

Capítulo 3

Metodología y herramientas de cálculo

3.1 Introducción

En el presente capítulo se describe el software y metodología empleados para el procesamiento de las observaciones GPS utilizadas en esta tesis. Esto no pretende ser un manual del software sino un resumen de sus características más relevantes al trabajo realizado. Parte de las explicaciones respecto del software puede ser encontrada en [Rothacher et al., 1996b], mientras que algunos comentarios referentes a la metodología empleada provienen de la experiencia adquirida a lo largo de las investigaciones descritas en los capítulos 4 y 5.

3.2 Descripción general

Tanto en el establecimiento del marco de referencia POSGAR'98, descrito en el capítulo 4 cuanto en el análisis de los residuos descrito en el capítulo 5 de este trabajo, se utilizó el paquete de procesamiento Bernese GPS Software V4.0 (BSW). Este conjunto de subrutinas ha sido desarrollado en el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna, por M. Rothacher, G. Beutler, W. Gurtner, E. Brockmann y L. Mervart. Es un producto en continuo desarrollo que incluye el estado del arte de los modelos empleados en el procesamiento de datos GPS. El

BSW es utilizado rutinariamente por el Centro Europeo de Determinación Orbital (CODE), uno de los siete centros de cálculo cuyas soluciones para las órbitas GPS y parámetros de orientación terrestre son utilizadas en la generación de los productos combinados que distribuye el IGS. La versión de que se dispone en la FCAG tiene algunas modificaciones respecto de la distribución original (1996) realizadas por Klaus Kaniuth, del DGFI y el autor (1997-1999) en el contexto del presente trabajo.

Como se mencionara en §2.2.3, existen dos enfoques básicos en el procesamiento de datos GPS: procesar las observaciones sin diferenciar, o construir previamente simples o dobles diferencias de fase. Si se es riguroso en la definición y aplicación de los modelos involucrados, y en ausencia de una sincronización precisa a priori entre los relojes de los satélites y receptores, no hay una diferencia conceptual entre uno u otro enfoque en cuanto a la información de posicionamiento absoluto que contienen [Kuang et al., 1996]. Sin embargo, existen condiciones que pueden hacer operativamente más ventajoso procesar observaciones sin diferenciar. Por ejemplo: disponer de una red con una gran cantidad de estaciones que observen simultáneamente, correcciones a priori para los relojes de los satélites GPS y observaciones de código de alta calidad en ambas frecuencias haría más conveniente un procesamiento no diferencial. Por el contrario cuando alguna de estas condiciones no se cumple, la conveniencia del posicionamiento diferencial va ganando terreno.

Paquetes de procesamiento científicos como GIPSY [Webb et al., 1997] y GEONAP [Wübbena, 1991][GEO++®, 1994] trabajan directamente con las observaciones sin diferenciar. Los programas comerciales en general modelan las dobles diferencias de fase. El Bernese GPS Software (BSW) también lo hace. La diferencia entre ellos se encuentra en la complejidad de los modelos utilizados en uno y otro caso.

El procesamiento de observaciones GPS con el BSW tiene la estructura presentada en la figura 3.1. A continuación se describen sus lineamientos generales y en particular las estrategias utilizadas para el cálculo del marco de referencia POSGAR'98.

3.3 Procesamiento previo

En esta sección se describe el tratamiento previo que es necesario realizar sobre las observaciones GPS con el BSW a fin de que estén en condiciones de ser ajustadas a un modelo multiestación de dobles diferencias de fase.

3.3.1 Preparación de las observaciones

Chequeo de la información almacenada en los archivos de sitio.

Este trabajo preliminar consiste en controlar la consistencia de los nombres de las estaciones ingresadas por los operadores con los nombres de los archivos. Su coincidencia es necesaria para el correcto funcionamiento de los programas que convierten desde el formato propietario de los datos originales, asociado a los receptores, al formato interno usado por Bernese, pasando por el formato Receiver INdependent EXchange Format (RINEX) [Gurtner, 1997].

Conversión de las observaciones del formato propietario de los receptores a RINEX

La transformación a RINEX había sido realizada ya en 1994 para los datos de POSGAR, por lo que no fue necesario hacerla nuevamente. Este paso sí fue realizado en el caso de las campañas de vinculación a SIRGAS y para las redes utilizadas como control.

Conversión de las observaciones de RINEX al formato propietario del BSW

Este paso es imprescindible ya que el programa trabaja internamente con archivos de observaciones en un formato propio. Cada archivo de observación RINEX genera otros cuatro: Dos archivos de encabezado, y dos archivos que contienen las observaciones de código y de fase respectivamente.

3.3.2 Pre-procesamiento de las observaciones de códigos

Pre procesamiento con códigos

Consiste en primer lugar en una verificación de las características estadísticas de la señal de código (CODCHK), esto es básicamente su continuidad y precisión, a fin de detectar tempranamente problemas en satélites que puedan dificultar el procesamiento en instancias posteriores.

Posicionamiento puntual con códigos (CODSPP)

Consiste en la resolución del problema del posicionamiento puntual para cada estación. Lo más importante del posicionamiento puntual con códigos es que se obtiene para cada época y estación una corrección al reloj del receptor con una precisión de al menos un microsegundo que se almacena en los archivos de observaciones de fase. Estas correcciones son imprescindibles para linealizar las observaciones de fase. La razón es que a pesar de que al combinar las observaciones el término de la corrección de reloj del receptor desaparece explícitamente de las ecuaciones, el cálculo del término geométrico exige conocer el instante de observación al microsegundo. En este sentido se debe recordar que el error del reloj local puede llegar a un milisegundo en algunos receptores.

Si los receptores recuperan el código P, en este paso puede utilizarse la combinación de códigos libre del efecto de la ionosfera. En esta instancia se aplica un filtrado para eliminar observaciones discordantes comparando los residuos de las observaciones con un máximo establecido por el usuario. Se tomó este máximo en cinco veces el error estándar a priori de la observación de códigos, para el que se propuso un valor de 20 metros. En este paso puede aplicarse un modelo troposférico sencillo o directamente ninguno, ya que este efecto es prácticamente despreciable si lo comparamos con la Disponibilidad Selectiva (SA) que afecta de lleno al posicionamiento puntual en todas las observaciones procesadas en este trabajo, ya que todas son anteriores a mayo de 2000.

