

Capítulo 2

El Sistema de Posicionamiento Global

2.1 Introducción

El sistema de posicionamiento global GPS se ha convertido, desde que fuera declarado operacional en 1993, en la herramienta de posicionamiento por excelencia por su versatilidad y bajo costo. El objetivo primordial del Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) fue desarrollar un sistema de navegación global, que proveyera resultados en tiempo real, que fuera independiente de las condiciones atmosféricas y tuviera una exactitud de pocos metros. Desde los inicios del proyecto NAVSTAR GPS, éste mostró cualidades sin precedentes para aplicaciones comerciales y científicas. Según el punto de vista que interesa a este trabajo, GPS provee un sistema de referencia global y al mismo tiempo una metodología para vincularse a él. Según la modalidad de trabajo que se emplee, GPS permite calcular posiciones de objetos respecto del ITRS con una exactitud desde decenas de metros hasta uno o dos centímetros. El posicionamiento de alta precisión con GPS ha contribuido a establecer el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), de exactitud centimétrica y fácilmente accesible en todo el mundo.

En el presente capítulo se expondrán las características principales del sistema GPS y el tratamiento de las observaciones con relación al establecimiento de marcos de referencia de exactitud centimétrica. Se describirán los problemas relativos al modelado de la propagación de la señal GPS. Los efectos que modifican la posición de la estación serán solo mencionados ya que han sido analizados antes en el capítulo 1.

2.2 Conceptos básicos del posicionamiento con GPS

El sistema GPS tiene una enorme versatilidad, respondiendo a las necesidades de una gran variedad de usuarios del posicionamiento. El posicionamiento puntual implica utilizar un solo receptor que determina su posición sobre la base de mediciones de pseudo distancia con códigos hacia al menos cuatro satélites, y efemérides, extraídas estas últimas del mensaje de navegación transmitido por los mismos satélites. Esta modalidad tuvo hasta el 30 de abril de 2000 una exactitud de hasta 100 m en latitud y longitud y hasta 156 m en altura para el 95% del tiempo, suponiendo un coeficiente de Dilución de la Precisión para la Posición (PDOP) menor que 6, según las especificaciones del Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS). Desde el 1^a de mayo de 2000, en que se eliminó la Disponibilidad Selectiva (SA) [IGS, 2000], las especificaciones del SPS deben dividirse por diez. Existe una modalidad algo más precisa o Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS) pero es accesible solamente para usuarios autorizados por el DoD. Si se necesita un posicionamiento de mejor calidad, existen varias alternativas. La mayoría implican el uso del método diferencial y del observable más preciso que da el sistema, la fase de la portadora. El método diferencial implica calcular las coordenadas de nuevos puntos respecto de al menos una estación de referencia, que debe tener coordenadas conocidas a priori, a partir de observaciones simultáneas en todas las estaciones o pares de ellas conformando una red. La situación deseable es que el cálculo diferencial no se encuentre afectado por errores sistemáticos apreciables. En ese caso, la exactitud de las coordenadas calculadas estará dada por la de las coordenadas a priori de la estación de referencia y la calidad de los modelos empleados en el cálculo. La precisión de las mismas en cambio estará determinada por la del observable utilizado y la distribución de los satélites en el cielo. El usuario debe ser capaz de controlar la incidencia de los errores sistemáticos en el cálculo de sus vectores a fin de poder obtener una solución precisa y exacta.

2.2.1 Las señales

Como se mencionó brevemente en el capítulo 1, los satélites GPS emiten dos portadoras, L_1 y L_2 . No será descripta aquí la generación de la señal en el satélite ni los detalles de la recepción. Un tratamiento general de estos temas puede encontrarse en [Kleusberg et al, 1996] o [Leick, 1995]. La razón para el uso de dos frecuencias es que esto permite la

eliminación del retardo producido por la ionosfera. Ambas portadoras están moduladas por varios códigos binarios que proveen las mediciones de pseudodistancia al satélite y su posición. La modulación utilizada es en fase de modo que cada transición en el código produce un cambio en la fase de la señal modulada de 180 grados.

La portadora L_1 está modulada por el mensaje de navegación, sucesión de dígitos binarios con 50 transiciones por segundo que, principalmente, indican al receptor la posición extrapolada del satélite y el estado de su reloj para el instante de medición [Van Dierendonck et al., 1978].

Tanto L_1 cuanto L_2 se encuentran además moduladas por otros dos códigos. Esta segunda codificación tiene múltiples propósitos: identificar, desde el receptor, al satélite en que se originó la señal recibida y separarla de las señales de los demás, medir la pseudo-distancia satélite-receptor, proteger las señales contra posibles interferencias casuales y/o deliberadas e impedir el uso de algunas capacidades del sistema a usuarios no autorizados por el DoD. Los códigos utilizados son del tipo pseudo aleatorio. Se parecen a una señal aleatoria real en que su autocorrelación cae a cero muy rápido al desfasar en tiempo dos copias del mismo código, y la correlación cruzada de dos códigos para cualquier corrimiento en tiempo es prácticamente nula. La asignación de un código diferente a cada satélite permite al receptor identificarlos aunque lleguen señales de varios satélites simultáneamente a la misma antena y sobre la misma frecuencia portadora.

El receptor busca el máximo de la autocorrelación del código recibido desde el satélite respecto de una copia del mismo código generada localmente en sincronización con el tiempo del satélite a menos de un error en el reloj local. Esto le permite medir el desfase causado por la propagación y por la falta de sincronización del reloj local con respecto al patrón del satélite. Este desfase, multiplicado por la velocidad de la luz es lo que se llama pseudo distancia o distancia afectada de errores de sincronización entre los relojes del satélite y del receptor. Si se dispone de las pseudo distancias a cuatro satélites simultáneamente, se puede calcular la posición de la antena y el error del reloj local respecto del tiempo patrón del sistema. La precisión de la medición de pseudo distancia depende de la duración mínima de un estado del código o *chip-rate*. El sistema posee un código de Adquisición Rápida o Clara (C/A). Este es una secuencia con una duración de 1 ms, de frecuencia 1.023 MHz, de acceso público y que modula sólo a L_1 . Además existe otro código, llamado P o Protegido. Es una secuencia de dígitos de 266 días de duración,

de frecuencia 10.23 MHz, de acceso restringido y que modula a L_1 y a L_2 . El código C/A tiene una frecuencia tal que durante uno de sus estados, la luz, puede desplazarse 300 metros, mientras que el código P tiene una frecuencia 10 veces más alta, por lo que deja trasladar la señal sólo 30 metros entre dos transiciones. Como la autocorrelación de los códigos por el receptor permite detectar desfases menores que 0.01 del chip-rate, la pseudodistancia con códigos permitiría un posicionamiento de precisión entre métrica y submétrica según el código que se utilice. Esto no resultaba así hasta el 30 de abril de 2000 para los usuarios no autorizados dado que el DoD degradaba el posicionamiento puntual en tiempo real, de importancia militar estratégica, mediante la Disponibilidad Selectiva (SA). La SA consistía en una degradación intencional de la marcha de los relojes de los satélites, o proceso δ , y de las posiciones de los satélites que se transmiten dentro del mensaje de navegación, llamado proceso ϵ . El primer proceso era el más activo y también el más perjudicial ya que afectaba a las mediciones mismas. Sus efectos tenían una variación muy rápida y no predecible, por lo que determinaban en la práctica las especificaciones del Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS), referidas al comienzo de §2.2. El proceso ϵ en cambio implicaba errores en las efemérides que eran de pocos metros y tenían una variación lenta. Además, el DoD aplica aún en los satélites el Anti Spoofing (AS) o restricción de acceso al código P. Esto impide que terceros reproduzcan espuriamente la señal GPS con fines de inutilizar el sistema. Un efecto secundario de la aplicación del AS es que, como el código C/A modula solamente a L_1 , a los usuarios civiles les resulta más difícil aprovechar las dos frecuencias de GPS, ya que se ha podido mitigar el problema pero esto ha requerido de receptores más complejos y costosos. La modulación de las señales por los códigos pseudo aleatorios produce un ensanchamiento de la banda que ocupa la señal en el espectro electromagnético que pasa de una fracción de KHz a 20 MHz, equivalente por ejemplo al ancho de todo el espectro VHF. Esto constituye una efectiva protección para el sistema de posicionamiento contra posibles interferencias, ya sea accidentales o intencionales.

Además de las pseudo distancias con códigos, los receptores pueden realizar una medición equivalente sobre la fase de las portadoras L_1 y L_2 . Dado que las frecuencias de L_1 y L_2 son del orden de 1000 veces mayores que las de los códigos, la precisión de esta observación resulta milimétrica.

La baja precisión de las mediciones de código elimina a las técnicas de posicionamiento basadas en ellas para las aplicaciones geodésicas que interesan en este trabajo por lo que no nos referiremos nuevamente a ellas.

2.2.2 La observación de fase

Cuando el receptor comienza a observar un satélite y mide por primera vez la diferencia de fase entre las ondas portadoras recibida y generada localmente por él mismo, esta diferencia de fase inicial es un número entero N de ciclos más una fracción de ciclo φ . Al ser todos los ciclos de la portadora idénticos, el receptor puede medir solamente la fracción φ , mientras que la cantidad N no puede ser observada y permanece como una incógnita en el problema del posicionamiento con fase. Llamaremos en adelante N_i^k a la ambigüedad para el satélite k respecto del receptor i . Es un número entero de ciclos cuya longitud es de aproximadamente 19 cm o 24 cm según se trate de L_1 o de L_2 respectivamente. En lo subsiguiente se utilizarán las siguientes convenciones:

$$\text{Observación de fase} = \varphi_i^k \text{ (ciclos)}$$

$$\text{Pseudodistancia} = \lambda \cdot (\varphi_i^k + N_i^k) = \Phi_i^k + \lambda \cdot N_i^k \text{ (metros)}$$

Donde λ representa la longitud de onda de la portadora de que se trate mientras que φ y Φ indican la observación de fase en ciclos y en metros respectivamente.

