

03060

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
INSTITUTO DE GEOFISICA
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Análisis de deformación en volcanes activos mediante técnicas GPS: Un ejemplo en el volcán Popocatépetl

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias (Geología Estructural y Tectónica)

Presenta:

FRANCISCO CORREA MORA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

CIUDAD UNIVERSITARIA
2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Francisco Corra, Morz

FECHA: 24-4-2004

FIRMA: Francisco Corra, Morz

Agradecimientos

Gracias a,

Lorena, Samantha y Sebastián que tuvieron una increíble paciencia durante la elaboración de la tesis y por darme motivos para reescribir cada párrafo, una y otra vez...

Gracias a,

Enrique Cabral, por sus consejos, correcciones y en especial por darle fluidez a la tesis...

Gracias a,

Gustavo Tolson, Analilian Martin, Osvaldo Sanchez, Victor Velazco y Vladimir Kostoglodov por mejorar la calidad de la tesis con sus comentarios y paciencia...

Gracias a:

Esteban Hernandez y Gerardo Cifuentes por la enorme ayuda para terminar este trabajo....

Gracias a:

A las abuelas (Lupita y Aida) que sin su apoyo para cuidar a mis enanos no hubiera concluido....

Gracias a:

Oscar Campos, Araceli Chaman y Mónica Salgado por su excelente disposición

Gracias a:

Vladimir Kostoglodov y Luis Marin por el software para realizar la comparación diferencial....

Gracias a:

Charles DeMets por sus comentarios y por las facilidades para procesar las estaciones GPS generar gráficas durante mi estancia en Madison

Gracias a:

Todas las instituciones que mantienen la red de GPS en el volcán Popocatépetl....



Por que cada evento tiene su momento en la serie de tiempo de la vida

Contenido

Resumen

1	Introducción	01
2	Marco geológico	05
	Faja Volcánica Mexicana	
	Volcán Popocatépetl	
3	Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	11
	Programa NavStar	
	Segmento de Control	
	Segmento del Usuario	
	Estructura de la Señal GPS	
	Posicionamiento con GPS	
4	Procesamiento de datos GPS	21
	GPS diferencial	
	Método	
	GrafNet	
	GPS con órbitas precisas	
	GIPSY-OASIS II	
5	Instrumentación GPS en el volcán Popocatépetl	30
	Red de Primera Generación	
	Red L1	
	Red PUMAS	

Contenido

6 Comparación de soluciones diferenciales con órbitas precisas	36
Distribución Normal	
Postproceso diferencial	
Tratamiento preliminar al postproceso diferencial	
Parámetros del postproceso diferencial	
Análisis de las series	
GPS Diferencial en tiempo casi real	
7 Episodios de deformación en el volcán Popocatépetl	48
Discusión	58
Conclusiones	61
Referencias	62
Apéndice	65

Resumen

La deformación de un volcán se origina por el emplazamiento de material magmático de la cámara que lo alimenta, de magma que se encuentra en movimiento hacia la superficie o debido a una acumulación de gases. Estos procesos generan un cambio de presión y de volumen que en la mayoría de los casos pueden ser registrados con equipos como: inclinómetros, distanciómetros o receptores que utilizan el Sistema de Posicionamiento Global (*Global Positioning System: GPS*). El uso del GPS para cuantificar la deformación superficial en volcanes activos se ha incrementado en la última década, debido a la precisión milimétrica que se puede obtener al emplear receptores que reciben en dos frecuencias (bandas L1 y L2) y al postproceso de la información utilizando órbitas precisas. Actualmente, los receptores GPS de doble frecuencia pueden alcanzar los cien mil pesos, una alternativa de mucho menor costo es la utilización de receptores que usan una sola frecuencia (L1) y procesar la información con el método diferencial. Se encuentra en operación una red mixta en el volcán Popocatepetl compuesta por tres estaciones con receptores de una sola frecuencia (L1) y dos estaciones con receptores de doble frecuencia. El procesamiento de esta red se realiza con el método GPS diferencial dentro de un sistema cerrado pues no es necesario contar con órbitas precisas, la precisión obtenida para las líneas de base empleando esta técnica es de ± 10 a ± 30 mm. El uso del método diferencial hace posible que las soluciones sean procesadas en intervalos que puedes variar de 3 a 24 horas y en situaciones logísticas adversas, lo que favorece que la deformación superficial causada por procesos magmáticos sea un elemento útil a considerar como precursor de una erupción volcánica. El objetivo de este trabajo es el de desarrollar y evaluar la aplicación del método diferencial en una red GPS mixta; y obtener los parámetros que validen una solución para intervalos menores o iguales a 24 horas que permitan mantener una precisión similar a la solución diaria que se obtiene con el método de órbitas precisas. Hasta el 2003, la red GPS instalada en el volcán Popocatepetl no ha detectado eventos de deformación que tengan su origen en procesos magmáticos. Sin embargo, la estación POSW de esta red ha registrado al menos dos eventos entre 1996 y 2003 de carácter tectónico, ya que es posible observar el mismo comportamiento al comparar estos eventos con las series de tiempo de otras estaciones GPS, por lo que es factible que tales eventos tengan su origen en la interacción que tiene lugar en la trinchera a lo largo de la costa Pacífica de México, reflejando que posiblemente existe una zona acoplada en la interfase de subducción entre las placas.

1 Introducción

Uno de los propósitos de este trabajo es el determinar el alcance del GPS para medir la deformación en volcanes activos. Se analiza la factibilidad de emplear el método diferencial para detectar la deformación en la superficie del volcán a corto plazo, y el empleo de dos tipos de receptores que contrastan en costos en al menos un orden de magnitud.

Más de 400 erupciones volcánicas con consecuencias fatales han sido documentadas durante el siglo XX presentándose de 2 a 4 eventos mayores por año durante las últimas dos décadas. La mayoría de las vidas que se perdieron como consecuencia de estos fenómenos fue durante las primeras 24 horas de la actividad volcánica debido principalmente a la rapidez con que ocurrió la erupción [Simkin *et al.* 2001].

En México se consideran actualmente activos a 11 de los aproximadamente 3000 estratovolcanes y conos monogenéticos que se encuentran en el territorio nacional [Simkin *and* Seibert , 1994] (Figura 1.1). Es claro el impacto que han sufrido diversas comunidades debido a este tipo de estructuras no sólo en tiempos históricos, sino también en años recientes; algunos ejemplos son el Parícutín en Michoacán que hizo erupción en 1943; el Chichón y el Tacaná en Chiapas durante 1982 y 1986 respectivamente, o el volcán de Colima que actualmente ha tenido episodios de gran actividad.

El riesgo causado por una erupción volcánica es un factor importante a tomarse en cuenta considerando que el volcán Popocatepetl es un volcán activo con una estructura que tiene 5452 m de altura y cuyas erupciones tienen la posibilidad de afectar a una población de más de 20 millones de personas que viven a menos de 100 km de su cráter.



Figura 1.1 Mapa de localización de los volcanes que se consideran activos (triángulos) y las principales ciudades de México (círculos). Con el recuadro se señala la localización del volcán Popocatepetl [modificado de Simki *and* Seibert, 1994].

Para poder minimizar los daños que una erupción volcánica puede causar, es necesario conocer la tendencia de los parámetros que pueden servir como predictores. Algunos de estos son: la cantidad de volátiles (CO_2 y SO_2), variaciones geoquímicas del agua de manantiales cercanos y de la ceniza, frecuencia y tipo de la sismicidad, anomalías de los campos magnético y gravimétrico, y la deformación superficial de la estructura volcánica.

De estos parámetros la medición de la deformación superficial puede revelar información importante de los procesos magmáticos que ocurren dentro de la corteza en la cual se desarrolla el volcán [Langbein *et al.*, 1993]. Si tomamos en cuenta que cambios en el estado de esfuerzos frecuentemente preceden a las erupciones en períodos de tiempo que pueden ir desde algunas horas hasta meses, es posible emplear las variaciones en la deformación que presenta un volcán como un parámetro viable para conocer la proximidad de un evento mayor [Linde *et al.*, 1993]. Existen también evidencias de que la deformación en volcanes activos puede presentarse desde algunos días o inclusive hasta varios meses antes del aumento de la actividad sísmica [Langbein *et al.*, 1993] demostrando que la geodesia es un elemento esencial en la evaluación del riesgo volcánico.

La precisión necesaria para tal estudio debe de ser del orden de milímetros a centímetros, especialmente en las primeras etapas de la actividad cuando el rango de los esfuerzos que se presenta es bajo y la deformación asociada no es grande, sobre todo si la fuente de deformación se encuentra a una profundidad considerable. Esto, combinado con la compleja deformación espacial y temporal que caracteriza a los volcanes activos, refleja la necesidad no sólo de una alta precisión, sino también de mediciones frecuentes y distribuidas espacialmente a lo largo de toda la estructura volcánica.

Generalmente los métodos más utilizados para medir la deformación, utilizan técnicas de geodesia tradicional para cuantificar el movimiento relativo entre estaciones o puntos de control que se colocan tanto en la cima como en las laderas del volcán. Estos estudios por lo general producen datos con resolución temporal de tipo discreto, ya que no es fácil mantener un equipo humano en operación continua debido principalmente al costo de su mantenimiento, y a las difíciles condiciones tanto ambientales como de alto riesgo implícitas en la mayoría de los volcanes activos.

Otra alternativa es el uso de estaciones automatizadas que permitan registrar información mostrando con frecuencias de segundos a minutos y que operen de forma continua, como estaciones que utilicen equipo EDM (*Electronic Distance Measurement*), inclinómetros o como en el caso particular de este trabajo, el uso del sistema de posicionamiento global, que al igual que los inclinómetros puede ser utilizado en cualquier condición climática a diferencia del EDM. Sin embargo, de estos métodos sólo las estaciones GPS satisfacen los criterios de alta precisión y de operación continua [Dixon *et al.*, 1997], ya que permite medir desplazamientos horizontales con buena precisión, además de estimar los cambios en el desplazamiento vertical. Por esto el número de volcanes con este tipo de monitoreo se ha incrementado en los últimos años (p. ej. volcanes Kilauea, Mauna Loa y Mauna Kea en Hawaii, Cotopaxi en Ecuador, Arenal en Costa Rica, El Misti en Peru, ver ligas al final de las referencias).

Sin embargo, no sólo es necesaria una alta precisión cuando se evalúa el riesgo que una erupción puede causar. Un factor adicional a tomarse en cuenta es el tiempo de respuesta a cambios rápidos de la estructura, lo que significa la posibilidad de analizar en intervalos cortos (del orden de horas o mejor aún en tiempo real) la información obtenida por los instrumentos y poder observar cambios en la tendencia de la deformación.

Al procesar la información utilizando el método de órbitas precisas (utilizando el programa GIPSY del *Jet Propulsion Laboratory*), es necesario utilizar los datos de GPS junto con las órbitas corregidas de cada satélite, lo que lleva a un desfase en la obtención del posicionamiento de aproximadamente 14 a 21 días, periodo durante el cual se puede presentar una crisis volcánica. Otra posibilidad es utilizar una variante estadística para la corrección de las órbitas, permitiendo analizar la información con un retraso de al menos de 24 horas, pero la limitante fundamental en este método es que sólo puede ser utilizado en estaciones con receptores GPS de doble frecuencia, ya que la mayor deriva del reloj en los receptores L1 imposibilita el procesamiento empleando GIPSY.

Por esta razón en este trabajo se analiza la posibilidad de utilizar el método diferencial, que se basa en la distancia entre las estaciones y no un posicionamiento absoluto como el que obtiene usando órbitas precisas, para poder detectar los cambios causados por una posible deformación. La ventaja de este procedimiento es que se puede analizar los datos de las estaciones en intervalos del orden de horas, además de poder analizar más estaciones GPS (con receptores L1/L2 y L1), lo que permite crear redes más densas dado el bajo costo de las estaciones L1; como es el caso de la red L1 instalada en el volcán Popocatepetl.

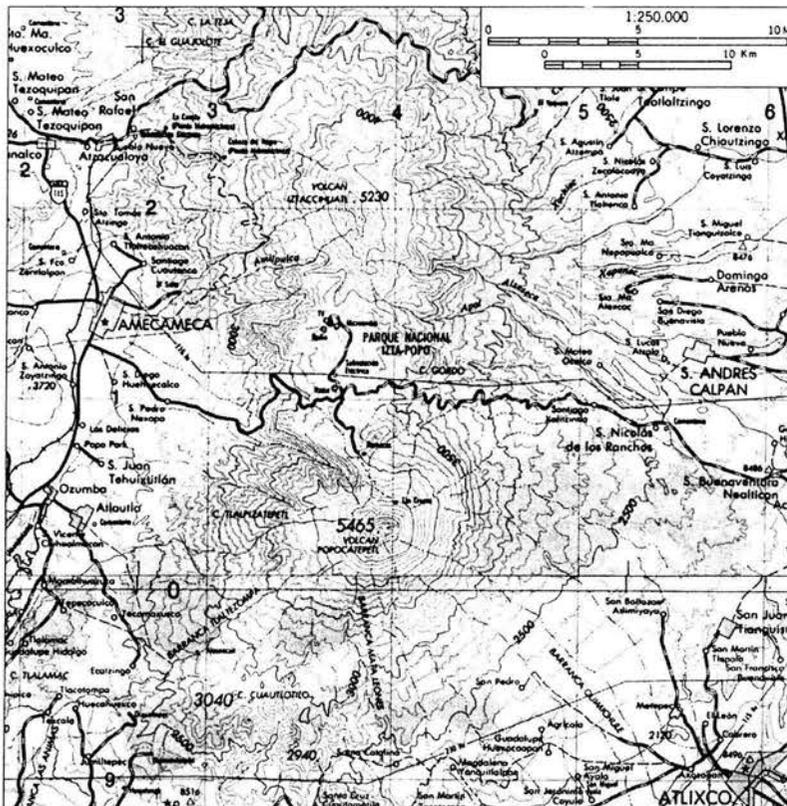


Figura 1.2 Mapa de localización de los poblados cercanos al volcán Popocatepetl.

El aumento de la actividad del volcán Popocatépetl a finales de 1994, cuando pasó de una fase moderada de actividad a una de mayor actividad sísmica y fumarólica con abundante emisión de gases, cenizas, extrusión de lava e incluso producción de flujos piroclásticos ha hecho más evidente el riesgo para las ciudades de México, Puebla, Cuernavaca y poblados cercanos.

El peligro potencial para los poblados cercanos son los flujos de material ocasionados por la erupción y por la lluvia asociada que llega a presentarse. Ejemplo de esto lo tenemos en Sarno, Italia, donde a partir de la erupción del volcán Vesubio y después de 30 horas de lluvia (100-180 mm de precipitación), se cubrieron grandes áreas con material coaluvial rico en tefra hasta distancias de 12 a 18 km del cráter [Pareschi, 2000]. Algo similar debió de haber ocurrido en el Popocatépetl y quedó registrado en el depósito del lahar de San Nicolás, que fue producido por una erupción de tipo pliniana hace aproximadamente 1300 años recorriendo una distancia de 60 km pasando por donde se encuentran actualmente las poblaciones de Santiago Xalitzintla, San Nicolás de los Ranchos, San Buenaventura Nealticán y San Jerónimo Tecuanipan [González, 2000] poblados que están al noreste del volcán (Figura 1.2).

El mayor peligro para la Ciudad de México no son los flujos de material, sino la caída de ceniza emitida durante la erupción ya que generaría tanto problemas en su infraestructura como de salud, ejemplos de esto serían el bloqueo del sistema de drenaje de la ciudad o el colapso de techos causado por el peso de la capa de ceniza. Existe una evidencia geológica de que es posible una situación como ésta, ya que existen estratos de ceniza y pómez depositados a lo largo del Valle de México y que fueron expulsados por erupciones anteriores [Siebe *et al.*, 1996]. Actualmente existe un mapa de peligros generado a partir de la cartografía geológica de estas unidades [Macías *et al.*, 1995].

Lo anterior justifica el monitoreo del volcán Popocatépetl no sólo para ser estudiado desde el punto de vista geológico, sino también por las implicaciones del riesgo potencial a la población.

2 Marco geológico

Como objeto de estudio para analizar la deformación se utiliza al volcán Popocatepetl, por lo que en este capítulo se presentan tanto las características geológicas de su estructura volcánica como el ambiente geológico en el que se encuentra (Faja Volcánica Mexicana). Se incluye también una reseña de la actividad volcánica hasta el 2004 reportada por CENAPRED (liga a final de las referencias) a la que se hace referencia en capítulos posteriores.

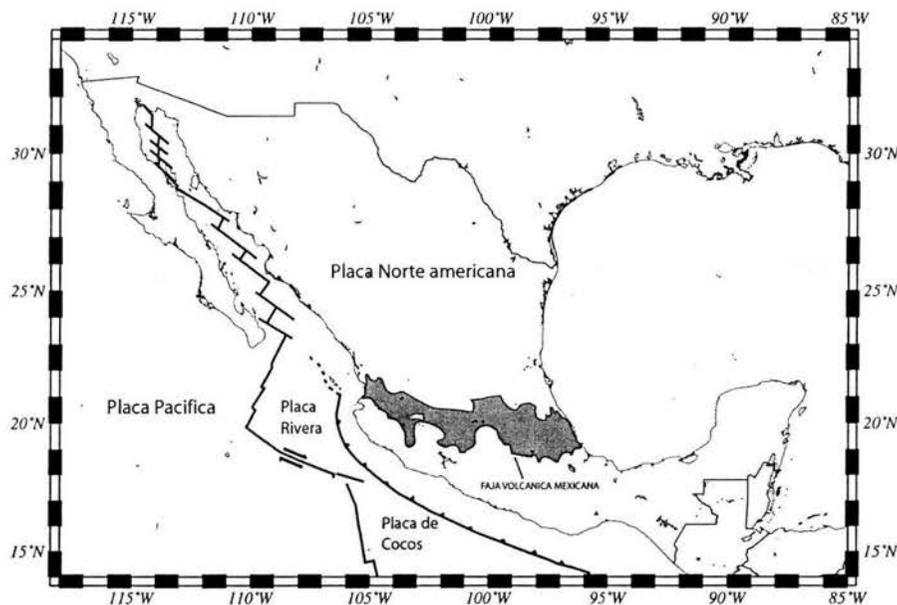


Figura 2.1 Localización de la FVM y las principales características tectónicas en el centro y oeste de México.

Faja Volcánica Mexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVM) es una de las principales estructuras geológicas de México [Ferrari *et al.*, 2000a]. Se localiza en el centro del país entre los 96° y 106° de longitud oeste, tiene una extensión de 1000 km de largo y una anchura que varía entre 20 y 200 km. Está constituida por rocas volcánicas del Neógeno, material que construyó grandes complejos de estratovolcanes, campos monogenéticos y volcanes de escudo.

La FVM no está caracterizada por una sola afinidad geoquímica. Ferrari *et al.* [2000b] la dividen en varios sectores de acuerdo no sólo a sus características geoquímicas, sino también con el período de formación. Las primeras etapas se caracterizan por la presencia de vulcanismo máfico a intermedio, emplazado entre los 11 y 7 Ma, que se extienden desde el extremo oeste a la porción central de la Faja. Este sector se puede subdividir en dos zonas basándose en las diferencias en las relaciones de los elementos trazas que contienen (en el distrito Jalisco-Guanajuato y el Querétaro-Hidalgo). Hacia el noroeste existen lavas máficas que incluyen variedades de rocas calcialcalinas a transicionales que conforman el distrito de Nayarit.

La ocurrencia de basaltos en el Mioceno Tardío parece estar controlado por zonas preexistentes de debilidad en la corteza terrestre a través de las cuales es factible el emplazamiento de magmas máficos. Estas estructuras al parecer fueron reactivadas por movimientos tectónicos diferenciales de bloques corticales al norte y sur de la FVM [Pasquaré *et al.*, 1986; Delgado-Granados, 1993]. El origen de la actividad ígnea en esta región no está suficientemente claro, aunque se han encontrado bases geoquímicas [Ferrari *et al.*, 2000b] para proponer que el sector Jalisco-Guanajuato no se pudo haber formado a partir de una pluma del manto, por lo que el origen de la variedad de los magmas máficos en el área se puede atribuir a una porción de la astenósfera que interactuó con los magmas presentes en la zona de subducción junto con material de la corteza continental.

La subducción casi horizontal de las placas de Farallón y Cocos bajo la placa de Norte América es el proceso tectónico más aceptado que le pudo haber dado origen a la FVM. Ejemplos de este tipo de subducción subhorizontal se pueden encontrar en aproximadamente 10% de las zonas de trincheras en el mundo [Marc-André, 2000]; en estas trincheras la producción de magma calcialcalino es normal a distancias aproximadas de 300 km durante la primera etapa de formación del arco continental. Después de que la subducción horizontal comienza, la placa inferior puede viajar varios cientos de kilómetros manteniendo una profundidad casi constante, conservando así las condiciones de temperatura y presión a lo largo de su trayectoria; esto permite que la placa no se incorpore al manto y se desplace una mayor distancia antes de que exista una fusión parcial del frente.

El modelo de subducción que pudo haber dado origen a la FVM se torna más complejo, debido a que la cinemática de las placas tectónicas involucradas no ha permanecido constante durante el tiempo en que han interactuado, además de que hay evidencia de que al menos una de las placas (placa de Rivera) se ha comportado en realidad como un conjunto de microplacas con movimientos independientes desde hace 10 Ma [DeMets, 2000].

Volcán Popocatepetl

El Volcán Popocatepetl (nombre que proviene del náhuatl y significa "Cerro que humea") es un estratovolcán que forma parte de la FVM. Está compuesto por rocas y depósitos con afinidad geoquímica de carácter andesítico-dacítico. Su estructura tiene una elevación de 5,452 msnm y su contacto inferior es con calizas del Cretácico, aunque la profundidad de éste límite no está muy bien determinada. Algunos estudios [p. ej. Arciniega *et al.*, 2000] lo sitúan entre los 500 y los 1500 m por debajo del nivel medio del mar estimado en base a información sísmica. El cráter se localiza en los 19.03° N y 98.35° W, y presenta una forma elíptica con el eje mayor orientado hacia el NE-SW de aproximadamente 750 m de largo, mientras que el eje menor es de aproximadamente 600 m, tiene una profundidad que varía entre los 150 y 450 metros. El cono es en general simétrico y sólo está modificado por la estructura del Ventorrillo en el flanco noroeste, siendo ésta estructura el remanente de un volcán previo. La actividad eruptiva del volcán está caracterizada por tres intervalos de aproximadamente 20,000, 1,000 y 100 años en los que se presenta actividad de tipo pliniana [Martin-Del Pozzo, *comunicación personal*].

El Popocatepetl fue construido principalmente por el emplazamiento de flujos de lava de composición andesítica a dacítica y en por al menos ocho erupciones de tipo plinianas, las que

reprodujeron depósitos de pomex, flujos piroclásticos y lahares. El actual cono del Popocatepetl se edificó sobre el remanente de un volcán más viejo que se colapsó hacia el sur. Fue construido en dos etapas: la primera la constituyó el Volcán Fraile que se formó hace 10,000 años y fue después parcialmente destruido por tres episodios de actividad explosiva, estos eventos produjeron depósitos masivos de avalancha que pueden ser observados en el flanco sur del volcán a los cuales Fries [1960] nombró la formación Tlayecac. El último evento ocurrió alrededor de 5,000 a 3,800 años antes del presente. La siguiente etapa forma la cima actual del Popocatepetl y se desarrolló al sur del cono de El Fraile por emisiones de lava hasta los 1,200 años a.C., después de lo cual se inició la fase explosiva que actualmente prevalece [Boudal and Robin, 1988]. En tiempos históricos ocurrió una erupción de este tipo entre el 822 y 823 a.C. [Siebe *et al.*, 1996]. Las últimas dos erupciones plinianas ocurrieron entre 700 y 850 d. C. y la otra en el primer siglo d.C. [Plunkett and Uruñuela, 1998]

Las erupciones en el Popocatepetl del siglo pasado están marcadas por la actividad que tuvo lugar durante la década de 1920 en la que se produjo un domo en el piso del cráter y fue destruido por una explosión, la actividad continuó por varios años con pequeñas emisiones de ceniza. Después de 1927, la actividad se caracterizó por emisiones fumarólicas y al menos en los últimos 70 años se ha observado una actividad eruptiva dominada por emisiones fumarólicas [Carrasco *et al.*, 1986].

Esta última etapa se ve alterada por cambios a partir de 1990 cuando se observó un incremento de la actividad fumarólica, disminución del pH en el agua del cráter y de sismicidad bajo del volcán [Delgado *et al.*, 2001]. La fase eruptiva actual se inicia el 21 de diciembre de 1994 con una columna de ceniza que alcanzó los 2 km de altura viajando hasta 50 km del cráter.

Durante los meses siguientes (de enero 1995 a marzo 1995) las explosiones se incrementaron gradualmente disminuyendo la cantidad de ceniza respecto a los gases. El material juvenil en la ceniza era escaso (<2%) emitiéndose a través de un conducto central y cuatro bocas localizadas en el piso Este del cráter. [Delgado *et al.*, 2001].

Después hubo una fase (agosto de 1995 a marzo de 1996) en la que la actividad se redujo y las emisiones de ceniza cesaron junto con la sismicidad y la emisión de gases.

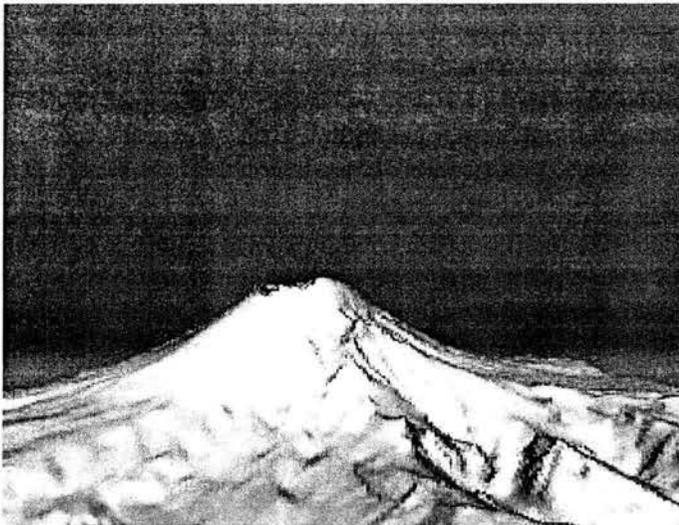


Figura 2.2 Modelo de elevación digital (DEM) del volcán Popocatepetl. Vista hacia el Suroeste.

Una nueva etapa se inició cuando la actividad se volvió intermitente presentándose fuertes explosiones (5 de marzo, 30 de abril y 30 de junio de 1996) que produjeron emisiones de cenizas durante varias horas y en algunos casos expulsión de material piroclástico. También durante esta etapa se observó un cuerpo de lava en el interior del cráter cuya extrusión de acuerdo a los registros sísmicos se inició el 5 de marzo. La emisión de lava dentro del cráter disminuyó gradualmente de junio a septiembre de 1996 cuando el domo cesa de crecer.

Otra fase explosiva siguió durante los últimos meses de 1996 reflejada en fuertes explosiones que ocurrieron el 28 de octubre, 27 de noviembre y el 5 y 29 de diciembre a las que se les asociaron columnas de ceniza que alcanzaron los 5 km de altura, flujos piroclásticos y en el caso de la última explosión la destrucción del domo de lava cubriendo el piso del cráter con escombros.

En enero de 1997 se inicia la formación de un nuevo domo de lava, estructura que fue destruida durante las explosiones del 11 y 15 de mayo y 14 de junio del 1997. Una de las erupciones más intensas registradas hasta entonces se produce el 30 de junio del mismo año. Cuatro días después se observó en el fondo del cráter el crecimiento de un nuevo domo, a finales de junio de 1997 se observa subsidencia en la parte central. Produciéndose un nuevo cuerpo de lava dentro de esta depresión el 19 de agosto, y que fue destruido durante las explosiones del 24 de diciembre de 1997 y el 1 de enero de 1998.

La actividad volcánica siguiente (enero 1998 hasta enero de 2000) se caracterizó por explosiones esporádicas de diversas magnitudes que produjeron columnas de ceniza de 2 a 5 km de altura y en algunas de ellas se observó expulsión de material incandescente.

EL 25 de febrero del 2000 se observa un cuerpo de lava en el interior del cráter que fue destruido en abril del mismo año. De mayo a noviembre del 2000 se tiene una fase con explosiones que generan columnas de ceniza de 4 a 10 km de altura, reportándose también en mayo 24 un flujo de escombros y el 15 de septiembre un domo en el interior del cráter. En diciembre del 2000 se observa un incremento en la actividad y en el crecimiento del domo (el más grande en la historia del volcán). Durante los días 18, 19, 25 y 27 de este mes se producen varias erupciones que lanzaron material incandescente y produjeron columnas que alcanzaron entre 2 y 5 km de altura (Figura 2.3).

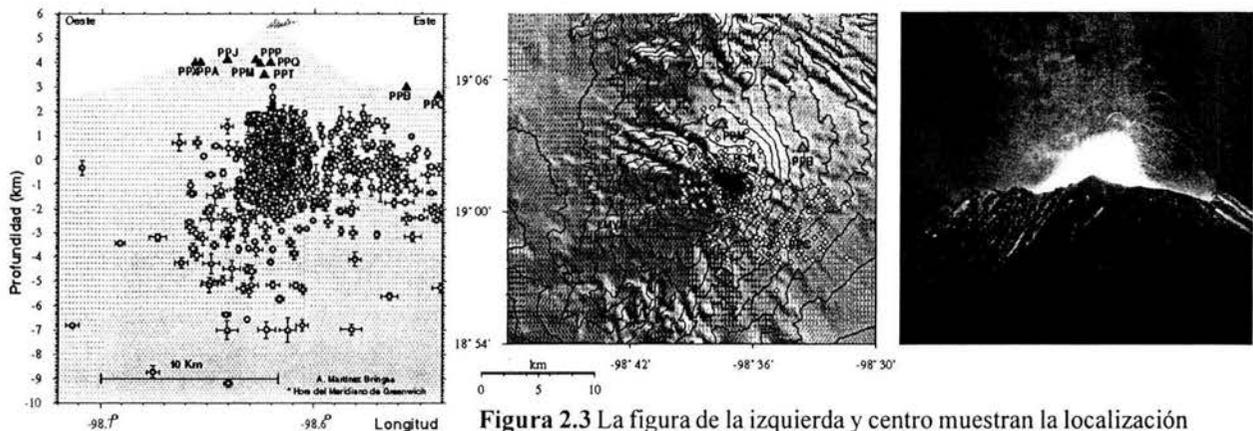


Figura 2.3 La figura de la izquierda y centro muestran la localización de los sismos en el volcán Popocatepetl hasta mayo del 2004, información de la página web de CENAPRED. Fotografía de una de las erupciones del volcán el 24 diciembre del 2000 (arriba) también tomada de la base de datos publicada en internet por CENAPRED.

Las primeras semanas de enero del 2001 la actividad tiende a niveles estables, produciéndose emisiones pequeñas de vapor y agua, ocasionalmente emisiones de cenizas y microsismos de carácter volcánotectónico. En enero 22 se incrementó la explosividad de la actividad creándose inclusive flujos piroclásticos. Después de estos eventos la actividad disminuyó presentándose emisiones de baja a moderada intensidad, acompañadas por emisiones esencialmente de vapor de agua, gas y algunas de ellas con algo de ceniza. En marzo 13 se presenta una erupción que lanza fragmentos y al día siguiente se observa la formación de un domo en el interior del cráter. Después es posible seguir el crecimiento del domo ya que existe un ligero incremento en el tremor armónico junto con microsismos y emisiones, este domo se destruyó durante las explosiones el 16 y 29 de abril, y 13 y 31 mayo.

Durante el mes de junio de 2001 continuaron las emisiones de pequeña a moderada intensidad constituídas principalmente de vapor y gas, junto con la presencia de microsismos de forma esporádica con magnitud de entre 2 y 2.7. Ocasionalmente se presentaron episodios de temores de baja amplitud durante este periodo.

En general en el mes de julio y las primeras semanas de agosto de 2001 los niveles de actividad se mantienen bajos y estables, con excepción del 3 de julio que se presenta una explosión. El 15 de agosto se observa la formación de un domo y un aumento de la actividad en los siguientes días, pero después disminuye a niveles estables. Esta situación se mantiene durante los meses de septiembre y octubre, aún cuando una fotografía tomada el 20 de septiembre muestra que el domo todavía está emplazado en la base del cráter. Mientras que otra fotografía del 25 de octubre revela una subsidencia en el domo y la aparición de un pequeño domo (50 m de diámetro) en el fondo del cráter.

El 10 de noviembre del 2001 se observa un pequeño evento explosivo, y después los parámetros regresan a niveles estables y bajos. El 21 de noviembre se observa la formación de un nuevo domo de 130m de diámetro en el interior del cráter. Después de un ligero incremento de la actividad esta regresa a niveles estables; condición que se verifica hasta el 21 de diciembre cuando un poco de material incandescente puede ser observado en los alrededores del volcán y se inicia un etapa en donde se aumenta la actividad. En las últimas semanas de diciembre de 2001 se observa el crecimiento de un domo (190m de diámetro) y algunos eventos explosivos, a la par de emisiones de ceniza con episodios de tremor armónico.

