088714.35706 24198493.695
111862090.38009 21286642.269 87165253.67509 21286634.992
113415791.04908 21582288.308 88375963.85809 21582281.233
      .
      .
      .
07 3 15 23 58 50.0000000 0 9 5 7 12 14 18 21 22 30 31
117090670.21608 22281596.226 91239487.01708 22281588.528
124465787.30307 23685052.838 96986331.35707 23685049.001
122261192.41708 23265514.612 95268506.03408 23265506.292
123369805.11307 23476467.257 96132359.23707 23476458.772
109856379.83309 20904953.875 85602389.65709 20904944.818
113055732.72108 21513779.062 88095364.65908 21513770.390
113839691.41709 21662965.545 88706226.48208 21662955.252
111788301.74109 21272591.671 87107781.80808 21272583.993
113159416.44308 21533499.927 88176194.35909 21533491.421

```

Fig. 2.5.1 Ejemplo de archivo RINEX de observación (.o)

2.6 Correcciones troposférica y ionosférica

Corrección Troposférica

La Troposfera es la capa gaseosa de la atmósfera que se extiende desde la superficie terrestre hasta 15 km de altitud. En esta zona la temperatura decrece a medida que la altitud aumenta, siendo su característica principal la ausencia de iones libres. Esta neutralidad hace que la troposfera se comporte como un medio no dispersivo para señales electromagnéticas de frecuencias inferiores a 30 GHz., haciendo que la propagación sea independiente de la frecuencia. Consecuentemente, las velocidades de grupo y de fase son iguales haciendo que no sea necesario distinguir entre las correcciones troposféricas para las medidas de la fase de la portadora, caracterizada por la velocidad de fase, y para las medidas de pseudodistancia, caracterizadas por la velocidad de grupo pues son modulaciones de la señal portadora. [3].

Una consideración conceptual es que en la corrección troposférica también está englobado el efecto de la estratosfera, que aunque en mucho menor grado que la troposfera presenta idénticas características de neutralidad iónica que ésta. Por tanto, la corrección troposférica abarca la capa de la atmósfera desde la superficie terrestre hasta una altitud de 50 km. [3].

La corrección troposférica, intrínsecamente, depende de las condiciones meteorológicas existentes en la estación en el instante de la observación, siendo necesario aplicar modelos matemáticos que eliminen o disminuyan este efecto en las observaciones realizadas.

Los parámetros atmosféricos a partir de los cuales se establecen los diferentes modelos troposféricos son la temperatura, la humedad y la presión atmosférica. Y se debe calcular la refractividad del medio, en este caso la troposfera y estratosfera en función de las variables atmosféricas mencionadas.

Los modelos, de retrasos de la señal, troposféricos más comunes son: el Modelo de Hopfield, el Modelo de Hopfield modificado, y el modelo de Saastamoinen. [3].

Corrección Ionosférica

La ionosfera es la parte de la atmósfera, desde 50 km hasta 1000 km, y es caracterizada por un contenido electrónico e iónico suficiente para producir dispersiones en una señal electromagnética. Esta característica dispersiva de la ionosfera afecta de modo diferente a la partes portadora y modulada de la señal GPS, produciendo un retardo en la fase de la portadora y un adelanto en los códigos que modulan la señal. [3].

El efecto ionosférico disminuye a medida que aumenta la frecuencia de la señal y dependerá de factores como la variación del día y la noche, del lugar de observación, de la actividad solar, de la existencia de tormentas magnéticas y de la dirección de la señal, aumentando o disminuyendo el contenido total de electrones, (TEC), existentes en dicha capa. [3].

El hecho de que la ionosfera sea un medio dispersivo, produce variaciones dependientes de la frecuencia de emisión en las velocidades de grupo y de fase de la señal modulada y consecuentemente en el índice de refracción tanto de grupo como de fase. Entonces las medidas de distancia mediante la pseudodistancia, grupo, y la fase de la portadora, fase, vendrán dadas respectivamente por: [3]

$$\rho p = \rho_{medida} + d_{ion}$$

$$\rho \phi = \rho_{medida} - d_{ion}$$

El parámetro TEC, se puede tratar a partir de los coeficientes emitidos en el mensaje de navegación por medio de un modelo (modelo de Klobuchar) o mediante combinaciones de las frecuencias L1 y L2. [3].

Los observables GPS se obtienen, como se ha visto en la sección anterior, de las señales emitidas por los satélites, bien de la fase de portadora, bien de los códigos que la modulan. Debido a que la portadora L1 está modulada por los códigos P y C/A y la L2 solamente por el código P, en un instante determinado y en receptores capacitados para ello, tendremos los siguientes observables:

Fases de ambas portadoras, ϕ_{L1} , ϕ_{L2} y las pseudodistancias correspondientes $\rho_{L1,C/A}$, $\rho_{L1,P}$ y $\rho_{L2,P}$. A continuación se verá cómo podemos formar combinaciones de estos observables a fin de eliminar o reducir el efecto ionosférico, la ambigüedad o la pérdida de ciclos. [3].

La mencionada posibilidad de adquisición de ambas frecuencias permite que en un instante se disponga de dos ecuaciones de observación correspondientes a la fase de cada una de las portadoras y los consiguientes modelos de dobles diferencias y triples. Estas ecuaciones pueden combinarse de diferentes modos dando lugar a ecuaciones de observación relativas a las nuevas frecuencias definidas a partir de estas combinaciones lineales.

En general, una combinación lineal de las fases observadas de ambas frecuencias es:

$$\varphi = n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2,$$

Donde n_1 y n_2 son valores arbitrarios y ϕ_1 y ϕ_2 son las fases respectivas de L1 y L2.

Puesto que:

$$\varphi_i = f_i t$$

La frecuencia y la longitud de onda de la combinación lineal establecida vendrán dadas por:

$$f = n_1 f_1 + n_2 f_2, \quad \lambda = \frac{c}{f}.$$

El efecto ionosférico como combinación lineal será:

$$\Delta\rho^{ion} = n_1 \Delta\rho_{L1}^{ion} + n_2 \Delta\rho_{L2}^{ion}$$

La combinación lineal de bandas ionosfera libre para el retardo temporal ionosférico se establece asignando a los coeficientes de la combinación lineal los valores:

$$n_1 = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 + f_{L2}^2}, \quad n_2 = \frac{f_{L1} f_{L2}}{f_{L1}^2 + f_{L2}^2}.$$

Esta combinación elimina el retardo temporal en primer orden, pero introduce un ruido en la medida tres veces mayor que el inherente a la señal L1, por lo que en distancias cortas es preferible utilizar datos de esta frecuencia desestimando la combinación lineal ionosfera libre. Asimismo, para la distancia geométrica la combinación lineal ionosfera libre toma los valores

$$n_1 = 1, \quad n_2 = -\frac{f_{L2}}{f_{L1}}.$$

En este caso a la señal resultante se le denomina L3.

2.7 Efemérides, parámetros de rotación y carga oceánica

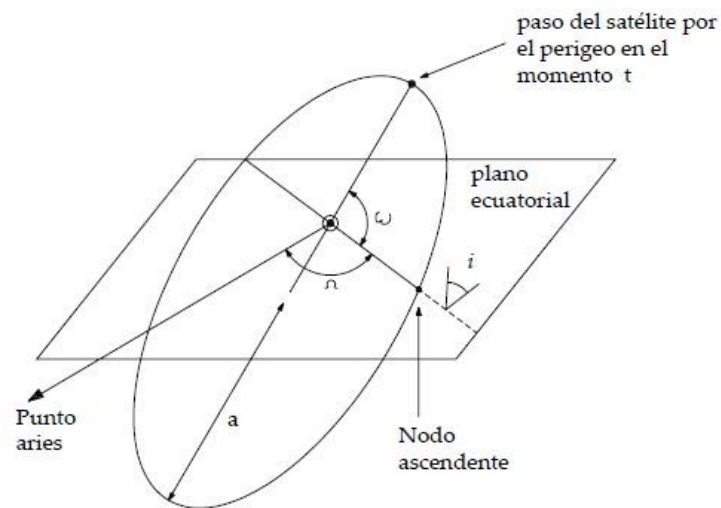
Efemérides y parámetros

Para resolver el problema del posicionamiento de un punto en el cual un receptor capta información, se debe resolver el modelo vectorial formado por el receptor, el centro de la Tierra y el satélite GPS. Para esto será necesario conocer a priori el vector geocentro-satélite para a partir de la observación receptor-satélite poder determinar el vector geocentro-receptor, vector que conlleva implícitamente las coordenadas absolutas del receptor. [3].

El vector geocentro-satélite establecido mediante las coordenadas cartesianas del satélite, se determina a partir de sus elementos orbitales y sus variaciones temporales, denominados efemérides del satélite.[3].

La información correspondiente al funcionamiento del satélite se encuentra en los llamados datos de almanaque que son datos transmitidos por un satélite GPS los cuales incluyen información de la órbita de todos los satélites, corrección de reloj y parámetros de retraso atmosférico. [15].

Los elementos keplerianos son usados para describir la posición de los satélites en el espacio, estos son seis parámetros y se refieren a elementos de un sistema de coordenadas en geodesia que permite la ubicación. Los 6 parámetros son: ascensión recta del nodo ascendente, la inclinación, la orientación, el semieje mayor del elipsoide de referencia, la excentricidad del elipsoide de referencia y, el argumento del perigeo. Tres de los parámetros son elementos celestes de un sistema inercial mientras que los otros tres están referidos al elipsoide, los cinco primeros elementos son constantes mientras el argumento del perigeo está en función del tiempo. [3], [15].



1° Ω Ascensión recta del nodo ascendente

2° i Inclinación

3° ω , Orientación

4° a , Semieje mayor

5° e , Excentricidad

6° t , momento del paso por perigeo.

Parámetros orbitales Keplerianos

Fig. 2.7.1 Elementos keplerianos

Estos datos se usan para facilitar un rastreo rápido de satélites. La información de órbita es una subserie de efemérides con precisión reducida.

Las coordenadas de los satélites GPS pueden obtenerse a partir de las efemérides transmitidas en el mensaje de navegación, efemérides emitidas, o a partir de efemérides que con mayor precisión son proporcionadas por diversas instituciones, efemérides precisas.

Las efemérides emitidas están basadas en observaciones de pseudodistancia de los satélites GPS realizadas por las estaciones del Segmento de Control y calculadas, mediante integración orbital, y transmitidas a los satélites por la estación principal del sistema. Estas coordenadas tienen una precisión de 5 a 10 metros, siendo accesibles en tiempo real, puesto que son transmitidas por los satélites en su mensaje de navegación.

Las efemérides emitidas son predichas para un período entre 12 y 36 horas y están referidas al elipsoide de referencia WGS-84.

Las efemérides precisas se basan en observaciones realizadas por redes de seguimiento y calculadas por diversas instituciones, la extensión que se les asigna a los archivos que contienen efemérides es .sp3.

El Servicio Internacional GNSS (IGS) es un organismo perteneciente a la NASA y está encargado de suministrar diversos productos para los usuarios del GPS, tal es el caso de las efemérides precisas.

Debido a que se requiere calcular una posición sobre la Tierra pero de manera global otros parámetros que es necesario conocer son: parámetros de rotación terrestre como nutación y precesión, valores de carga oceánica, marea terrestre y presión de radiación. Es necesario considerar lo anterior por que las observaciones están referidas a un polo medio.

Geometría de los satélites y Dilución de la precisión

La geometría que presentan los satélites observados simultáneamente es un factor importante en el cálculo de las coordenadas absolutas de la estación. El efecto de la configuración geométrica de los satélites está expresado por la dilución de la precisión o factor DOP.

El factor DOP es un escalar que representa la contribución de la configuración geométrica a la precisión del posicionamiento. En las incógnitas de los modelos anteriores, pseudodistancia y fase de la portadora, intervienen tanto las coordenadas cartesianas de la estación como el error existente en el oscilador de dicho receptor, y puesto que en ambos modelos las incógnitas se calculan simultáneamente, la configuración de los satélites

afectará tanto a las coordenadas cartesianas obtenidas como al error estimado del oscilador. [24].

El factor DOP se denominará de diversos modos según la incógnita particular, o combinación de incógnitas que elijamos. Así, se tendrán: [3].

<i>VDOP</i> ...	Desviación típica para la altura (vertical)
<i>HDOP</i> ...	Precisión en el posicionamiento horizontal (bidimensional)
<i>PDOP</i> ...	Precisión en el posicionamiento absoluto (tridimensional)
<i>TDOP</i> ...	Desviación típica del tiempo del receptor
<i>HTDOP</i> ...	Precisión en el posicionamiento horizontal y tiempo
<i>GDOP</i> ...	Precisión en el posicionamiento absoluto y tiempo

Es común que el factor DOP se identifique con el parámetro GDOP, puesto que éste, jerárquicamente, engloba a todos los demás.

Los valores pequeños de dichos parámetros indicarán una buena distribución en la geometría de los satélites observados y consiguientemente se obtendrán errores pequeños en la posición y tiempo estimados.

Los parámetros anteriores se definen como: [3].

$$\begin{aligned}
 GDOP &= \sqrt{\sigma_{XX}^2 + \sigma_{YY}^2 + \sigma_{ZZ}^2 + \sigma_{tt}^2} \\
 HDOP &= \sqrt{\sigma_{XX}^2 + \sigma_{YY}^2}, \\
 VDOP &= \sigma_{ZZ}, \\
 PDOP &= \sqrt{\sigma_{XX}^2 + \sigma_{YY}^2 + \sigma_{ZZ}^2}, \\
 TDOP &= \sigma_{tt}.
 \end{aligned}$$

2.8 Instrumentación (máscara de elevación y multipath)

Dependiendo de la aplicación de GPS que necesite será la instrumentación que se implementará, así bien si solo se requiere el GPS para una situación de navegación el equipo será un navegador. [24].

Sin embargo cuando se necesita llevar a cabo un levantamiento geodésico que requiere una gran precisión se necesitara implementar una estación de observación, donde se instalará un equipo receptor GPS, este consta de una base (tripié si es temporal o edificación si es fija), una antena que va sobre la marca geodésica, y dispositivo para interactuar con el usuario, mediante el cual se programa, inicializa y finaliza la sesión de observación, y una memoria para almacenar las mediciones en forma de archivos digitales.

Las estaciones de observación, lugar donde se instala un receptor GPS y del cual se obtendrá su posición, requieren cierto grado de control y cuidado cuando se solicitan precisiones altas. Dos factores, que están relacionados entre sí, para tener un adecuado control de la observación y evitar errores debido a la instrumentación son la máscara de elevación y el efecto multipath.

El efecto multipath se refiere a la recepción de una señal satelital a lo largo de una ruta directa y a lo largo de una o más rutas reflejadas. Las señales reflejadas son causadas por las superficies reflectantes cerca de la antena GPS. Resultados de la señal en una medición de pseudodistancia incorrecta. Para evitar esto la antena de la estación de observación debe tener una máscara de elevación adecuada, dependiendo del lugar y las condiciones de la estación de observación esta será asignada al momento de programar la sesión de observación.

La máscara de elevación pues es el ángulo por debajo del cual no serán rastreados los satélites. Normalmente se elige un valor de 15° para prevenir los problemas de interferencia causados por construcciones, árboles y multipath. [3].

2.9 Simples, dobles y triples diferencias. Solución de la ambigüedad

Los modelos de pseudorange y fase portadora son suficientes para posicionamientos absolutos que no requieren altas precisiones, navegación, topografía. En Geodesia, donde se requieren grandes precisiones, es necesario recurrir al posicionamiento relativo entre las estaciones que conforman una red geodésica, para a partir del establecimiento de estaciones fijas dotar a todas las estaciones de la red de coordenadas absolutas. [3].

El posicionamiento relativo consiste en la determinación del azimut, de la distancia relativa y de la diferencia en altura, o también los incrementos en las coordenadas cartesianas geocéntricas, entre las estaciones que conforman la red geodésica. El Sistema de Posicionamiento Global permite resolver este problema mediante la observación simultánea desde varias estaciones de la señal emitida por los satélites del sistema. [3].

Los métodos de simples, dobles y triples diferencias eliminan o reducen muchos de los efectos que limitan al GPS y proporcionan muy buenas precisiones.

Estos métodos se basan en la construcción de diferencias entre las medidas realizadas en diferentes estaciones o de diferentes satélites en un mismo instante o en instantes sucesivos.

Recordemos que el modelo simplificado para la fase observada por el receptor i del satélite k en el instante t viene dado por: [3]

$$\phi_i^k(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_i^k(t) + f^k [dt^k(t) - dT_i(t)] + N_i^k + \frac{1}{\lambda} [d_{trop}(t) - d_{ion}(t)]$$

Donde ϕ es la fase total, número entero de ciclos más la parte fraccional de ciclo medida en el instante de adquisición de la señal, ρ es la distancia geométrica satélite-receptor, $dt(t)$ y $dT(t)$ las desviaciones de los osciladores del satélite y del receptor, con respecto al tiempo GPS en el instante t , N es la ambigüedad en el instante de recepción de la señal y d_{ion} y d_{trop} son los efectos ionosférico y troposférico, respectivamente.

Simple diferencias: [3]

Las simples diferencias entre receptores se establecen a partir de la diferencia de fase obtenida mediante la observación simultánea de un mismo satélite k desde dos estaciones i y j .

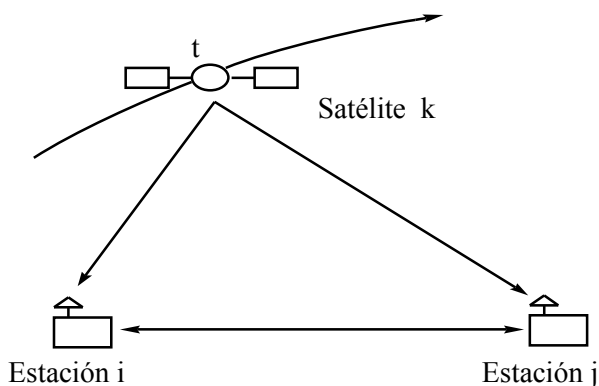


Fig. 2.9.1 Simple diferencias

Las ecuaciones de observación para cada estación vienen dadas por:

$$\begin{aligned}\phi_i^k(t) &= \frac{1}{\lambda}\rho_i^k(t) + f^k [dt^k(t) - dT_i(t)] + N_i^k + \frac{1}{\lambda} [d_{trop,i}^k(t) - d_{ion,i}^k(t)], \\ \phi_j^k(t) &= \frac{1}{\lambda}\rho_j^k(t) + f^k [dt^k(t) - dT_j(t)] + N_j^k + \frac{1}{\lambda} [d_{trop,j}^k(t) - d_{ion,j}^k(t)]\end{aligned}$$

De donde:

$$\begin{aligned}\phi_j^k(t) - \phi_i^k(t) &= \frac{1}{\lambda} [\rho_j^k(t) - \rho_i^k(t)] + N_j^k - N_i^k - f^k [dT_j(t) - dT_i(t)] \\ &\quad - \frac{1}{\lambda} [d_{ion,j}^k(t) - d_{ion,i}^k(t)] + \frac{1}{\lambda} [d_{trop,j}^k(t) - d_{trop,i}^k(t)].\end{aligned}$$

Haciendo un cambio de notación:

$$\phi_{i,j}^k(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{i,j}^k + N_{i,j}^k - f^k dT_{i,j}(t) - \frac{1}{\lambda}d_{ion,i,j}^k + \frac{1}{\lambda}d_{trop,i,j}^k$$

Este modelo está afectado por la ambigüedad en el instante inicial en ambos receptores, por el efecto ionosférico y troposférico y las desviaciones de los osciladores de los receptores i y j . Sin embargo elimina el error en el oscilador del satélite con respecto al tiempo GPS y para estaciones próximas también ocurrirá lo mismo con las correcciones ionosférica y troposférica.

Un caso análogo es la construcción de las simples diferencias de observaciones realizadas simultáneamente de dos satélites k y l diferentes desde una misma estación i . El proceso de obtención de este modelo es análogo al realizado anteriormente obteniéndose:

$$\phi_i^{k,l}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_i^{k,l} + N_i^{k,l} + f^k dt^k(t) + f^l dt^l(t) - \frac{1}{\lambda}d_{ion,i}^{k,l} + \frac{1}{\lambda}d_{trop,i}^{k,l}$$

La ventaja de este modelo es la eliminación del término correspondiente al error del oscilador del receptor.

Dobles diferencias: [3]

Este modelo se establece mediante diferencias de simples diferencias obtenidas a partir de observaciones de dos satélites k y l desde dos estaciones i y j en el mismo instante t .

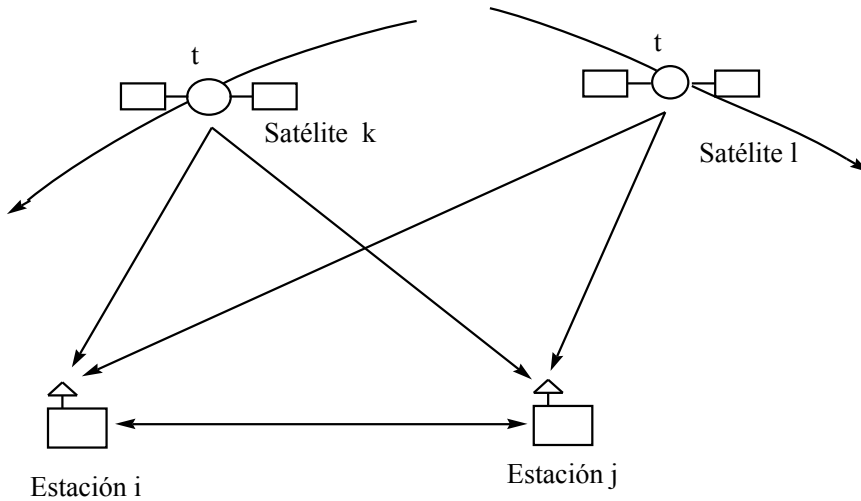


Fig. 2.9.2 Dobles diferencias

Para cada satélite observado desde ambas estaciones las simples diferencias vienen dadas por:

$$\begin{aligned}\phi_{i,j}^k(t) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^k(t) + N_{i,j}^k - f^k dT_{i,j}(t) - \frac{1}{\lambda} d_{ion,i,j}^k(t) + \frac{1}{\lambda} d_{trop,i,j}^k(t) \\ \phi_{i,j}^l(t) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^l(t) + N_{i,j}^l - f^l dT_{i,j}(t) - \frac{1}{\lambda} d_{ion,i,j}^l(t) + \frac{1}{\lambda} d_{trop,i,j}^l(t).\end{aligned}$$

Las dobles diferencias se obtienen restando las simples diferencias definidas anteriormente, con la hipótesis de que la frecuencia de emisión de ambos satélites es igual:

$$\begin{aligned}\phi_{i,j}^l(t) - \phi_{i,j}^k(t) &= \frac{1}{\lambda} \left[\rho_{i,j}^l(t) - \rho_{i,j}^k(t) \right] + N_{i,j}^l - N_{i,j}^k \\ &\quad - \frac{1}{\lambda} \left[d_{ion,i,j}^l(t) - d_{ion,i,j}^k(t) \right] + \frac{1}{\lambda} \left[d_{trop,i,j}^l(t) - d_{trop,i,j}^k(t) \right]\end{aligned}$$

Haciendo nuevamente un cambio de notación:

$$\phi_{i,j}^{k,l}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^{k,l}(t) + N_{i,j}^{k,l} - \frac{1}{\lambda} d_{ion,i,j}^{k,l}(t) + \frac{1}{\lambda} d_{trop,i,j}^{k,l}(t)$$

Mediante el uso de este modelo se eliminan las desviaciones de los osciladores de los receptores con respecto a la escala de tiempo GPS debido a las hipótesis de observaciones simultáneas e iguales frecuencias de emisión en cada satélite, aunque sigue presentando el error debido a la ambigüedad inicial en ambas estaciones y las correcciones ionosféricas y troposféricas.

Triplas diferencias: [3]

Este modelo se basa en la diferencia de dobles diferencias establecidas entre dos estaciones y dos satélites y entre una época y la siguiente

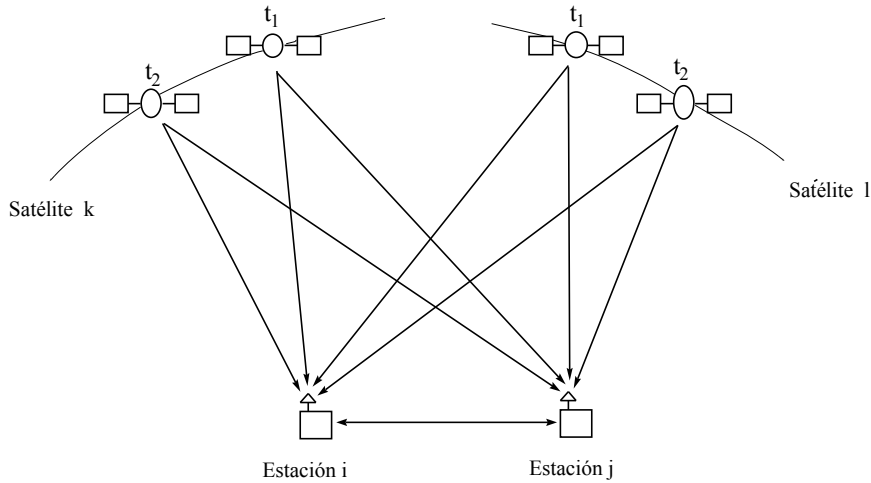


Fig. 2.9.3 Triples diferencias

Así, las dobles diferencias en los instantes t_1 y t_2 vienen dadas por:

$$\begin{aligned}\phi_{i,j}^{k,l}(t_1) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^{k,l}(t_1) + N_{i,j}^{k,l} - \frac{1}{\lambda} d_{ion,i,j}^{k,l}(t_1) + \frac{1}{\lambda} d_{trop,i,j}^{k,l}(t_1) \\ \phi_{i,j}^{k,l}(t_2) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^{k,l}(t_2) + N_{i,j}^{k,l} - \frac{1}{\lambda} d_{ion,i,j}^{k,l}(t_2) + \frac{1}{\lambda} d_{trop,i,j}^{k,l}(t_2).\end{aligned}$$

Por tanto, la diferencia de estas dobles diferencias será:

$$\begin{aligned}\phi_{i,j}^{k,l}(t_2) - \phi_{i,j}^{k,l}(t_1) &= \frac{1}{\lambda} \left[\rho_{i,j}^{k,l}(t_2) - \rho_{i,j}^{k,l}(t_1) \right] - \frac{1}{\lambda} \left[d_{ion,i,j}^{k,l}(t_2) - d_{ion,i,j}^{k,l}(t_1) \right] \\ &\quad + \frac{1}{\lambda} \left[d_{trop,i,j}^{k,l}(t_2) - d_{trop,i,j}^{k,l}(t_1) \right].\end{aligned}$$

Haciendo el cambio de notación:

$$\phi_{i,j}^{k,l}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^{k,l}(t_{12}) - \frac{1}{\lambda} d_{ion,i,j}^{k,l}(t_{12}) + \frac{1}{\lambda} d_{trop,i,j}^{k,l}(t_{12})$$

Como podemos observar en la expresión de este modelo, una de sus grandes ventajas es que se eliminan las ambigüedades iniciales. Además, las triples diferencias no están

afectadas por cualquier interrupción que se produzca en la recepción de la señal y la consiguiente pérdida de ciclos.

Solución de la ambigüedad

Para el caso, por ejemplo, de las dobles diferencias donde la solución de la ambigüedad sigue siendo un problema, se tiene que esta se puede resolver por otro método.

La resolución de la ambigüedad cuando disponemos de receptores de dos frecuencias puede efectuarse mediante la combinación banda ancha de éstas [3]. Así:

$$\phi_{BA} = \phi_{L1} - \phi_{L2},$$

Y con la siguiente ecuación de combinación:

$$N_{L1} = \frac{f_{L1}}{f_{BA}} \phi_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{BA}} (\phi_{L2} + N_{BA}) - \left(\frac{\rho}{c} + (dt - dT) \right) (f_{L1} + f_{L2})$$

Que se denomina ecuación ionosfera-libre para el cálculo de la ambigüedad N_{L1} . De igual modo se obtendría una expresión análoga para la ambigüedad N_{L2} .

2.10 Métodos de posicionamiento, el método Estático aplicado a monitoreo de subsidencia.

El principal objetivo del GPS es proporcionar coordenadas absolutas (posicionar) a estaciones situadas en la Tierra o bien en el espacio terrestre. Según la precisión que requiera y el tipo de levantamiento, ya sea dinámico o estático, se utilizan diversos métodos de posicionamiento.

El posicionamiento absoluto se refiere a un aparato receptor que recibe información de por lo menos cuatro satélites para poder posicionarse, la precisión que ofrece este método no es muy buena.

El posicionamiento relativo requiere de al menos dos estaciones que observen al mismo tiempo más de 4 satélites para posteriormente realizar los ajustes necesarios para eliminar errores y obtener precisiones de hasta milímetros.

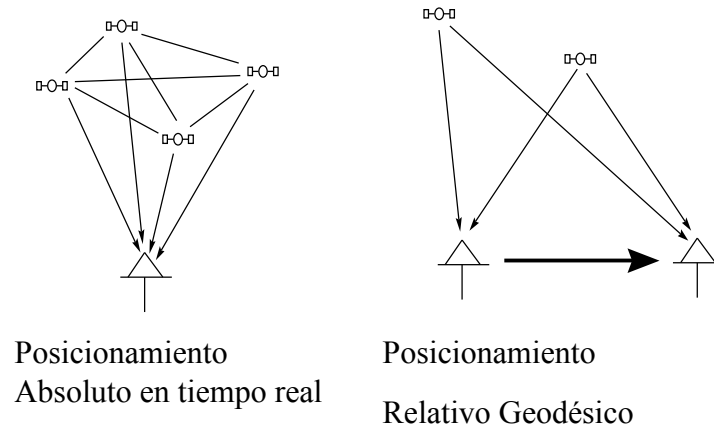


Fig. 2.10.1 Tipos de posicionamiento

El método natural del GPS consiste en posicionar en tiempo real estaciones móviles terrestres, marítimas o aéreas. Este posicionamiento absoluto se suele denominar solución de navegación y proporciona unas coordenadas cuya precisión depende, principalmente, del código aleatorio que el receptor a bordo del móvil sea capaz o esté autorizado a adquirir.