La fase observada en un receptor i que recibe señal de un satélite k puede escribirse como:

$$\Phi_i^k = \sqrt{(x^k - x_i)^2 + (y^k - y_i)^2 + (z^k - z_i)^2} + c \cdot \delta t^k + c \cdot \delta t_i - I_i^k + T_i^k + dm_i^k - \lambda N_i^k + \varepsilon_i^k \quad (2.1)$$

Expresión en la que pueden distinguirse, en orden y expresados en metros, la distancia geométrica entre satélite y receptor, el error de reloj del satélite, el error de reloj del receptor, los retardos ionosférico y troposférico y el efecto del multicamino. Completan la expresión los términos de la ambigüedad y del error de observación.

Las magnitudes de los términos de la ecuación (2.1) son muy disímiles. El error de reloj del receptor $c \cdot \delta t_i$ implica típicamente cientos de km dada la baja calidad de los relojes internos de los receptores, que pueden acumular desfases de hasta 1 ms, equivalente a

300 km de error en el cálculo de la observación. El término $c \cdot \delta t^k$ incluía el proceso δ de la SA, por lo que al haber sido ésta eliminada, disminuyó de varias decenas a sólo pocos metros. La magnitud del efecto ionosférico I_1^k puede alcanzar decenas de metros y depende de la frecuencia. La troposfera es un medio no dispersivo para las frecuencias de las portadoras y su efecto T_1^k alcanza unos pocos metros, mientras que el efecto del multicamino dm_1^k tiene magnitudes de hasta unos pocos centímetros y depende de la frecuencia. Finalmente el último término, ϵ_1^k , que representa al error de observación, tiene valores típicos de 2 a 3 milímetros en los receptores geodésicos.

2.2.3 El método diferencial

Para aprovechar la calidad de la observación de fase se deben modelar todos los términos con una exactitud comparable al error de observación. El primer problema se presenta con los errores de los relojes satelitales, de considerable magnitud, variación rápida y difícil predicción. Existen básicamente dos alternativas para resolver esto. Una de ellas es modelar la marcha de los relojes y demás fenómenos en el nivel de las observaciones crudas representadas en (2.1). Un ejemplo de aplicación de esta estrategia para fines científicos es el paquete de procesamiento GPS GIPSY, desarrollado en el JPL [Sovers et al., 1990][Webb et al., 1997]. La otra alternativa posible, y que se emplea en este trabajo a través del Bernese GPS software V4.0 [Rothacher et al., 1996b], es el método diferencial. Consiste en el procesamiento de diferencias de observaciones simultáneas, realizadas por al menos dos estaciones a los mismos satélites. El método diferencial aprovecha principalmente el hecho de que los errores de reloj de un satélite tienen el mismo efecto sobre todos los receptores que lo observen en forma simultánea. Además aprovecha la correlación espacial de otros varios efectos: los errores orbitales de un satélite tienen efectos muy parecidos para dos receptores que lo observen simultáneamente separados por una distancia pequeña respecto de la que media entre receptor y satélite, que es del orden de 20.000 km. En el caso de los errores por propagación atmosférica, tanto el efecto de la ionosfera cuanto el de la troposfera están correlacionados espacialmente. Los efectos ionosféricos diferenciales son despreciables sólo para distancias entre receptores menores que 10 km. Si se pretende la máxima precisión en vectores más largos se debe eliminar la contribución significativa de la ionosfera por medio de una combinación adecuada de L_1 y

L₂. Los efectos de la troposfera para dos estaciones que observan simultáneamente pueden considerarse iguales sólo para distancias entre receptores de muy pocos kilómetros. El multicamino y el error de observación, en cambio, no están correlacionados para mediciones simultáneas por lo que no son atenuados al utilizar el método diferencial sino que sus efectos aumentan en la observación combinada.

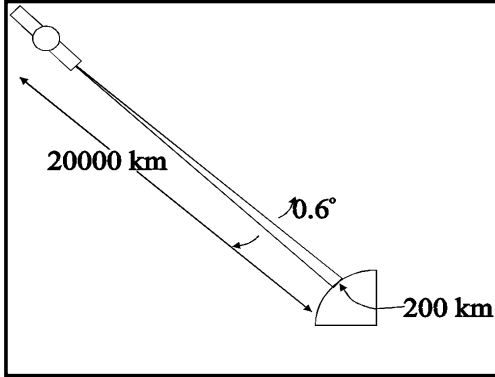


Figura 2.1: Escalas relevantes para el posicionamiento diferencial

En el ejemplo de la figura (2.1) se pueden apreciar las escalas asociadas al posicionamiento GPS diferencial. Las direcciones a un mismo satélite desde dos estaciones separadas por cientos de kilómetros son muy similares. Si el vector entre las dos estaciones se hace muy corto, las señales son afectadas por prácticamente los mismos errores.

A partir de las coordenadas y error de reloj de la estación i , obtenidos en el posicionamiento puntual con códigos por ejemplo, y la posición del satélite k proveniente de las efemérides transmitidas o precisas, se puede obtener una primera aproximación de la observación de fase:

$$\Phi_{i,0}^k = \sqrt{(x_0^k - x_{i,0})^2 + (y_0^k - y_{i,0})^2 + (z_0^k - z_{i,0})^2} + c \cdot \delta t_{i,0} - \lambda \cdot N_{i,0}^k \quad (2.2)$$

Donde $N_{i,0}^k$ es una primera aproximación del valor de la ambigüedad correspondiente al satélite k y la estación i . El valor buscado es $N_i^k = N_{i,0}^k + \delta N_i^k$. En rigor la incógnita que resta encontrar es la pequeña fracción δN_i^k , sin embargo, de aquí en adelante se utilizará el símbolo N_i^k para indicar dicha fracción a fin de conservar una notación algo más sencilla.

Si el error de reloj local $\delta t_{i,0}$ es conocido con una precisión de un μs , la diferencia entre la fase observada y calculada puede ser aproximada linealmente como se muestra en (2.3).

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_i^k &= \Phi_i^k - \Phi_{i,0}^k \cong (\cos \alpha_{i,0}^k \cdot \delta x_i + \cos \beta_{i,0}^k \cdot \delta y_i + \cos \gamma_{i,0}^k \cdot \delta z_i) + c \cdot \delta t_i + dm_i^k + \varepsilon_i^k - \lambda N_i^k \\ &+ (\cos \alpha_{i,0}^k \cdot \delta x^k + \cos \beta_{i,0}^k \cdot \delta y^k + \cos \gamma_{i,0}^k \cdot \delta z^k) + c \cdot \delta t^k + \\ &- I_i^k + T_i^k \end{aligned} \quad (2.3)$$

Las incógnitas de la posición del receptor quedan expresadas en función de los cosenos directores de la dirección receptor–satélite. Estas direcciones deben provenir de coordenadas a priori para la estación y efemérides del satélite expresadas en el mismo sistema de referencia.

En la primera línea figuran los términos relacionados con el receptor, en orden: efecto del error en la posición a priori de la estación i , $(\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i)$, del error de reloj del receptor, del multicamino, del ruido de observación y finalmente el término de la ambigüedad, que implica la diferencia entre el valor correcto y la primera aproximación, que puede provenir por ejemplo de una solución previa a partir de códigos. En la segunda línea se encuentran los términos relativos al satélite: efectos del error orbital $(\delta x^k, \delta y^k, \delta z^k)$, y del error del reloj del satélite. Finalmente, en la tercera línea figuran los retardos producidos por la ionosfera y troposfera.

Las aproximaciones lineales de dos observaciones de fase simultáneas realizadas desde las estaciones i y j al mismo satélite k pueden expresarse como sigue:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_i^k &= (\cos \alpha_i^k \cdot \delta x_i + \cos \beta_i^k \cdot \delta y_i + \cos \gamma_i^k \cdot \delta z_i) + c \cdot \delta t_i - \lambda N_i^k \\ &+ (\cos \alpha_i^k \cdot \delta x^k + \cos \beta_i^k \cdot \delta y^k + \cos \gamma_i^k \cdot \delta z^k) + c \cdot \delta t^k - I_i^k + T_i^k + dm_i^k + \varepsilon_i^k \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_j^k &= (\cos \alpha_j^k \cdot \delta x_j + \cos \beta_j^k \cdot \delta y_j + \cos \gamma_j^k \cdot \delta z_j) + c \cdot \delta t_j - \lambda N_j^k \\ &+ (\cos \alpha_j^k \cdot \delta x^k + \cos \beta_j^k \cdot \delta y^k + \cos \gamma_j^k \cdot \delta z^k) + c \cdot \delta t^k - I_j^k + T_j^k + dm_j^k + \varepsilon_j^k \end{aligned} \quad (2.5)$$

Restando estas expresiones entre sí se obtiene la expresión (2.6), que aproxima linealmente a una simple diferencia de fase, y que se encuentra libre del error de reloj del satélite siempre que la simultaneidad de las observaciones en las dos estaciones esté asegurada al nivel del μs . En la expresión (2.6) aparecen en orden: (i) el error del vector a priori entre las dos estaciones, (ii) el error de la posición a priori de la estación j , (iii) la combinación de los errores de reloj de las dos estaciones receptoras, (iv) la combinación de las dos

$$\Delta\Phi_{ij}^k = \mu_i^k \cdot \delta x_{ij}^k + \mu_j^k \cdot \delta x_j^k + c \cdot \delta t_{ij}^k + \lambda N_{ij}^k + \mu_j^k \cdot \delta x^k - \Delta I_{ij}^k + \Delta T_{ij}^k + \Delta dm_{ij}^k + \varepsilon_{ij}^k \quad (2.6)$$

fracciones desconocidas de las ambigüedades para el satélite k desde las estaciones i y j , (v) el error orbital del satélite k , (vi) los efectos atmosféricos diferenciales entre las dos estaciones y (vii) las combinaciones de los errores por multicamino y medición de las dos estaciones. La cantidad i) contiene los parámetros de interés geodésico, que debe ser estimados para poder obtener las coordenadas de la estación i respecto de las coordenadas conocidas del punto j . El efecto de iii) puede llegar a miles de metros, por lo que debe ser

estimado o eliminado convenientemente del problema. Los factores μ_{ij}^k representan diferencias entre los cosenos directores de las direcciones desde ambas estaciones al satélite y son muy pequeños, por lo tanto, los términos ii) y v) pueden ignorarse sin perder exactitud en el cálculo de un vector corto. En §2.3.1 se mostrará lo antedicho con un ejemplo y también el papel de estos términos en el cálculo de vectores largos. El efecto ionosférico diferencial puede alcanzar valores de decenas de cm en vectores de cientos de kilómetros [Brunini, 1998]. El efecto troposférico diferencial puede alcanzar varios centímetros para distancias de sólo pocos kilómetros. Por último queda una combinación de fracciones de las ambigüedades iniciales N_{ij}^k que es un número entero a estimar.

