



Universidad Nacional de La Plata

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis Doctoral

**Materialización del Sistema de
Referencia Terrestre Internacional en
Argentina mediante observaciones
GPS**

Juan F. Moirano

Una firma manuscrita en tinta que parece decir 'JF Moirano', con una línea horizontal que atraviesa la base de la escritura.

Agosto de 2000

Tesis Doctoral

**Materialización del Sistema de Referencia Terrestre
Internacional en Argentina mediante observaciones
GPS**

Juan F. Moirano

Agosto de 2000

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Paseo del Bosque s/n – (B 1900 FWA) - La Plata – Argentina
e-mail: jmoirano@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen

El Sistema de Posicionamiento Global GPS permite el cálculo de la posición de un usuario en forma instantánea durante las 24 horas del día y en cualquier parte del mundo con una exactitud de decenas de metros respecto de un sistema de referencia global. Mediante técnicas de medición y post procesamiento adecuadas, se logra un posicionamiento con exactitud de pocos centímetros. Esta capacidad de GPS es aprovechada para el establecimiento del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), una de cuyas aplicaciones es unificar las referencias geométricas de los países a escala global con una exactitud centimétrica. Las investigaciones tendientes a mejorar el modelo de las observaciones GPS aportan a su vez nuevos conocimientos sobre el comportamiento de la ionosfera y troposfera, responsables de retardos significativos en las señales y sobre la tectónica global y efectos de carga por mareas, responsables de movimientos mensurables de las estaciones receptoras.

El sistema de referencia de la Argentina ha cambiado en la última década, pasando de Inchauspe'69, local y con errores relativos de 3 a 10 partes por millón, a POSGAR'94, que materializa al sistema global con una exactitud submétrica y tiene errores relativos de 1 ppm. En el mismo período se estableció en Sudamérica la red SIRGAS, que en particular en la Argentina permite acceder al Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) con una exactitud centimétrica a través de diez puntos.

El resultado principal de ese trabajo es el nuevo marco de referencia POSGAR'98, que constituye la densificación argentina del marco SIRGAS95 y materializa al Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) con una exactitud de pocos centímetros. Fue calculado aplicando el estado del arte del procesamiento de observaciones GPS y su exactitud fue inferida a partir de comparaciones con observaciones independientes procesadas con la misma metodología. Se compara este nuevo marco con el oficial, POSGAR'94, y se ilustran mediante ejemplos con redes geodésicas existentes los casos en que sería ventajoso utilizar POSGAR'98 como control geodésico.

Se presenta también una metodología para el análisis de los residuos del ajuste de observaciones GPS. Se muestra que este método constituye una herramienta útil para analizar las deficiencias remanentes en el modelo de las observaciones con el objeto de orientar la investigación para el aumento de la exactitud de los resultados.

Tabla de contenidos

Introducción	1
Capítulo 1 Sistemas de referencia de la Geodesia actual	6
<i>1.1 Introducción</i>	6
<i>1.2 El marco conceptual</i>	8
1.2.1 El sistema de referencia ideal	9
1.2.2 El sistema de referencia convencional	9
1.2.3 El marco de referencia	10
1.2.4 Densificación del marco de referencia	10
<i>1.3 Sistemas de referencia celestes y terrestres</i>	11
1.3.1 Sistemas celestes	11
1.3.2 Sistemas terrestres	12
1.3.3 Sistemas intermediarios	13
1.3.4 El enfoque relativista	14
1.3.5 La referencia temporal	14
1.3.6 Constantes fundamentales	16
1.3.7 Cooperación internacional para establecer el sistema de referencia global	16
<i>1.4 Las técnicas de observación</i>	18
1.4.1 VLBI	18
1.4.2 LLR	19
1.4.3 SLR	20
1.4.4 GPS	22
1.4.5 DORIS	23
<i>1.5 El Sistema de convenciones del IERS de 1996</i>	24
1.5.1 El Sistema de Referencia Celeste Convencional	24
1.5.2 El Sistema de Referencia Terrestre Convencional	26
1.5.3 Transformaciones entre sistemas celestes y terrestres	29
1.5.4 Modelo de geopotencial	31
1.5.5 Efectos que producen desplazamientos en los sitios de observación	33
<i>1.6 Materializaciones del ITRS</i>	36
<i>1.7 Densificación del marco ITRF en América del Sur</i>	37
<i>1.8 Otros marcos de referencia globales</i>	38
Capítulo 2 El Sistema de Posicionamiento Global	40
<i>2.1 Introducción</i>	40
<i>2.2 Conceptos básicos del posicionamiento con GPS</i>	41
2.2.1 Las señales	41
2.2.2 La observación de fase	44
2.2.3 El método diferencial	45
2.2.4 El posicionamiento con fases	49
<i>2.3 Problemas particulares del posicionamiento de alta precisión</i>	58
2.3.1 Errores orbitales y de las coordenadas de la estación de referencia	58

