

# Capítulo 5

## Análisis de residuos de observaciones GPS

---

### 5.1 Introducción

Se ha mostrado que el Sistema de Posicionamiento Global permite la materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional con exactitudes centimétricas. Esto se logra aplicando los modelos y metodología mencionados en los primeros tres capítulos de este trabajo. La gran cantidad de observaciones de que en general se dispone hace que se puedan obtener resultados de muy alta precisión. Sin embargo, por lo general esta sobreestima la exactitud de las coordenadas. Esto se ve en general en todas las redes geodésicas calculadas con observaciones GPS y en particular en el ejemplo de POSGAR'98: basta comparar los rms de los residuos provenientes del control realizado sobre dicho marco de referencia, que aparecen en la tabla 4.3, con las estimaciones de precisión de las coordenadas resultantes del ajuste que se muestran en el apéndice I. Esta falta de representatividad de la exactitud por parte de la precisión puede tener varias fuentes: Por un lado, algunos efectos aún están deficientemente modelados respecto del nivel de los errores de medición. Por otro lado, la elección de algunos parámetros de procesamiento tiene un efecto no despreciable en los resultados finales y esto no es puesto en evidencia ni siquiera por la repetibilidad de las coordenadas a partir de varias ocupaciones de la red, ya que en general los mencionados parámetros se mantienen fijos en todo el procesamiento de una campaña.

El tratamiento del retardo troposférico tiene influencia en la determinación de las alturas [Kaniuth et al., 1999d]. Las variaciones de la posición de los centros de fase de las antenas aún habiendo sido tratadas con los modelos disponibles más confiables pueden influir apreciablemente sobre las coordenadas calculadas [Kaniuth et al., 1999a]. Otros efectos como los desplazamientos debidos a las cargas oceánica y atmosférica deben tenerse en cuenta por su posible influencia, principalmente en la determinación de las alturas [Dodson et al., 1999]. En el establecimiento de marcos de referencia regionales y de alta calidad se debe tener especial cuidado con la influencia que tienen en el ajuste de la red los errores en las coordenadas de control. Además, parámetros de procesamiento como por ejemplo la máscara de elevación elegida, tienen un efecto apreciable sobre las alturas cuando se estiman simultáneamente correcciones al modelo troposférico [Kaniuth et al., 1998b].

Ante la complejidad de la situación se plantea la búsqueda de una estrategia capaz de separar las contribuciones de los distintos efectos y discernir su importancia relativa a fin de orientar futuros esfuerzos para el mejoramiento del tratamiento de las observaciones.

Se propone el análisis de los residuos del ajuste de observaciones GPS diferencial como herramienta para estudiar estos problemas. No se espera encontrar directamente correcciones a los modelos ya que los residuos aportan una información bastante indirecta a ese respecto: provienen de un ajuste en que las deficiencias de los modelos pueden ser en parte absorbidas por algunos de los parámetros estimados, y además, el hecho de que GPS sea una técnica interferométrica hace que los residuos conserven sólo las contribuciones de los errores de modelo que no son comunes a las estaciones ni los satélites que han sido combinados para construir las simples y dobles diferencias de fase.

En este capítulo se muestran las características de los residuos de dobles diferencias de fase de observaciones GPS para ejemplos de mediciones de alta calidad. Se implementa además una técnica para la separación de los efectos provenientes de las distintas estaciones y satélites. A través de ella se llega a analizar pseudo-residuos asignables a estaciones individuales. La efectividad del método se muestra en vectores cortos mediante el siguiente ejemplo: se perturba el modelo de las variaciones de los centros de fase de una antena geodésica dentro de una red y se observan las consecuencias de esta acción en los residuos correspondientes a cada estación. A continuación la técnica es probada para el análisis de residuos de vectores largos. Se seleccionan para el análisis los residuos provenientes del cálculo de una campaña GPS en los Alpes. La disposición de las antenas es tal que

conforman un anillo de cientos de kilómetros de longitud, abierto en la estación Wettzell, donde se encuentran dos antenas separadas que por una distancia de pocos metros. Se analizan los residuos día por día y se eliminan los efectos dependientes de las antenas, para poder ver los que resultan iguales para antenas diferentes emplazadas a poca distancia entre ellas. A estos efectos se los llama ‘dependientes del sitio’ en este trabajo. Finalmente se aplican las técnicas desarrolladas al análisis de residuos del cálculo de parte de la red SIRGAS’95. A fin de llevar a cabo las tareas mencionadas se desarrolló una serie de programas por Klaus Kaniuth y el autor en el marco de la cooperación de la FCAG y el DGFI para el análisis de residuos de observaciones GPS.

## 5.2 Análisis de residuos de observaciones GPS

### 5.2.1 Las observaciones

Se tomaron observaciones recopiladas entre 1995 y 1998 en varias campañas. Estas incluyeron varias de las combinaciones de antenas y receptores más usadas para los trabajos geodésicos de alta precisión. Las campañas de observación elegidas forman redes de puntos que abarcan distancias de pocos metros a cientos de kilómetros. La tabla 5.1 muestra las características salientes del conjunto de observaciones utilizadas.

Tabla 5.1: Descripción de las campañas GPS utilizadas

<b>Campaña</b>	<b>Tipo</b>	<b>Duración (días)</b>	<b>Nro. de estaciones utilizadas</b>
<b>SIRGAS</b>	Regional	10	27 (3 redes separadas)
<b>COLLOC</b>	Local	10	5 (vectores aislados)
<b>WETTZELL</b>	Local	4	4 (red)
<b>ALPEN’98</b>	Regional/Local	5	6 (red)

Todas las campañas listadas arriba están conformadas por receptores de doble frecuencia y recuperación de la portadora  $L_2$  con su longitud de onda completa, contando para todas las antenas con correcciones de la posición de los puntos de recepción de la señal de fase incluidos en el modelo IGS.01 [Rothacher et al., 1996a]. Los equipos que se listan en la tabla 5.2 participaron en estas campañas fueron utilizados para identificar a las estaciones.

Tabla 5.2: Antenas y receptores utilizados en las campañas calculadas

<b>Campaña</b>	<b>Estación</b>	<b>Receptor</b>	<b>Antena</b>
<b>SIRGAS</b>			
	Red Ashtech	Ashtech Z-12	ASH700718 y 228
	Red Leica	SR299	LEISR299 INT
	Red Rogue	ROGUE	AOAD/M_T/_B/_R
<b>COLLOC</b>	Ídem SIRGAS	Ídem SIRGAS	Ídem SIRGAS
<b>ALPEN'98</b>			
	WTZR	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T
	WTZT	TRIMBLE 4000 SSI	TRM22020.00+GP+RD
	PENC	TRIMBLE 4000 SSE	TRM14532.00
	GRAA	TRIMBLE4000 SSI	AOAD/M_T
	ZIMM	TRIMBLE 4000 SSE	TRM14532.00
<b>WETTZELL</b>			
	759A	TRIMBLE 4000 SSE	TRM14532.00
	1200	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_B
	11	LEISR299	LEISR299 INT
	8___	ASHTECH Z-XII3	ASH700228

### 5.2.2 Metodología

El programa principal de ajuste del Bernese GPS software V4.0, GPSEST, fue modificado para que, además de los residuos de dobles diferencias de fase, produzca un archivo con las direcciones topocéntricas a los satélites desde cada estación incluida en el cálculo. Esta información es luego integrada con los residuos de dobles diferencias de fase en un solo archivo por vector mediante el programa MGFIL. A continuación, pueden analizarse los residuos de dobles diferencias mediante el programa DDRES que puede producir un mapa de la ocupación del cielo, calcular la autocorrelación de las series más largas, estimar dependencias lineales de los residuos respecto de la elevación, estimar dependencias lineales de los residuos con respecto a las direcciones N-S y E-O y ajustar a todos los datos una superficie de grado tres en función de la elevación y el acimut.