Dobles diferencias

En el problema del posicionamiento diferencial con simples diferencias, aún queda entre las incógnitas la combinación de los errores de los relojes locales, que es preciso estimar época por época. Para evitar esto se pueden restar pares de simples diferencias simultáneas correspondientes al mismo par de estaciones hacia satélites diferentes. Se obtienen así las dobles diferencias de fase, cuya aproximación lineal puede escribirse como se muestra a continuación:

$$\Delta\Phi_{ij}^{kl} = \mu_{ij}^{kl} \cdot \delta x_{ij}^k + \mu_{ij}^{kl} \cdot \delta x_j^k + \mu_{ij}^{kl} \cdot \delta x^k - \Delta I_{ij}^{kl} + \Delta T_{ij}^{kl} + \Delta dm_{ij}^{kl} - \lambda \cdot N_{ij}^{kl} + \epsilon_{ij}^{kl} \quad (2.7)$$

Donde el $\mu_{ij}^{kl} = \mu_{ij}^k - \mu_{ij}^l$ y convenciones de notación análogas valen para los índices de los efectos atmosféricos, el multicamino, las ambigüedades y el error de observación. Los órdenes de magnitud de los nuevos términos son los mismos que los que les corresponden en el análisis realizado para el caso de las simples diferencias ya que en general los satélites l y k pueden estar en cualquier parte del cielo siempre que sean visibles desde ambas estaciones.

2.2.4 El posicionamiento con fases

Se analizarán brevemente las características particulares del observable de fase y sus consecuencias en el posicionamiento.

Ambigüedades y ciclos perdidos

La existencia de las ambigüedades agrega al problema del posicionamiento al menos una de estas incógnitas por satélite y por receptor. El hecho de que sean números enteros, tanto para las observaciones mismas cuanto para las simples y dobles diferencias, puede ser incorporado al problema para dar mayor confiabilidad al resultado. Se diferencian entonces las soluciones con ambigüedades de punto flotante de las soluciones con ambigüedades de punto fijo o enteras. En general, para todos los métodos de posicionamiento con GPS, si las ambigüedades son fijadas correctamente, se obtendrá la solución más exacta posible.

Se mantendrá una incógnita de ambigüedad por satélite correspondiente a la primera observación a menos que el receptor pierda la señal. Si esto sucediera, deberá asumir que existe una nueva ambigüedad en la primera observación a partir de que la recepción se restablezca. *Se dice entonces que la señal del satélite ha sufrido una pérdida o salto de ciclos enteros.*

Este proceso puede verse claramente en la figura 2.2. Para evitar un aumento excesivo de la cantidad de ambigüedades a estimar, todos los programas de procesamiento de fase realizan un pre procesamiento de las observaciones con el objeto de reparar los ciclos perdidos. Si la reparación se realiza en el nivel de

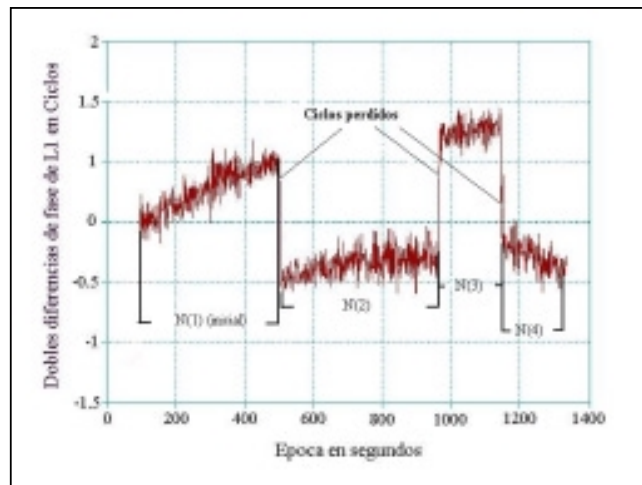


Figura 2.2: Ciclos perdidos en dobles diferencias de L_1

las observaciones de fase directamente, se requiere la asistencia de por ejemplo observaciones de pseudo distancia con código P de muy buena calidad. Este enfoque se utiliza en el paquete de procesamiento GIPSY. Su principal inconveniente es que la presencia del AS hace que sólo algunos de los receptores geodésicos de mayor performance puedan proveer observaciones de código P de la calidad requerida. Los paquetes de procesamiento que usan el método diferencial en cambio, reparan los ciclos

perdidos en el nivel de las dobles diferencias. En este caso los saltos pueden individualizarse sin ayuda de otro observable verificando la continuidad de las observaciones a lo largo del tiempo. Un inconveniente de esta metodología es que al procesar una red de estaciones que miden simultáneamente, y a pesar de que los ciclos perdidos dependen solamente de las parejas satélite-receptor, el análisis debe hacerse vector por vector. En consecuencia, un cambio de configuración de la red que modifique las combinaciones entre estaciones obliga a realizar al menos parte del pre proceso de fases nuevamente, sin importar que se trate de las mismas observaciones originales. En el caso mostrado en la figura 2.2, la reparación debería dejar como incógnita solamente a la ambigüedad inicial. El éxito del proceso de corrección depende de la causa del salto y de la calidad de las observaciones de fase. Cuanto mayor sea el intervalo de interrupción de la señal, tanto mayor será la dificultad para corregirlo. Las causas más comunes de ciclos perdidos son la presencia de obstrucciones momentáneas entre el receptor y los satélites, una extremadamente baja relación señal ruido, fenómeno que afecta especialmente a L₂, y variaciones rápidas del efecto ionosférico, comunes en los períodos de alta actividad solar, que hacen que los receptores pierdan el seguimiento de la señal de fase.

Algunas combinaciones lineales de observaciones particularmente útiles

Se han descrito las simples y dobles diferencias de fase y sus ventajas en el posicionamiento diferencial. Se pueden construir otras combinaciones lineales de observaciones diferentes realizadas por un mismo receptor para obtener nuevas pseudo observaciones con características especialmente adecuadas para resolver problemas específicos. Estas combinaciones tienen la forma general:

$$\Phi_{i\Omega}^k = \alpha_1 \cdot \Phi_{i1}^k + \alpha_2 \cdot \Phi_{i2}^k \tag{2.8}$$

Donde Ω indica la combinación realizada mientras que α_1 y α_2 son coeficientes convenientemente elegidos para dar a la combinación resultante ciertas propiedades deseadas.

Las características más buscadas en estas combinaciones son: ambigüedades enteras, valores grandes de la longitud de onda equivalente, inmunidad ante el efecto ionosférico y bajo nivel de ruido. Esto hace que de las infinitas posibilidades existentes, sólo unas pocas combinaciones de observaciones de fase de L₁ y L₂, o incluso de fases y códigos, tengan utilidad práctica. Entre ellas, nos ocuparemos sólo de las combinaciones *libre de ionosfera*,

widelane y *narrowlane* por su utilidad para resolver los dos problemas centrales que se presentan en el posicionamiento con fases de alta precisión en regiones extensas: La eliminación de los efectos de la ionosfera y la resolución de ambigüedades como números enteros.

Combinación libre de ionosfera

La ionosfera se extiende aproximadamente entre los 90 km y 1000 km de altura sobre la superficie terrestre. Se trata de una región de la atmósfera muy rica en electrones libres a causa de la ionización producida por la radiación solar en los gases allí presentes. La existencia de estas partículas cargadas provoca un retardo en la señal GPS que causa errores apreciables en el posicionamiento.

El retardo que sufren las señales GPS al atravesar la ionosfera es directamente proporcional al contenido de electrones del espacio atravesado por la señal y es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la onda portadora. El término del retardo ionosférico en las señales GPS para una estación i que observa a un satélite k puede escribirse como:

$$I_i^k = \frac{\kappa \cdot \text{TEC}_i^k}{f^2} \quad (2.9)$$

Donde κ es una constante, TEC_i^k es el contenido electrónico total encontrado por la señal en su paso por la ionosfera al viajar desde el satélite k al receptor i , y f es la frecuencia de la onda portadora. Si se cuenta con receptores de doble frecuencia, se puede eliminar la parte significativa del efecto ionosférico mediante una combinación "libre de ionosfera" (L_0). Una combinación lineal de observaciones de fase con esta propiedad se muestra en (2.10).

$$\Phi_{i0}^k = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_{i1}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_{i2}^k \quad (2.10)$$

Donde Φ_{i1}^k y Φ_{i2}^k son las observaciones de fase en L_1 y L_2 respectivamente de la estación i al satélite k , siendo f_1 y f_2 las frecuencias de las portadoras. Desarrollando esta expresión usando la (2.1) y haciendo explícitos solamente los términos de la distancia, ambigüedades, efecto ionosférico y errores de observación, queda la expresión (2.11):

$$\Phi_{i0}^k = \sqrt{(x^k - x_i)^2 + (y^k - y_i)^2 + (z^k - z_i)^2} + \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{\kappa \cdot \text{TEC}_i^k}{f_1^2} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{\kappa \cdot \text{TEC}_i^k}{f_2^2} \right] - \left[c \cdot \frac{f_1 N_{i1}^k - f_2 N_{i2}^k}{f_1^2 - f_2^2} \right] + \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \epsilon_{i1}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \epsilon_{i2}^k \right] \quad (2.11)$$

En la primera línea de (2.11) puede verse que se cancela el término del efecto ionosférico. Otra consecuencia de la combinación realizada es que las ambigüedades resultantes no son ya enteras por lo que en principio su resolución será de tipo “flotante”. La razón es que la combinación de términos de ambigüedades que ha quedado no puede expresarse como un número entero multiplicado por una longitud de onda λ_0 que pueda asociarse a la señal resultante. Esto se muestra en el primer término de la segunda línea. Finalmente se ve en el último término que el error de esta combinación, entendido como la desviación estándar de los errores combinados, aumenta. En efecto, si se considera a las observaciones en las dos frecuencias L_1 y L_2 tienen varianzas iguales y no están correlacionados, se llega a que la desviación estándar de la observación combinada es aproximadamente tres veces mayor que la de cada una de las componentes, como puede verse en la tabla 2.1. Por esta razón, el uso de la combinación libre de ionosfera para posicionamiento de alta precisión se reserva para el trabajo con vectores de longitud mayor que 10 km.; suficiente para que el efecto ionosférico diferencial no sea despreciable. En caso contrario, una solución igualmente exacta pero más precisa será la calculada a partir de las observaciones de L_1 .