2.3.2 Multicamino y dispersión de la señal	61
2.3.3 Variación de la posición de los centros de fase de las antenas receptoras	62
2.3.4 Efecto de las protecciones de las antenas o radomes	64
2.3.5 El retardo ionosférico	64
2.3.6 El retardo troposférico	66
Capítulo 3 Metodología y herramientas de cálculo	72
3.1 <i>Introducción</i>	72
3.2 <i>Descripción general</i>	72
3.3 <i>Procesamiento previo</i>	74
3.3.1 Preparación de las observaciones	74
3.3.2 Pre-procesamiento de las observaciones de códigos	75
3.3.3 Utilización de efemérides precisas	76
3.3.4 Pre-procesamiento de las observaciones de fase	76
3.4 <i>Cálculo de las sesiones</i>	82
3.4.1 Características más relevantes del procesamiento de fases	82
3.4.2 Estructura del programa principal de estimación de parámetros del BSW	85
3.4.3 Resultados por sesión	89
3.5 <i>El ajuste multisesión</i>	90
3.5.1 La introducción de las coordenadas de control en el ajuste	90
3.5.2 Acerca de la exactitud de la solución combinada	91
3.5.3 Densificación de ITRF	92
Capítulo 4 El marco de referencia POSGAR'98	93
4.1 <i>Introducción</i>	93
4.2 <i>Desarrollo histórico del marco de referencia nacional</i>	95
4.3 <i>POSGAR'94</i>	101
4.3.1 Las observaciones	101
4.3.2 El cálculo	102
4.3.3 Los resultados	103
4.3.4 POSGAR'94 y SIRGAS	103
4.4 <i>La transición entre el sistema Inchauspe'69 y POSGAR'94</i>	105
4.4.1 Parámetros de transformación entre CAI69 y POSGAR'94	105
4.5 <i>El marco de referencia POSGAR'98</i>	107
4.5.1 La integración de La Argentina en el marco SIRGAS	107
4.5.2 Las observaciones	108
4.5.3 El cálculo	110
4.5.4 Introducción del sistema de referencia	113
4.5.5 Resultados	115
4.5.6 POSGAR'94 - POSGAR'98, una transición notoria en ciertos casos prácticos	120
4.6 <i>Conclusiones</i>	122
Capítulo 5 Análisis de residuos de observaciones GPS	125

5.1	<i>Introducción</i>	125
5.2	<i>Análisis de residuos de observaciones GPS</i>	127
5.2.1	Las observaciones	127
5.2.2	Metodología	128
5.2.3	Aplicación de la inversión de los residuos al análisis de una red GPS local	133
5.2.4	Aplicación del método al análisis de redes geodésicas de extensión regional	138
5.2.5	Eliminación de los efectos dependientes de las antenas	140
5.2.6	Aplicación de las herramientas de análisis a la campaña SIRGAS'95	143
5.3	<i>Conclusiones del capítulo</i>	144
Capítulo 6 Conclusiones y trabajos futuros		146
6.1	<i>El marco de referencia Posgar'98</i>	146
6.2	<i>Análisis de residuos de observaciones GPS</i>	147
6.3	<i>El futuro del marco de referencia terrestre en Argentina</i>	149
Referencias citadas en el texto		151
Anexo I	El marco de referencia POSGAR'98	158
Anexo II	Tabla de ocupación de las campañas POSGAR	165
Anexo III	Las estaciones que conforman el marco POSGAR'98	167
Anexo IV	Información relativa al cálculo de POSGAR'98	169
Anexo V	Posiciones de los centros de fase de las antenas utilizadas en el procesamiento de POSGAR'98	170
Anexo VI	Residuos de cero diferencias en Wettzell	171
Anexo VII	Residuos de cero diferencias en Wettzell (valores medios extraídos)	177