En la salida de CODSPP se controló que todos los satélites observados en cada estación tuvieran estimaciones a posteriori del error de una observación de aproximadamente 30 metros o menor y se prestó atención al número de observaciones discordantes según el criterio

delineado más arriba. Si una estación parecía tener problemas, se tomaba nota para más tarde volver a este paso en caso de encontrar problemas en el procesamiento de las fases para esa estación y ese día.

3.3.3 Utilización de efemérides precisas

En forma independiente al procesamiento de las observaciones en sí, se deben obtener las efemérides precisas y los parámetros de rotación terrestre correspondientes a los días de observación a fin de:

a) Transformar estas efemérides del marco de referencia terrestre en que vienen expresadas, como por ejemplo ITRF94, a un marco celeste geocéntrico cuyos ejes apuntan a direcciones fijas en el espacio en lugar de acompañar a la Tierra en su rotación.

b) En el sistema de referencia pseudo inercial descrito en a) se integra un arco de órbita para cada sesión y cada satélite definido por los seis parámetros de Kepler más nueve adicionales que pueden absorber efectos no modelados, principalmente los de la presión de radiación solar sobre el satélite. Este ajuste se realiza tomando las efemérides precisas como si fueran observaciones realizadas a cada satélite cada 15 minutos.

Los arcos de órbita que resultan de esta integración se utilizan luego para calcular la posición de los satélites en cualquier instante de tiempo.

3.3.4 Pre-procesamiento de las observaciones de fase

Se parte de las órbitas calculadas y los archivos de observaciones de fases habiendo incorporado las correcciones de reloj de las estaciones obtenidas del posicionamiento puntual con códigos.

Combinación de observaciones de fase

Cuando se combinan las observaciones para formar simples y dobles diferencias, las ventajas en cuanto a la simplificación de los modelos son evidentes y fueron mencionadas extensamente en §2.2.3. Sin embargo, si se dispone de más que dos estaciones observando simultáneamente en una sesión, el modelo estadístico de las pseudo observaciones resultantes, sean estas simples o dobles diferencias, se complica por la aparición de correlaciones entre ellas. Esto es claro ya en el nivel de las simples diferencias si se piensa que dos vectores que comparten un vértice y a los que corresponden sendas series de simples diferencias tienen para cada época una observación común. Esto equivale a decir que las simples diferencias correspondientes no son estadísticamente independientes.

La mayoría de los programas de procesamiento GPS comerciales ignora las correlaciones entre los vectores conformados en una misma sesión y permiten procesar y luego ajustar tantos vectores como combinaciones posibles haya entre las estaciones que miden simultáneamente. Esto causa una falsa sobreabundancia de vectores en el ajuste final y una estimación de errores estadísticamente incorrecta.

En este trabajo se tuvieron en cuenta las correlaciones entre las observaciones simultáneas. Esto hizo indispensable procesar solamente un conjunto de vectores que no fuera redundante. Es decir, que no fuera posible generar una observación de simples o dobles diferencias correspondiente a un dado par de estaciones a partir de una combinación de simples o dobles diferencias simultáneas provenientes de otros pares de estaciones. Esto sucedería por ejemplo si se observara en tres puntos simultáneamente y luego se quisiera ajustar conjuntamente las observaciones de los tres vectores posibles.

Existen varios criterios para la selección del conjunto de vectores a procesar en una sesión de entre todos los posibles. En general en este trabajo se prefirieron las combinaciones de estaciones que hicieran máxima la cantidad de observaciones procesadas. Como segunda prioridad, se trató de formar vectores tan cortos cuan fuera posible. Finalmente, en casos en que se dispone de un gran número de ocupaciones para cada estación en días sucesivos se trata de variar la conformación de los vectores a fin de no tener en todas las sesiones las mismas combinaciones de estaciones. La razón de esto es que en días sucesivos, pequeños efectos

causados por la troposfera o errores en los modelos de la variación de la posición de los centros de fase de las antenas o incluso el multicamino, pueden repetirse en forma muy parecida, generando efectos sistemáticos extremadamente difíciles de detectar.