En primer lugar, se estudiaron ejemplos de residuos de dobles diferencias de fase resultantes del procesamiento de la campaña COLLOC y ALPEN'98. En ese análisis se vio que existe una gran coherencia entre los residuos de distintos días. Esta coherencia es mayor para vectores cortos que para los de longitud mayor.

Esto puede verse del análisis de DDRES, por ejemplo en la estimación de la dependencia lineal de los residuos respecto de la distancia cenital de los satélites, lo que se ve en la figura 5.1 para un vector de pocas decenas de metros ubicado en Tierra del Fuego, que fue observado durante diez días.

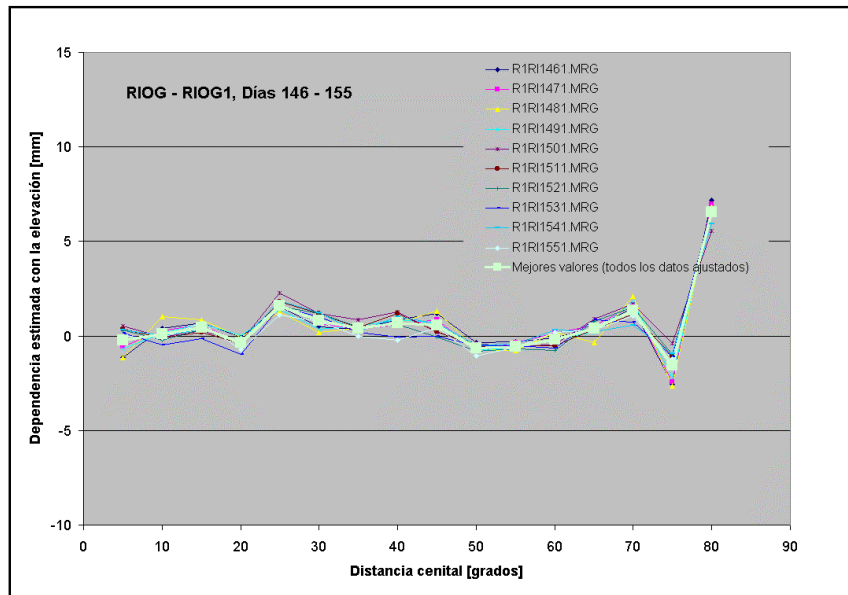


Figura 5.1: Dependencia de los residuos de dobles diferencias con la distancia cenital en un vector corto

En la figura 5.2 se ve un análisis análogo, realizado para un vector de aproximadamente 300 kilómetros que fue observado durante seis días.

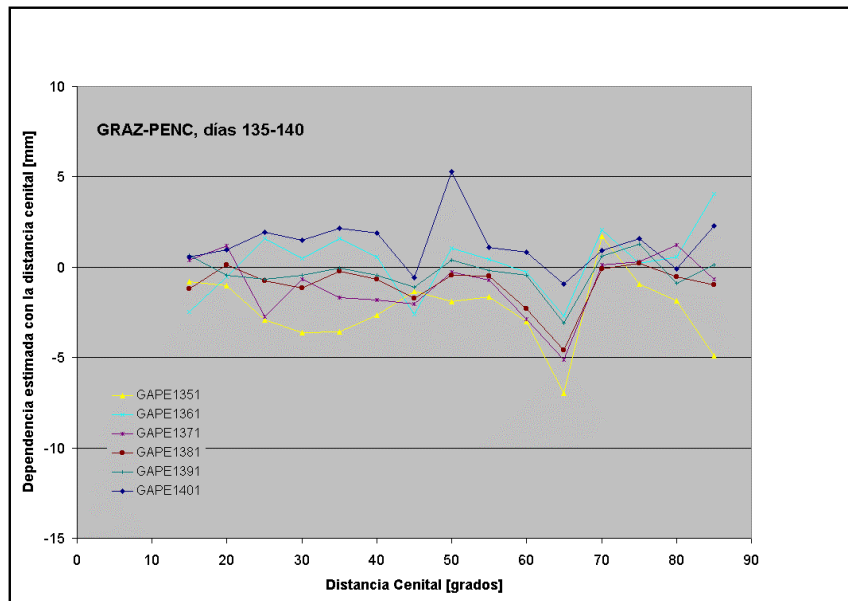


Figura 5.2: Dependencia de los residuos de dobles diferencias con la distancia cenital en un vector largo

Con DDRES se calculó también la autocorrelación de las series más largas de residuos de dobles diferencias para varios días y tanto en vectores locales cuanto en largos.

En la figura 5.3 se ve que para vectores cortos la autocorrelación cae por debajo de 0.2 luego de los primeros 600 segundos, mientras que de la figura 5.4 se ve que no ocurre lo mismo en vectores largos sino hasta pasados los 1200 segundos.

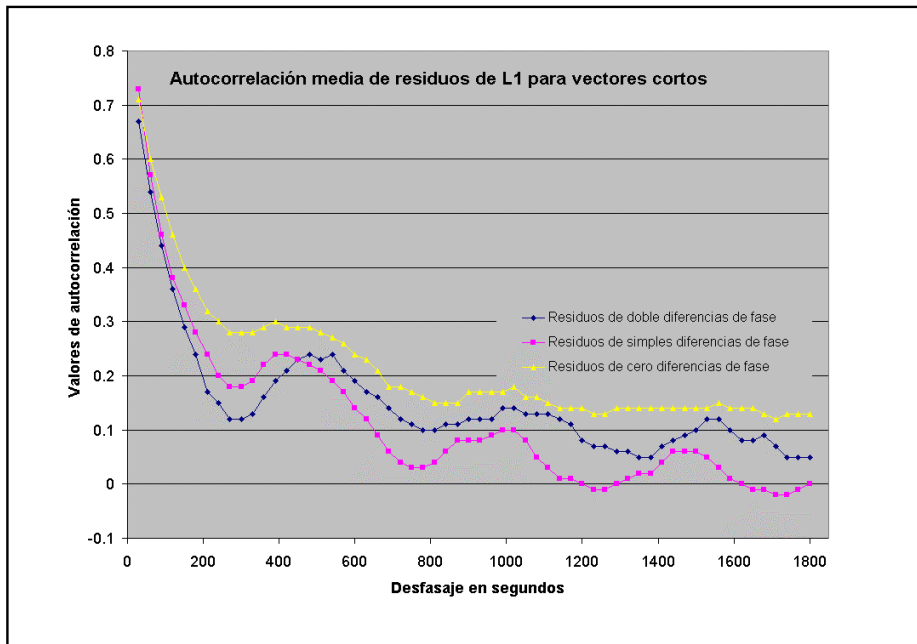


Figura 5.3: Autocorrelación para series de residuos en vectores cortos

La explicación de este fenómeno puede ser la presencia de errores de modelo que se acentúan para los vectores largos.