Lista de figuras

Figura 1.1: Red de estaciones VLBI que participan en el IVS	19
Figura 1.2: Red global de estaciones SLR participantes del ILRS	21
Figura 1.3: Red de rastreo GPS permanente del IGS	22
Figura 1.4: Red global de balizas DORIS	23
Figura 2.1: Escalas relevantes para el posicionamiento diferencial	46
Figura 2.2: Ciclos perdidos en dobles diferencias de L_1	49
Figura 2.3: Soluciones posibles con ambigüedades enteras de L_1 a partir de una posición a priori de exactitud métrica	52
Figura 2.4: Soluciones posibles con ambigüedades enteras de L_0	53
Figura 2.5: Ventaja de la solución de ambigüedades enteras en función de la longitud de la sesión	57
Figura 3.1: Esquema del flujo de procesamiento del Bernese GPS software V 4.0	78
Figura 4.1: Vinculaciones por punto	103
Figura 4.2: Nro. de ocupaciones por punto	103
Figura 4.3: Vectores calculados en POSGAR'98	109
Figura 4.4: Establecimiento del sistema de referencia en el cálculo de POSGAR'98	114
Figura 4.5: Repetibilidad de las coordenadas de POSGAR'98 a través de las desviaciones estándar de los residuos en las direcciones Norte, Este y Altura	115
Figura 4.6: Desviaciones estándar de transformaciones de tres parámetros entre las soluciones por sesión y la que resulta de la combinación de todas. Se discrimina por sesión y por componente	116
Figura 4.7: Residuos de una transformación de 7 parámetros entre solución libre de POSGAR'98 y otra obtenida de fijar todos los puntos de control disponibles	117
Figura 4.8: Diferencias entre coordenadas POSGAR'94 y POSGAR'98	120
Figura 5.1: Dependencia de los residuos de dobles diferencias con la elevación en un vector corto	129
Figura 5.2: Dependencia de los residuos de dobles diferencias con la elevación en un vector corto	129
Figura 5.3: Autocorrelación para series de residuos en vectores cortos	130
Figura 5.4: Autocorrelación para series de residuos en vectores largos	130
Figura 5.5: Residuos de dobles diferencias entre TR14532.00 y LEI-INT, satélites 5 y 9	131
Figura 5.6: Residuos de cero diferencias para el satélite 5 en TRM14532.00	134
Figura 5.7: Residuos de cero diferencias para el satélite 27 en TRM14532.00	134

Figura 5.8: Residuos de cero diferencias respecto en AOAD/M_T para el satélite 5	135
Figura 5.9: Residuos de cero diferencias respecto en AOAD/M_T para el satélite 27	135
Figura 5.10: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en TRM14532.00 para el satélite 27	136
Figura 5.11: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en AOAD/M_T para el satélite 27	136
Figura 5.12: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en TRM14532.00 para el satélite 5	137
Figura 5.13: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en TRM14532.00 para el satélite 5	137
Figura 5.14: Residuos de cero diferencias (valores medios diarios sustraídos) para las estaciones TRM20220.00+GP+RD y AOAD/M_T en Wettzell para el día 140	141
Figura 5.15: Residuos de cero diferencias (valores medios diarios sustraídos) para las estaciones TRM20220.00+GP+RD y AOAD/M_T en Wettzell para el día 136	142
Figura 5.16: Residuos medios de cero diferencias para la estación AOAD/M_T en Wettzell	142
Figura 5.17: Residuos medios de cero diferencias para la estación TRM20220.00+GP+RD en Wettzell	143
Día 134. Fig. VI-1 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-2 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	172
Día 136. Fig. VI-3 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-4 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	173
Día 138. Fig. VI-5 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-6 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	174
Día 139. Fig. VI-7 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-8 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	175
Día 140. Fig. VI-9 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-10 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	176
Día 134. Fig. VII-1 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-2 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	178
Día 136. Fig. VII-3 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-4 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	179
Día 138. Fig. VII-5 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-6 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	180
Día 139. Fig. VII-7 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-8 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	181
Día 140. Fig. VII-9 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-10 (abajo): TRM20220.00+GP+RD	182

Lista de tablas

Tabla 2.1: Características relevantes de las combinaciones más usadas	55
Tabla 4.1: Diferencias de coordenadas absolutas y distancias entre POSGAR'94 y SIRGAS	104
Tabla 4.2: Residuos de una transformación de 7 parámetros entre la solución libre de POSGAR'98 y trece puntos de control	118
Tabla 4.3: Residuos de una transformación de 7 parámetros entre la solución libre de POSGAR'98 y la solución libre de la red de control	119
Tabla 4.4: Residuos de una transformación de tres parámetros entre la solución libre de la red local y la solución libre de POSGAR'98	119
Tabla 4.5: POSGAR'94 y POSGAR'98 como control de redes extensas y precisas	121
Tabla 5.1: Descripción de las campañas GPS utilizadas	127
Tabla 5.2: Antenas y receptores utilizados en las campañas calculadas	128