Los primeros meses del 2002 (enero, febrero, marzo, abril, y mayo) la actividad en el volcán se mantuvo dentro de límites estables y en general bajos, con ocasionales emisiones de cenizas y emisiones de vapor y agua de leve a moderada intensidad, tremor armónico de baja amplitud y microsismos volcánotectónicos con magnitud de entre 1.8 y 2.6. Esta actividad se relaciona con el crecimiento de domos y su posterior destrucción en eventos explosivos en general de baja intensidad y en ocasiones con emisión fragmentos incandescentes a corta distancia del cráter. Una fotografía del 11 de enero muestra que el domo reportado en diciembre de 2001 se destruyó y desgasificó parcialmente. Mientras que otra fotografía del 24 de enero revela la presencia de un nuevo domo de 180 m de diámetro y 50 de altura aproximadamente (20 veces menor al de diciembre de 2000) y hasta el 7 de marzo no se observa cambios significativos en el volumen del domo.

En junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre de 2002 cambia a la actividad del volcán observándose un régimen de emisiones de cenizas, emisiones de vapor y microsismos (en general con magnitud mayor a 2.2). También se presentaron esporádicos episodios de tremor armónico de baja frecuencia y amplitud pero no se observa el crecimiento de un domo. En las últimas semanas de noviembre y a inicios de diciembre se observa un ligero incremento en la actividad y el crecimiento de un domo el 2 de este mes (180m de diámetro y 40m de altura). En las últimas semanas de diciembre se observan emisiones de ceniza asociadas a la destrucción del domo.

En enero de 2003 continuó la actividad asociada con la destrucción del domo del diciembre pasado. Pare el 17 de enero se observa el emplazamiento de un nuevo domo y un ligero aumento en el número de emisiones. En el mes de febrero se observan una fase explosiva con eventos de moderada intensidad los días 4, 14, 21, 22, y 28; también se observan algunas emisiones de ceniza y un aumento en el número de emisiones.

En marzo de 2003 los niveles de actividad se mantuvieron estables y bajos. El 25 de abril se presenta una explosión de baja intensidad y se observan cambios en los niveles de azufre, en el tipo de tremor, en la geoquímica de los manantiales y pequeñas deformaciones del edificio volcánico. Pero en una fotografía tomada el 30 de abril no posible observar la formación de un domo en el interior del cráter. En mayo la actividad se mantiene estable y de baja intensidad, hasta el 19 de este mes no se observa la formación de un domo en el cráter. En las semanas siguientes se presentan emisiones de baja a moderada intensidad y ocasionales emisiones de ceniza.

En julio de 2003 existe un incremento de la actividad que incluye eventos explosivos de moderada intensidad (los días 1, 19 y 25 de julio) y un aumento en el número de emisiones y columnas de ceniza durante las primeras semanas de este mes. El 21 de julio se detecta la presencia de un domo de lava en el interior del cráter. Durante los siguientes meses (agosto a diciembre) el número de emisiones es bajo y generalmente están acompañadas por emisiones de vapor y gas, esta tendencia es rota solo por una explosión el día 13 de agosto y una emisión de ceniza el 28 del mismo mes. En una fotografía del día 25 de agosto se observa una subsidencia del domo y otras tomadas los días 17 de octubre, 6 de noviembre y 10 de diciembre muestran una depresión en el interior del cráter; en este periodo es escasa la presencia de microsismos y la actividad fumarólica baja.

Durante los meses de enero a abril de 2004 la actividad del volcán se mantiene estable y en niveles bajos, en este periodo se hace más frecuente la presencia de microsismos en comparación a los meses anteriores, se presentan ligeras emisiones de vapor y gas. Dada la tendencia que presenta la actividad del volcán de niveles bajos durante los últimos 12 meses se actualiza el nivel de la alerta volcánica a Amarillo Fase 1 el 24 de marzo de 2004.

3 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

En este capítulo se describe la historia y la teoría del sistema GPS esta basado en Dixon [1991], Hofmann *et al.* [1992] y, Martínez y Fuster [1995].

El sistema de posicionamiento global (GPS) es una constelación de satélites que conforman el proyecto NAVSTAR (*NAVigation Satellite Timing And Ranging*), los que provienen de posicionamiento tridimensional, navegación y hora de forma continua y en tiempo real en todo el mundo. Cualquier persona con un receptor GPS puede acceder al sistema para utilizarlo en aplicaciones que requieran del posicionamiento de algún lugar de la Tierra. Entendiéndose como posicionamiento la obtención de las coordenadas geográficas (u otro sistema de referencia) de un punto en el espacio. El conjunto de satélites es operado por el Departamento de Defensa de los EEUU (DoD).

Los elementos principales del sistema GPS comúnmente se agrupan en tres segmentos:

1. El segmento espacial, lo conforman un grupo de satélites que orbitan a la Tierra (satélites del programa NavStar).
2. El Segmento de Control, está representado por las estaciones de monitoreo de los satélites en las que se obtiene la información necesaria para calcular las órbitas y operarlos.
3. El segmento del usuario, que incluye tanto a los usuarios civiles como militares.

Programa NavStar

El segmento espacial del GPS es una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra equipados con transmisores de radio frecuencia y relojes atómicos. La constelación de satélites GPS está distribuida en seis planos orbitales inclinados con 55 grados (respecto al ecuador) y con cuatro satélites en cada plano orbitando a 16,000 km de altura. Con esta órbita se asegura que las trayectorias de los satélites sean estables y predecibles, ya que no se afectan por la resistencia atmosférica. Cada plano orbital se identifica con una letra (A, B, C, D, E y F) y cada posición del satélite dentro de la órbita con un número (1, 2, 3 y 4). El periodo orbital es de aproximadamente 12 horas, lo que resulta en que cada satélite pase dos veces sobre un mismo punto de la Tierra al día. El sistema está diseñado para mantenerse en operación aunque algunos de los satélites fallen.

En 1967 se construyó el primer prototipo de satélite GPS (*Timation 1*) como parte de un programa de prueba militar para la navegación satelital. Algunas de sus características eran las siguientes: pesaba cerca de 40 kg, consumía sólo 6 W de energía, la mayoría para proveer a un transmisor UHF y a un reloj de cuarzo (este reloj tiene una deriva en su frecuencia de varias partes en 10^{11} por día). El satélite fue puesto en una órbita baja alrededor de la Tierra (~900 km de altura).

Después de 10 años de pruebas se conformó el programa NTS 2 (*Navegation Technology Satellite*) que dio origen al programa actual de GPS. Los satélites de NTS-2 fueron puestos en órbita a 20,300 km de altura, pesaban 440 kg, consumían 400 W y transmitían en dos frecuencias de la banda L (~1.2 y 1.5 GHz). Utilizaban relojes de Cesio que tenían una deriva de menos de dos partes en 10^{23} por día.

Un año después del programa NTS-2, la primera generación de satélites GPS (*Block 1*) fue puesta en órbita iniciándose así la fase operacional de prueba del sistema. Este primer bloque lo constituyen los satélites prototipo y se lanzaron a partir del 22 de febrero de 1978 hasta 1985, momento en el cual la constelación incluía a 6 satélites totalmente operacionales y tenían de 3 a 4 días de autonomía (que es el tiempo sin contacto con las estaciones de control).

En las siguientes décadas se construyeron y lanzaron varias generaciones de satélites cada una con características propias. La constelación NavStar actual está formada por tres de estas generaciones identificando a cada bloque de satélites por el periodo en que se pusieron en órbita y por el tipo de hardware con el que fueron construidos; actualmente están en operación los satélites de los Bloques II/IIA/IIR/IIF.

El Bloque II consta de 24 satélites que permitió que en 1995 se declarara al sistema GPS totalmente operacional al usuario no militar. Los satélites del Bloque IIR fueron lanzados posteriormente y se diseñaron para sustituir a los satélites del Bloque II en caso de que alguno fallara. La última etapa comprende a los satélites del Bloque IIF en los que se implementaron mejoras en la electrónica.

Los satélites del Bloque II tienen asignados los números SVN (*Space Vehicle Numbers* que representa el orden de su lanzamiento) del 13 al 21, fueron desarrollados por *Rockwell International*. Están diseñados para operar 14 días sin contacto con el Segmento de Control (*Segment Control, CS*) se lanzaron de febrero de 1989 a octubre de 1990.

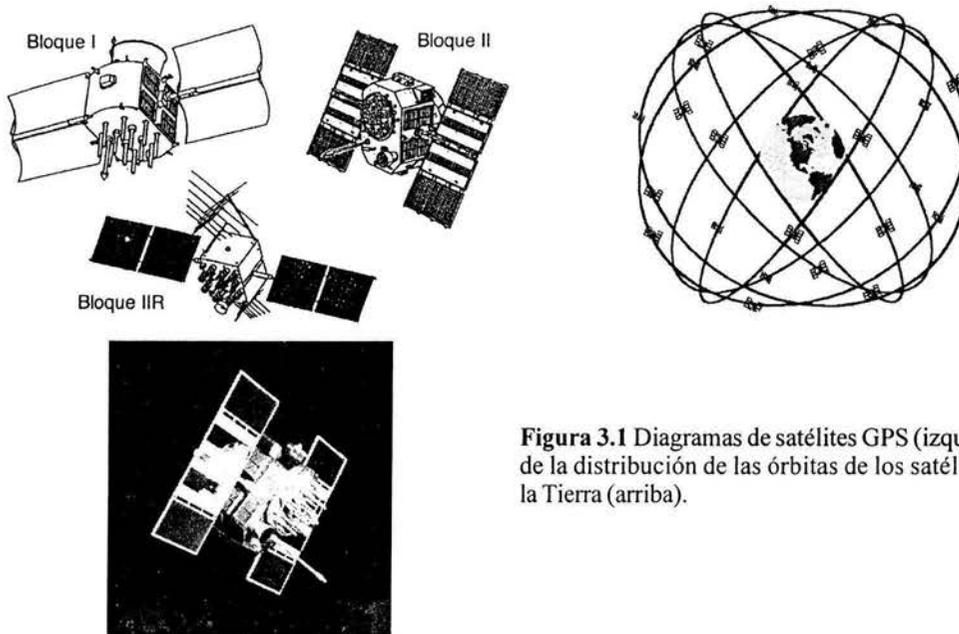


Figura 3.1 Diagramas de satélites GPS (izquierda). Esquema de la distribución de las órbitas de los satélites alrededor de la Tierra (arriba).

Los satélites del Bloque IIA tienen asignados los SVN del 22 al 40 y representan la segunda serie de satélites operacionales desarrollados también por *Rockwell International*. Fueron diseñados para tener una autonomía de 180 días de operación sin tener contacto con el Segmento de Control, aunque durante este periodo es posible que la precisión en los mensajes de navegación se degrade. Este bloque se lanzó entre noviembre de 1990 y noviembre de 1997.

La vida útil de los satélites de los Bloques II/IIA es de 7.3 años, cada uno contiene 4 relojes atómicos, dos de Cesio (Cs) y dos de Rubidio (Rb); estos Bloques tienen la posibilidad de degradar la señal (proceso conocido como *Selective Availability*, SA y *Anti-Spoof*, A-S). Ambos Bloques fueron lanzados desde el *Kennedy Space Center*, Florida en cohetes Delta II.

Los satélites del Bloque IIR van de los SVN 41 al 62, son los satélites que sirven de reemplazo desarrollados por *Lockheed Martin*. Fueron diseñados para proveer al menos 14 días de operación sin contacto con el Segmento de Control y más de 180 días de operación cuando utiliza el modo de navegación autónoma (*AUTONAV*). En este caso una alta precisión del mensaje de navegación se puede lograr usando una técnica (*cross-link ranging*) que utiliza la comunicación entre los satélites del Bloque IIR.

El método *cross-link ranging* es usado para estimar y actualizar los parámetros en el mensaje de navegación de cada satélite del Bloque IIR sin contacto con el Segmento de Control. La vida útil de este bloque es de 7.8 años; cada uno tiene tres relojes atómicos de Rubidio, estos satélites también tienen capacidades de SA y A-S. Este Bloque se empezó a lanzar en enero de 1997, el último satélite (PRN18/SVN54) fue lanzado el 30 de enero del 2001 a las 07:55 desde el *Kennedy Space Center*, Florida.

El tiempo de autonomía de operación de cada bloque define tres tipos de modos: normal, extrapolado de período corto y extrapolado de período largo. Estos modos de operación son utilizados para conocer el estado de actualización de las efemérides, ya que a medida que transcurre el tiempo sin que el segmento de control recargue la información de los satélites, el error en el posicionamiento se incrementa.

Segmento de Control

El Departamento de Defensa de los EEUU (DoD) mantiene una estación de control maestra (MCS) en la Base *Falcon* de la Fuerza Aérea en *Colorado Springs*, Colorado y a cuatro estaciones más de monitoreo localizadas en Hawaii, Isla Ascensión, Diego García y Kwajalein (Figura 3.2). Estas estaciones de seguimiento están regularmente espaciadas en longitud y tienen coordenadas muy precisas.

Las estaciones de monitoreo rastrean pasivamente a todos los satélites GPS visibles (más de 11 simultáneamente tanto en la banda L1 como en la banda L2); esta información es transferida a la MCS en donde se procesan y se calculan modelos orbitales basados en la medición de las órbitas a cada uno de los satélites (obtenidas por las estaciones de monitoreo) y por órbitas estimadas (*predicted orbits*); el resultado son las efemérides que se utilizan en el mensaje de navegación de los receptores GPS. La transmisión de las efemérides, correcciones del reloj y comandos de telemetría se pueden realizar desde las estaciones de Ascensión, Diego García y Kwajalein. Las comunicaciones de control entre tierra y satélite se hacen en la frecuencia de 1.78374 GHz, y entre satélite y tierra en 2.2275 GHz, ambas en la frecuencia S de radio.

La precisión nominal de estas efemérides permite la determinación de la posición de un satélite con un error menor de 1 m en sentido radial, 7 m a lo largo de la trayectoria y 3 m transversalmente. Es claro que las órbitas extrapoladas ofrecen necesariamente una determinación residual mayor.

La precisión final alcanzable depende de la exactitud de las efemérides, por lo que es posible utilizar efemérides calculadas a posteriori que son llamadas efemérides precisas (u órbitas precisas), obtenidas por observación de los satélites desde las estaciones de control y que son posicionados por otros métodos (como el sistema VLBI, *Very Long Baseline Interferometry*).

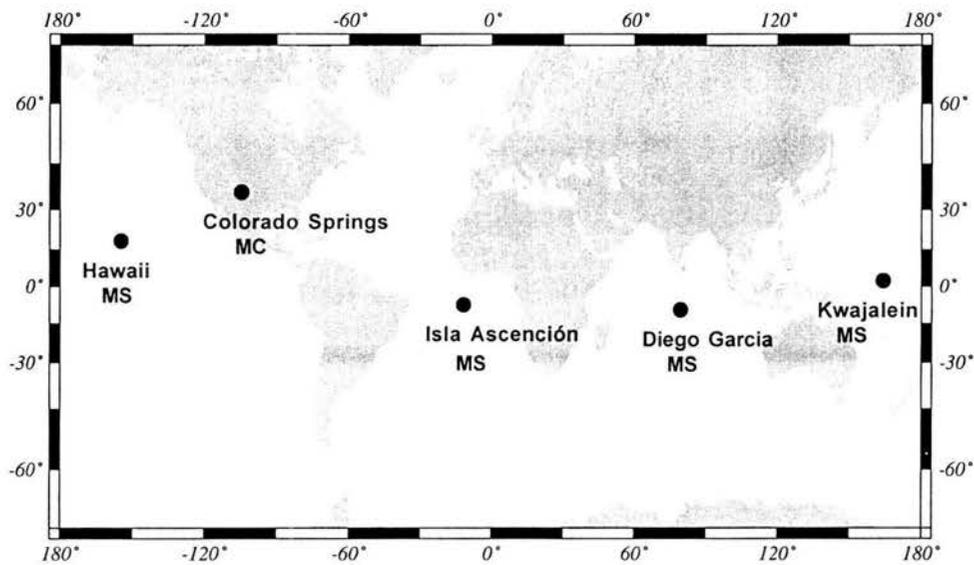


Figura 3.2 Localización de la estación de control (*Master control, MC*) y distribución de las estaciones de monitoreo (*Monitor Station, MS*).

Segmento del Usuario

Se compone de los receptores utilizados para determinar las coordenadas de un punto, realizar navegación u obtener el tiempo usando las señales transmitidas por los satélites NavStar. El equipo esencial está formado por una antena y un receptor, las coordenadas calculadas están referidas al centro de fase de la antena.

El receptor cuenta normalmente con diferentes canales que le permiten seguir simultáneamente a varios satélites, un procesador interno con un programa especial (*firmware*) que le permite entre otras funciones el generar réplicas de los códigos C/A y P, una unidad de almacenamiento de memoria (usualmente de estado sólido), puertos de alimentación y control junto con una pantalla en donde se despliega la información.

Actualmente existe en el mercado una gran variedad de receptores que se diferencian básicamente en la capacidad de utilizar los códigos C/A o P, de recibir en una o dos frecuencias (L1 y L2) y en el número de canales que puede recibir (lo que se refleja en el número de satélites que se pueden usar simultáneamente).

Estructura de la Señal GPS

El sistema GPS utiliza dos frecuencias L1 y L2 y varias formas de codificar la información, como el código C/A (*Coarse Acquisition o Clear Acquisition*) y el código P (*Precise*). En la banda L1 se utilizan ambos códigos, mientras que para la banda L2 sólo se utiliza el código P. Las portadoras L1 y L2 son múltiplos coherentes (154 y 120 respectivamente) de la frecuencia de un reloj atómico en cada uno de los satélites y que oscila a 10.23 MHz (Tabla 3.1). La frecuencia del reloj es en realidad ligeramente más baja que la frecuencia nominal para tomar en cuenta efectos de tipo relativista, así de esta forma un observador en la Tierra “ve” 10.23 MHz casi exactamente. Los satélites GPS transmiten continuamente en estas frecuencias los datos de posición y tiempo. A la señal de satélite le toma 6/100 de segundo aproximadamente en alcanzar la superficie de la Tierra, y dada la longitud de onda se requiere de una línea directa entre el receptor y los satélites, además de que ésta no puede penetrar el agua, suelo, paredes u otros obstáculos similares.

Tabla 3.1 Características de la señales transmitidas por los satélites GPS

	Portadoras		Códigos	
	L ₁	L ₂	P	C/A
Frecuencia	1.5754 GHz	1.2276 GHz		
Chip rate			10.23 MHz	1.023 MHz
Longitud de onda	19.0 cm	24.4 cm	~30 m	~300 m

La portadora L1 tiene dos componentes: el componente modulado en fase es el código P y el de más baja frecuencia (código C/A) que es modulado en cuadratura (desplazado 90°), mientras que en la portadora L2 solo tiene un componente en el que esta modulado el código P. Estos tres componentes están modulados por una tercera frecuencia de 50 Hz en la que se transmite el mensaje de navegación.

El código C/A es una secuencia con un largo de 1023 modulaciones bifásicas binarias que se transmiten en la señal portadora del GPS con una amplitud máxima de 1,023 MHz. Este código se repite cada milisegundo.

El código P es una secuencia más larga de modulaciones bifásicas binarias transmitidas también en la frecuencia portadora con una amplitud pico de 10.23 MHz que se repite aproximadamente cada 267 días (~37 semanas). A cada satélite GPS se le asigna una porción de código de una semana y debido a que el número de satélites en operación no excede a 24, cada satélite tiene un número único que lo identifica (PRN) y que representa al número del segmento transmitido. Para usos militares existe una versión encriptada del código P que se llama código Y; es claro que es de uso restringido y para el usuario común no se encuentran disponibles las características que presenta.

El mensaje de navegación tiene una longitud de 1500 bits y es transmitido en las dos frecuencias a una velocidad de 50 bps. Este mensaje contiene el tiempo del sistema, los parámetros de corrección del reloj, parámetros del modelo de retraso ionosférico, efemérides y estado de operación del satélite.

La señal transmitida es de un ancho de banda amplia y de bajo consumo (-160 dBW). Es modulada con un código pseudoaleatorio (*Pseudo Random Noise, PRN*) para extender la energía de la señal sobre un ancho de banda más amplia que el ancho de banda de la información, pero ésta se puede reproducir exactamente. Su propiedad más importante es tener un bajo valor de correlación entre una señal generada y una de referencia si existe algún tipo de desfase entre ellas. Esto da la propiedad de recibir a todos los satélites sin problemas de ambigüedad y de tener más resistencia al ruido y la multitrayectoria.

Los códigos $P(t)$, $C(t)$ y $D(t)$ pueden considerarse como ondas cuadradas con valores de ~ 1 (Figura 3.3). Se pueden representar a estas señales como:

$$S_1(t) = A_{P1} P(t) D(t) \cos(\omega_1 t) + A_C C(t) D(t) \sin(\omega_1 t)$$

$$S_2(t) = A_{P2} P(t) D(t) \cos(\omega_2 t)$$

donde ω_1 y ω_2 son las frecuencias angulares ($\omega = 2\pi f$) asociadas con las portadoras $L1$ y $L2$, A_P y A_C son las amplitudes relativas de los códigos P y A/C .

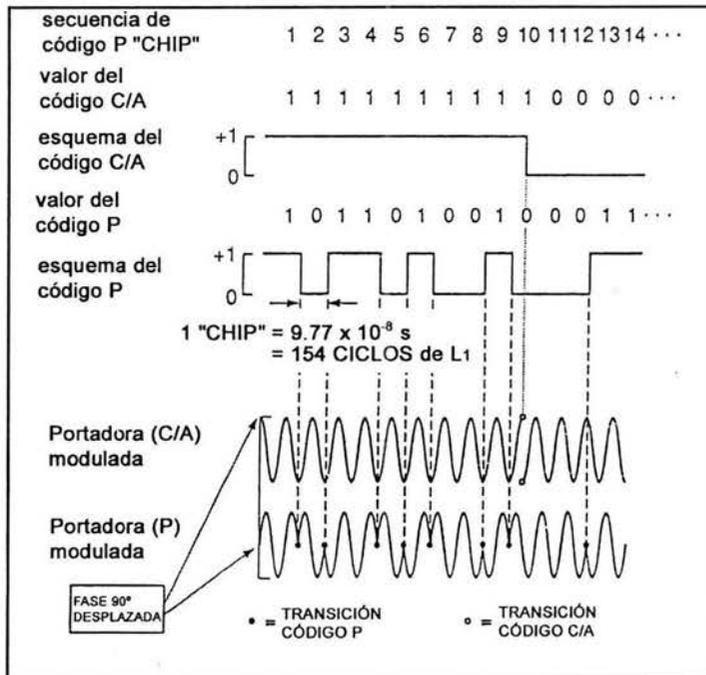


Figura 3.3 Representación gráfica de los códigos transmitidos en la señal GPS.

Posicionamiento con GPS

Para tener una idea clara de las aplicaciones que puede tener la tecnología GPS, es esencial considerar la precisión obtenida en el posicionamiento resultante, para lo cual no sólo es necesario conocer la estructura y el tipo de la señal de radio GPS empleadas, sino entender los efectos que tienen las diversas fuentes de error del sistema.

Los receptores GPS se clasifican de acuerdo con la frecuencia de radio que pueden recibir y esto está en relación con la precisión que pueden lograr. Así los receptores del tipo de código de CA sólo reciben el pseudo rango y/o la fase en la frecuencia L1, mientras que los receptores de tipo código P reciben la frecuencia L2 más el código CA de la banda L1. El pseudorango de la señal en el código P es mucho más exacto al compararlo con el pseudorango del código CA dada su longitud.

Sin importar qué tipo de señal se está recibiendo, los modelos matemáticos para calcular la distancia a cada satélite y como consecuencia la ubicación de un punto en el espacio, son esencialmente los mismos :

Si utilizamos el pseudorango expresado en metros y de una forma simple es

$$\rho = C * \Delta t + v \quad (1)$$

y la fase representada por su longitud de onda o ciclos, puede ser escrita como

$$\Phi = \theta + \Sigma\theta + N + v \quad (2)$$

En la ecuación (1), **C** representa la velocidad de la luz y Δt es el tiempo de transmisión (en segundos) de la señal de radio del satélite al receptor; **v** representa a los errores. Esta relación simple es el principio del modelo de la mayoría de las formas de navegación o de levantamientos con un nivel de precisión de metros.

La ecuación (2), por otro lado, representa la relación básica para los levantamientos de alta precisión, donde **N** representa un parámetro llamado ambigüedad en la fase (*phase ambiguity*), θ es una medida interna obtenida de la mezcla de una frecuencia de referencia generada por el receptor con la de la señal de GPS. Esta es siempre una fracción de la longitud de onda de las frecuencias L1 (0.19m) o L2 (0.24m). La $\Sigma\theta$ es la suma de las ondas portadoras que llegan desde el momento que el satélite ha sido fijado (*locked*) por el receptor. Este fragmento de onda, medido a partir de los datos de la fase, tiene generalmente un nivel de precisión submilimétrico.

El término **N** en la ecuación de fase (2) no es una cantidad que se pueda obtener de la señal, pero es posible calcularla indirectamente utilizando varias observaciones. **N** representa el número entero de ondas completas recibidas en el receptor GPS de cada uno de los satélites desde el momento que han sido fijados.

Retomando la idea, la distancia entre los satélites y el receptor es medida en ondas o su equivalente en metros; esto significa que **N** representa la porción entera de la distancia inicial o la distancia al satélite medida en la primer época. La fracción restante de la distancia inicial es medida internamente, como el valor θ . Cambios subsecuentes en las distancias son registrados en el término $\Sigma\theta$.

Se puede deducir que para utilizar la fase total Φ como un parámetro de medida, es necesario calcular el entero inicial N a cada uno de los satélites fijados. A este proceso se le llama obtener la ambigüedad de fase. Si se pierde la continuidad de la señal con uno o varios satélites, es absolutamente necesario recalcular una nueva ambigüedad para el valor de N para cada uno de los satélites.

Cualquier posición obtenida con un receptor GPS contiene un cierto grado de incertidumbre. La precisión final es determinada por la suma de diferentes fuentes de error, pero éstas dependen básicamente de las condiciones ionosféricas, atmosféricas y del tipo del equipo utilizado.

Las fuentes de error incluyen variaciones en la velocidad de transmisión de la señal de radio, debido a la variabilidad de la ionosfera y la troposfera, derivas en los relojes, interferencias eléctricas con el receptor y errores causados por multitrayectorias (*multipaths*) en los que la señal de radio no viaja directamente al receptor. Estos errores son parte inherente al sistema y no pueden ser evitados. Una relación de errores comunes en receptores de una sola frecuencia se muestra en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Errores promedio de un receptor GPS de una sola frecuencia (Green, 2000).

Fuente de Error	[m]
Reloj en el satélite	1.5
Efemérides	2.5
Receptor	0.3
Atmosféricas/ionosféricas	5.5
Multitrayectoria	0.6
Error total	10.4

Cuando se trabaja en campo algunos receptores pueden calcular la precisión aproximada, del posicionamiento, este valor se basa en el principio de dilución geométrica de la precisión (*principle of geometric dilution of precision, GDOP*). Los errores antes mencionados pueden variar de acuerdo con la posición de los satélites y los ángulos entre cada uno. Obviamente entre menos efecto tengan estos errores, mejor es el posicionamiento. El procesador de un buen receptor tiene rutinas para analizar la posición relativa de todos los satélites dentro de su campo de visión, por lo que puede seleccionar los satélites mejor posicionados para reducir el error. De esta forma el GDOP es minimizado y los valores de la posición por dilución de la precisión (*position dilution of precision, PDOP*) pueden variar de 4 a 6 bajo condiciones razonables; en buenas condiciones se pueden lograr valores menores de 3. El valor estimado de precisión para el GPS puede calcularse multiplicando el error total de la Tabla 3.2 por el PDOP, lo que resulta en errores de 18-30 m para un buen receptor y en el peor de los casos de 100 m.

Este valor se basa sólo en una descripción geométrica de la incertidumbre de una posición dada, diferenciando la GDOP: geométrica (3 coordenadas de posición más un offset del reloj en la solución); PDOP: posición (3 coordenadas); HDOP: horizontal (2 coordenadas en horizontal); VDOP: vertical (sólo altura); TDOP: tiempo (sólo el offset del reloj) y RDOP: relativo (normalizado a 60 segundos).

Geoméricamente, la PDOP es proporcional a 1 dividido entre el volúmen de la pirámide formada por las líneas del receptor a cuatro satélites. Es por esto que valores pequeños (<3) se consideran satisfactorios porque se asocian con una separación grande entre los satélites.

Para muchas aplicaciones del GPS los errores en la posición con un intervalo de 30 a 100 m son aceptables. Afortunadamente, podemos mejorar la posición utilizando un sistema que cuantifique los errores cuando ocurren, al mismo tiempo que la información de la posición es colectada corrigiendo parte de los errores intrínsecos al sistema GPS. Esto se logra usando un segundo receptor que sirve de referencia y que se mantiene estacionario en un sitio con posición conocida, con lo que se puede calcular la distancia a cada satélite y comparar ésta con la calculada de la señal GPS obteniendo así un error, que es transmitido a otros receptores en el área.

La precisión lograda puede variar de algunos centímetros hasta 2 o 3 metros, dependiendo de la distancia entre las estaciones y de la precisión de las coordenadas de la estación base, que usualmente no es mayor de 0.5 m.

Dado que la órbita de los satélites es muy alta, si los dos receptores en el campo están separados sólo por unas decenas de kilómetros, la señal que alcanza a ambos viaja virtualmente por las mismas condiciones ionosféricas y atmosféricas, por lo que ambas señales tienen retrasos similares. Sin embargo, el ruido del receptor y las refracciones causadas por las multitrayectorias para cada señal son diferentes y no pueden ser corregidas.

En lugar de usar las señales de radio para calcular la posición, el receptor de referencia utiliza su posición para calcular el tiempo que toma la señal en viajar entre éste y el satélite; esto es posible porque:

- La distancia entre el receptor de referencia y el satélite puede ser calculada en cualquier momento. La posición del satélite puede ser calculada con los parámetros orbitales y la posición del receptor de referencia que es conocida y fija.
- El intervalo de tiempo teórico que toma la señal en cubrir esta distancia es calculada a partir de la velocidad de transmisión de las ondas de radio.
- Cualquier diferencia (de aquí el término diferencial al método) entre los dos tiempos es el retraso o error en la señal del satélite.

El receptor de referencia continuamente monitorea los errores y éstos pueden ser compensados de la siguiente forma:

El receptor de referencia transmite las correcciones al receptor móvil para hacer una corrección en tiempo real. Con este método un receptor de referencia puede proveer de correcciones a varias unidades móviles. En sistemas con corrección en tiempo real, los errores instantáneos para cada satélite son codificados por el receptor y transmitidos a todos los receptores móviles por radio, usualmente en la banda VHF o UHF.

Los receptores móviles reciben la lista de errores completa y aplican las correcciones para cada uno de los satélites que utilicen. La ventaja de los sistemas de operación en tiempo real, como lo sugiere su nombre, radica en que la información de la posición se hace posible al operador de la unidad móvil durante el trabajo de campo con la precisión de las coordenadas de la estación base.

La precisión de un buen sistema DGPS operando en tiempo real y sin procesar la información recibida por los satélites puede variar entre 0.3 a 1.5 m, dependiendo de la distancia entre las estaciones (Tabla 3.3). Aún es posible mejorar ésta precisión, analizando posteriormente la información generada por los receptores, este procedimiento recibe el nombre de postproceso.

Tabla 3.3 Errores promedio de un sistema Trimble DGPS en tiempo real (Trimble Navigation Ltd, 1993).

Fuente de Error	[m]
Reloj en el satélite	0.0
Efemérides	0.0
Receptor	0.3
Atmosféricas/ionosféricas	0.6
Multitrayectoria	0.6
Error total	1.5

4 Procesamiento de los datos GPS

GPS diferencial

Para emplear esta técnica es necesario ocupar las estaciones remotas mientras se tiene operando una estación base, al procesar los datos para obtener la posición después de adquirirlos, se evitan errores que se presentan al utilizar el posicionamiento en tiempo real, es muy frecuente que en algunos lugares no se tenga buena comunicación de radio entre la estación base y las estaciones móviles aumentando la posibilidad de tener un error en la medición o inclusive evitando que se lleve a cabo. Otra de las principales ventajas de postprocesar es que el sistema (receptores y accesorios) se simplifica, pues sólo se requiere de receptores operando en modo autónomo y de ningún equipo de comunicación adicional (p. ej. radiomodems o radios UHF).

Generalmente la técnica de modo diferencial es utilizada en los levantamientos geodésicos. Esto significa que al menos un receptor es colocado en un punto con coordenadas conocidas previamente u obtenidas posteriormente (con órbitas precisas o geodesia), a la que se llama estación base o *master*, y por otro lado existe al menos un receptor que se coloca en un punto remoto (*rover*) con coordenadas a resolver. El primer paso para encontrar la posición de la estación móvil es determinar el vector o línea de base entre las estaciones; de esta forma se obtiene un posicionamiento relativo dado que las coordenadas finales de la estación remota son siempre relativas a las coordenadas conocidas de la estación base.