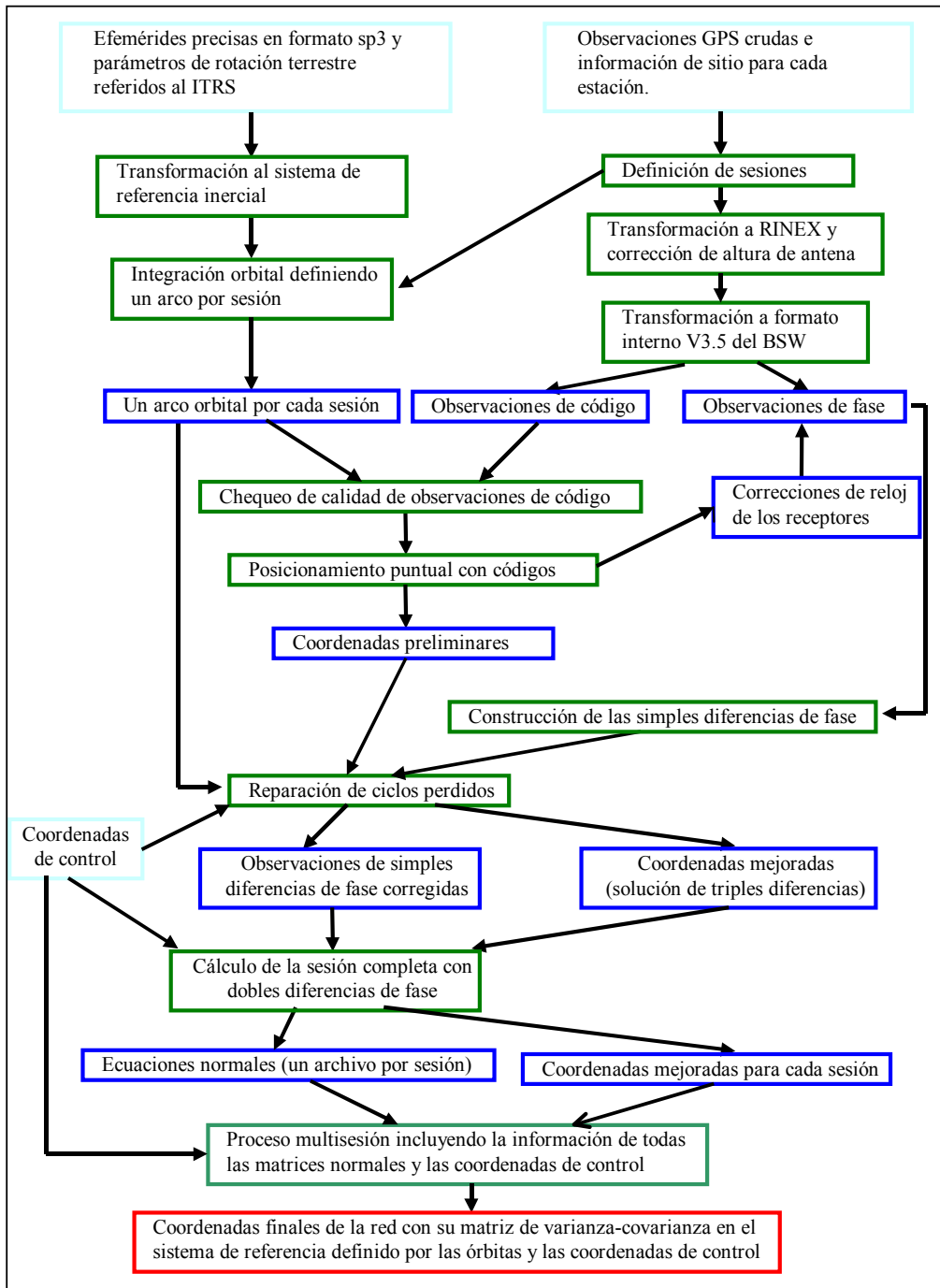


Figura 3.1: Esquema del flujo de procesamiento del Bernese GPS software V 4.0

Una vez elegido un conjunto de pares de estaciones no redundante por sesión, se forman las simples diferencias de fase y en adelante se trabaja solamente con esta información.

Reparación de ciclos perdidos

El pre proceso de las observaciones de fase se realiza vector por vector y su objetivo básico es la reparación de ciclos perdidos en las portadoras L_1 y L_2 . Esto consiste en primer lugar de un chequeo de continuidad. Se realiza proponiendo un comportamiento suave de las dobles diferencias de fase. Por ejemplo, si se supone que para un intervalo corto éstas se comportan como una parábola, entonces se hacen diferencias entre las observaciones hasta aproximar la tercera derivada del polinomio propuesto. Se controla estadísticamente la diferencia entre este valor estimado para la tercera derivada y cero, y si esta fuera significativa se considera que allí hay una discontinuidad. Este proceso se repite para todas las observaciones en ambas frecuencias y aquellas en las que se detectan discontinuidades son marcadas para luego ser excluidas del paso siguiente: el cálculo de una solución a partir de *triples diferencias de fase*.

Las triples diferencias se forman restando dobles diferencias consecutivas dentro de cada serie correspondiente a un dado par de satélites y un dado par de estaciones. Carecen de ambigüedad y como además el efecto troposférico cambia lentamente respecto del intervalo entre observaciones, que en general es de pocas decenas de segundos, el modelo de las triples diferencias es muy sencillo: contiene sólo un término con información geométrica, la variación temporal de la ionosfera, y ruido de observación, tanto para el caso de L_1 cuanto para el de L_2 . Si se utiliza el observable libre de efecto ionosférico L_3 , en las triples diferencias se tendrá solamente el término geométrico y ruido de observación.

Se calcula entonces con triples diferencias de L_3 una solución para las componentes del vector procesado. Esta tiene una precisión sólo submétrica ya que la información geométrica de las triples diferencias está muy atenuada debido a lo poco que varía la posición de los satélites respecto de las estaciones durante el corto intervalo entre mediciones sucesivas. De todos modos la solución de triples diferencias presenta como ventajas el hecho de responder a un modelo muy sencillo y de que los ciclos perdidos afectan solamente a la observación en la cual se producen y no a las subsiguientes. Se toma como ejemplo para lo siguiente el caso en que se procesa con dobles frecuencias un vector largo ya que es el caso que se da casi

exclusivamente en este trabajo. A partir de la solución de triples diferencias en L_3 , en la que participan solamente las observaciones en que no se han detectado saltos en el paso anterior, se calculan los residuos de las triples diferencias de fase para el observable libre de ionosfera L_3 a los que se denominará aquí r_3 . Los residuos son calculados incluyendo todas las observaciones. La reparación de los ciclos perdidos en L_1 y en L_2 se realiza de la siguiente manera: llamando b_1 y b_2 a los tamaños medidos en ciclos de los saltos para una época en L_1 y L_2 , se construyen los residuos de las triples diferencias para ambas frecuencias como se muestra en (3.1):

$$\begin{aligned} r_1 &= b_1 \cdot \lambda_1 + (I_{ij}^{kl}(t_n) - I_{ij}^{kl}(t_{n-1})) \\ r_2 &= b_2 \cdot \lambda_2 + \frac{f_1^2}{f_2^2} (I_{ij}^{kl}(t_n) - I_{ij}^{kl}(t_{n-1})) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Utilizando los residuos descritos en (3.1) se construye el residuo que le correspondería en L_3 combinándolos como se indica en (2.10). La búsqueda de ciclos perdidos se realiza en cada época partiendo de la suposición de que b_1 y b_2 son cero. Esta hipótesis se verifica por medio de dos condiciones: la primera se muestra en (3.2):

$$r_3 \leq 3 \cdot \sqrt{8} \cdot \sqrt{\left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \sigma_1 \right)^2 + \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \sigma_2 \right)^2} \quad (3.2)$$

Que no es otra cosa que esperar que los residuos en las triples diferencias de L_3 se mantengan por debajo de tres veces la desviación estándar esperada para el error de la combinación L_3 . Este límite alcanza 74mm si σ_1 , y σ_2 valen ambos 3 mm.