Para evitar esta dependencia de los códigos se idearon métodos consistentes en observaciones simultáneas de satélites que proporcionan posicionamientos relativos entre las estaciones de observación. Entre estos, destacan los métodos estático y cinemático.

El método cinemático se ocupa de la determinación de coordenadas, en instantes sucesivos, de posiciones ocupadas por un móvil terrestre, marítimo o aéreo. Este método consiste en una estación fija de coordenadas conocidas y un receptor a bordo del objeto móvil.

El método estático consiste en realizar observaciones de los satélites GPS con receptores estacionados en vértices geodésicos. Este método requiere un post proceso. A partir de estas observaciones se obtienen posicionamientos relativos entre las estaciones y considerando conocidas las coordenadas absolutas de al menos una de ellas, llamadas estaciones fijas, se determinan las coordenadas de las demás, siendo las estaciones móviles. Para considerar conocidas las coordenadas absolutas de una estación se han implementado Redes geodésicas mundiales, como la de IGS, nacionales, como la de INEGI en México o bien algún usuario puede implementar su propia Red según las necesidades que requiera satisfacer. Las estaciones pertenecientes a estas Redes se denominan fijas.

Estas redes sirven de apoyo para los diversos proyectos en los que el método de posicionamiento GPS estático es un insumo.

Tal es el caso de monitoreo de subsidencia del terreno, en donde se pretende conocer con mucha precisión la posición de una marca relativamente fija durante un periodo prolongado de tiempo. El posicionamiento relativo garantiza la precisión deseada mientras que el método estático nos dice la posición de cierta marca establecida y que será movida por el usuario, si no por diversos factores, es decir el conocimiento del movimiento de esta marca es la finalidad deseada.

2.11 Aplicaciones del método Estático y ejemplos de proyectos.

Entre las características del método estático se encuentran:

- Medición clásica de líneas base
- Se usa en distancias largas con eficiencia.
- Ofrece precisión de hasta milímetros.
- Los tiempos de observación son prolongados
- Es un método estándar para distancias superiores a 50 km.
- Actualmente es más económico que los métodos geodésicos tradicionales.

Por tales razones se aplica para:

- Control geodésico
- Establecer redes Nacionales e Internacionales
- Control de movimientos tectónicos
- Monitoreo de subsidencia.
- Control de deformación provocada por diversos fenómenos como vulcanismo
- Monitoreo y seguimiento de movimientos variables biológicas e hidrológicas.
- Conocimiento de las condiciones geográficas y sociales del entorno.
- Apoyo para localización en geología y geomorfología
- Investigar la disponibilidad de infraestructura
- Creación de redes locales para apoyo específico.

Capítulo 3. Implementación de métodos geodésico-espaciales para monitoreo de desplazamiento

3.1 Instrumentación adecuada en el lugar.

Al momento de realizar una sesión de observación GPS es necesario hacer una delimitación, debemos establecer los objetivos de la observación y cuál es el propósito de los datos que se recopilarán. La delimitación consiste en plantear para que se requiere dicha observación, es decir el objetivo, pues dependiendo de esto se elegirá la zona ideal para establecer la estación y también se realizará la instrumentación adecuada. [3].

Una observación GPS consiste en la puesta en estación de la instrumentación indicada, realizar el seguimiento de satélites determinando la planificación, almacenar en la memoria sólida del receptor y recabar los datos obtenidos para posterior análisis y procesado de los mismos.

En la instrumentación utilizada en el seguimiento de satélites GPS se puede distinguir entre equipos receptores y equipos auxiliares. El equipo receptor, elemento principal de la observación, se encarga de la adquisición de la señal procedente de los satélites y almacenamiento de los datos observados. Está formado por una antena con preamplificador de tratamiento de la señal, dispositivo de almacenamiento de datos y cables calibrados de baja pérdida. Los equipos auxiliares permiten el funcionamiento del equipo receptor y conexiones para el traslado de datos. [3].

Para evaluar el modelo troposférico en toda observación es necesario disponer de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa, así dispondremos de estos datos para programar nuestros equipos y que nuestros modelos sean los mejores para que contribuyan a arrojar buenos resultados. Entonces dentro de los equipos auxiliares también se encuentran en su caso estaciones meteorológicas o aparatos de medición meteorológica.

Los equipos con los que se cuenta en las estaciones de monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en la zona oriente del Distrito Federal son equipos de medición GPS del fabricante TRIMBLE.

En las estaciones denominadas CCHO y FESZ los receptores son modelo TRIMBLE 4000SSE con código TRMSSE y las antenas son el modelo TRM14532.00 con código TRMSST.

En las estaciones IZT1 e IZT2 los receptores son el modelo TRIMBLE NETR9 con código TRNTR9, mientras que las antenas son el modelo TRM57971.00 con código TRMZGS.

El domo es un aditamento que se puede adaptar a las antenas para que las señales que éstas reciben tengan mejor calidad, por ejemplo algunos domos disminuyen la entrada de señales afectadas por el efecto multipath, sin embargo cuando las estaciones no cuentan con una antena con domo se pueden modificar otros parámetros al momento de la observación como restringir la entrada de señales de mala calidad modificando la máscara de elevación, establecer el lugar de la observación en lugares amplios y con visibilidad adecuada, etc. Las cuatro estaciones del oriente del Distrito Federal cuentan con antena sin domo.

En el caso del uso del GPS para monitoreo de deformación horizontal y subsidencia es necesario que las estaciones de observación implementadas sean fijas por lo que existen dos requerimientos básicos: el diseño adecuado de la red de estaciones de monitoreo y en cada estación la construcción de la monumentación adecuada.

Cuando se requiere que las estaciones de observación sean fijas o de carácter permanente la monumentación que se debe de implementar debe de ser visible e inamovible del sitio donde se construya. Bloques o columnas de concreto son recomendados para colocar ahí las marcas geodésicas.

El diseño de una red para monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal debe reunir una serie de características entre las que se encuentra una buena distribución de puntos de los que se obtendrá la información, disponibilidad para establecer la estación en ese sitio, y que sean puntos cuya información satisfaga las necesidades del problema a resolver.

Las cuatro estaciones del oriente del Distrito Federal cumplen los tres requisitos mencionados en el párrafo anterior en cuanto a ubicación geográfica.

3.2 Ubicaciones estratégicas geológica, meteorológica y socialmente adecuadas.

Además de cumplir con los requisitos de una buena ubicación espacial, una estación de observación para monitoreo de subsidencia y deformación horizontal debe tener otras características o bien cumplir con tres requisitos de ubicación estratégica.

La ubicación estratégica consiste en la geología del lugar de la observación, las condiciones meteorológicas a las que se encuentre sometida la estación y el contexto social en donde de proponga establecerla.

Cuando, en ocasiones, no se pueda cumplir en un cien por ciento con todos los requerimientos de ubicación de las estaciones de observación es necesario tomar en consideración y tener presente aquellos factores que no se pudieron satisfacer para ubicar adecuadamente la estación, así se puede brindar cierto control durante la sesión de observación.

El primer factor de ubicación estratégica es considerar la geología del lugar sobre el cual se pondrá la marca geodésica de la estación de observación, esto es de vital importancia y requiere un poco de cuidado dado que va ampliamente relacionado con la interpretación que se le dará a los datos obtenidos de realizar observaciones en dicho lugar.

Se recomienda que el lugar para colocar una estación sea estable y dependiendo de la finalidad que se le vaya a dar a la observación cuidar los fenómenos geológicos, por ejemplo si existen fallas o fracturas cercanas o incluso si observar el comportamiento de estas es el fin de la observación, o saber la composición del material sobre el cual está la marca para detallar resultados de las observaciones.

La ubicación estratégica en cuanto a condiciones meteorológicas también es indispensable controlarla y conocerla, ya que sabiendo las condiciones climáticas de la región se podrá decidir cómo implementar una estación en dicho lugar.

Las variables ambientales a las que generalmente están expuestas las estaciones son el viento, la lluvia y otro tipo de precipitaciones, altas o bajas temperaturas y el Sol.

La variable viento puede influir en nuestra estación cuando causa un desajuste o movimiento en los aparatos de medición, generalmente en la antena, por ello para impedirlo es recomendable proteger la antena de corrientes de viento fuertes que puedan afectarla y por lo tanto brindar datos erróneos.

La lluvia y precipitaciones en forma de granizo y nieve también pueden llegar a dañar nuestros aparatos, nuevamente la antena, cables, y el receptor, cuando este se encuentre expuesto. Si se sabe que el lugar donde se encontrará la estación tiene un clima lluvioso o presenta temporadas de lluvias también será necesario que la estación cuente con protección para el equipo contra estos fenómenos, por ejemplo algún tipo de techo algún implemento de protección contra el agua.

Generalmente los equipos GPS están diseñados, como todo equipo de trabajo de campo, para ser resistentes ante los cambios de temperatura, sin embargo, cuando una estación debe funcionar por un largo de tiempo ininterrumpido será necesario primeramente monitorear la variaciones de temperatura para programar correctamente el equipo y secundariamente se debe proteger al equipo por medio los aditamentos necesarios para que el desgaste que éste sufra no sea tan rápido e implique costes económicos posteriores por tener que reponer o reemplazar el equipo.

La exposición prolongada de los equipos al Sol puede ocasionar daños en periodos prolongados por lo que es recomendable tener esto en cuenta y contemplar el tiempo de funcionamiento óptimo de los equipos.

Las condiciones sociales del lugar en el que se encuentre una estación de observación son muy importantes para determinar también como se construirá esta. Si se sabe que la zona donde se ubicara la estación tiene fama o es conocida porque ahí suceden actos de delincuencia o vandalismo se deben tomar las precauciones necesarias.

Ubicación específica de las estaciones GPS para monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal



Fig. 3.2.1 Mapa donde se muestra la ubicación específica de las estaciones IZT1, IZT2, CCHO y FESZ, mismas que conforman la Red Geodésica de monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal. Estas estaciones cumplen con los requisitos de ubicación geográfica y estratégica.

El equipo que se usa para hacer mediciones de GPS es costoso por lo tanto se debe proteger, y para esto es necesario que la estación donde se encontrará el equipo esté libre de vandalismo, ya sea que este vigilada o que simplemente se encuentre en algún lugar resguardado.

Algunas consecuencias graves de que la estación sufra vandalismo son: robo total o parcial del equipo, robo de aditamentos como memorias y cables, interrupción de las sesiones de observación, destrucción de la edificación o monumento y por lo tanto de la marca geodésica, daños generales a la estación como grafitis o deterioro por alojar basura en el lugar.

Si la estación de observación se encontrara en algún lugar de extrema convivencia con agentes biológicos también se debe de proteger de por ejemplo que la fauna local destruya la estación, o de que las plantas de la región deterioren el equipo y la construcción.

Las cuatro estaciones del oriente del Distrito Federal para monitoreo de subsidencia y deformación horizontal cumplen con los tres requisitos de la ubicación estratégica adecuada. Así también, retomando el tema anterior, las estaciones cumplen con las tres condiciones de ubicación geográfica adecuada. La ubicación específica de las estaciones de monitoreo se muestra en el mapa de la figura 3.2.1.

Es necesario señalar que no hay ninguna receta o manual para establecer una estación de observación, cuando esto suceda solo se debe de tener cierto control y vigilancia en la estación, ya que las amplias aplicaciones que tiene la observación de GPS en Geodinámica abren una amplia gama de condiciones a considerar para el establecimiento de las estaciones y por lo tanto de métodos para que la Red Geodésica con aplicación a monitoreo de subsidencia y deformación horizontal funcione adecuadamente y proporcione información de calidad.

Dado que no existe en forma estricta una manera de cumplir los requisitos de ubicación estratégica y esto solo son recomendaciones que valdría la pena cumplir, es destacado decir que las estaciones del oriente del Distrito Federal se ubican según la geología del lugar en un lugar inestable, sin embargo, el movimiento causado por la inestabilidad del terreno es lo que se pretende medir, cuantificar y monitorear.

La ubicación estratégica en cuanto a variables meteorológicas es adecuada en las cuatro estaciones ya que el Distrito Federal posee un clima templado con una temporada de lluvias que no afecta o descompone el equipo y el viento tampoco puede llegar a dañar la instalación del mismo.

En el Distrito Federal es sabido que frecuentemente ocurren actos vandálicos es por eso que las estaciones de observación se encuentran en lugares resguardados y vigilados, como escuelas y dependencias, por lo tanto el equipo y la estación en general está protegido de cualquier acto humano vandálico.

3.3 Elección del software para procesar datos.

Dentro de la implementación de los métodos de Geodesia espacial por medio de GPS para monitorear subsidencia y deformación horizontal se encuentra el realizar un meticuloso análisis para realizar un post proceso con los datos.

El post proceso es necesario ya que el método de observación para la problemática del oriente del Distrito Federal requiere de éste.

El post proceso es un tratamiento que se le debe dar a los datos observados en primera instancia para convertirlos en información útil y posteriormente dar una interpretación a estos datos para brindar una solución a la problemática y cumplir el objetivo de realizar un monitoreo.

La elección de un software confiable, eficiente, robusto y eficaz, para el procesamiento de información geodésica con una interpretación geodinámica, es complicado ya que existen varios software que realizan este proceso.

Aunque la variedad de software tiene diferentes características, opciones o métodos, su finalidad es el procesamiento de información geodésica para construir modelos, mapas, gráficas, series o diferentes productos que sean insumo para resolver problemas a través de la toma de decisiones. A estos productos posteriormente se les puede dar una interpretación y finalmente se llegarán a establecer conclusiones sobre los procesos geodinámicos que suceden.

Existen en el mundo diferentes instituciones o asociaciones dedicadas al estudio de las Ciencias de la Tierra y Espaciales y múltiples son los proyectos que se realizan actualmente en estas instituciones en materia de Geodesia.

Una entidad de investigación que actualmente desarrolla proyectos haciendo uso de Geodesia es UNAVCO.

UNAVCO es un consorcio universitario gobernado sin fines de lucro que facilita la investigación geocientífica y educación utilizando Geodesia . La comunidad académica y de investigación UNAVCO busca ampliar la comprensión humana del cambio de la Tierra por las tecnologías de integración, observaciones geodésicas, y la investigación. Este consorcio es financiado por la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF) y la Administración Nacional Aeronáutica y Espacial (NASA) y apoya la investigación en todo el mundo. [22].

UNAVCO promueve la investigación y el aprendizaje en la geodesia, proporcionando una variedad de software, incluyendo aplicaciones web y utilidades de escritorio para científicos, profesores, estudiantes y otros. Herramientas basadas en la web de visualización de datos y cartografía ofrecen a los usuarios la posibilidad de ver los datos postprocesados mientras utilidades geodésicas basadas también en la web proporcionan información auxiliar. Utilidades de software independientes descargables incluyen aplicaciones para

realizar cálculos de datos sin procesar, por ejemplo, los datos de pre procesamiento y post procesamiento, y las tareas de gestión de datos y modelización geodésica. [22].

Los software o herramientas que proporciona UNAVCO para el post proceso de datos de GPS son:

- TEQC (Translation, Editing and Quality Checking)
- GPS/GNSS Pre-processing Tools — Hatanaka, Trimble's runpkr00
- GPS/GNSS Post-processing Tools:
 - **GAMIT/GLOBK/TRACK**
 - GIPSY-OASIS II
- TLS Software
- SAR Software

Las Universidades e instituciones educativas y de investigación en muchas ocasiones están relacionadas con otras asociaciones internacionales tal es el caso del Instituto de Geofísica de la UNAM que mantiene un convenio con UNAVCO, por lo tanto puede adquirir información e insumos, como diferente software, de UNAVCO para el desarrollo de sus proyectos.

Se debe recordar que para obtener información por medio de técnicas de GPS y posteriormente hacer un postproceso se necesita de un archivo muy especial, el archivo .o del formato RINEX, que es un archivo de observación donde se asienta lo que se midió durante la sesión de observación. Sin embargo también hay que recordar que el fabricante de equipos receptores tiene su propio archivo de datos nativo diferente al .o formato RINEX. Para resolver este problema UNAVCO proporciona TEQC que es un programa que nos permite pasar por un control de calidad los datos adquiridos de la observación. TEQC es útil para convertir la información a formato RINEX.

Un software o paquete que satisface las necesidades del tratamiento, procesamiento y análisis de información adquirida a través de GPS, para el monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal, es GAMIT.

Aunque otros software de la misma línea, como GIPSY, también ofrecen soluciones adecuadas para el procesamiento de información de GPS actualmente se está implementando GAMIT para realizar el post proceso de los datos de las estaciones del oriente del Distrito Federal.

3.4 GAMIT

3.4.1 Historia de GAMIT.

GAMIT / GLOBK es un paquete completo de análisis GPS desarrollado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), El centro para astrofísica Harvard-Smithsonian (CfA), y el Instituto de Scripps de Oceanografía (SIO) para la estimación de coordenadas de la estación y las velocidades, deformación sísmica, retrasos atmosféricos, órbitas de satélite y parámetros de orientación de la Tierra. Aunque el software es mantenido actualmente por tres investigadores, muchas personas han hecho sustanciales contribuciones. [7].

La integración orbital y módulos utilizados en el cálculo teórico de la fase observable tienen su origen en el Programa de Efemérides Planetaria (PEP), escrito por Michael Ash, Irwin Shapiro, y Bill Smith en el Laboratorio Lincoln en la década de 1960, con contribuciones posteriores por Bob Reasenber y John Chandler en el MIT. Los códigos para procesamiento de observación GPS fueron desarrollados en el MIT en la década de 1980 por Chuck Counselman, Sergei Gourevitch, Yehuda Bock, Rick Abad, y el Bob King. GAMIT ha alcanzado su forma actual gracias al esfuerzo de Bock, Danan Dong, Peng Fang, Kurt Feigl, Arenque, Rey, McClusky, Peter MÓrgano, Mark Murray, Liz Petrie, Berkhard Schraffin, Seiichi Shimada, Paul Tregoning, y Chris Watson. GLOBK fue desarrollado por Arenque en CfA para la combinación de los datos VLBI y modificado en el MIT para incorporar los datos del GPS. [7].

El financiamiento para el desarrollo temprano de GAMIT fue proporcionado por la Fuerza Aérea Geofísica de laboratorio, y para GLOBK por la NASA. El apoyo actual para el desarrollo y el apoyo de la comunidad científica viene principalmente de la Fundación Nacional de la Ciencia de los Estados Unidos. [7].

El Departamento de la Tierra, la Atmósfera y Ciencias Planetarias en el Instituto de Tecnología de Massachusetts está financiado por la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF) para apoyar a los investigadores que utilizan el software de procesamiento de GAMIT y GLOBK. Los esfuerzos del MIT incluyen la capacitación de los investigadores y sus colaboradores en el extranjero, y la mejora de la capacidad, fiabilidad, interfaces de usuario, y la documentación del software. [7].

GAMIT y GLOBK forman un conjunto completo de programas para el análisis de mediciones GPS principalmente para estudiar la deformación de la corteza. El software ha sido desarrollado por el MIT, el Instituto de Scripps de Oceanografía y la Universidad de Harvard con el apoyo de la Fundación Nacional de Ciencia. [7].

En el sitio web de GAMIT/GLOBK se especifica que el software puede ser obtenido sin acuerdo escrito o pago de regalías por universidades y las agencias gubernamentales para fines no comerciales pero al momento de hacer la petición se debe incluir en el correo electrónico el nombre completo, dirección y teléfono y números de fax de la institución.

3.4.2 Funcionamiento de GAMIT

GAMIT es una colección de programas que se utilizan para el análisis de los datos del GPS. Utiliza las observables de GPS de fase portadora y de pseudodistancia para estimar posiciones relativas tridimensionales de estaciones terrestres y órbitas de los satélites, retrasos cenitales atmosféricos, y parámetros de orientación de la Tierra. El software está diseñado para ejecutarse en cualquier sistema operativo UNIX. [7].

Para realizar un completo análisis de la información, GAMIT se complementa con GLOBK.

GLOBK es un filtro de Kalman cuyo objetivo principal es combinar varias soluciones geodésicas, por ejemplo de GPS. Se acepta como los datos u observaciones las estimaciones y matrices de covarianza para las coordenadas de la estación, parámetros de orientación de la Tierra, los parámetros orbitales, y posiciones de las fuentes generadas a partir del análisis de las observaciones primarias. Las soluciones de entrada se realizan generalmente con incertidumbres a priori asignados a todos los parámetros globales, por lo que las restricciones se pueden aplicar de manera uniforme en la solución combinada. [7].

El programa de solución de GAMIT incorpora un ponderado algoritmo de mínimos cuadrados para estimar la posición relativa de un conjunto de estaciones, los parámetros orbitales y de rotación de la Tierra, retrasos cenitales y soluciones de ambigüedades de la fase dan ajuste a las observaciones por el método de dobles diferencias. Desde que el modelo funcional (matemático) que relaciona las observaciones y parámetros no es lineal GAMIT produce dos soluciones, la primera en obtener coordenadas dentro de unos pocos decímetros, y el segundo para obtener las estimaciones finales. [10].

La solución que hasta este paso proporciona GAMIT generalmente no se utiliza directamente para obtener la estimación final de las posiciones de las estaciones de una Red.

Sin embargo se utilizan estas estimaciones y una matriz de covarianza de posiciones asociada de las estaciones y opcionalmente parámetros orbitales y de rotación de la Tierra que posteriormente son una entrada de datos para GLOBK u otros programas similares para combinar los datos con los de otras redes y las posiciones en otros tiempos para estimar posiciones y velocidades. [10].

GAMIT se compone de distintos programas que llevan a cabo las funciones de preparación de los datos para su procesamiento (makexp y makex), la generación de los valores de la órbita y de la rotación de referencia para los satélites (arc, yawtab), los valores del tiempo y ubicación de interpolación de valores específicos atmosféricos y modelos de carga (grdtab), el cálculo de las observaciones residuales (O-C's) y derivadas parciales de un modelo geométrico (model), la detección de valores atípicos o roturas de datos (autcln), Y la realización de un análisis de mínimos cuadrados (solve). [10].

Aunque los módulos pueden ejecutarse individualmente, se puede usar el flujo de datos, así el proceso se realiza mejor porque existe una secuencia (fixdrv). El realizar el proceso de forma automática tiene muchas ventajas en el modelado, edición y la estimación. Aunque la edición de datos casi siempre se realiza de forma automática, los residuos de la solución se pueden visualizar o trazar de forma que los datos problemáticos pueden ser identificados (CView). [10].

La secuencia completa de pasos que lleva a partir de datos de la fase portadora hasta la obtención de series de tiempo se lleva a cabo con dos scripts (de shell):

- **sh_gamit**: busca datos crudos o RINEX en un rango de días y manda a llamar a los programas GAMIT para producir estimaciones con restricciones de las coordenadas junto con graficas celestes de datos de fase como un registro de la transformación.
- **sh_glred**: utiliza los resultados de GAMIT para producir series de tiempo de los dias involucrados en el análisis, repetibilidades diarias o un archivo que se puede combinar además con las de otros tiempos para estimar las velocidades de la estación.

La única preparación necesaria es el establecimiento de los metadatos de los registros de la estación, o parámetros de la estación; la creación de los archivos de control, la mayoría de los cuales son comunes a todos los análisis de un tiempo en particular, y la liga, con los datos de fase proporcionados por IGS, en una en uno o más directorios en el sistema.

3.4.3 Instalación.

El software GAMIT y el paquete de programas con el que trabaja está diseñado para funcionar en ambientes UNIX.

El compilador libre recomendado para Linux es gfortran ya sea gcc 4.2 o superior, sin embargo, no se recomienda gcc 4.3 pues puede tener algunos errores. No es recomendable usar los compiladores gfortran distribuidos con gcc 4.0 o 4.1.1, ya que tienen un conjunto incompleto de las bibliotecas. [10].

Se puede utilizar cualquier otro de bash o csh para el shell terminal, pero csh debe ser instalado desde los scripts específicos que lo llaman. La preferencia de idioma en .cshrc o .bashrc debe establecerse en inglés. [10].

Primeramente se debe crear un directorio de nivel superior de todo el software preferentemente en una localidad también de nivel superior, como *usr*, luego se hará un ftp. A partir de esto se ejecutaran varias instrucciones para descargar, descomprimir y finalmente ejecutar la instalación del software.

Es recomendable seguir el manual de instalación de GAMIT/GLOBK para seguir detalladamente los pasos.

Adicionalmente GAMIT debe de estar en constante actualización, igualmente por medio de comando de actualización.

3.4.4 Resultados del software

Hay tres criterios principales que se deben utilizar para determinar si el procesamiento arroja buenos resultados:

- Todos los datos esperados fueron incluidos.
- Los datos se ajustan al modelo esperado.
- Las incertidumbres son aceptablemente pequeñas.

En la mayoría de los casos se puede evaluar estos tres requisitos rápidamente mediante el archivo GAMIT.summary, alojado en la carpeta del día, junto con las gráficas de repetibilidades diarias.

Hay tres indicadores de calidad de los datos en el archivo resumen (summary) y cada uno mide ligeramente diferente.

El bloque de líneas del archivo resumen comienza con "RMS" que significa la Raíz Media Cuadrática. En la segunda línea de RMS, el primer valor es un RMS general en mm. Los valores restantes en esa línea muestran la dispersión por satélite y el valor en décimas de mm para permitir una mejor distinción de diferencias que pudieran indicar que un modelo orbital está mal para una satélite. Las últimas cuatro líneas reportan los valores de los dos sitios con la más baja y la más alta dispersión. En un levantamiento típico, los mejores sitios tendrán valores de 3 a 5 mm, y los peores 7 a 9 mm. Los valores entre 10 y 15 mm indican niveles altos pero aceptables de ruido. Los valores de RMS superiores a 15 mm sugieren una recepción con mal seguimiento, un ambiente de alto efecto multipath, errores en el tiempo, o un problema con la duración de la sesión causada por coordenadas de baja calidad o un lapso corto de observación. [10].

La comprobación definitiva de los datos y el tratamiento se visualiza en la serie de tiempo generada por sh_glred como archivos con nombre PSBase y extensión del nombre de la estación que están en la carpeta creada y nombrada como gsoln. Con sesiones de 24 horas y una estabilización robusta, se deben obtener incertidumbres con calidad de 1 a 2 mm para las coordenadas horizontales y 3.5 mm para la coordenada vertical. Con sesiones de 8 h, las horizontales deben ser de 2 a 4 mm y la vertical de 10 a 15 mm Si las incertidumbres son altas para algunos sitios pero no en otros se debe comprobar la duración de la sesión en el archivo RINEX o x-file, el número de datos borrados en el resumen de edición de autcln.post.sum, y el ruido de los datos. [10].

3.5 Mantenimiento de las estaciones de monitoreo.

Es natural que con paso del tiempo y con la frecuencia de uso que se le dé, el equipo de las estaciones sufra un desgaste pues cuando se trata de sesiones de observación de 24 horas y además estas observaciones se repiten todos los días, es decir son continuas, el equipo nunca para de funcionar por lo tanto deberá ser vigilado para ver que siga cumpliendo de manera correcta con sus funciones y cuando no sea así será necesario sustituir los elementos que conforman la parte física de la estación, equipo e instrumentos complementarios, como antena, cables, receptor, memorias de almacenamiento de datos.

La construcción hecha para monumentar la marca geodésica de la estación también debe de ser vigilada, como se ha mencionado anteriormente esta debe ser estable e inmóvil, relativamente, sin embargo cuando sea notado algún desperfecto en el monumento se debe arreglar para evitar tener errores en cuanto a la posición de la marca geodésica, así no se confundirá un error causado por desperfectos en la estación con desplazamientos del terreno.

Dentro del mantenimiento de las estaciones de monitoreo también está contemplada la recolección de datos, cuando las estaciones son permanentes, como es el caso de las cuatro estaciones del oriente del Distrito Federal, es necesario acudir regularmente a recolectar los datos grabados en la memorias del equipo, ya que cuando estas llegan a llenarse en su máxima capacidad ya no guardaran más información y se perderán datos valiosos de observación. Una vez vaciadas las memorias de los equipos estas continuaran guardando información nueva y continua de las observaciones.

Los datos recolectados, que fueron vaciados de las memorias de los equipos a otros dispositivos portátiles, como laptops, están listos para pasar por un post proceso, un tratamiento, y finalmente un análisis.

Capítulo 4. Procesado de datos GPS en geodinámica

4.1 Selección del método adecuado (Estático).

El método de observación de GPS Estático posee muchas características que son adecuadas para realizar un procedimiento de cálculo de coordenadas cuando se trata de monitorear cambios en variables geodinámicas, como subsidencia o deformación horizontal del terreno.

Cuando el método de observación es Estático y el procedimiento es relativo, se pueden llegar a obtener altas precisiones que garantizan que los resultados obtenidos serán de calidad y adecuados para resolver problemas de desplazamiento y deformación como los que ocurren, entre otras zonas, en el oriente del Distrito Federal.

Por medio de la observación simultánea de satélites GPS y posteriormente al efectuar un tratamiento sobre los datos observados, se calcula el posicionamiento relativo entre estaciones de una red geodésica establecida, obteniéndose componentes relativas (dx, dy, dz), y de las líneas observadas con sus correspondientes desviaciones típicas. Estos valores serán los datos experimentales en el mencionado postproceso. [3].

La precisión obtenida en el procesado de los datos GPS es inversamente proporcional a la distancia existente y a la geometría entre las estaciones observadas.

Los modelos matemáticos para el procesado de datos GPS están basados, como se mencionó anteriormente, tanto en las pseudodistancias como en las diferencias de fase, en observaciones indirectas que proporcionan sistemas explícitos y sistemas de ecuaciones de observación por lo que lo más conveniente es la solución mediante mínimos cuadrados.