Método

En concepto, los observables en la señal GPS son distancias, que son derivadas de la medición del tiempo o de la diferencia de fase basados en la comparación entre las señales recibidas y generadas por el receptor. En consecuencia el GPS utiliza dos relojes, uno en el satélite y otro en el receptor. Esto ocasiona que las distancias sean “sesgadas” por los errores en los relojes de los satélites y es por esto se denominan pseudo rangos.

La teoría del posicionamiento diferencial trata de corregir o minimizar los errores de una estación utilizando el error conocido de otra estación (ya que de esta última se conoce su posición). Entonces, el receptor de referencia o estación base calcula las correcciones para cada satélite tomando en cuenta la posición “real” y la calculada a partir de los satélites en vista.

Existen dos tipos de modelos para realizar GPS diferencial utilizando diferencias dobles. En uno las diferencias dobles son calculadas con un solo satélite en dos épocas distintas (Figura 4.1), mientras que en el segundo se utilizan dos satélites en la misma época. Ambos modelos pueden ser calculados con el código y la fase. Las correcciones que se aplican a la posición de la estación remota se generan a partir de las coordenadas conocidas de la estación base y del resultado obtenido por la diferencias dobles.

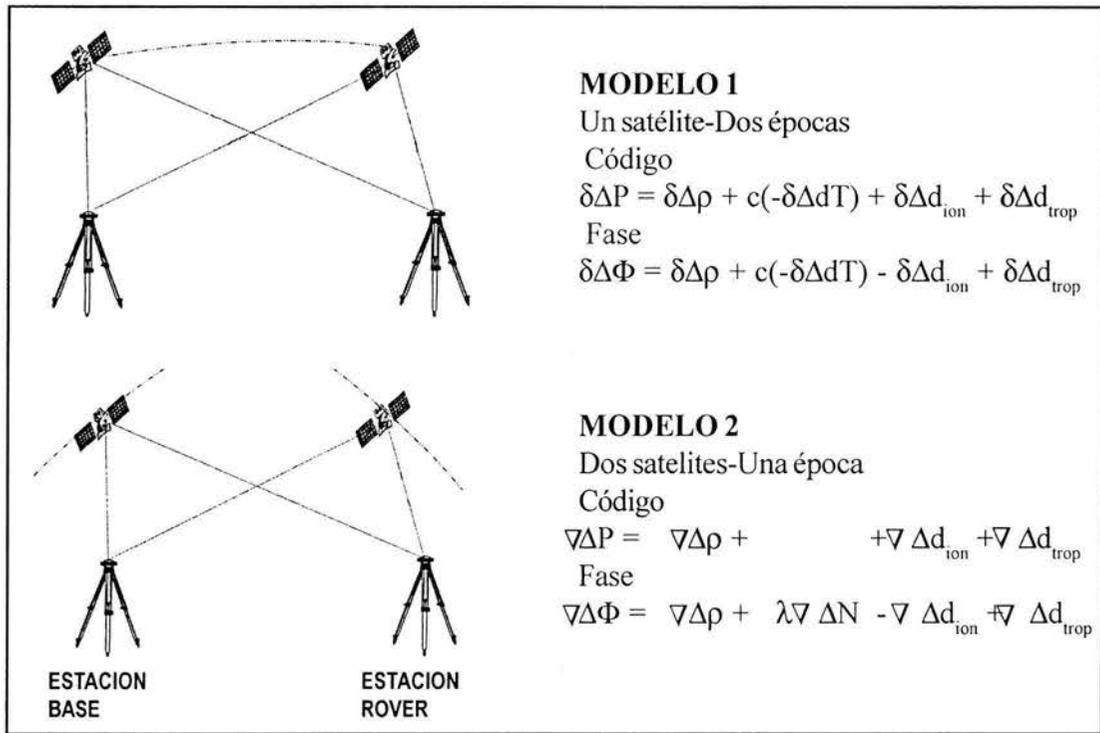


Figura 4.1 Método de Dobles Diferencias para el cálculo de las correcciones en un sistema de GPS Diferencial.

Del modelo básico :

$$P = \rho + c(dt-dT) + d_{ion} + d_{trop} + e \quad (3)$$

$$\Phi = \rho + c(dt-dT) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + e, \quad (4)$$

en donde P y Φ es el pseudorange (calculado por código y la fase), ρ es la distancia geométrica a el satélite, c es la velocidad de la luz, dt y dT son las derivas del tiempo en los relojes del satélite y del receptor (tiempo GPS), d_{ion} y d_{trop} son los retrasos ionosféricos y troposféricos respectivamente, e representa el efecto de multitrayectoria y ruido del receptor, N es la ambigüedad de la fase, y λ es la longitud de onda.

En los modelos Δ se utiliza para denotar el incremento en el parámetro, mientras que δ y ∇ representan la diferencia entre los observables de los receptores. El propósito de tomar la diferencia en cada uno los modelos es de obtener incrementos de una magnitud pequeña. Lo que permite reemplazar los incrementos que no son lineales relacionados a los parámetros de interes, por su primera aproximación.

Existen en el mercado varios programas (en general cada fabricante de receptores GPS cuenta con su propio software) con los que se puede aplicar este método; en particular en el Laboratorio de Cartografía Digital se utiliza *GrafNet* de *Waypoint Consulting* que es el programa utilizado también para el desarrollo de esta tesis.

GrafNet

GrafNet es un programa para postprocesado de datos de GPS diseñado para operar bajo Windows 9x/NT y obtener la solución del posicionamiento de levantamientos estáticos. Incluye dentro de su programación opciones para el ajuste de la red y un algoritmo inteligente de cierre de poligonales. El programa se puede utilizar para procesos automáticos aplicados en sesiones de tipo estático con múltiples estaciones móviles y una estación base.

Características

Se pueden obtener varios tipos de soluciones (*Fixed*, *Float* y *Quick static*) dependiendo del tipo de información y la precisión buscada. Tiene la posibilidad de procesar datos de receptores con frecuencia sencilla y doble, además de que es posible determinar líneas de base grandes. Cuenta también con la opción de emplear efemérides precisas durante el proceso.

Input Data

GrafNet acepta varios tipos de formatos de archivos en los que se incluyen los generados por los siguientes modelos de receptores: *Allen Osborne Associates* (AOA), *Ashtech* (todos los modelos de 12 canales), *Canadian Marconi* (*Allstar*), *JAVAD*, *Motorola* (6/8 canales *Oncore*, *PVT6*), *NavSymm/Navstar* (todos los modelos), *Furuno*, *NovAtel* (todos los modelos), *Rockwell* (*Jupiter* y *PLGR*), *Trimble* (4000 y formato *DAT*), *Rinex* y *UKOOA*. Además cuenta con el soporte para efemérides precisas en formato *SP3*. Es también posible utilizar al programa como una librería dinámica de Windows (DLL), característica que permite integrarlo en programas generados por el usuario (p. ej. con *Visual Basic*).

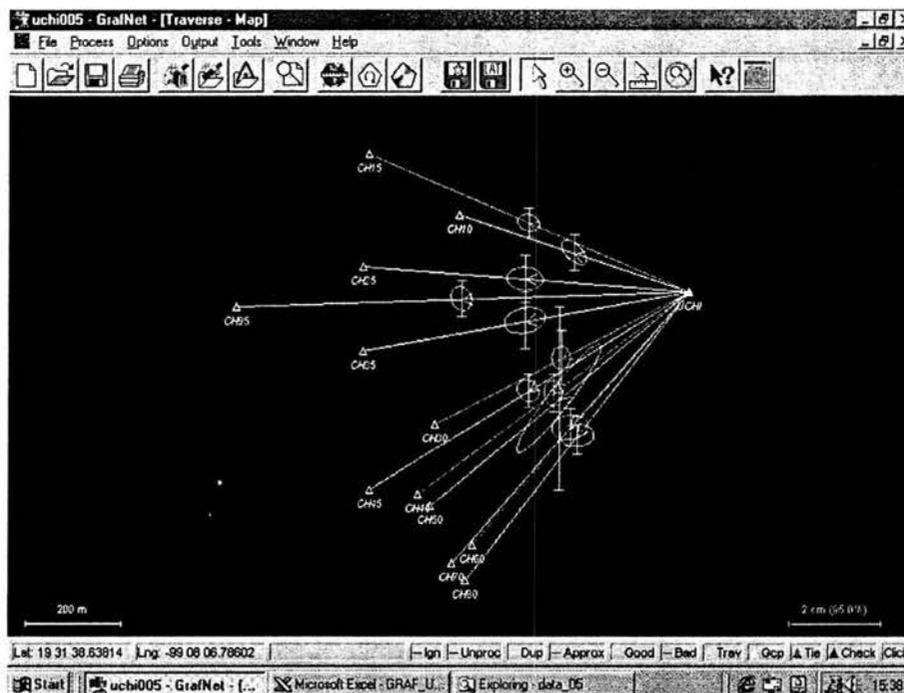


Figura 4.2 Ejemplo de la ventana de *GrafNet*. Se puede observar que todas las líneas de base convergen en la estación *master*. Se puede observar también la elipse de error de cada una de las soluciones.

Output Data

El programa tiene una interfaz de usuario interactiva (Figura 4.2) en la que se observa de manera gráfica la posición de las estaciones, los vectores entre éstas y la elipse de error para cada uno de ellos (esta última una vez que se obtuvo la solución). Además es posible generar un archivo de texto con la información de las coordenadas, vectores y ajustes de la red que se obtuvieron como resultado del análisis.

Precisión

La precisión depende principalmente de la longitud de la línea de base entre las estaciones, que en general para el modo de *fixed solution* debe de ser menor de 15 km, ya que con esto se logra que las fuentes de error se cancelen debido a que se asume que los receptores (base y móvil) están bajo las mismas condiciones atmosféricas e ionosféricas. Otros factores importantes son el tiempo de adquisición que se recomienda que no sea menor de 8 minutos y la frecuencia de muestreo que puede ser de 5 segundos; al utilizar estos parámetros se pueden lograr errores de 0.5 a 2 cm.

Algoritmo

En el caso de utilizar el programa en modo de *fixed solution* que es el más preciso, para calcular la ambigüedad de la fase se fuerza en una primera etapa a tomar un valor entero que se obtiene de una solución previa en la que se obtuvo el valor de la ambigüedad en forma de un número decimal. Después de encontrar los enteros de las ambigüedades (o sea el número de ciclos completos), utilizando un modelo estadístico, la posición se recalcula para reflejar la condición más acertada de las ambigüedades.

GPS con órbitas precisas

El método más exacto para posicionar una estación o punto de control es el que utiliza las órbitas corregidas de la constelación *NavStar*. Uno de los programas que puede manejar estas correcciones y que además es capaz de calcular una matriz que contiene parámetros de ajuste basados en estaciones GPS y que son utilizados para mejorar la solución de la estación por posicionar, es el programa *GIPSY-OASIS II*.

GIPSY-OASIS II

La solución absoluta que se logra con este programa se obtiene al postprocesar la información de los receptores GPS con *GIPSY-OASIS II* (*GIPSY*). Este programa fue desarrollado por el *Jet Propulsion Laboratory (JPL)* para la realización de proyectos de investigación que involucren técnicas que pueden ser aplicadas en la obtención del posicionamiento de una o varias estaciones y para la determinación de órbitas con una alta precisión. *GIPSY* se utiliza en modo de postproceso debido a que la preparación del modelo orbital se basa en las órbitas corregidas de cada uno de los satélites, por lo que no es posible el análisis en modo de tiempo real.

El objetivo principal de GIPSY es lograr un posicionamiento preciso, para lo cual se utilizan modelos de movimiento de placas tectónicas y algoritmos de estimación, y en ocasiones a más de 800 estaciones GPS repartidas alrededor del mundo.

Historia

La primera demostración del programa fue en 1985 con el análisis que recibió el nombre de *March 1985 High Precision Baseline Test*. En este proyecto se logró una precisión de 1 parte en 10^9 en la longitud de las líneas de base y se demostró la validez de los conceptos involucrados tanto en el programa de GIPSY como en la aproximación fiducial. Desde entonces, GIPSY ha demostrado buenas precisiones en las líneas de base bajo diversas condiciones y consistencias al estimar las órbitas de satélites GPS del orden de 30 cm o menos.

GIPSY tiene sus orígenes en dos sistemas independientes: el programa para la determinación de órbitas desarrollado durante los años de la navegación espacial, y el programa para geodesia basada en el método VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), incluyendo los modelados de dinámica terrestre y del retraso de la señal de radio.

En 1985, estos dos sistemas más la adición de un filtro Kalman para la estimación de parámetros y preproceso de los datos (para editar la información con gráficas interactivas) fueron combinados para formar a GIPSY.

Al mismo tiempo, un programa similar con algunos módulos comunes con GIPSY fue desarrollado y fue llamado OASIS; este es aún utilizado para el análisis de covarianza de misiones orbitales terrestres. También se incorporó la capacidad para estudiar las estrategias de estimación de los coeficientes del campo de gravedad y de parámetros orbitales de satélites con receptores GPS.

El término GIPSY-OASIS se refiere entonces a la unión de estos programas, aunque la mayoría de los investigadores usan uno u otro. El desarrollo inicial de GIPSY-OASIS tomó lugar en computadoras con plataforma VAX y MicroVAX empleando sistemas operativos VMS. En 1991 y 1992, GIPSY fue reescrito para correr bajo UNIX en estaciones Sun y HP. En el transcurso de la conversión del código, todos los módulos mayores recibieron cambios significativos y actualizaciones. El programa resultante en el sistema UNIX se llamó GIPSY-OASIS II.

Input Data

Todo los datos de fase y pseudorange obtenidos de los receptores GPS que entran a GIPSY-II deben estar en formato RINEX II. Existen varias utilerías para convertir desde otros formatos propietarios a RINEX (p. ej. el programa TEQC de UNAVCO), pero estas utilerías no son parte de GIPSY-II.

Además de los datos de seguimiento (*tracking*) a los satélites GPS se deben de introducir los datos sobre las propias órbitas de los satélites, orientación terrestre, el campo de gravedad terrestre, la posición de otros cuerpos en el Sistema Solar y una localización aproximada de las estaciones por analizar.

Los datos orbitales proveídos por los propios receptores pueden ser utilizados también ya sea en formato RINEX II o en formato SP1 o SP3.

Los parámetros de orientación terrestre pueden ser obtenidos del IERS (*International Earth Rotation Service*) o del análisis FLINN (*Fiducial Laboratories for an International Natural Science Network*) o incluso de algunas otras fuentes que están a disposición del público. Existen programas para hacer uso de los boletines (en los que se encuentran estos parámetros) en formato B del IERS y del análisis de FLINN del JPL.

La información del campo de gravedad terrestre tiene el formato de entrada del módulo de integración orbital (*oi*). Actualmente se utiliza el modelo de gravedad GEMT3 truncado a coeficientes esféricos de 8x8. Este archivo se provee (como otros modelos de gravedad) y junto con las efemérides planetarias como parte de la distribución de programa de GIPSY-II.

Output data

Los datos de salida del GIPSY-II incluyen una matriz de covarianza completa, los vectores estimados, las gráficas y tablas de los residuales pre y postajuste, coordenadas de las líneas de base en varios sistemas coordinados (tanto locales como globales), órbitas de los satélites y la evolución de los parámetros estocásticos tales como retrasos troposféricos y en los relojes. También estadísticas de la repetibilidad de las líneas de base pueden ser obtenidas.

Rango de Aplicación

La aplicación básica de GIPSY es el posicionamiento preciso y el cálculo de líneas de base con distancias que van desde metros hasta cientos de kilómetros.

Se puede utilizar para el posicionamiento con receptores funcionando en modo de levantamiento estático (varias horas de ocupación en cada sitio, al menos 8 horas) que usualmente son levantamientos a escalas regionales.

Otro uso importante de GIPSY es la determinación precisa de órbitas GPS utilizando una red de receptores (como la red FLINN) distribuida en todo el mundo. Para la determinación de las órbitas se utilizan estaciones con coordenadas fijadas (o ligeramente ajustadas) a valores determinados por métodos GPS o alguna otra técnica, como la interferometría de línea de base grande (*Very Long Baseline Interferometry, VLBI*) o por medición con láser desde satélites (*Satellite Laser Ranging, SLR*).

Recientemente GIPSY ha sido mejorado para permitir el análisis de los datos tanto para la orbitografía y el posicionamiento utilizando la señal doppler por satélite (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS*) como para la utilización de la medición con láser desde satélites (SLR) de forma conjunta o separada con datos de GPS.

Precisión

Como se mencionó antes, GIPSY fue desarrollado como parte de un proyecto para investigar técnicas de posicionamiento con alta precisión y la determinación de órbitas usando datos de GPS. El programa en sí mismo ha sido siempre escrito con el objetivo principal de obtener una precisión y una estabilidad en el modelo matemático, por lo que los algoritmos utilizan la *square root information matrix* (SRIF) en lugar de la matriz de covarianza.

La exactitud y precisión obtenidas con GIPSY han evolucionado y mejorado con el desarrollo y perfeccionamiento de los algoritmos aumentando la calidad de los resultados. Blewitt *and* Lichten [1992] con base en un experimento en donde utilizando datos de 21 receptores (de marca Rogue) distribuidos globalmente, demostraron que es posible obtener errores del orden de 2 mm más 2×10^{-9} de la longitud de la línea base.

Por otro lado, Blewitt *et al.* [1992] demostraron una diferencia de RMS (*root mean square difference*) del orden de 12 mm entre las coordenadas de 33 estaciones de GPS y del ITRF90. También Heflin *et al.* [1992] lograron obtener una precisión de 3 mm en horizontal y 7 mm en vertical en coordenadas absolutas de estaciones distribuidas globalmente.

Las órbitas de satélites GPS obtenidas utilizando GIPSY son de gran precisión; es común que se logren aproximaciones que pueden variar entre 7 y 10 cm de las órbitas reales. También al extrapolar órbitas de satélites GPS utilizando el análisis diario de FLINN desfasadas por un día, se han obtenido errores de 30 cm. En el mismo sentido, una comparación de órbitas de los satélites TOPEX (*TOPOgraphy EXperiment for Ocean Circulation*) estimadas a partir de datos generados con GPS y analizados con GIPSY, contra órbitas calculadas con otros métodos (por ejemplo, SLR), han mostrado una diferencia de 4 a 6 cm [Lichten *and* Border, 1987].

Características

Dentro de las principales características de GIPSY se encuentran:

- El procesamiento de la red completa se hace con referencia a un sistema global de coordenadas (con parámetros geodésicos fundamentales);
- La integración de órbitas usando una expansión esférica y armónica del campo de gravedad, tomando en cuenta los efectos del Sol, la Luna y los Planetas más las fuerzas no gravitacionales originadas por la presión de la radiación solar;
- Modelación de la dinámica conocida de la Tierra, incluyendo las mareas sólidas terrestres, movimiento de precesión, movimiento polar, mareas polares y carga del océano, además del modelo relativista general de los retrasos en la fase y el pseudorange de la señal;
- Modelos de retraso troposférico de tipo seco y húmedo incluyendo el desdoblamiento de los rayos, la curvatura terrestre y la estimación estocástica de los retrasos (cartografiados respecto al cenit) y de las desviaciones del reloj (como el ruido en el proceso Gauss-Markov);
- Estimación estocástica de gradientes troposféricos;
- Varias posibilidades de resolver la ambigüedad en la fase portadora observada (*integer cycle ambiguity*) y,
- Determinación de la covarianza completa, incluyendo sensibilidad a parámetros no incluidos en el modelo (p.e. valores incorrectos de la posición del polo).

El programa también incluye una variedad de utilerías para limpiar archivos de datos, definir la entrada, graficar los resultados y estadísticas, etc. (Figura 4.3).

OBSERVACIONES

ORBITAS

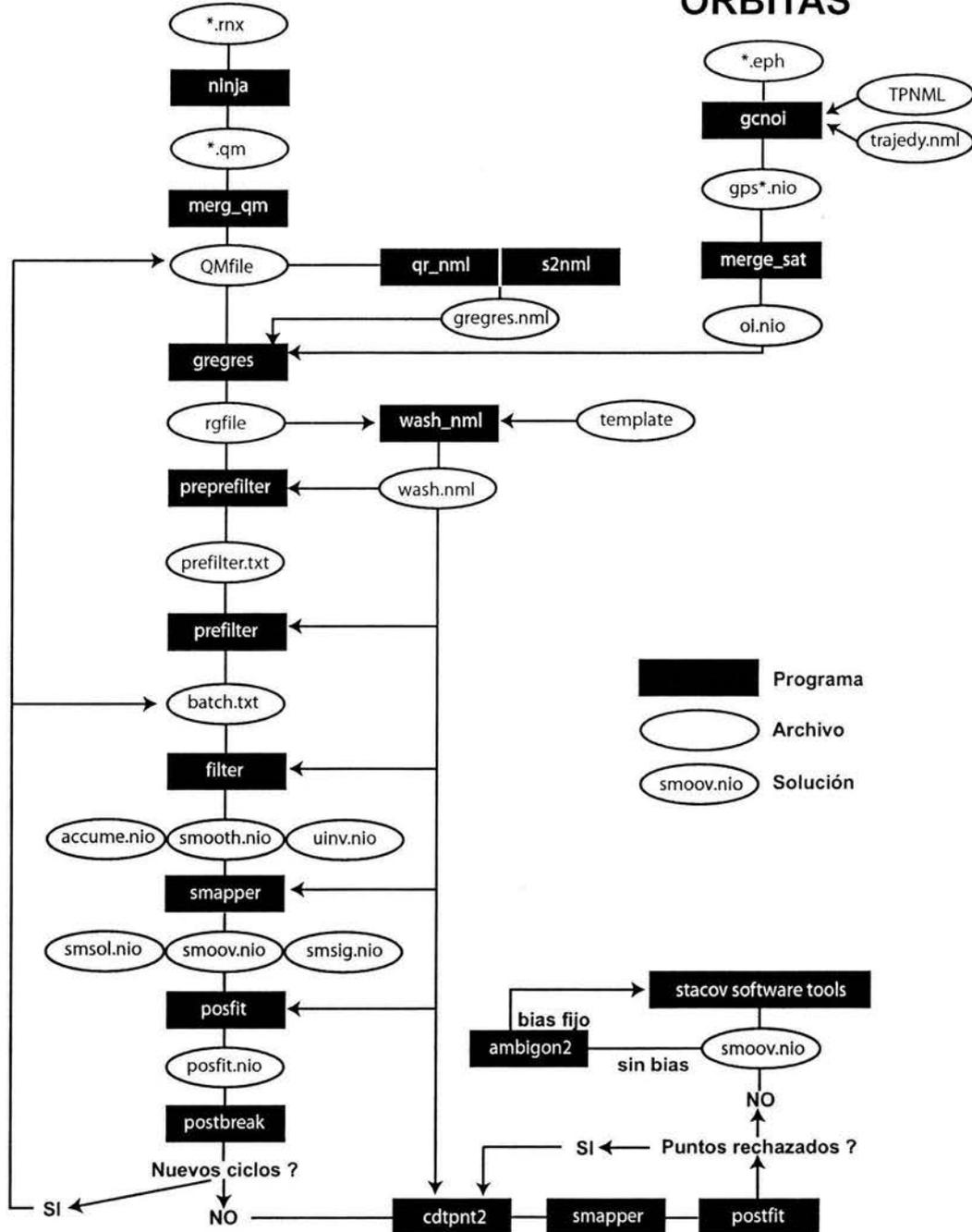


Figura 4.3 Diagrama de flujo del procesamiento con el programa GIPSY. Se presenta esta figura para ilustrar de forma general que GIPSY es en realidad un conjunto de subrutinas (módulos) programados para usarse en UNIX. Información específica del funcionamiento y descripción de cada módulo se puede obtener en Gregorius [1996].

Algoritmos

Los algoritmos en GIPSY presentan una evidente ausencia del análisis de doble diferencia (*double-differencing*) como medio para eliminar las desviaciones del reloj, la reducción simultánea de la fase y el pseudorango observados.

Las desviaciones del reloj son modeladas utilizando coeficientes polinomiales, los cuales son usualmente estimados con parámetros estocásticos en el límite del "ruido blanco" (una aproximación recomendada). El procedimiento es usualmente equivalente a la eliminación de la desviación usando un método de doble diferencia. Sin embargo, si los pseudorangos son reducidos simultáneamente con las fases portadoras de las diferencias dobles, se obtiene que las variaciones de las desviaciones del reloj son idénticas para ambos tipos. De hecho, con GIPSY las variaciones del reloj pueden ser graficadas explícitamente, lo que permite que se pueda localizar observaciones con posibles problemas.

Bajo ciertas circunstancias en donde no se pueden utilizar diferencias dobles, es posible aplicar el método de solución explícito para el *offset* o desviación del reloj y la estimación geodésica, aunque estas condiciones ya no son tan comunes desde que la constelación de satélites y la red de receptores han sido más densas.

Desde 1995 los conceptos de soluciones no fiduciales y de posicionamiento preciso han sido desarrollados y demostrados con GIPSY. La aproximación no fiducial permite la libertad de no tener distorsiones en la red, ocasionadas por imperfecciones en el conocimiento de las localidades de un conjunto de sitios fiduciales. Esto además permite cambiar a un nuevo marco de referencia cuando se publica uno mejor, sin degradación en la solución y sin tener que reprocesar la información.

Debido a que GIPSY no utiliza el método de diferencias dobles y resuelve explícitamente la diferencia de los relojes de los satélites, es posible utilizar órbitas precisas de una red global de estaciones y aplicarlo a posicionamientos puntuales, procesando una estación a la vez. Esto reduce drásticamente el tiempo de computadora necesario para el análisis de un conjunto de datos GPS.

Cuando se resuelve la posición de muchas estaciones simultáneamente por el método de diferencias dobles, el requerimiento de tiempo para el cálculo de un sistema de cómputo aumenta en proporción al cubo del número de estaciones. Esta es la razón por lo que no es posible obtener una solución con cientos de estaciones utilizando dicho procedimiento. Con el posicionamiento preciso puntual como el realizado con GIPSY se obtienen las mismas estimaciones numéricas, pero el tiempo empleado en este caso tiene una relación lineal con el número de estaciones, lo que permite el análisis de grandes redes con estaciones de trabajo ordinarias (como p. ej. SUN o PC con Linux).

5 Instrumentación GPS en el volcán Popocatepetl

La instrumentación de estaciones GPS en el volcán Popocatepetl forma parte de la red de deformación DefNet (*Deformation Network*); dicha red es parte de uno de los proyectos del Laboratorio de Cartografía Digital (CARDI) en el Instituto de Geofísica, UNAM. Actualmente están en operación seis estaciones autónomas y de operación continua, (tres de las cuales cuentan con receptores de doble frecuencia y tres reciben en la frecuencia L1). Las estaciones fueron desarrolladas para monitorear la deformación del volcán Popocatepetl.

De las estaciones que se encuentran en el volcán, seis están distribuidas alrededor de la estructura volcánica y cuatro están instaladas en las cercanías (las estaciones PP01 y PONE utilizan el mismo monumento) (Figura 5.1). Estas estaciones conforman tres sistemas independientes que son: Red de Primera Generación, Red L1 y Red PUMAS, cada una con su propio esquema de operación y transmisión de datos (Figura 5.4).

La marca de referencia de las estaciones POSW, POPN y POPW esta colocada en una base de concreto armado, de 1 m de diámetro y 1.5 m de profundidad; en el caso de las estaciones L1 se implemento el esquema de la Figura 5.2 o para las estaciones en afloramientos

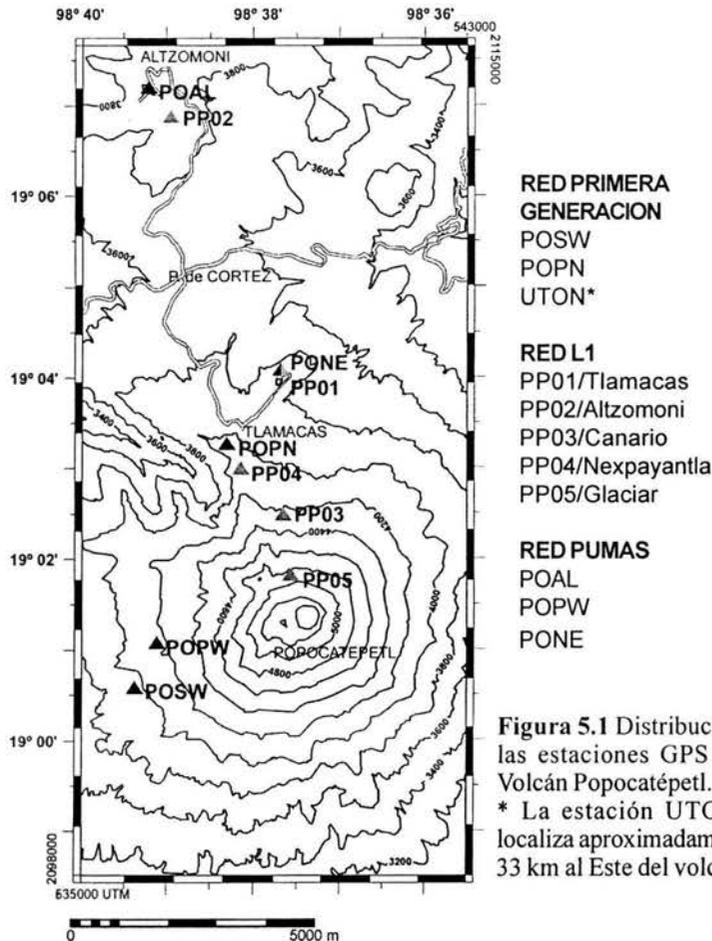
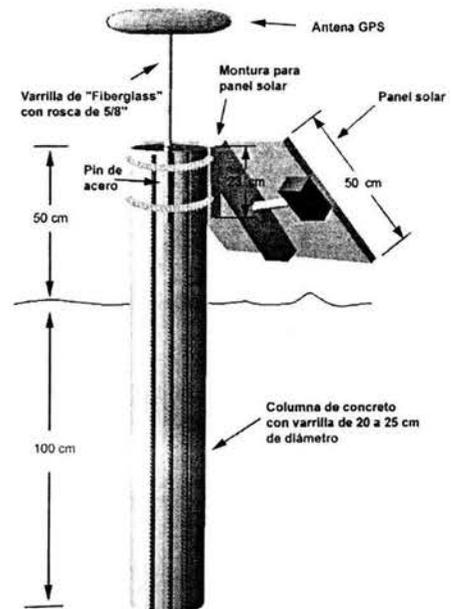


Figura 5.2 Esquema de monumentación utilizado en las estaciones L1.



rocosos, la instalación se realizó perforando directamente en la roca y fijando después la antena con resina epóxica (Hilti HY-150); las marcas de referencias de POAL y UTON están sobre un pilar de concreto que son parte de una barda o edificio, respectivamente.

Red de Primera Generación

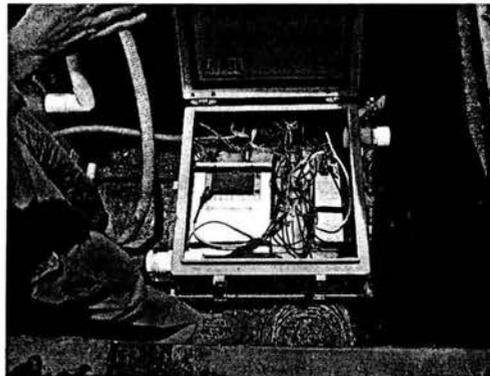
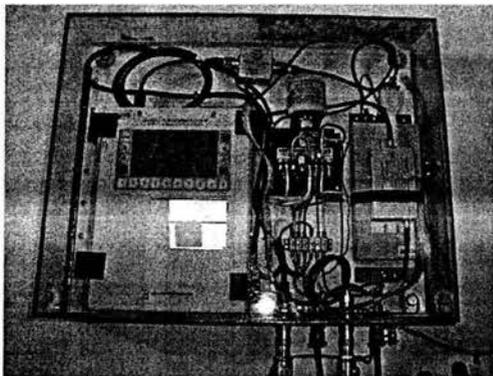
Esta red está en operación desde junio de 1996, consta de las estaciones POSW, POPN y UTON (Tabla 5.1 y Figura 5.3), utilizan receptores *TurboRogue* modelo SRN-8000 (POSW y POPN) y *Trimble* (UTON) al principio se utilizó un receptor modelo 4000 Sse que se reemplazó después por un *Trimble* 4700. Estos receptores operan con doble frecuencia (L1/L2). Los sitios POSW y POPN están situados en las laderas norte y suroeste del volcán y forman aproximadamente una línea base Norte-Sur a 4000 msnm (Figura 5.1), mientras que UTON está en las instalaciones del INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica) en Tonantzintla, Puebla aproximadamente 33 km al Este del volcán.

La transmisión de datos entre las estaciones instaladas en el volcán y el Instituto de Geofísica (Figura 5.4) se realiza con radio modems *Freewave* enlazados punto a punto; la frecuencia de transmisión es de 902 a 928 MHz utilizando la modulación de espectro esparcido (*spread spectrum*). Debido a la distancia entre las estaciones en el volcán y el Instituto de Geofísica (~70 km) es necesario utilizar un amplificador de 5 W para mejorar la recepción de la información.