La segunda condición es que el cambio en el efecto ionosférico diferencial medio para las dos frecuencias, calculado a partir de r_1 y r_2 como se muestra en (3.3), no supere un máximo

$$m = \frac{1}{2} \cdot \left(r_1 + \frac{f_2^2}{f_1^2} \cdot r_2 \right) \quad (3.3)$$

esperable establecido por el usuario, M_{ion} (3.4).

$$m \leq M_{ion} \quad (3.4)$$

De modo que la hipótesis de ausencia de salto se acepta si se cumplen ambas condiciones. En caso contrario, se prueba con distintas combinaciones de b_1 y b_2 hasta encontrar una que

satisfaga (3.2.) y (3.4). Seguidamente se procede a corregir las observaciones de L_1 y L_2 . Si en cambio, ninguna combinación de saltos en L_1 y L_2 satisface las dos condiciones, la observación es marcada y eventualmente se puede definir una nueva ambigüedad en esa época según se estime cual sea la causa de la discontinuidad. En general esto último no puede saberse a priori durante el pre procesamiento por lo que resulta más prudente sólo marcar la observación y luego analizar los residuos del ajuste de dobles diferencias para controlar que haya sido la decisión correcta.

Es evidente que la corrección exitosa de los ciclos perdidos depende fuertemente de los valores seleccionados para σ_1 , σ_2 y M_{ion} . Para observaciones de alta calidad, 3 mm es un valor adecuado para σ_1 y σ_2 , que pueden tomarse iguales a pesar que L_2 tiene un poco más de error que L_1 . Para las observaciones de POSGAR por ejemplo, en que se midió con receptores que bajo AS cuadran la señal de L_2 para deshacerse del código P, la corrección de ciclos perdidos fue bastante difícil, se tomaron valores de 4 mm para σ_1 y σ_2 . Esto hace que se dificulte separar saltos de $\frac{1}{2}$ ciclo de L_2 del ruido y obligó en muchos casos a una edición manual de los datos. Si se hubiera utilizado un valor inferior para σ_1 y σ_2 el algoritmo hubiera interpretado numerosos residuos como candidatos a ciclos perdidos e incluso podría haber corregido erróneamente observaciones sólo por tener alto ruido. El parámetro M_{ion} no debe ser demasiado pequeño, ya que en ese caso, una gran cantidad de observaciones serán interpretadas como candidatas a tener ciclos perdidos y puede que no se encuentren combinaciones de saltos en L_1 y L_2 adecuadas, lo que resultaría en una gran cantidad de observaciones marcadas. En este trabajo se utilizaron valores de M_{ion} del orden de pocos ciclos de L_1 . El parámetro M_{ion} cobra mayor importancia cuando se procesan las frecuencias L_1 y o L_2 por separado. En estos casos, la condición (3.4) es la única que se utiliza en el algoritmo para buscar ciclos perdidos.

Una vez reparados los ciclos perdidos en todos los vectores se está en condiciones de calcular la sesión utilizando dobles diferencias de fase.

Ya se ha mencionado que la reparación de ciclos perdidos puede ser una tarea delicada según sea la calidad de los datos de que se disponga. En caso que hubiera problemas no resueltos en el preproceso, estos pueden ser detectados luego al procesar el vector con dobles diferencias.

En esa instancia se controla que el RMS a posteriori de la observación de simples diferencias no sea muy superior al producto del error a priori de la observación de fase por la raíz cuadrada de 2. Si así sucediera, se deben examinar los residuos del ajuste con dobles diferencias de cada vector cuidadosamente a fin de detectar posibles saltos en la portadora aún no corregidos. En caso de encontrarlos, se debe realizar una edición manual de los archivos e incluso a veces volver al pre-procesamiento de fase a fin de que el programa cree nuevas ambigüedades en épocas en que no se haya podido reparar alguna discontinuidad. Este proceso se repite hasta que no se observen saltos evidentes en los residuos de ningún vector de la sesión.

3.4 Cálculo de las sesiones

En esta instancia se utiliza toda la capacidad del programa para modelar las dobles diferencias de fase, ya que es aquí donde se exige la mayor precisión en las coordenadas a estimar.

3.4.1 Características más relevantes del procesamiento de fases

El software tiene la posibilidad de calcular modelando dobles diferencias de observaciones de fase en cualquiera de las portadoras o usar varias combinaciones de ellas. En este trabajo, por la longitud de los vectores y la larga duración de las sesiones se utilizó siempre la combinación libre de ionosfera L_3 .

Efemérides

Las efemérides precisas se utilizan luego del tratamiento explicado en §3.3.3. El uso de estas órbitas implica conocer las posiciones de los satélites con una precisión de pocos centímetros lo que asegura, como se explicó en §2.3.1, que los errores causados por las órbitas serán despreciables en el cálculo de los vectores. Estas efemérides están acompañadas por correcciones precisas a los relojes de los satélites. La utilización de estas correcciones de reloj en las efemérides precisas del IGS está limitada porque se proveen valores sólo cada 15 minutos.

Correlaciones entre las observaciones

Se modelan correctamente las correlaciones entre observaciones simultáneas, esto es lo que se llama modo multiestación, cuyas ventajas han sido mencionadas en §3.3.4.

El efecto troposférico

Es considerado como la suma de un valor dado por un modelo a priori, evaluado en condiciones atmosféricas estándares, y una corrección que se estima a partir de los mismos datos GPS. Las dependencias estándares de la presión, temperatura y humedad relativa respecto de la altura de la estación utilizadas por el software se muestran en (3.5):

$$\begin{aligned} P &= P_{\text{sup}} \cdot (1 - 2.26 \times 10^{-5} \cdot h)^{5.25} \\ T &= T_{\text{sup}} - (0.0065 \cdot h) \\ H &= H_{\text{sup}} \cdot e^{-(6.396 \times 10^{-4} \cdot h)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

[P]= mbar, [T]=°K, [H]= %

Este modelo se evalúa en condiciones atmosféricas en superficie al nivel del mar que pueden ser medias o particulares de la estación según sea la disponibilidad y calidad de los datos meteorológicos locales. Ya se mencionó en §2.3.6 que el uso de datos meteorológicos locales en cada estación es requerido solamente cuando la investigación atmosférica forma parte de los objetivos del trabajo.