En una matriz de diseño de un sistema linealizado de cualquiera de los modelos de tratamiento de datos intervienen las coordenadas de los satélites GPS, por tanto, la precisión de las efemérides que se utilicen influirá directamente en la calidad de los resultados obtenidos. En aplicaciones puramente geodésicas, o bien geodésicas para resolver problemas geodinámicos, será necesario contar con posiciones de satélites de alta precisión, efemérides precisas, despreciando las efemérides emitidas por los satélites en su mensaje de navegación. Las coordenadas de las efemérides precisas tienen precisiones entre 3 y 10 metros, que garantizan calidades en los posicionamientos relativos de aproximadamente 0.5 ppm. [3].

El formato .sp3 proporciona las coordenadas cartesianas geocéntricas en kilómetros de los satélites GPS, la variación de las mismas en decímetros por segundo, las correcciones de

los osciladores de los satélites, el tipo de órbita ajustada, las precisiones de las mismas y otros datos como pueden ser el organismo que las determina, la época de corrección del movimiento del Polo, número de semana GPS, etc.

La influencia de la atmósfera en la propagación de la señal, efectos ionosféricos y troposféricos, se deben modelar o, solo en el caso del efecto ionosférico, eliminar para disminuir los errores.

Para la aplicación del modelo de corrección troposférica, necesario en cualquier orden de distancia, se tomarán los correspondientes datos meteorológicos de presión atmosférica, humedad relativa y temperatura que intervienen en el modelo.

Los receptores dotados de las dos frecuencias, L1 y L2, posibilitan la eliminación del efecto ionosférico utilizando la combinación ionosfera libre, aunque en cortas distancias, esta combinación introduce en el procesado de los datos un elevado ruido que imposibilita su utilización. [3].

La disminución o eliminación de estos efectos tiene gran importancia en el procesado de líneas largas, pues tanto las condiciones meteorológicas como las ionosféricas pueden ser muy diferentes en unas u otras estaciones.

Un procesado ideal de datos de GPS, como tal, consiste en la siguiente secuencia: pseudodistancia, triples diferencias, dobles diferencias obteniendo, además, los valores enteros de las ambigüedades iniciales y dobles diferencias aplicando las ambigüedades calculadas. [3].

La no linealidad del sistema supone partir de unas coordenadas aproximadas de las estaciones. El procesado en pseudodistancia es necesario para sincronizar los datos obtenidos en cada una de las estaciones, marcas de tiempo. Esta sincronización no se refiere al error del oscilador del receptor pues éste variará durante toda la observación. En este proceso previo no se utilizan la fase de la portadora dado que en ellas interviene la ambigüedad inicial, aspecto que no ocurre en la pseudodistancia. [3].

Las triples diferencias receptor-satélite-tiempo se obtienen observando varios satélites en épocas sucesivas desde dos o más receptores. Se definen como el cambio en la doble diferencia receptor-satélite entre una época y la siguiente. Elimina los errores inducidos por los relojes de los satélites y de los receptores. En la medida de la fase de la señal de la portadora, desaparece la ambigüedad existente en el contado inicial de ciclos. Esta insensibilidad respecto de la ambigüedad, de la pérdida de ciclos y de los errores de los osciladores de los receptores y de los satélites hace que en este modelo, solo las correcciones de las coordenadas geocéntricas cartesianas de las estaciones observadas serán las incógnitas a resolver. Las coordenadas así calculadas son consideradas los valores iniciales del siguiente proceso iterativo, las dobles diferencias. [3].

Las dobles diferencias se obtienen mediante observaciones de varios satélites en una misma época desde dos o más receptores, restando las correspondientes simples diferencias. Ahora, las incógnitas son las correcciones de los valores iniciales, y las ambigüedades para

cada par satélite-receptor. Las soluciones de este modelo inducen un nuevo procesado donde ahora ya se aplican las ambigüedades enteras, calculándose la solución final para las coordenadas cartesianas de las estaciones. [3].

El procedimiento idealizado de aplicar primero las triples diferencias y luego las dobles independiza los resultados de los errores de los osciladores de los receptores, que en un proceso por simples diferencias habría que tener en cuenta. Puesto que las correcciones a las coordenadas geocéntricas cartesianas iniciales son las incógnitas principales de estos procesos pudiera parecer que no estamos efectuando posicionamientos relativos. Esto no es así, dado que dichas correcciones proceden de la linealización del vector relativo entre las estaciones, lo que en definitiva procede de las diferencias de pseudodistancias entre los satélites y las estaciones inherentes a la construcción de las simples diferencias, origen de las dobles y triples. En la realización del post proceso se pueden utilizar diferentes aplicaciones o paquetes especializados. [3].

Para el caso de monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal el software utilizado para realizar un postproceso de datos es GAMIT.

El postproceso descrito anteriormente es una concepción ideal que proporciona a los datos calidades altas, útiles en geodesia y con aplicaciones por ejemplo para redes de apoyo y control. Sin embargo, el paquete GAMIT realiza mediante diversos programas y por medio de las dobles diferencias y procedimiento relativo el postproceso de los datos. Estos datos efectivamente son obtenidos mediante observaciones estáticas, un punto clave que es importante señalar es que las observaciones que proporcionan datos para procesar con GAMIT deben durar como mínimo seis horas para evitar errores en los cálculos matemáticos, por consiguiente en los archivos RINEX de observación, los archivos con extensión .o, se puede verificar el tiempo en los que se estuvo midiendo y así elegir los archivos con datos útiles.

El software GAMIT fue desarrollado para hacer geodesia aplicada, o bien aplicar la información geodésica a cuestiones geodinámicas. El procesado de datos de GPS en geodinámica brinda resultados tales que la información geodésica proporcione la medida de los desplazamientos que experimentan los sólidos sometidos a esfuerzos.

Cuando se habló del funcionamiento de GAMIT se señaló que después de calcular posiciones estimadas por el método de las dobles diferencias, este se complementa con GLOBK que mediante otra serie de procesos brinda soluciones que se obtuvieron de combinar los datos, por ejemplo de diferentes redes y posiciones en otros tiempos, con esto se estiman posiciones y velocidades.

Una vez habiendo elegido el mejor método, el método de GAMIT, para hacer un postproceso se debe considerar si la red de monitoreo debe de procesarse internamente o de forma ligada, es decir con apoyo de redes geodésicas de orden superior. Esto se decide según las necesidades que se requieran satisfacer.

4.2 Tipos de procesado: interno y ligado.

Un postprocesado de la observación de datos GPS se puede hacer de forma interna o de forma ligada.

Generalmente durante el postproceso o tratamiento de datos del procedimiento relativo se hace uso de los datos de observaciones de estaciones de diversas redes de apoyo, sin embargo existe un caso donde estaciones de un mismo conjunto o una misma red se ajusten entre ellas sin necesitar el apoyo de otras redes de orden superior.

A las estaciones pertenecientes a redes de apoyo o control geodésico se les llama estaciones fijas, dado que su posición está establecida bajo un estricto control. Las estaciones que un usuario establece, e implementa se denominan estaciones móviles. Las estaciones móviles son estaciones objetivo ya que es de estas la posición, o posiciones que posee a través del tiempo, que se requiere obtener después de un postprocesado. El término “móviles” no se refiere a que las estaciones se moverán o se cambiarán del lugar donde se establecieron, este término nos indica que la posición calculada para la estación se ajustará con respecto de otras estaciones por medio de las ecuaciones propias del procedimiento relativo, donde se requiere observaciones simultáneas de receptores en diferentes estaciones.

Cuando se realiza un postprocesado relativo de tipo interno, se hacen los cálculos con el conjunto de estaciones de una misma red. Esta red es la que el usuario ha implementado y por tanto no se dispone de coordenadas y posiciones controladas lo que puede arrojar precisiones pequeñas.

Lo más común y conveniente es realizar el procesado de forma ligada, es decir que se forman vectores entre las estaciones fijas y las móviles. Los datos con estaciones pertenecientes a redes de apoyo nacionales como la red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en México o internacionales como la red perteneciente al Servicio Internacional GNSS (IGS), que tiene estaciones en todo el mundo, tienen suficiente grado de cuidado y control. La precisión de los resultados de un postproceso ligado a estaciones de control fijas aumenta significativamente con respecto de la de un postproceso interno.

El software GAMIT realiza un procesado de tipo ligado en donde las estaciones fijas son las estaciones de la red IGS y las estaciones móviles las establece el usuario, así como los datos de las estaciones móviles que se recolectaron en estaciones implementadas por el usuario.

Para la determinación de la tasa de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal las estaciones móviles que se implementaron, y con las cuales se obtiene información para proporcionarle a GAMIT datos para que realice el postproceso, son CCHO, FESZ, IZT1 e IZT2.

La red IGS cuenta con datos de 453 estaciones en todo el mundo y actualmente 383 están activas. Se procura que las estaciones de esta red estén midiendo de forma continua es decir

24 horas los 365 días del año. Hay ocasiones en las que los datos de observación de estas estaciones no están disponibles debido a diversas razones como cambio de equipo o cese temporal por falla en el equipo.

De las estaciones IGS se han elegido 5 para establecerlas como fijas. Aunque en las oficinas centrales de INEGI en Aguascalientes, México se encuentra la estación INEG de IGS, a través de varios experimentos se ha comprobado que mucha información de este sitio no está disponible, por tanto INEG generalmente no se emplea como estación fija en el procesado de datos del oriente del Distrito Federal. Las 5 estaciones IGS que es conveniente tomar como fijas para realizar los cálculos de postproceso se eligieron de forma que rodearan y envolvieran la zona de estudio, se trató de elegir las para que estuvieran geométricamente distribuidas en forma de estrella y se verificó que tuvieran una buena disponibilidad de datos.

Dichas estaciones son MANA en Managua, Nicaragua, MDO1 en Fort Davis, U.S.A, MKEA en Mauna Kea, U.S.A, MONP en Laguna Mountains, U.S.A y SCUB en Santiago de Cuba, Cuba. Las cinco estaciones son visibles en el siguiente mapa de las estaciones IGS en Norte América:

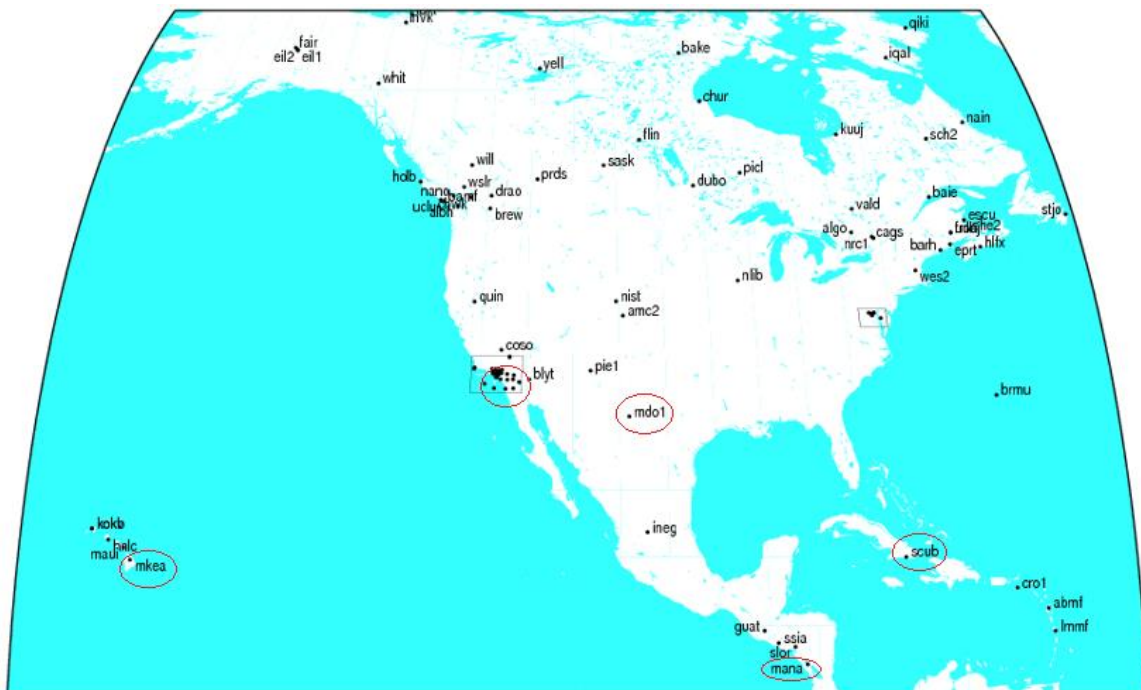


Fig. 4.2.1 Estaciones fijas IGS de apoyo [12].

Es necesario aclarar que aunque una estación sea determinada como fija, esto también es relativo porque las coordenadas de estas estaciones también entran a un análisis y ajuste donde se recalcula la posición, sin embargo, este ajuste es mínimo y solo sirve para brindar

apoyo al procedimiento relativo. El ajuste con mayor peso se hace en las estaciones determinadas como móviles, esto porque son de las que se requiere obtener información.

4.3 Orientación y escalamiento de la red.

El diseño de una red geodésica viene determinado por diversos factores, pudiéndose destacar la técnica geodésica elegida, el método de obtención de coordenadas a utilizar, las características de la instrumentación disponible y las condiciones propias de la zona. [3].

La utilización del sistema espacial GPS impone menos restricciones en el diseño de la red que triangulaciones o trilateraciones de Geodesia clásica, donde los triángulos han de ser de preferencia equiláteros, para evitar que se dé una propagación de errores no uniforme a las coordenadas de la red. [3].

La puesta en órbita y operatividad de los satélites del Sistema de Posicionamiento Global supone un avance sustancial en el desarrollo experimental de la Geodesia y ciencias afines en relación a otros sistemas espaciales anteriores en cuanto a productividad, costos y precisiones alcanzadas. El Sistema GPS permite establecer un sistema de referencia, elipsoide de referencia WGS-84, mediante observaciones de los satélites NAVSTAR, a usuarios situados en cualquier lugar de la Tierra y en cualquier instante. [3].

Basado en el principio interferométrico de observaciones simultáneas de los satélites de la constelación NAVSTAR, permite obtener posicionamientos relativos entre estaciones con precisiones del orden de 1 ppm y, por tanto, con características geodésicas en escala. Estos posicionamientos relativos están carentes de orientación y si bien son de aplicación directa a estudios geodinámicos, están carentes de significado geodésico. [3].

Para obtener posiciones absolutas, consecuentemente geodésicas es necesario disponer de medidas para brindar control; como estaciones de redes de orden superior con posiciones estrictamente y cuidadosamente controladas.

A partir de los procesos de tipo interno y ligado se derivan los conceptos de orientación y escalamiento de la red.

Cuando el proceso es de tipo interno la red adquiere solamente una escala ya que no hay ninguna referencia de coordenadas fijas establecidas como verdaderas y por lo tanto orientadas, sin embargo, en el ajuste entre estaciones móviles se adquiere una escala porque el proceso se realiza de manera correcta pero no se tiene una dirección, es decir solo se sabe que existe en el espacio y tiene dimensiones pero no tiene una dirección considerada real con respecto de algún sistema coordenado. Cuando no se requiere la información para colocar a la red en un marco de referencia y solo se quiere la magnitud del cambio de dimensiones o la medida del desplazamiento, búsqueda común en geodinámica, es suficiente tener una red con escalada, sin embargo, es muy conveniente y muchas veces

necesario tener un marco de referencia geoespacial a cual referir las mediciones. Una orientación siempre proporciona información de utilidad crucial en la toma de decisiones.

La orientación de la red se da por medio de un proceso ligado porque adquiere la dirección de la red que posee las estaciones fijas que entraron al análisis y las coordenadas tienen cierto grado de control. La red se orienta por medio de los vectores que se forman y con los que se ajusta, esta posee una dirección que consideramos real porque conocemos su geometría. Las estaciones móviles se giran, mueven, posicionan con respecto de las estaciones fijas, es decir se orientan. Esta red orientada también posee una escala.

Según los fines u objetivos de un proyecto se determinara si una red necesita ser escalada solamente u orientada y escalada forzosamente.

En el postprocesado con GAMIT se hace uso de estaciones fijas o de referencia de IGS cuya escala y orientación poseen alta precisión; al realizar el procedimiento las estaciones del oriente del Distrito Federal quedan escaladas y adquieren una orientación de calidad referida a un marco espacial.

4.4 Análisis de los ficheros necesarios para el proceso.

Para realizar un procesado de datos GPS que arroje información geodinámica útil para el monitoreo de subsidencia y deformación horizontal se debe tener un control tanto del flujo o secuencia del proceso como de los archivos que intervienen en cada parte.

Se explicará a continuación paso por paso como realizar un procesado de información GPS con GAMIT para resolver el problema del oriente del Distrito Federal.

Para la preparación de la sesión de procesado primeramente se debe determinar el experimento a realizar, llamándole experimento al procedimiento de procesar datos que tengan características en común. Se debe crear un directorio o carpeta exclusiva para desarrollar el experimento donde se colocara posteriormente la información para el postproceso y se ejecutaran los comando que hacen correr los programas que conforman GAMIT.

Se elegirá el intervalo de tiempo del que se requieren resultados y por lo tanto deben existir archivos de las sesiones de observación de este intervalo. Por ejemplo se pueden procesar datos de algunos días consecutivos de un año o bien todos los datos del año. Por ejemplo después de elegir el intervalo de tiempo un directorio para el experimento puede nombrarse 2012 o Enero_2012.

Se deben elegir las estaciones móviles, o red de estaciones móviles, de las cuales se procesaran los datos observados, a partir de esto se eligen también las estaciones fijas o de apoyo de la red de IGS para realizar el procedimiento de tipo ligado.

Antes de empezar a correr los comandos del postproceso se deben preparar los archivos RINEX de observación de las estaciones móviles. En el caso de no contar con archivos de observación nativos es necesario obtener los RINEX .o haciendo uso del software TEQC. Se debe ser cuidadoso al elegir solo aquellos archivos que superen seis horas de observación. El nombre de los archivos de observación debe constar de cuatro letras minúsculas que indiquen el nombre de la estación y cuatro cifras que indiquen el día del año del cual son los datos observados y el número de archivo por día, las tres primeras cifras indican el día del año y la cuarta cifra indica, si es que existe más de un archivo para ese día, el número de archivo del cual se trata. La extensión de los archivos es .###o donde ## indica el año de los datos observados. Por ejemplo un archivo que se nombra de la siguiente forma: ccho0130.12o indica que se trata de un archivo RINEX de observación de la estación ccho, es el día 013 (según el calendario GPS), el ultimo 0 nos dice que es el primer archivo de observación de ese día y por la extensión se sabe que se trata del año 2012.

Ahora se deben de crear tres subdirectorios en el directorio destinado para el experimento, estas deben de llevar por nombre: *gsoln*, *rinex* y *tables*.

El directorio *gsoln* por el momento se quedará vacío, pero posteriormente ahí se depositaran archivos solución y series de tiempo de posiciones de todas las estaciones.

En el directorio *rinex* se copiaran todos los archivos RINEX locales, es decir de las estaciones móviles, nombrados adecuadamente y que rebasen las seis horas de observación. Los archivos RINEX de las estaciones IGS se descargarán de forma automática durante el proceso.

En el directorio *tables* antes de ejecutar cualquier comando se deben de colocar tres archivos: uno de coordenadas a priori del datum *itrif*, uno donde se establecen las estaciones fijas IGS y el nombre del experimento llamado *sites.defaults*, y uno donde establece la precisión requerida para los cálculos llamado *sittbl*. Aunque se pueden copiar mediante la posterior ejecución de un comando, poner previamente los archivos anteriores permite tener un mejor control del procedimiento.

En este momento es muy recomendable hacer un respaldo de la preparación para el postproceso, ya que si alguna falla o fracaso llegara ocurrir, se tiene toda la información inicial previa que es necesaria para correr el procesado del experimento nuevamente.

A continuación se abre una terminal o línea de comandos en la carpeta del experimento y se ejecuta el comando: *sh_setup* que vincula o copia en la carpeta *tables* los archivos de control y de parámetro terrestres correctos para el cálculo de los modelos matemáticos necesarios en el proceso. Todas las plantillas y tablas requeridas residen en \sim *gg* / *tables*, donde \sim *gg* es un alias que apunta al nivel más alto de la instalación de GAMIT. La ejecución de *sh_setup* llama a *sh_links.tables* que copia los siguientes archivos de control, los cuales se pueden editar: [10].

- *process.defaults*: Este archivo es para especificar el entorno de computación, las fuentes de datos internas y externas y archivos órbita, hora de inicio y el intervalo de muestreo, y las instrucciones para archivar los resultados.
- *sites.defaults*: Este archivo es para especificar que estaciones IGS se usaran en el proceso, sin embargo, cuando se tiene previo a la ejecución del comando no se sobre escribe.
- *station.info*: Este archivo contiene la información de receptores, antenas y altura de la antena para todas las observaciones de las estaciones que va a utilizar. Es muy conveniente tener este archivo bajo estricta vigilancia, que toda la información dentro de este sea correcta, ya que de él dependerá en gran medida que el proceso ocurra sin errores.
- *coordinate files*: El comando *sh_gamit* mantiene en el directorio del *tables* dos archivos de coordenadas a priori. El archivo que termina en *.apr* contiene las coordenadas cartesianas (posición y velocidad). Para cualquier estación que no tiene coordenadas *sh_gamit* intentará calcular las coordenadas a través de una solución por pseudorange por medio de las coordenadas en la cabecera de los archivos RINEX. Cuando GAMIT corre, estas coordenadas se actualizarán con la solución de fase que para los días sucesivos en los que se observa la misma estación se usen las coordenadas exactas.
- *sestbl.* y *sittbl.* : Estos archivos son para configurar las opciones adecuadas para el análisis. Hay que asegurarse de que cualquier estación para la que se especifican restricciones en el archivo *sittbl.* tenga coordenadas precisas. El archivo *sittbl* tampoco se sobrescribe si se tiene previo al comando.
- *autcln.cmd*: Este archivo normalmente no requerirá la edición a menos que encuentre datos inusuales durante el procesamiento.

Otros archivos no editables que se ligan o copian en la carpeta *tables* y que poseen información sobre los parámetros necesarios para cálculos en el proceso son: [10].

- Tablas EOP de IERS (*International Earth Rotation Service*): *ut1. pole.*
- Tablas de nutación: (IERS/IGS standards) *nutabl.*
- Efemérides solares y lunares: *luntab. soltab.*
- GPST – UTC (relación tiempo GPS y tiempo UTC): *leap.sec*
- Códigos antena/receptor IGS: *rcvant.dat*
- Códigos antena/receptor definidos por el usuario: *guess_rcvant.dat*
- Campo de dimensiones mecánicas de antenas: *hi.dat*
- Bloques de satélites y PRN: *svnav.dat*
- Campo de modelos de centro de fase de las antenas: *antmod.dat*
- Código de sesgo P1-C1, P1-P2: *dcb.dat*
- Modelos de carga oceánica: *otl.grid, otl.list*
- Parámetros atmosféricos: *map.grid, map.list*

Una vez editados adecuadamente los archivos necesarios se puede iniciar el procesado desde el directorio del experimento ejecutando *sh_gamit* para el experimento y la serie de días elegidos para procesar mediante el comando:


```
sh_gamit -expt scal -d 2000 034 035 036> &! sh_gamit.log
```

El comando anterior es para procesar los días 034, 035 y 036 del año 2000 y puede ir acompañado de la especificación de algunos parámetros, mismo que también pueden ser controlados en el archivo *process.defaults*, Dichos parámetros son: [10].

- orbit: Tipo de órbita (IGSU IGSR IGSF MITF SIOU SIOR SIOF, IGSF defecto)
- eops: serie EOP a utilizar (usno [default], bull_b)
- sessinfo: Intervalo de muestreo, número de épocas, hora de inicio (HH MM).
- copt: Lista de archivos para comprimir en un directorio de días (predeterminado x, k, autcln.out, d).
- dopt: Lista de archivos a eliminar desde el directorio del día (por defecto C-archivos)
- pres ELEV: Graficas celestes de ángulo de elevación contra fase observada.
- nogifs: Creación de archivos .gif de graficas celestes.
- yrext: Añadir el prefijo año a los nombres de los directorios de días.
- netext: Añade el sufijo a los nombres de los directorios de días.
- noftp: No descargar por medio de ftp cualquier dato fuera del local sistema.

La mayoría de las veces los parámetros pueden omitirse y dejar los que se han especificado en *process.defaults* para todo el experimento, sin embargo, si desea probar el efecto del procesamiento de un día con un parámetro distinto se puede modificar el comando.

Por último, es posible enviar el estatus de *sh_gamit* a un archivo de texto con la instrucción `> &! sh_gamit.log` al final del comando. Esto es muy útil cuando ocurre un fracaso en el proceso del experimento, el fracaso se hace notar por la aparición de un archivo *GAMIT.fatal*, el archivo con extensión .log permitirá identificar el punto y la razón del fracaso si es que ocurre. [10].

Si el procesamiento de cada día es exitoso se generaran una serie de subdirectorios adicionales en el directorio principal del experimento, estas son carpetas de los días procesados y ahí se encuentran archivos con estadísticas que hay que checar para saber si se obtuvieron resultados precisos. También se genera un subdirectorio llamado *gifs* donde se encuentran imágenes .gif de las gráficas celestes de cada estación y cada día de ángulos de observación contra la fase observada.

Ahora se puede utilizar *sh_glred* para obtener una serie temporal de estimaciones de posición. Se necesitan editar dos archivos de control creados en el directorio */gsoln*. Y posteriormente se ejecuta:

```
sh_glred -expt scal -s 2000 34 2000 36 -OPT HGE> &! sh_glred.log
```

Donde *scal* es el nombre del experimento y quedo establecido en el archivo *sites.defaults*, y 2000 34 2000 36 es el intervalo de tiempo procesado que va del día 034 del año 2000 al día 036 del año 2000.

Para entender cómo configurar los controles de entrada y evaluar su solución, es necesario tener en cuenta los archivos de datos y de soluciones que se van generando en cada parte del proceso: [10]

Nombre del archivo	Ejemplo	Descripción
RINEX	blyt0340.00.o	Archivos de observación, entrada a makex.
x- files	xblyt0.034	Archivos de observación ASCII GAMIT, similar a RINEX pero el intervalo de muestreo es el mismo para todos los sitios; salida de makex, entrada para modelar.
c-files	cblyt0.034	Archivos de observación binarios, contienen derivados de o-c y parciales, así como las observaciones; salida del modelo, entrada y salida de autcln y entrada para resolver.
q-file	qscala.034	Informe completo de solución a resolver.
GAMIT h-file	hscala.00034	Estimación limitada con soluciones y covarianzas a resolver.
GLOBK h-file	h0001341200_scal.glx	Archivo binario para GLOBK, creado por htoglb.
org file	globk_comb.org	Informe de solución de Glog.

Tabla 4.4.1 Archivos de datos del procesamiento, ejemplos de los archivos y su descripción.

Finalmente en el directorio */gsoln* los archivos con nombre de la estación y la extensión *.pbase*, por ejemplo *CCHO.pbase*, son las series de tiempo generadas mediante estimación de posiciones multitemporales y que representan la información geodinámica buscada para interpretarla y finalmente efectuar el monitoreo de subsidencia y deformación horizontal. El archivo consta de tres series de tiempo, una para la componente Norte (North), otra para la

componente Este (East) y otra para la componente Vertical (Up). Las series de tiempo aparecen tanto para las estaciones fijas como las móviles, sin embargo, las de la red móvil, las estaciones CCHO FESZ IZT1 e IZT2, son las que nos brindan información del oriente del Distrito Federal.

En las cabeceras de las gráficas de las series de tiempo se incluyen los parámetros: promedio o pendiente (promedio en observaciones cortas y pendiente en observaciones largas) y las raíces medias cuadráticas normalizadas y ponderadas (nrms y wrms). Estos parámetros nos indican la precisión del procesado y la información buscada para el caso del monitoreo del Distrito Federal en la pendiente de la gráfica indicada como desplazamiento en el tiempo y con las unidades de mm/año.

Capítulo 5. Consideraciones para Geodinámica del Sistema de Posicionamiento Global

5.1 Información geodinámica y errores geodésicos.

Como se ha mencionado con anterioridad el surgimiento de la Geodesia espacial tiene orígenes bélicos. Sin embargo, con el paso del tiempo, dada la diversidad de métodos y técnicas de levantamientos geodésico-espaciales, se han encontrado infinidad de aplicaciones de la Geodesia espacial, que es una relativamente nueva rama de la Geodesia.

Dadas las características del método del levantamiento GPS estático, éste se puede utilizar para resolver problemas en Geodinámica. Pero habrá que hacer ciertas consideraciones de importancia donde las técnicas de Geodesia no se aplican en sentido estricto y se usan los conceptos solamente.

En todo proceso geodinámico se presenta un fenómeno, que es el que se busca monitorear, por lo tanto existe una respuesta del medio a ese fenómeno. Los fenómenos o procesos geodinámicos presentados en el oriente del Distrito Federal son deformación horizontal y subsidencia y la respuesta es el desplazamiento o cambio de posición del terreno en el tiempo. Esto se monitorea verificando el cambio de posición de un punto o vértice establecido en una estación de observación. Por lo tanto se puede decir que, en este caso, la Geodesia mide la respuesta del medio al proceso geodinámico que se presenta.

Un ajuste consiste en un reparto del error. Pero el error arrojado y la información buscada pueden confundirse por lo tanto el ajuste debe de hacerse de manera cuidadosa.

Por ejemplo en Geodesia clásica una red se controla de la siguiente manera: “Las coordenadas calculadas de las estaciones se denominan coordenadas ajustadas de la red. Los ajustes de la red están sometidos por los criterios expuestos a la eliminación o adición de observaciones con lo que las soluciones obtenidas se rigen por correspondientes ajustes”. [3].

Se especifica que el número de sesiones de observación hechas en un vértice contribuirá a calcular una posición estándar y geodésicamente controlada para la estación, esto es válido para redes geodésicas que sirven de apoyo para control, sin embargo en geodinámica se recomienda hacer el procedimiento o bien tratar la información solo una vez ya que los procesos que ocurren son únicos para cualquier instante de tiempo.

Debe ser cuidadoso el no confundir un error geodésico, (error de cierre en polígonos cuyos vértices son las estaciones de observación), con información geodinámica. Para tener un control adecuado de la situación existen varios paquetes informáticos que a través de

modelos u algoritmos, como el filtro Kalman, separan el error de la información buscada, para posteriormente ajustar coordenadas y arrojar resultados útiles en geodinámica.