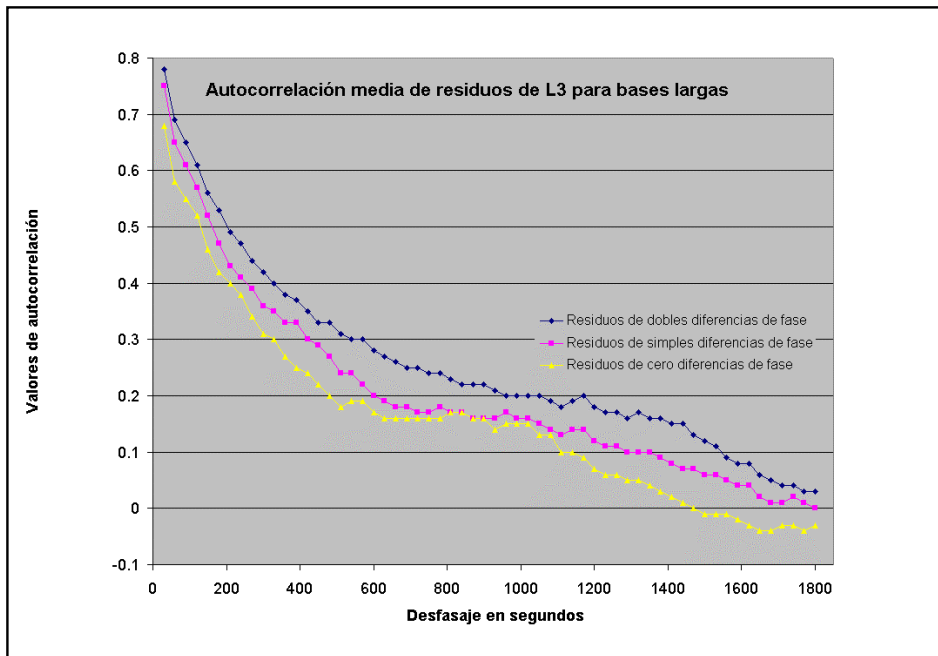


Figura 5.4: Autocorrelación para series de residuos en vectores largos

A fin de verificar la sensibilidad del análisis de residuos, se procesó un vector local y se eliminó el modelo de PCV de una de las antenas. La figura 5.5 muestra el comportamiento de los residuos para la combinación de los satélites 9 y 5.

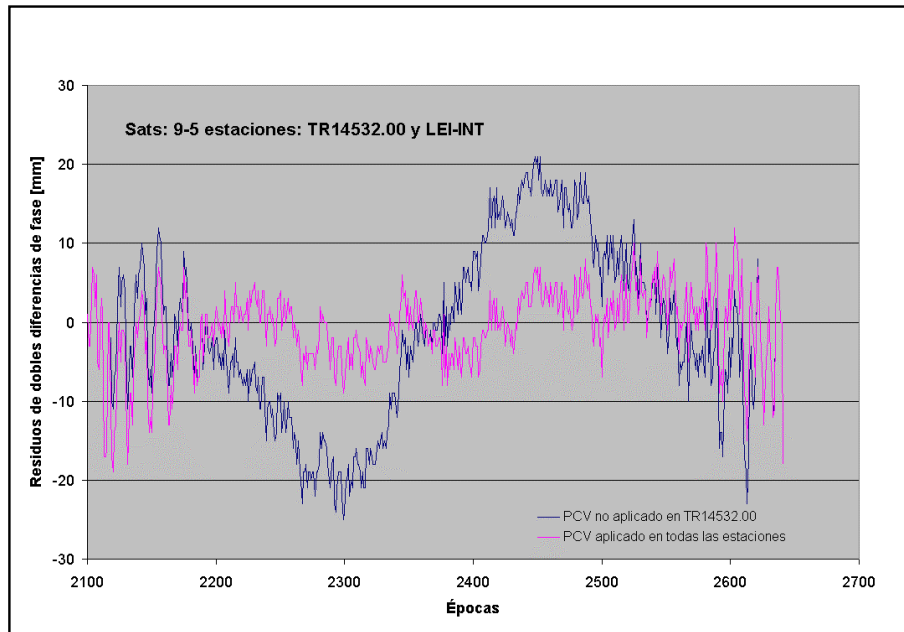


Figura 5.5: Residuos de dobles diferencias entre TR14532.00 y LEI-INT, satélites 5 y 9

Este resultado indica la sensibilidad de los residuos a los errores de modelo. Sin embargo, en general es de interés relacionar los efectos sistemáticos detectados con fenómenos físicos con el fin de estudiar su posible incorporación en el modelo de las observaciones. La interpretación de este tipo de residuos es difícil ya que provienen de dobles diferencias de fase en que se encuentran combinados los efectos asociados a dos satélites y dos receptores. Se propone entonces extender el análisis a ‘pseudo residuos’ asignables a simples diferencias y cero diferencias u observaciones no diferenciadas. Esto requiere asignar a cada satélite y receptor contribuyentes de un residuo de dobles diferencias, la parte que a cada uno les corresponde del residuo original. Como la información común se ha perdido en el proceso de construir las dobles diferencias, lo que se recupera es en realidad la porción de los residuos que correspondería a las observaciones sin combinar asociada a cada satélite y receptor no común para todos ellos. Por ello su denominación estricta sería ‘pseudo residuos’ aunque se los seguirá en adelante llamando residuos a fin de no complicar en demasía el lenguaje. Una vez que se obtengan los residuos de cero diferencias, se procederá a su análisis utilizando las direcciones topocéntricas de los satélites respecto de cada estación, que como se mencionara anteriormente, son almacenadas inicialmente junto con los residuos del ajuste.

Para realizar la inversión de los residuos de dobles diferencias se utilizó la estrategia propuesta por [Braun et. al.,1998]. El proceso se realiza época por época en dos pasos, cada uno de los cuales implica la aplicación de una condición para permitir la estimación de las incógnitas, cuyo número en ambos casos supera en uno al de observaciones.

El primer paso permite generar los residuos de simples diferencias y se realiza en procesos independientes de un vector por vez. Se dispone de  $n-1$  residuos de dobles diferencias asociadas con  $n$  observaciones de simples diferencias correspondientes a otros tantos satélites. Se considera que cada residuo de dobles diferencias proviene de restar dos residuos de simples diferencias. Esto implica un sistema de  $n-1$  ecuaciones con  $n$  incógnitas por época, que relaciona los residuos de simples diferencias con los de dobles diferencias. Además, se agrega la condición de que la suma de todos los residuos de simples diferencias a estimar debe ser cero. Esto equivale a afirmar que en los residuos de simples diferencias que se estimarán, no quedará ningún efecto que sea común a todos los satélites. La implementación de esta metodología se realizó mediante el programa DDTOSD.

Los residuos de simples diferencias estimados pueden a su vez ser utilizados para estimar residuos de observaciones sin diferenciar. En este segundo paso se razona en forma parecida al caso anterior con la salvedad que las estaciones juegan ahora el papel que antes tuvieron los satélites. La inversión se realiza también época por época pero no ya vector por vector sino que los residuos deben provenir del ajuste de una red. Para pasar de  $p-1$  residuos de simples diferencias a  $p$  residuos correspondientes  $p$  estaciones, se procede también época por época y satélite por satélite. De este modo, en cada época, se toman los residuos de simples diferencias correspondientes a cada satélite para todas las estaciones y se considera que cada uno de ellos proviene de restar dos residuos de observaciones no diferenciadas. Esto implica un sistema de  $p-1$  ecuaciones con  $p$  incógnitas. A ellas se agrega la condición de que la suma de los residuos de cero diferencias a estimar para el satélite elegido y sobre toda la red procesada sea cero. Esto equivale a exigir que para cada satélite y cada época, no haya en los residuos de cero diferencias ninguna contribución que sea común a todas las estaciones. La implementación de esta técnica se realizó mediante el programa SDTOZD.

Tanto para los residuos de simples diferencias cuanto para los de observaciones sin diferenciar, se escribieron programas de análisis similares a DDRES, denominados SDRES



y ZDRES donde ZD se refiere a ‘cero diferencias’. Además de los programas mencionados se realizaron tres más con el objeto de visualizar la amplitud de los residuos de forma que fuera más sencilla su interpretación en función de tres variables: tiempo, distancia cenital y acimut. Los programas mencionados son PLTDDR, PLTSDR y PLTZDR. Los dos primeros preparan los residuos para ser visualizados con el MS EXCELL™ o el programa Plot™ (Ashtech Inc) El tercero puede prepararlos también para su visualización mediante GMT [Wessel et al., 1991][Wessel et al., 1995] en proyección polar alrededor de la estación en función de la distancia cenital y el acimut, indicando también el satélite y el tiempo en horas (TU).