Las correcciones a los modelos troposféricos son variables en el tiempo en caso que las estaciones observen por períodos suficientemente prolongados como para que el efecto diferencial de la troposfera presente variaciones considerables. La versión del software utilizada en este trabajo tiene incorporados los modelos troposféricos de [Saastamoinen, 1973], [Davis et al., 1985], [Lanyi, 1984], Hopfield modificado [Remondi, 1984], [Baby et al., 1988] y [Niell, 1996] e incluso se tiene la posibilidad de utilizar solamente la parte de los modelos que estima el retardo debido a la componente seca de la troposfera. Las correcciones estimadas por estación tuvieron una validez de no más de cinco horas. Los modelos troposféricos mencionados no están incluidos en la distribución estándar del software sino que fueron agregados en la versión disponible en la FCAG por Klaus Kaniuth. En la distribución estándar además, las correcciones a los modelos troposféricos a priori utilizan una función de mapeo $1/\cos(z)$, mientras que la versión usada incluye además la posibilidad de utilizar una

aproximación de la función de mapeo correspondiente a algunos de los modelos a priori disponibles, sea Hopfield modificado [Remondi, 1984], [Davis et al., 1995] sea [Niell, 1996].

Comportamiento del centro de fase de las antenas

Ya fue explicado en §2.3.3 el comportamiento de los centros de fase de las antenas GPS y sus consecuencias en el posicionamiento. En el trabajo realizado se utilizaron los offsets medios y los modelos de variaciones de la altura de los centros de fase de las antenas GPS publicados por el IGS en 1996 con el nombre de IGS.01 [Rothacher et al., 1996a].

Estrategia de resolución de ambigüedades.

El BSW permite aplicar distintas estrategias para la resolución de ambigüedades como números enteros. Puede hacerlo sobre varias combinaciones de las dos portadoras y permite usar cuatro métodos diferentes de búsqueda [Rothacher et al., 1996b]. En vectores hasta unas pocas decenas de kilómetros se estimaron las ambigüedades como enteros. En virtud de lo mostrado en la figura 2.5 en §2.2.4, y debido a que la duración de las sesiones en el trabajo realizado fue siempre superior a las seis horas, la diferencia entre resolver las ambigüedades como enteros y estimarlas como números reales no fue considerada significativa. En consecuencia se trabajó siempre con ambigüedades de punto flotante.

Acerca de las condiciones que se aplican en el procesamiento de fase con el BSW

En varias instancias del procesamiento, el BSW requiere del usuario la asignación de pesos a priori para algunos parámetros. Es menester comprender cómo funciona este mecanismo para poder introducir información a priori en el ajuste y asignarle el peso deseado. Se tomará como ejemplo el caso en que se conocen con cierta exactitud las coordenadas a priori de una estación: en el BSW se tiene la opción de darle peso a estas coordenadas asignándoles una desviación estándar a priori. Sin embargo, este parámetro es utilizado por el programa para calcular el peso de una ecuación de observación artificial que se agrega al sistema a resolver y dice que las coordenadas de la estación son las introducidas por el usuario. El peso de esta ecuación en el ajuste se calcula como se muestra en (3.6), donde n representa el número total de observaciones en el ajuste.

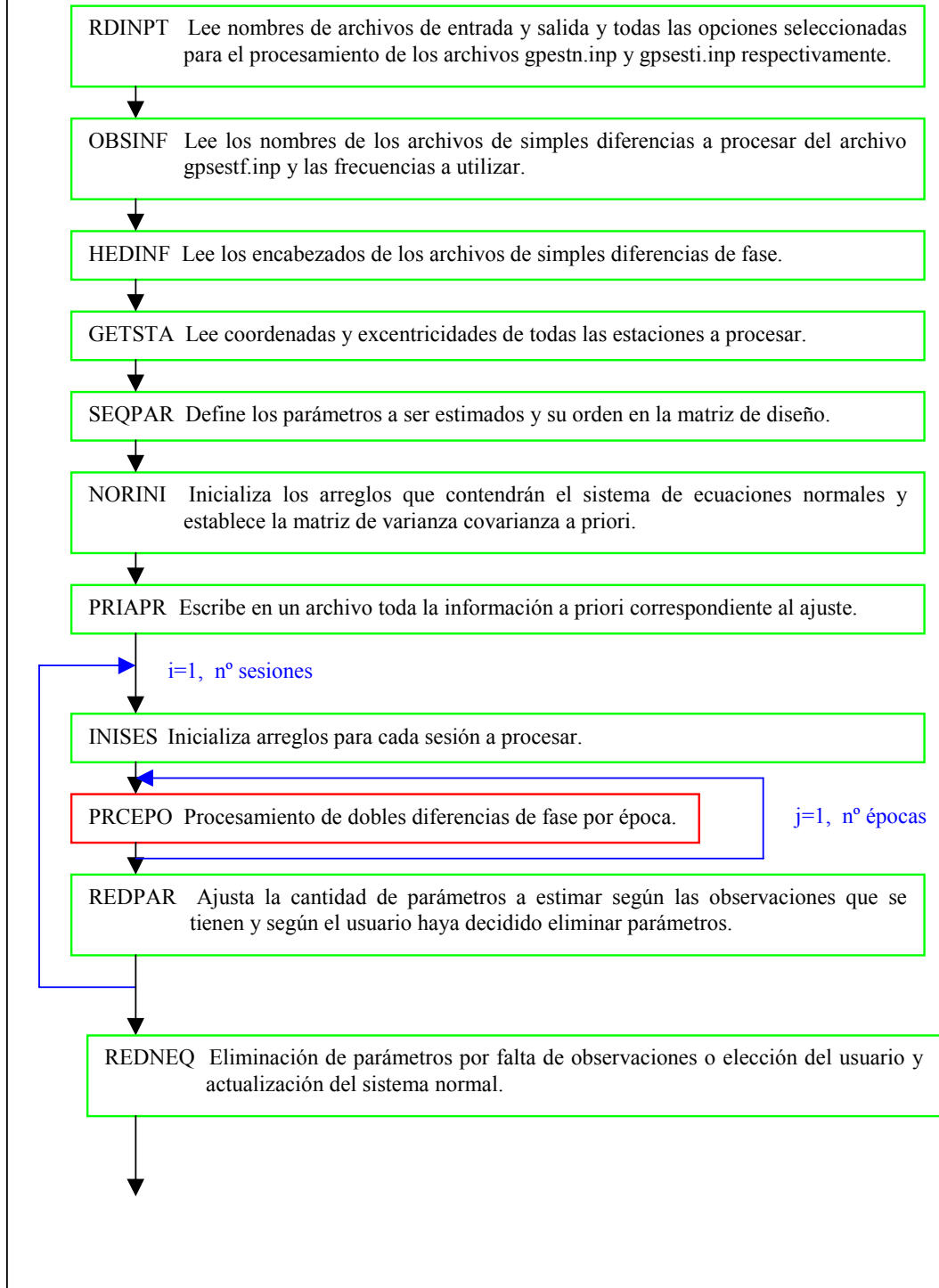
$$w = \frac{\sigma_{L1}^2}{\sigma_{Coord}^2} \cdot \frac{1}{n} \quad (3.6)$$