Los datos son recibidos en el Instituto de Geofísica, UNAM en una computadora de clase Intel Pentium con sistema Linux. Esta computadora controla el almacenamiento y distribución de la información para su posterior procesamiento (Figura 5.4). La computadora baja la



Figura 5.3 La fotografía superior izquierda es un vista hacia el NE desde la estación Chipiquixtle se puede observar la antena de la estación POSW. Abajo (en la fotografía de la izquierda) de izquierda a derecha: receptor GPS, electrónica y radio modem instalados en el interior de la caseta de Chipiquixtle (PPX). En la fotografía de abajo-derecha se puede observar el receptor Turbo Rogue y a su derecha el radio modem (caja izquierda) en la estación POPN..



información de los receptores cada dos horas, recibéndola en formato *Conan Binary* hasta enero de 1999 y en formato *TurboBinary* desde entonces a la fecha. El intervalo de adquisición de los receptores GPS es de 30 segundos, lo que permite almacenar información en su memoria interna hasta por 10 días antes que se sobrescriba (en caso de que el sistema de transmisión falle).

La estación UTON está fuera de la estructura volcánica y por lo tanto fuera del campo de deformación que puede producir el volcán, lo que la hace susceptible de ser utilizada como un sitio de referencia. El control y envío de la información en este caso es manejado por guiones de automatización (*scripts*) que operan en una PC Pentium III bajo ambiente linux (SuSe 8.0). Esta estación cuenta con la posibilidad de utilizar Internet para servidor como medio de enlace entre el receptor y el Instituto de Geofísica (Figura 5.4).

Tabla 5.1 Datos técnicos de la estaciones POSW, POPN y UTON

Características	Chipiquixtle	Tlamacas	Tonantzintla
Nombre	POSW	POPN	UTON
Inicio	Abril 1996	Abril 1996	Enero 2003
Latitud	19.010	19.057	19.033
Longitud	261.343	261.363	261.684
Altura [m]	3940	4000	2156
Antena	Dorne Margolin T		Choke Ring
Altura de antena [m]	1.0	1.0	0.0792
Antena ID	8411		66588
Receptor	TurboRouge SNR-8000		Trimble 4700

Red L1

La red está compuesta por cinco sitios instalados en abril de 1999 distribuidos en las laderas noreste del volcán a elevaciones de aproximadamente 4000 m (PP01, PP03 y PP04), más un sitio que se instaló en el glaciar a 5100 m de altura (PP05, actualmente fuera de operación), y otra estación (PP02) que se encuentra a 11 km del volcán, a 800 metros al sureste de las instalaciones de televisa en el Cerro de Altzomoni (Figura 5.1). Dentro de estas instalaciones esta situado el radio modem que funciona como la estación *master* para la red TDMA, que a su vez esta conectado a otro radiomodem que opera como *slave* en la conexión con el Instituto de Geofísica. (Figura 5.4). Los receptores que se emplean en esta red fueron desarrollados por UNAVCO.

El equipo es de dimensiones reducidas y de bajo costo (comparado con el sistema L1/L2). Estos tipos de estaciones están enlazadas con radio modems *FreeWave* DGRO-115 conformando una red de tipo TDMA (*Time Division Multiple Access*). Los receptores GPS adquirían datos en intervalos de un segundo hasta julio del 2000; a partir de entonces el intervalo es de 10 segundos. Debido a su bajo costo los receptores no cuentan con memoria interna para grabar información, sólo disponen de un buffer para la transmisión, por lo que cada observación es transmitida inmediatamente. El receptor GPS es una tarjeta *Canadian Marconi Allstar OEM* y la antena es de tipo Micro-Pulse, con un *groundplane* diseñado por UNAVCO; a mediados de 2003 se cambiaron los receptores por el modelo Novatel 501.

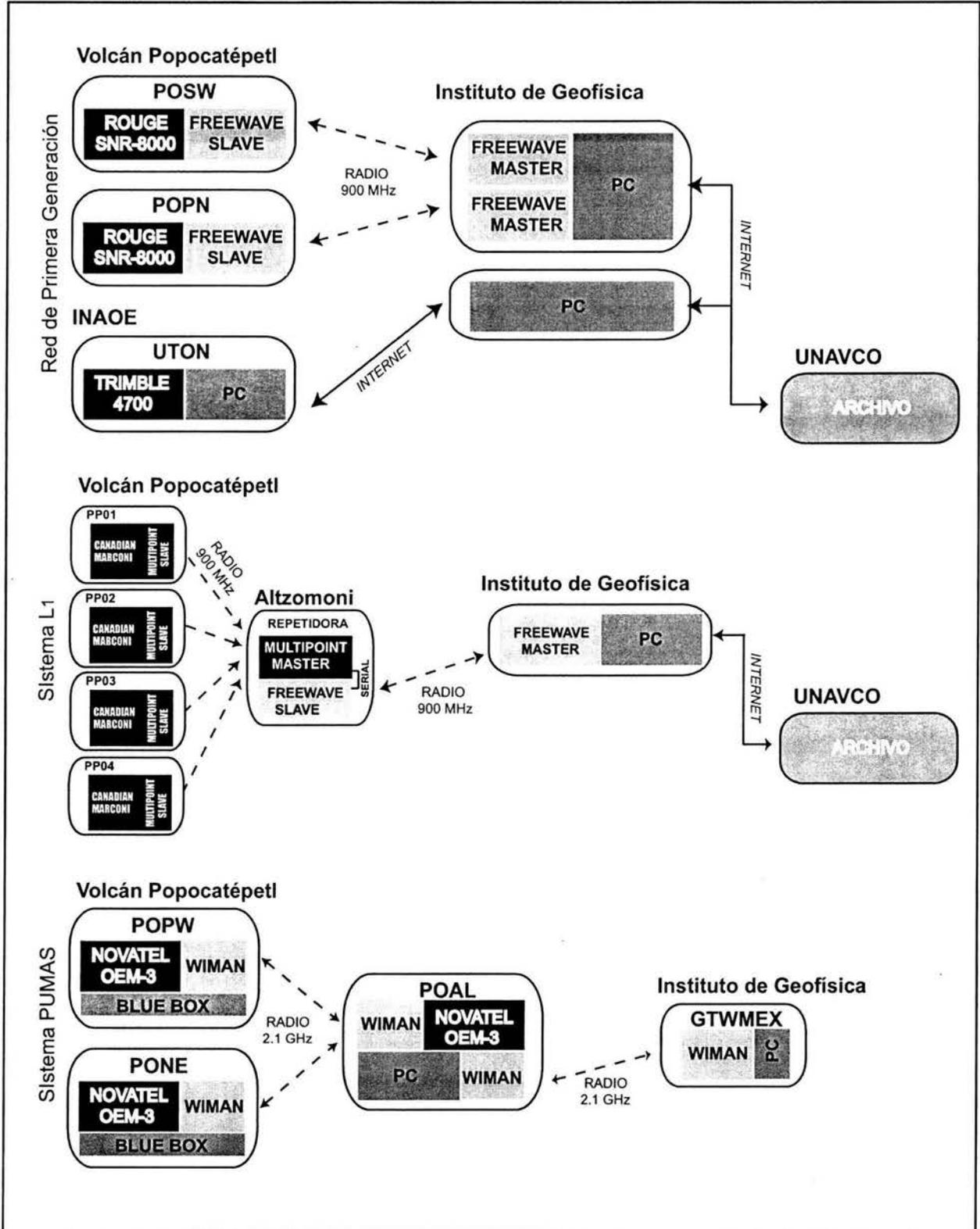


Figura 5.4 Configuración de la transmisión de los datos de las estaciones GPS de monitoreo en el volcán Popocatepetl y de referencia en el INAOE al Instituto de Geofísica.

Los datos de la red L1 son recibidos en tiempo real en el Instituto de Geofísica, UNAM en una computadora de clase Intel Pentium operando bajo Linux. La configuración en este caso es de un único modem como *multipoint master* (instalado en la estación de Alzomoni) y varios modems (estaciones) que operan como *multipoint slaves* (en el volcán) y dos modems que hacen el enlace punto a punto entre Alzomoni y Geofísica funcionando como *master/slave*. El flujo de datos es en tiempo real, siendo administrado por una computadora (con Red Hat 8.0) que recibe y controla el almacenamiento de la información transmitida por los sitios. (Figura 5.4).

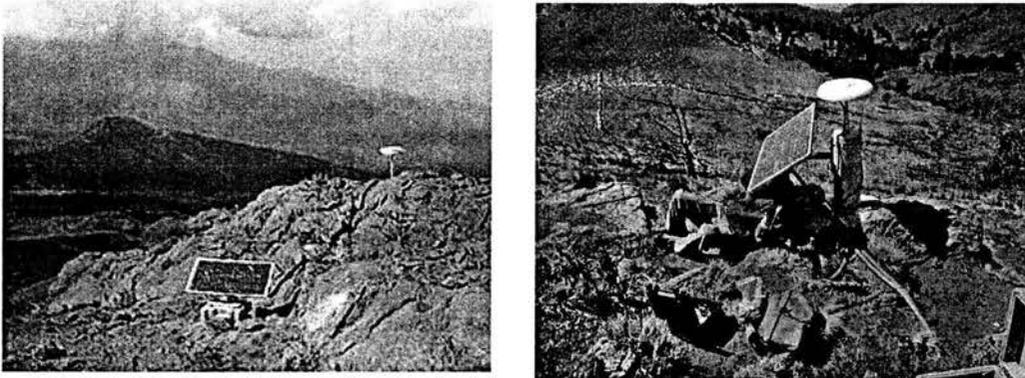


Figura 5.5 En estas fotografías se puede observar el tipo de monumentación de la red L1: izquierda monumentación en roca (estación PP03), la fotografía derecha es un ejemplo de la monumentación sobre ceniza (PP02), en este caso se utiliza una base de concreto armado, el monumento sirve también como soporte para el panel y antenas, la electrónica se encuentra en una caja separada, usualmente bajo tierra.

Red PUMAS

Esta red es parte del proyecto PUMAS (*Permanent Universal Monitoring Array System*) se realiza en colaboración con el *GeoForschungs Zentrum (GFZ)* de Potsdam, Alemania. En este proyecto se pretende integrar varios tipos de instrumentos en una sola estación y no sólo equipo GPS, también se considera soporte para gravímetros, magnetómetros, inclinómetros, sensores meteorológicos y sismómetros, todos aplicados al monitoreo en tiempo real de volcanes activos. Esta red está compuesta por dos tipos de estaciones: puerta de enlace (*gateway*) y de monitoreo (Figura 5.5).

Las estaciones de tipo *gateway* son computadoras de clase Intel con sistema Linux (SuSe 6.1); su función es la de servir de enlace entre la red local de monitoreo en el volcán, las estaciones repetidoras e Internet. Las estaciones se comunican entre sí por radio modems de marca *Wiman* utilizando una frecuencia de 2.4 GHz (Figura 5.4). Como la distancia entre las estaciones es considerable (~70 km), es necesario el uso de antenas parabólicas de alta ganancia para mejorar la calidad de la transmisión.

Las estaciones que miden la deformación (Figura 5.6) consisten de una computadora (*BlueBox*) construida especialmente para este proyecto con un kernel de *linux* compacto, además del equipo para la carga y administración de la corriente (controlador de baterías,

convertidor AC-DC, cargador, inversor, etc.) y del equipo de comunicación que son dos juegos de radio modems *Wiman* (uno para la comunicación con las estaciones de monitoreo y otro con el *gateway*). La estación *gateway* y las estaciones de monitoreo están enlazadas con una configuración de tipo "estrella" en la que el *gateway* se conecta con varias estaciones a la vez. En el caso del Popocatepetl se cuenta con una estación *gateway* (POAL), la que además sirve como estación de referencia, utiliza un receptor GPS de doble frecuencia *Novatel OEM-3* y antena *choke ring Novatel* modelo 503.

Las estaciones de monitoreo se instalaron en noviembre de 1999; los sitios PONE y POPW están ubicados en el cerro Tlamacas y en la ladera oeste del volcán, respectivamente (Figura 5.1). Cada uno cuenta con una computadora de tipo *BlueBox* que tiene un procesador AMD 486 a 66 MHz, 16 Mb de RAM y 32 Mb en un Flash Card donde se almacena y carga el kernel de Linux. Cada estación cuenta con siete puertos seriales en los que se puede conectar más instrumentos geofísicos. En uno de estos puertos está implementado un receptor GPS de marca *Novatel OEM-3 Millenium* con antena de tipo *choke ring Novatel* modelo 503. La comunicación a la estación en el cerro de Alzomoni (POAL) se realiza por radio modem marca *Wiman* que funciona con una frecuencia de 2.1 GHz. (Figura 5.4)

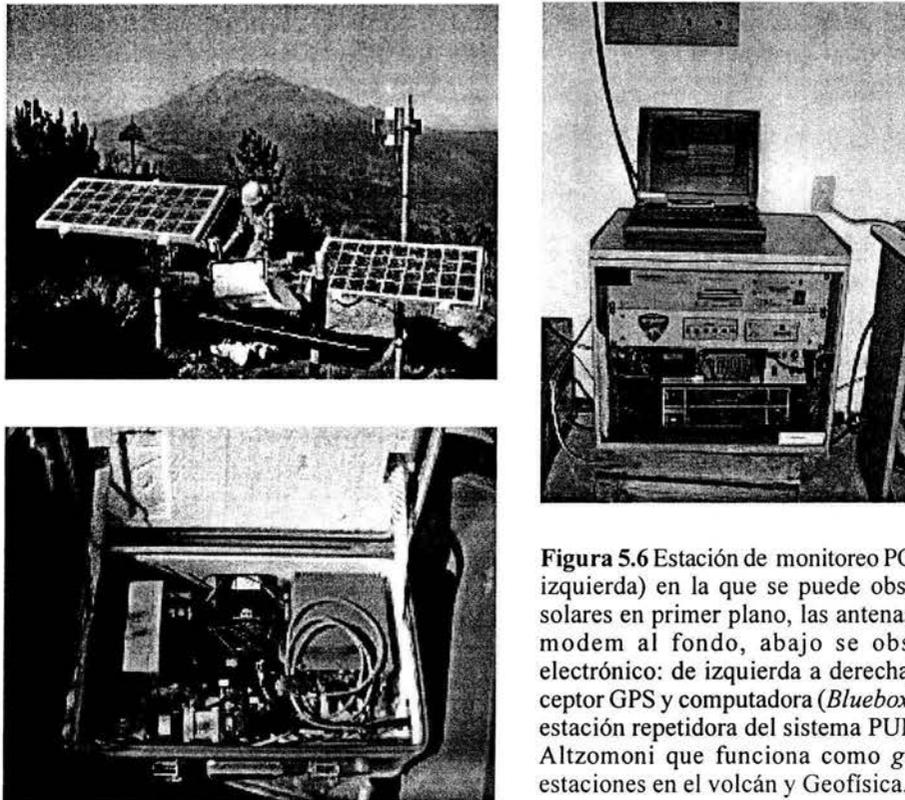


Figura 5.6 Estación de monitoreo PONE/PP01 (arriba-izquierda) en la que se puede observar los paneles solares en primer plano, las antenas de GPS y radio modem al fondo, abajo se observa el equipo electrónico: de izquierda a derecha, controlador, receptor GPS y computadora (*Bluebox*). Arriba derecha: estación repetidora del sistema PUMAS instalada en Alzomoni que funciona como *gateway* entre las estaciones en el volcán y Geofísica.

6 Comparación de soluciones Diferenciales y Orbitas Precisas

Uno de los propósitos de esta tesis es evaluar el alcance y la precisión que tiene la red de receptores L1 para medir la deformación superficial en el volcán, en este capítulo se realiza un análisis estadístico para tal efecto.

El ascenso de magma en un volcán activo causa cambios en el régimen de esfuerzos en la cámara magmática o en los conductos hacia la superficie, lo que se traduce en la deformación de la superficie de la estructura volcánica. Considerando que esta deformación puede ocurrir desde horas hasta meses antes de una erupción volcánica, es posible utilizar tal parámetro como precursor a un evento eruptivo [Linde *et al.*, 1993]. Con la aplicación de la tecnología GPS se puede caracterizar y cuantificar las variaciones espaciales y temporales de un grupo de estaciones que sirven como punto de control para medir la deformación en superficie de un volcán.

Actualmente, para medir desplazamientos del orden de milímetros se utilizan estaciones GPS con receptores de doble frecuencia (L1/L2), pero el alto costo y los requerimientos de infraestructura necesarios para instalar este tipo de equipo en ambientes de alto riesgo (como los presentes en un volcán activo), restringen el número de estaciones que se pueden colocar. Una opción para obtener una red de estaciones GPS más densa para definir mejor cambios de la estructura de un volcán, es la utilización de receptores que operan con una sola frecuencia (L1) [Volker *et al.*, 2002], dado su relativo bajo costo y requerimientos. Al implementar redes de GPS mixtas que incluyan receptores de una y de dos frecuencias es posible conocer mejor cómo está distribuida la deformación ya que el número de estaciones se incrementa.

Para el análisis con órbitas precisas es necesario realizar una corrección de las órbitas de cada uno de los satélites GPS antes de procesar los datos, por lo que se tiene un desfase en la obtención del posicionamiento de 2 a 3 semanas, periodo durante el cuál no se conoce la tendencia en la deformación de la estructura volcánica. El proceso de la información generada por una red GPS puede realizarse también utilizando métodos diferenciales, ya que existe un factor importante a tomarse en cuenta si es necesario informar el estado de la deformación (p. ej. a organizaciones de protección civil) para calcular el riesgo de un evento eruptivo, por lo que es deseable tener la posibilidad de analizar en intervalos de tiempo del orden de horas (o mejor aún en tiempo real) la posición de las estaciones GPS para determinar algún cambio considerable en la estructura del volcán.

Por esta razón se analiza a continuación la posibilidad de utilizar datos en la frecuencia L1 de receptores GPS y su postproceso con el método diferencial, para obtener la longitud de la línea de base entre las estaciones.

Distribución Normal en las series de tiempo GPS

Las serie de tiempo GPS representa la variación de la posición en el tiempo que tiene la estación (en realidad es la posición de la antena), por lo que, la pendiente de la línea calculada por mínimos cuadrados a partir de la serie de tiempo representa la velocidad con que la estación se mueve. Debido a que el análisis que se va realizar involucra la interpolación lineal para caracterizar la tendencia de la misma, es conveniente comprobar que la distribución de los datos es de tipo gaussiana o normal, ya que de no ser así el método de mínimos cuadrados no puede ser aplicado. Condición que se verifica a continuación.

Para la comprobación se toma como base la serie de tiempo de la estación POSW, ésta refleja la posición de la estación desde su inicio en 1996 hasta febrero de 2003 filtrando los datos a 3 sigma (3σ). A partir de la información de cada una de las componentes en la serie de tiempo y empleando las expresiones propuesta por Mandel [1964], es posible generar histogramas y obtener parámetros estadísticos que permitan caracterizar a cada componente, se tiene que la media de los datos (μ) está definida por:

$$\mu = \sum m_i f_i, \tag{5}$$

en donde m_i es la parte central del intervalo y f_i representa la frecuencia relativa correspondiente al intervalo i , que esta dada por,

$$f_i = N_i / \sum N_i \tag{6}$$

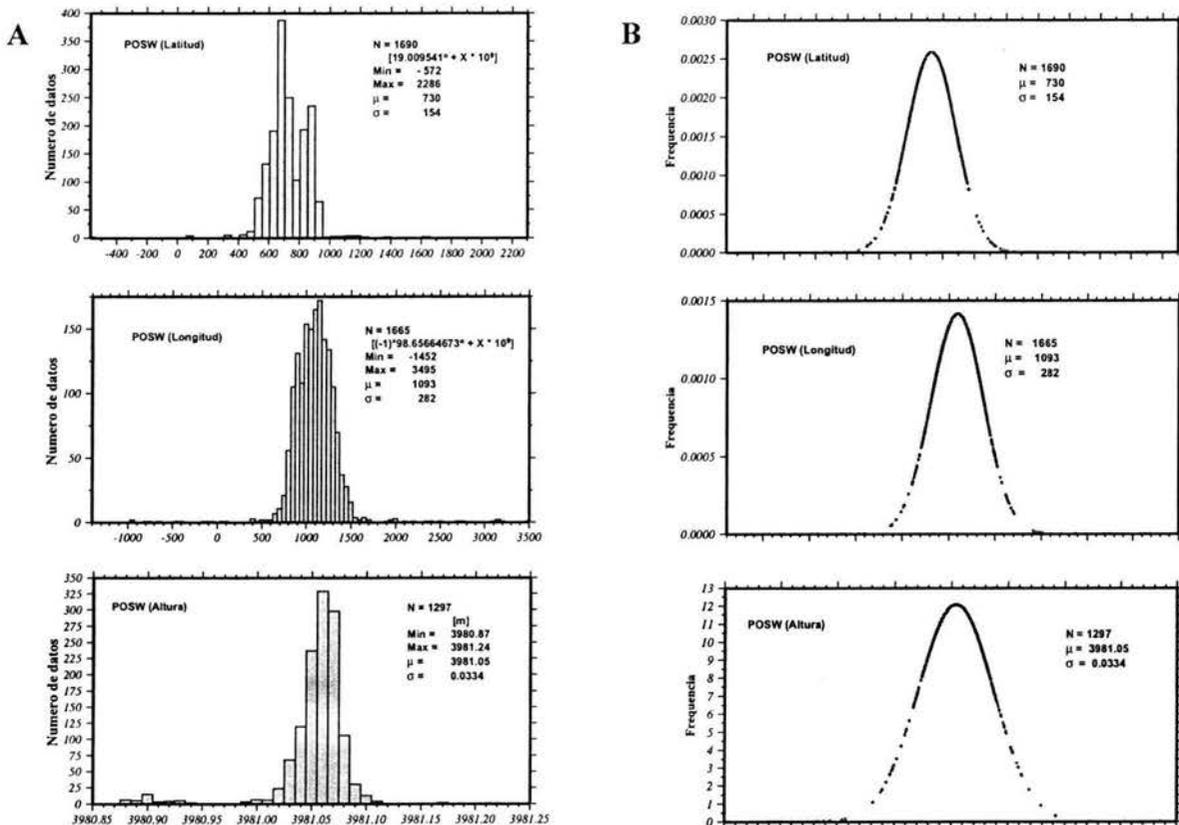


Figura 6.1 (A) Histogramas de los datos de posición diaria de la estación POSW. (B) Función de densidad para las componentes de la serie de tiempo.

para el número de datos (N_i). La estimación de la varianza en base al agrupamiento de los intervalos esta dada por,

$$\sigma^2 = \sum(m_i - \mu)^2 f_i \quad (7)$$

La forma simétrica o casi simétrica de los histogramas muestra un clara tendencia a la distribución normal (Figura 6.1a). Con los parámetros estadísticos de los histogramas se puede caracterizar a la población, y calcular la función de densidad para la distribución (normal) de acuerdo a,

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)} e^{-0.5(x-\mu/\sigma)^2}, \quad (8)$$

de esta manera se generan gráficas de distribución (Figura 6.1b), que muestran dada su forma un claro comportamiento gaussiano; demostrando que es factible utilizar el método de mínimos cuadrados para interpolar.

Postproceso diferencial

El postproceso diferencial calcula la línea de base entre estaciones GPS, en este apartado se utilizan una parte de los datos con los que se puede utilizar el método de dobles diferencias entre las estaciones POSW y POPN, para ser comparados con el método de órbitas precisas. Al analizar el comportamiento de la línea de base de estas estaciones para el periodo de 1996 a 2001 y procesadas con GIPSY (Figura 6.2), se puede observar que la línea de base tiende a incrementarse a razón de 1.4 mm/año.

Para realizar la comparación se tomó como referencia las soluciones diarias de las estaciones POSW y POPN procesadas con GIPSY. Se utilizaron los días del 1 de enero al 19 de febrero del 2001 (50 días) ya que se cuenta con un registro continuo y al menos con archivos de 20 horas por día. Para fines estadísticos no se tomaron en cuenta las soluciones con un error mayor a 3σ (Figura 6.2).

Para el postproceso diferencial se utilizaron los programas: *GrafNet* de *Waypoint*, *SkiPro* de *Leica* y *Geomatics* de *Trimble* con los que se obtuvieron las líneas de base para cada día de la serie propuesta. En este analisis todo el procedimiento fue manual, es decir, que no se ocupó algún tipo de *scripts* para realizar el proceso. Los archivos originales estan en formato RINEX, por lo que en algunos programas fue necesario convertirlos al formato nativo del *software* para utilizarlos.

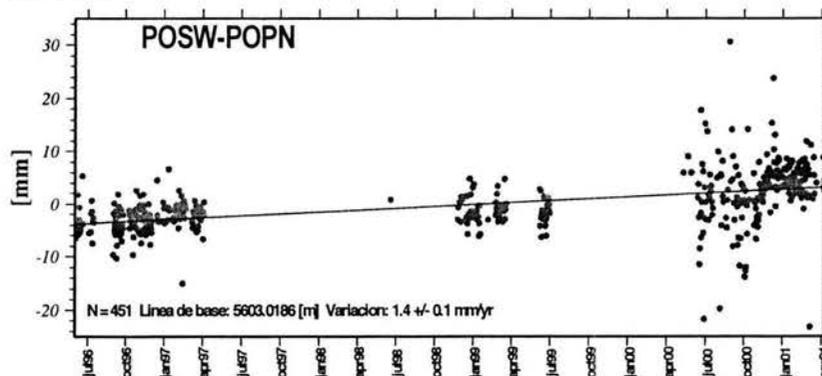


Figura 6.2 Línea de base entre las estaciones POPN y POSW, procesada con GIPSY y utilizando el método de órbitas precisas.

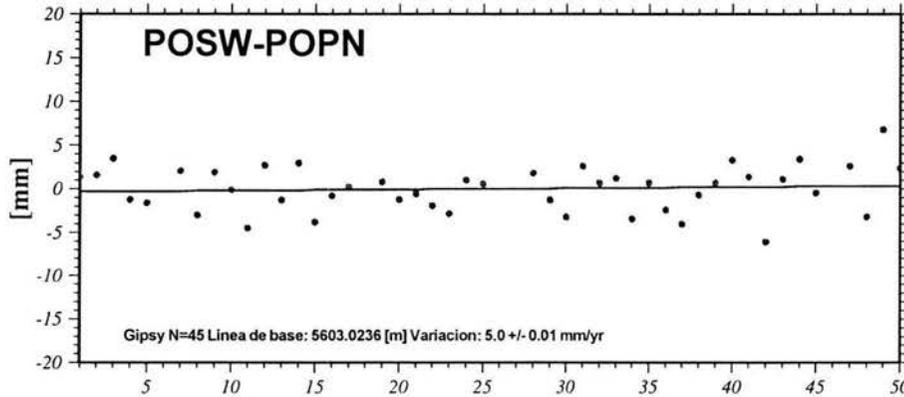


Figura 6.3 Línea de base entre las estaciones POPN y POSW, procesada con GIPSY y utilizando el método de órbitas precisas del 1 de enero al 19 de febrero de 2001.

Tratamiento preliminar al postproceso diferencial

Para facilitar la comparación estadística se transformaron las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altura) de las series de tiempo a coordenadas geocéntricas (X,Y,Z) tomando como referencia el elipsoide WGS84. Las fórmulas utilizadas para la transformación son las siguientes:

$$X = (v+h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \quad (9)$$

$$Y = (v+h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \quad (10)$$

$$Z = ((1-e^2) \cdot v + h) \cdot \sin \varphi \quad (11)$$

donde $v = a / (1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi)^{0.5} \quad (12)$

$$e^2 = (a^2 - b^2) / a^2 \quad (13)$$

$$f = (a - b) / a \quad (14)$$

La latitud φ , longitud λ y la altura h son tomados de las series de tiempo; a y b representan el eje semimayor y semimenor del elipsoide; f es el achatamiento (*flattening*); v es el radio de curvatura del primer vertical que pasa por el punto y e^2 representa la primera excentricidad. Los parámetros del elipsoide WGS84 son:

- $a = 6378137.0 \text{ m}$
- $b = 6356752.3 \text{ m}$
- $f = 1/298.257223563$
- $e^2 = 0.00669437999013$

La línea de base (L) entre dos estaciones se calcula de la siguiente forma,

$$L = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2)^{0.5} \quad (15)$$

Parámetros del postproceso diferencial

Para utilizar el método diferencial es necesario establecer las coordenadas de la estación de referencia (POPN o POSW en el caso del Popocatépetl), estas coordenadas se calcularon a partir de la serie de tiempo generada por el método de órbitas precisas para el periodo de análisis, utilizando el WRM (*Weighted Root Mean*: promedio ponderado) de acuerdo a,

$$WRM = \frac{\sum x_i w_i}{\sum w_i} \pm (1/\sum w_i)^{0.5} \quad (16)$$

donde $w_i = 1/\sigma_i^2$

Resultando las siguientes coordenadas:

POPN (latitud, longitud, altura)		
19.0566358	-98.6372328	4029.381
POSW (latitud, longitud, altura)		
19.0595416	-98.6566471	3981.064

Para tener un mejor control del postproceso siempre que fue posible se utilizaron los siguientes parámetros, que son de carácter general y comunes en todos los programas utilizados:

Elevación	15°
Modelo troposférico	<i>Saastamoinen</i>
Modelo ionosférico	Sin modelo
Tipo de solución	<i>ion free fixed</i>
Efemérides	Transmitidas
Fase	L1 o L1L2
Código	L1 o L1L2
Satélites	todos
Antena	genérica
Altura antena	1 m (POSW, POPN) 0 m (red L1)

El paso siguiente fue obtener la solución diferencial para cada uno de los días y con cada uno de los programas, después se calculó la tendencia de cada serie realizando un ajuste lineal por mínimos cuadrados, el valor de la intersección (ordenada al origen) y de la pendiente de la línea de ajuste se obtuvieron de la siguiente forma

$$B_0 = Y - B_1 X \quad (17)$$

$$B_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (18)$$

Aquí **Y** y **X** son las medias de cada conjunto de datos. El valor de la variación que presenta la línea de base (usualmente expresada en mm/año) corresponde entonces a

$$dBL/dt = B_1 * 365, \quad (19)$$

considerando que la unidades de la línea de base son milímetros.

El error de este parámetro se puede obtener si primero definimos la siguientes sumatorias:

$$ss_{xx} = \sum(x_i - \bar{X})^2 = (\sum x_i^2) - n\bar{X}^2 \quad (20)$$

$$ss_{yy} = \sum(y_i - \bar{Y})^2 = (\sum y_i^2) - n\bar{Y}^2 \quad (21)$$

$$ss_{xy} = \sum(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y}) = (\sum x_i y_i) - n\bar{X}\bar{Y} \quad (22)$$

entonces el error estandar del ajuste está definido por,

$$SE_{B_1} = s / (ss_{xx})^{0.5} \quad (23)$$

en donde **s** está dada por,

$$s = \sqrt{\frac{ss_{yy} - \frac{ss_{xy}^2}{ss_{xx}}}{n - 2}} \quad (24)$$

Estadísticas opcionales en la serie de tiempo

Para dar una idea de la dispersión de la serie, se utiliza la estadística WRMS (*Weighted RMS*) en la media y en línea de mejor ajuste (tendencia) utilizando

$$WRMS_{media} = \sqrt{\frac{\frac{N}{N-1} \sum \frac{(x_i - x_m)^2}{\sigma_i^2}}{\frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (25)$$

donde x_i y x_m son los datos de la serie y de la media ponderada, respectivamente; σ_i^2 es la varianza de cada dato.

$$WRMS_{linea} = \sqrt{\frac{\frac{N}{N-2} \sum \left[\frac{y_i - (B_0 + B_1 t_i)}{\sigma_i} \right]^2}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (26)$$

donde y_i es el resultado obtenido del postproceso diferencial, B_0 y B_1 son la ordenada al origen y la pendiente de la línea de mejor ajuste; t_i es el tiempo para cada solución y σ_i^2 es la varianza.

En algunos casos es recomendable obtener el intervalo de confianza para el ajuste, ya que refleja la variabilidad en el valor de la pendiente. El intervalo de confianza se puede calcular a partir de la varianza en la regresión

$$S^2_{BL} = \sum (BL_o - BL_i)^2 / df \quad (27)$$

tomando en cuenta que **df** son los grados de libertad, que para nuestro caso por ser un...

modelo lineal es **N-2**, siendo **N** el número de datos utilizados. Entonces, el intervalo de confianza (CI) de línea de tendencia (BL) calculado con una probabilidad de 0.95 es

$$CI_{BL_i} = BL_i \pm (2F_{2,n-2})^{0.5} * S_{BL} * (1/N + (x_i - \bar{X})^2 / \sum(x_i - \bar{X})^2)^{0.5}, \quad (28)$$

en donde F es la distribución de Fisher para 2 y n-2 grados de libertad.