Combinaciones lineales útiles para resolver ambigüedades

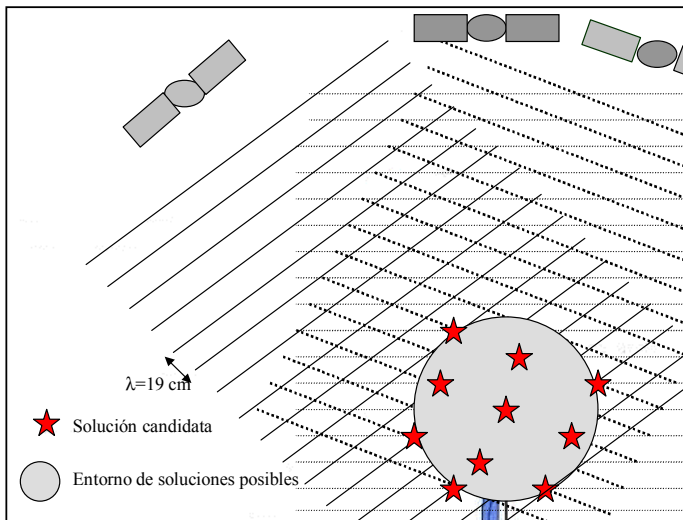


Figura 2.3: Soluciones posibles con ambigüedades enteras de L_1 a partir de una posición a priori de exactitud métrica.

Cuando se desea resolver las ambigüedades como números enteros se parte de la mejor aproximación disponible de las coordenadas del punto de interés. A partir del error estimado para esa primera aproximación se puede definir un elipsoide alrededor de la solución a priori con un tamaño suficiente para asegurar que la solución verdadera se encuentre

dentro de ella. Existe en principio un conjunto de infinitas soluciones posibles para las coordenadas de la estación que caerán dentro del elipsoide de error. Sin embargo, si se exige que la solución tenga ambigüedades enteras, las posibles soluciones se reducen a un conjunto finito. Este número de soluciones posibles está controlado por la calidad de las coordenadas a priori, la cantidad de satélites observados, la longitud de onda de la observación de fase o de la combinación de portadoras que se emplee y por la precisión de las observaciones que se estén utilizando. Una vez identificado el conjunto de soluciones “candidatas” se debe seleccionar la correcta. Para una discusión más profunda acerca de la resolución de ambigüedades se recomienda referirse por ejemplo a [Teunissen, 1996].

El éxito de las estrategias de resolución de ambigüedades depende, en primer lugar, de que se pueda reducir convenientemente el conjunto de soluciones posibles o “candidatas” ya mencionado. La razón es que luego se deben ensayar tantas soluciones como candidatas haya. En consecuencia, un aumento del número de ellas implica un incremento enorme de la cantidad de operaciones matemáticas necesarias para encontrar la mejor solución. En las figuras 2.3 y 2.4 se muestra la reducción del número de soluciones candidatas al usar una combinación de observaciones con una longitud de onda equivalente grande. En segundo lugar, una vez reducido convenientemente el número de soluciones candidatas, es preciso discernir de entre ellas cuál es la correcta. En este proceso el éxito depende en gran medida de que la combinación del ruido de observación y el efecto del multicamino sea pequeña respecto de la longitud de onda asociada a la combinación utilizada. En vectores largos se agregan los efectos troposférico e ionosférico, que deben ser controlados convenientemente.

Las longitudes de onda de las portadoras L_1 y L_2 son aproximadamente 19 cm y 24 cm respectivamente. Sin embargo, si se dispone de ambas frecuencias, se puede

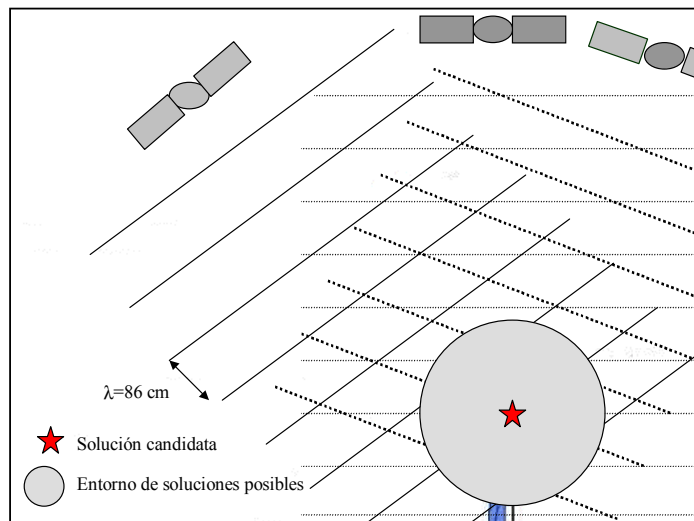


Figura 2.4: Soluciones posibles con ambigüedades enteras de L_{Δ}

construir la combinación widelane o L_{Δ} , que se forma como se muestra en (2.12) y (2.13) y cuya longitud de onda es 86 cm.

$$\Phi_{i\Delta}^k = \frac{f_1}{f_1 - f_2} \cdot \Phi_{i1}^k - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \cdot \Phi_{i2}^k \quad (2.12)$$

$$\Phi_{i\Delta}^k = \sqrt{(x^k - x_i)^2 + (y^k - y_i)^2 + (z^k - z_i)^2} - \frac{\text{TEC}_i^k}{f_1 \cdot f_2} - \frac{c}{f_1 - f_2} \cdot (N_{i1}^k - N_{i2}^k) + \frac{f_1 \cdot \epsilon_{i1}^k - f_2 \cdot \epsilon_{i2}^k}{f_1 - f_2}$$

donde:

$$\lambda_{\Delta} = \frac{c}{f_1 - f_2} \approx 86\text{cm} \quad (2.13)$$

La resolución de ambigüedades para L_{Δ} en vectores cortos es mucho más sencilla que para L_1 o L_2 ya que para el mismo entorno de error alrededor de las coordenadas a priori se tienen considerablemente menos soluciones posibles. Los inconvenientes de esta combinación lineal son por un lado que su desviación estándar es alrededor de 5 veces superior al de L_1 , y por otro que el efecto de la ionosfera es 30% mayor que el sufrido por L_1 , como puede verse en la tabla 2.1. Esto hace que las ambigüedades de L_{Δ} puedan ser resueltas en forma confiable solamente para vectores de hasta pocas decenas de kilómetros de longitud y que la solución correspondiente tenga baja precisión respecto de la que puede lograrse usando L_1 . En consecuencia, se la utiliza sólo como paso previo para poder resolver las ambigüedades de la combinación narrowlane o L_{Σ} . Esta nueva pseudo observación es obtenida al combinar las observaciones de fase en L_1 y L_2 , como se indica en (2.14) y tiene una longitud de onda de aproximadamente 11 cm. La solución obtenida sobre la base de este nuevo observable no sufre del alto ruido de la combinación L_{Δ} (ver tabla 2.1).

$$\Phi_{i\Sigma}^k = \frac{f_1}{f_1 + f_2} \cdot \Phi_{i1}^k + \frac{f_2}{f_1 + f_2} \cdot \Phi_{i2}^k \quad (2.15)$$

$$\Phi_{i\Sigma}^k = \sqrt{(x^k - x_i)^2 + (y^k - y_i)^2 + (z^k - z_i)^2} + \frac{\text{TEC}_i^k}{f_1 \cdot f_2} - \frac{c}{f_1 + f_2} \cdot (N_{i1}^k + N_{i2}^k) + \frac{f_1 \cdot \epsilon_{i1}^k + f_2 \cdot \epsilon_{i2}^k}{f_1 + f_2}$$

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{c}{f_1 + f_2} \approx 11\text{cm} \quad (2.14)$$

Debe notarse sin embargo, que el efecto ionosférico sobre L_{Σ} tiene la misma magnitud que sobre widelane (ver tabla 2.1) y su longitud de onda es muy corta, por lo que la resolución de las ambigüedades se dificulta cuando los vectores no son cortos.

Tabla 2.1: Características relevantes de las combinaciones más usadas

Observable	Carácter de las ambigüedades	Longitud de onda equivalente	Error de observación relativo a L1	Efecto ionosférico relativo a L1
L_1	Enteras	19 cm	1	1
L_2	Enteras	24 cm	1	1.6
Libre de ionosfera (L_0)	No enteras	-	3	0
Widelane (L_Δ)	Enteras	86 cm	5,7	1.3
Narrowlane (L_2)	Enteras	11 cm	0.7	-1.3

Además de las combinaciones antes apuntadas se utilizan también otras que involucran observaciones de códigos y de fases. Estas son empleadas por las estrategias rápidas de resolución de ambigüedades aprovechando el carácter no ambiguo de las observaciones de código. Las combinaciones de código y fase permiten obtener estimaciones de la solución suficientemente buenas como para resolver las ambigüedades de la fase entre pocos candidatos. Para lograr ese objetivo estas estrategias necesitan observaciones de código P de alta calidad en las dos frecuencias, lo que permite resolver las ambigüedades de L_Δ en el nivel de las observaciones sin diferenciar.