En consecuencia debe tenerse bien presente que hay dos factores que tienen influencia determinante sobre el peso que tiene la condición introducida por las coordenadas a priori y sus desviaciones estándares en el ajuste: el primero es el valor asignado por el usuario al error a priori de una observación de fase de L_1 . El segundo factor es la cantidad de observaciones que son incluidas en el ajuste. Como consecuencia, una desviación estándar de 5 mm para las coordenadas de un punto tendrán mucho mayor peso en el ajuste de un vector que en el de una sesión con 10 vectores que contenga 10 veces más observaciones. En consecuencia, las desviaciones estándar a priori introducidas por el usuario en el BSW deben ser vistas como índices relativos de peso. Estos pueden ser adecuados por prueba y error a la cantidad de observaciones que se tenga sobre la base de un análisis de sus efectos en el ajuste y a la información que se disponga a priori acerca de los parámetros a pesar. Siguiendo con el ejemplo de las coordenadas de una estación: suponiendo por ejemplo que sus errores son inferiores a un centímetro, se les asignará cierta desviación estándar a priori en el ajuste. Para verificar si el peso asignado es el adecuado se puede comparar, después del ajuste, las coordenadas estimadas con las propuestas inicialmente para la estación. Si las diferencias fueran superiores a un centímetro, será indicación de que se debe disminuir la desviación estándar a priori de las coordenadas para aumentar el peso de esta información.

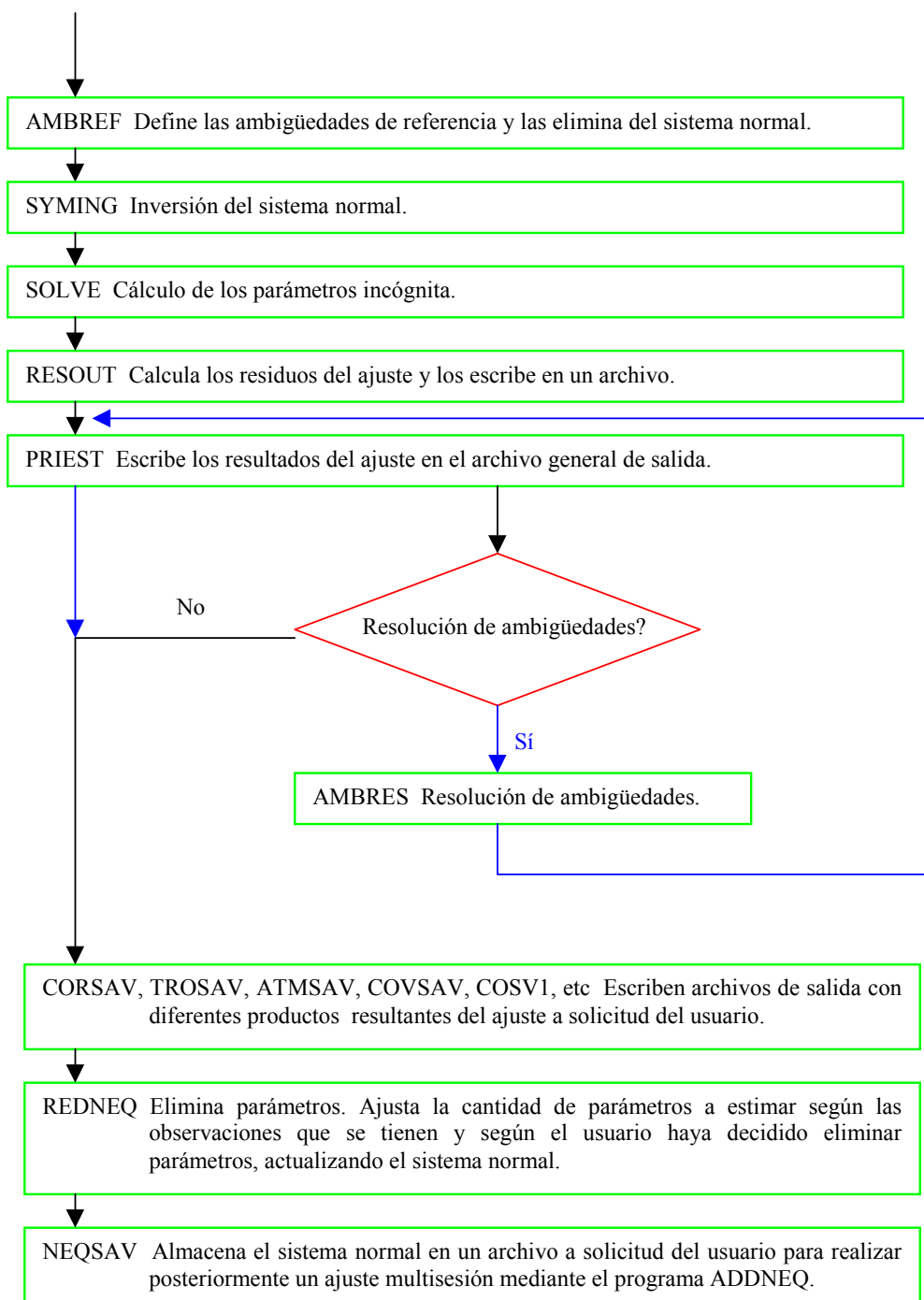
3.4.2 Estructura del programa principal de estimación de parámetros del BSW

El procesamiento descrito en la sección anterior se realiza mediante el programa GPSEST o programa de estimación de parámetros del BSW. Este llama a varias subrutinas que realizan desde la lectura de los parámetros de procesamiento seleccionados por el usuario hasta la impresión de los resultados finales, pasando por la implementación y ajuste del modelo de las dobles diferencias de fase. Se describirá esquemáticamente su conformación y funcionamiento dado que es el programa más importante del BSW y constituye la estructura donde deben realizarse modificaciones si se trabaja en el mejoramiento del modelo de la observación GPS de fase.