Cada problema geodinámico a resolver es diferente, existen diferentes variables, condiciones y parámetros a considerar en cada situación y por eso para aplicar las técnicas geodésicas estas se deben de adecuar. En el caso del oriente del Distrito Federal no confundir el error arrojado con valores de deformación o subsidencia incorrectos y encontrar la información real se da por medio del establecimiento de una red estaciones móviles controladas y se realiza un postprocesado con un software robusto.

Es importante recordar que una consideración de importancia para el personal que pretende obtener información geodinámica por medio de métodos geodésicos es tener una amplia capacitación en el área de Geodesia e Informática; así se puede hacer un correcto tratamiento de la información y correcto uso de insumos tales como el software para realizar el postprocesamiento que otorgara resultados finales.

5.2 Redes geodésicas con aplicaciones geodinámicas.

Las redes geodésicas están formadas por un conjunto de puntos sobre el terreno, denominados vértices geodésicos, los cuales se encuentran en una estación de observación. Los vértices de las redes están materializados y señalados. De estos vértices se mide la posición y una característica importante de las redes es que poseen un control de calidad de alto nivel.

La distribución de los vértices de una red, antiguamente en Geodesia clásica, se veía forzada a las limitaciones del instrumental empleado, que requería de intervisibilidad entre las estaciones, por lo que se ubicaban en lugares lo más elevado posible. Actualmente, con las tecnologías vía satélite y el surgimiento de la Geodesia espacial, en la planificación de redes se busca que los puntos tengan el cielo despejado entre otras características de las que necesiten estar dotadas para cumplir con sus objetivos. [3].

El establecimiento de una red geodésica se basa en una primera fase, de carácter empírico, cuyo resultado es un conjunto de observaciones que posteriormente, mediante el tratamiento oportuno de datos, proporcionan las coordenadas absolutas de los vértices geodésicos pertenecientes a la red.

La bondad de los datos obtenidos en esta fase experimental afectará directamente a los resultados obtenidos y depende de aspectos tales como el diseño de la red, la planificación de las observaciones a realizar, la instrumentación utilizada y la calidad de dichas observaciones. [24].

El diseño de una red geodésica viene determinado por diversos factores, pudiéndose destacar la técnica geodésica elegida, el método de obtención de coordenadas a utilizar, las características de la instrumentación disponible y las condiciones propias de la zona.

La utilización del sistema de navegación espacial GPS impone menos restricciones en el diseño de la red que triangulaciones o trilateraciones clásicas, donde los triángulos han de ser preferentemente equiláteros, para evitar una propagación de errores no uniforme a las coordenadas de la red.

Mediante la observación simultánea de satélites GPS y efectuando un tratamiento sobre los datos observados (capítulo 2), se calcula el posicionamiento relativo entre las estaciones de la red geodésica establecida, obteniéndose las componentes relativas (dx,dy,dz,dt), de las líneas observadas con sus correspondientes desviaciones típicas. Estos valores serán nuestros datos experimentales, en el subsiguiente proceso de ajuste.

El cálculo y ajuste de una red geodésica consiste en dotar a las estaciones observadas de coordenadas geodésicas, (ϕ,λ,h) , referidas al elipsoide de referencia WGS-84 y sus precisiones, o las correspondientes coordenadas cartesianas geocéntricas (X,Y,Z) . [3].

$$X = (N + h)\cos\phi\cos\lambda$$

$$Y = (N + h)\cos\phi\sen\lambda$$

$$Z = \left(\frac{b^2}{a^2}N + h\right)\sen\phi$$

Y donde N es el radio de curvatura y se calcula con la siguiente expresión:

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2\cos^2\phi + b^2\sen^2\phi}}$$

La transformación de coordenadas geodésicas en cartesianas es inmediata, mientras que el cambio contrario presenta el inconveniente de que por ser N una función dependiente de la latitud, es necesario efectuar un proceso iterativo sobre las coordenadas cartesianas de partida. Además, la instrumentación geodésica clásica y los métodos habituales de triangulación y la propia inercia humana hacen que el cálculo y ajuste de la red se efectúe en coordenadas geodésicas y a partir de éstas obtener las coordenadas cartesianas geocéntricas utilizadas, por ejemplo, en la determinación de orbitas precisas de satélites. [3].

Así, pues, el proceso de ajuste de una red geodésica conlleva la reducción al elipsoide de los valores procedentes del posicionamiento relativo, el establecimiento de estaciones de control y el cálculo final de las coordenadas geodésicas absolutas. El posicionamiento relativo proporciona las diferencias, (dX, dY, dZ) , de las coordenadas geocéntricas cartesianas entre las estaciones, las coordenadas topocéntricas horizontales, acimut y elevación, y cartesianas, (x, y, z) , considerando una de las estaciones como origen del correspondiente sistema horizontal topocéntrico, las diferencias en alturas elipsódicas, dh , y las precisiones de estos valores. Hay que hacer constar que en este sistema topocéntrico el

horizonte es elipsódico y no astronómico y que, además, se tienen unas coordenadas absolutas, (X, Y, Z), iniciales aproximadas. Este último aspecto expresa la necesidad de introducir en el procesado relativo de los datos GPS coordenadas iniciales lo más precisas posible. Por las razones expuestas anteriormente y dado que las coordenadas geodésicas están referidas al elipsoide, para el cálculo de éstas, partiremos de las coordenadas topocéntricas horizontales, de la distancia directa entre las estaciones, de las diferencias elipsódicas y de las coordenadas geodésicas aproximadas iniciales. [3].

La planificación de una de observación constante de satélites GPS por medio de una red consiste en establecer adecuadamente el sitio para cada estación o vértice ya que la visibilidad y el seguimiento simultaneo de los satélites no dependerá del tiempo si no de la ubicación. Se debe recordar que al implementar una estación de observación se tienen que considerar los factores geológicos, meteorológicos y el entorno social, esto influye de manera significativa en el diseño de una red.

Siguiendo las reglas generales para el establecimiento de redes geodésicas se pueden establecer redes geodésicas con características geodinámicas. Mientras que las redes geodésicas buscan ser la base de un sistema de referencia, cuando se les dota de características de redes de apoyo para geodinámica buscan recolectar información de los desplazamientos ocurridos en los vértices que poseen.

La red del oriente del Distrito Federal es una red geodésica con características geodinámicas debido al carácter de implementación y funcionamiento de sus estaciones, la forma en la que miden, y el empleo y tratamiento que se les da a los datos recopilados en las observaciones de cada una de las estaciones.

Para el oriente del Distrito se Federal, en las cuatro estaciones que conforman la red de monitoreo de desplazamiento y subsidencia, se recolectan datos continuos, es decir los instrumentos instalados están funcionando todo el tiempo, sin embargo, llega a existir ausencia de datos, por circunstancias como llenado de las memorias, al momento de realizar el postproceso y análisis de la información la información que pudiera faltar es compensada por métodos estadísticos o filtros. El monitoreo y las mediciones son continuas debido a que el fenómeno presentado necesita resultados con altas precisiones, así se garantiza un adecuado control de la grave problemática de subsidencia que existe.

➤ *Ejemplos de Redes Geodésicas con aplicaciones geodinámicas:*

❖ **En México:**

La Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) se define como el conjunto de estaciones de monitoreo continuo de datos del GPS, distribuidas estratégicamente en el territorio nacional, que materializan el Sistema Geodésico Nacional en su vertiente horizontal, y proporcionan servicios de posicionamiento geodésico a los usuarios mediante datos en línea y coordenadas en el marco oficial. [13].

Cada estación de la RGNA a que se liga un levantamiento geodésico desempeña un papel activo, al funcionar como puntos de referencia para determinar las diferencias entre sus posiciones altamente precisas y las posiciones de nuevos puntos derivadas directamente de los datos transmitidos por el sistema de satélites de navegación global (GNSS); así, mediante la técnica del posicionamiento diferencial, la RGNA ofrece información geodésica acorde a las altas precisiones que proporcionan los equipos del sistema de posicionamiento global.

Por lo anterior, la RGNA se presenta como una alternativa que permite a los usuarios ligar sus proyectos al Sistema Geodésico Nacional, al disponer gratuitamente de la información y exactitud posicional de las estaciones durante sus levantamientos geodésicos o topográficos con tecnología GPS, con el consecuente ahorro en tiempo y costo.

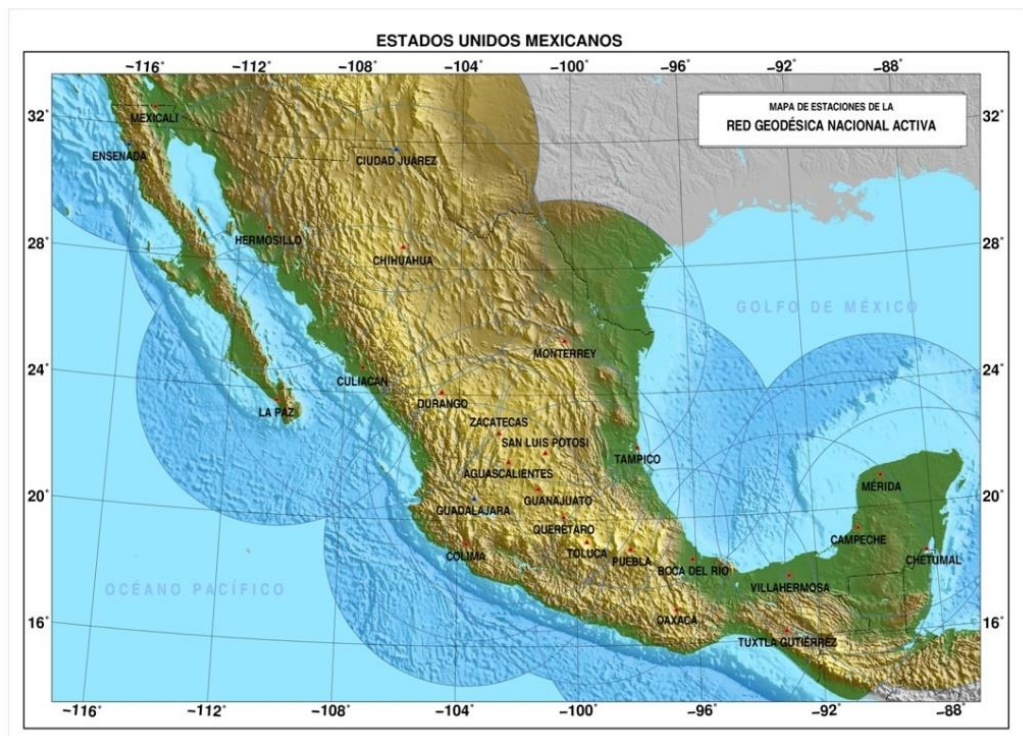


Fig. 5.2.1 Estaciones de la RGNA de INEGI [13]

Orígenes:

La RGNA fue concebida e implementada por las siguientes razones: [13]

- Necesidad de establecer un marco de referencia compatible en precisión con las modernas tecnologías de posicionamiento, particularmente el GPS.
- Adoptar un marco de mayor exactitud posicional y consistencia que el ofrecido por el NAD27.

- Responder a los requerimientos de referenciación geográfica que demandaron programas de relevancia nacional tales como el Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares Urbanos (PROCEDE).
- Apoyar el Programa de Modernización de la Actividad Geográfica del INEGI, con tecnología digital, con el empleo intensivo del GPS para los trabajos de campo en diferentes proyectos específicos y de apoyo a otras instituciones.
- La demanda creciente de cartografía de mayor precisión; el auge de los sistemas de información geográfica en México; las necesidades de apoyo a la investigación de orden geográfico; la referenciación con GPS aerotransportado de las fotografías aéreas, etc.; en un sistema de referencia geodésico preciso y consistente.

Algunas aplicaciones

En términos generales, la RGNA brinda el marco geodésico en apoyo a los siguientes trabajos: [13]

- Levantamientos geodésicos efectuados por las diferentes dependencias de la federación, gobiernos estatales y municipales para el estudio y definición de sus límites político-administrativos.
- Establecimiento y densificación de la Red Geodésica Horizontal para el control de las obras de ingeniería e infraestructura que se realicen en diferentes regiones del país.
- Apoyo terrestre necesario para trabajos fotogramétricos.
- Acercamiento de líneas de control o base necesarias para la actualización de cartografía urbana y catastral mediante métodos de levantamiento directos, tanto tradicionales como del GPS.
- Determinación de la posición geodésica de monumentos internacionales que definen las fronteras de México con los países vecinos.
- Delimitación de la zona económica exclusiva, mar patrimonial y espacios marítimos del país de conformidad con la convención de las Naciones Unidas y el Derecho Internacional.
- Control y ubicación del territorio insular mexicano.
- **Estudios de tectónica y riesgos para el reordenamiento territorial y protección civil.**
- **Investigación y monitoreo de fenómenos geodinámicos y geofísicos (subsistencia, fallas, etc.).**

A partir del 23 de Junio de 2004 las observaciones GPS de las estaciones de la RGNA se encuentran disponibles gratuitamente en el servidor FTP de la RGNA durante un periodo de 90 días.

❖ **En el mundo:**

El Servicio Internacional de GNSS (IGS) recopila y analiza datos del Sistema de Navegación por Satélite (GNSS), como el GPS, para producir una gama de productos.

Estos productos permiten el posicionamiento y sincronización a nivel mundial para la máxima precisión posible y son de gran utilidad en una amplia gama de aplicaciones, desde la vigilancia del cambio del nivel del mar hasta para la planificación de la agricultura de precisión.

El IGS contribuye al control, extiende y densifica el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF). El ITRF proporciona un marco preciso y consistente, para hacer referencia a las posiciones en diferentes momentos y en diferentes lugares de todo el mundo. La realización de acciones por parte de IGS para ITRF hace que se extienda el número de estaciones significativamente, y finalmente hace de ITRF un marco de referencia de fácil acceso. Estaciones que finalmente son un marco de referencia y que contribuyen al ITRF, son las estaciones GNSS de más alta calidad en el mundo. Esta calidad afecta directamente el nivel de precisión que se puede lograr mediante el uso de la ITRF. [14].

Ventajas al utilizar como apoyo a una estación de marco de referencia:

Hay numerosas ventajas que obtendrá una organización u operador de alguna estación al apoyarse en una estación que contribuye a ITRF, incluyendo: una mayor precisión del marco de referencia en la región de interés, mayor facilidad y precisión al establecer conexiones con el marco de referencia, una mayor precisión de posicionamiento en productos globales, como las órbitas de satélites y datos de los relojes y una descripción más precisa en transformaciones a sistemas de referencia en esa región y los puntos de referencia nacionales e internacionales.

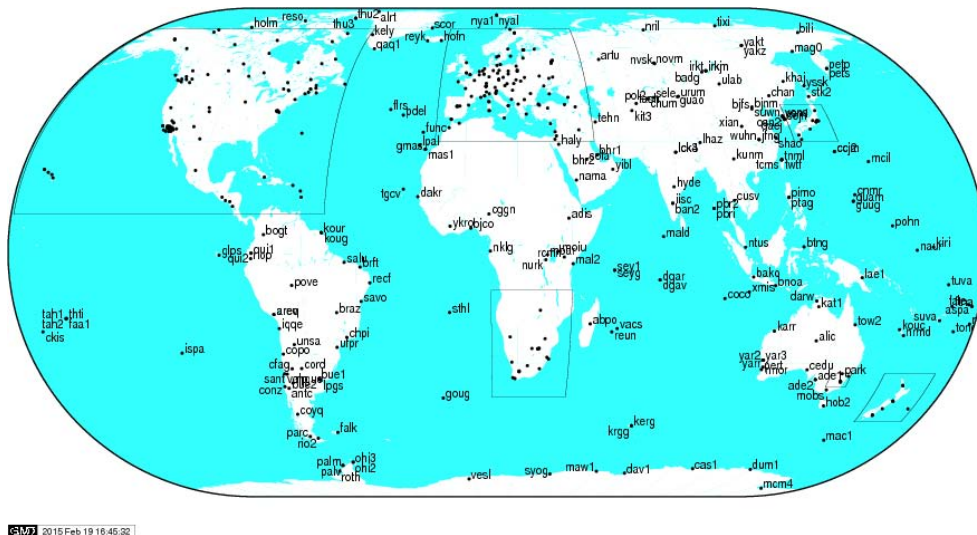


Fig 5.2.2 Estaciones IGS. [14].

Requisitos principales para Estaciones de marco de referencia

Los requisitos para estaciones que se consideren marco de referencia o sean apoyo para el marco de referencia ITRF incluyen: un monumento de gran calidad sobre rocas de una corteza estable, contar con una excelente visibilidad del cielo, una historia larga de observación de alta calidad, constante, continua y la disposición de datos crudos completa, cambios mínimos en el equipo y su entorno y el compromiso de mantenerla durante el mayor tiempo posible. Los requisitos de manera específica se detallan en el sitio web de IGS y de ITRF. [11], [14].

Estos requisitos son muy estrictos con el fin de garantizar mediciones fiables de todo el mundo para proyectos tales como el cambio del nivel del mar. Las consecuencias de contar con estaciones de mala calidad y un marco de referencia mal controlado serían el impactar negativamente en la precisión de numerosas aplicaciones científicas y de posicionamiento, especialmente en la región que rodea inmediatamente a la estación. [14].

En sentido estricto la RGNA y la red de IGS no son redes geodésicas con características geodinámicas pero son redes cuyas estaciones sirven de apoyo como estaciones fijas para realizar el ajuste de estaciones de redes con características geodinámicas, como la del oriente del Distrito Federal. Sin embargo debido al paquete que se usa en el postproceso las estaciones fijas de apoyo son las de la red IGS.

Capítulo 6. Continuidad del proyecto

6.1 Toma de datos en un lapso considerable para la obtención de series de tiempo.

Una vez finalizado el postprocesado de los datos se obtendrán resultados, en este caso para el seguimiento de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal. La manera en la que se hizo una primera aproximación para comenzar el monitoreo fue realizar un pequeño experimento para asegurarse que el software GAMIT funcionara adecuadamente, este experimento está provisto en el mismo software, los datos experimentales son de una estación en California y los archivos de las correspondientes observaciones son de estaciones fijas IGS. El propósito de este experimento de prueba es que el usuario se familiarice con el funcionamiento, los pasos y etapas de procesado, los archivos que hay que proveer, modificar o que se descargan automáticamente y que intervienen en el proceso.

Los parámetros utilizados para verificar la calidad y precisión de la información arrojada en los resultados son principalmente las raíces medias cuadráticas normalizadas: nrms y las raíces medias cuadráticas ponderadas: wrms. Los resultados se arrojan en un sistema topocéntrico (North, East y Up). El número de datos para formar la serie también mostrado en la cabecera de la serie de tiempo es un indicador que también muestra la calidad del procesamiento.

Una vez que se comprobó la fiabilidad del software se realizaron otros experimentos para tener certeza de que el procedimiento se estuviera llevando a cabo de forma adecuada. Pero los datos de observación de las estaciones móviles o estaciones objetivo fueron de las cuatro estaciones del oriente del Distrito Federal: CCHO, FESZ, IZT1 e IZT2.

Para este experimento se escogieron los días 291, 292, 293, 294, 295 y 296 del año 2012. Para elegir las estaciones fijas de IGS que es más conveniente usar en el postprocesado de datos en la zona oriente del Distrito Federal se hicieron pruebas con diferentes combinaciones de estaciones de modo que rodearan la zona de estaciones móviles.

Las tres combinaciones de estaciones IGS para formar la red de apoyo fueron:

Red 1: MANA, MDO1, MKEA, MONP, SCUB.

Red 2: GUAT, INEG, MDO1, SCUB.

Red 3: INEG, MANA, MDO1, MKEA, MONP, SCUB.

Los parámetros para revisar la calidad de las redes se tomaron de la estación CCHO y se presentan en la tabla 6.1.1.

El postproceso que tiene una mejor calidad según la tabla 6.1.1 es el que usa la combinación de la Red 3 para formar la red de estaciones fijas, sin embargo la estación INEG, ubicada en Aguascalientes, México, de IGS posee muchos huecos en la continuidad de sus observaciones por lo que muchos datos no están disponibles. Por lo anterior se decidió usar la combinación de la Red 1 ya que también ofrece calidad en el postproceso.

Parámetros estadísticos para verificar calidad de las redes de prueba 1, 2 y 3

Parámetro	Red 1	Red 2	Red 3
N nrms	0.25	0.46	0.15
N wrms (mm)	6.0	19.0	3.7
N # datos	6/6	6/6	6/6
E nrms	0.64	0.36	0.63
E wrms (mm)	17.9	16.0	17.9
E # datos	6/6	6/6	6/6
Up nrms	0.31	0.47	0.29
Up wrms (mm)	16.1	57.9	14.8
Up # datos	6/6	6/6	6/6

Tabla 6.1.1 En la tabla se muestra una comparación de los parámetros estadísticos para medir la calidad del postproceso usando combinaciones de estaciones para formar tres redes de apoyo.

Las series de tiempo y parámetros de precisión para cada estación del Distrito Federal en el experimento de prueba son los siguientes:

CCHO

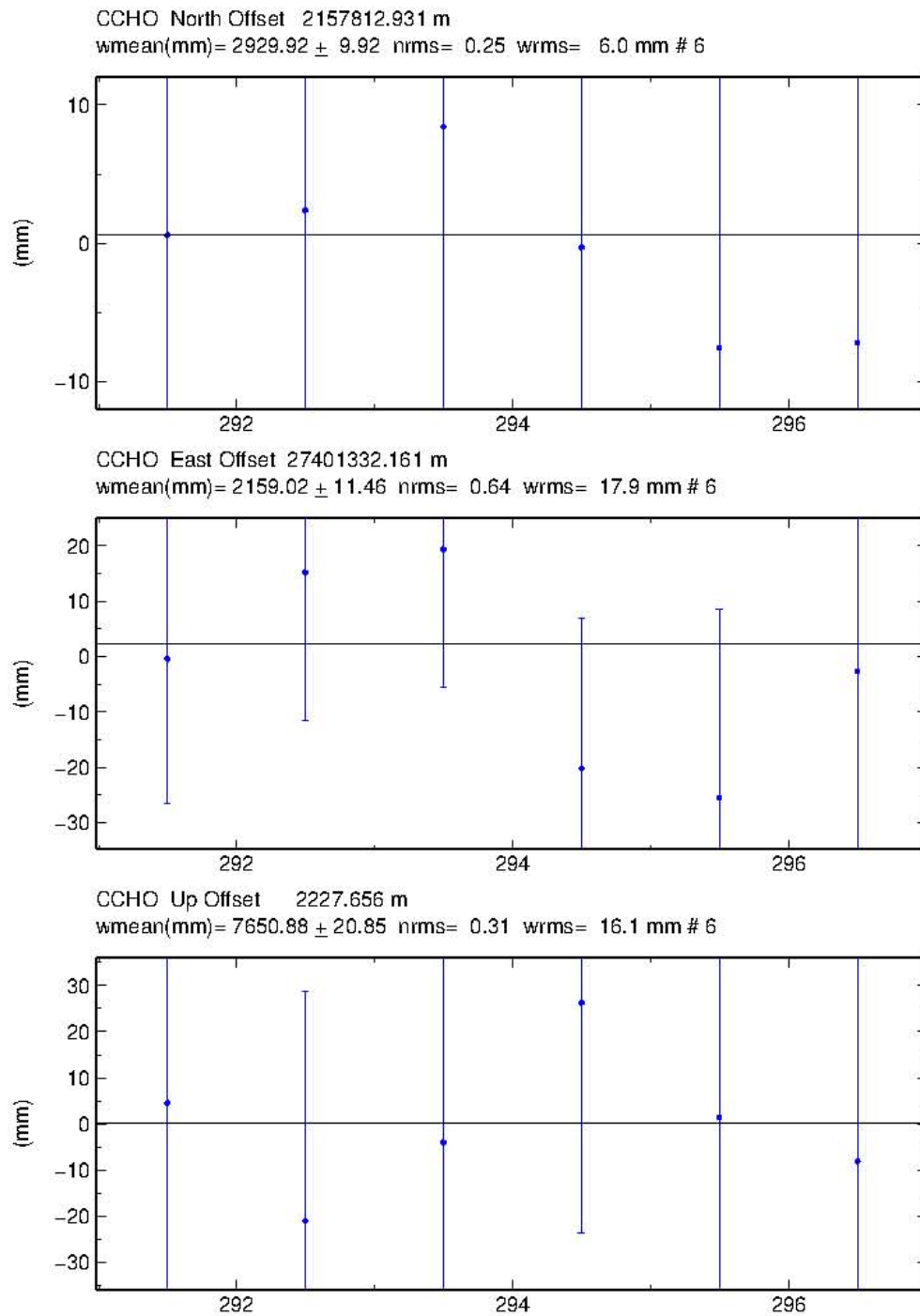
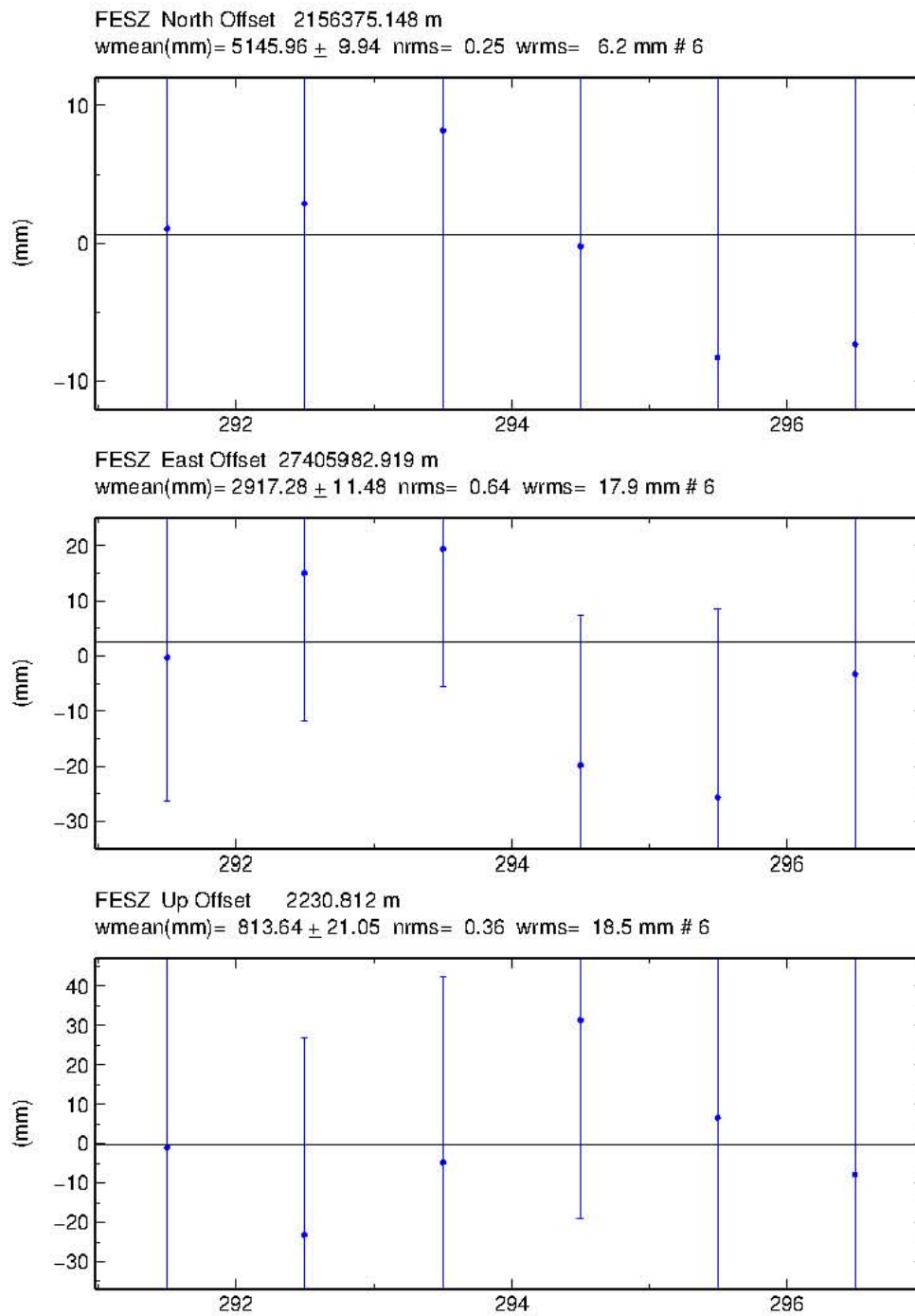


Fig. 6.1.1 Series de tiempo de la Estación CCHO de los días 291, 292, 293, 294 y 296 del 2012.

FESZ



GM 2014 Oct 28 14:27:12

p: 2

Fig. 6.1.2 Series de tiempo de la Estación FESZ de los días 291, 292, 293, 294 y 296 del 2012.