El posicionamiento diferencial con fase

En (2.16) se plantea la aproximación lineal para el problema del posicionamiento con simples diferencias de fase en una época incluyendo, para mayor claridad, sólo a los términos de la geometría, relojes locales y ambigüedades.

$$\Delta\Phi_{ij}^k = \cos\alpha_i^k \cdot \Delta x_{ij} + \cos\beta_i^k \cdot \Delta y_{ij} + \cos\gamma_i^k \cdot \Delta z_{ij} + c \cdot \Delta dt'_{ij} - \lambda \cdot N_{ij}^k \quad (2.16a)$$

$$\Delta\Phi_{ij}^l = \cos\alpha_i^l \cdot \Delta x_{ij} + \cos\beta_i^l \cdot \Delta y_{ij} + \cos\gamma_i^l \cdot \Delta z_{ij} + c \cdot \Delta dt'_{ij} - \lambda \cdot N_{ij}^l \quad (2.16b)$$

$$\Delta\Phi_{ij}^m = \cos\alpha_i^m \cdot \Delta x_{ij} + \cos\beta_i^m \cdot \Delta y_{ij} + \cos\gamma_i^m \cdot \Delta z_{ij} + c \cdot \Delta dt'_{ij} - \lambda \cdot N_{ij}^m \quad (2.16c)$$

$$\Delta\Phi_{ij}^n = \cos\alpha_i^n \cdot \Delta x_{ij} + \cos\beta_i^n \cdot \Delta y_{ij} + \cos\gamma_i^n \cdot \Delta z_{ij} + c \cdot \Delta dt'_{ij} - \lambda \cdot N_{ij}^n \quad (2.16d)$$

Donde $N_{ij}^k = N_i^k - N_j^k$. Se ve que es preciso resolver las tres incógnitas de posición relativa, la combinación de los errores de reloj de los receptores, y además una ambigüedad por cada satélite. El sistema de ecuaciones es sub abundante, por lo que no puede resolverse con esta información ni tampoco aumentando el número de satélites observados. Es fácil deducir que para dobles diferencias de fase la situación es análoga, ya que se cancela la combinación de errores de los relojes locales, pero las ambigüedades se combinan y siguen permaneciendo en el problema, una por cada doble diferencia.

Se ve que la resolución de las ambigüedades requiere de información adicional a la disponible en las observaciones de fase en sólo una época de observación. La inclusión de, por ejemplo, las observaciones de la época siguiente, no resuelve el problema. La razón es la lentitud con que varía la configuración geométrica de satélites y receptores. En efecto, en las ecuaciones de simples diferencias (2.16), se ve que las incógnitas de posición relativa están multiplicadas por los cosenos directores de las direcciones desde la estación i a los distintos satélites. Las posiciones de los satélites en el cielo varían a razón de aproximadamente 30° por hora, por lo que agregar en el problema las ecuaciones correspondientes a una época muy cercana no aportará información relevante ya que sería casi como repetir las mismas ecuaciones. En otras palabras, el problema se hace deficiente de rango ya que las tres columnas de su matriz de diseño que contienen los cosenos directores antes mencionados resultan linealmente dependientes. Se necesita incorporar observaciones separadas por un intervalo mayor que media hora a fin de que la configuración geométrica varíe lo suficiente como para resolver adecuadamente el problema.

En zonas de trabajo pequeñas existen alternativas menos costosas en términos de productividad para resolver las ambigüedades. Estas técnicas incorporan información adicional a la fase de L_1 para cada época de observación. Las más robustas son las que incorporan las observaciones de la fase de L_2 y del código P. Para una discusión más detallada de estos métodos referirse a [Kleusberg, et al, 1996] o [Leick, 1995].

En zonas de trabajo extensas las estrategias para resolver las ambigüedades son más limitadas. La presencia del efecto ionosférico dificulta la resolución de las ambigüedades de L_Δ en vectores de longitudes mayores que unas pocas decenas de km. La solución a partir de L_0 es confiable si se mide el tiempo suficiente como para resolver las ambigüedades flotantes. Una estrategia utilizada por muchos paquetes de procesamiento es la siguiente: se obtiene primero una solución con L_0 (ambigüedades flotantes). Luego se calcula una solución con L_Δ estimando solamente las ambigüedades y dejando las coordenadas provenientes del cálculo anterior (L_0) fijas. Este paso es delicado ya que, como se mencionó antes, L_Δ sufre 1.3 veces el efecto que la ionosfera produce en L_1 . Esto, combinado con el alto ruido que presenta L_Δ hace que para las distancias consideradas aquí pueda producirse una solución errónea. Si se ha logrado resolver las ambigüedades L_Δ ,

puede reescribirse el término de la ambigüedad en la ecuación de la combinación libre de ionosfera L_0 de la siguiente manera:

$$\Phi_{i_0}^k = \sqrt{(x^k - x_i)^2 + (y^k - y_i)^2 + (z^k - z_i)^2} + \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{\kappa \cdot \text{TEC}_i^k}{f_1^2} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{\kappa \cdot \text{TEC}_i^k}{f_2^2} \right] - \left[c \cdot \frac{f_2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot N_{i\Delta}^k + \frac{c}{f_1 + f_2} \cdot N_{i\Gamma}^k \right] + \Delta T_i^k + \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \epsilon_{i1}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \epsilon_{i2}^k \right] \quad (2.17)$$

Donde vemos que la ambigüedad desconocida restante $N_{i\Gamma}^k$ es entera. Su longitud de onda asociada es $c/(f_1+f_2)$ que como se vió antes vale 11 cm por lo que se la denominada narrowlane (L_Σ). Su longitud de onda efectiva es sin embargo el doble ya que siempre vale que si $N_{i\Delta}^k$ es par (impar), entonces $N_{i\Sigma}^k$ será par (impar). El paso siguiente en esta estrategia es resolver las ambigüedades narrowlane como números enteros en la combinación L_0 junto con las componentes del vector medido. Este observable se encuentra libre del efecto ionosférico, pero sí es sensible al efecto troposférico diferencial, al multicamino, y al ruido de la observación L_0 , que es tres veces el de L_1 . Como se mencionó anteriormente, la perturbación ionosférica hace que esta estrategia implique siempre cierto riesgo. En consecuencia resulta conveniente, antes de adoptar la solución L_0 de ambigüedades fijas como final, compararla con una solución L_0 de ambigüedades flotantes y controlar que las diferencias estén bien por debajo del tamaño del ciclo de la portadora.

La resolución de ambigüedades enteras se facilita si se mide durante mucho tiempo ya que esto permite producir mejores estimaciones flotantes de las mismas y por ende menor cantidad de candidatos posibles para la solución. Sin embargo, cuando se miden vectores durante más de 4 horas, la diferencia entre fijar o no las ambigüedades se hace casi despreciable como se muestra en

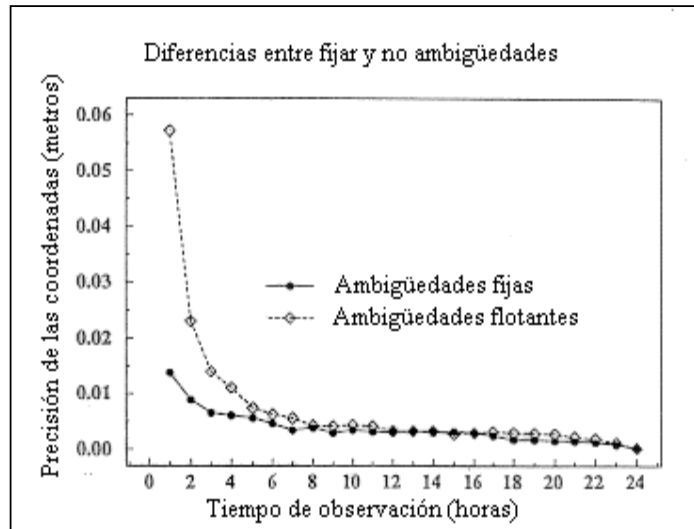


Figura 2.5: Ventaja de la solución de ambigüedades enteras en función de la longitud de la sesión [Rothacher et al., 1996b]

la figura 2.5. Por esto, en casos en que se buscan muy altas precisiones en vectores largos, una práctica segura es medir durante varias horas y calcular luego el vector mediante una solución libre de ionosfera con ambigüedades flotantes. Si, en cambio, se busca llevar la exactitud de los resultados al límite tratando de mejorar el modelo de las observaciones, sería recomendable trabajar con soluciones de ambigüedades fijas.

2.3 Problemas particulares del posicionamiento de alta precisión

En esta sección se describe el estado del arte del posicionamiento con GPS para la materialización de sistemas de referencia de alta precisión. Se abordan en principio los problemas que actualmente ponen el límite a la exactitud del posicionamiento con GPS.

2.3.1 Errores orbitales y de las coordenadas de la estación de referencia

En (2.18) se escribe nuevamente la aproximación lineal de la ecuación de simples diferencias de fase.

$$\Delta\Phi_{ij}^k = \mu_{ij}^k \cdot \Delta\bar{x}_{ij}^k + \mu_{ij}^k \cdot \Delta\bar{x}_j^k + c \cdot \delta t'_{ij} + \mu_{ij}^k \cdot \Delta\bar{x}^k - \Delta I_{ij}^k + \Delta T_{ij}^k - \lambda N_{ij}^k + \Delta dm_{ij}^k + \epsilon_{ij}^k \quad (2.18)$$

En el método diferencial, los errores de las coordenadas de la estación de referencia y de las efemérides de los satélites actúan de forma atenuada. El término $\mu_{ij}^k \cdot \Delta\bar{x}_j^k$ de (2.18) es el error que se introduce en el cálculo de la observación debido a la aproximación de las coordenadas de la estación de referencia. Este término puede acotarse mediante:

$$\mu_{ij}^k \cdot \Delta\bar{x}_j^k \leq \|\mu_{ij}^k\| \cdot \|\Delta\bar{x}_j^k\| = \frac{\sqrt{(x_{i0} - x_{j0})^2 + (y_{i0} - y_{j0})^2 + (z_{i0} - z_{j0})^2}}{\sqrt{(x^k - x_{j0})^2 + (y^k - y_{j0})^2 + (z^k - z_{j0})^2}} \cdot \|\Delta\bar{x}_j^k\| = \frac{\text{dist}(i, j)\text{km}}{\approx 20.000\text{km}} \times \text{error}_j \quad (2.19)$$

La expresión equivalente para el término del error orbital es análoga y no la escribiremos, la única diferencia respecto de (2.19) es que se reemplaza el módulo del error de las coordenadas de la estación de referencia j por el del error orbital del satélite k . Estas expresiones resultan adecuadas para estimar el error resultante en las alturas elipsoidales relativas pero son algo pesimistas para las coordenadas horizontales relativas [Beutler,

1996]. De todos modos son de utilidad para realizar una estimación de los efectos de los errores orbitales y de las coordenadas de la estación de referencia en el posicionamiento relativo.