### **5.2.3 Aplicación de la inversión de los residuos al análisis de una red GPS local**

A fin de tener una estimación de la precisión con que la separación planteada puede alcanzarse se realizó el siguiente experimento: Se ajustó una red GPS de extensión local, con distancias entre puntos de sólo decenas de metros. Esto asegura que los residuos de las dobles diferencias de fase contendrán solamente una combinación del ruido de observación con el efecto del multicamino además de eventuales errores en los modelos de variación del centro de fase de las antenas (PCV). La red procesada consta de cuatro estaciones equipadas con otras tantas antenas diferentes que sirvieron para identificarlas: AOAD/M\_B, TRM14532.00, LEI\_INT y ASH700228. Se realizaron dos cálculos de la red: en el primero se aplicó el modelo completo de la observación para todas las estaciones. En la segunda oportunidad no se incluyó el modelo de PCV de la antena TRM14532.00. Esto debería producir residuos con un efecto sistemático asociado a esa antena solamente y no afectar los residuos de las otras con relación a la primera solución. La figura 5.5 en §5.2.2 mostraba los residuos de dobles diferencias que resultaron de los dos ajustes realizados. Se compararon en esa oportunidad los correspondientes a las estaciones TRM14532.00 y LEI\_INT para los satélites 5 y 9. El resultado del experimento en el nivel de las cero diferencias puede verse en las figuras siguientes. En esta oportunidad se comparan los residuos de la estación TRM14533.00 y la AOAD/M\_T para los satélites 5 y 27.

La figura 5.6 abajo muestra, para el satélite 5, la diferencia entre los residuos correspondientes a la estación TRM14532.00 habiendo o no aplicado el modelo de PCV.

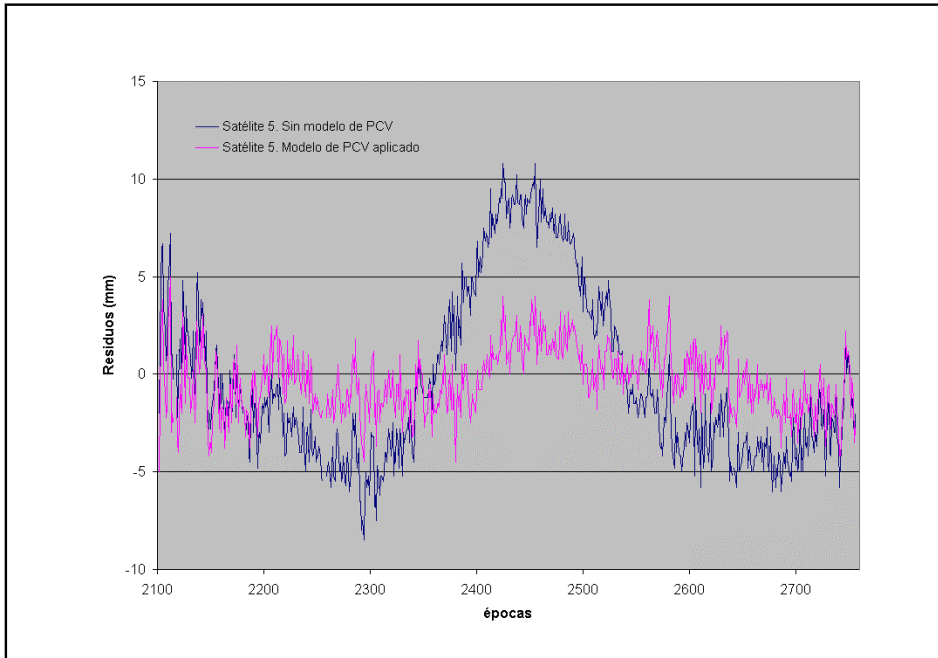


Figura 5.6: Residuos de cero diferencias para el satélite 5 en TRM14532.00

La figura 5.7 muestra el efecto del experimento para el satélite 27. Para evaluar la capacidad del método para separar efectos sistemáticos provenientes de una estación

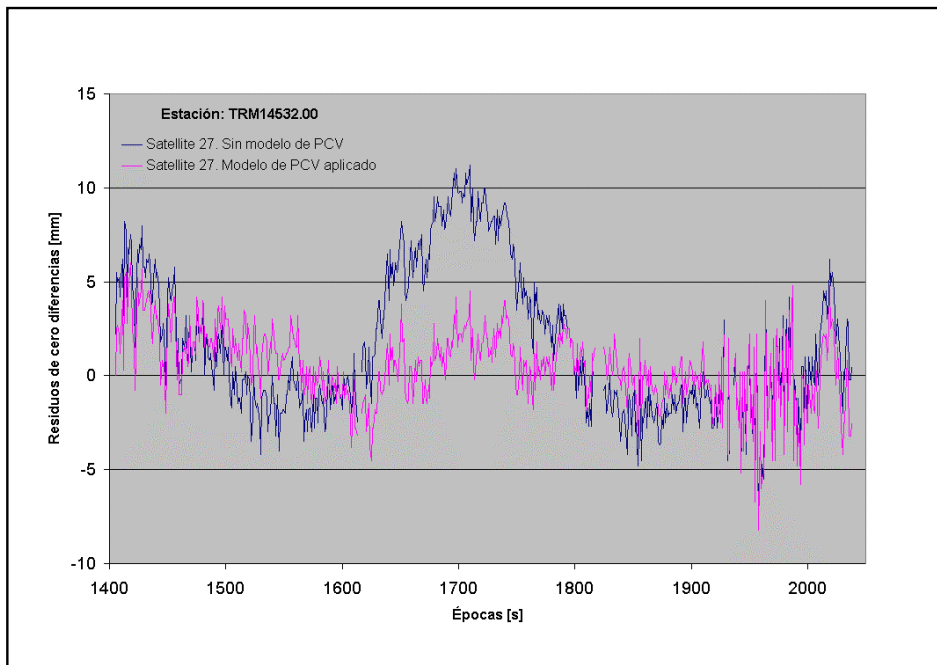


Figura 5.7: Residuos de cero diferencias para el satélite 27 en TRM14532.00

particular se debe también evaluar cómo afecta un error sistemático en una estación a otras que han sido ajustadas conjuntamente pero cuyos modelos se encuentran libres de errores sistemáticos.

En las figuras 5.8 y 5.9 se muestran comparaciones de residuos análogos a las de las figuras 5.6 y 5.7 pero para la estación AOAD/M\_T, incluida en los dos ajustes realizados y cuyo modelo no fue modificado en ningún caso. Como en el caso de la estación TR14532.00, se muestran comparaciones para los satélites 5 y 27.

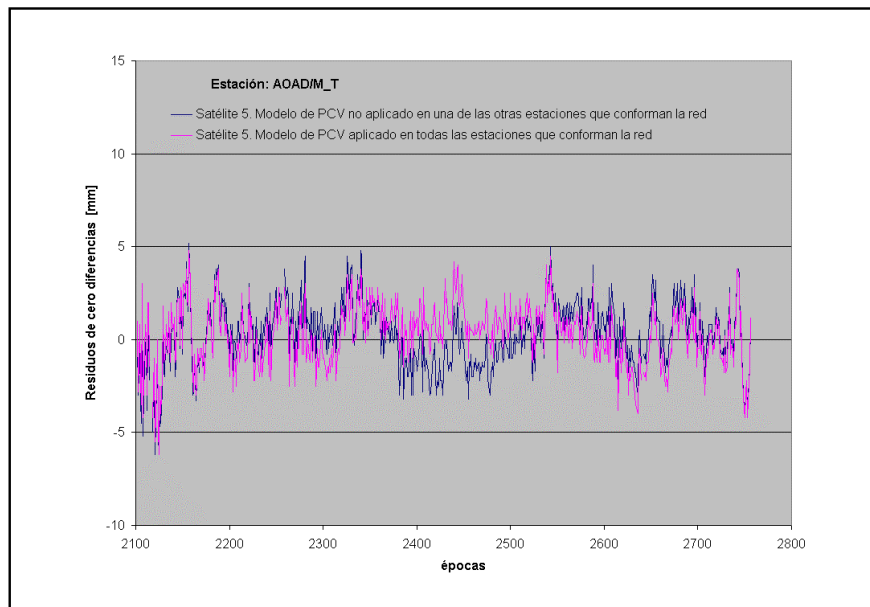


Figura 5.8: Residuos de cero diferencias respecto en AOAD/M\_T para el satélite 5