Usualmente se utiliza a χ^2 para dar una idea de la calidad del ajuste, en el caso de la media y de la tendencia tenemos,

$$\chi^2_{media} = \frac{1}{N-1} \sum \frac{(x_i - \bar{x}_m)^2}{\sigma_i^2} \quad (29)$$

$$\chi^2_{tendencia} = \frac{1}{N-2} \sum \frac{(y_i - (B_0 + B_1 t_i))^2}{\sigma_i^2} \quad (30)$$

Análisis de las series

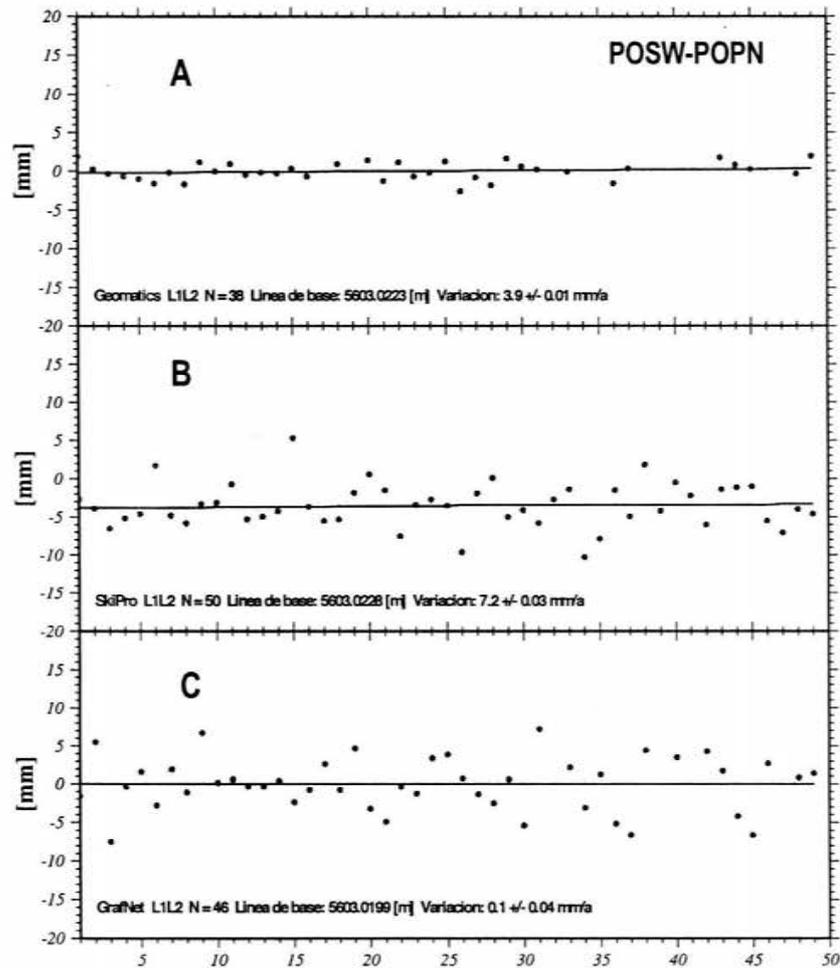
Las gráficas en las Figuras 6.4 y 6.5 son el resultado de postproceso diferencial de las series de tiempo usando tanto una como dos frecuencias, se tomaron en cuenta solo las soluciones que están dentro del intervalo de dos desviaciones estándar (3σ). Al comparar estas soluciones con las obtenidas con GIPSY para el mismo periodo (Figura 6.3) se observa lo siguiente.

La dispersión de todas las series es similar (± 5 mm), los promedios de longitudes de la línea de base tienen una buena aproximación ya que presentan un desfase con GIPSY que va de 0.8 a 3.7 mm. En el caso de las tendencias la mayoría son positivas con excepción de *GraNet* (L1/L2) y *Skipro* (L1), que son casi cero y negativa, respectivamente. Por lo anterior, se puede decir que la diferencia neta entre órbitas precisas (OP) y diferencial (DGPS) es del orden de milímetros, y también porque el valor de la diferencia entre las tendencias, va de 0.8 mm con *GrafNet* (L1) a 4.9 mm también con *GraNet* pero con utilizando dos frecuencias.

Es necesario remarcar que se puede mejorar la solución en cada uno de los programas al utilizar parámetros específicos antes del proceso, pero dado que estos no se pueden incluir de igual forma en todos, se utilizaron parámetros genéricos y de *default*. Por ejemplo, *GrafNet* basa su solución en la frecuencia L1 y hay que dar ciertas restricciones para el empleo de la frecuencia L2, por lo que la solución por *default* es de menor precisión sino se toman en cuenta.

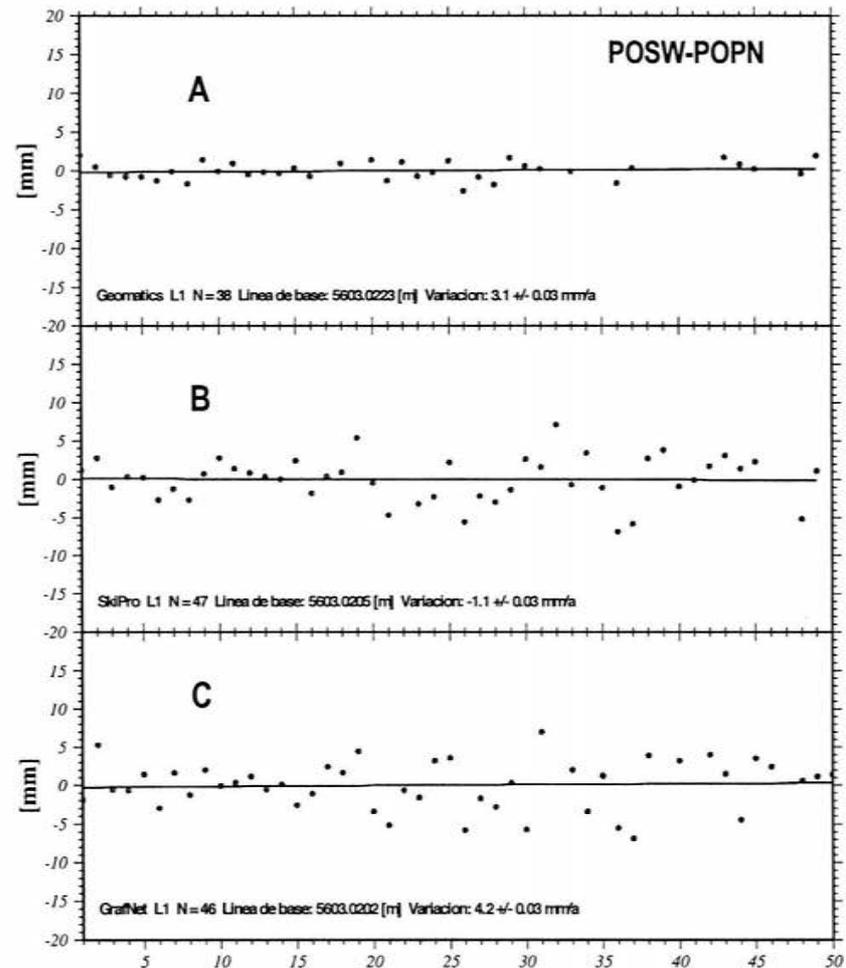
En particular, el programa *Geomatics* es el más consistente entre el empleo de una y dos frecuencias, pero es necesario un alto control de la calidad de los datos, entendiendo por calidad: el número de satélites, la cantidad de épocas y la geometría (posición) de los satélites en el momento de la adquisición. Por lo que solo fue posible obtener la solución del 76% de los datos, mientras que con los otros dos programas (*GrafNet* y *SkiPro*) se obtuvieron entre el 92 y el 100% del total de los días.

En general se puede decir, que es factible utilizar el postproceso diferencial con cualquiera de estos programas, esperando un desfase respecto a GIPSY de algunos milímetros.



GMT 2004 Feb 18 14:50:15 IGEOF-UW CorreaMF

Figura 6.4 Líneas de base entre estaciones POPN y POSW procesadas con el método GPS diferencial, utilizando doble frecuencia y distintos programas. Se incluyen las estadísticas de cada serie, la tendencia (línea) y la variación de la línea de base. Las gráficas y datos obtenidos son las soluciones que están dentro del rango de 2σ .



GMT 2004 Feb 21 15:57:15 IGEOF-UW CorreaMF

Figura 6.5 Líneas de base entre estaciones POPN y POSW procesadas con el método GPS diferencial, utilizando una frecuencia (L1) y distintos programas. Se incluyen las estadísticas de cada serie, la tendencia (línea) y la variación de la línea de base. Las gráficas y datos obtenidos son las soluciones que están dentro del rango de 2σ .

GPS Diferencial en tiempo casi real

Para fines de monitoreo volcánico se puede aplicar el método GPS Diferencial con una o con dos frecuencias, utilizando cualquiera de los programas analizados anteriormente, ya que permiten observar variaciones del orden de centímetros. Sin embargo, para la aplicación en un sistema de monitoreo en tiempo "casi real", GrafNet tiene algunas características especiales para aplicarlo en las estaciones del volcán Popocatepetl, ya que no solo basa su solución en la frecuencia L1, sino que también puede ser utilizado como una utería dinámica (DLL), haciéndolo adecuado para ser controlado mediante *scripts* y por lo tanto, el postproceso puede ser automatizado.

El protocolo a seguir para monitorear la deformación se divide entonces en dos estrategias: a largo y a corto plazo. Se puede ver la tendencia que la deformación presenta con un desfase de 2 a 3 semanas utilizando la línea de base generada con GIPSY, y se puede obtener una solución diaria utilizando GPS diferencial con *GrafNet*, con esto es factible conocer el estado de la deformación del día anterior. En el caso de que el evento volcánico evolucione en horas y no en días es posible utilizar el método diferencial en lapsos menores.

Por lo que se analizó la variabilidad que tiene una solución en particular utilizando diversos intervalos de adquisición, con el objetivo de determinar el periodo de tiempo mínimo para aplicar el método diferencial y conservar una buena aproximación. Como ejemplo se tomaron las soluciones generadas a partir de intervalos de 1, 3, 6, 8 y 12 horas en dos líneas de base (con distancias de 5 y 11 km, aproximadamente), utilizando una red mixta conformada por receptores de una frecuencia y doble frecuencia. La solución diferencial de cada uno de los intervalos se comparó con la solución para 24 horas (soluciones para el 16 de Febrero de 2001).

Las estaciones utilizadas representan las líneas de base más largas en la red y por lo tanto con la mayor variabilidad en la geometría de los satélites (*DOP*), ya que el volcán se encuentra entre ellas. Cabe mencionar que la disposición geométrica evaluada (*PDOP*) se puede considerar constante y que se repite diariamente. Lo que significa que la posición de los satélites en un momento dado del día es la misma después de 24 horas. En términos generales esta repetibilidad en la posición relativa de los satélites se mantiene por intervalos de meses.

Las estaciones L1 utilizadas fueron PP03 (Canario) y PP02 (Altzomoni) y como estación *master* se utilizó a POSW utilizando el programa *GrafNet*.

Como ejemplo se tomaron las soluciones generadas a partir de intervalos de 1, 3, 6, 8 12 horas en dos líneas de base (con distancias entre 5 y 11 km) utilizando estaciones con receptores de una y doble frecuencia. La información se comparó con la solución para 24 horas de las mismas líneas de base. Estas estaciones representan las líneas de base más largas de la red y con la mayor variabilidad en la geometría de los satélites (*DOP*), ya que se encuentra la estructura del volcán entre ellas. Cabe mencionar, que la disposición geométrica evaluada (*PDOP*) es en términos generales constante y se repite diariamente.

Las Tablas 6.1 y 6.2 muestran la comparación entre soluciones para los intervalos de menos de 24 horas con DGPS. El $PDOP^2$ presentado es el promedio de las épocas utilizadas y se calcula utilizando el valor de DD_DOP (Diferencias dobles de *DOP*) que genera el programa.

Tabla 6.1 Línea de base POSW-PP03 (4690.6 m)

Tiempo	1 hora [cm] (PDOP ² ,min)	3 horas	6 horas	8 horas	12 horas
0:00					
1:00	-23.57 (6.0,43.0)				
2:00	-0.79 (7.4,47.5)				
3:00	-1.47 (3.9,36.5)	-0.84 (3.9,126.0)			
4:00	-0.42 (8.0,45.0)				
5:00	-0.34 (4.7,48.0)				
6:00	-0.84 (2.2,50.5)	-0.67 (2.2,142.0)	-0.69 (2.2,266.5)		
7:00	-2.93 (4.0,31.5)				
8:00	-25.91 (1.8,12.0)			-0.67 (1.8,308.5)	
9:00	21.66 (3.3,32.5)	0.30 (3.3,75.0)			
10:00	38.65 (4.7,47.0)				
11:00	0.89 (2.7,39.5)				
12:00	NP (18.0,42.5)	NP (18.0,129.0)	0.38 (3.0,203.5)		-0.34 (3.0,469.0)
13:00	NP (9.4,22.0)				
14:00	NP (3.5,16.5)				
15:00	-33.72 (3.8,20.0)	NP (3.8,61.5)			
16:00	-29.34 (8.7,42.5)			-33.76 (8.7,264.0)	
17:00	0.36 (2.2,23.5)				
18:00	0.57 (3.0,48.5)	0.78 (3.0,113.0)	0.60 (3.0,174.5)		
19:00	-1.08 (2.6,47.0)				
20:00	0.56 (3.2,48.0)				
21:00	NP (2.6,49.0)	0.12 (2.6,142.5)			
22:00	0.12 (3.0,37.0)				
23:00	SD				
24:00	SD	0.12 (3.0,37.0)	0.33 (3.0,179.5)	0.43 (3.0,250.0)	0.53 (3.0,353.0)

Tabla 6.2 Línea de base POSW-PP02 (11744.1 m)

Tiempo	1 hora [cm] (PDOP ² ,min)	3 horas	6 horas	8 horas	12 horas
0:00					
1:00	1.48 (5.4,50.5)				
2:00	-1.13 (1.9,53.0)				
3:00	-2.93 (4.4,53.5)	-1.64 (4.4,155.5)			
4:00	-1.43 (3.2,50.0)				
5:00	-0.48 (12.6,53.0)				
6:00	-0.69 (2.9,53.5)	-1.07 (2.9,156.0)	-1.08 (2.9,310.9)		
7:00	-1.57 (1.9,59.5)				
8:00	-0.63 (2.5,59.5)			-1.30 (2.5,429.0)	
9:00	-0.50 (2.1,59.0)	-0.83 (2.1,177.0)			
10:00	-0.40 (1.8,59.0)				
11:00	-0.84 (5.0,58.5)				
12:00	-0.02 (3.1,54.5)	-0.45 (3.1,171.0)	-0.77 (3.1,347.5)		-0.11 (3.1,658.5)
13:00	-0.13 (3.6,33.0)				
14:00	-0.03 (3.8,50.0)				
15:00	2.05 (4.2,42.5)	-0.17 (4.2,124.5)			
16:00	2.76 (6.2,44.5)			-0.33 (6.2,397.5)	
17:00	21.64 (2.1,40.5)				
18:00	NP (3.5,44.5)	3.97 (3.5,128.0)	-0.17 (3.5,252.0)		
19:00	4.6 (2.1,45.5)				
20:00	NP (3.3,44.5)				
21:00	NP (1.9,47.0)	NP (1.9,135.5)			
22:00	-1.98 (3.9,53.0)				
23:00	6.86 (2.1,38.0)				
24:00	3.79 (3.0,53.0)	5.49 (3.0,143.0)	NP (3.0,278.0)	5.40 (3.0,361.5)	-0.17 (3.0,529.5)

Se presenta también el periodo utilizado durante el proceso (minutos), en el que PDOP² es menor de 3.16 (tolerancia por *default* del programa). El intervalo de adquisición es de 30 s (2 épocas/min). **NP** significa que falló el test de RMS durante el proceso con GrafNet y **SD** se emplea cuando no existe información en ese periodo. Para facilitar la interpretación de los resultados presentados en las Tablas 6.1 y 6.2, se sintetiza la información en la Figura 6.6, en donde están graficados los promedios de la diferencia entre cada intervalo y la solución de 24 horas. Se consideran solo las soluciones que están dentro del rango de 2σ .

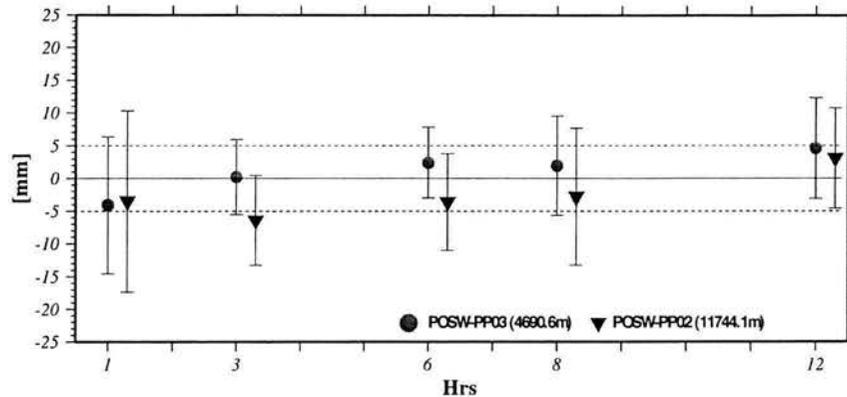


Figura 6.6 Soluciones con diferentes intervalos (1, 3, 6, 8 y 12 horas) comparadas con la solución diaria (24 horas). Se graficó la media de la diferencia entre el intervalo reducido y la solución de referencia.

Dado que las estaciones representan la mayor variabilidad de la geometría (estación-satélite) en el arreglo de la red, y considerando tanto la distancia como la localización con respecto a la estructura del volcán (que puede bloquear la visibilidad a ciertos satélites), se puede decir que todas los periodos analizados pueden ser utilizados con una aproximación de ± 5 mm, pero si se considera el rango del error, está aproximación puede incrementarse hasta ± 15 mm cuando se emplean periodos de 1 hora. Por lo que se recomienda utilizar intervalos de 3 horas como mínimo en líneas de base de hasta 5 km e intervalos de 6 a 8 horas cuando sean líneas de base de 12 km. En particular es necesario utilizar los siguientes criterios al utilizar *GrafNet* para mantener esta aproximación:

- Al menos en una dirección del análisis diferencial la solución debe de pasar las pruebas de *RMS* y *RMS reliability* calculados por *GrafNet* (estas pruebas evalúan el residual de cada época utilizada en el proceso).
- Si existen las soluciones en las dos direcciones (*forward* y *reverse*) se debe de utilizar el promedio de ambas.
- Se debe de tener un mínimo de 100 épocas en el intervalo y el promedio de PDOP² de éstas debe de ser menor a 3.1.
- Se puede considerar que más allá de 2σ es un *outlier* de la serie.

Una vez establecidos los parámetros para designar una solución como válida se puede automatizar el procedimiento. Esto se logró usando programas desarrollados con Visual Basic durante el proceso de esta tesis. Estas utilerías permiten obtener los archivos de los servidores que bajan la información del volcán y empezar a procesarlos a un intervalo definido, utilizando como base el programa *GrafNet*. A continuación se describen los programas utilizados para este proceso (El código fuente se encuentra en el apéndice)

- GPSD_process** Directorio donde se ejecuta y administra la información del proceso, contiene:
- bin** Directorio donde se encuentran los ejecutables y los archivos de configuración.
- data** Directorio donde se almacenan los archivos a procesar en formato RINEX y GPB.
- solutions** Directorio donde se guarda la solución de las líneas de base en formato GD.
- CronMaster** Programa que controla todo el proceso, éste utiliza los siguientes programas,
 - GetFiles** Baja los datos realizando un ftp al servidor.
 - PosDif** Checa si es posible realizar el proceso diferencial.
 - UnCompress** Descomprime los datos.
 - ConvertFiles** Convierte los datos de RINEX a GPB.
 - MakeNavFile** Crea los archivos de navegación para las estaciones L1 .
 - FindVectors** Inicia *GrafNet* y calcula las líneas de base.
 - SendSolution** Obtiene las soluciones y da formato a los archivos GD.
 - BorrarFiles** Elimina los archivos del directorio data.

7 Episodios de deformación en el volcán Popocatepetl

En este capítulo se describen e interpretan las series de tiempo de las estaciones GPS instaladas en el volcán Popocatepetl. En estas series las soluciones diarias presentan un comportamiento variable, como resultado de esto, es posible agrupar la información en periodos en los que la tendencia de los datos muestran una pendiente positiva y después cambia a negativa. Dichos periodos en las series de tiempo pueden reflejar episodios de deformación en los que la estructura del volcán cambia de volúmen, sin embargo, como se demuestra al final del capítulo no es factible correlacionar el origen de esta deformación con los procesos magmáticos que se han presentado en el Popocatepetl. Por lo que se resalta el hecho de que la interpretación de las series de tiempo GPS se debe de hacer dentro de un marco geológico regional y no solo limitarse a dar una explicación en función de los procesos magmáticos propios del volcán, ya que existe la posibilidad de que las series de tiempo registren varios tipos de eventos, como se explica más adelante. Previo al análisis de si las estaciones GPS han registrado o no una deformación, resulta conveniente estimar el rango en el cual un volcán puede deformarse antes de una erupción.

La deformación superficial ha sido considerada durante varias décadas como un parámetro que precede a una erupción, utilizando diversas técnicas geodésicas para cuantificar este fenómeno. Una de estas técnicas utiliza inclinómetros para medir indirectamente los cambios que se presenta en un volcán, ya que un cambio debido a una variación de su volúmen puede modificar el ángulo de las pendientes de las laderas del volcán en las que se encuentran instalados los inclinómetros. Un ejemplo de este tipo de instrumentación, lo tenemos en el volcán Unzen en Japón, en donde un inclinómetro registró un cambio en la deformación aproximadamente 9 días antes de la formación de un domo en el interior del cráter, presentándose después un evento de tipo vulcaniano que fue asociado al proceso de crecimiento del domo [Yamashina, 1999]; también en este volcán se han documentado desplazamientos de algunos centímetros utilizando equipo GPS [Jousset, 1999]. Otro ejemplo es el volcán Unzendake, Japón, en donde se utilizó la variación de líneas de base entre siete estaciones GPS con receptores de doble frecuencia para medir la deformación, en este caso se observaron cambios de 3 a 12 cm [Nishi *et al.*, 1999]. La deformación superficial puede ser de mayor magnitud, como la que se presento en una caldera en Italia, en donde se midieron desplazamientos verticales que alcanzaron un máximo de 3.5 m [Bianchi *et al.*, 1987]. Sin embargo, también puede ocurrir que la estructura se deforme sin que se presente un evento eruptivo como por ejemplo en la caldera de Long Valley, California, en la que se han observado cambios en la línea de base entre estaciones de 8 a 10 cm sin que se presente una erupción [Langbein *et al.*, 1995].

Actualmente el Laboratorio de Cartografía Digital (CarDi) en el Instituto de Geofísica realiza un monitoreo continuo de la deformación del volcán Popocatepetl utilizando las estaciones GPS instaladas en los alrededores de su cráter (Figura 5.1). De forma breve, el procesamiento de los datos generados por estas estaciones es el siguiente: la información de las estaciones

es enviada a CarDi, ahí los datos son archivados, procesados y transferidos al *Geodesy Lab* de la Universidad de Miami-RSMAS, algunos de estos datos son además enviados a UNAVCO para su respaldo y acceso público. El postprocesado de los datos se realiza con el programa GIPSY utilizando órbitas no fiduciales, después las soluciones diarias generadas se refieren al sistema ITRF2000 [Altamimi *et al.*, 2002]. Cada solución en particular representa la posición de la estación para un determinado día, estas soluciones se grafican *versus* tiempo, generándose de esta forma las series de tiempo GPS, que en nuestro caso son utilizadas para conocer el estado de la deformación del volcán, como a continuación se describe.

La Figura 7.1 es la serie de tiempo para la estación POSW procesada con GIPSY y con el método delineado previamente, las soluciones como se mencionó se hacen considerando fija a la placa de Norte América. Esto significa que si la estación solo se moviera con esta placa, las soluciones diarias estarían alrededor de una recta con pendiente igual a cero. Pero como se observa en la Figura 7.1 es posible definir al menos dos periodos en los cuales se presenta un cambio en la dirección de la tendencia, que van de febrero 1997 a junio 1999 y de octubre de 2000 a octubre 2002 (recuadros). Durante estos periodos se pueden observar variaciones de hasta 20 mm en las componentes horizontales y un máximo de 35 mm en la vertical. En una primera aproximación estos cambios de tendencia pueden representar eventos de deformación del volcán por lo que se presenta una discusión de estos resultados en un contexto local y después regional para definir el origen real de estos eventos.

Tomando en cuenta que la deformación del Popocatepetl puede ser causada por el incremento de material en la cámara magmática, resulta conveniente correlacionar la actividad del volcán y el comportamiento de la serie de tiempo durante estos periodos. Considerando tanto la actividad reportada por CENAPRED (capítulo dos) como a los periodos de posible deformación definidos por los cambios que presentan las series al cambiar de sentido la pendiente en ellas (eventos enmarcados en la Figura 7.1). Se tiene que es posible relacionar durante el primer periodo (recuadro izquierdo Figura 7.1) el crecimiento de varios domos en el interior del cráter con algunos cambios en la tendencia de la serie de tiempo. De forma tal, que durante el intervalo de enero a diciembre de 1997 en los reportes de CENAPRED se documentaron varios domos en el interior del cráter y para este mismo intervalo, que está representado por la primera mitad del recuadro izquierdo en la gráfica de la Figura 7.1 se observa una pendiente positiva. Después, CENAPRED reporta durante los meses de mayo y junio de 1997 la presencia de fuertes erupciones y en la gráfica alrededor de estas fechas se tiene un máximo cuando se invierte el sentido de la tendencia que presentan las soluciones en la serie. Al final de estos eventos, según los reportes de CENAPRED la actividad que presenta el volcán, es en términos generales baja, y en la serie de tiempo la tendencia se aproxima al valor promedio. Esta correlación entre la actividad desarrollada por el volcán manifestada por el desarrollo de domos y el desplazamiento de la estación POSW registrado en la serie, podría llevar a la conclusión de que se registró un evento de deformación superficial debido al volcán Popocatepetl en la serie de tiempo. Sin embargo, para el caso del segundo periodo (del 2000 al 2003, recuadro derecho en la Figura 7.1) no es posible establecer el mismo patrón entre la evolución de los domos o de cualquier otra actividad magmática y el cambio de la tendencia de la serie de tiempo como el mencionado para el primer periodo. Dado que tanto la magnitud del desplazamiento como su duración son similares en los dos periodos se podría considerar que tienen un origen común, pero solo es posible relacionar uno de los dos eventos de deformación registrados en las series de tiempo GPS y la actividad magmática (Figura 7.1).

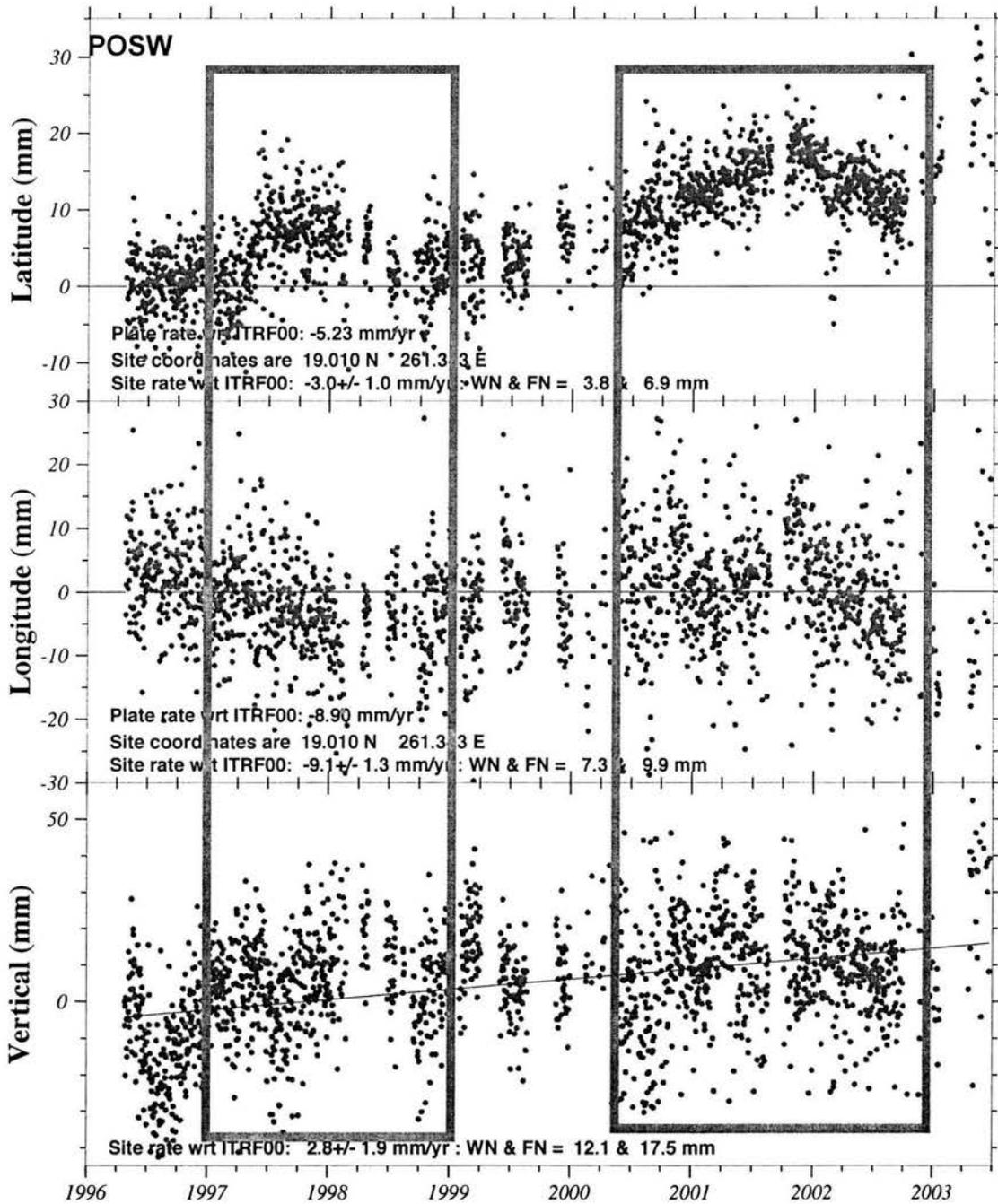


Figura 7.1 Serie de tiempo de la estación POSW, considerando fija la placa de Norte América. Se muestran también la velocidad del sitio calculado apartir del modelo ITRF 2000 (*Site rate*) y la velocidad de la placa de Norte América calculada en las coordenadas de la estación (*Plate rate*). WN es la abreviación de *White Noise* y FN es de *Flake Noise* que son una medición del ajuste y de la dispersión, respectivamente [Mao *et al.*, 1999]. Se delimitan con los recuadros los posibles eventos de deformación (ver texto).

Un evento importante que puede servir como parámetro para dar una interpretación, ya que podría estar registrado en las series de tiempo es la actividad eruptiva del volcán Popocatepetl durante la segunda mitad del 2000. Durante este periodo se desarrolló el domo más grande observado en el cráter desde 1994, seguida por el máximo nivel de actividad sísmica y eruptiva registrado hasta hoy. Este evento no se ve reflejado en la serie de tiempo de la estación POSW (Figura 7.1) ya que la tendencia de soluciones en la serie solo describen una pendiente positiva y constante, que inicia antes del 2000 y continúa hasta las primeras semanas del 2002.

Dado que hay una incertidumbre entre la relación de las variaciones en la serie de tiempo GPS (Figura 7.1) y la actividad propia del Popocatepetl (eventos reportados por CENAPRED), es factible suponer que este fenómeno pueda ser causado por otra fuente y que no tenga una relación con la deformación originada por algún procesos en el volcán. Para determinar el posible origen del desplazamiento de la estación POSW, en una primera aproximación se analiza el comportamiento que tiene el vector de velocidad en estaciones GPS instaladas en el volcán y de estaciones fuera de su rango de influencia, de tal forma que una discrepancia entre ellas representaría a un fenómeno que a largo plazo desplaza las estaciones del volcán, en el supuesto de que las estaciones de referencia con las que se comparan son tectónicamente estables (Figura 7.2).