IZT1

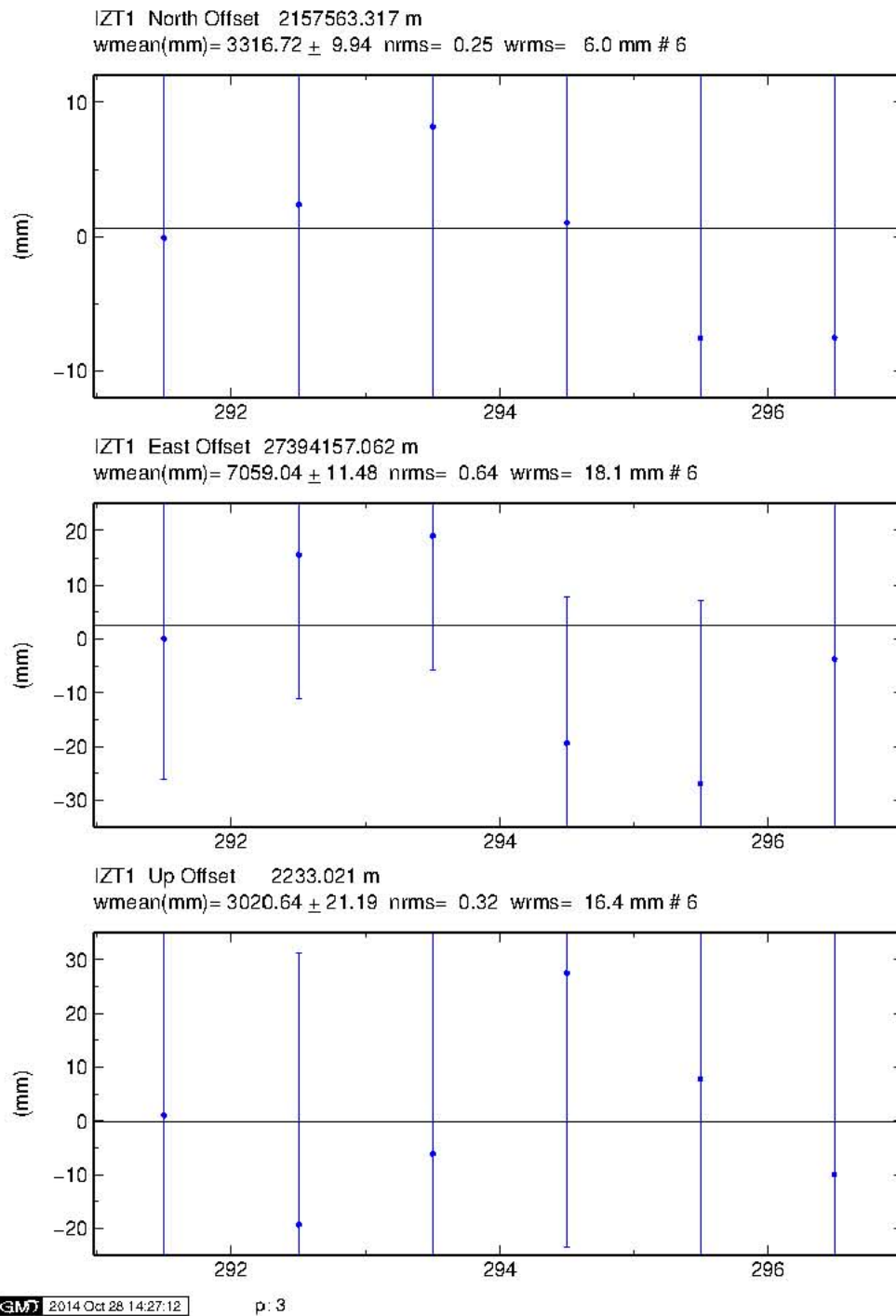
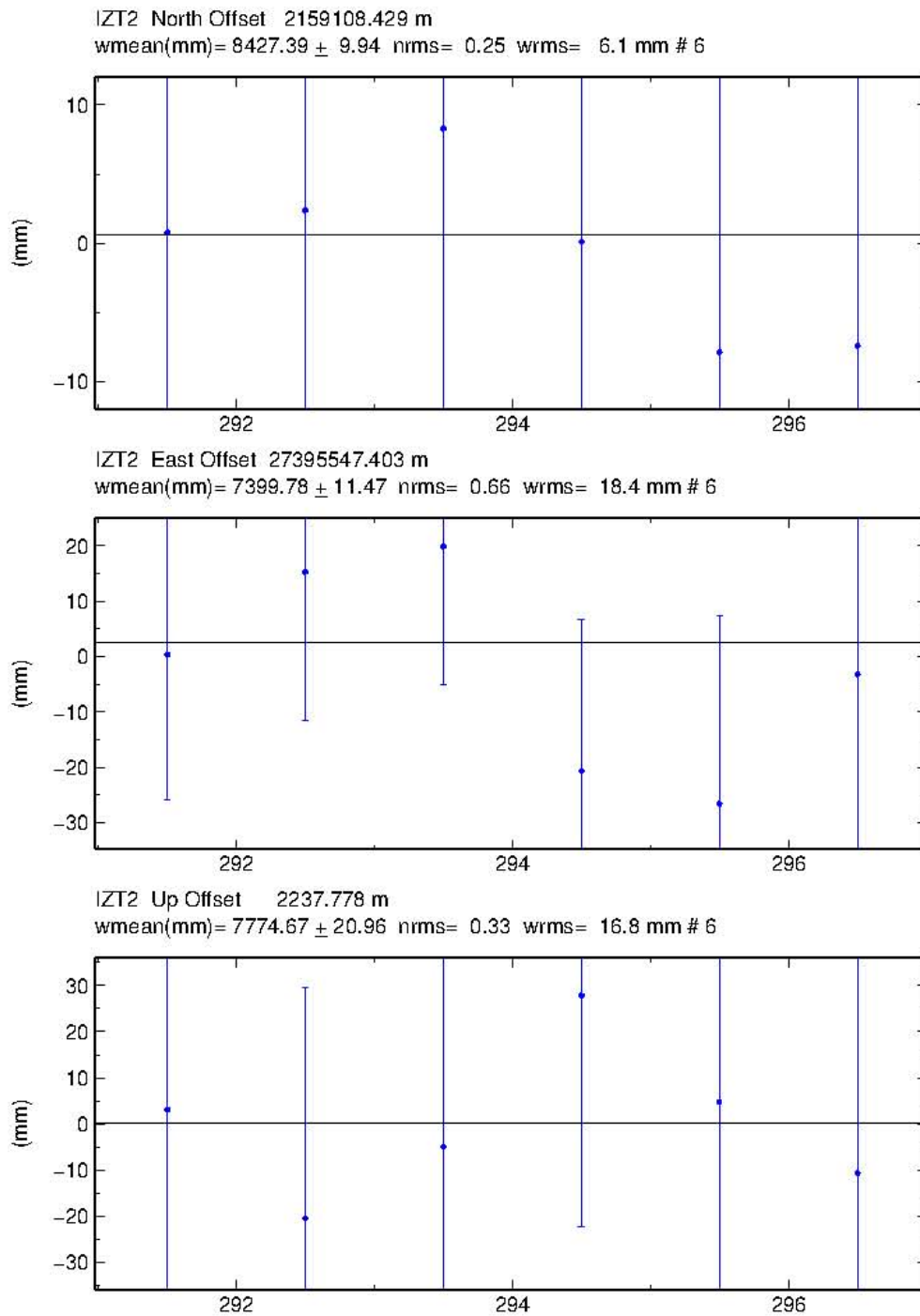


Fig. 6.1.3 Series de tiempo de la Estación IZT1 de los días 291, 292, 293, 294 y 296 del 2012.

IZT2



GM 2014 Oct 28 14:27:13

p: 4

Fig. 6.1.4 Series de tiempo de la Estación IZT2 de los días 291, 292, 293, 294 y 296 del 2012.

Cabe destacar que cuando se analiza el cambio de posición de un vértice geodésico se puede hacer el monitoreo o la observación por campañas o bien observar continuamente, el procedimiento elegido dependerá de la finalidad que se le vaya a dar a la información. En ambos procedimientos se cuantifica el desplazamiento.

El procedimiento por campañas consta de realizar en unos cuantos días observaciones de duración de tiempo suficiente y repetir las observaciones tiempo después. Cuando los datos observados en diferentes fechas se procesan se puede llegar a obtener información de la velocidad del movimiento del terreno, sin embargo se desconoce de cómo sucedió el desplazamiento.

En el procedimiento de observaciones continuas, como su nombre lo indica, se procesan datos continuos (o con pérdida de datos poco significativa) de cada año. La ventaja de este procedimiento es que en las series de tiempo se observa como ocurrió el cambio de posición de la marca geodésica. Esto lo traducimos a cómo ocurrieron los procesos de subsidencia y deformación horizontal, y cuanto se hundió o deformó el terreno anualmente en el caso del oriente del Distrito Federal.

Cuando se corroboró que el postproceso de las estaciones móviles del oriente del Distrito Federal arrojaba datos de calidad y se eligieron las estaciones fijas, o de apoyo, más convenientes se empezó con el postprocesamiento y análisis de datos de las estaciones CCHO y FESZ de los años 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013; y de las estaciones IZT1 e IZT2 de los años 2012 y 2013.

Las series de tiempo de los datos de cada una de las estaciones y de los años y procesados son las siguientes:

CCHO 2008

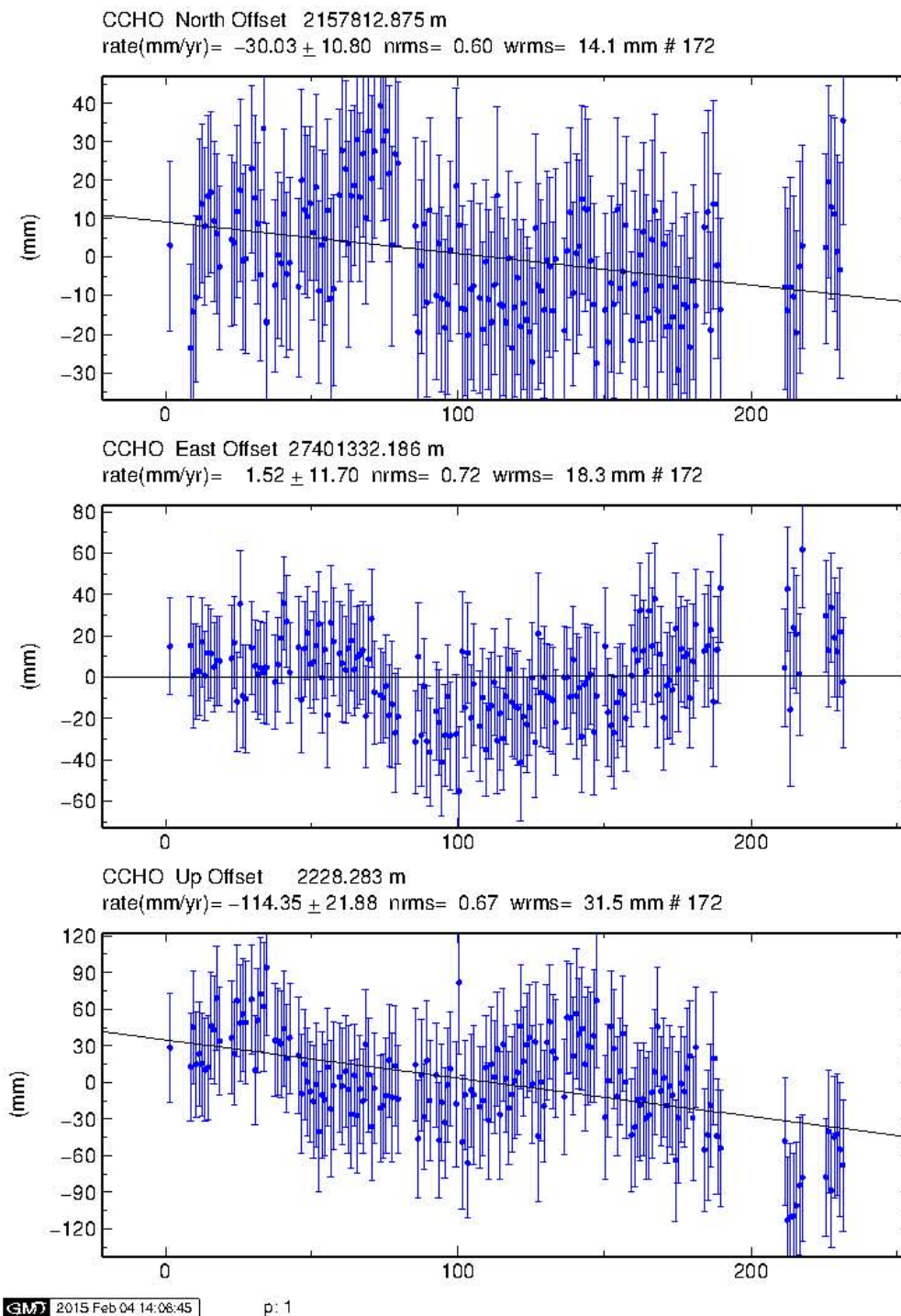


Fig. 6.1.5 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2008

CCHO 2009

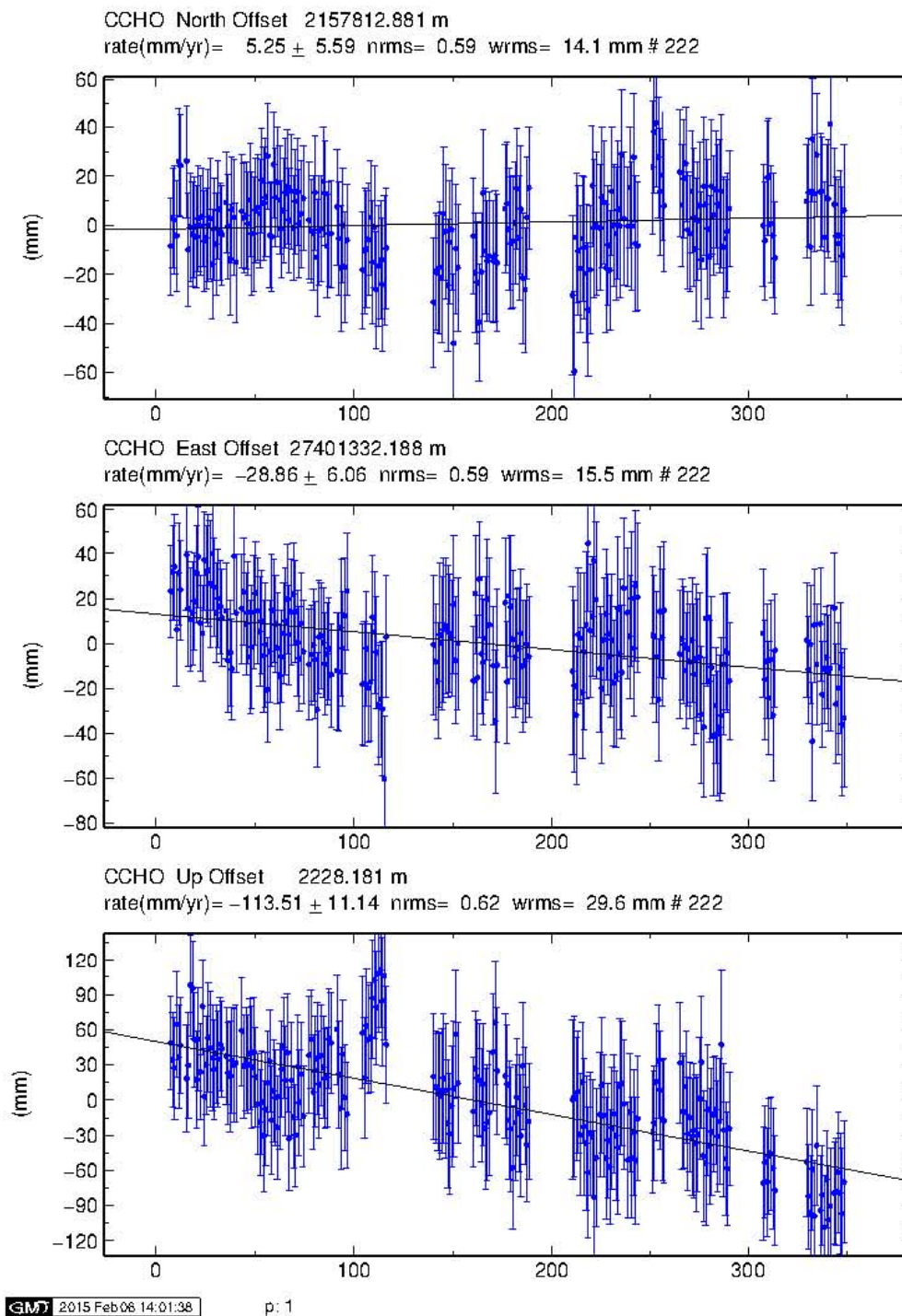


Fig. 6.1.6 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2009

CCHO 2010

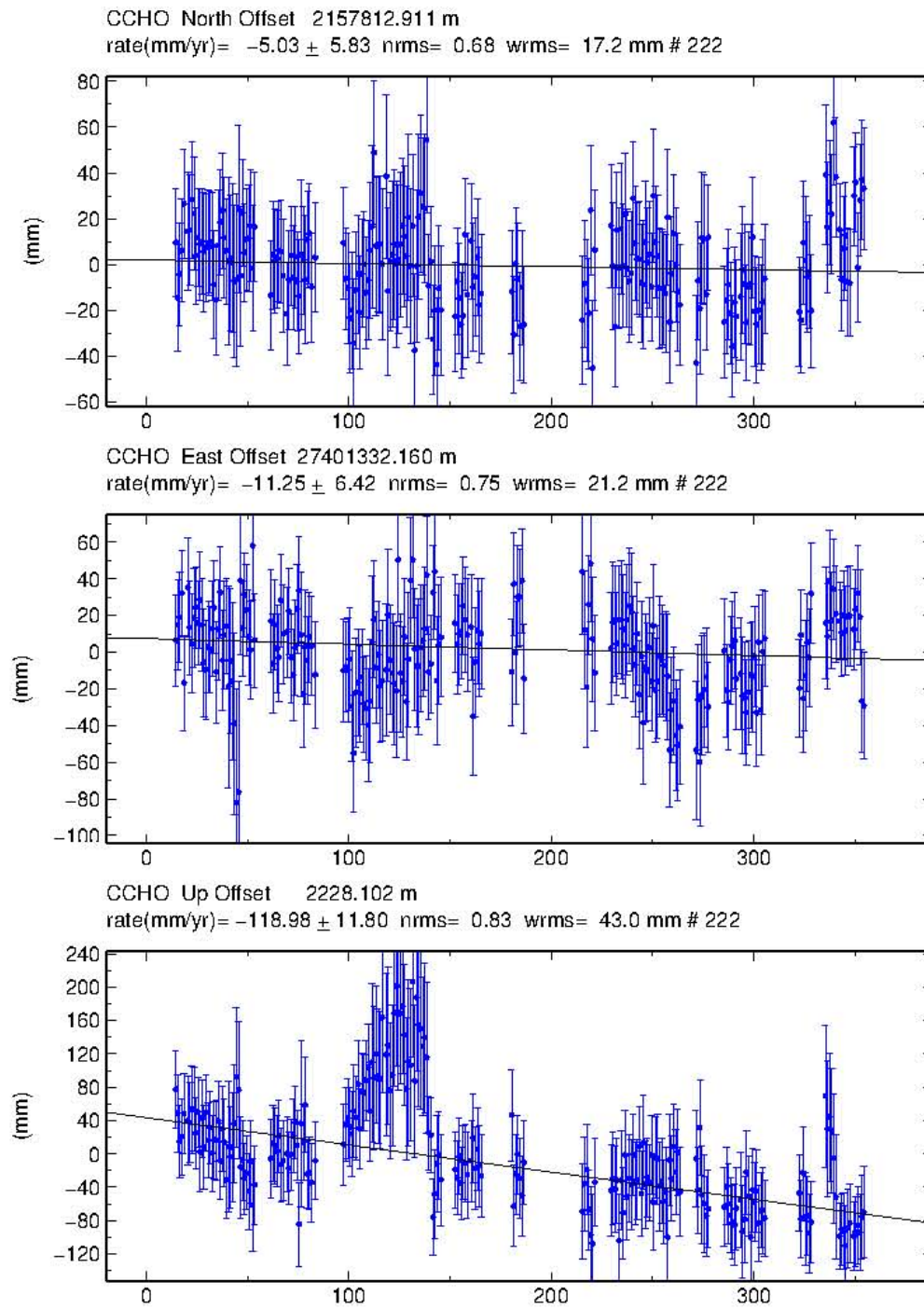


Fig. 6.1.7 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2010

CCHO 2011

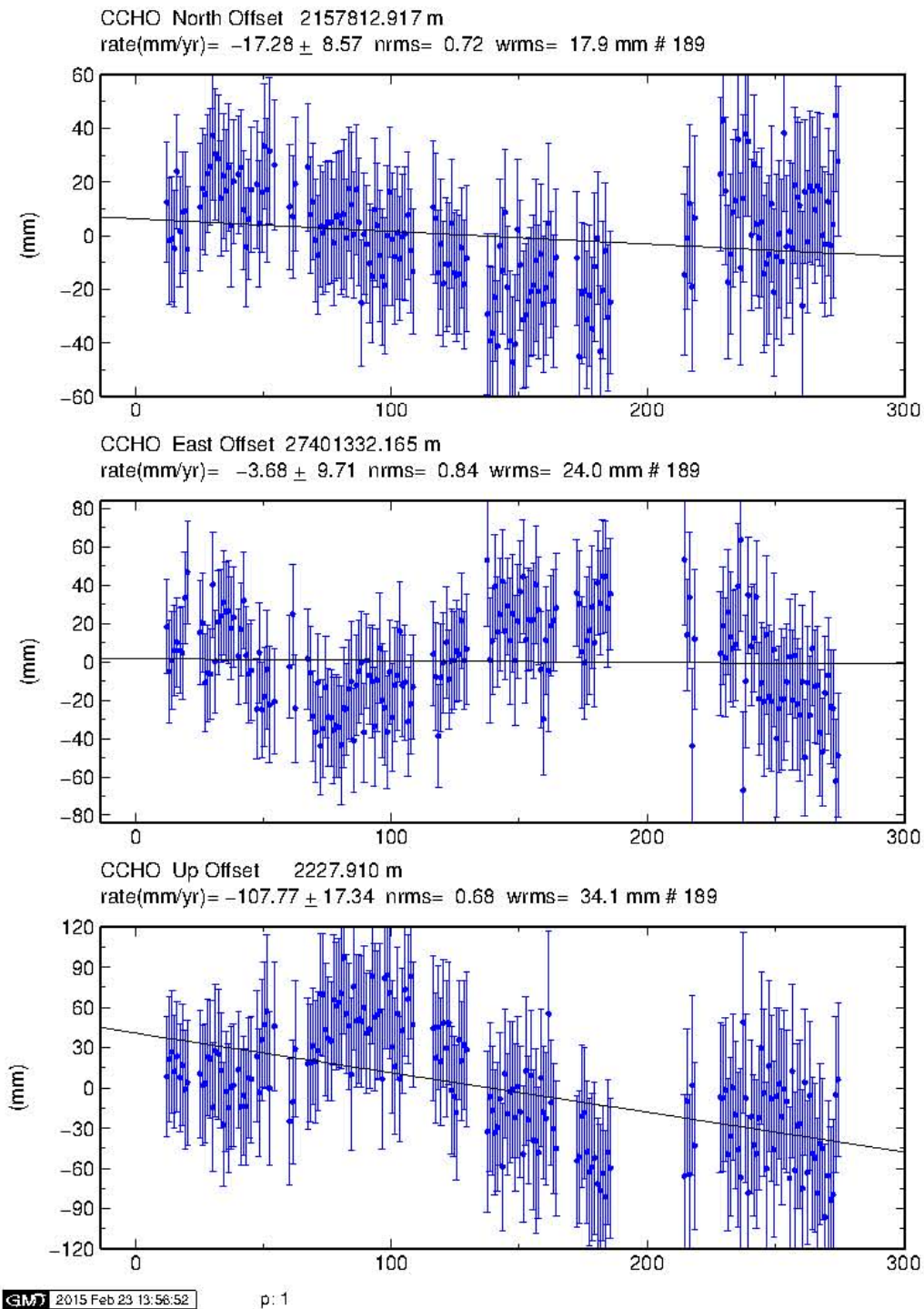


Fig. 6.1.8 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2011

CCHO 2012

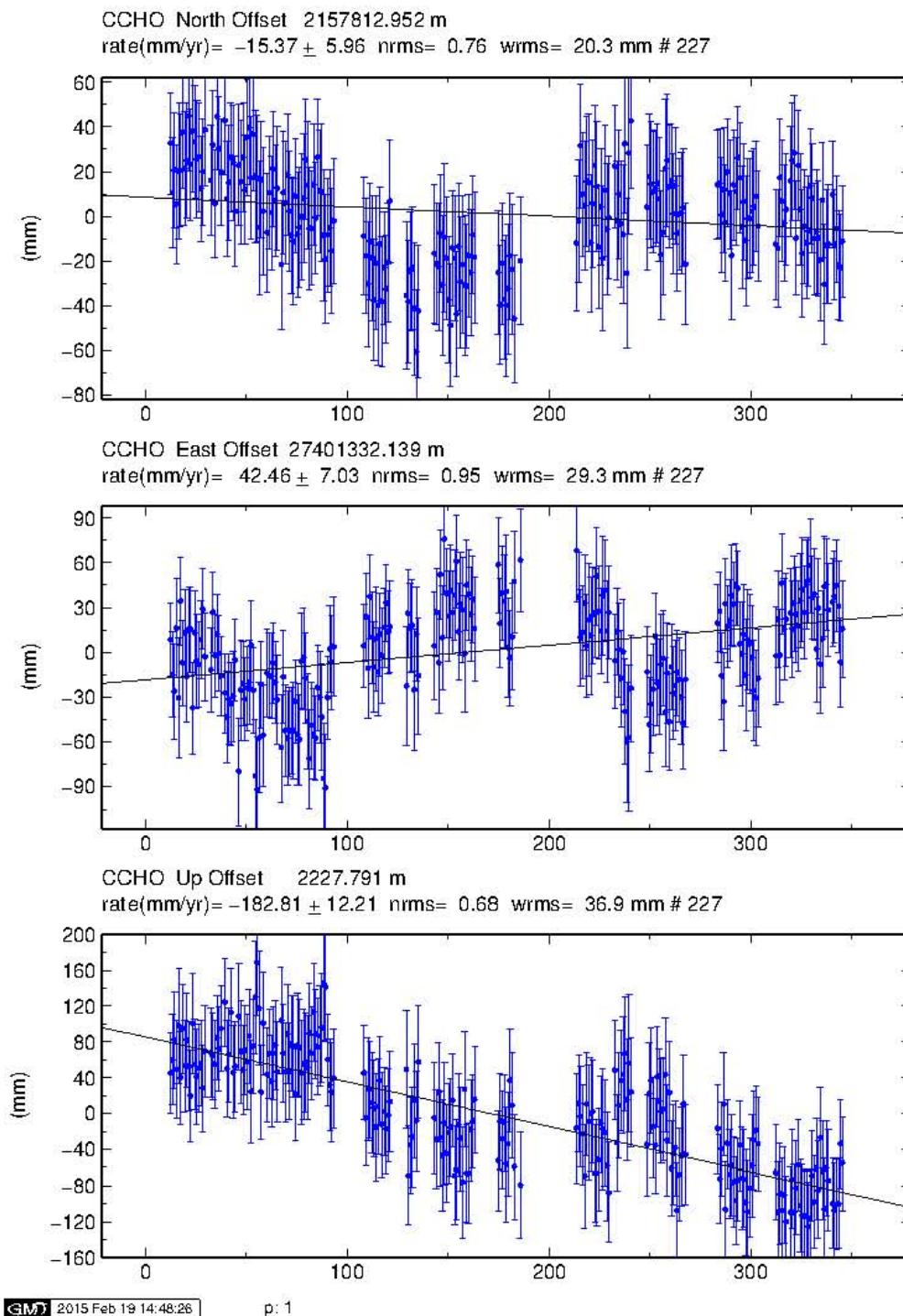


Fig. 6.1.9 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2012

CCHO 2013

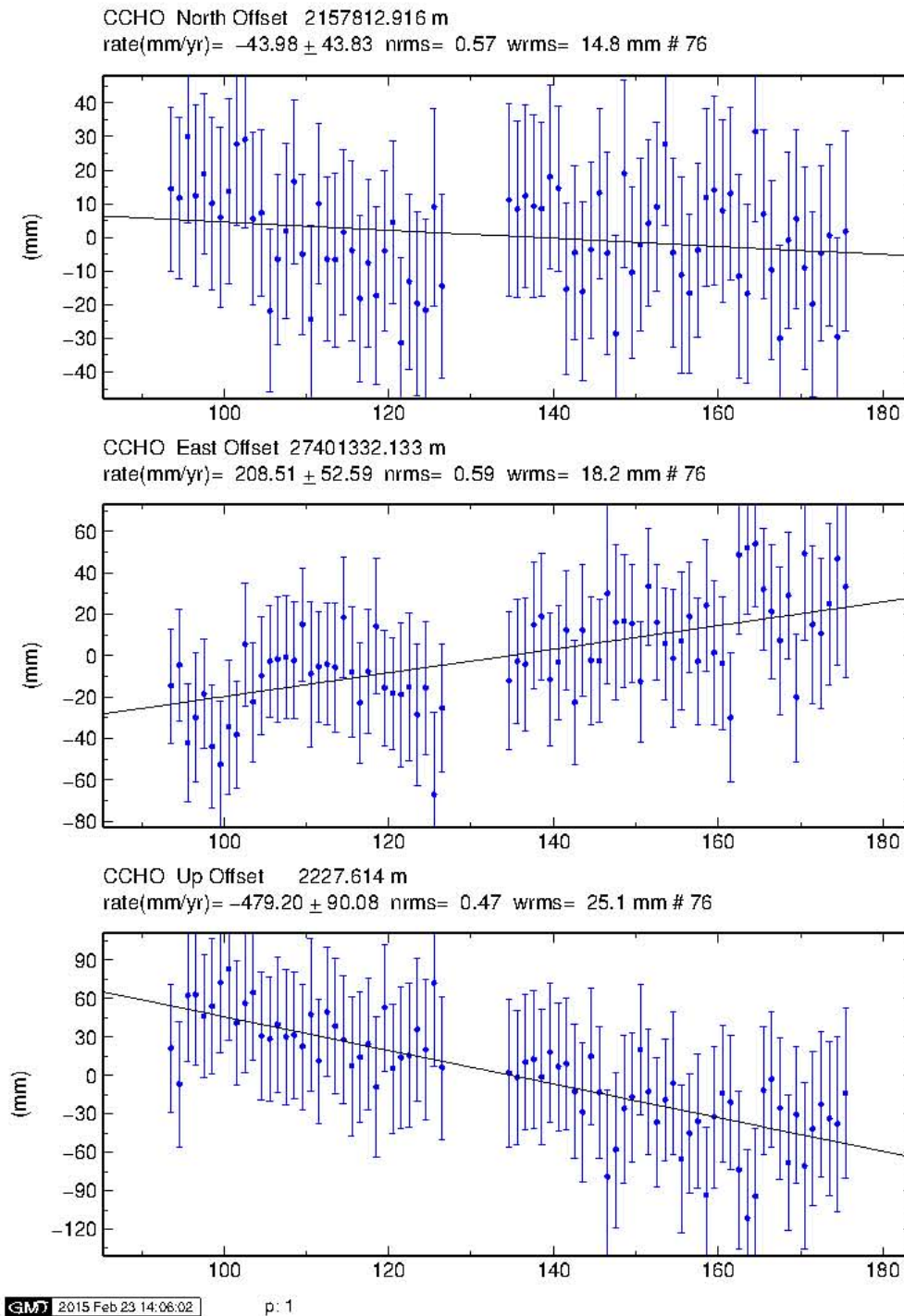


Fig. 6.1.10 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2013

FESZ 2008

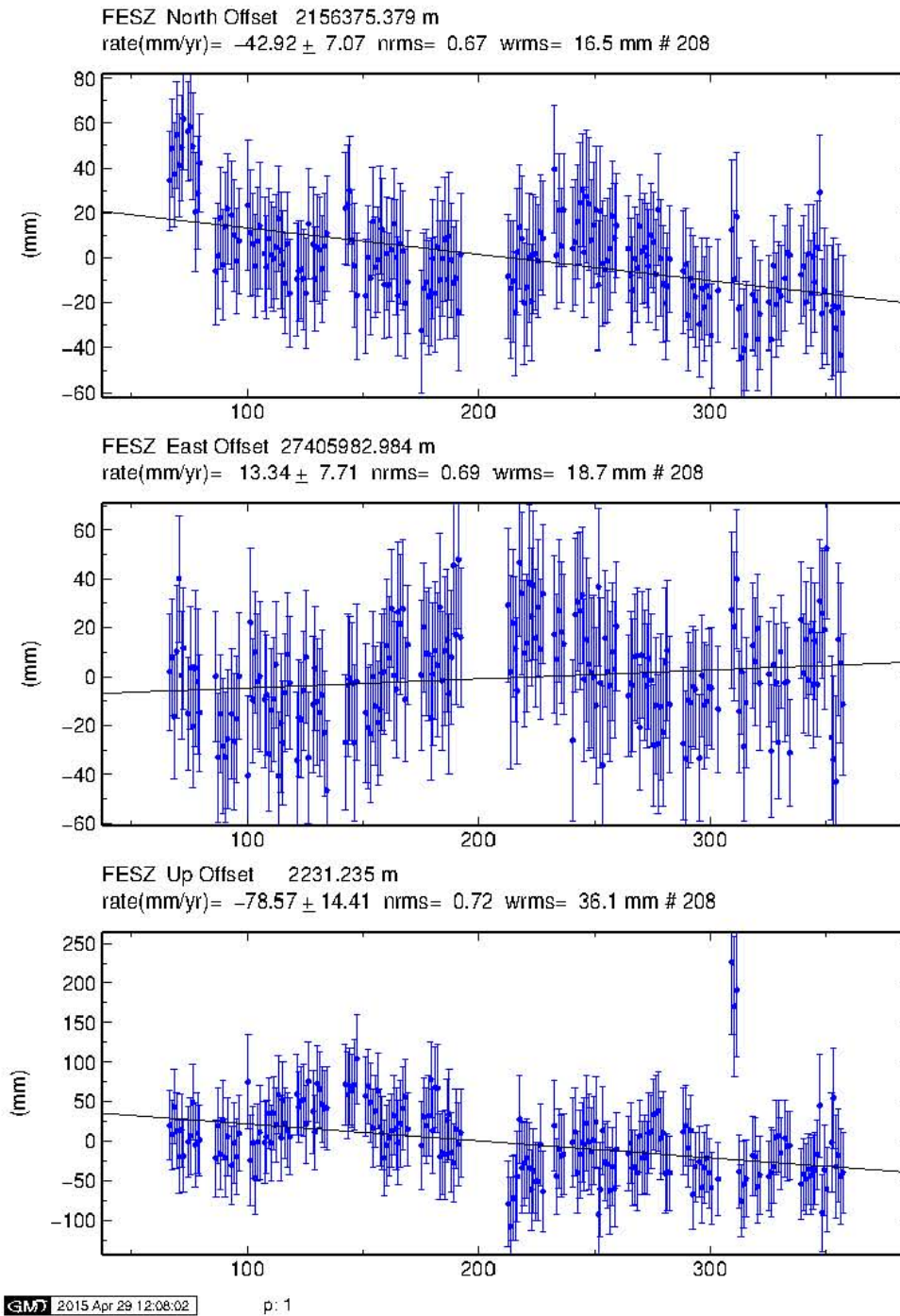
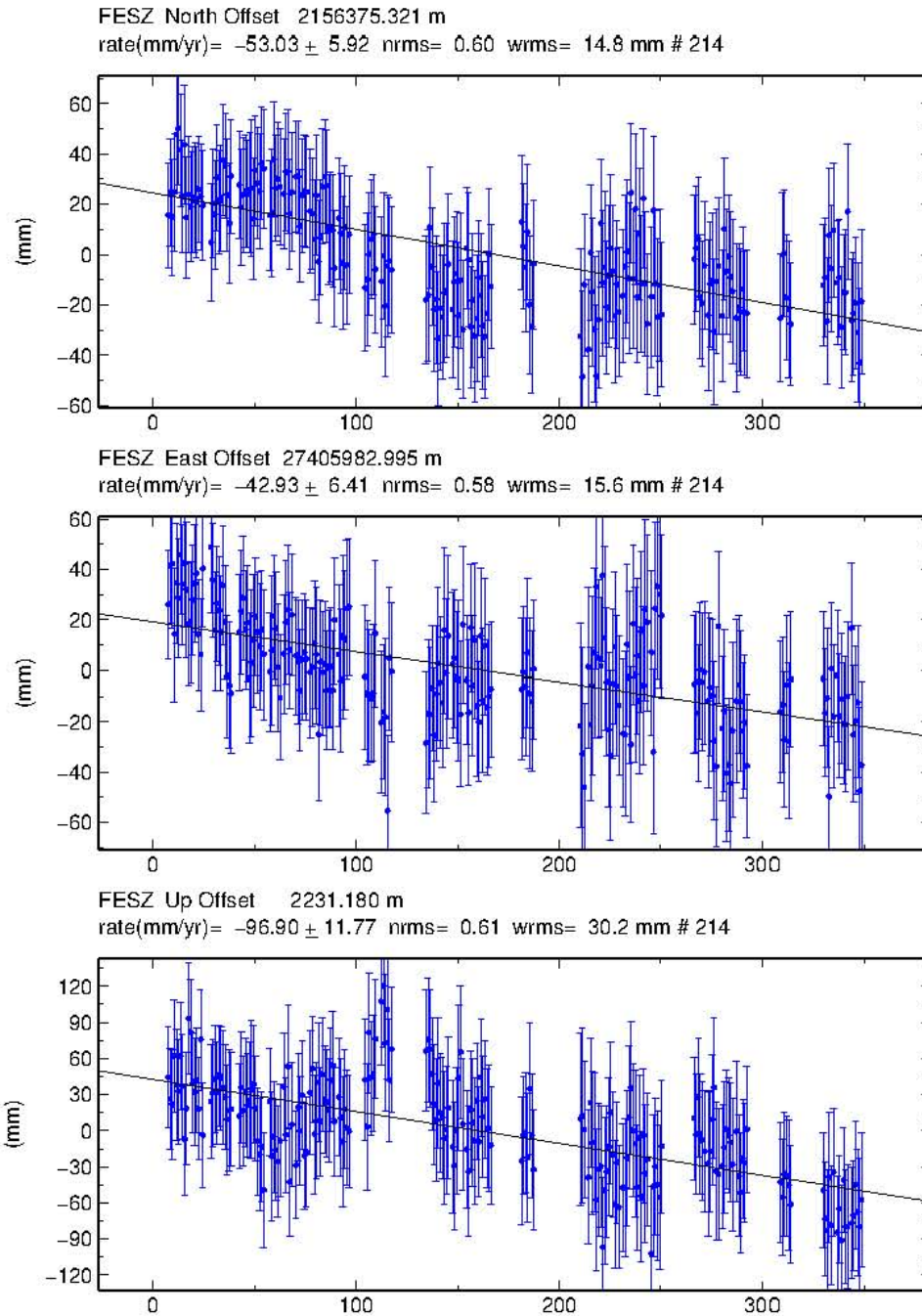


Fig. 6.1.11 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2008

FESZ 2009



GM 2015 Apr 30 23:46:52

p: 1

Fig. 6.1.12 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2009

FESZ 2010

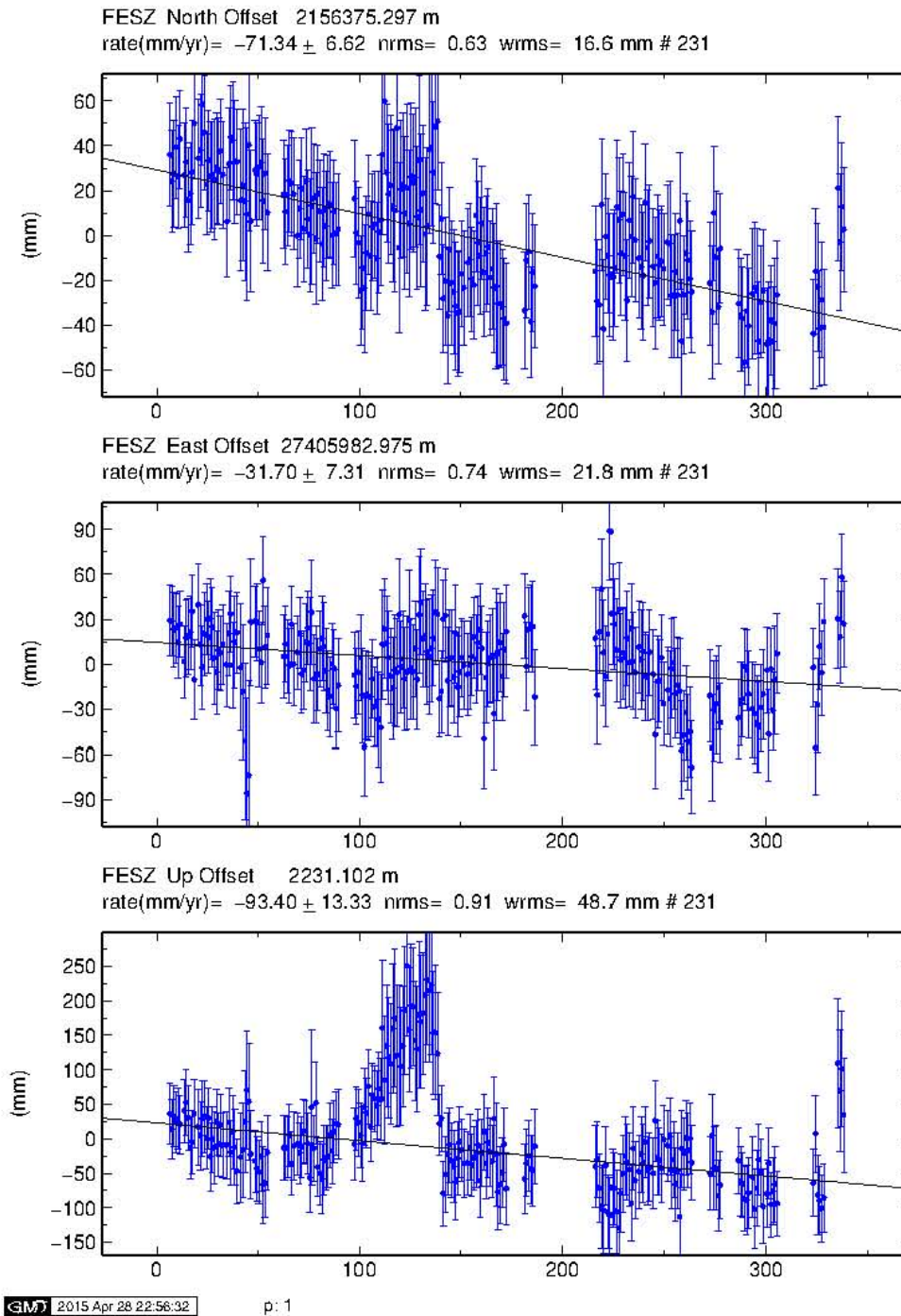
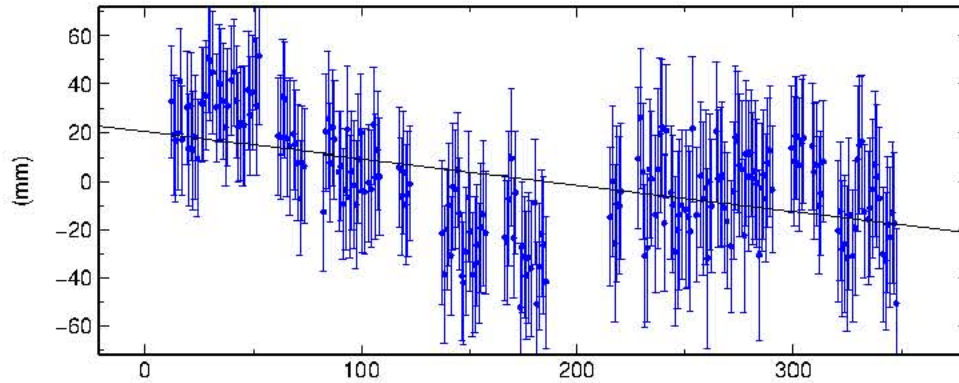


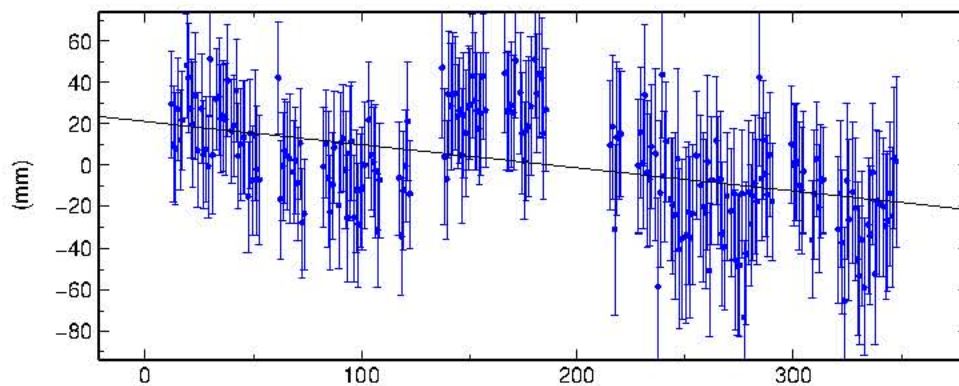
Fig. 6.1.13 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2010

FESZ 2011

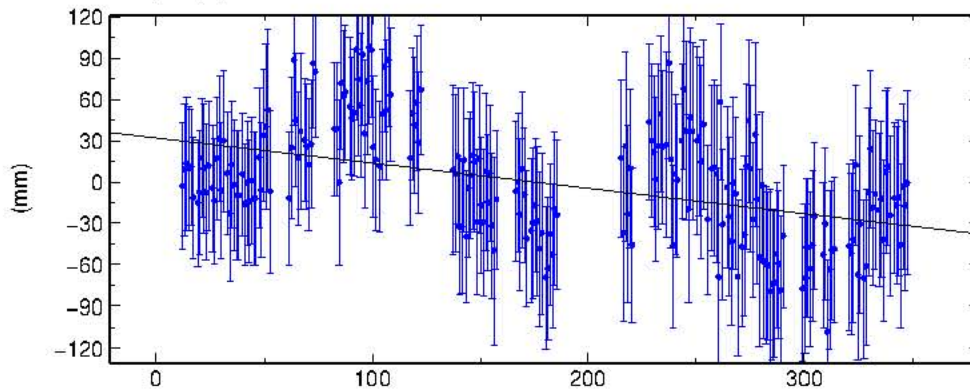
FESZ North Offset 2156375.244 m
 rate(mm/yr)= -39.81 ± 6.22 nrms= 0.74 wrms= 19.4 mm # 217



FESZ East Offset 27405982.949 m
 rate(mm/yr)= -40.97 ± 7.09 nrms= 0.72 wrms= 21.4 mm # 217



FESZ Up Offset 2230.959 m
 rate(mm/yr)= -66.99 ± 12.52 nrms= 0.69 wrms= 36.3 mm # 217



GM 2015 Apr 29 14:15:23

p: 1

Fig. 6.1.14 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2011

FESZ 2012

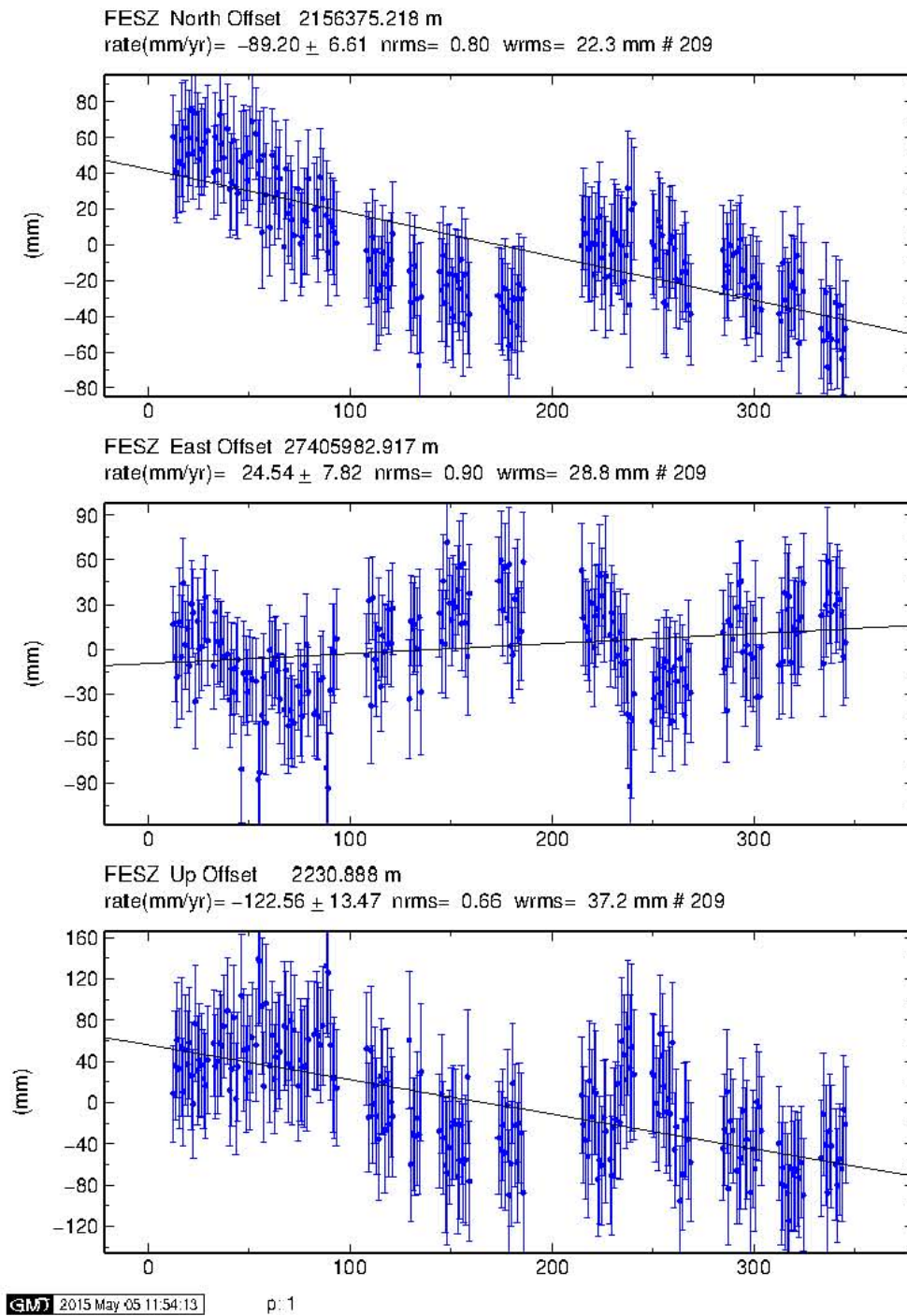


Fig. 6.1.15 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2012

FESZ 2013

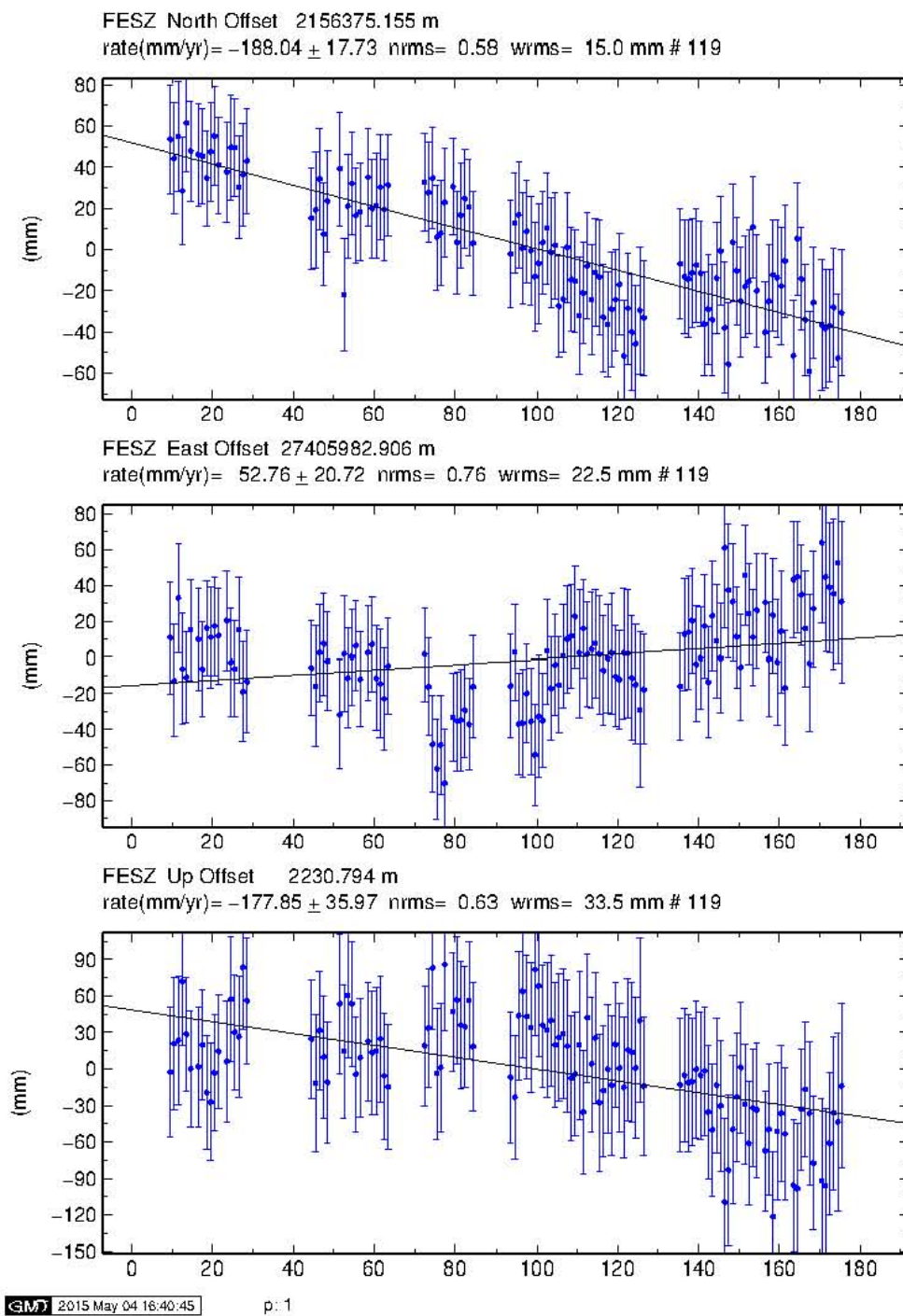


Fig. 6.1.16 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2013

IZT1 2012

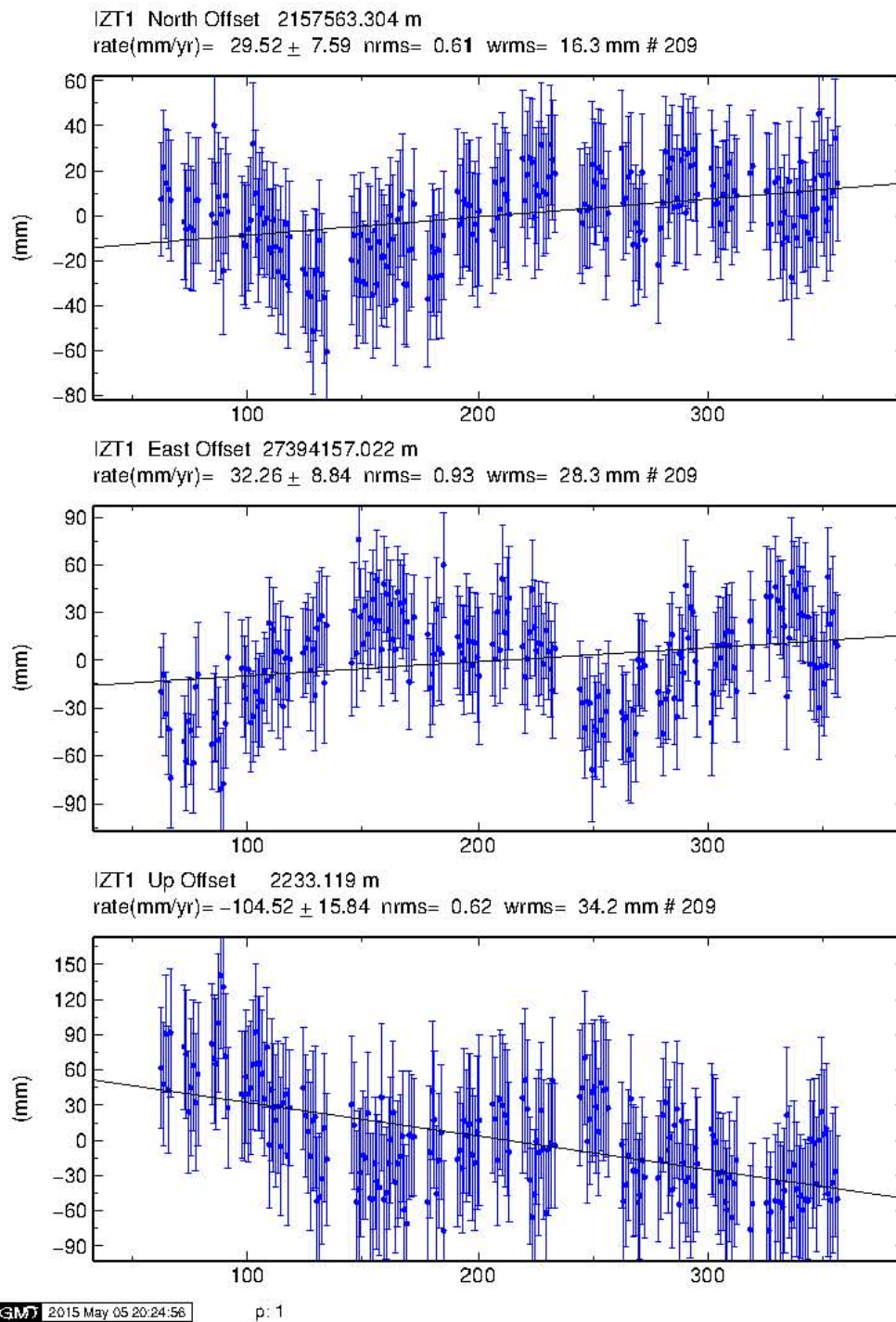


Fig. 6.1.17 Series de tiempo de la Estación IZT1 del año 2012

IZT1 2013

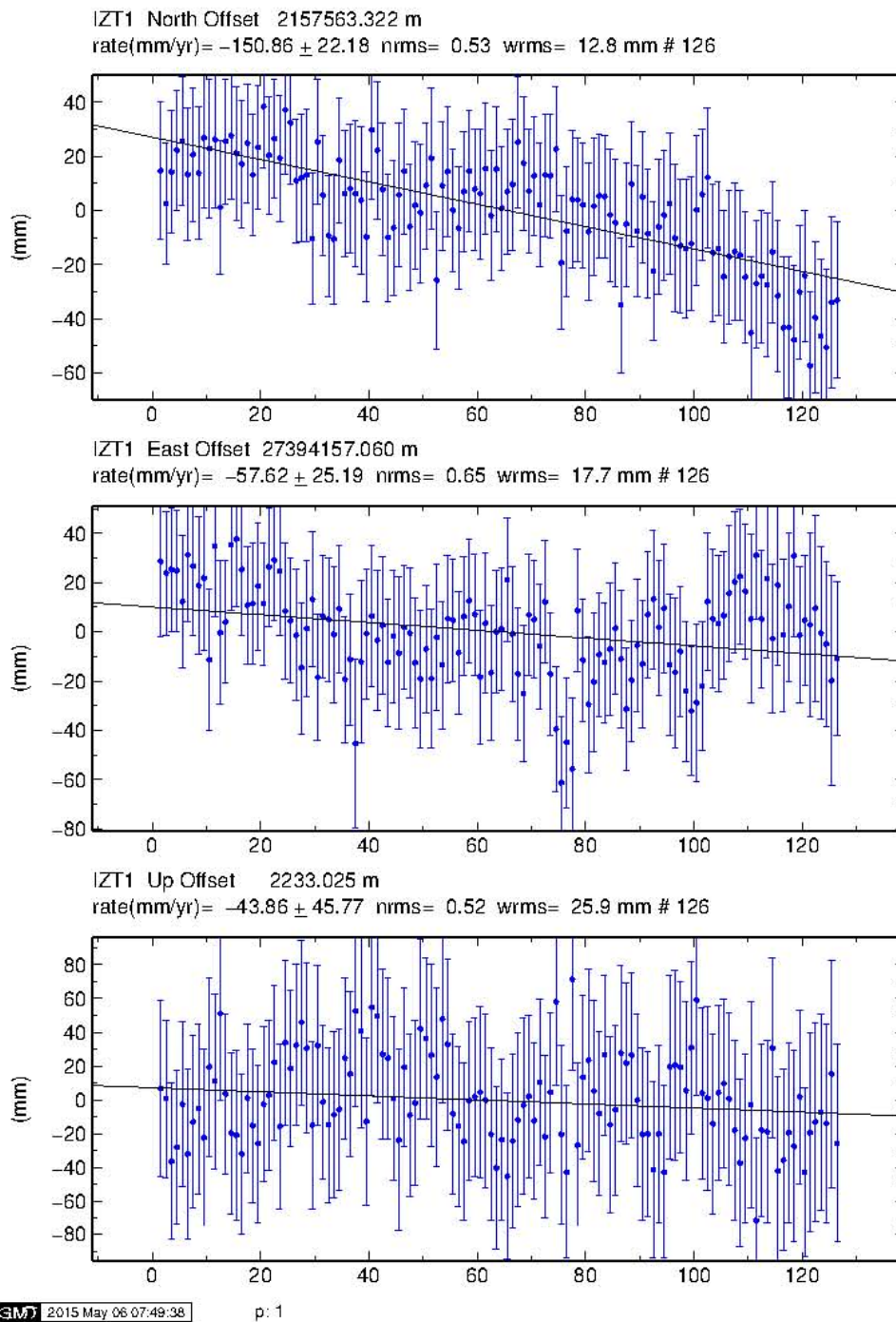


Fig. 6.1.18 Series de tiempo de la Estación IZT1 del año 2013

IZT2 2012

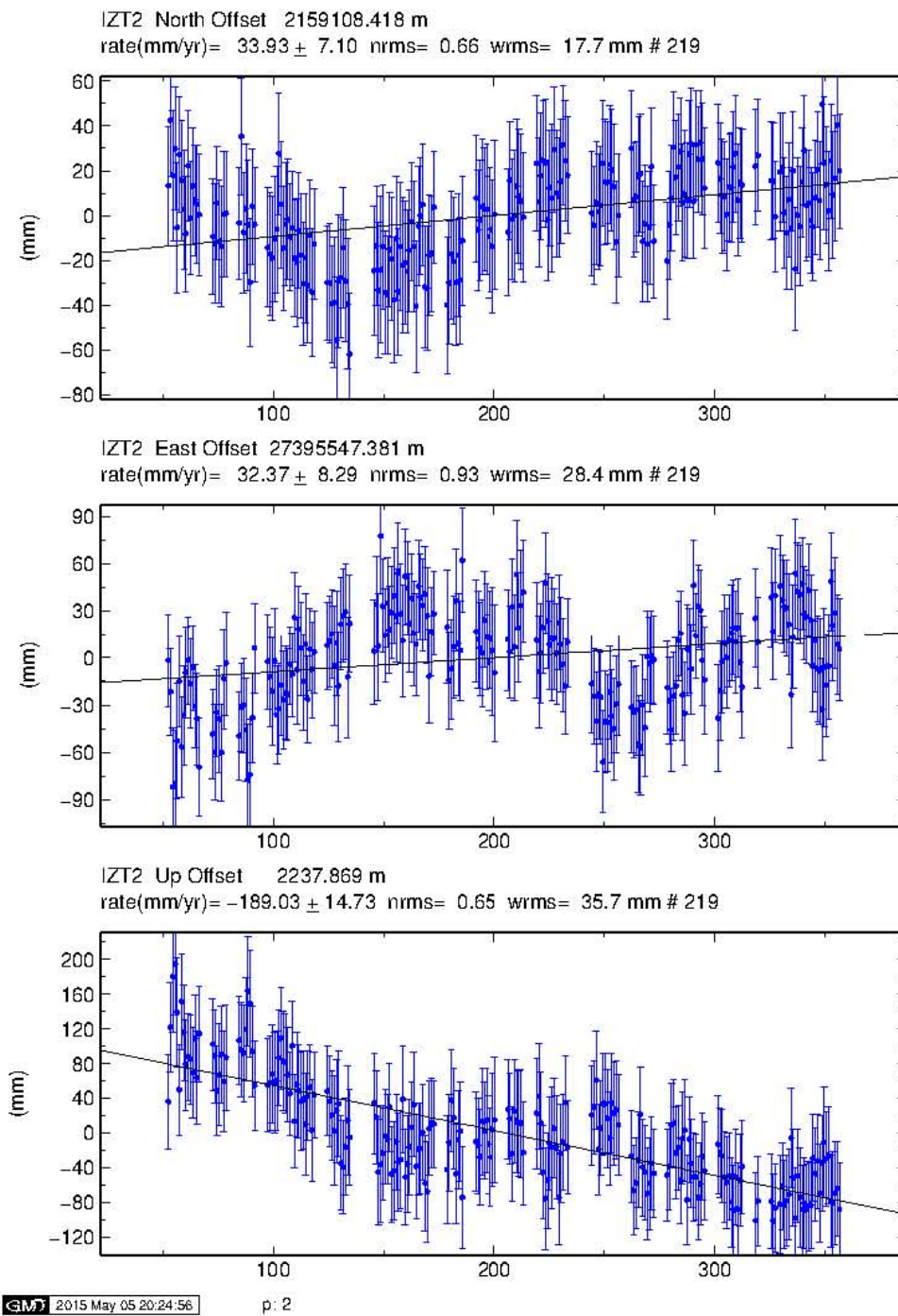


Fig. 6.1.19 Series de tiempo de la Estación IZT1 del año 2012

IZT2 2013

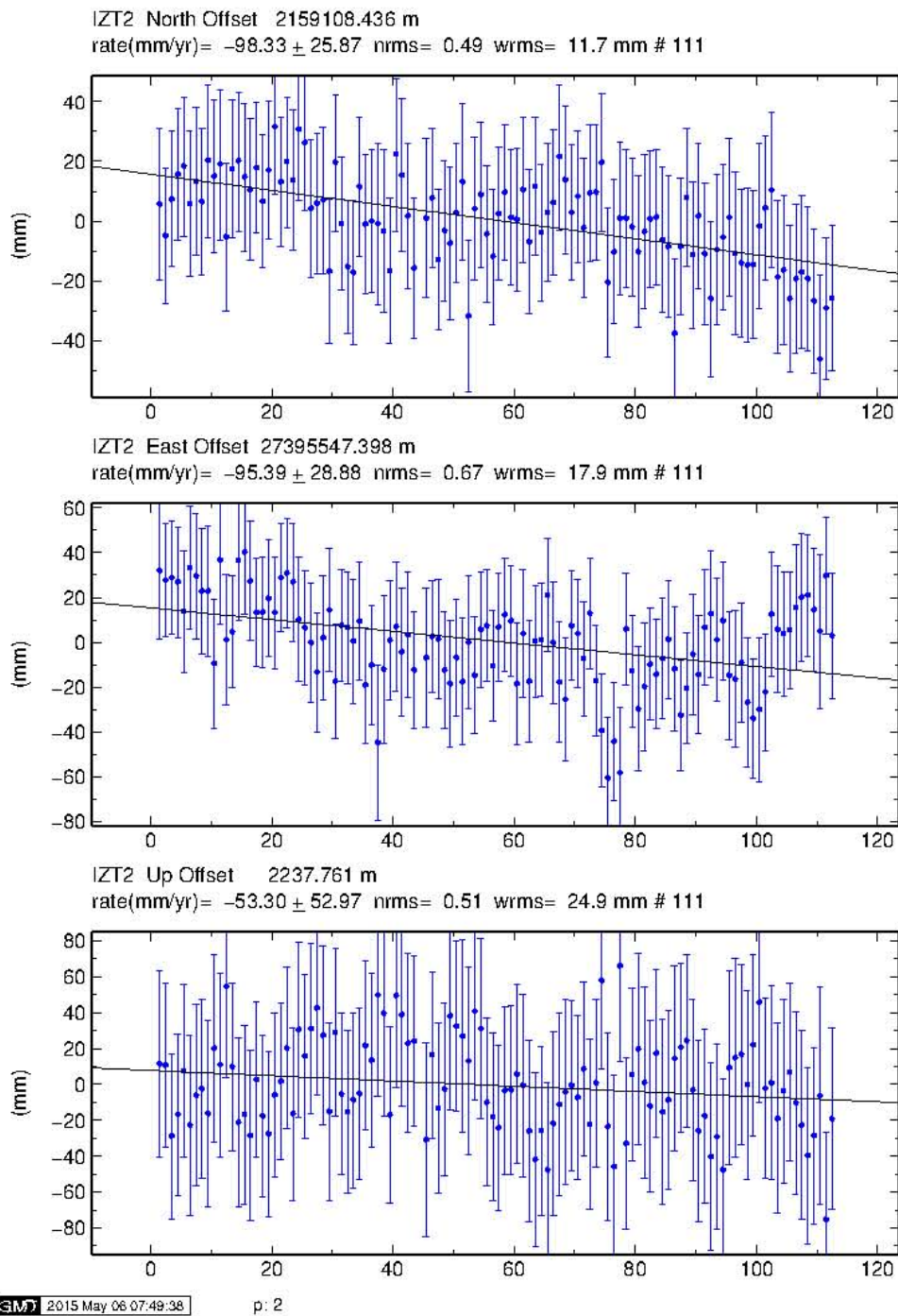


Fig. 6.1.20 Series de tiempo de la Estación IZT1 del año 2013

Para visualizar la información obtenida con respecto a la subsidencia que se presentó del año 2008 hasta el año 2013 en las cuatro estaciones se presentan gráficas multianuales:

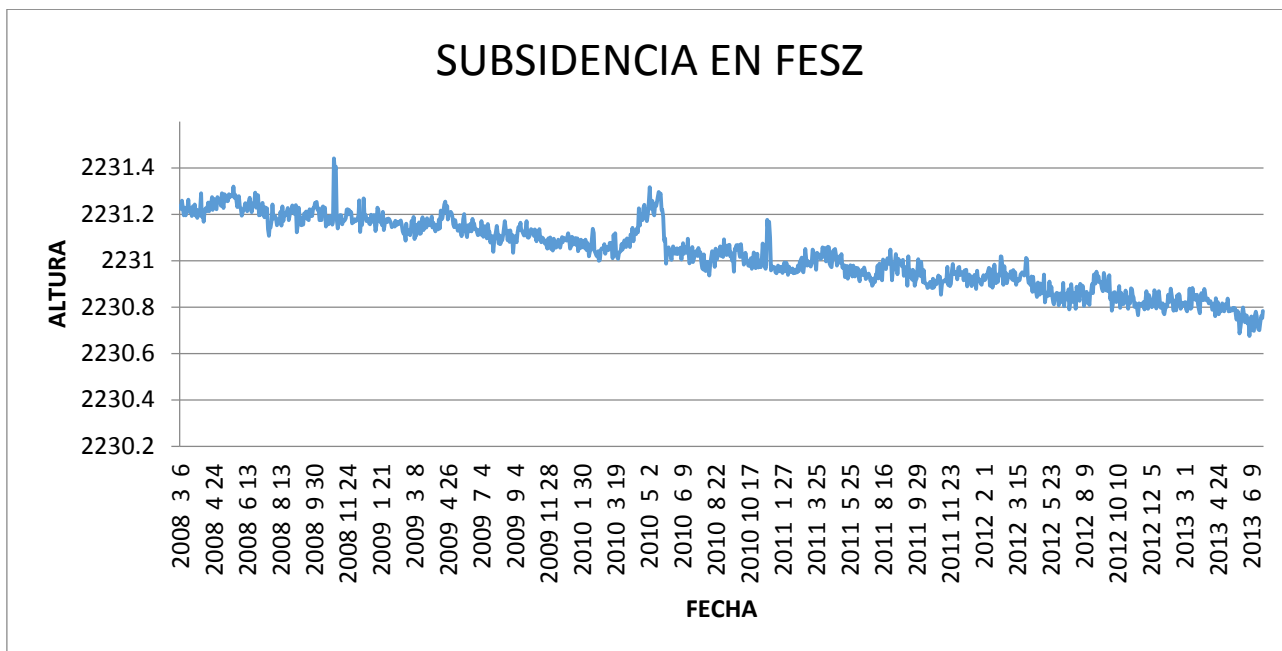


Fig. 6.1.21 Subsidencia de la estación FESZ del 2008 al 2013

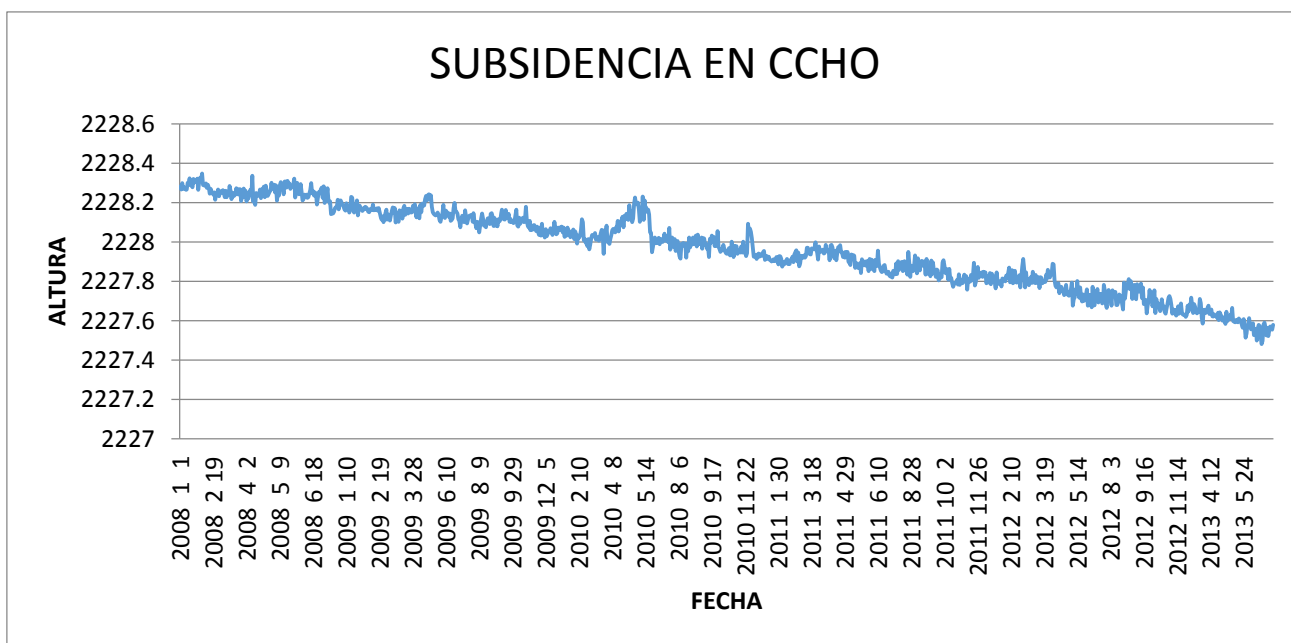


Fig. 6.1.22 Subsidencia de la estación CCHO del 2008 al 2013

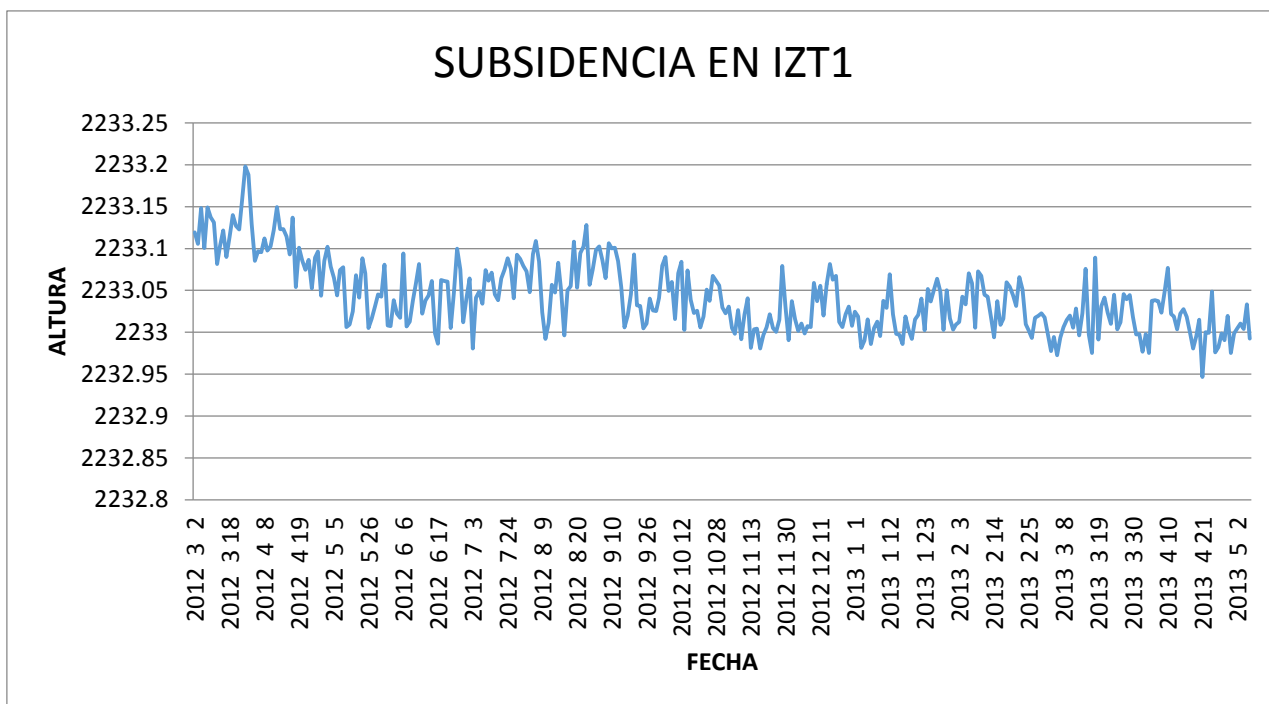


Fig. 6.1.23 Subsistencia de la estación IZT1 del 2012 al 2013

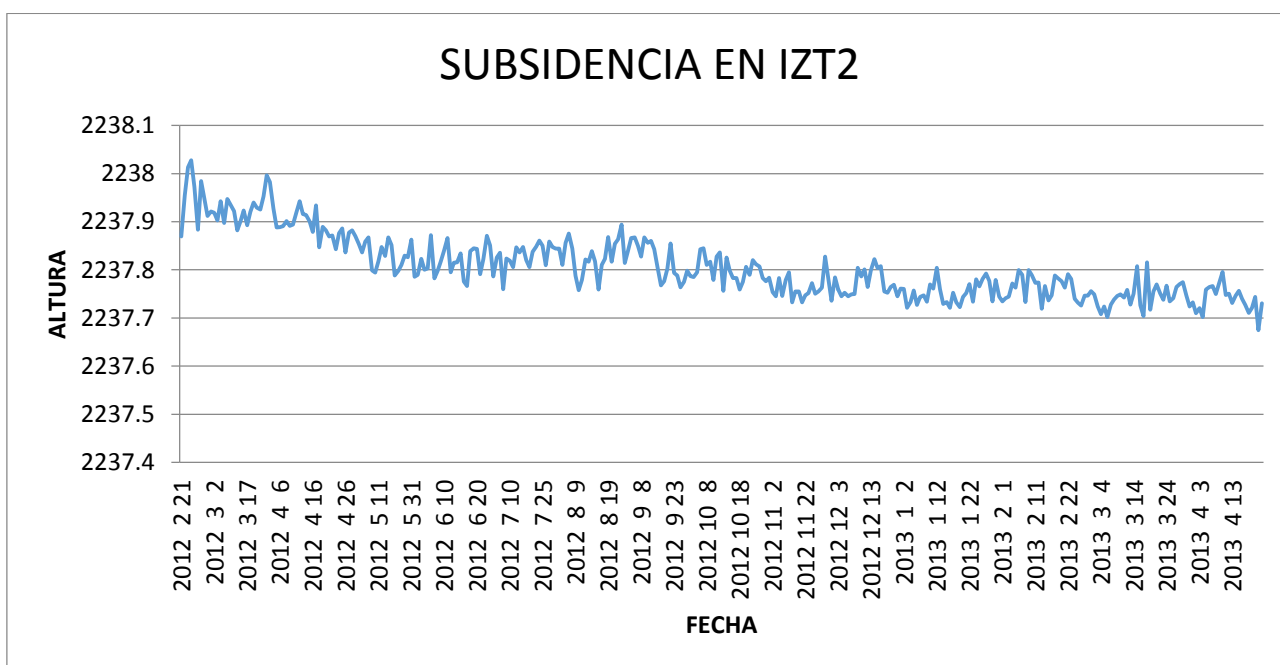


Fig. 6.1.24 Subsistencia de la estación IZT2 del 2012 al 2013

Los anteriores análisis de datos aunque son verídicos y aportan información de gran utilidad no son concluyentes, ya que se pueden integrar algunos datos de días faltantes. De las series anteriores se ha analizado y puesto especial atención en la tendencia o pendiente (rate) de la gráfica que nos dice el desplazamiento en milímetros por año (mm/yr), y en los parámetros de precisión para verificar la calidad del postproceso. No se realizan análisis tales como armónicos o espectrales ya que las series no presentan periodos, si no tendencias. También es conveniente integrar en el postproceso los datos de las estaciones móviles FESZ, IZT1 e IZT2, por último para generar datos históricos se requieren observaciones multianuales (recomendable más de los seis años aquí presentados).