Lista de acrónimos utilizados en el texto

- AS: Anti Spoofing o encriptación del código P.
- ARP: Antenna Reference Point. Punto físico convencional de la antena GPS al que son referidos los offsets medios del centro de fase.
- BIH: Bureau International de l'Heure.
- BSW: Bernese GPS Software V4.0.
- CAI69: Marco de referencia Campo Inchauspe'69
- CAP: Central Andes Project.
- CEP: Celestial Ephemeris Pole. Polo norte definido por las teorías de Precesión (Lieske) y Nutación (Wahr) respecto del sistema inercial.
- CIO: Conventional International Origin. Polo norte convencional. Está definido por la intersección del eje Z del ITRF con la superficie terrestre.
- CODE: Center for Orbit Determination of Europe, Berna, Suiza.
- CODCHK: Code check. Módulo del BSW que verifica la continuidad de las observaciones de código.
- CODSPP: Code single point positioning. Módulo del BSW que calcula posicionamiento puntual con códigos.
- CRS: Conventional Reference System.
- CTRS: Conventional Terrestrial Reference System.
- DGFI: Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. Instituto Alemán de Investigaciones Geodésicas, Munich.
- DoD: U.S. Department of Defense.
- DORIS: Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated by Satellite.
- FCAG: Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.
- GPS: Global Positioning System.
- GPPS: Geodetic Post Processing Software™, Ashtech Inc.
- GISPY/OASIS: GPS Inferred Positioning System / Orbit Analysis and Simulation Software.
- IAG: International Association of Geodesy.
- IAU: International Astronomical Union.
- ICRF: International Celestial Reference Frame.
- ICRS: International Celestial Reference System.

IERS: International Earth Rotation Service.

IGM: Instituto Geográfico Militar argentino.

IGS: International GPS Service.

ILRS: International LASER Ranging Service.

ILS: International Latitude Service.

IPGH: Instituto Panamericano de Geografía e Historia (OEA).

IPMS: International Polar Motion Service.

ITRF: International Terrestrial Reference Frame.

ITRS: International Terrestrial Reference System.

IUGG: International Union of Geodesy and Geophysics.

IVS: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry.

LAGEOS: LASER GEodynamic Satellite.

LLR: Lunar LASER Ranging.

LOD: Length of Day. Variaciones de la longitud del día.

msa: milisegundos de arco.

NIMA: National Imaginery and Mapping Agency; antes: Defense Mapping Agency DMA.

Parsec: Paralaje de un segundo de arco que equivale a una distancia de 3.09×10^{13} Km o 3.26 años luz.

NNR-NUVEL-1A: No Net Rotation Northwestern University VELOCITY Model 1A.

PASMA: Proyecto de Asistencia al Sector Minero Argentino.

PCV: Phase Center Variations. Correcciones a la posición del centro de fase de las antenas GPS. En general implica es una dependencia respecto de la elevación del satélite en que se origina la señal recibida.

PDOP: Point Dilution of Precision. Factor de propagación de la precisión de las observaciones a las coordenadas calculadas de un punto a causa de la distribución geométrica de los satélites observados.

PGA94: POSGAR '94. Materialización del sistema POSGAR de 1994.

PGA98: POSGAR '98. Materialización del sistema POSGAR de 1998, coincidente con SIRGAS '95 e ITRF94 para la época 1995.4.

POSGAR: Posiciones Geodésicas Argentinas.

SA: Selective Availability o Disponibilidad Selectiva.

SAGA: South American Geodynamic Activities. Proyecto de investigación del Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) dedicado a la geodinámica andina.

SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur.

SLR: Satellite LASER Ranging.

SRC: Sistema de Referencia Convencional (equivale a Sistema de Referencia).

TAI: Tiempo Atómico Internacional.

TCG: Tiempo Coordinado Geocéntrico.

TDB: Tiempo Dinámico Baricéntrico.

TDT: Tiempo Dinámico Terrestre.

TT: Tiempo terrestre.

UT0: Tiempo universal calculado a partir de observaciones astronómicas en ausencia de información acerca de la posición del polo de rotación en el marco terrestre.