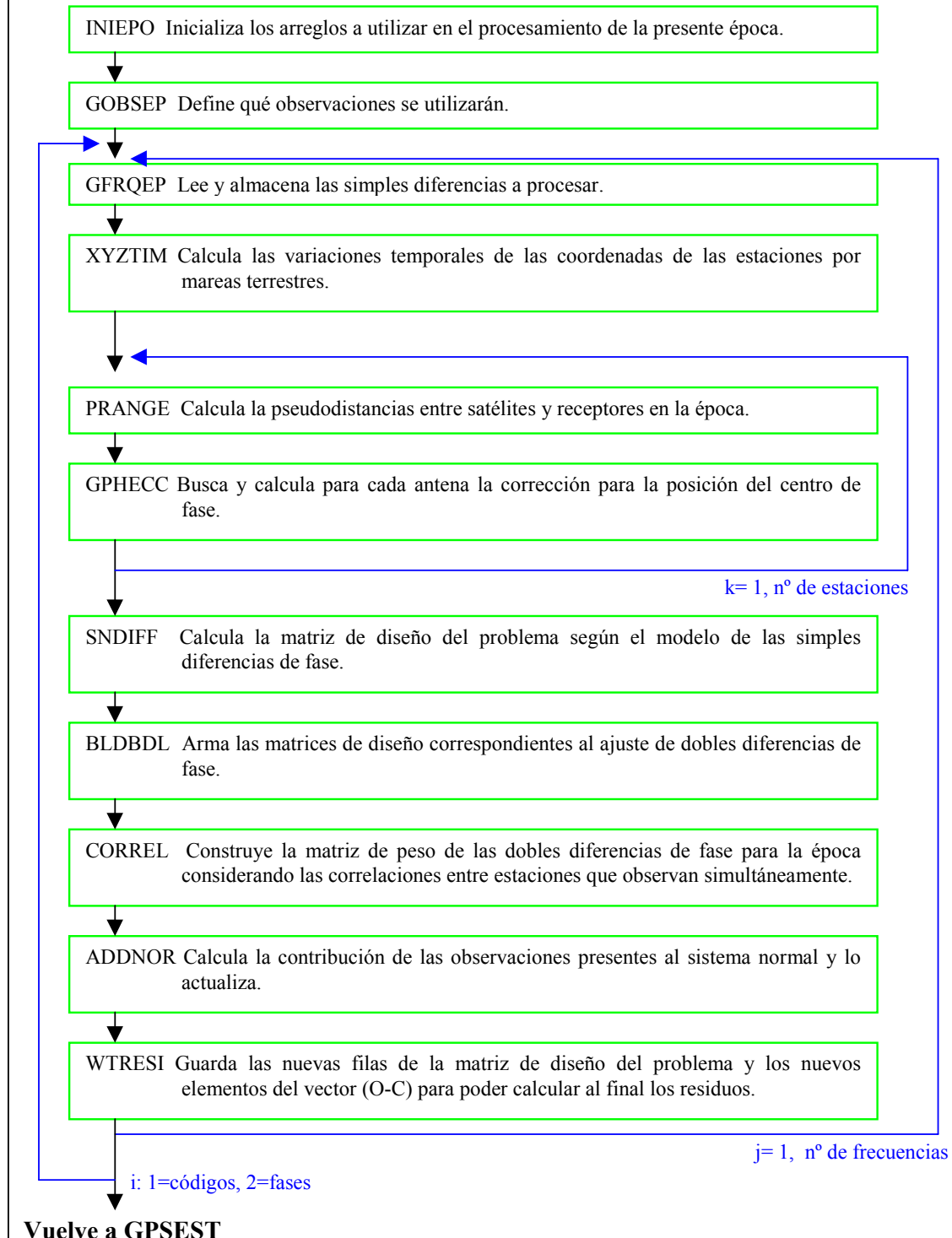
La estimación de parámetros en el BSW



La estimación de parámetros en el BSW (cont.)



El procesamiento por época (PRCEPO)



3.4.3 Resultados por sesión

Como producto del procesamiento multiestación se obtiene un conjunto de soluciones, una por cada sesión. En este trabajo se calculan siempre las sesiones en forma casi libre, esto es asignando pesos bajos a las coordenadas de partida a fin de producir soluciones dependientes sólo de las órbitas y no distorsionadas por condicionar fuertemente la red a coordenadas que podrían tener una exactitud insuficiente respecto del sistema de referencia de las efemérides. Los indicadores de precisión interna de la solución, esto es principalmente el RMS a posteriori de la observación de simples diferencias, los valores de los parámetros de corrección troposférica y el RMS de las ambigüedades flotantes estimadas, sirven para detectar problemas en cada una de las sesiones.

Además de las coordenadas, en esta etapa se almacenan la matriz normal de cada sesión así como el vector de observaciones menos el modelo evaluado en los valores iniciales de los parámetros desconocidos. Esta es una forma compacta y muy conveniente de almacenar la información de cada sesión para luego integrar todo en un ajuste multisesión.

Un producto de los ajustes por sesión que resulta de suma utilidad en este trabajo, como se muestra en el capítulo 5, son los residuos de las dobles diferencias involucradas en el ajuste. El programa fue modificado por Klaus Kaniuth y el autor a fin de que proveyera, además de los residuos, las elevaciones y acimutes de todos los satélites para cada época y para todos los vectores que participan de cada sesión. De esta manera pueden estudiarse los residuos del ajuste en función de las direcciones de procedencia de las señales correspondientes. Estos conceptos serán desarrollados con mayor detalle en el capítulo 5.