Es importante darle continuidad al proyecto de monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el Distrito Federal porque ya se cuenta con los insumos necesarios (de implementación de estaciones de observación y software de postprocesado) para el desarrollo y la obtención de diversos productos o información como:

- Series de tiempo de posiciones
- Mapas de velocidades de movimiento del terreno
- Mapas de isolneas (dilatación y deformación)
- Modelos de desplazamiento horizontal y vertical
- Tendencias de incremento o disminución en X, Y y Z
- Detección de periodicidad en el desplazamiento o la deformación
- Predicción de la magnitud y dirección del movimiento del terreno.

Con el postprocesado, análisis e interpretación de los datos de los años 2008 a 2013 se verifica el potencial del software utilizado, GAMIT, y que el uso del Sistema de Posicionamiento Global, GPS, es un recurso y método actual de gran utilidad para resolver problemas en Geodinámica.

Capítulo 7. Conclusiones

Como se ha planteado en el presente trabajo, a través de los capítulos que constituyen este documento, se exponen los pasos necesarios para realizar estudios de monitoreo y vigilancia de la subsidencia y deformación horizontal en el Oriente del Distrito Federal.

Durante el desarrollo de este trabajo se ha puesto en marcha la integración de conceptos de diferentes áreas del conocimiento para lograr solucionar problemas presentados y cumplir los objetivos establecidos.

La idea primordial fue aplicar conceptos, técnicas y métodos propios de la Geomática para medir y cuantificar los fenómenos de subsidencia y deformación horizontal que se estudian en Geodinámica. Para esto fue necesario conocer la perspectiva histórica de la geología e hidrología del lugar y conocer las condiciones sociodemográficas de la zona de estudio. También se necesitó presentar un marco teórico relativo al Sistema de Posicionamiento Global, GPS, y a la Geodesia Espacial, que es una ciencia fundamental de la Geomática. A partir de los métodos que se mencionaron en el marco teórico se desglosan la implementación y el procesamiento de la información para realizar el monitoreo. Se hace mención de las consideraciones necesarias para hacer aplicables procesos y conceptos de Geomática y Geodesia a Geodinámica y finalmente se obtienen los resultados para que en una posterior etapa puedan realizarse análisis e interpretaciones y difundir la información recopilada.

Es importante resaltar que el realizar proyectos de este tipo contribuye a resolver problemáticas de carácter social ya que mediante la publicación de resultados se da pie a la implementación de medidas para la prevención de diversos riesgos ocasionados por subsidencia en la zona de estudio.

Los análisis y estudios de hundimiento del terreno en el Distrito Federal y específicamente en el la zona oriente, se han llevado a cabo con mayor frecuencia desde hace aproximadamente setenta años, cuando esto empezó a considerarse como un problema grave. Se infirió que el hundimiento era causado por la sobre explotación de cuerpos de agua subterráneos y la consecuente compactación del material que los contenía. Así también se relacionó que la sobre explotación se estaba dando debido a la creciente demanda de recursos hídricos para abastecer a la población, que aumentaba de la misma forma en la se extraía agua de los acuíferos y en la que se desplazaba verticalmente el terreno.

Uno de los objetivos de este trabajo fue demostrar que el hundimiento se sigue presentando y cuantificarlo permite evaluar las medidas de prevención que en años anteriores han sido propuestas e implementadas, es decir se puede decir si han funcionado o han sido deficientes. También se da pie a proponer nuevas iniciativas y tomar medidas para racionalizar la extracción de agua del subsuelo en el oriente del Distrito Federal.

Con respecto a los resultados encontrados en una primera instancia, mostrados en la series de tiempo, se puede observar que la información de subsidencia obtenida por medio de técnicas con GPS de datos recientes coincide, en una primera aproximación, con los estudios históricos de hundimiento.

El monitoreo de la deformación horizontal, dada por desplazamientos en las coordenadas

Norte y Este, por otro lado contribuye al análisis de movimiento tectónico ocurrido, sin embargo el cambio en esta variable no tiene consecuencias de impacto que generen problemáticas como lo es la subsidencia en el Distrito Federal.

El potencial del uso de los modernos métodos de medición con GPS es grande, específicamente en este caso contribuye a solucionar por medio del cálculo de posiciones precisas la problemática de monitoreo de subsidencia y deformación horizontal, y como se ha mencionado también es aplicable en muchos otros proyectos de diferentes disciplinas, entre ellas Geodinámica.