Como ejemplo, se calcula primero el efecto de estos términos en las coordenadas del punto desconocido para un vector de 30 km de longitud considerando un error en las efemérides transmitidas de 3 metros y que se conocen las coordenadas de la estación de referencia con un error de 10 metros. Entonces, los valores de los términos correspondientes serán: 4.5 mm por el error orbital, que considerando 5 satélites a la vista y un PDOP igual a 4, se propaga a un error de 8 mm en las coordenadas calculadas. El error en las coordenadas de la estación de referencia introduce 15 mm en el cálculo de las observaciones, que considerando 5 satélites a la vista y un PDOP igual a 4, se propaga a un error de aproximadamente 26 mm en las coordenadas calculadas. Sumando ambas contribuciones se obtiene un total de 34 mm, que representa algo más que una parte por millón de la longitud de la línea de base.

El análisis previo indica que cuando se trabaja con fase en áreas pequeñas, y a fin de aprovechar todo su potencial para el posicionamiento relativo, se pueden utilizar efemérides transmitidas, pero que es conveniente tener coordenadas de partida con una exactitud mejor que 10 m en el sistema de referencia de las órbitas. Recordando las especificaciones del SPS (ver §2.2) es evidente que, cuando la SA estaba activa, las coordenadas de partida no podían provenir del posicionamiento puntual con códigos. En el capítulo 4 se verá que en Argentina, las coordenadas Inchauspe'69, adecuadamente transformadas a POSGAR'94, tienen errores de pocos metros, que sí es suficiente en este caso.

Se analiza seguidamente el impacto de los errores de las efemérides GPS en el posicionamiento relativo para el caso de áreas de cientos a miles de km de extensión. En [Beutler, 1996] se estima que las efemérides transmitidas tienen errores menores que cuatro metros respecto de ITRF. Un análisis de propagación de errores análogo al realizado más arriba indica que la incidencia de los mencionados errores de las efemérides transmitidas no es relevante para áreas de hasta pocas decenas de kilómetros de extensión. Sin embargo, para vectores de 50 km se pueden esperar errores de alrededor de 1 cm y para 500 km el efecto puede alcanzar los 10 cm.

De lo anterior resulta evidente que si se busca calcular vectores de cientos o miles de kilómetros de longitud con exactitudes centimétricas o mejores, se requerirá el empleo de efemérides precisas y coordenadas de partida provenientes de un marco de referencia geocéntrico y preciso. Esto equivale a decir que la información de posicionamiento absoluto contenida en las simples o dobles diferencias es más significativa a medida que la distancia entre receptores aumenta y requiere cada vez mayor compatibilidad entre efemérides y coordenadas de control.

Las efemérides precisas calculadas y diseminadas por el IGS aproximan en la actualidad las órbitas GPS con una exactitud decimétrica o mejor y son de acceso público [IGS, 1999a]. Esto implica que el problema de disponer de órbitas precisas en ITRF queda resuelto hasta para las aplicaciones más exigentes. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, a fin de no desaprovechar la calidad de las órbitas, se debe trabajar con programas de procesamiento adecuados a las convenciones del IERS detalladas en el capítulo 1 para la materialización del sistema de referencia. Desde el punto de vista del usuario esto implica, por ejemplo, que si fuera necesario transformar entre los sistemas de referencia celeste y terrestre durante el procesamiento, se deberá asegurar su máxima exactitud. Esto significa que se deberán utilizar parámetros de rotación terrestre (EOP) compatibles con las efemérides utilizadas. Como ejemplo, los EOP combinados por el IERS y distribuidos junto con las órbitas del IGS permiten calcular la orientación de la Tierra para el instante de las observaciones con un error del orden de 0.1 msa [IGS, 1999a], equivalente a 3 mm en la superficie de la Tierra. Además, las coordenadas de partida a utilizar deben estar expresadas respecto del ITRS para la época central de la campaña de medición a procesar para asegurar la máxima compatibilidad con las efemérides precisas. El marco POSGAR'98, presentado en el capítulo 4, brinda en la Argentina puntos con coordenadas geocéntricas con exactitudes respecto del sistema ITRS que se estiman mejores que 0.1 metros en latitud, longitud y altura. Este marco coincide con el de SIRGAS y está referido a la época 1995.4. En síntesis, la utilización de las efemérides precisas y EOP distribuidos por el IGSE y el marco POSGAR'98 permite calcular vectores con GPS dentro del país sin perder exactitud debido a los dos efectos descriptos en esta sección suponiendo que se cuenta con algún modelo de velocidades que tenga en cuenta el movimiento de la estación por la deriva continental entre la época de definición del marco y la época de las observaciones.

2.3.2 Multicamino y dispersión de la señal

Ya se hizo una descripción breve de estos fenómenos en §2.2.3. No se trata de efectos constantes, sino que su amplitud depende de la variación de la configuración geométrica de los satélites, la antena y obstáculos reflectores cercanos a ella. Por tal motivo estos efectos tienen períodos en un rango que abarca desde unos pocos minutos a decenas de minutos. En [Kleusberg et al., 1996, p. 134] pueden encontrarse expresiones para la amplitud del multicamino dependiendo de la reflectividad del obstáculo y del desfase entre las señales superpuestas a causa de la diferencia de camino recorrido hasta la antena. Para las observaciones de fase la amplitud del efecto alcanza un límite teórico de 5 cm en L_1 considerando las peores condiciones de reflectividad, pero en general es algo más pequeño. De todos modos, debe recordarse que al utilizar combinaciones de las dos portadoras el efecto resultante puede ser mayor. Por ejemplo, al formar la combinación libre de ionosfera, el efecto resultante del multicamino es 2.5 veces el que afecta a L_1 menos 1.5 veces el que afecta a L_2 . En consecuencia, según como sean los signos de los efectos en ambas frecuencias, el efecto neto resultante puede llegar a ser varias veces mayor que el que afecta a L_1 .

El multicamino es muy difícil de eliminar una vez que ha afectado a las observaciones, por lo que se han ideado varias medidas para rechazarlo implementadas en antenas y receptores de uso geodésico: el uso de antenas preparadas para la recepción de señales de polarización circular derecha asegura un alto grado de atenuación a eventuales señales con el sentido de polarización invertido por reflexiones. Las antenas equipadas con plano de tierra rechazan las señales provenientes de reflexiones en el suelo. El máximo rechazo del multicamino se logra en las antenas equipadas con el sistema “choke ring”, consistente en anillos de disposición concéntrica alrededor de la antena propiamente dicha cuya separación produce una máxima atenuación de las señales reflejadas o provenientes de debajo del plano de tierra. El multicamino puede minimizarse seleccionando sitios abiertos, libres de obstáculos y monturas para la antena que no contengan superficies metálicas horizontales. Además, sus efectos pueden ser atenuados en mediciones estáticas que duren varios días, lo que obedece a su dependencia de la distribución de satélites y reflectores cercanos a la antena: dado que la configuración de los satélites se repite casi exactamente cada día sidéreo, dos días de observación consecutivos en una estación están afectados por aproximadamente el mismo multicamino si se desfasa el tiempo del primero

de ellos en $23^{\text{h}}56^{\text{m}}4^{\text{s}}$. Este hecho puede ser aprovechado en las estaciones de rastreo GPS permanente como por ejemplo la red IGS.

Otro problema de naturaleza similar es la dispersión de la señal por objetos muy cercanos a la antena. Este efecto puede producirse en antenas permanentes montadas sobre pilares y produce un error que varía lentamente con la elevación de los satélites, por lo que afecta la determinación de coordenadas y parámetros de corrección troposférica [Johansson, 1998]. Una manera de atenuar este problema que ha sido probada con éxito es la colocación de material absorbente en la banda de las microondas entre la antena y el pilar [Clark et al., 1999].

2.3.3 Variación de la posición de los centros de fase de las antenas receptoras

Uno de los problemas más graves de la técnica GPS para materializar un sistema de referencia de exactitud subcentimétrica es la definición física de los puntos de recepción de las señales en las antenas. En general se necesita referir las mediciones GPS a alguna marca física en el terreno. Una parte de este problema se resuelve midiendo el vector que media entre la marca de interés y alguna referencia física en la antena. Cuando la antena se encuentra centrada sobre la marca esto se reduce a medir la “altura de antena”. La medición de la altura de antena es un problema delicado ya que de su correcta ejecución depende el resultado de todo el trabajo. La otra parte del problema es conocer el vector que media entre la referencia física de la antena o Antenna Reference Point (ARP) y el punto efectivo de recepción de la señal o centro eléctrico de la antena. Este vector está especificado por los fabricantes de antenas en sus tres componentes. Sin embargo, calibraciones independientes han detectado diferencias significativas respecto de los valores de fábrica. En general las diferencias horizontales son de pocos milímetros, pero las verticales alcanzan algunos pocos centímetros para muchas antenas. Más aún, la altura del centro de recepción de fase cambia con la elevación del satélite recibido, siendo sus variaciones mayores que un centímetro para algunas antenas tanto en L_1 cuanto en L_2 . En el capítulo 5 se mostrará mediante un ejemplo el efecto de este problema en los residuos del ajuste de un vector. El nombre comúnmente usado para referirse a este problema es antenna Phase Center Variations (PCV) y es el que se usará en lo sucesivo en este trabajo. Su efecto se elimina en posicionamiento solamente si se miden vectores cortos con antenas

iguales e igualmente orientadas, como por ejemplo al norte. Análogamente al caso del multicamino, este efecto puede amplificarse para alcanzar varios centímetros si se usan combinaciones de ambas portadoras.