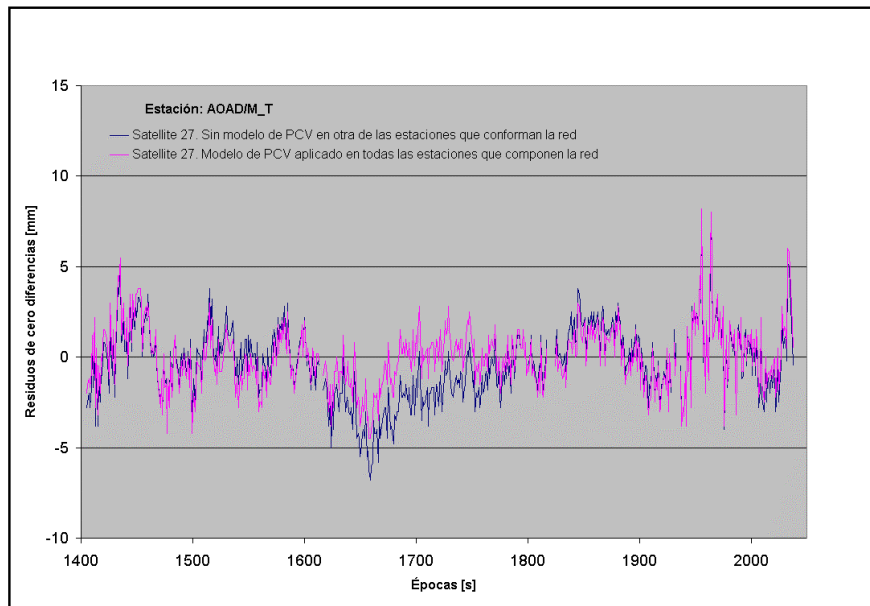


Figura 5.9: Residuos de cero diferencias respecto en AOAD/M\_T para el satélite 27

Para constatar que el error introducido en la estación TRM14532.00 implica una dependencia de los residuos respecto de la elevación del satélite, en las figuras 5.10 a 5.13 se muestran los residuos para TRM14532.00 y AOAD/M\_T y los satélites 5 y 27 pero esta vez respecto de la distancia cenital del satélite.

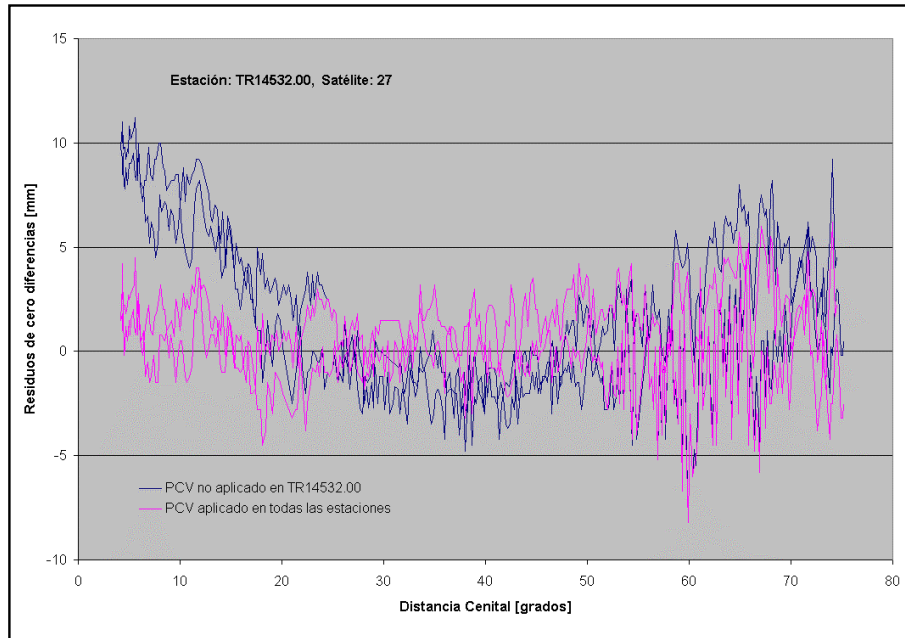


Figura 5.10: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en TRM14532.00 para el satélite 27

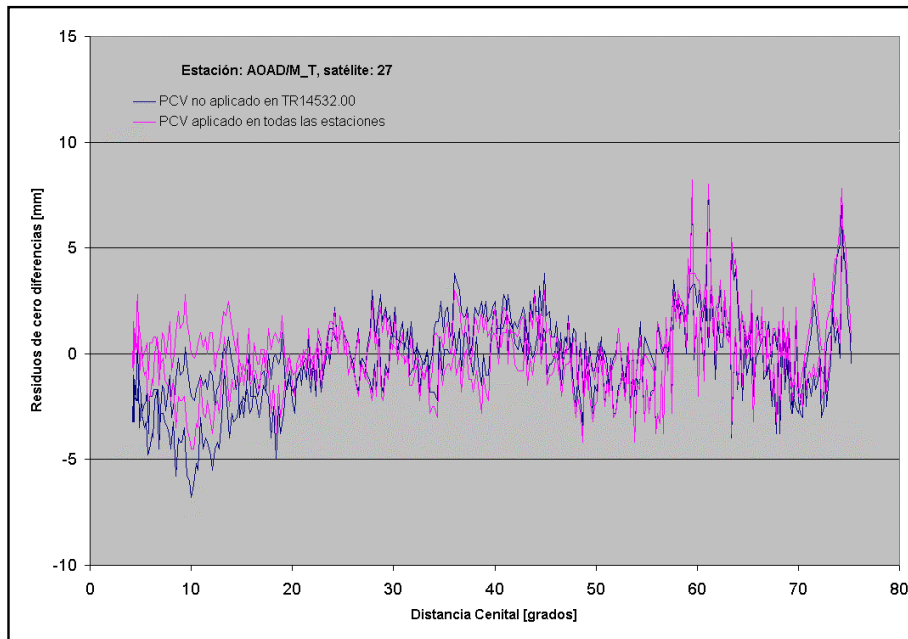


Figura 5.11: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en AOAD/M\_T para el satélite 27

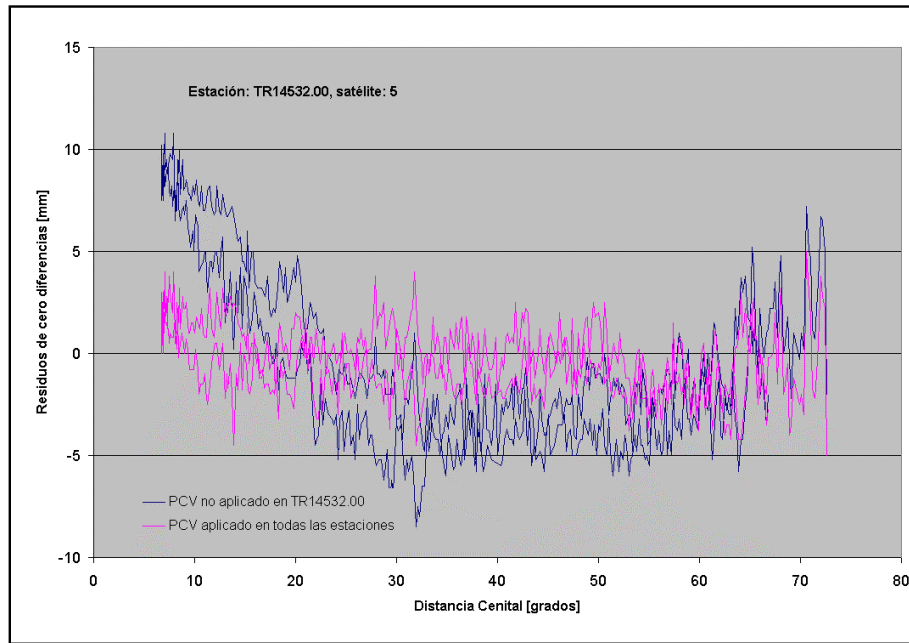


Figura 5.12: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en TRM14532.00 para el satélite 5