Conocer el funcionamiento, historia, estructura y los conceptos relativos al Sistema de Posicionamiento Global es fundamental para entender cómo se da el proceso por medio del cual se obtiene y es tratada la información de subsidencia y deformación horizontal. Esta información, del cambio de posiciones de diferentes marcas en el terreno a través del tiempo, se puede decir para concluir que es la punta del iceberg de un proceso estructurado de conocimientos que deben de ser manejados con habilidad en el campo de estudio de la Geomática.

Apéndice A. Manejo del sistema operativo Linux

A.1 Uso de este tipo de sistemas para trabajar y resolver problemas científicos

Linux es un sistema operativo, es decir un conjunto de programas que permiten interactuar a un usuario con un ordenador y ejecutar otros programas.

Un sistema operativo consiste en varios programas fundamentales que necesita el ordenador para poder comunicar y recibir instrucciones de los usuarios; tales como leer y escribir datos en el disco duro, controlar el uso de la memoria y ejecutar otros programas.

La parte más importante de un sistema operativo es el núcleo. En un sistema GNU/Linux, Linux es el núcleo. El resto del sistema consiste en otros programas, muchos de los cuales fueron escritos para un proyecto llamado GNU. Dado que el núcleo de Linux en sí mismo no forma un sistema operativo funcional, preferimos utilizar el término “GNU/Linux” para referirnos a los sistemas que la mayor parte de las personas llaman de manera informal “Linux”.

El núcleo Linux apareció por primera vez en 1991, cuando un estudiante de informática finlandés llamado Linus Torvalds anunció en el grupo de noticias de USENETcomp.os.minix, una primera versión de un núcleo de reemplazo para Minix. (Para más referencias consulte la [página de historia de Linux](#) en Linux Internacional).

Linux es un sistema operativo basado en Unix. Desde sus comienzos, Linux se diseñó para que fuera un sistema multitarea y multiusuario, por lo tanto Linux es una implementación de UNIX, corren en el mismo tipo de plataformas o hardware y son compatibles con los mismos software, sin embargo, se diferencian en que Linux es actualizado por una comunidad cooperativa de desarrolladores mientras que los administradores de Linux se esfuerzan por no quedarse atrás. Linux es legal e históricamente diferente de UNIX

Estrictamente, UNIX designa el núcleo de un sistema operativo multiusuario y multitarea. En un sentido más amplio, comprende el núcleo del sistema operativo más un conjunto de programas que permiten compilar lenguajes de programación, editar texto, interpretar comandos, manejar archivos y discos, acceder a otras máquinas, establecer comunicaciones telefónicas, enviar y recibir correo electrónico y un sinfín de tareas más. Algunos de estos programas pueden haber sido desarrollados por los propios usuarios.

UNIX designa al mismo tiempo un cierto "ambiente de trabajo", un conjunto de circunstancias que encuentra el usuario de la computadora donde corre UNIX, tales como la presentación en pantalla, los programas disponibles y la forma de trabajo que impone o permite.

El proyecto GNU, ha desarrollado un conjunto de herramientas de software libre para ser utilizados por Unix y sistemas operativos tipo Unix como Linux. Estas herramientas permiten a los usuarios desarrollar tareas que van desde las mundanas (como copiar o eliminar ficheros del sistema) a las arcanas (como escribir y compilar programas o hacer edición sofisticada en una gran variedad de formatos de documento).

Aunque hay muchos grupos e individuos que han contribuido a Linux, la Fundación de Software Libre ha sido quien más ha contribuido. No sólo creó la mayor parte de las herramientas que se utilizan en Linux sino también la filosofía y comunidad que hizo que Linux fuera posible.

Los usuarios de Linux tienen una gran libertad al elegir sus programas. Por ejemplo, un usuario de Linux puede elegir entre docenas de distintos intérpretes de línea de órdenes y entre distintos entornos de escritorio. Tantas opciones confunden a veces a los usuarios de otros sistemas operativos que no están acostumbrados a poder modificar el intérprete de línea de órdenes o el entorno de escritorio.

Es menos probable que un sistema Linux se colapse, además tiene mejor capacidad para ejecutar múltiples programas al mismo tiempo y es más seguro que muchos otros sistemas operativos. Debido a estas ventajas, Linux es el sistema operativo que ha experimentado mayor crecimiento en el mercado de los servidores. Últimamente, Linux está empezando a ser popular entre los usuarios domésticos y en empresas además de continuar siendo usado por la comunidad científica.

Actualmente existen sistemas operativos muy sofisticados, como es el caso de Linux, que no son tan sólo unos mensajeros o intermediarios entre dispositivos y aplicaciones sino, que además, realizan otras muchas tareas.

Linux, por todo lo anteriormente expuesto, ha tenido gran aceptación en el mundo académico.

Características de sistemas UNIX/Linux para ser utilizados por la comunidad científica:

- Herramientas de software abundantes (compiladores, editores, utilitarios para muchas tareas).
- Reutiliza el software, a través de la combinación de comandos simples en aplicaciones complejas.
- Portable: el mismo sistema operativo corre en un espectro de máquinas que van desde notebooks a supercomputadoras.
- Flexible: se adapta a aplicaciones diferentes.
- Potente: dispone de muchos comandos y servicios ya incorporados.
- Multiusuario: atiende personas simultáneamente.
- Multitarea: hace varias cosas a la vez.