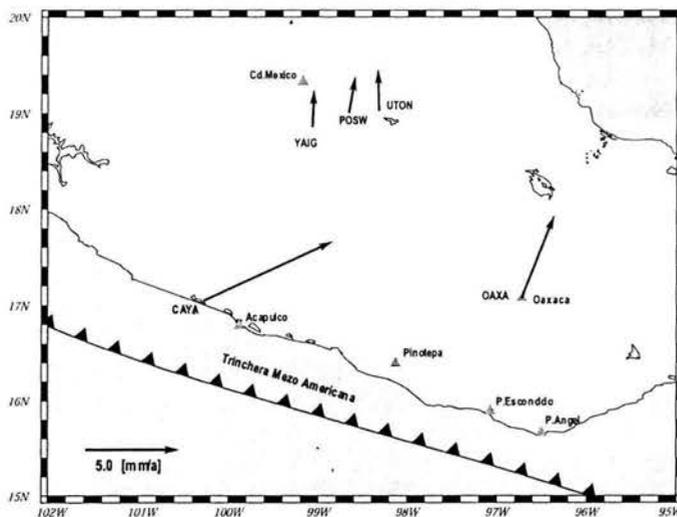
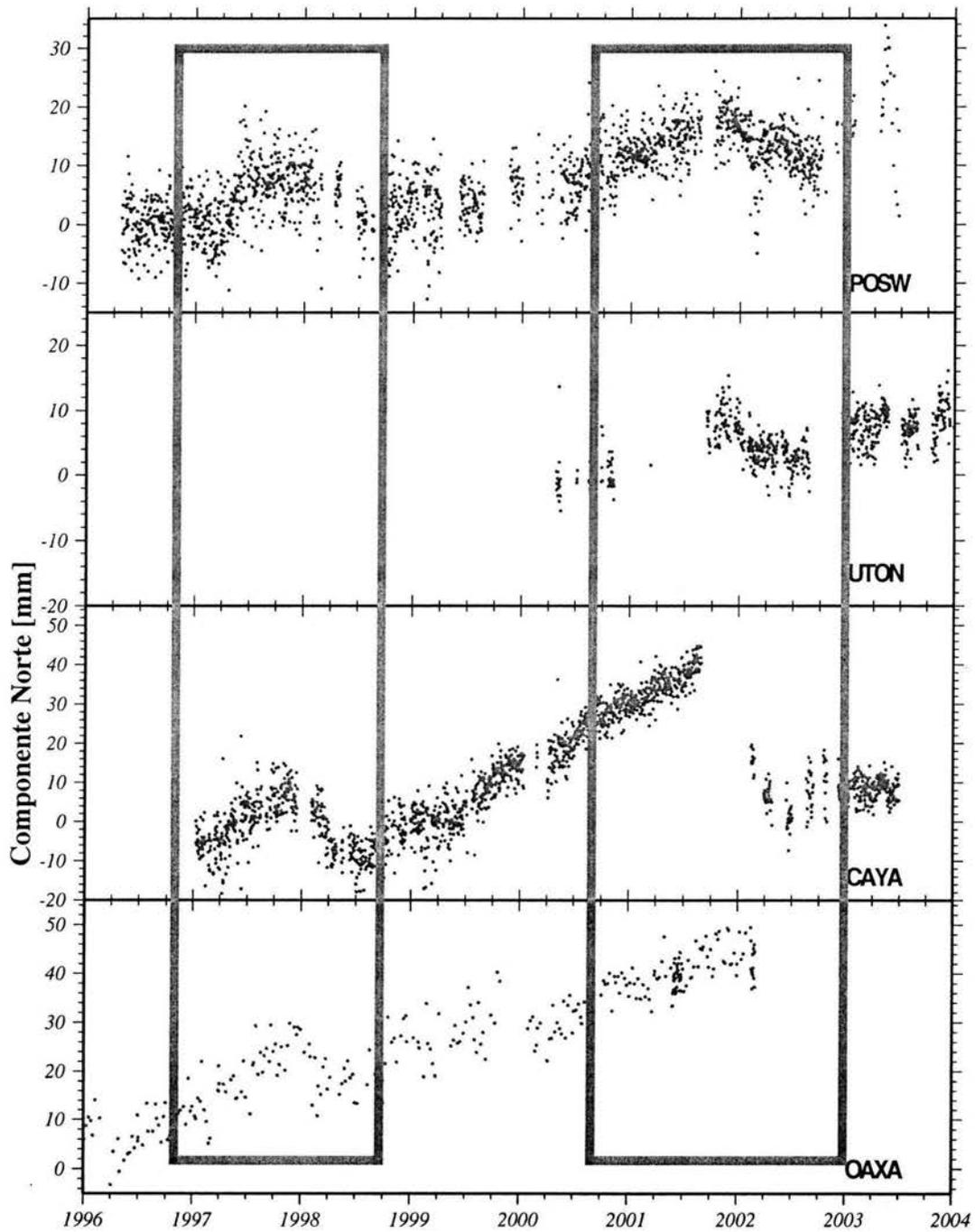


Figura 7.2 Vectores de velocidad de estaciones GPS en el volcán Popocatepetl (POSW), Puebla (UTON), Morelos (YAIG), Guerrero (CAYA) y Oaxaca (OAXA). (las velocidades están referidas a la placa de Norte América).

Un análisis de la Figura 7.2 muestra que los vectores de velocidad para las estaciones POSW, UTON y YAIG son muy similares tanto en magnitud como en sentido, este hecho indica que no muestran un desplazamiento relativo entre ellas y que se localizan dentro del mismo segmento cortical sin que aparentemente se observe una deformación significativa entre las estaciones. Entonces resulta interesante extender esta comparación a otras estaciones GPS más alejadas para saber si se presenta una situación similar. Con esta idea en la Figura 7.3 se comparan las series de tiempo de POSW, UTON, CAYA y OAXA utilizando la componente Norte de cada serie, ya que es donde se define mejor el cambio de pendiente por que la dispersión es menor. Para esta comparación los datos se obtuvieron del repositorio que administra UNAVCO (con excepción de OAXA). Las estaciones utilizadas están en el Popocatepetl (POSW); en Puebla (UTON); además de CAYA que esta Guerrero y es administrada por el Departamento de Sismología del Instituto de Geofísica, y OAXA que esta en la ciudad de Oaxaca y es operada por INEGI; se incluye en la Figura 7.3 los periodos de los eventos en análisis (recuadros). Las series de tiempo con todas las componentes se pueden observar en la Figura 7.4 (A, B y C).



GMT 2004 Apr 25 16:01:25 UW/GEOF CorreaMF

Figura 7.3 Componente norte de las estaciones POSW, UTON, CAYA y OAXA, considerando fija a la placa de Norte América. Se observan dos periodos de deformación que coincide en todas las estaciones (recuadros). Los datos se obtuvieron de UNAVCO con excepción de OAXA. POSW y UTON son administrados por CARDI; CAYA por el depto de Sismología del Instituto de Geofísica; y OAXA por INEGI.

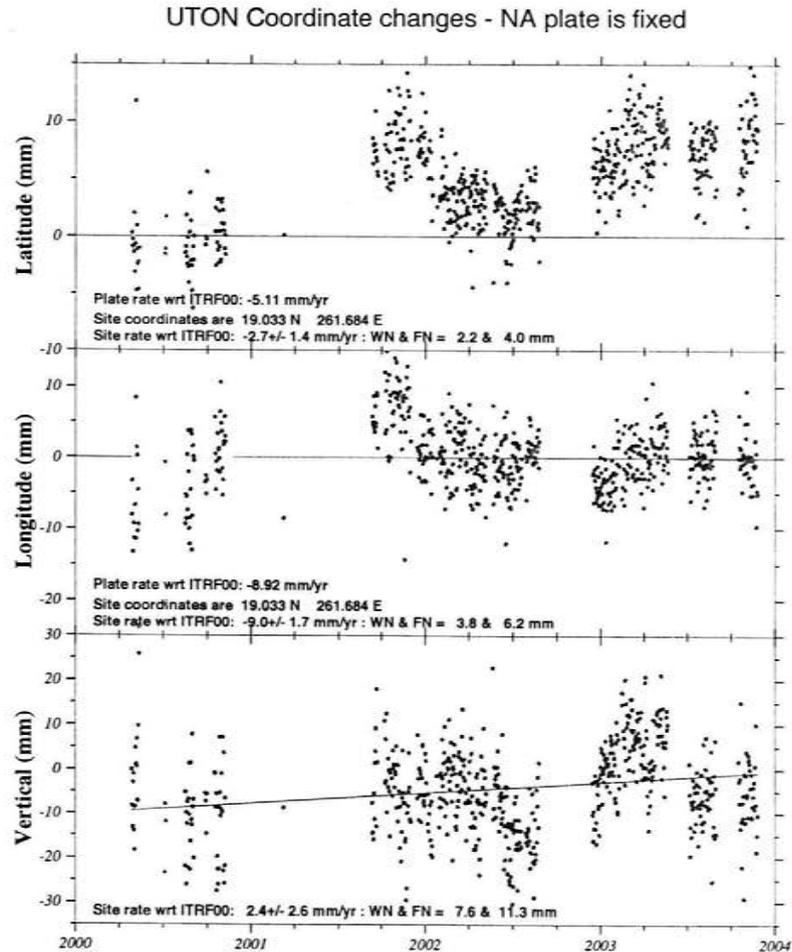
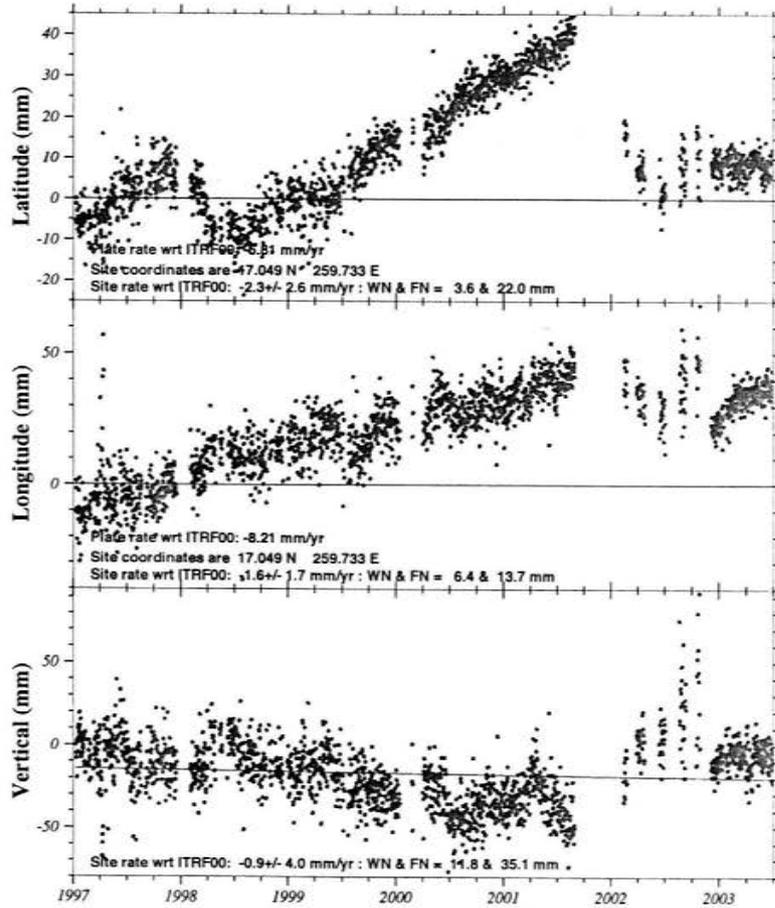
A

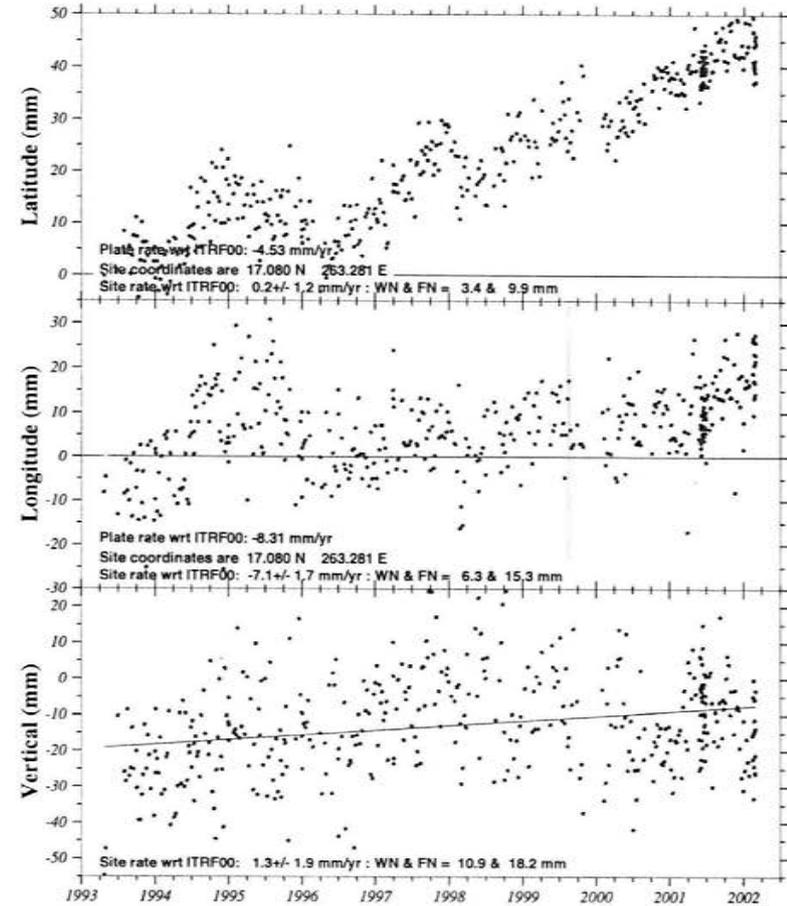
Figura 7.4 Series de tiempo de estaciones GPS: (A) UTON, Tonantzintla, Puebla, (B) OAXA, Cd. de Oaxaca, Oaxaca y (C) CAYA, Cayaco, Guerrero. Las series están procesadas con *GIPSY* (versión 2.6), considerando fija a la placa de Norte América y sin el *common mode* [Marquez-Azua and DeMets, 2003]. Se muestran también la velocidad del sitio calculado a partir del modelo ITRF 2000 (*Site rate*) y la velocidad de la placa de Norte América calculada en las coordenadas de la estación (*Plate rate*). WN es la abreviación de *White Noise* y FN es de *Flake Noise* que son una medición del ajuste y de la dispersión, respectivamente [Mao *et al.*, 1999].

B

CAYA Coordinate changes - NA plate is fixed

**C**

OAXA Coordinate changes - NA plate is fixed



Se puede observar en la comparación entre las estaciones GPS de la Figura 7.3 que hay una buena correlación tanto en la forma de las series caracterizada por los cambios de la tendencia como en el intervalo y duración en que se presentan estos cambios. Esto es una evidencia clara para situar el origen del desplazamiento registrado en la serie de tiempo de POSW a un contexto de carácter regional, siendo éste el resultado de un fenómeno que afecta a la porción suroeste de México debido a que es posible observarlo en estaciones GPS en esta área del país.

Retomando los eventos que tuvieron lugar durante la máxima actividad que presentó el Popocatepetl en la segunda mitad del 2000, existe la posibilidad de que esta actividad este registrada como un cambio en la línea de base entre las estaciones GPS, con la premisa de que la amplitud del evento tectónico es similar en todas las estaciones instaladas en el volcán, por lo que como una segunda aproximación para analizar esta deformación se aplicó el método GPS diferencial como se ha propuesto en capítulos anteriores (cuatro y cinco).

El proceso diferencial se realizó fijando a POSW como estación de referencia y alternado la estación *rover* a POPN, PP03, PP04 y PP02; se utilizó el conjunto de programas desarrollado durante esta tesis que utilizan el *software GrafNet* de *Waypoint* como motor principal para el análisis diferencial (mencionados en el capítulo seis y que se detallan en el apéndice). El intervalo de los datos usados para cada una de las soluciones es de 24 horas. Dada las características de los receptores, para calcular la línea de base entre POSW y POPN se utilizaron dos frecuencias, y una sola frecuencia entre la estación POSW y las estaciones PP03, PP04 y PP02. Los resultados de procesar con el método diferencial se pueden observar en las Figuras 7.5 y 7.6, en estas se muestran la variación en el tiempo de la línea de base y de cada una de las componentes que la conforman (Norte, Este y Vertical).

Del comportamiento de la línea de base entre las estaciones se desprende, que al igual que en la serie de tiempo procesada con órbitas precisas para la estación POSW (Figura 7.1), si existiera un desplazamiento relativo entre las estaciones, las series de tiempo que muestran la variación de la línea de base entre las estaciones (Figura 7.5 y 7.6) deberían mostrar cambios en su distancia total, lo que no se observa. Para el caso de las estaciones POSW y PP02 (Figura 7.5), en general, también no se observa un cambio considerable de la línea de base. La dispersión de los datos esta dentro de un límite razonable (± 10 mm) dada la distancia que separa las estaciones (11.74 km). Esto nos indica que la línea de base entre estas estaciones se ha mantenido estable desde mediados del 2001 hasta la primera mitad del 2003. En general, esta misma tendencia se puede observar entre POSW y las otras estaciones (POPN, PP03 y PP04) mostrado en las Figuras 7.5 y 7.6, en estos casos la longitud de las líneas de base es aproximadamente la misma (5 km) por lo que se podría esperar un comportamiento y una dispersión similar de las soluciones (± 5 mm). Aunque estrictamente hablando -en un sentido estadístico- en las gráficas en las Figuras 7.5 y 7.6 no se observa una variación considerable de la pendiente, se puede delinear en la serie de tiempo entre las estaciones POSW con POPN y PP03 un "ligero" cambio durante la primera mitad del 2000 en donde la pendiente se vuelve negativa y después cambia a positiva manteniéndose así hasta finales del mismo año, presentándose un desfase de al menos 10 mm. Hay que remarcar el hecho de que este comportamiento coincide con la mayor actividad que se ha presentado en el volcán Popocatepetl, pero no se puede llegar a una conclusión definitiva, por que la amplitud del fenómeno registrado en las series esta cerca del límite de detección que tiene el método diferencial, como resultado de esto, una deformación de la estructura menor a 10 milímetros no puede ser delineada claramente.

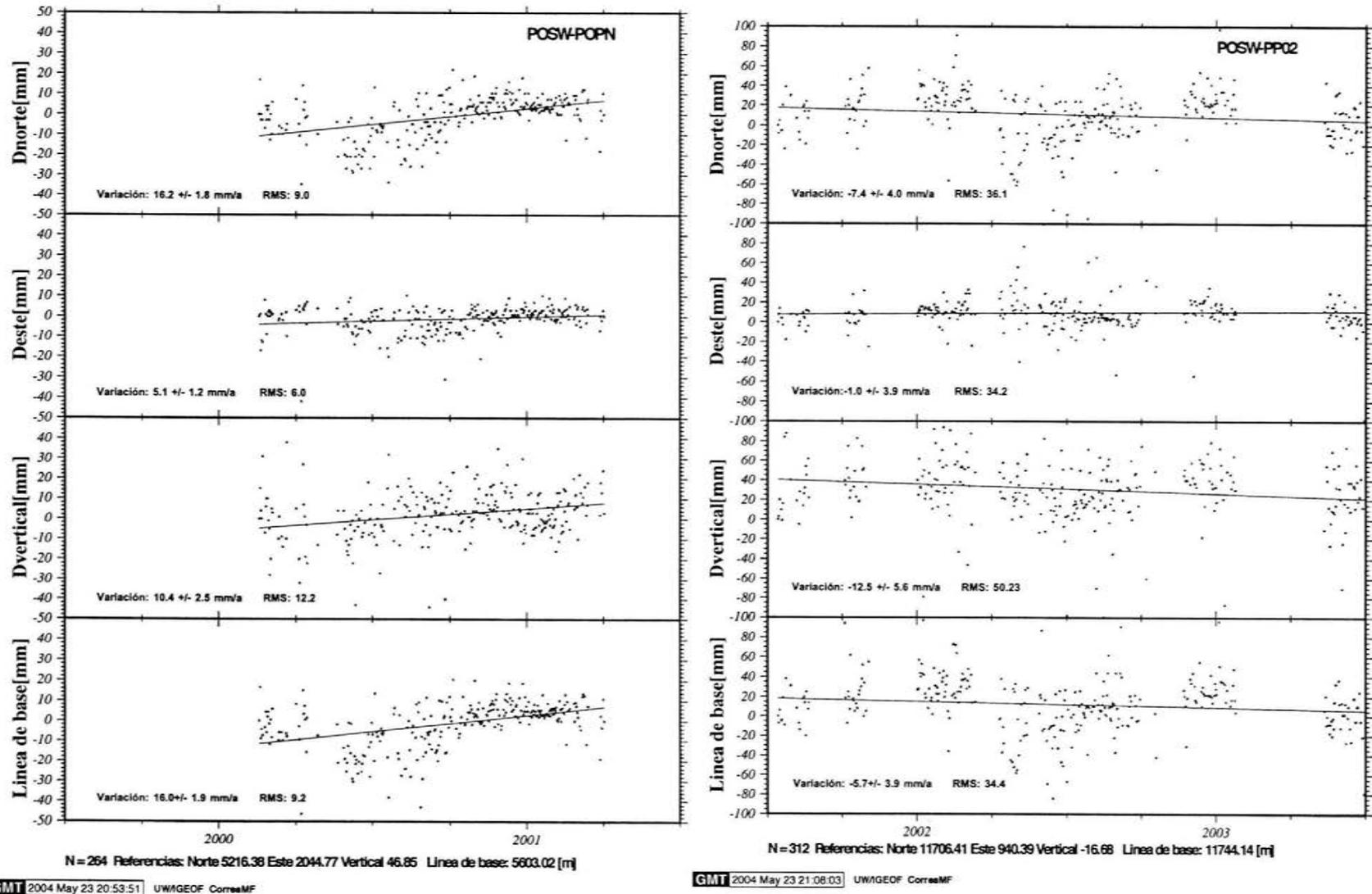
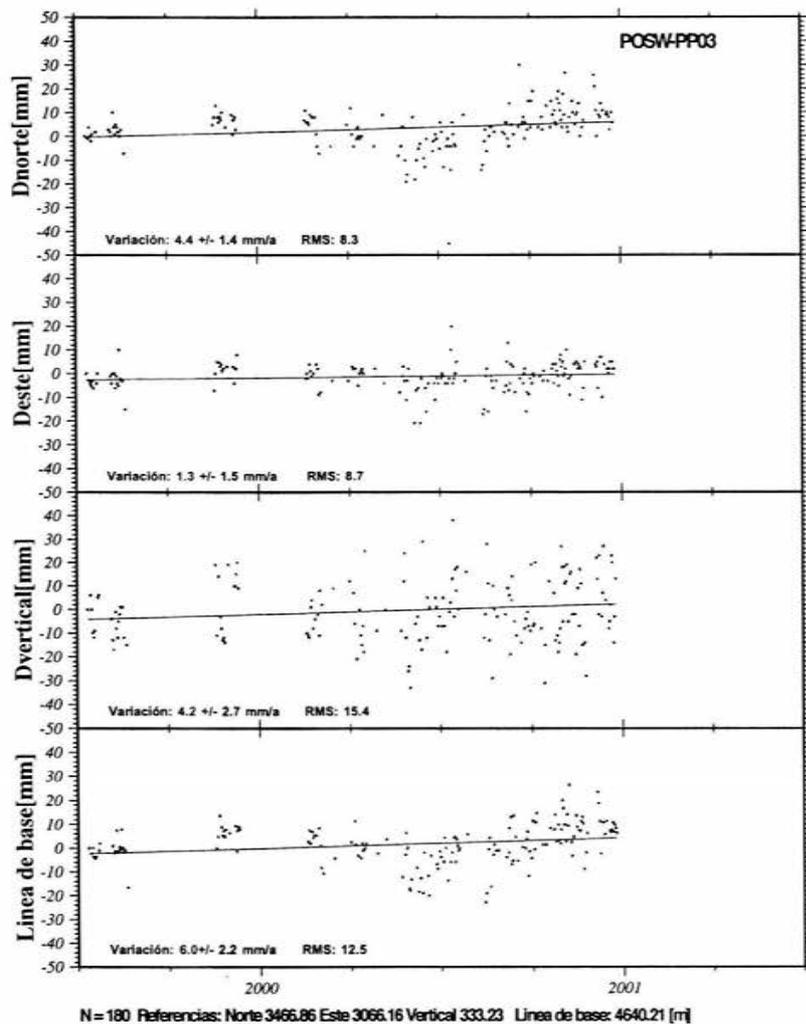
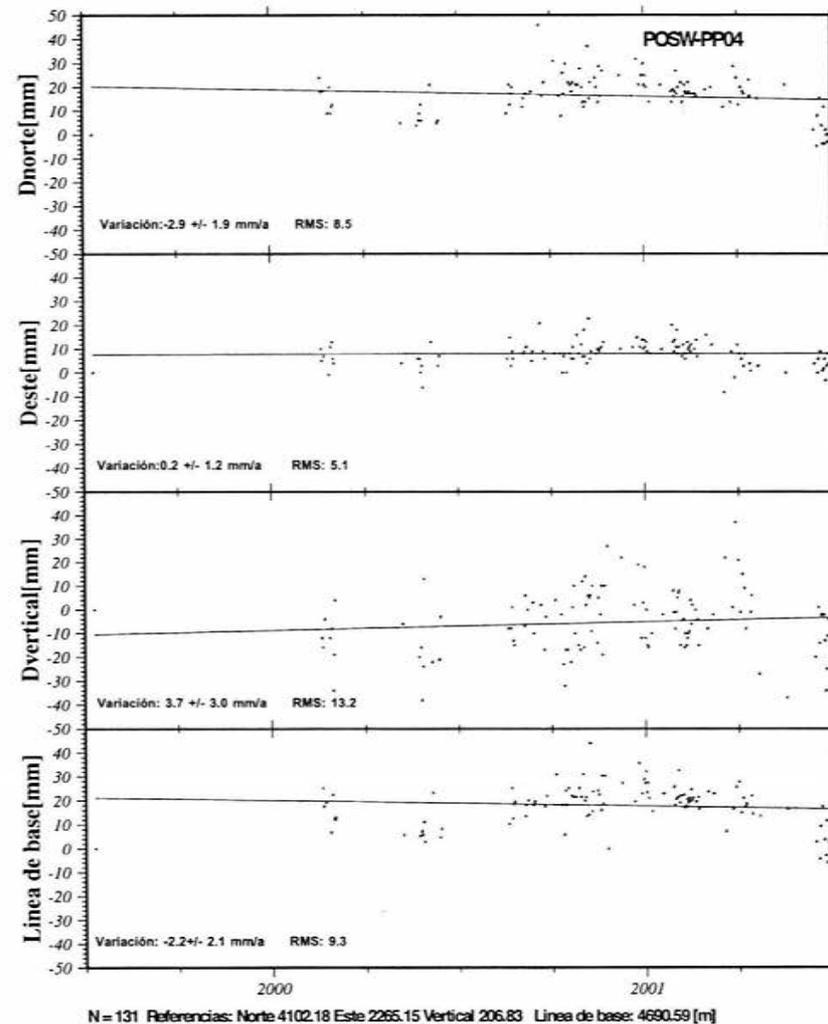


Figura 7.5 Variación de la líneas de base entre las estaciones POSW-POPn y POSW-PP02, procesadas con el método diferencial utilizando el programa *GrafNet*.



GMT 2004 May 24 08:32:07 UWGEOF CorreaMF



GMT 2004 May 24 08:28:21 UWGEOF CorreaMF

Figura 7.6 Variación de la líneas de base entre las estaciones POSW-PP03 y POSW-PP04, procesadas con el método diferencial utilizando el programa *GrafNet*.

Discusión

En la serie de tiempo de la estación POSW (Figura 7.1) es posible delinear dos periodos de deformación que se observan durante febrero de 1997 a junio de 1999, y de octubre de 2000 a octubre de 2002; estos eventos se expresan mejor en la componente Norte de la serie. Para llegar a una conclusión hay que tomar en cuenta que durante el primer periodo se puede correlacionar la actividad eruptiva que ha tenido el volcán con el desplazamiento registrado en la serie, pero también que los dos periodos están registrados en estaciones GPS fuera del rango de influencia del volcán (Figura 7.3). Esto permite afirmar que los fenómenos que desplazan a la estación POSW no tienen su origen en procesos que se relacionen con la actividad magmática del volcán Popocatepetl, y dada su extensión se puede decir que son de carácter regional, ya que se observan tanto en la porción centro como en el sur de México. El hecho de que coincida temporalmente el primer periodo de deformación registrado en la serie con el emplazamiento y destrucción de domos en el cráter, permite suponer que sea factible que la deformación regional desencadene en algunos casos eventos eruptivos en el volcán Popocatepetl, aunque esto es algo que deberá de estudiarse con mayor detalle a futuro.

Las series de tiempo no muestran eventos significativos de deformación del volcán, lo que se puede deber a que: 1) la actividad eruptiva que ha mostrado el Popocatepetl desde 1994 no ha involucrado el volumen de magma necesario para deformar la estructura del volcán, material emplazado en una cámara magmática somera (en el caso de que se comporte como un sistema cerrado) o 2) el sistema se comporta como un sistema abierto en el cual, aunque la cantidad de magma y volátiles transportados a través de él o los diques entre una cámara profunda y la superficie sea significativo, no se produce una deformación detectable. En este sentido, el método diferencial ofrece una buena alternativa para discriminar eventos regionales, ya que al analizar las variaciones en la línea de base entre estaciones se eliminan desplazamientos comunes. En el caso particular de las estaciones en el volcán Popocatepetl, al aplicar el método GPS Diferencial, la magnitud de la actividad eruptiva que tendría que presentar el volcán debe de ser mayor a la observada durante la segunda mitad del 2000 para que quedara registrada en las series de tiempo

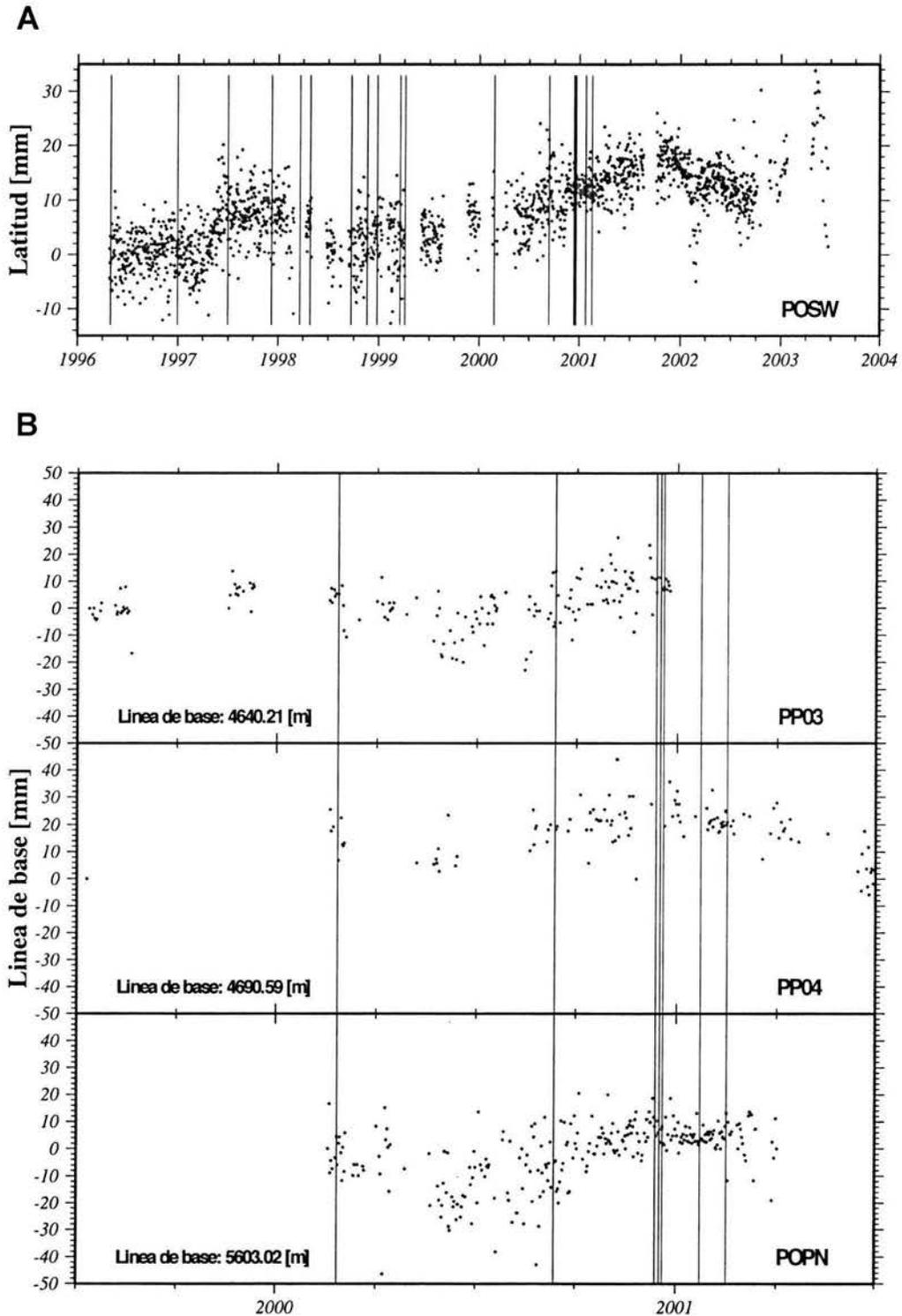
Para conocer el origen de la deformación registrada en las estaciones GPS, hay que tomar en cuenta que la convergencia de dos placas tectónicas puede generar una interfase de subducción cuando una de ellas se desplaza por debajo de la otra. Puede ocurrir que en una parte de esta interfase las placas se encuentran acopladas, lo que da lugar a una acumulación de energía en el plano de falla. Esta energía puede ser acomodada como una deformación en las placas o puede ser liberada con un deslizamiento entre ellas. La velocidad con que la falla cede determina la forma en que el desplazamiento es registrado en superficie; se puede

presentar de forma estable y continua, o rápida, generándose para este último caso un sismo. Sin embargo, también existe la posibilidad de que se presenten eventos transitorios (*transient slip*); estos fenómenos pueden durar meses y representan la parte intermedia del espectro de la velocidad con el que una falla en la interfase de subducción libera la energía acumulada [DeMets, 2002; *comunicación personal*]. Las estaciones GPS han sido la herramienta ideal para distinguir y documentar este tipo de eventos, debido a las características propias que lo distinguen como son la duración y la amplitud del desplazamiento. Eventos de este tipo han sido observados en las zonas de subducción de Cascadia, Canadá y en la de Japón [Miller *et al.*, 20001; Ozawa *et al.* 2001].