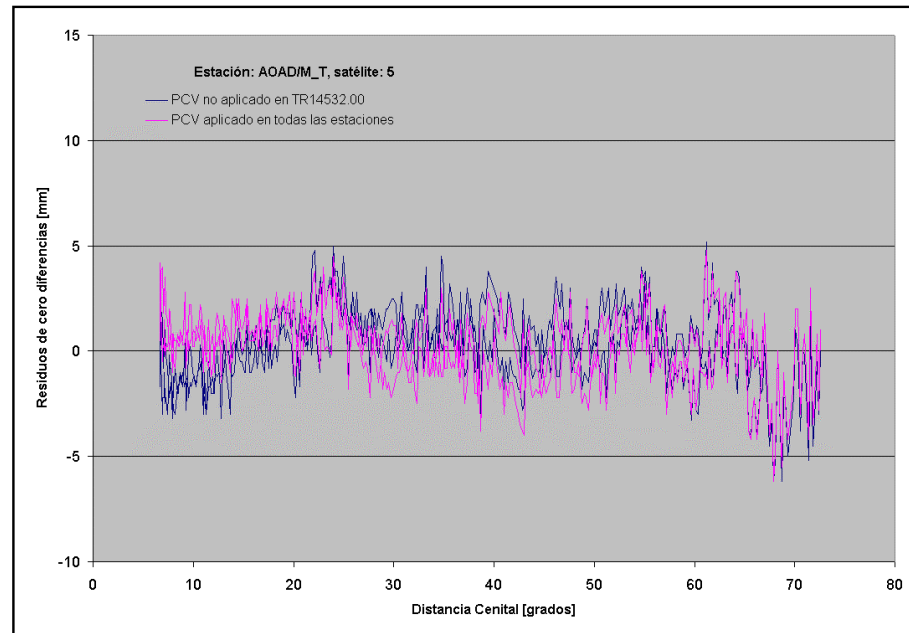


Figura 5.13: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en AOAD/M\_T para el satélite 5

Se ha visto en estos ejemplos que el método es sensible como para detectar efectos sistemáticos del orden de pocos milímetros y además puede separar las contribuciones de los distintos satélites y receptores que sean mayores que aproximadamente 2 mm en  $L_1$ . Esto prácticamente equivale a afirmar que se pueden separar efectos presentes en los

residuos provenientes de distintas estaciones hasta un nivel cercano al error de observación en  $L_1$ .

#### **5.2.4 Aplicación del método al análisis de redes geodésicas de extensión regional**

Una vez probada la capacidad de la inversión de los residuos para separar efectos sistemáticos provenientes de estaciones particulares en una red geodésica local, el paso siguiente fue extender el análisis a una red más extensa. Esto debería permitir detectar efectos dependientes del sitio pero no de la antena receptora. Efectos de este tipo son por ejemplo errores en los modelos que describen el comportamiento del retardo troposférico, o el movimiento de la estación a causa de efectos de carga. El estudio de estos problemas es de necesario para el mejoramiento de la exactitud de las alturas que se calculan con GPS. A diferencia de los ejemplos anteriores, y debido a la longitud de los vectores, se trabajó siempre con la combinación libre de ionosfera  $L_3$ , cuyo error de observación resulta tres veces mayor que el de  $L_1$ , por lo que se espera un nivel de ruido mayor que el de los ejemplos de redes locales.

Se contó con las observaciones de dos redes geodésicas de alta calidad: la porción de la red SIRGAS'95 al sur del paralelo 15 grados Sur incluyendo aproximadamente 35 estaciones, y una red regional incluyendo estaciones en los Alpes y la estación geodésica Wettzell en el sureste de Alemania. Ambas redes fueron descritas esquemáticamente en la tablas 5.1 y 5.2 en §5.2.1.

Al igual que en el experimento descrito en la sección anterior, no se cuenta con observaciones de ninguna otra técnica independiente que sean sensibles a los efectos que dependen del sitio y no de la antena. En consecuencia se debió diseñar un experimento con las observaciones GPS disponibles a fin de hacerlos evidentes. En la campaña ALPEN'98 se cuenta con algunos sitios en que se emplazaron dos receptores separados por solamente unos pocos metros. En consecuencia, se ajustó una red de cinco estaciones y varios cientos de kilómetros de extensión durante cinco días diferentes. En la estación Wettzell hay dos receptores identificados como AOAD/M\_T y TRM20220.00+GP+RD separados por pocos metros que a los fines del experimento no fueron vinculados directamente mediante el posicionamiento diferencial sino a través de vectores regionales de cientos de kilómetros de longitud. En los residuos que resultan de la inversión explicada en §5.2.2, se esperaría

encontrar una superposición de efectos además del inevitable ruido de observación: multicamino, posibles errores en los modelos de PCV, errores del modelo troposférico y posiblemente también consecuencias de los efectos de carga oceánica y atmosférica. Los primeros dos efectos mencionados deberían ser diferentes para ambas antenas pero repetirse casi exactamente durante los cinco días, mientras que los dos últimos deberían ser distintos cada día pero idénticos para ambas antenas debido a su proximidad.

En las figuras VI-1 a la VI-10 del apéndice VI se muestran los residuos de los dos receptores emplazados en Wettzell para los cinco días calculados. Allí puede verse un bandeo concéntrico muy notorio en la estación TRM20220.00+GP+RD que muestra residuos predominantemente positivos cerca del cenit, en que alcanzan valores promedio de 10 mm. A medida que aumenta la distancia cenital los residuos se hacen negativos para alcanzar un mínimo de entre  $-5$  y  $-10$  mm alrededor de 30 grados. Si se sigue aumentando la distancia cenital se ve nuevamente un aumento del valor de los residuos para alcanzar un nuevo máximo de entre 5 y 10 mm para 45 grados. Este último máximo se muestra bastante desdibujado y es difícil separar a simple vista una clara dependencia de los residuos para distancias cenitales mayores.

Si se observan los residuos correspondientes a la estación AOAD/M\_T, se ve nuevamente una dependencia con la distancia cenital en forma de círculos concéntricos. Esta dependencia es bastante menos marcada que la observada para la otra antena en el mismo sitio. Sin embargo se puede distinguir un mínimo de aproximadamente  $-5$  mm en la dirección del cenit. Al aumentar la distancia cenital se observa un aumento gradual de los residuos para alcanzar un máximo de alrededor de 5 mm para los 30 grados. A partir de allí los residuos vuelven a disminuir pero no es evidente a simple vista una estructura sistemática.

Al observar el comportamiento de los residuos en las figuras A-VI-1 a A-VI-10 para las dos estaciones en Wettzell en los cinco días calculados es evidente que:

- a) La principal dependencia de los residuos es con la distancia cenital de los satélites.
- b) Dicha dependencia se repite en todos los días procesados para ambas estaciones.
- c) El comportamiento de los residuos es diferente para las dos estaciones al compararlas para un mismo día.