La solución a este problema es una precisa calibración de las antenas GPS. Existen dos enfoques básicos diferentes para hacerlo: Las calibraciones absolutas consisten en la determinación de correcciones a la posición del centro de fase para cada elevación a partir de mediciones en laboratorio entre la antena y una fuente emisora, ambas con posiciones conocidas. Esto debe realizarse en un recinto cubierto de material absorbente para microondas para evitar reflexiones múltiples, disponiendo de los instrumentos adecuados para controlar la posición y orientación de la antena durante las operaciones [Schupler, et al., 1994][Menge et al., 2000]. El otro método es la calibración relativa. Consiste en calcular, mediante posicionamiento diferencial con GPS en una base muy corta, de componentes conocidas a priori con mucha precisión, las PCV para una antena respecto de la otra considerada como patrón [Rothacher et al., 1995]. Las calibraciones relativas son más comunes que las absolutas debido a que son más económicas y confiables [Rothacher et al., 1995][Johansson, 1998]. Se utiliza como patrón la antena AOA Dorne Margolin T, un tipo de antena GPS de alta calidad que tiene PCV absolutas pequeñas [Rothacher et al., 1995]. El Servicio Internacional de GPS (IGS) utiliza estas antenas en la gran mayoría de sus estaciones y ha publicado correcciones de altura para los centros de fase de la mayoría de las otras antenas de uso geodésico existentes en el mercado. El uso de estos coeficientes es recomendable si se pretende obtener alturas de exactitud centimétrica o mejor con GPS, tanto en los casos en que los vectores involucrados sean de cientos de kilómetros, cuanto en aquellos en que se utilicen antenas diferentes para medir vectores de cualquier longitud [Rothacher et al., 1996a]. Queda sin embargo sin resolver el problema de la calibración absoluta de las antenas patrón. Este no es un problema menor, ya que el error sistemático en las alturas que provoca es invocado hoy día por el IERS como una de las dos razones por las cuáles recomienda que las soluciones globales de GPS no sean utilizadas para definir la escala de los marcos ITRF [Blewitt et al., 1999]. La otra razón es la dificultad para modelar el efecto troposférico como se verá más adelante.

2.3.4 Efecto de las protecciones de las antenas o radomes

Muchos fabricantes de antenas GPS proveen protecciones para sus productos para el caso en que deban trabajar por tiempos prolongados a la intemperie o en regiones en que nieva. En general, los radomes producen un retardo adicional en la señal GPS que afecta especialmente la determinación de la altura de la estación pudiendo provocar errores de varios centímetros cuando en el cálculo se determinan parámetros de corrección al modelo troposférico además de coordenadas [Johansson, 1998][Kaniuth, et al., 1999c]. Este retardo depende del material del radome, de su forma, espesor y del dispositivo usado para fijar este accesorio a la antena GPS. A partir del análisis de la influencia de estos factores se han diseñado radomes de forma semiesférica, espesor de 1/8 de pulgada y soporte no conductor, cuyo efecto en el posicionamiento es de muy pocos milímetros [UNAVCO, 1997]. El uso de radomes modifica de todos modos el comportamiento eléctrico de la antena GPS al nivel de al menos unos pocos milímetros. Esto, sumado a los efectos de dispersión de la señal por la montura sobre el pilar son argumentos a favor de la determinación in situ de las PCV de las antenas GPS para las estaciones permanentes que contribuyen a la materialización del ITRS.

2.3.5 El retardo ionosférico

Como ya mencionamos en §2.2.4, cuando la distancia entre estaciones es mayor que unos pocos kilómetros, los efectos de la ionosfera y troposfera dejan de cancelarse totalmente en las simples diferencias y sus efectos relativos en la ecuación de observación (2.7) superan rápidamente el nivel del error de medición.

El efecto de la ionosfera diferencial puede alcanzar decímetros para distancias de cientos de kilómetros [Brunini, 1998]. La disponibilidad de las dos frecuencias permite por un lado el posicionamiento preciso con vectores largos y por otro, la detección y análisis de la distribución de electrones en la ionosfera a escala regional o global, como se muestra por ejemplo en [Brunini, 1998] o [Schaer, et al, 1996].

En vectores largos y disponiendo de las dos frecuencias, el efecto ionosférico tiene aún consecuencias negativas indirectas. Es la principal causa de la dificultad para resolver las ambigüedades como números enteros si se dispone sólo de observaciones de fase. Además

puede causar problemas de recepción que deriven en la aparición de gran cantidad de ciclos perdidos, lo que puede complicar significativamente el pre procesamiento. Como se mencionara en §2.2.4, la combinación L_{Δ} sufre un efecto ionosférico pronunciado, que a pesar de su gran longitud de onda, dificulta la resolución de ambigüedades en vectores largos. Los efectos ionosféricos diferenciales a que se hace referencia, se deben a pronunciados gradientes regionales en la densidad de electrones en la ionosfera, fenómeno que ocurre mayormente en las regiones ecuatoriales, y también a causa de las TID o Travelling Ionospheric Disturbances, que afectan a todas las regiones del globo. Para superar este problema contando sólo con observaciones de fase se puede utilizar estrategias como Quasi Iono-Free (QIF) [Rothacher et al., 1996b] que consiste en agregar un retardo ionosférico diferencial por época, por frecuencia y por satélite en el modelo de las observaciones de L_1 y L_2 . Se agrega además como condición una estimación a priori del retardo diferencial mencionado acompañado de su desviación estándar. Este modelo se utiliza en la determinación de las ambigüedades enteras para L_1 y L_2 a partir de una solución flotante y luego se utiliza la combinación L_0 como se muestra en la ecuación (2.17) para aprovechar las ambigüedades enteras ya estimadas. Para vectores de cientos de km de longitud la determinación de los retardos ionosféricos a priori es realizada con la asistencia de un modelo ionosférico regional que puede provenir de un procesamiento previo de los mismos datos GPS o por ejemplo de una determinación global independiente como las que se muestran en [Brunini, 1998] o las producidas rutinariamente por el [IGS, 1999a]. Esta estrategia ayuda a resolver satisfactoriamente la mayoría de las ambigüedades en vectores de hasta 2000 Km de longitud [Rothacher et al, 1996b]. Para vectores más largos la combinación de fases y códigos llamada usualmente de Melbourne-Wübbena por haber sido propuesta independientemente por ambos autores, es la opción más efectiva. Se describe aquí un enfoque debido a [Blewitt, 1989]: consiste en construir una combinación de códigos y fases en ambas frecuencias que da directamente la ambigüedad L_{Δ} , libre de cualquier efecto sistemático excepto el multicamino y el ruido de las observaciones combinadas. Esta combinación puede ser expresada como se muestra en (2.20), donde la

$$\phi_{i2}^k - \phi_{i1}^k + \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \cdot (P_1 + P_2) = n_{i2}^k - n_{i1}^k + e_{i(n_2 - n_1)}^k \quad (2.20)$$

notación minúscula usada para las observaciones de fase indica que están expresadas en ciclos de cada portadora.

Como fuera mencionado en §2.2.4, el éxito de esta estrategia requiere disponer de observaciones de código P de muy buena calidad en ambas frecuencias ya que el término del error está dominado por la combinación de dos componentes: la precisión de la observación y el efecto del multicamino de las observaciones de código. Para que la estrategia de Melbourne-Wübbena permita resolver las ambigüedades de L_{Δ} la precisión de la combinación (2.20) debe ser mejor que 0.5 metros.

2.3.6 El retardo troposférico

El efecto de la troposfera es más pequeño y mucho más local que el de la ionosfera. Como no depende de la frecuencia para la banda del espectro electromagnético en que se encuentran las portadoras debe ser siempre modelado. En el posicionamiento diferencial, la correlación espacial del efecto y el empleo de modelos sencillos permiten mantener sus consecuencias por debajo de las tolerancias para prácticamente todas las aplicaciones en el caso de vectores de unos pocos kilómetros. Cuando se miden vectores largos, el retardo troposférico diferencial puede introducir errores en la determinación de la altura de varios centímetros por lo que debe ser modelado cuidadosamente si se requieren resultados de la máxima exactitud.

La troposfera es la capa más baja de la atmósfera. Está definida por el hecho de que en ella, la temperatura disminuye linealmente al aumentar la altura. Su espesor es variable entre extremos 9 km en los polos y 16 km en el Ecuador. Dentro de esta capa, las ondas electromagnéticas interactúan con átomos y moléculas neutros, lo que produce su refracción, que resulta en un retraso de las señales respecto de una señal ideal que se propagara en el vacío. Este fenómeno ocurre también para capas atmosféricas más altas, pero dado que la mayor parte del efecto proviene de la troposfera por su mayor densidad, es tratado en conjunto y denominado convencionalmente retardo troposférico en lugar de retardo por efecto de la atmósfera neutra, que sería estrictamente más apropiado.

El retardo troposférico puede describirse si se conoce la refractividad del aire a lo largo del camino de la señal. Esta responde a la combinación de tres efectos: dos de ellos son debidos a transiciones electrónicas en el ultravioleta de los dipolos inducidos de las moléculas del aire seco y del vapor de agua. El tercer efecto es debido a transiciones rotacionales en el infrarrojo por el dipolo permanente de la molécula de vapor de agua. Los

efectos de estos fenómenos en la propagación de la señal pueden aproximarse respectivamente mediante los términos que conforman la expresión siguiente de la refractividad.

$$N = K_1 \cdot \left(\frac{P_d}{T} \right) \cdot Z_d^{-1} + \left[K_2 \cdot \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \cdot \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] \cdot Z_w^{-1} \quad (2.21)$$

Donde los K_i son coeficientes determinados empíricamente. Los Z_j son los factores de compresibilidad del aire seco y del vapor de agua respecto del caso de un gas ideal, diferentes de 1 en menos que 10^{-3} por lo que pueden en general ser ignorados [Mendes et al., 1999]. Además, también en (2.21), T es la temperatura, P_d la presión parcial del aire seco y e es la presión parcial del vapor de agua.

Una manera práctica de escribir la refractividad N es separándola en dos componentes usualmente denominadas *seca* y *húmeda*.

$$N = K_1 \cdot \frac{P}{T} + K_2^* \cdot \frac{e}{T^2} \quad (2.22)$$

Donde:

$$K_2^* = [(K_2 - K_1) \cdot T + K_3] \quad (2.23)$$

Otra alternativa para expresar a N es separar las contribuciones de los gases que tienen un comportamiento hidrostático de la contribución del vapor de agua, que no lo tiene. Entonces su expresión queda:

$$N = K_1 \cdot R_d \cdot \rho - \left(K_1 \cdot \frac{M_w}{M_d} - K_2 \right) \cdot \frac{e}{T} + K_3 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (2.24)$$

Donde el primer término es la componente hidrostática de la refractividad y M_w y M_d son las masas molares del vapor de agua y del aire seco respectivamente. El comportamiento hidrostático del primer término permite expresar la densidad del aire húmedo en función de la gravedad media y la temperatura absoluta a lo largo de la columna de aire recorrida por la señal. De esta manera es posible la integración directa de la componente hidrostática a lo largo del camino de la señal si se conoce el perfil de temperatura de la troposfera.