Los episodios caracterizados por los cambios de la pendiente en las series de tiempo de POSW, POPN, UTON y CAYA se relacionan con la respuesta elástica que tiene la placa de Norte América a lo largo de la costa pacífica del suroeste de México. Este mecanismo da lugar a que la placa experimente un acortamiento; como resultado las estaciones GPS se mueven hacia el interior de la placa. Esto se registra en la serie de tiempo como una tendencia positiva y estable -ya que se considera fija a la placa de Norte América- (Figura 7.3). La deformación acumulada llega a un límite en el cual la energía es liberada de forma asísmica y lenta durante un periodo de meses; este comportamiento se observa en la serie de tiempo cuando la pendiente cambia de positiva a negativa. El evento asísmico que se presenta durante febrero de 1997 a junio de 1999 ha sido documentado mediante el registro de varias estaciones permanentes GPS, y su modelado permitió estimar que la energía liberada durante este fenómeno puede ser igual o mayor a la que generaría un sismo de magnitud 6.5 [Kostoglodov *et al.*, 2003; Lowry *et al.*, 2001].

Entonces, el posicionamiento puntual con órbitas precisas ofrece una herramienta indispensable para detectar deformaciones de carácter regional; sin embargo, podemos utilizar la variación de la línea de base entre estaciones para observar ciclos de inflación y deflación de la estructura del volcán. La Figura 8.1 muestra las series de tiempo ya presentadas en capítulos anteriores pero se incluyen las erupciones que ha tenido el volcán Popocatépetl en las que se tiene presente material juvenil, esta característica permite afirmar que el material proviene de una cámara magmática reflejando un transporte de material dentro del sistema. En este sentido, en la Figura 8.1A no se observa una correlación entre la acumulación del magma (etapa previa a una o varias erupciones) y la deformación registrada por los cambios de pendiente; sin embargo, en la Figura 8.1B parece coincidir una deformación del volcán registrada como un cambio en la línea de base entre dos etapas de erupción; este comportamiento está presente en varias estaciones lo que podría reflejar un cambio de volumen del volcán.

Como se mencionó antes la única limitante para afirmar que el método diferencial es efectivo para detectar una deformación del volcán Popocatépetl es que hasta el momento las series no están completas (debido a la escasez de datos), lo que resulta en que el comportamiento de la tendencia que se puede delinear no es suficientemente claro.



GMT 2004 Jun 24 16:32:18 UWGEOF CorreaMF

Figura 8.1 A) Componente de la serie de tiempo de la estación POSW (procesada con Gipsy). B) Variación de la líneas de base entre las estaciones POSW-PP03, POSW-PP04 y POSW-POPN, procesadas con el método diferencial utilizando el programa *GrafNet*. En ambas figuras las líneas verticales indican las erupciones de origen magmático reportadas en Martin-Del Pozzo *et al.* [2002].

Conclusiones

De la comparación entre el método de órbitas precisas y el método diferencial se desprende que el método GPS diferencial tiene la resolución adecuada para ser utilizado en el monitoreo de la deformación superficial de un volcán, ya que tiene una aproximación de ± 10 a ± 30 mm en las estaciones instaladas en el volcán Popocatepetl, lo que abre la posibilidad de crear redes mixtas con receptores de una y de dos frecuencias para tales efectos. En este sentido, aunque se pueden emplear intervalos con un mínimo de 3 horas para generar una solución, se recomienda el uso de periodos de 24 horas para minimizar el error.

Aunque hasta el momento la actividad eruptiva del volcán Popocatepetl desde 1994 ha sido en algunas ocasiones importante para afectar a las poblaciones aledañas o a las ciudades a su alrededor, no ha sido suficiente para generar un episodio claro de deformación de su estructura porque no se ha presentado o ha sido de muy baja magnitud. Considerando que las estaciones POSW y POPN instaladas en el volcán y otras estaciones GPS en México han registrado eventos de deformación regional cuya amplitud es del orden de 20 mm, por lo tanto es de esperar que se detecte una deformación en superficie si ésta es del mismo orden de magnitud como mínimo. En particular, los episodios de deformación observados en las series de tiempo de POSW, POPN y UTON son el efecto de un evento asísmico que afecta la porción suroeste de la placa de Norte América.

El método diferencial y una red mixta GPS con estaciones L1 en combinación con estaciones de doble frecuencia permiten discriminar eventos regionales, por lo que es factible emplearlo para obtener características asociadas a una deformación en superficie tales como la profundidad de la cámara magmática, velocidades de migración del magma tanto vertical como horizontal y la relación entre los ciclos de inflación y deflación de la estructura. En el caso del volcán Popocatepetl el principal problema a solucionar es mantener la comunicación constante entre las estaciones instaladas en el volcán y la computadora donde se respalda la información. Una posible solución sería implementar un sistema de respaldo en la estación de Alzomoni.

Referencias

- Altamimi, Z., P.Sillard, and C. Boucher. 2002. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Frame Reference Frame for Earth science applications. *J. Geophys. Res.* 107, doi:10.1029/2001JB000, 561,2002.
- Arciniega-Ceballos, A, Valdes-Gonzales, C. and Dawson P. 2000. Temporal and spectral characteristics of seismicity observed at Popocatepetl volcano, Central México. *J. Geophys. Res.* 102, (2000). 207-216.
- Bianchi, R.A., Coradini, C., Federico, G. Giberti, G. Sartoris, and R. Scandone. 1984. Modelling of surface ground deformations in the Phlegraean Fields volcanic area, Italy. *Bull. Volcanol.*, 44-2, pp 321-330.
- Bianchi, R.A., Coradini, C., Federico, G. Giberti, P. Lacianno, J.P. Pozzi, G. Sartoris, and R. Scandone. 1987. Modeling of Surface Deformation in Volcanic Areas: The 1970-1972 and 1982-1984 Crises of Campi Flegrei, Italy. *J. of Geop. Res.* 92-13. pp. 14 139-14 150.
- Blewitt, G., and S.M. Lichten. 1992. "Carrier phase ambiguity resolution up to 12000 km: Results from the GIG'91 experiment," in Proc. of the Sixth Int. Symp. on Satellite Positioning, Columbus, Ohio State University, USA.
- Blewitt, G., M. Heflin, W. Bertiger, F. Webb, U. Lindqwister, and R. Malla. 1992. Global Coordinates With Centimeter Accuracy In The International Terrestrial Reference Frame Using The Global Positioning System, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.19, No. 9, 853-856
- Boudal, C., and Robin, C., 1988, Volcán Popocatepetl: Recent Eruptive History, and Potential Volcanic Hazards and Risks in Future Eruptions; in Latter, J.H., ed., 1988, *Volcanic Hazards: Assessment and Monitoring*; Springer-Verlag, p. 110-128.
- Carrasco, G, Mora, S. Delgado, H., Urrutia, J. 1986. Geología y paleomagnetismo del Popocatepetl. Serie de investigación. Instituto de Geofísica UNAM.
- Delgado-Granados, H., 1993. Late Cenozoic tectonics offshore western Mexico and its relation to the structure and volcanic activity in the western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofis. Int.* 32, pp. 543-559.
- Delgado, H., Cárdenas, L., Piedad, N. 2001. Sulfure dioxide emissions from Popocatepetl (México): case study of high-emission rate, passively-degassing erupting volcano. *J.V.G.R.v.108*.pp. 107-120.
- DeMets, C. and Traylen, S. 2000. Motion of the Rivera plate since 10 Ma relative to the Pacific and North American plates and the mantle. *Tectonophysics* 318 (2000), pp. 119-159.
- Dixon, T. 1991. An introduction to the Global Positioning System and some Geological applications. *Review of Geophysics.* pp 249-276.
- Dixon T., Mao A., Burisk M., Heflin M., Langbein J., Stein R. and Webb F. 1997. Continuous monitoring of surface deformation at Long Valley Caldera, California, with GPS. *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 102 No. B6, pp. 12,017-12,034.
- Ferrari, L. 2000a. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, A.C. Número especial: Avances de la geología mexicana en la última década*, tomo LIII,1, pp 84-92.
- Ferrari, Sandro Conticelli, Gloria Vaggelli, Chiara M. Petrone and Piero Manetti. 2000b. Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics

during the early development of the Tans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics* 318 (2000), pp. 161–185.

Fries, C. 1960. Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región Central-Meridional de México. *Bol. Inst. Geol.* 60, UNAM México, pp 256.

González Huesca, A.E. 2000. Estudios de detalle estratigráfico y sedimentológico del lahar de San Nicolás en el flanco noreste del Volcán Popocatepetl. Facultad de Ingeniería. UNAM. Tesis de Licenciatura.

Green E.P., Mumby, P.J., Edwards A.J. and Clark, C.D. 2000. *Remote Sensing Handbook*. UNESCO Publishing.

Gregorius, T. 1996. GIPSY-Oasis II: How it works. Department of Geomatics. Univ of Newcastle.

Heflin, M.B., W.I. Bertiger, G. Blewitt, A.P. Freedman, K.J. Hurst, S.M. Lichten, U.J. Lindqwister, Y. Vigue, F.H. Webb, T.P. Yunck, and J.F. Zumberge., 1992 Global geodesy using GPS without fiducial sites. *Geophysical Research Letters*, Vol. 19, p. 131-134.

Hofmann, W.B., Lichtenegger, H and Collins J. 1992. *GPS: Theory and Practice*. Ed. Springer-Verlag, New York. pp 326.

Jousset, P. and Okada, H. 1999. Post-eruptive volcanic dome evolution as revealed by deformation and microgravity observation at Usu volcano (Hokkaido, Japan). *Jour.of Volc. and Geo. Rea.* 89. pp 255-273.

Kostoglodov, V., S. K. Singh, J. A. Santiago, S. I. Franco, K. M. Larson, A. R. Lowry, and R. Bilham. 2003. A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 30(15), 1807, doi:10.1029/2003GL017219, 2003.

Langbein, J.O., D.P. Hill, T. N. Parker and S.K. Wilkinson. 1993. An episode of re-inflation of

the Long Valley Caldera, eastern California :1989-1991. *J. Geophys. Res.* 98, pp. 15,851-15,870.

Langbein J., Dzurisin D., Marshall G., Stein R., Rundle J. 1995. Shallow and peripheral volcanic sources of inflation revealed by modeling two-color geodimeter and leveling data from Long Valley Caldera, California 1988-1992. *J. Geophys. Res.* 100. pp 12 487-12 495.

Lichten, S. and Border, J.S. 1987. Strategies for High-Precision Global Positioning System Orbit Determination. *Jour. of Geo. Res.* 92-12. pp 12751-12762.

Linde, A., K. Agustsson, I. S. Sacks and R. Stefansson. 1993. Mechanism of the 1991 eruption of Hekla from continuous borehole strain monitoring. *Nature*, 365, pp. 737-740.

Lowry, A, Larson, K., Kostoglodov, V., and Bilham, R. 2001. Transient fault slip in Guerrero, southern Mexico. *Geophys. Res. Lett.*, 28, Num. 19, pp 3753-3756, 2001.

Macias Vázquez, J.L, Carrasco Nuñez, G, Delgado Granados, H., Martin del Pozzo, A.L., Siebe Grabach, C., Hoblitt, R.P., Sheridan, M.F. y Tilling, R.I. 1995. *Mapa de Peligros del Volcán Popocatepetl*. Instituto de Geofísica, UNAM.

Mandel, J. 1964. *The statistical analysis of experimental data*. Dover Publications, Inc., New York.

Mao, A., C.G.A. Harrison, T.H. Dixon. 1999. Noise in GPS coordinate time series, *J. Geophys. Res.* 104, pp.2797-2816.

Marc-André Gutscher, René Maury, Place Nicolas Copernic, Jean-Philippe Eissen. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction?. *Geology*, June 2000, v. 28, no. 6, pp. 535–538

Marquez-Azua, B. and DeMets, C. 2003. Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements, 1993 to June 2001: Implications for neotectonics of Mexico. *J. Geophys. Res.* 108, (B9) p 2450.

Martin-Del Pozzo, A.L., Aceves, F., Espinasa, R., Aguayo, A., Inguaggiato, S., Morales, P. and Cienfuegos, E. 2002. Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl volcano, Mexico. *Chemical Geology* 190 (2002) pp. 207-229.

Martinez Rosique, J.A. and Fuster Escuder, J.M..1995. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Principios Básicos de Funcionamiento. Depto. de Comunicaciones. Esc. Tec. Sup. de Ingenieros de Telecomunicaciones. Univ. Politecnica de Valencia. pp. 355.

Miller, M., Johnson, D. Rubin, C., Dragert, H., Wang K., Qamar, A. and Goldfinger, C. 2001. GPS-determination of along-strike variation in Cascadia margin kinematics: Implications for relative plate motion, subduction zone coupling, and permanent deformation. *Tectonics*, Vol.20, Num. 2, pp 161-176.

Nishi K., Ono H. and Mori H. 1999. Global positioning system measurements of ground deformation caused by magma intrusion and lava discharge: the 1990-1995 eruption at Unzendake volcano, Kyushu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 89 (1-4)(1999). Pp. 22-34.

Ozawa, S., M. Murakami, and T. Tada. 2001. Time-dependent inversion study of the thrust event in the Nankai trough subduction zone, southwestern Japan, *J. Geophys. Res.*, 106, 787-802.

Pareschi M.T., Favalli M., Giannini F., Sulpizio R, Zanchetta G., Santacroce R.. 2000. May 5, 1998, debris flows in circum-Vesuvian areas (southern Italy): Insights for hazard assessment. *Geology*, July 2000, v. 28, no. 7, pp. 639-642

Pasquare', G., Forcella, F., Tibaldi, A., Ferrari, M., 1986. Structural behaviour of a continental volcanic arc: The Mexican Volcanic Belt. In: Wezel, F.C. (Ed.), *The Origin of Arcs*. Elsevier, Amsterdam, pp. 509-527.

Plunkett, P and Uruñuela, G. 1998. Preclassic household patterns preserved under volcanic ash at Tetimpa, Puebla, México. *Latin Am. Antiq.* 94 (4), 287-309.

Siebe C., M. Abrams, J.L. Macias and J. Obenholzner. 1996. Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl central México; Past key to the future?. *Geology*, 24, 399-402.

Simkin, T., Siebert, L. and Blong R. 2001. Volcano Fatalities: Lessons from the Historical Record. *Science* 291(5502), 255.

Simkin, T., and Seibert, L., 1994, *Volcanoes of the World*, Second Edition: Geosciences Press, Tuscon, 349 pp.

Trimble Navigation Ltd. 1993. Manual del Usuario.

Volker Janssen, Craig Roberts , Chris Rizos a, Hasanuddin Z. Abidin.2002. Low-cost GPS-based volcano deformation monitoring at Mt. Papandayan, Indonesia . *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 115 (2002) 139-151

Yamashina, K and Shimizu, H. 1999. Crustal deformation in the mid-May 1991 crisis preceding the extrusion of a dacite lava dome at Unzen volcano, Japan. *Jour. of vol. and Geo. Res.* 89. pp 43-55.

GPS en Volcanes

Kilauea, Mauna Loa y Mauna Kea:

<http://volcanoes.usgs.gov/About/What/Monitor/Deformation/GPS.html>

Cotopaxi:

http://volcano.und.nodak.edu/vwdocs/volc_images/img_cotopaxi.html

Arenal y El Misti:

<http://www.geodesy.miami.edu/volcano.html>

CENAPRED:

<http://www.cenapred.unam.mx/mvolcan.html>

Apéndice

Código fuente

Descripción de los programas

CronMaster

Programa que controla todo el proceso, utiliza el archivo de configuración CronMaster.cfg para extraer los parámetros de ambiente generales como el directorio donde se encuentran los ejecutables, el intervalo a utilizar y el periodo por procesar. Este programa esta siempre activo durante todo el proceso administrandolo con la sentencia "case" y modificando los archivos YearInProcecess.dat y DayInProcess.dat.

GetFiles

Baja los datos realizando un ftp al servidor, el archivo de configuración para este programa es Getfiles.cfg en donde se encuentran los datos del servidor, usuario y password. Este programa tiene una lista de las estaciones de las que se bajara la información.

PosDif

Checa si es posible realizar el proceso diferencial comparando los archivos que se obtuvieron del servidor. Utiliza el archivo PosibDif.cfg para definir cual es la estación master (variable Archivomaster), las estaciones a comparar estan definidas en el cuerpo del programa.

UnCompress

Utiliza al software winzip para descomprime los archivos a utilizar. El archivo de configuración de este programa es UnCompress.cfg. Es posible modificarlas propiedades del Timer (variable Bloques) para ajustarlo a la velocidad de la computadora.

ConvertFiles

Convierte los datos de RINEX a GPB utilizando la utilería "wconvert" de Waypoint, los parametros como la ruta a este programa se encuentran en el archivo ConvertFiles.cfg.

MakeNavFile

Crea los archivos de navegación para las estaciones L1 tomando como base el archivo de la variable MASTERMODEL en el archivo MakeNavFile.cfg.

FindVectors

Inicia *GrafNet* y calcula las líneas de base de cada una de las estaciones por analizar definidas por la variable "estacion" y la estación de referencia (master). El programa simula la intervención del usuario y crea los archivos de configuración necesarios. Al terminar el proceso extrae la información de los vectores calculados y los añade al archivo de salida (*.GD).

SendSolution

Obtiene las series de cada estación y las envia a un servidor. Los parámetros de configuración del servidor estan en el archivo SendSolutions.cfg.

BorrarFiles

Prepara los directorios para seguir con el proceso al eliminar los archivos de un día en particular.

```

Form1 - 1

Public AnioProcess, DiaProcess
Public m
Public BuscarVar, ValorVar
Public MRutaBin, bloques
Public FileCfg$

Private Sub Form_Load()
'Lee parametros de configuracion

FileCfg$ = CurDir & "\* & "CronMaster.cfg"
BuscarVar = "RUTABIN"
Buscar_Variable
MRutaBin = ValorVar

BuscarVar = "INTERVAL"
Buscar_Variable
bloques = ValorVar

Timer1.Interval = bloques
Timer1.Enabled = True

End Sub

Private Sub Label4_Click()
End
End Sub

Private Sub Label10_Click()
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "Inicio-0"
Close #fn
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()

m = m + 1
Label8.Caption = m * 5 & "s"

fp = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Input As #fp
Input #fp, State
Close #fp

Select Case State

Case "Inicio-0"
AnioEnProceso$ = CurDir & "\* & "YearInProcess.dat"
Open AnioEnProceso$ For Input As #1
Input #1, AnioProcess
Close #1

DiaEnProceso$ = CurDir & "\* & "DayInProcess.dat"
Open DiaEnProceso$ For Input As #1
Input #1, DiaProcess
Close #1

DiaFormato = DiaProcess
If DiaProcess < 100 Then DiaFormato = "0" & DiaProcess
If DiaProcess < 10 Then DiaFormato = "00" & DiaProcess

Label1.Caption = "Procesando -> " & AnioProcess & ":" & DiaFormato
Label7.Caption = Time


```

```

Form1 - 2

fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "GetFiles-0"
Close #fn

Case "GetFiles-0"
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "In_GetFiles"
Close #fn
Label2.Caption = "MODULO: GetFiles"
miPrograma = MRutaBin & "GetFiles.exe"
Retval = Shell(miPrograma, 1)

Rem Case "GetFiles-1"
Rem fn = FreeFile
Rem ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Rem Open ProcessState$ For Output As #fn
Rem Print #fn, "In_UnCompress"
Rem Close #fn
Rem Label2.Caption = "MODULO: UnCompress"
Rem rem miPrograma = MRutaBin & "UnCompress.exe"
Rem Retval = Shell(miPrograma, 1)

Case "UnCompress-1"
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "In_PosibDif_1"
Close #fn

Label2.Caption = "MODULO: PosibDif"
miPrograma = MRutaBin & "PosibDif.exe"
Retval = Shell(miPrograma, 1)

Case "PosibDif-1"
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "In_PosibDif_II"
Close #fn

PosibDif$ = CurDir & "\* & "PosibDif.dat"
Open PosibDif$ For Input As #1
Input #1, Sepuede
Close #1
If Sepuede = 0 Then GoTo 100

fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "MakeNavFile-0"
Close #fn

Case "MakeNavFile-0"

fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "In_MakeNavFile"
Close #fn
Label2.Caption = "MODULO: MakeNavFile"
miPrograma = MRutaBin & "MakeNavFile.exe"
Retval = Shell(miPrograma, 1)


```

Form1 - 3

```
Case "MakeNavFile-1"

fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\" & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "In_ConvertFiles"
Close #fn

Label2.Caption = "MODULO: ConvertFiles"
miPrograma = MRutaBin & "ConvertFiles.exe"
RetVal = Shell(miPrograma, 1)

Case "ConvertFiles-1"
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\" & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "In_FindVectors"
Close #fn

Label2.Caption = "MODULO: FindVectors"
miPrograma = MRutaBin & "FindVectors.exe"
RetVal = Shell(miPrograma, 1)

Case "FindVectors-1"
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\" & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "In_SendSolution"
Close #fn

Label2.Caption = "MODULO: SendSolution"
miPrograma = MRutaBin & "SendSolution.exe"
RetVal = Shell(miPrograma, 1)

Case "SendSolution-1"
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\" & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "In_BorrarFiles"
Close #fn
Label2.Caption = "MODULO: BorrarFiles"
miPrograma = MRutaBin & "BorrarFiles.exe"
RetVal = Shell(miPrograma, 1)

Case "BorrarFiles-1"

100 Label2.Caption = "Siguiete DIA"

NextDay = DiaProcess + 1
If NextDay = 367 Then
Timer1.Enabled = False
End
End If

fn = FreeFile
DiaEnProceso$ = CurDir & "\" & "DayInProcess.dat"
Open DiaEnProceso$ For Output As #fn
Print #fn, NextDay
Close #fn

m = 0

ProcessState$ = CurDir & "\" & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "Inicio-0"
Close #fn

End Select

End Sub
Sub Buscar_Variable()
```

Form1 - 4

```
Open FileCfg$ For Input As #1

Do Until EOF(1) Or NombreVar = BuscarVar
Input #1, AnalizarVar
largo = Len(AnalizarVar)
ind = InStr(1, AnalizarVar, "=")

If ind <> 0 Then
ValorVar = Mid(AnalizarVar, ind + 1, largo - ind)
NombreVar = Left(AnalizarVar, ind - 1)
End If
Loop
Close #1

End Sub
```

Form1 - 1

```
Public Archivo, i, dia, anio, c
Public RutaServer$, RutaLocal$
Public estacion
Public BuscarVar, ValorVar
Public AnioProcess, DiaProcess
Public FileCfg$, PosibDif$
Public MServer, MUser, MPassw, RutaSer, RutaLoc, DiaFormato, Bloques
Public info, CRLF
Private Sub Form_Load()
    estacion = Array("posw", "posw", "popn", "popn", "pp01", "pp02", "pp03", "pp04", "pp05")
    PosibDif$ = CurDir & "\* & "PosibDif.dat"
    'Lee parametros de configuracion
    AnioEnProceso$ = CurDir & "\* & "YearInProcess.dat"
    Open AnioEnProceso$ For Input As #1
    Input #1, AnioProcess
    Close #1

    DiaEnProceso$ = CurDir & "\* & "DayInProcess.dat"
    Open DiaEnProceso$ For Input As #1
    Input #1, DiaProcess
    Close #1

    FileCfg$ = CurDir & "\* & "GetFiles.cfg"

    BuscarVar = "SERVIDOR"
    Buscar_Variable
    MServer = ValorVar

    BuscarVar = "USER"
    Buscar_Variable
    MUser = ValorVar

    BuscarVar = "PASSW"
    Buscar_Variable
    MPassw = ValorVar

    BuscarVar = "RUTASERVER"
    Buscar_Variable
    RutaSer = ValorVar

    BuscarVar = "RUTALOCAL"
    Buscar_Variable
    RutaLoc = ValorVar

    BuscarVar = "INTERVAL"
    Buscar_Variable
    Bloques = ValorVar

    DiaFormato = DiaProcess
    If DiaProcess < 100 Then DiaFormato = "0" & DiaProcess
    If DiaProcess < 10 Then DiaFormato = "00" & DiaProcess

    CRLF = Chr$(13) & Chr$(10)
    info = " Procesando --> " & AnioProcess & ":" & DiaFormato
    info = info & CRLF & "Servidor --> " & MServer
    info = info & CRLF & "Usuario --> " & MUser
    info = info & CRLF & "Dir Server --> " & RutaSer
    info = info & CRLF & "Dir Local --> " & RutaLoc
    info = info & CRLF & "Intervalo --> " & (Bloques * 5) & "s"
    Text1.Text = info

    Timer1.Enabled = True
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
    c = c + 1
    Rem cada 10 segundos
```

Form1 - 2

```
If (c Mod Bloques = 0) Then
    RutaServer$ = RutaSer & estacion(i) & "_" & AnioProcess & "_rnx" & "/"
    RutaLocal$ = RutaLoc
    Archivo = estacion(i) & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "c"
    If i = 1 Or i = 3 Then
        Archivo = estacion(i) & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "n"
    End If

    Text1.Text = info & CRLF & " Bajando --> " & Archivo
    Get_File (Archivo)
    i = i + 1
End If

If i > 8 Then
    Kill (PosibDif$)
    Timer1.Enabled = False
    fn = FreeFile
    ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
    Open ProcessState$ For Output As #fn
    Print #fn, "UnCompress-1"
    Close #fn
End If

End Sub
Public Function Get_File(Archivo As String)
On Error Resume Next

GetFile1 = RutaServer$ & Archivo
GetFile2 = RutaLocal$ & Archivo
With Inet1
    .URL = "ftp://" & MServer
    .UserName = MUser
    .Password = MPassw
    .Execute , "GET " & GetFile1 & " " & GetFile2
End With

End Function

Sub Buscar_Variable()
    Open FileCfg For Input As #1

    Do Until EOF(1) Or NombreVar = BuscarVar
        Input #1, AnalizarVar
        largo = Len(AnalizarVar)
        ind = InStr(1, AnalizarVar, "=")

        If ind <= 0 Then
            ValorVar = Mid(AnalizarVar, ind + 1, largo - ind)
            NombreVar = Left(AnalizarVar, ind - 1)
        End If
        Loop
    Close #1
End Sub
```

GetFiles

```

Form1 - 1

Public AnioProcess, DiaProcess
Public estacion
Public FileCfg$
Public MPath, path
Public BuscarVar, ValorVar
Public ExisteFile

Private Sub Form_Load()
    estacion = Array("posw", "popn", "pp01", "pp02", "pp03", "pp04", "pp05")
    PosibDif$ = CurDir & "\ " & "PosibDif.dat"

    AnioEnProceso$ = CurDir & "\ " & "YearInProcess.dat"
    Open AnioEnProceso$ For Input As #1
    Input #1, AnioProcess
    Close

    DiaEnProceso$ = CurDir & "\ " & "DayInProcess.dat"
    Open DiaEnProceso$ For Input As #1
    Input #1, DiaProcess
    Close

    FileCfg$ = CurDir & "\ " & "PosibDif.cfg"

    BuscarVar = "RUTADATA"
    Buscar_Variable
    MPath = ValorVar

    DiaFormato = DiaProcess
    If DiaProcess < 100 Then DiaFormato = "0" & DiaProcess
    If DiaProcess < 10 Then DiaFormato = "00" & DiaProcess

    ArchivoMaster = MPath & estacion(0) & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "o"
    ChecarFile (ArchivoMaster)
    PosibleMaster = ExisteFile

    If PosibleMaster = 1 Then
        For i = 1 To 6
            ArchivoRover = MPath & estacion(i) & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "o"
            ChecarFile (ArchivoRover)
            PosibleRover = PosibleRover + ExisteFile
        Next
    End If

    ProcesoPosible = PosibleMaster + PosibleRover

    If ProcesoPosible > 1 Then
        Open PosibDif$ For Output As #1
        Print #1, 1
        Close
    Else
        Open PosibDif$ For Output As #1
        Print #1, 0
        Close
    End If

End Sub

Public Function ChecarFile(path As String) As Boolean

On Error Resume Next
Dim TempFile As String, fn As Integer

fn = FreeFile
Rem si existe se puede abrir
Open path For Input As #fn

If Err = 0 Then
Close #fn
Rem Kill TempFile
ExisteFile = 1

```

```

Form1 - 2

Else
    ExisteFile = 0
End If

End Function

Sub Buscar_Variable()
Open FileCfg$ For Input As #1

Do Until EOF(1) Or NombreVar = BuscarVar
Input #1, AnalizarVar
largo = Len(AnalizarVar)
ind = InStr(1, AnalizarVar, "=")

If ind <> 0 Then
ValorVar = Mid(AnalizarVar, ind + 1, largo - ind)
NombreVar = Left(AnalizarVar, ind - 1)
End If
Loop
Close #1

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\ " & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "PosibDif-1"
Close #fn

End
End Sub

```

```

Form1 - 1

Public RetVal
Public estacion, Archivo
Public ExisteFile
Public AnioEnProceso, DiaProcess, DiaFormato
Public Bloques, MPath, MWinZip
Public BuscarVar, ValorVar, FileCfg$
Public c, i

Private Sub Form_Load()
Rem Modificar las propiedades del winzip opciones->configuration->folders para que _
sea el mismo Start up, Extract, work en este caso C:\GPSD_process\data\
estacion = Array("posw", "posw", "popn", "popn", "pp01", "pp02", "pp03", "pp04", "pp05")
'Lee parametros de configuracion
AnioEnProceso$ = CurDir & "\ " & "YearInProcess.dat"

Open AnioEnProceso$ For Input As #1
Input #1, AnioProcess
Close

DiaEnProceso$ = CurDir & "\ " & "DayInProcess.dat"
Open DiaEnProceso$ For Input As #1
Input #1, DiaProcess
Close

FileCfg$ = CurDir & "\ " & "UnCompress.cfg"

BuscarVar = "RUTAFILES"
Buscar_Variable
MPath = ValorVar

BuscarVar = "WINZIPPATH"
Buscar_Variable
MWinZip = ValorVar

BuscarVar = "INTERVAL"
Buscar_Variable
Bloques = ValorVar

DiaFormato = DiaProcess
If DiaProcess < 100 Then DiaFormato = "0" & DiaProcess
If DiaProcess < 10 Then DiaFormato = "00" & DiaProcess

Text1.Text = "Intervalo --> " & (Bloques * 5) & " s"

Timer1.Enabled = True

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
c = c + 1
Rem cada 10 segundos
If (c Mod Bloques = 0) Then
Archivo = estacion(i) & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "0" & ".2"
If i = 1 Or i = 3 Then
Archivo = estacion(i) & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "n" & ".2"
End If
ParaChecar = MPath & Archivo
ChecarFile (ParaChecar)

If ExisteFile = 1 Then
Text1.Text = "Descomprimiendo --> " & Archivo
FileToUnzip
WinZipEnd
Kill ParaChecar
End If
i = i + 1
End If

If i > 8 Then

```

```

Form1 - 2

Timer1.Enabled = False
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\ " & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "UnCompress-1"
Close #fn
End
End If

End Sub

Sub FileToUnzip()
RunWinZip = MWinZip & " " & MPath & Archivo
RetVal = Shell(RunWinZip, 1)

End Sub

Sub WinZipEnd()
Rem AppActivate RetVal
SendKeys "[e]", True
SendKeys "{ENTER}", True
SendKeys "[F4]", True

End Sub

Public Function ChecarFile(path As String) As Boolean

On Error Resume Next
Dim TempFile As String, fn As Integer

fn = FreeFile
Rem si existe se puede abrir
Open path For Input As #fn

If Err = 0 Then
Close #fn
Rem Kill TempFile
ExisteFile = 1
Else
ExisteFile = 0
End If

End Function

Sub Buscar_Variable()
Open FileCfg$ For Input As #1

Do Until EOF(1) Or NombreVar = BuscarVar
Input #1, AnalizarVar
largo = Len(AnalizarVar)
ind = InStr(1, AnalizarVar, "*")

If ind <> 0 Then
ValorVar = Mid(AnalizarVar, ind + 1, largo - ind)
NombreVar = Left(AnalizarVar, ind - 1)
End If
Loop
Close #1

End Sub