De las tres observaciones anteriores puede deducirse que el comportamiento dominante observado en los residuos no puede deberse a efectos troposféricos no modelados ni a efectos de carga ya que estos deberían ser iguales para ambas estaciones por su cercanía. La repetibilidad diaria del patrón de residuos señala que lo que se observa podría ser una combinación de efectos de multicamino y variaciones de la posición de los centros de fase de las antenas debido a inexactitudes en el modelo de PCV (igs.01) [Rothacher et al., 1996a] aplicado en el cálculo. Como estos dos efectos dependen de la posición topocéntrica de los satélites respecto de la antena y de la antena misma, es esperable que se repitan casi exactamente cada día con un desfase de  $-3m\ 56s$  debido a la diferencia entre el día sidéreo, período en que los satélites GPS describen dos revoluciones completas, y el día según el tiempo GPS. Finalmente, es evidente por el tamaño de los efectos sistemáticos observados respecto a los residuos medios en estos ejemplos que cualquier otro efecto presente se encuentra enmascarado. En consecuencia el estudio de los efectos sistemáticos dependientes del sitio y no de la antena será muy difícil si estos últimos no son eliminados previamente.

### **5.2.5 Eliminación de los efectos dependientes de las antenas**

A fin de poder saber si en los residuos estudiados hay efectos dependientes del sitio se propuso eliminar las contribuciones dependientes de las antenas. Para lograr esto se aprovechó la periodicidad diaria de dichos fenómenos, referida en la sección anterior. Se implementó el algoritmo ZDMULT. Este programa utiliza archivos de residuos de cero diferencias de una misma estación para varios días. Primero desfasa los tiempos asociados a los residuos de cada satélite a fin de hacer corresponder entre sí para todos los archivos, residuos que responden a exactamente la misma configuración geométrica antena-satélite. Luego obtiene un residuo promedio de todos los días para cada satélite y época. Seguidamente ese residuo promedio es sustraído de cada uno de los residuos originales. De este modo, cada archivo original de residuos da origen a uno nuevo, en que éstos han sido despojados de su valor medio diario obtenido de todos los archivos disponibles. Además el programa crea un archivo nuevo más por estación, con el mismo formato que el de los archivos de residuos de cero diferencias, que contiene los residuos medios sustraídos.



Para demostrar la efectividad de la aplicación de este algoritmo se utilizaron los residuos de cero diferencias de la campaña Alpen98 que fueron analizados en la sección anterior. Nuevamente se analizaron los residuos para las dos estaciones emplazadas en Wettzell. Los residuos resultantes pueden verse en las figuras VII-1 a la VII-10 en el apéndice VII.

De estas figuras es evidente que:

- a) La dependencia de los residuos con la distancia cenital ha desaparecido.
- b) La coherencia entre los distintos días para cada estación ha sido eliminada.
- c) El patrón de los residuos de ambas estaciones en Wettzell tiene similitudes, pero para verlas mejor es necesaria una observación con más detalle.

A fin de analizar con más detalle los residuos de las dos estaciones en Wettzell se realizó una comparación satélite por satélite, prestando especial atención a las series de residuos que mostraran valores altos y de variación suave. Estas dos características los harían fácilmente distinguibles de los errores de observación y permitiría asociarlos con fenómenos físicos de variación lenta respecto del intervalo entre observaciones como son por ejemplo los efectos de carga o los fenómenos meteorológicos.

En las figuras 5.14 y 5.15 se muestran ejemplos de tres satélites para las dos antenas en

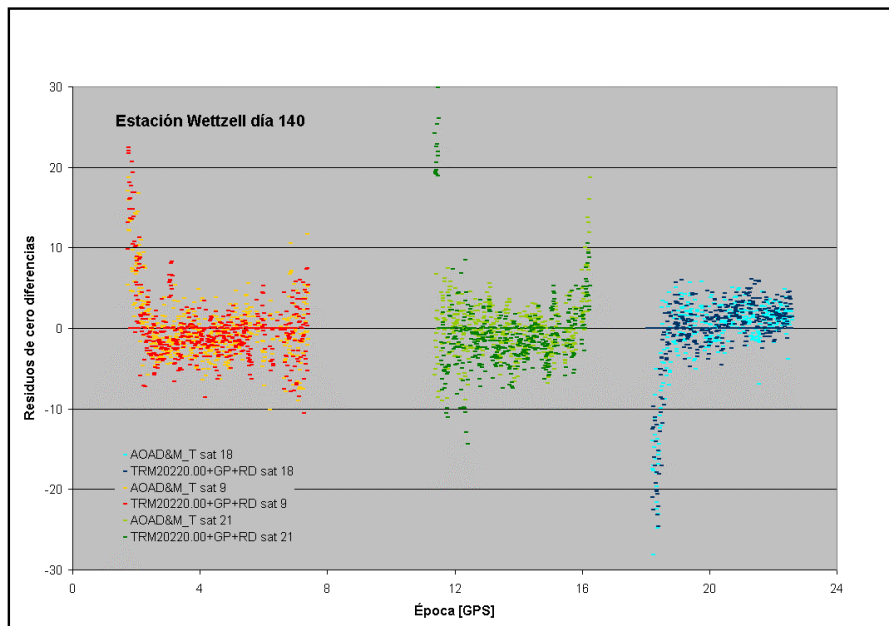


Figura 5.14: Residuos de cero diferencias (valores medios diarios sustraídos) estaciones TRM20220.00+GP+RD y AOAD/M\_T (Wettzell), día 140

Wetzell para los días 140 y 136 de 1998 respectivamente. En estas figuras, los colores fuertes corresponden a TRM20220.00+GP+RD mientras que los débiles a AOAD/M\_T.

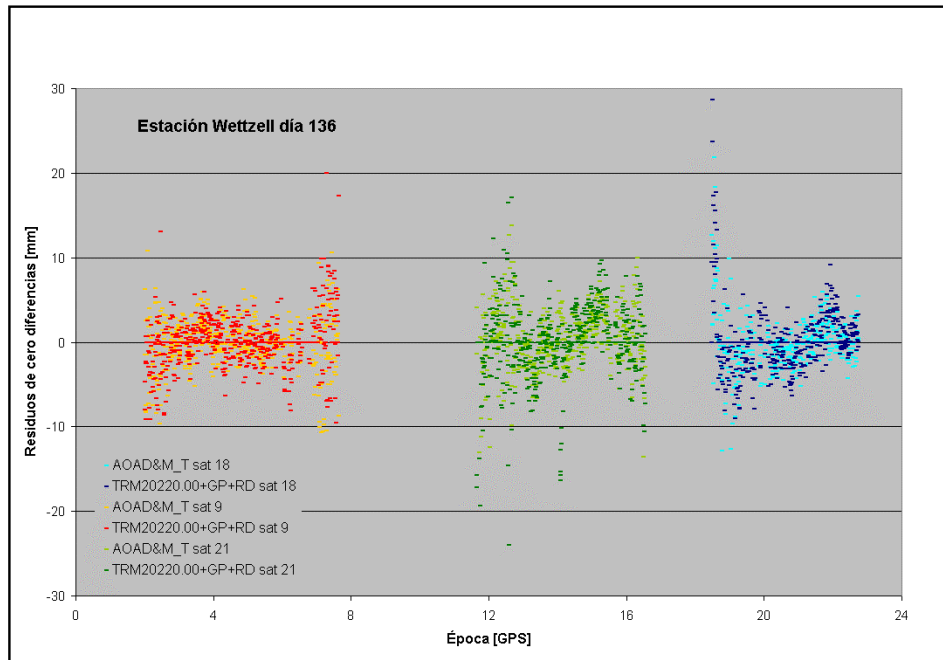


Figura 5.15: Residuos de cero diferencias (valores medios diarios sustraídos) estaciones TRM20220.00+GP+RD y AOAD/M\_T (Wetzell), día 136

Finalmente, en las figuras 5.16 y 5.17 se muestran los residuos medios que fueron sustraídos de los originales.