El retardo en una señal que viaja desde un satélite a un receptor en la superficie terrestre causado por la troposfera, suponiendo una distribución de densidad atmosférica dependiente solo del radio se expresa mediante (2.25):

$$d_{\text{trop}} = \int_{r_s}^{r_a} [n(r) - 1] \cdot \csc \theta(r) \cdot dr + d_{\text{geo}} \quad (2.25)$$

Donde θ es la elevación aparente o refractada del satélite y d_{geo} es el retardo geométrico, debido a la diferencia entre el camino real de la señal y el camino recto. Este último término se muestra en la expresión (2.26):

$$d_{\text{geo}} = \left[\int_{r_s}^{r_a} [\csc \theta(r) - \csc \varepsilon(r)] \cdot dr \right] \quad (2.26)$$

Donde ε es la elevación del camino recto. Si se despreciara la diferencia entre los caminos recto y refractado considerando $\varepsilon = \theta$ en (2.26), se cometerá un error de 3 mm para una elevación 20 grados, 2 cm para 10 grados y 17 cm para 5 grados para el caso de la componente hidrostática. Para la componente húmeda este efecto es despreciable a 10 grados de elevación y alcanza entre 5 y 10 mm a 5 grados [Mendes et al., 1995][Janes et al., 1991].

Se han desarrollado muchos modelos para calcular el retardo troposférico dependiendo de las hipótesis que se utilicen para poder integrar la ecuación (2.25). La gran mayoría expresa finalmente al retardo total como una combinación del tipo:

$$d_{\text{trop}} = d_d^z \cdot m_d(Z) + d_w^z \cdot m_w(Z) \quad (2.27)$$

Donde el retardo total por el camino inclinado se obtiene de combinar los retardos cenitales hidrostático y húmedo. El primero depende solamente de la presión atmosférica en superficie, siendo el segundo también función de la temperatura y humedad superficiales. En ambos casos, la conversión al retardo inclinado se realiza multiplicándolos por funciones de mapeo adecuadas.

Entre los modelos troposféricos en uso, se destacan los debidos a [Saastamoinen, 1973] y [Hopfield, 1972] por su amplia difusión en los softwares de procesamiento GPS. Durante las dos décadas que siguieron a estos desarrollos, se avanzó principalmente en cuanto al mejoramiento de las funciones de mapeo. Entre las contribuciones más notables podemos mencionar las de Yionoulis, Goad y Goodman, Black, y Black y Eisner que desarrollaron funciones de mapeo para el modelo de Hopfield. Por otra parte, Marini y Murray, Chao y [Davis et al., 1985] trabajaron a partir del modelo de retardo cenital de Saastamoinen. Posteriormente fueron desarrolladas nuevas funciones de mapeo para ser utilizadas en los modelos de observación de VLBI, adecuados para llegar a elevaciones de sólo unos pocos

grados, entre ellas podemos mencionar los modelos debidos a [Lanyi, 1984], Ifadys, [Herring, 1992] y [Niell, 1996]. Muchos de estos modelos han sido descriptos y comparados respecto del trazado de rayos para una atmósfera estándar en [Janes, et al., 1991][Mendes, et al., 1995][Mendes et al., 1999]. Las diferencias relativas que el uso de uno u otro modelo produce en el posicionamiento relativo con GPS han sido investigadas en por ejemplo [Kaniuth et al., 1998b]. De los trabajos mencionados, puede verse que los avances logrados no fueron suficientes para el correcto modelado del efecto: las mediciones de presión atmosférica en superficie permiten calcular la componente hidrostática del retardo con una exactitud milimétrica [Mendes et al., 1999]. Los modelos de retardo húmedo en cambio, tienen errores de varios centímetros debido en parte a su inexactitud, y en parte a que los datos de humedad en superficie son muchas veces poco representativos del comportamiento a lo largo del camino de la señal. Si a esto se agrega la variabilidad temporal de las condiciones meteorológicas, que obliga a mediciones frecuentes de los parámetros meteorológicos superficiales, y la dificultad de operar y mantener equipos de medición meteorológica precisos y calibrados en el campo, se comprende la razón del paulatino abandono de esta práctica durante la primera mitad de la década del '90 en campañas de observación en que no interesa separar las componentes seca y húmeda. El método alternativo desarrollado y que hasta hoy se utiliza en el posicionamiento de alta precisión es el siguiente: se calcula un efecto troposférico a priori, utilizando algún modelo moderno sobre la base de una atmósfera estándar en lugar de datos meteorológicos reales [Brunner et al., 1994][Dodson et al., 1996]. Esta estimación tiene errores de varios centímetros debido principalmente a deficiencias en la predicción de la componente húmeda, a lo que puede sumarse la falta de datos precisos de presión atmosférica local. En regiones tropicales este error de modelo puede alcanzar valores superiores a 30 cm. Para resolver este problema se estiman correcciones al retardo cenital del modelo a partir de las mismas observaciones GPS. Estas correcciones deben ser variables en el tiempo a fin de seguir las fluctuaciones meteorológicas sobre las estaciones. Siguiendo este enfoque, el retardo troposférico puede expresarse como se muestra en (2.28), en que el último término representa a la corrección al modelo troposférico. Será una corrección al retardo total a menos que se cuente con datos de presión atmosférica

$$d_{\text{trop}} = d_d^z \cdot m_d(z) + d_w^z \cdot m_w(z) + \Delta d(t) \cdot m(z) \quad (2.28)$$

precisos. La disponibilidad de la presión atmosférica superficial permitiría el cálculo de la componente hidrostática por lo que la corrección estimada correspondería exclusivamente

al retardo húmedo, y por lo tanto, constituiría información directa acerca de la cantidad de vapor de agua sobre la estación. La función de mapeo correspondiente a la corrección al retardo cenital es en muchos casos una muy simple, como $1/\cos(z)$. Sin embargo esto es estrictamente incorrecto y puede provocar errores sistemáticos de 0.5 cm si se utilizan observaciones con elevaciones de 10 grados y de varios cm si se llegara a elevaciones de 5°. Un procedimiento más adecuado es utilizar la misma función de mapeo, o una conveniente aproximación, que aquella empleada en el cálculo del retardo a priori [Kaniuth et al., 1999b].

La estimación de correcciones a los modelos troposféricos es hoy el método estándar para corregir los errores en los modelos de retardo troposférico en ausencia de perfiles meteorológicos precisos de la troposfera. Sin embargo, su desventaja es que la geometría del posicionamiento con GPS implica una alta correlación entre la altura de la estación y las correcciones troposféricas estimadas. Esta correlación disminuye de 0.8 a 0.5 si se incluyen por ejemplo, observaciones de elevaciones entre 20° y 10° en el procesamiento [Rothacher, 1998a][Kaniuth et al., 1998b]. Sin embargo se debe recordar que la relación señal ruido empeora marcadamente para observaciones de baja elevación debido principalmente al diseño del lóbulo de radiación de las antenas y al incremento de los efectos del multicamino. Estos hechos repercuten negativamente en la calidad de la solución por lo que la máscara de elevación debe surgir de un compromiso entre mejorar la geometría del problema y no incluir datos de muy mala calidad. A manera de ejemplo, se puede citar un análisis del efecto de la máscara de elevación en las coordenadas resultantes para una red regional europea y otra sudamericana en [Kaniuth et al., 1998b] que sugiere una máscara de elevación óptima de 13°. Debe aclararse en este punto que este valor depende en cierto modo de la calidad de las observaciones así como también de las características de los sitios de emplazamiento de las estaciones de observación.

Durante los últimos años han continuado los esfuerzos para el mejoramiento de los modelos troposféricos. Además de proponerse nuevas funciones de mapeo como la ya mencionada [Niell, 1996] que tiene en cuenta variaciones atmosféricas globales estacionales, se puso a prueba la hipótesis de simetría axial para la atmósfera alrededor de la antena que suponen todos los modelos en uso. Se han determinado gradientes horizontales en el retardo troposférico mediante observaciones de VLBI que son coherentes con los obtenidos de datos meteorológicos regionales [Chen et al., 1997]. Con

observaciones GPS y en estaciones con datos de muy buena calidad para elevaciones de hasta 5 grados, se observa una mejora en la repetitividad de las coordenadas horizontales de las estaciones a lo largo de cientos de días de observación. Sin embargo, no está establecido aún que esa mejoría se deba exclusivamente a un mejor modelado troposférico y no a la absorción de otros efectos por parte de los gradientes estimados [Rothacher et al., 1998b][Gradinarski et al., 1999]. La estimación de las correcciones troposféricas de los datos GPS ha abierto un gran campo para la aplicación de GPS como técnica de estudio de la troposfera. La sensibilidad de la técnica a la integral del vapor de agua sobre la estación la hacen adecuada para la estimación de la cantidad de vapor de agua precipitable (PW), parámetro que contiene información útil para la meteorología, tanto para análisis del tiempo cuanto para su pronóstico. Esta cantidad puede obtenerse del retardo troposférico húmedo directamente mediante la expresión (2.29), donde k es una constante que puede ser estimada con una exactitud del 2% a partir de mediciones de temperatura en superficie [Rocken et al., 1999].

$$PW = k \cdot z d_w \quad (2.29)$$

En la actualidad se están llevando a cabo experimentos para la estimación de modelos locales tridimensionales de PW basados en la determinación del retardo troposférico húmedo en tiempo real por medio de una red local de estaciones GPS [Rocken et al., 1999]. Tanto este último enfoque cuanto la detección de gradientes troposféricos con GPS puede constituir un aporte significativo al estudio de los frentes de tormenta, fenómeno responsable de gran parte de las precipitaciones en latitudes medias [Duan et al., 1996][Bar Sever et al., 1998].