- Elegante: sus comandos son breves, coherentes, específicos para cada tarea y muy eficientes.
- Orientado a redes desde el comienzo.

Objetivos de UNIX/Linux

UNIX fue diseñado teniendo en mente los siguientes objetivos:

- Crear un sistema interactivo de tiempo compartido diseñado por programadores y para programadores, destinado a usuarios calificados.
- Que fuera sencillo, elegante, escueto y consistente.
- Que permitiera resolver problemas complejos combinando un número reducido de comandos básicos.
- Comandos cortos, simples, específicos y muy eficientes, que "hacen una sola cosa pero la hacen muy bien".
- Entrada y salida estandarizadas que permiten la interconexión de comandos. Esto se llama entubamiento ("pipelining"): la salida de un comando es tomada por el siguiente como entrada.

Los objetivos establecidos en el diseño van de la mano con los requerimientos que tienen los software científicos especializados en varios proyectos de investigación.

Las características y objetivos son suficientes para diferenciar a Linux de otros sistemas operativos más conocidos. Sin embargo, Linux es más diferente de lo que pueda imaginar. Nadie es dueño de Linux, a diferencia de otros sistemas operativos. Gran parte de su desarrollo lo realizan voluntarios de forma altruista.

A.2 Estructura y funcionamiento del sistema

La característica más distintiva del sistema operativo UNIX es la estructura del sistema de archivos.

La estructura del sistema de archivos se asemeja a un árbol invertido, con los archivos del usuario como las hojas a lo largo de la parte inferior y la raíz en la parte superior. El directorio principal del usuario se coloca en la punta de la estructura, pero el usuario no se limita a ese directorio. Es posible moverse en el árbol hacia arriba, abajo, hacia los lados, en directorios pertenecientes a otros usuarios y/o en el sistema.

Los usuarios pueden proteger sus archivos y directorios de las miradas indiscretas de los demás cambiando los permisos de acceso.

Cada archivo y directorio tiene un nombre con una ruta que lo identifica de manera única. El camino se describe, a partir de la raíz, a través de las ramas del árbol y finalmente al directorio que contiene el archivo. Los nombres de archivo deben ser únicos dentro de cada

directorio. En UNIX, esta estructura de árbol se extiende por todos los sitios que existen en él.

Para ejecutar los programas y comandos propios de UNIX existe una terminal, o línea de comandos, en la cual el usuario interactúa especificando órdenes expresadas como comandos mediante el teclado.

El intérprete de comandos (shell)

El intérprete de comandos de UNIX, o shell, es un proceso que muestra un indicador de comandos (\$, %, o #) y aguarda que el usuario digite un comando. Cada vez que el usuario digita un comando, el intérprete lo valida, y si es correcto crea un proceso hijo que realiza la acción encomendada. Al terminar el proceso hijo, muestra nuevamente el indicador de comando e intenta leer una nueva línea de la entrada.

En UNIX, hay dos tipos principales de shell:

1. El shell Bourne (sh). Si está utilizando un Shell de tipo Bourne, el símbolo por defecto es el carácter \$.
2. El shell C (csh). Si está utilizando un shell de tipo C, el símbolo por defecto es el carácter %

A.3 Comandos básicos

Comandos en el sistema UNIX.

En UNIX, los comandos son programas ejecutables separados. El shell como intérprete de comandos puede expandir y cambiar la manera en que actúan, admite el uso de comodines y la interconexión o entubamiento de comandos.

Estructura de comandos.

La estructura general de un comando es la siguiente:

nombre opciones argumentos

- *nombre* es el nombre del comando.
- Las *opciones* o banderas controlan la forma en que actúa el comando; van precedidas por el signo - (menos).
- Los *argumentos* son comúnmente nombres de archivos o nombres de login de usuarios.

Ejemplos:

```
pr -l23 nota
pr -l23 LEAME
```

Da formato y muestra el archivo indicado en páginas de 23 líneas de largo para que quepa en la pantalla.

```
pr -d -l23 LEAME
```

Muestra el archivo LEAME a doble espacio, con un largo de página de 23 líneas.

```
pr -d -o15 -l23 LEAME
```

Da doble espacio, margen izquierdo de 15 espacios y largo de página de 23 líneas.

```
cat nota LEAME
```

Concatena los archivos, los presenta uno tras otro.

```
cat nota LEAME | pr -l23
```

Concatena los archivos y luego les da formato a los dos juntos.

Expansiones de la línea de comando.

Los comodines son caracteres que sustituyen cadenas de caracteres.

- * secuencia de caracteres cualesquiera, 0 o más.
- ? caracter cualquiera, uno y uno sólo.
- [...] sustituye los caracteres indicados individualmente.

Comandos básicos UNIX/Linux:

Comandos de archivo		
1.	ls	Listado en el directorio
2.	ls-al	Listado ordenado con los archivos ocultos
3.	ls -lt	Mostrar la lista ordenada por modificación temporal
4.	cd dir	Cambiar el directorio a dir
5.	cd	Cambiar al directorio <i>home</i>
6.	pwd	Mostrar directorio actual de trabajo
7.	mkdir dir	Crear de un directorio
8.	more file	Mostrar el contenido de un archivo
9.	head file	Mostrar las primeras 10 líneas del archivo de salida
10.	tail file	Mostrar las 10 últimas líneas del archivo de salida
11.	rm file	Eliminar un archivo
12.	rm -r dir	Eliminar un directorio
13.	cp file1 file2	Copiar el contenido de archivo1 al archivo2
14.	mv file1 file2	Renombrar o trasladar archivo1 a archivo2
15.	file link ln -s	Crear enlace simbólico vinculado al archivo

Gestión de procesos		
1.	ps	Mostrar el trabajo actual
2.	top	Mostrar todo proceso en ejecución
3.	exit	Salir
4.	killall proc	Termina todo proceso
Permisos de archivo		
1.	chmod file	Cambiar el permiso del archivo
Ámbito		
1.	grep pattern file	Buscar un patrón en archivo
2.	locate file	Encontrar todas las instancias del archivo
Información del sistema		
1.	date	Mostrar la fecha y hora actuales
2.	cal	Mostrar el calendario de este mes
3..	cat proc/meminfo	Información sobre la memoria
4.	man	Mostrar el manual del comando
5.	du	Mostrar el uso del espacio directorio

REFERENCIAS DEL APÉNDICE A: [5], [6], [9], [18], [21], [23].

Glosario

Ajuste. Proceso de corregir mediciones para producir los valores más probables, o los mejores valores finales de los valores desconocidos. Un ajuste se realiza cuando una serie de observaciones contiene redundancias. El proceso de ajuste ayuda a encontrar y eliminar errores en las observaciones y produce indeterminaciones estadísticas que se pueden usar para estimar la precisión final de la medición realizada.

Almanaque. Conjunto de parámetros incluidos en el mensaje de navegación que integran los datos transmitidos por un satélite GPS referentes a la información de las órbitas de cada satélite, esta información es actualizada continuamente y permite conocer de antemano la geometría de la constelación.

Altura. Distancia vertical entre un punto y una superficie de referencia, para la altura elipsoidal la dicha superficie es el elipsoide de referencia. Con el sistema GPS se calculan alturas elipsoidales.

Ambigüedad. Número arbitrario de ciclos observados en la fase portadora como un sesgo inicial. La fase inicial medida cuando un receptor GPS engancha la señal es un número entero ambiguo de ciclos, debido a que el receptor no tiene forma de conocer el número exacto de ciclos de la onda portadora entre el satélite y el receptor. Esta ambigüedad permanece constante mientras el receptor mantiene enganchada la señal y su valor se determina cuando los datos de la fase portadora son procesados.

Antena. Componente de un equipo GPS que capta una señal análoga del satélite GPS y la envía al receptor para su procesamiento.

Banda. Intervalo de longitudes de onda en el espectro electromagnético.

Código. Conjunto de información que representa un mensaje.

Código C/A. Coarse/Acquisition, código modulado en la señal GPS L1. Este código es una secuencia de 1023 modulaciones de doble fase binarias pseudoaleatorias a razón de 1.023 MHz, teniendo así un periodo de repetición de código de un milisegundo. Este código fue seleccionado para proporcionar buenas propiedades de rastreo.

Código P. Código protegido o preciso, usado en las portadoras L1 y L2. Este código se hará disponible por medio del DOD, solo para usuarios especializados. El código P es una secuencia muy larga de modulaciones bifásicas binarias pseudoaleatorias en el portador GPS, a un rango de 10.23 MHz, lo cual no se repite por alrededor de 38 semanas. Cada satélite usa un segmento de una semana de este código, el cual es único para cada satélite GPS y es reconfigurado cada semana.

Constelación. Conjunto específico de satélites en órbita. Usado para calcular una posición o todos los satélites visibles en una época específica. La constelación GPS consiste en 24 satélites en órbitas circulares de 12 horas a una altitud de 20.200 kilómetros. En la constelación nominal, cuatro satélites están interlineados en cada uno de los seis planos orbitales. La constelación fue seleccionada para provocar una alta probabilidad de cobertura satelital.

Datum. Cantidad numérica o geométrica o serie de cantidades que sirven como referencia o base para otras cantidades. En la medición, se debe considerar dos tipos de datum: datum horizontal, el cual forma la base para los cálculos de posiciones horizontales que consideran la curvatura de la tierra. Y datum vertical, al cual se refieren las elevaciones. Históricamente, los datum horizontales eran definidos por un elipsoide y la relación entre el elipsoide y un punto en la superficie topográfica establecido como origen del datum. Generalmente (pero no necesariamente), esta relación se puede definir por cinco cantidades: latitud geodésica, longitud y altura del origen, los dos componentes de la desviación del datum vertical en el origen y el acimut geodésico de una línea, desde el origen hasta algún punto. El sistema GPS usa WGS84 el cual, como en los datum más recientes, es geocéntrico y fijo a la Tierra (ECEF).

Deformación. Cambio de forma de un cuerpo sólido, se da cuando el cuerpo está sometido a esfuerzos y se determina midiendo el cambio en la longitud sobre cada uno de los ejes de dicho cuerpo, o bien el desplazamiento ocurrido sobre cada eje. La deformación del terreno se mide sobre los ejes del sistema topocéntrico Este, Norte y Z.

Desplazamiento. Cambio de posición de una partícula en un intervalo de tiempo.

DOP. Dilución de Precisión. Es una descripción del efecto de la geometría satelital en los cálculos de tiempo y posición. Los valores considerados buenos son pequeños, p. ej. 3. Los valores mayores que 7 se consideran pobres. Así, un DOP pequeño se asocia a los satélites ampliamente separados o con buena geometría.

Dentro de los términos DOP se incluyen:

PDOP (Dilución de Precisión en la Posición) que refleja los efectos de la geometría satelital en los cálculos de posición.

HDOP (Dilución de Precisión Horizontal) que refleja los efectos de la geometría satelital en las componentes horizontales de los cálculos de la posición.

VDOP (Dilución de Precisión Vertical) que refleja los efectos de la geometría satelital en la componente vertical del cálculo de posición.

TDOP (Dilución de Precisión en el Tiempo) que refleja los efectos de la geometría satelital en los cálculos de tiempo.

GDOP (Dilución de Precisión Geométrica) que es una medición compuesta que refleja los efectos de la geometría satelital en los cálculos tanto de posición como de tiempo.

Efecto Doppler. Es el corrimiento en la frecuencia que sufre una señal recibida, debido al movimiento relativo entre la parte que trasmite y la que recibe.

Efemérides. Lista de posiciones o ubicaciones de un objeto celestial como una función de tiempo. En GPS constituyen la información de la órbita de un satélite. Pueden ser transmitidas como por el propio satélite o precisas cuando han sido postprocesadas.

Elementos keplerianos. Conjunto de seis parámetros que describen la posición y velocidad de un satélite artificial en una órbita elíptica. Estos parámetros son:

a semieje mayor de la elipse orbital

e excentricidad de la elipse

i inclinación, ángulo que se forma entre el plano ecuatorial y el plano de la órbita.

W ascensión recta del nodo ascendente

w argumento del perigeo

f anomalía verdadera

Elipsoide de Referencia. Figura matemática formada por la revolución de una elipse sobre su eje menor. Un elipsoide se define por la longitud de su semieje mayor (a) y el achatamiento (f). A esta superficie están referidas todas las observaciones GPS.

Época. Marca de tiempo para un intervalo de medición o frecuencia de datos, por ejemplo 15 segundos. Es una muestra o medición básica de la señal. El contador de épocas, cuenta la cantidad de veces que se toma una medición.

Error. Inexactitud cometida por culpa de no poder controlar adecuadamente la influencia de todas las variables presentes en un experimento.

Esfuerzo. Resistencia interna que ofrece un área unitaria del material que constituye un cuerpo a una carga externa aplicada.

Fase portadora. Se le denomina así a la situación instantánea del ciclo de la onda portadora, siendo la onda portadora una onda de radio, la fase es medida por el equipo de recepción GPS mientras enlaza la señal.

Filtro Kalman. Es un algoritmo que sirve para poder estimar el estado no medible de un sistema dinámico lineal a partir de mediciones sin correlación estadística. Su método se basa en minimizar la media del error cuadrático. Es una herramienta poderosa para la estimación de valores finales a partir de mediciones ruidosas.

Frecuencia. Número de veces que un evento periódico ocurre por unidad de tiempo. En GPS la frecuencia se refiere a la radio frecuencia, en Hz, de las portadoras transmitidas por cada satélite.

Geodesia. Ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra, así como su campo gravitacional, la representación topográfica a nivel global, se encarga de hacer mediciones superficiales y externas de la superficie terrestre y de establecer sistemas de referencia (para brindar posiciones) y su relación entre ellos.

Geodesia espacial. Término moderno para referirse a la parte de la Geodesia que se encarga de medir y posicionar elementos de la superficie terrestre por medio de instrumentos espaciales: satélites y equipos receptores. Dentro de la Geodesia Espacial se encuentra lo relativo al GNSS.

Geodinámica. Rama de las Ciencias de la Tierra que estudia los agentes y fuerzas que intervienen en los procesos dinámicos de la Tierra. Se divide en Geodinámica interna (procesos endógenos) y Geodinámica externa (procesos exógenos de la superficie terrestre).

Geoide. Superficie equipotencial que aproximadamente coincide con el nivel medio del mar. Representa la verdadera forma de la Tierra. Cualquier punto en el geoide es perpendicular a la dirección de la gravedad.

GNSS. Sistema Global de Navegación por Satélite. Se basa en constelaciones de satélites que transmiten rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre y en cualquier instante.

GPS. Sistema de Posicionamiento Global. Es un sistema de navegación basado en satélites que utiliza mediciones de distancia precisas de satélites GPS para determinar la posición y la hora en cualquier parte del mundo. El sistema es operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. El GPS tiene gran cantidad de aplicaciones.

Levantamiento. Recopilación de información física específica o datos de un área de estudio determinada.

Longitud de onda. Distancia real que recorre una onda en el intervalo de tiempo en el que se da un ciclo.

Observable. Propiedad del estado de un sistema que puede ser determinado por medio de una secuencia de operaciones físicas.

Oscilador. Sistema capaz de crear perturbaciones o cambios periódicos o cuasiperiódicos en un medio. Se usa en los relojes de los dispositivos GPS.

Postproceso. Reducción y procesamiento de datos GPS después de que fueron medidos. El postproceso es normalmente llevado a cabo en gabinete y haciendo uso de software especializados.

Precisión. Grado de cuidado con el que se efectúa una medición. Medida de la tendencia de un conjunto de valores con respecto a un valor determinado en función del conjunto.

PRN. Ruido Pseudo Aleatorio. Es una secuencia binaria determinista con propiedades similares a las del ruido. El sistema GPS transmite dos códigos PRN: el código C/A y el código P.

Pseudorange. También conocido como pseudodistancia, es la medición del tiempo de propagación aparente desde el satélite a la antena del receptor, expresado como distancia. La pseudodistancia se obtiene al multiplicar el tiempo de la señal de propagación aparente por la velocidad de la luz. La pseudodistancia difiere de la distancia real porque los relojes del satélite y del usuario no están perfectamente sincronizados, por el retraso de la propagación y otros errores.

Receptor. En GPS, parte del equipo de medición donde llega y se concentra la información y datos transmitidos por un satélite.

Red geodésica. Serie de monumentos o puntos de referencia con mediciones precisas que es usada como referencia y apoyo para levantamientos geodésicos.

Reducción al elipsoide. Proceso de transformación geométrico para trasladar mediciones geodésicas espaciales a información en geodesia clásica.

Satélite GPS. Vehículo que se encuentra orbitando la Tierra y es perteneciente a la constelación satelital GPS, lleva con el dispositivos de transmisión de ondas con las cuales se puede calcular la posición.

Señal. Variación de una corriente eléctrica o alguna otra magnitud física que se utiliza para transmitir información.

Subsidencia. Fenómeno ocurrido en el terreno, describe el hundimiento progresivo de una superficie, generalmente la litósfera, puede ser causado por movimiento relativo de placas tectónicas o bien por el asentamiento del terreno en cuencas sedimentarias. Es a menudo acelerado por la actividad humana.

Tiempo GPS. Tiempo de referencia usado por los satélites GPS. Los satélites continuamente están transmitiendo el tiempo GPS, el cual está varios segundos adelantado con relación al Tiempo Coordinado Universal (UTC).

Descripción de las Tablas y Figuras

Capítulo 1.

Fig. 1.1.1 Mapa geológico del oriente del Distrito Federal (zona de interés) donde se muestran las líneas de las secciones geológicas AA' y BB' así como la ubicación de las estaciones de monitoreo IZT1, IZT2, CCHO y FESZ. Las abreviaturas correspondientes a los materiales mostrados son: Qal-Aluvi3n con piroclastos; Qla-Sedimentos lacustres, arcillas, limos y arenas interdigitados con piroclastos; Ql-Sucesiones efusivas y derrames l3vicos andes3tico-bas3lticos; Qpp-Material bas3ltico-andes3tico con ceniza y lapilli; Tmv-Rocas extrusivas: tobas, brechas y derrames mayormente andes3ticas; Tpc-Sucesiones de composici3n andes3tica con p3mez y aluvi3n. [20].

Fig. 1.1.2 Secciones geol3gicas AA' y BB' cuyas ubicaci3n se representa en el mapa 1.1.1. Las abreviaturas correspondientes a los materiales mostrados son: Kc-Caliza de interestratificaci3n gruesa con lutitas y limolitas; Km-Caliza y dolom3a interestratificadas; K mz-Arenisca, limolita y lutitas interestratificadas; Qal-Aluvi3n con piroclastos; Qla-Sedimentos lacustres, arcillas, limos y arenas interdigitados con piroclastos; Qpp- Material bas3ltico-andes3tico con ceniza y lapilli; Tmv-Rocas extrusivas: tobas, brechas y derrames mayormente andes3ticas; Tomv-Rocas volc3nicas: brechas, tobas y derrames de tipo andes3tico, se incluyen riolitas; Tppc-Dep3sitos pirocl3sticos y cl3sticos fluviales, margas y arcillas lacustres interdigitados con unidades volc3nicas. [20].

Fig. 1.2.1 Gr3fica de hundimiento y extracci3n de agua en el centro de la Ciudad de M3xico de 1890 a 1990. [16].

Fig. 1.2.2 Gr3fica de hundimiento y extracci3n de agua en el sur de la Ciudad de M3xico de 1950 a 1995. [16].

Fig. 1.2.3 Hundimiento de monumentos del Distrito Federal: Catedral, Alameda Central, Primer Cuadro, Palacio de Miner3a y Monumento a Carlos IV, de 1990 a 1996. [16].

Fig. 1.2.4 Mapa de curvas de igual hundimiento acumulado desde 1891 a 1994. [16].

Fig. 1.2.5 Mapa de la ubicaci3n general de las estaciones GPS: IZT1, IZT2, CCHO y FESZ, para monitorear subsidencia y deformaci3n horizontal en el oriente del Distrito Federal.

Capítulo 2.

Tabla 2.1.1 Cronolog3a de los eventos m3s destacados del GPS [15].

Fig. 2.1.1 Constelaci3n GPS.

Fig. 2.1.2 Ubicaci3n de las estaciones de control del GPS.

Fig. 2.1.3 Equipos GPS, receptores.

Fig. 2.1.4 C3lculo de la posici3n por medio de GPS y el sistema de ecuaciones formado.

Fig. 2.4.1 Tiempos y retardos en GPS.

Fig. 2.4.2 Transmisión de la portadora en el tiempo.

Fig. 2.5.1 Ejemplo de archivo RINEX de observación (.o)

Fig. 2.7.1 Elementos keplerianos.

Fig. 2.9.1 Simples diferencias.

Fig. 2.9.2 Dobles diferencias.

Fig. 2.9.3 Triples diferencias.

Capítulo 3.

Fig. 3.2.1 Mapa donde se muestra la ubicación específica de las estaciones IZT1, IZT2, CCHO y FESZ, mismas que conforman la Red Geodésica de monitoreo de subsidencia y deformación horizontal en el oriente del Distrito Federal. Estas estaciones cumplen con los requisitos de ubicación geográfica y estratégica.

Capítulo 4.

Fig. 4.2.1 Estaciones fijas IGS de apoyo [12].

Tabla 4.4.1 Archivos de datos del procesamiento, ejemplos de los archivos y su descripción.

Capítulo 5.

Fig. 5.2.1 Estaciones de la RGNA de INEGI. [13].

Fig. 5.2.2 Estaciones IGS. [14].

Capítulo 6.

Tabla 6.1.1 En la tabla se muestra una comparación de los parámetros estadísticos para medir la calidad del postproceso usando combinaciones de estaciones para formar tres redes de apoyo.

Fig. 6.1.1 Series de tiempo de la Estación CCHO de los días 291, 292, 293, 294 y 296 del 2012.

Fig. 6.1.2 Series de tiempo de la Estación FESZ de los días 291, 292, 293, 294 y 296 del 2012.

Fig. 6.1.3 Series de tiempo de la Estación IZT1 de los días 291, 292, 293, 294 y 296 del 2012.

Fig. 6.1.4 Series de tiempo de la Estación IZT2 de los días 291, 292, 293, 294 y 296 del 2012.

Fig. 6.1.5 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2008.

Fig. 6.1.6 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2009.

Fig. 6.1.7 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2010.

Fig. 6.1.8 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2011.

Fig. 6.1.9 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2012.

Fig. 6.1.10 Series de tiempo de la Estación CCHO del año 2013.

Fig. 6.1.11 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2008.

Fig. 6.1.12 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2009.

Fig. 6.1.13 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2010.

Fig. 6.1.14 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2011.

Fig. 6.1.15 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2012.

Fig. 6.1.16 Series de tiempo de la Estación FESZ del año 2013.

Fig. 6.1.17 Series de tiempo de la Estación IZT1 del año 2012.

Fig. 6.1.18 Series de tiempo de la Estación IZT1 del año 2013.

Fig. 6.1.19 Series de tiempo de la Estación IZT2 del año 2012.

Fig. 6.1.20 Series de tiempo de la Estación IZT2 del año 2013.

Fig. 6.1.21 Subsistencia de la estación FESZ del 2008 al 2013.

Fig. 6.1.22 Subsistencia de la estación CCHO del 2008 al 2013

Fig. 6.1.10 Subsistencia de la estación IZT1 del 2012 al 2013

Fig. 6.1.10 Subsistencia de la estación IZT2 del 2012 al 2013

REFERENCIAS

- [1] AGUA.ORG.MX. RECUPERADO EL 2 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTP://WWW.AGUA.ORG.MX/H2O/INDEX.PHP?OPTION=COM_CONTENT&VIEW=CATEGORY&ID=21&ITEMID=300020](http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=category&id=21&Itemid=300020)
- [2] ANGELES SERRANO, GABRIELA; PEREVOCHTCHIKOVA, MARÍA J.; CARRILLO RIVERA, JOEL. (2008). *POSIBLES CONTROLES HIDROGEOLOGICOS DE IMPACTO AMBIENTAL POR LA EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN XOCHIMILCO*, MÉXICO. JOURNAL OF LATIN AMERICAN GEOGRAPHY.
- [3] BERROCOSO, MANUEL. ET. AL. (2003). *EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL*. ESPAÑA: LABORATORIO DE ASTRONOMÍA Y GEODESIA. DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS. FACULTAD DE CIENCIAS. UNIVERSIDAD DE CÁDIZ.
- [4] CABRAL CANO, ENRIQUE; ET. AL. (2008), *SPACE GEODETIC IMAGING OF RAPID GROUND SUBSIDENCE IN MÉXICO CITY, GEOLOGIC AND HIDROLOGYC BACKGROUND*. GSA, BULLETIN NOVEMBER-DECEMBER
- [5] DEBIAN.ORG. RECUPERADO EL 24 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTPS://WWW.DEBIAN.ORG/RELEASES/ETCH/HPPA/CH01S02.HTML.ES](https://www.debian.org/releases/etch/hppa/ch01s02.html.es)
- [6] *FUNDAMENTAL UNIX COMMANDS*. RECUPERADO EL 24 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTP://WWW.CALPOLY.EDU/~IAS/USERGUIDES/CENTRALUNIX/PDF/AIX20102.PDF](http://www.calpoly.edu/~ias/userguides/centralunix/pdf/AIX20102.pdf)
- [7] GAMIT-GLOBK HOME. RECUPERADO EL 12 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTP://WWWGPSG.MIT.EDU/~SIMON/GTGK/INDEX.HTM](http://www.gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm)
- [8] GARCÍA ÁLVAREZ, DAVID ABELARDO. (2008). *SISTEMA GNSS*. RECUPERADO EL 6 DE FEBRERO DE 2015 DE: [HTTP://ARANTXA.II.UAM.ES/~JMS/PFCSTELECO/LECTURAS/20080125DAVIDGARCIA.PDF](http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080125DAVIDGARCIA.PDF)
- [9] GONZÁLEZ BARBONE, VÍCTOR A.. (2002). *CURSO BÁSICO DE UNIX*. INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA - FACULTAD DE INGENIERÍA - MONTEVIDEO, URUGUAY. RECUPERADO EL 24 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTP://IIE.FING.EDU.UY/~VAGONBAR/UNIXBAS/INDEX.HTM](http://iie.fing.edu.uy/~vagonbar/unixbas/index.htm)
- [10] HERRING, T. A.; KING, R. W.; MCCLUSKY, S. C.. (2010). *INTRODUCTION TO GAMIT/GLOBK RELEASE 10.4*. U.S.A.: DEPARTMENT OF EARTH, ATMOSPHERIC, AND PLANETARY SCIENCES MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- [11] *IGS REFERENCE FRAME STATIONS*. (2014), INTERNATIONAL GNSS SERVICE. SITIO WEB:
[HTTP://KB.IGS.ORG/HC/EN-US/ARTICLES/201208226-IGS-REFERENCE-FRAME-STATIONS-FACT-SHEET](http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201208226-IGS-REFERENCE-FRAME-STATIONS-FACT-SHEET)
- [12] IGS STATIONS. RECUPERADO EL 18 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTP://IGSCB.JPL.NASA.GOV/NETWORK/LIST.HTML](http://igscb.jpl.nasa.gov/network/list.html)

- [13] INEGI, RED GEODÉSICA NACIONAL ACTIVA. RECUPERADO EL 23 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTP://WWW.INEGI.ORG.MX/GEO/CONTENIDOS/GEODESIA/RGNA.ASPX?P=22](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/rgna.aspx?p=22)
- [14] ITRF.ORG. RECUPERADO EL 23 DE FEBRERO DE 2015 DE: [HTTP://BIT.LY/ITRFGUIDE](http://bit.ly/ITRFguide).
- [15] LEICK, ALFRED. (2004). *GPS SATELLITE SURVEYING*. U.S.A: WILEY.
- [16] LESSER ILIADES, JUAN MANUEL; CORTÉS PÉREZ, MIGUEL ÁNGEL. (SEPTIEMBRE - DICIEMBRE DE 1998). *EL HUNDIMIENTO DEL TERRENO EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y SUS IMPLICACIONES EN EL SISTEMA DE DRENAJE*. INGENIERÍA HIDRAÚLICA EN MÉXICO, VOL. XIII NUM. 3.
- [17] NASA.GOV. *GLOBAL POSITIONING SYSTEM HISTORY* RECUPERADO EL 6 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTP://WWW.NASA.GOV/DIRECTORATES/HEO/SCAN/COMMUNICATIONS/POLICY/GPS_HISTORY.HTML#VESxxFMG8YM](http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/gps_history.html#VESxxFMG8YM)
- [18] NEMETH, EVI; SNYDER, GARTH; HEIN, TRENT R.; WHALEY, BEN. (2010). *UNIX AND LINUX SYSTEM ADMINISTRATION HANDBOOK* (4TH EDITION). UNITED STATES: PRENTICE HALL.
- [19] SITIBSA.COM. RECUPERADO EL 23 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTP://SITIBSA.COM/PROCESOS.PHP?LNG=ES](http://sitibsa.com/procesos.php?lng=es)
- [20] SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS A.C. (1989). *SIMPOSIO SOBRE TÓPICOS GEOLÓGICOS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO*. MÉXICO.
- [21] *TALLER DE PROGRAMACIÓN EN SHELL, COMANDOS EN UNIX*, RECUPERADO EL 24 DE FEBRERO DE 2015 DE: [HTTP://BLACKSHELL.USEBOX.NET/PUB/SHELL/TALLER_SH/X137.HTML](http://blackshell.usebox.net/pub/shell/taller_sh/x137.html)
- [22] UNAVCO.ORG. RECUPERADO EL 12 DE FEBRERO DE 2015 DE: [HTTP://WWW.UNAVCO.ORG/](http://www.unavco.org/)
- [23] *UNIX TUTORIAL*. RECUPERADO EL 24 DE FEBRERO DE 2015 DE:
[HTTP://WWW.TUTORIALSPPOINT.COM/UNIX/UNIX-SHELL.HTM](http://www.tutorialspoint.com/unix/unix-shell.htm)
- [24] VAN SICKLE, JAN. (1996). *GPS FOR LAND AND SURVEYORS*. U.S.A: ANN HARBOR PRESS INC.