```

UnCompress

ConvertFiles

```

Form1 - 1

PublicRetVal
Public c, Bloques
Public BuscarVar, ValorVar
Public FileCfg$

Private Sub Form_Load()
Rem Estar seguros que el path de wconvert es el correcto
FileCfg$ = CurDir & "\* & "ConvertFiles.cfg"

BuscarVar = "RUTAWCONVERT"
Buscar_Variable
MMconvert = ValorVar

BuscarVar = "INTERVAL"
Buscar_Variable
Bloques = ValorVar

RunMconvert = MMconvert
RetVal = Shell(RunMconvert, 1)
SendKeys "{r}", True
For t = 1 To 9
SendKeys "{TAB}", True
Next
SendKeys "{ENTER}", True
SendKeys "{c}", True

CRLF = Chr$(13) & Chr$(10)
info = "Convirtiendo de RINEX -> GPB"
info = info & CRLF & "Intervalo --> " & (Bloques * 5) & "s"
Text1.Text = info

Timer1.Enabled = True

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
c = c + 1

If (c Mod Bloques = 0) Then
SendKeys "{F4}", True
SendKeys "{F4}", True
End If

If c = (Bloques + 1) Then
Timer1.Enabled = False
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "ConvertFiles-1"
Close #fn
End
End If

End Sub

Sub Buscar_Variable()
Open FileCfg$ For Input As #1

Do Until EOF(1) Or NombreVar = BuscarVar
Input #1, AnalizarVar
largo = Len(AnalizarVar)
ind = InStr(1, AnalizarVar, "=")

If ind <> 0 Then
ValorVar = Mid(AnalizarVar, ind + 1, largo - ind)
NombreVar = Left(AnalizarVar, ind - 1)
End If
Loop
Close #1
End Sub

```

```

Form1 - 1

Public ExisteFile
Public i
Public ParaNav
Public AnioProcess, DiaProcess
Public FileCfg$
Public MPath, MMaster, DiaFormato
Public BuscarVar, ValorVar

Private Sub Form_Load()
ParaNav = Array("pp01", "pp02", "pp03", "pp04", "pp05")
'Lee parametros de configuracion
AnioEnProceso$ = CurDir & "\" & "YearInProcess.dat"
Open AnioEnProceso$ For Input As #1
Input #1, AnioProcess
Close

DiaEnProceso$ = CurDir & "\" & "DayInProcess.dat"
Open DiaEnProceso$ For Input As #1
Input #1, DiaProcess
Close

FileCfg$ = CurDir & "\" & "MakeNavFile.cfg"

BuscarVar = "RUTALOCAL"
Buscar_Variable
MPath = ValorVar

BuscarVar = "MASTERMODEL"
Buscar_Variable
MMaster = ValorVar

DiaFormato = DiaProcess
If DiaProcess < 100 Then DiaFormato = "0" & DiaProcess
If DiaProcess < 10 Then DiaFormato = "00" & DiaProcess

Text1.Text = " Modelo -->: " & MMaster & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "n"
Timer1.Enabled = True

End Sub

Public Function ChecarFile(path As String) As Boolean
On Error Resume Next
Dim TempFile As String, fn As Integer

fn = FreeFile
Rem si existe se puede abrir
Open path For Input As #fn

If Err = 0 Then
Close #fn
Rem Kill TempFile
ExisteFile = 1
Else
ExisteFile = 0
End If

End Function

Sub Buscar_Variable()
Open FileCfg$ For Input As #1

Do Until EOF(1) Or NombreVar = BuscarVar
Input #1, AnalizarVar
largo = Len(AnalizarVar)
ind = InStr(1, AnalizarVar, "-")

If ind <> 0 Then
ValorVar = Mid(AnalizarVar, ind + 1, largo - ind)

```

```

Form1 - 2

NombreVar = Left(AnalizarVar, ind - 1)
End If
Loop
Close #1

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()

ArchivoObs = MPath & ParaNav(i) & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "o"
ChecarFile (ArchivoObs)

If ExisteFile = 1 Then
Text1.Text = " Creando -->: " & ParaNav(i) & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "n"
Modelo = MPath & MMaster & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "n"
NavFile = MPath & ParaNav(i) & DiaFormato & "0." & Right(AnioProcess, 2) & "n"
FileCopy Modelo, NavFile
End If

i = i + 1

If i = 5 Then
Timer1.Enabled = False
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\" & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "MakeNavFile-1"
Close #fn

End
End If
End Sub

```

```

FindVectors - 1

Public Retval
Public bloques, FileSolucion, FileOpt, FileConfig
Public BuscarVar, ValorVar, ArchivoRover, ArchivoMaster
Public FileAna$, FileCfg$, DiaFormato
Public MPath, MBatch, MSoluciones
Public Archivo, ArchT, ExisteFile, ArchivoAprocesar
Public estacionMaster, estacionRover
Public DiaCons, DiaFile
Public mes, DiaMes, i
Public FileLog, GDdate
Public AnioProcess, DiaProcess
Public estacion
Public desviacion
Public BuscarVar2, ValorVar2

Private Sub Form_Load()
Rem Load frm_inicio
FindVectors.Show
estacion = Array("posw", "popn", "pp01", "pp02", "pp03", "pp04", "pp05")

AnioEnProceso$ = CurDir & "\* & "YearInProcess.dat"
Open AnioEnProceso$ For Input As #1
Input #1, AnioProcess
Close

DiaEnProceso$ = CurDir & "\* & "DayInProcess.dat"
Open DiaEnProceso$ For Input As #1
Input #1, DiaProcess
Close

FileCfg$ = CurDir & "\* & "FindVectors.cfg"

BuscarVar = "RUTADATA"
Buscar_Variable
MPath = ValorVar

BuscarVar = "RUTAWATCH"
Buscar_Variable
MBatch = ValorVar

BuscarVar = "RUTASOLUTIONS"
Buscar_Variable
MSoluciones = ValorVar

BuscarVar = "INTERVAL"
Buscar_Variable
bloques = ValorVar

DiaFormato = DiaProcess
If DiaProcess < 100 Then DiaFormato = "0" & DiaProcess
If DiaProcess < 10 Then DiaFormato = "00" & DiaProcess

estacionMaster = estacion(0) & DiaFormato
ArchivoMaster = MPath & estacion(0) & DiaFormato & "0.gpb"

i = 1
Do Until i = 7

estacionRover = estacion(i) & DiaFormato
ArchivoRover = MPath & estacion(i) & DiaFormato & "0.gpb"
ChecarFile (ArchivoRover)
Rover = ExisteFile
If Rover = 1 Then
Label2.Caption = "SOLUCION :" & UCase(estacion(0)) & "->" & UCase(estacion(i))
Timer1.Enabled = True
Iniciar_Wbatch
Do
dummy = DoEvents()
Loop Until Timer1.Enabled = False
End If

```

```

FindVectors - 2

i = i + 1
Loop
Close
fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\* & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "FindVectors-1"
Close #fn

End

End Sub

Sub Iniciar_Wbatch()
FileSolucion = MPath & estacion(0) & "TO" & estacion(i) & "_ " & DiaFormato & ".bnw"
FileOpt = MPath & estacion(0) & "TO" & estacion(i) & "_ " & DiaFormato & ".opt"
FileConfig = MPath & estacionMaster & "0 to " & estacionRover & "0 (1).cfg"

Crear_Files
parametros = MBatch & " " & FileSolucion
Retval = Shell(parametros, 1)
T1.BackColor = &HFF00&

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
On Error GoTo 300
bloques = bloques + 1

Rem Carga archivos e inicia proceso
If bloques = 3 Then
T2.BackColor = &HFFFF&
AppActivate Retval
SendKeys "{F5}", True
SendKeys "{ENTER}", True
SendKeys "{f}", True
SendKeys "{p}", True
End If

Rem Cierra aplicacion
If bloques = 14 Then
T2.BackColor = &HFF00&
SendKeys "{ENTER}", True
SendKeys "{f}", True
SendKeys "{x}", True
SendKeys "{ENTER}", True
T3.BackColor = &HFF00&
End If

Rem Extrae los vectores
If bloques = 15 Then
desviacion = ""
FileAna$ = MPath & estacionMaster & "0 to " & estacionRover & "0 (1).fss"
BuscarVar2 = "DE/DN/DZ"
Buscar_Variable2
desviacion = ValorVar2

ObtenerFecha

Rem CALCULA el dia consecutivo par graficar a partir de 1999
For a = 1999 To AnioProcess
DiasAcum = DiasAcum + Dias
If ((a Mod 4 = 0) And (a Mod 100) = 0) Or (a Mod 400) = 0 Then
Dias = 366
Else
Dias = 365
End If
Next

DiaConsec = DiasAcum + DiaProcess

```

```

FindVectors - 3

Rem Extrae los Sigma
Open FileAna$ For Input As #2
IniSeccion = "FLOAT SOLUTIONS BELOW ARE GIVEN FOR 3 MINUTE INTERVALS"
Do Until EOF(2)
If Escribe = 0 Then Input #2, AnalizarVar

If IniSeccion = AnalizarVar Then
Escribe = 1
For head = 1 To 5
Input #2, headers
Next
AnalizarVar = ""
End If

If Escribe = 1 Then
Input #2, GPSTIME, LATg, LATm, LATs, LONGg, LONGm, LONGs, Vert, DN, DE, DH, Stdev, NUM
If GPSTIME = "" Then GoTo 100
SUM_DN = SUM_DN + DN
SUM_DE = SUM_DE + DE
SUM_DH = SUM_DH + DH
Epocas = Epocas + 1
End If

Loop

100 Rem salida
Close #2

RMS_DN = SUM_DN / (Epocas - 1)
RMS_DE = SUM_DE / (Epocas - 1)
RMS_DH = SUM_DH / (Epocas - 1)

Rem Guarda soluciones

ParaGuardar = MSolutions & UCase(estacion(0)) & "-" & UCase(estacion(1)) & ".GD"
ChecarFile (ParaGuardar)
CRLF = Chr(13) + Chr(10)
Header = ExisteFile
If Header = 0 Then
Open ParaGuardar For Append As #1
Print #1, "DATE", "DEast (m)", "DNorth (m)", "DHeight (m)", "+/-SigmaDE", "+/-SigmaDN", "+
/-SigmaDV", "INTER (3min)", "DIACONS", CRLF
Else
Open ParaGuardar For Append As #1
End If

If desviacion <> "" Then
Print #1, GDdate, desviacion, Format(RMS_DE, "0.###0"), Format(RMS_DN, "0.###0"), Format(RMS_D
H, "0.###0"), Epocas, DiaConsec, CRLF
Close #1
Else
Close #1
End If

T4.BackColor = &HFF00&
End If

If bloques = 17 Then

T1.BackColor = &HFF&
T2.BackColor = &HFF&
T3.BackColor = &HFF&
T4.BackColor = &HFF&
bloques = 0
Timer1.Enabled = False
End If

```

```

FindVectors - 4

300 Rem aqui acaba
End Sub

Sub Buscar_Variable()
Open FileCfg$ For Input As #1

Do Until EOF(1) Or NombreVar = BuscarVar
Input #1, AnalizarVar
largo = Len(AnalizarVar)
ind = InStr(1, AnalizarVar, "=")

If ind <> 0 Then
ValorVar = Mid(AnalizarVar, ind + 1, largo - ind)
NombreVar = Left(AnalizarVar, ind - 1)
End If
Loop
Close #1

End Sub
Sub Buscar_Variable2()

MF = FreeFile
Open FileAna$ For Input As #MF

Do Until EOF(1) Or NombreVar2 = BuscarVar2
Input #MF, AnalizarVar2
largo2 = Len(AnalizarVar2)
comparar2 = Left(AnalizarVar2, 8)
ind2 = InStr(1, AnalizarVar2, ".")

If comparar2 = BuscarVar2 Then
ValorVar2 = Mid(AnalizarVar2, ind2 + 1, largo2 - ind2)
NombreVar2 = Left(AnalizarVar2, ind2 - 1)
End If
Loop
Close #MF

End Sub

Public Function ChecarFile(path As String) As Boolean

On Error Resume Next
Dim TempFile As String, fn As Integer

fn = FreeFile
Rem si existe se puede abrir
Open path For Input As #fn

If Err = 0 Then
Close #fn
Rem Kill TempFile
ExisteFile = 1
Else
ExisteFile = 0
End If

End Function

Sub Crear_Files()

Open FileSolucion For Append As #6
Print #6, "$BATCHCFG GrafNav Batch Ver6.02"
Print #6, "Hdr { NumItems: 1"
Print #6, "SolMode: -1"
Print #6, "GGMode: 157"
Print #6, "Weight: 1.000"
Print #6, "PPM: 0.00"
Print #6, "MaxDist: 0 75.00"
Print #6, "Cutoff: 0 5.000 4 20.00 25.000 0"

```

FindVectors - 5

```
Print #6, "TimeRange: 0 0.00 1000000.00"  
Print #6, "ProcMode: 103"  
Print #6, "StatMode: 109"  
Print #6, "KarMode: 111"  
Print #6, "GlnMode: 124"  
Print #6, "}"  
Print #6, "Combine { Reject: 1 0.5000 2.0000"  
Print #6, "FixFloat: 0"  
Print #6, "OutBL: 1 0"  
Print #6, "OutCMB: 0"  
Print #6, "LogWarn: 0"  
Print #6, "}"  
Print #6, "Item { Prefix: " & estacionMaster & "0*to*" & estacionRover & "0*(1)"  
Print #6, "Rename: 0"  
Print #6, "SolMode: -1"  
Print #6, "GGMode: 157"  
Print #6, "Weight: 1.000"  
Print #6, "PPM: 0.00"  
Print #6, "MaxDist: 0 75.00"  
Print #6, "Cutoff: 0 5.000 4 20.00 25.000 0"  
Print #6, "TimeRange: 0 0.00 1000000.00"  
Print #6, "ProcMode: 103"  
Print #6, "StatMode: 109"  
Print #6, "KarMode: 111"  
Print #6, "GlnMode: 124"  
Print #6, "}"  
Close #6
```

Open FileOpt For Append As #6

```
Print #8, " PROJECT: FCM Tesis"  
Print #8, " DATE: May 2/103 (date/time of processing)"  
Print #8, " TIME: 00:00:00"  
Print #8, " CREATED BY: GrafNav Batch Version 6.02"  
Print #8, "}"  
Print #8, "PROCESS_MODE = 103 109 111 124; Processing modes"  
Print #8, "}"  
Print #8, "DATUM = WGS84 ; Processing datum"  
Print #8, "ELEV_MASK = 10.0 ; Elevation mask (deg)"  
Print #8, "}"  
Print #8, "CYCLE_TEST = BOTH ; Cycle slip test method"  
Print #8, "TREND_CYCLE_TOL = 0.90 ; Cycle tol for fixed static soln (cycles)"  
Print #8, "}"  
Print #8, "DOPPLER_TOL = 25.000 ; Bad doppler tolerance (m/s)"  
Print #8, "USE_DOPPLER = ON OFF ; Use doppler meas. for phase, for code-only"  
Print #8, "}"  
Print #8, "BASE_SAT = 99 ; Base satellite (99-default)"  
Print #8, "}"  
Print #8, "TIMERANGE = ALL 0.0 0.0 0 ; Processing time range"  
Print #8, "INTERVAL = 30.00 ; Processing time interval (seconds)"  
Print #8, "}"  
Print #8, "PROCESS_DIR = FORWARD ; Process direction (FORWARD/REVERSE)"  
Print #8, "BOTH_DIR = OFF s ; True for processing both directions"  
Print #8, "SHOTGUN = ON ; Use filter reset (ON/OFF)"  
Print #8, "WRITE_BAD_EPOCHS = OFF ; Save bad data to .fwd/rev file (ON/OFF)"  
Print #8, "NOWRITE_HIGH = OFF 6 20.000 ; Don't write epoch with high statistics (q, stdev-m)"  
Print #8, "OUTPUT_MODE = NORMAL ; Format for .fwd/rev file"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}; Second values for KAR are Dual frequency Wide-lane values"  
Print #8, "KAR_MIN_TIME = 8.00 2.00 ; Min. time for KAR, L1 and L2 (minutes)"  
Print #8, "KAR_MIN_ADD = 2.00 ; minutes/10-km added to KAR_MIN_TIME"  
Print #8, "KAR_MAX_TIME = 30 ; Time before Float KAR soln used (minutes)"  
Print #8, "KAR_CUBE = 1.00 4.00 ; Kinematic ambiguity resolution cube size (m)"  
Print #8, "KAR_MAX_DOP = 9.0 ; Cutoff DD_DOP value for KAR to work"  
Print #8, "KAR_L2_NOISE = AUTO ; L2 noise model: AUTO, IONO, HIGH MEDIUM or LOW"  
Print #8, "KAR_IONO_DIST = 10.0000 ; Distance for choosing between HIGH and IONO noise (AUTO noise o  
nly) - km"  
Print #8, "KAR_STATIC = OFF ; Engage KAR while in static mode"  
Print #8, "KAR_EPOCH_SIZE = 60.0 30.0 ; Computation interval for KAR"  
Print #8, "KAR_EPOCH_FILTER = 5.0 ; KAR data storage interval"
```

FindVectors - 6

```
Print #8, "KAR_DISTANCE = 7.500 30.000 ; KAR cutoff distance (km)"  
Print #8, "ISSUE_KAR_DOP = OFF 25.0 ; Issue KAR when DOP drops below value"  
Print #8, "}"  
Print #8, "RAPID_TIME = 0.0 ; Quick Static time (sec)"  
Print #8, "RAPID_CUBE = 1.50 2.50 ; Quick Static cube size (m)"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}; Fixed static solution options"  
Print #8, "FIX_CUBE = NORMAL 0.500 1.500 -1 ; Fixed solution search area options"  
Print #8, "FIX_L2_NOISE = AUTO -1 ; Fixed solution L2 noise model"  
Print #8, "FIX_IONO_DIST = 20.000 -1 ; Distance for switching to Iono model for AUTO L2 noise"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}; use PCODE, L2 for amb. res., L2 for iono. (OFF/RELATIVE/FREE), correct C/A for iono."  
Print #8, "DUAL_FREQUENCY = OFF ON OFF OFF"  
Print #8, "IONO_DIST = 4.0 ; Engage Relative iono. after this dist. (km)"  
Print #8, "L2_SLIP_TOL = 0.400 ; Small cycle slip tolerance on L2 (cycles)"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}; Standard deviations and tolerances"  
Print #8, "RANGE_SD = 7.00 ; C/A code stdev (m)"  
Print #8, "PHASE_SD = 0.020 ; L1 phase stdev (m)"  
Print #8, "PHASE_RATE_SD = 0.250 ; L1 phase rate stdev (m)"  
Print #8, "AUTO_DOP_SD = ON ; On for auto doppler standard dev."  
Print #8, "PCODE_SD = 2.00 ; P code stdev (m)"  
Print #8, "RMS_TOL = 0.10 25.0 10.0 1.0; L1, CA, P RMS tolerance (m) PPM scale"  
Print #8, "LOCKTIME_CUTOFF = 4.0 ; Carrier locktime cutoff (seconds)"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}; Miscellaneous options"  
Print #8, "TROP0_MODEL = SAAS ; Tropospheric model (BLACK/SAAS)"  
Print #8, "WRITE_RESIDUALS = OFF ; Create .RL1 and .RCA files"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}; Glonass Options"  
Print #8, "Gln_TOFF = ON 0.0000 1000.0000 0.000000"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}; GPSpace Options"  
Print #8, "GPSPACE_FREQ = 1 2 ; 1 or 2, tropo_model 1 or 2"  
Print #8, "USESLIM = OFF"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}; The following are Additional (user) items"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}"  
Print #8, "}; End-of-file"  
Close #8
```

Open FileConfig For Append As #7

```
Print #7, " PROJECT: FCM Tesis"  
Print #7, " DATE: May 2/103 (date/time of processing)"  
Print #7, " TIME: 00:00:00"  
Print #7, " CREATED BY: GrafNav Batch Version 6.02"  
Print #7, "}"  
Print #7, "PROCESS_MODE = 103 109 111 124; Processing modes"  
Print #7, "}"  
Print #7, "DATUM = WGS84 ; Processing datum"  
Print #7, "ELEV_MASK = 10.0 ; Elevation mask (deg)"  
Print #7, "}"  
Print #7, "CYCLE_TEST = BOTH ; Cycle slip test method"  
Print #7, "TREND_CYCLE_TOL = 0.90 ; Cycle tol for fixed static soln (cycles)"  
Print #7, "}"  
Print #7, "DOPPLER_TOL = 25.000 ; Bad doppler tolerance (m/s)"  
Print #7, "USE_DOPPLER = ON OFF ; Use doppler meas. for phase, for code-only"  
Print #7, "}"  
Print #7, "BASE_SAT = 99 ; Base satellite (99-default)"  
Print #7, "}"
```

FindVectors

```

FindVectors - 7
Print #7, "TIMERANGE = ALL 0.0 0.0 0 0 ; Processing time range"
Print #7, "INTERVAL = 30.00 ; Processing time interval (seconds)"
Print #7, ""
Print #7, "MASTER_FILE = " & ArchivoMaster
Print #7, "MASTER_POS = 19 00 34.35013 -98 39 23.92977 3981.064"
Print #7, "MASTER_ANT = 1#"
Print #7, ""
Print #7, "REMOTE_FILE = " & ArchivoRover
Print #7, "REMOTE_POS = 19 00 34.35013 -98 39 23.92977 3981.064"
Print #7, "REMOTE_SD = 100.0000 ; Set to 0.0 to fix position"
Print #7, ""
Print #7, "REMOTE_ANT = 0#"
Print #7, "PROCESS_DIR = FORWARD ; Process direction (FORWARD/REVERSE)"
Print #7, "BOTH_DIR = OFF ; True for processing both directions"
Print #7, "SHOTGUN = ON ; Use filter reset (ON/OFF)"
Print #7, "WRITE_BAD_EPOCHS = OFF ; Save bad data to .fwd/rev file (ON/OFF)"
Print #7, "NOWRITE_HIGH = OFF & 20.000 ; Don't write epoch with high statistics (q, stdev-m)"
Print #7, "OUTPUT_MODE = NORMAL ; Format for .fwd/rev file"
Print #7, ""
Print #7, "; Second values for KAR are Dual frequency Wide-lane values"
Print #7, "KAR_MIN_TIME = 8.00 2.00 ; Min. time for KAR, L1 and L2 (minutes)"
Print #7, "KAR_MIN_ADD = 2.00 ; minutes/10-km added to KAR_MIN_TIME"
Print #7, "KAR_MAX_TIME = 30 ; Time before Float KAR soln used (minutes)"
Print #7, "KAR_CUBE = 1.00 4.00 ; Kinematic ambiguity resolution cube size (m)"
Print #7, "KAR_MAX_DOP = 9.0 ; Cutoff DD_DOP value for KAR to work"
Print #7, "KAR_L2_NOISE = AUTO ; L2 noise model: AUTO, IONO, HIGH MEDIUM or LOW"
Print #7, "KAR_IONO_DIST = 10.0000 ; Distance for choosing between HIGH and IONO noise (AUTO noise on ly) - km"
Print #7, "KAR_STATIC = OFF ; Engage KAR while in static mode"
Print #7, "KAR_EPOCH_SIZE = 60.0 30.0 ; Computation interval for KAR"
Print #7, "KAR_EPOCH_FILTER = 5.0 ; KAR data storage interval"
Print #7, "KAR_DISTANCE = 7.500 30.000 ; KAR cutoff distance (km)"
Print #7, "ISSUE_KAR_DOP = OFF 25.0 ; Issue KAR when DOP drops below value"
Print #7, ""
Print #7, "RAPID_TIME = 0.0 ; Quick Static time (sec)"
Print #7, "RAPID_CUBE = 1.50 2.50 ; Quick Static cube size (m)"
Print #7, ""
Print #7, "; Fixed static solution options"
Print #7, "IX_CUBE = NORMAL 0.500 1.500 -1 ; Fixed solution search area options"
Print #7, "FIX_L2_NOISE = AUTO -1 ; Fixed solution L2 noise model"
Print #7, "FIX_IONO_DIST = 20.000 -1 ; Distance for switching to Iono model for AUTO L2 noise"
Print #7, ""
Print #7, "; use PCODE, L2 for amb. res., L2 for iono. (OFF/RELATIVE/FREE), correct C/A for iono."
Print #7, "DUAL_FREQUENCY = OFF ON OFF"
Print #7, "IONO_DIST = 4.0 ; Engage Relative iono. after this dist. (km)"
Print #7, "L2_SLIP_TOL = 0.400 ; Small cycle slip tolerance on L2 (cycles)"
Print #7, ""
Print #7, "; Standard deviations and tolerances"
Print #7, "RANGE_SD = 7.00 ; C/A code stdev (m)"
Print #7, "PHASE_SD = 0.020 ; L1 phase stdev (m)"
Print #7, "PHASE_RATE_SD = 1.000 ; L1 phase rate stdev (m)"
Print #7, "AUTO_DOP_SD = ON ; On for auto doppler standard dev."
Print #7, "PCODE_SD = 2.00 ; P code stdev (m)"
Print #7, "RMS_TOL = 0.10 25.0 10.0 1.0; L1, CA, P RMS tolerance (m) PPM scale"
Print #7, "LOCKTIME_CUTOFF = 4.0 ; Carrier Locktime cutoff (seconds)"
Print #7, ""
Print #7, "; Miscellaneous options"
Print #7, "TROPO_MODEL = SAAS ; Tropospheric model (BLACK/SAAS)"
Print #7, "WRITE_RESIDUALS = OFF ; Create .RL1 and .RCA files"
Print #7, ""
Print #7, ""
Print #7, "; Glonass Options"
Print #7, "GLN_TOFF = ON 0.0000 1000.0000 0.000000"
Print #7, ""
Print #7, ""
Print #7, "; GPSpace Options"
Print #7, "GPSPACE_FREQ = 1 2 ; 1 or 2, tropo_model 1 or 2"
Print #7, "USSSLIM = OFF"
Print #7, ""
Print #7, ""
Print #7, "; The following are Additional (user) items"

```

```

FindVectors - 8
Print #7, ""
Print #7, ""
Print #7, ""
Print #7, "; End-of-file"
Close #7

End Sub
Sub ObtenerFecha()
Dim Nmeses, nmes
Nmeses = Array("JAN", "FEB", "MAR", "APR", "MAY", "JUN", "JUL", "AGO", "SEP", "OCT", "NOV", "DEC")
nmes = Array(31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31)

If (((AnioProcess Mod 4 = 0) And (AnioProcess Mod 100) Or (AnioProcess Mod 400)) = 0) Then
nmes(1) = 29
End If

For mes = 0 To 11
SumaAnt = SumaMes
SumaMes = SumaMes + nmes(mes)
If SumaMes > DiaProcess Or SumaMes = DiaProcess Then
DiaMes = DiaProcess - SumaAnt
If mes = 0 Then
DiaMes = DiaProcess
End If
GoTo 10
End If
Next

10 If DiaMes < 10 Then
DiaMes = "0" & DiaMes
End If

GDdate = DiaMes & Nmeses(mes) & Right(AnioProcess, 2)
End Sub

```

```

Form1 - 1

Public AnioProcess, DiaProcess
Public estacion
Public FileAna$, FileCfg$
Public BuscarVar, ValorVar
Public i, c
Public MServer, MUser, MPassw, RutaSer, RutaLoc, DiaFormato, Bloques
Public info, CRLF
Public Solucion, Archivo
Public ExisteFile

Private Sub Form_Load()
    estacion = Array("posw", "popn", "pp01", "pp02", "pp03", "pp04", "pp05")

    AnioEnProceso$ = CurDir & "\ " & "YearInProcess.dat"
    Open AnioEnProceso$ For Input As #1
    Input #1, AnioProcess
    Close

    DiaEnProceso$ = CurDir & "\ " & "DayInProcess.dat"
    Open DiaEnProceso$ For Input As #1
    Input #1, DiaProcess
    Close

    FileCfg$ = CurDir & "\ " & "SendSolutions.cfg"

    BuscarVar = "SERVIDOR"
    Buscar_Variable
    MServer = ValorVar

    BuscarVar = "USER"
    Buscar_Variable
    MUser = ValorVar

    BuscarVar = "PASSW"
    Buscar_Variable
    MPassw = ValorVar

    BuscarVar = "RUTASERVER"
    Buscar_Variable
    RutaSer = ValorVar

    BuscarVar = "RUTALOCAL"
    Buscar_Variable
    RutaLoc = ValorVar

    BuscarVar = "INTERVAL"
    Buscar_Variable
    Bloques = ValorVar

    DiaFormato = DiaProcess
    If DiaProcess < 100 Then DiaFormato = "0" & DiaProcess
    If DiaProcess < 10 Then DiaFormato = "00" & DiaProcess

    CRLF = Chr$(13) & Chr$(10)
    info = "Servidor --> " & MServer
    info = info & CRLF & "Usuario --> " & MUser
    info = info & CRLF & "Dir Server --> " & RutaSer
    info = info & CRLF & "Dir Local --> " & RutaLoc
    info = info & CRLF & "Intervalo --> " & (Bloques * 5) & "s"
    Text1.Text = info

    Timer1.Enabled = True

End Sub
Private Sub Timer1_Timer()
    c = c + 1

    Rem cada 10 segundos

```

```

Form1 - 2

If (c Mod Bloques = 0) Then
    i = i + 1
    Text1.Text = info & CRLF & " Probando --> " & UCase(estacion(0)) & "-" & UCase(estacion(i)) & "
.GD"

    Solucion = RutaLoc & UCase(estacion(0)) & "-" & UCase(estacion(i)) & ".GD"
    ChecarFile (Solucion)
    ExisteSolucion = ExisteFile
    If ExisteSolucion = 1 Then
        Text1.Text = info & CRLF & " Enviando --> " & UCase(estacion(0)) & "-" & UCase(estacion(i))
        & ".GD"
        Put_File (Solucion)
        End If
    End If
    If i = 6 Then
        Timer1.Enabled = False

    fn = FreeFile
    ProcessState$ = CurDir & "\ " & "ProcessState.dat"
    Open ProcessState$ For Output As #fn
    Print #fn, "SendSolution-1"
    Close #fn
    End
    End If

End Sub
Public Function Put_File(Archivo As String)
    On Error Resume Next

    PutFile1 = Solucion
    PutFile2 = RutaSer & UCase(estacion(0)) & "-" & UCase(estacion(i)) & ".GD"
    With Inet1
        .URL = "ftp://" & MServer
        .UserName = MUser
        .Password = MPassw
        .Execute , "SEND " & PutFile1 & " " & PutFile2
    End With
End Function

Sub Buscar_Variable()
    Open FileCfg$ For Input As #1

    Do Until EOF(1) Or NombreVar = BuscarVar
        Input #1, AnalizarVar
        largo = Len(AnalizarVar)
        ind = InStr(1, AnalizarVar, "=")

        If ind <> 0 Then
            ValorVar = Mid(AnalizarVar, ind + 1, largo - ind)
            NombreVar = Left(AnalizarVar, ind - 1)
        End If
        Loop
    Close #1

End Sub
Public Function ChecarFile(path As String) As Boolean

On Error Resume Next
Dim TempFile As String, fn As Integer

fn = FreeFile
Rem si existe se puede abrir
Open path For Input As #fn

If Err = 0 Then
    Close #fn
    Rem Kill TempFile
    ExisteFile = 1
Else
    ExisteFile = 0

```

SendSolution

```

Form1 - 1
Public u
Public BorrarrFiles
Public FileCfg$
Public MScommand, MBorrar, MIntervalo
Public BuscarVar, ValorVar

Private Sub Form_Load()

RutaFiles = "C:\GPSD_process\data\"
BorrarrFiles = "del /Q " & RutaFiles & "*.*"

FileCfg$ = CurDir & "\ " & "BorrarrFiles.cfg"

BuscarVar = "RUTAMSCOMMAND"
Buscar_Variable
MScommand = ValorVar

BuscarVar = "RUTABORRAR"
Buscar_Variable
MBorrar = ValorVar

BuscarVar = "INTERVAL"
Buscar_Variable
MIntervalo = ValorVar

RunMScommand = MScommand
RetVal = Shell(RunMScommand, 1)

Timer1.Interval = MIntervalo
Timer1.Enabled = True

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
u = u + 1

If u = 2 Then
SendKeys BorrarrFiles, True
End If

If u = 3 Then
SendKeys "{ENTER}", True
End If

If u = 4 Then
SendKeys "exit", True
End If

If u = 5 Then
SendKeys "{ENTER}", True
Timer1.Enabled = False

fn = FreeFile
ProcessState$ = CurDir & "\ " & "ProcessState.dat"
Open ProcessState$ For Output As #fn
Print #fn, "BorrarrFiles-1"
Close #fn

End
End If

End Sub
Sub Buscar_Variable()
Open FileCfg$ For Input As #1

Do Until EOF(1) Or NombreVar = BuscarVar
Input #1, AnalizarVar
largo = Len(AnalizarVar)
ind = InStr(1, AnalizarVar, "--")

If ind <> 0 Then

```

```

Form1 - 2
ValorVar = Mid(AnalizarVar, ind + 1, largo - ind)
NombreVar = Left(AnalizarVar, ind - 1)
End If
Loop
Close #1

End Sub

```