3.5 El ajuste multisesión

Habiendo almacenado las ecuaciones normales de todas las sesiones incluidas en el cálculo, se procede a realizar el ajuste final. En esta instancia se presentan tres problemas principales que es preciso resolver: primeramente se debe introducir el sistema de referencia en el ajuste controlando la perturbación que esto produce sobre la geometría interna de la red. El segundo problema es controlar la calidad de la solución final a fin de encontrar buenos estimadores de la exactitud de los parámetros calculados. Esto se puede hacer si la red tiene redundancia, o sea si a lo largo de las sesiones se han podido cerrar figuras. El resultado de este análisis es la repetitividad de las coordenadas de las estaciones. Finalmente el tercer problema es asegurar el óptimo aprovechamiento de la calidad de las coordenadas de control a fin de asegurar la máxima exactitud de las coordenadas finales respecto a ITRF.

3.5.1 La introducción de las coordenadas de control en el ajuste

La introducción del sistema de referencia puede hacerse introduciendo las coordenadas de las estaciones de control como fijas, que es equivalente a introducir las coordenadas a priori de los puntos de control con un peso extremadamente grande en el ajuste. Otra manera de hacerlo es introducir dichas coordenadas en el ajuste con un peso de alguna manera acorde con su exactitud nominal. La introducción de estos pesos es una operación delicada y debe hacerse de acuerdo a lo explicado en el final de §3.4.1. Sin embargo, existe un elemento más a tener en consideración cuando se desea materializar un sistema de referencia en una región con dimensiones de miles de km. Es posible que la compatibilidad de las efemérides con las coordenadas de control sea algo peor de acuerdo a las observaciones procesadas que lo indicado por la información a priori. Esto es evidente si se observa una deformación de la red ajustada respecto de una solución libre cuando se ha condicionado el ajuste para que la solución presente diferencias iguales o menores que los errores a priori respecto de coordenadas de control. Si existen elementos referentes a la solución combinada, como la repetitividad de las soluciones libres, calculada a partir de transformaciones de similaridad

adecuadas, que indiquen una calidad comparable a la de las coordenadas de control, conviene relajar los pesos de las coordenadas de control hasta que las deformaciones de la red ajustada sean despreciables respecto de la red libre. En caso que la red calculada sea peor que el control, será más recomendable conservar los pesos aunque la red se deforme un poco y considerar a las deformaciones como una buena indicación de la exactitud de las coordenadas finales.

3.5.2 Acerca de la exactitud de la solución combinada

Los indicadores naturales de la precisión de la solución final son las desviaciones estándar de las coordenadas provenientes del ajuste combinado. Sin embargo, para el cálculo de una red que involucre cientos de miles de observaciones estos parámetros mostrarán valores demasiado optimistas para ser tomados como un índice de exactitud. La razón de este fenómeno es simplemente el hecho de que no es cierto que los residuos del ajuste sean aleatorios, sino que se encuentran afectados por varios efectos no completamente modelados. Sin embargo el modelo de las observaciones no considera esto y de todos modos, las desviaciones estándar de las coordenadas calculadas disminuyen de acuerdo a la cantidad de mediciones involucradas en el ajuste. Esto es evidente si se comparan los resultados de dos sesiones calculadas independientemente y que involucren a las mismas estaciones. Aún cuando ambas sesiones materialicen el mismo sistema de referencia, si no se las ha deformado mediante pesos excesivos en los puntos de control, las diferencias entre las coordenadas de dichas sesiones son en general bastante mayores que las desviaciones estándar resultantes del ajuste. Para obtener indicadores más confiables de la exactitud de la solución puede procederse como se describe a continuación: se obtiene en primer lugar un resultado habiendo aplicado pesos muy bajos a las coordenadas a priori de todos los puntos de control. Esto es usualmente denominado solución libre. Los bajos pesos en las coordenadas a priori dejan que las órbitas definan el sistema de referencia completamente y a la vez evitan deformaciones a causa de posibles incompatibilidades entre efemérides, observaciones y coordenadas de control. Esta solución libre puede ser comparada con las de cada sesión, también libre, por intermedio de transformaciones de similitud ya que en estas condiciones se puede considerar que cada solución materializa un sistema de referencia levemente diferente. Por

esto, para ver deformaciones entre cada sesión y la solución combinada, se deben observar los residuos de estas transformaciones y no los parámetros de transformación obtenidos. Las desviaciones estándar de estos residuos pueden aportar una indicación más realista de la exactitud de las coordenadas finales que las resultantes del ajuste.

3.5.3 Densificación de ITRF

Cuando la intención del trabajo es la densificación del marco ITRF, se debe seguir las convenciones del IERS para su determinación detalladas en el capítulo 1. Esto implica el uso de efemérides precisas y parámetros de rotación terrestre determinados por el IGS. Respecto a las coordenadas de las estaciones de control, se debe tener muy en cuenta que las estaciones que conforman el ITRF poseen coordenadas cuyos errores nominales tienen significado solamente para su época de definición. En consecuencia, antes de realizar el ajuste deben compatibilizarse las coordenadas de las estaciones de control con las de los satélites. Esto se hace transformando las coordenadas de los puntos de control ITRF primero a la época central de las observaciones utilizando sus propias velocidades. Luego se las debe transformar (si fuera necesario) al marco de referencia que materializan las efemérides. En caso que algunos puntos de control de la red no posean aún velocidades confiables determinadas a partir de métodos de la geodesia satelital, se deberá transformar las épocas de sus coordenadas con el modelo de velocidades NNR NUVEL1A [De Mets, et al., 1994], recomendado en las convenciones del IERS como se mencionara en §1.5.2.

Como resultado de este cálculo final se obtienen las coordenadas finales de las estaciones con su matriz de varianza-covarianza completa y referidas al sistema de referencia terrestre internacional en la época de las mediciones. Para referir las coordenadas a una época particular convencional se las debe aún transformar utilizando el mismo modelo de velocidades usado para llevar las coordenadas de control a la época de las observaciones.