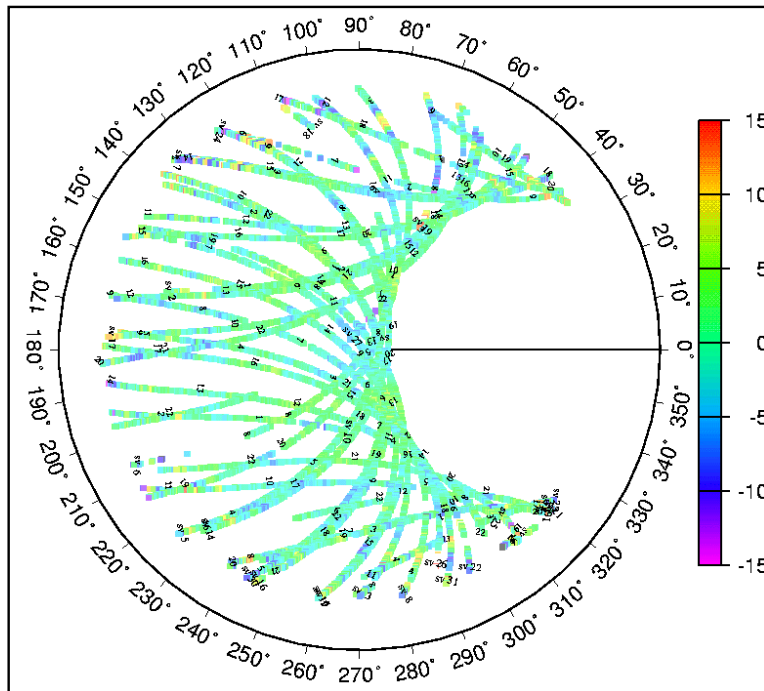


Figura 5.16: Residuos medios de cero diferencias para la estación AOAD/M\_T (Wetzell)

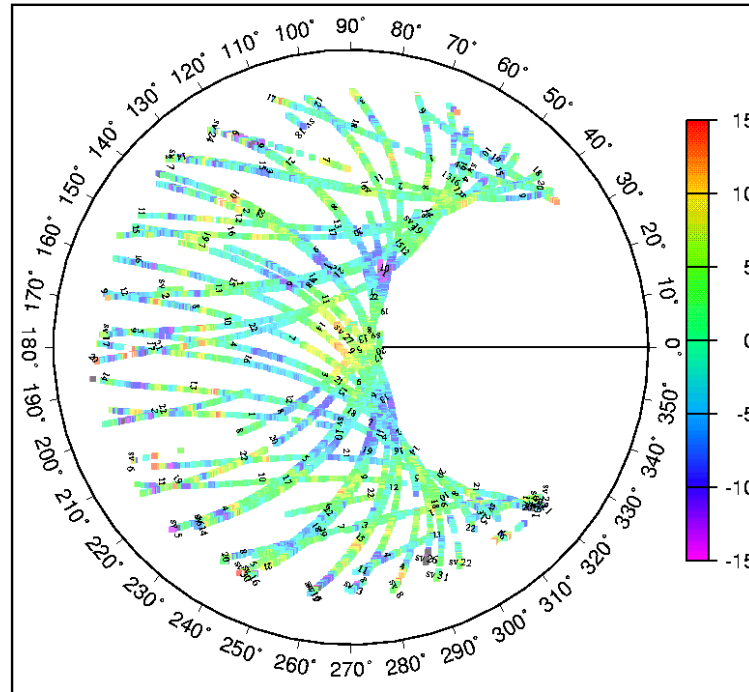


Figura 5.17: Residuos medios de cero diferencias para la estación TRM20220.00+GP+RD (Wetzell)

Es notoria la mayor amplitud de la dependencia con la elevación en el caso de la antena TRM20220.00+GP+RD. Este comportamiento podría explicarse por el hecho de que el modelo de PCV igs.01 aplicado en el cálculo es relativo a las antenas AOAD/M\_T, que poseen una función de PCV muy pequeña y por el hecho de que la antena TRM20220+GP+RD tiene colocada una protección o radome cuyos efectos en la determinación de la altura han sido ya señalados en [Kaniuth et al., 1999c].

### 5.2.6 Aplicación de las herramientas de análisis a la campaña SIRGAS'95

Se emplearon observaciones de las estaciones Ashtech, Rogue y Leica ubicadas al sur de 15°S. Se utilizaron las simples diferencias ya pre-procesadas durante el cálculo de SIRGAS'95. Tal como se hiciera en aquella oportunidad [SIRGAS Project Committee, 1997], se procesaron redes independientes compuestas por solamente un tipo de receptor durante hasta diez días. Suponiendo válidas las conclusiones obtenidas de la campaña Alpen'98, se invirtieron los residuos de estas redes y además se eliminaron los efectos comunes a todos los días mediante la estrategia descrita en §5.2.5. En este caso, como las tres redes estaban conformadas por antenas iguales entre sí, se espera que los efectos

eliminados consistan en prácticamente sólo multicamino. Sin embargo, puede constatarse que al aplicar ZDMULT, el rms de los residuos de cero diferencias, luego de ajustar una dependencia lineal con respecto de la elevación con ZDRES, disminuye en un 20% a 25% en promedio para nueve estaciones de la red Ashtech, en las redes Leica y Rogue también hay una disminución notoria de rms de los residuos, pero la muestra de que se dispone es menos significativa por ser redes de muy pocas estaciones y por encontrarse muy separadas entre sí, hecho que ocasiona una gran pérdida de observaciones en el proceso de inversión de los residuos.

Luego de aplicados estos procesos, se espera que lo restante en los residuos sean efectos por deficiencias del modelo troposférico, efectos de carga y ruido de observación. No se intentó ningún experimento aún a fin de separar los dos primeros efectos. Sin embargo, un enfoque de análisis inicial puede ser buscar anomalías en el rms de los residuos de cero diferencias a lo largo de los diez días que estén correlacionadas espacial y temporalmente para un grupo de estaciones. En un análisis de este tipo, sería conveniente contar con datos meteorológicos sinópticos o de estaciones meteorológicas estándares con una buena distribución en la parte sur del continente. Esto permitiría identificar si las anomalías en el rms de los residuos se correlacionan con fenómenos meteorológicos de escala regional.

### **5.3 Conclusiones del capítulo**

Dada la multitud de problemas que afectan las observaciones GPS cuando se buscan resultados de la mayor exactitud, el análisis de los residuos es una herramienta útil para estudiar el problema de mejorar el modelo de las observaciones GPS. La razón es que permite orientar los esfuerzos a la descripción de los efectos más significativos presentes en el caso particular en que se trabaje. El método utilizado para separar las contribuciones de las distintas estaciones a los residuos de dobles diferencias, resultando en los llamados residuos de cero diferencias ha mostrado ser exitoso para separar errores de modelo con una sensibilidad del orden de 2 milímetros trabajando con  $L_1$ . Trabajando en vectores de alcance regional con el observable libre de ionosfera ( $L_3$ ), el método permite distinguir efectos con amplitudes del orden de 5 milímetros. Esto se encuentra cerca del límite impuesto por la precisión del observable de fase mismo.

Se ve también en los ejemplos mostrados en §5.2.5 que luego de eliminar la parte de los residuos que se repite según la geometría satélite-receptor, el comportamiento de lo que queda, para frecuencias bien por debajo de la de muestreo y para amplitudes en los residuos mayores que el ruido de observación, no depende de la antena, por lo que se puede considerar que la información restante en los residuos debería responder a fenómenos ambientales que afectan al sitio de observación.

Se ha realizado un análisis preliminar de los residuos de las observaciones SIRGAS'95 sobre la base del éxito alcanzado por la técnica de inversión de los residuos. Se ha constatado una disminución del rms de los residuos en la red Ashtech al eliminar los efectos que se repiten diariamente. Esta disminución debería estar asociada a una reducción de los efectos del multicamino ya que se trabaja con una red de estaciones equipadas con antenas iguales por cuanto no se esperan efectos apreciables debidos a errores en el modelo de PCV. La separación de los efectos dependientes del sitio requiere de un análisis más profundo, que deberá incluir información física adicional.