UT1: Resulta de corregir a UT0 por el movimiento del polo.

UT2: Resulta de corregir a UT1 por las variaciones de la longitud del día (LOD).

UTC: Tiempo Universal Coordinado. Escala Basada en el TAI pero que mantiene la duración del día solar medio mediante saltos de un segundo.

VLBI: Very Long Baseline Interferometry.

WGS84: World Geodetic System 1984.

Introducción

En las últimas dos décadas, el desarrollo de las comunicaciones y las herramientas informáticas han producido un aumento tal en la posibilidad de producir, almacenar procesar e intercambiar información, que en el caso de las geociencias, hace posible una nueva visión de muchos problemas. En este contexto, la Tierra es una unidad dentro de la cual fenómenos de interés pueden estudiarse incluyendo sus relaciones entre sí y con su entorno a escala local, regional o incluso global. Entre las muchas relaciones que pueden definirse para la cuantificación de los componentes de un problema, las que se encuentran directamente relacionadas con este trabajo son las de tipo espacial: A fin de definir unívocamente la posición de un objeto en el espacio, se debe definir primero un Sistema de Referencia. Sin embargo éste es en principio sólo una idealización, por lo que para poder utilizarlo con el fin de asignar coordenadas a puntos físicos es necesario previamente materializarlo, es decir lograr que sea posible medir respecto de él.

La Geodesia es la ciencia que por definición se ocupa de la materialización de sistemas de referencia en la Tierra. En los últimos diez años, el desarrollo de los métodos de posicionamiento de la geodesia espacial, principalmente interferometría de muy larga base (VLBI), medición de distancias a satélites artificiales con LASER (SLR) y más recientemente el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) han permitido por primera vez la materialización de un sistema de referencia global de exactitud centimétrica. Se trata del Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) y su materialización o Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF). Establecida dicha materialización, que consta

hoy de aproximadamente doscientas estaciones distribuidas en toda la superficie terrestre, se realizaron grandes esfuerzos a fin de aumentar el número de puntos de referencia. Esto último permitiría el acceso generalizado de los usuarios de las coordenadas al Sistema. Con este objetivo, en América del Sur se estableció en 1997 mediante observaciones GPS, una red de referencia que llevó de 9 a 60 los puntos en el continente con coordenadas referidas al ITRS. Esta tarea se llevó a cabo mediante el proyecto de cooperación internacional denominado Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur (SIRGAS). El siguiente objetivo del proyecto fue densificar la red dentro de cada país, ya que la Argentina por ejemplo, sólo contaba con 10 puntos SIRGAS dentro de su territorio.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS), se ha convertido en la herramienta de posicionamiento por excelencia por su bajo costo y gran versatilidad. Fue diseñado para que un usuario en cualquier parte del mundo y durante las 24 horas del día pudiera obtener sus coordenadas con exactitudes de pocos metros respecto a un sistema de referencia global en forma instantánea utilizando un equipo portátil y de bajo costo. Mediante métodos de observación y cálculo especialmente diseñados se puede lograr que estas exactitudes métricas se transformen en centimétricas. Las observaciones GPS en sí tienen una precisión milimétrica, por lo que aún se estudia la forma de mejorar un poco más la exactitud de los resultados del posicionamiento con esta técnica. La mejora de los modelos de las observaciones tiene dos aplicaciones principales: por un lado permitir aumentar la exactitud del posicionamiento, y por otro, obtener información acerca de la física de diferentes componentes del modelo de las observaciones. Entre estas componentes se puede citar la distribución de electrones en la ionosfera, o de vapor de agua en la troposfera, que producen retardos mensurables en las observaciones, y efectos de carga oceánica o atmosférica, que influyen especialmente sobre la posición vertical de la estación. Finalmente, es cada vez más difundido el uso de GPS para obtener información del movimiento y deformaciones de la corteza terrestre, tanto para el estudio de fenómenos continuos, como las velocidades de las placas tectónicas, cuanto episódicos, como la mecánica de generación de terremotos o erupciones volcánicas. En particular los movimientos de las placas tectónicas deben ser incorporados en los modelos cuando se requiere relacionar con exactitud centimétrica, coordenadas y observaciones referidas a épocas diferentes.

En este trabajo, se estudia la capacidad de la técnica GPS para la materialización de marcos de referencia de escala regional y se presenta un nuevo marco de referencia para la Argentina, denominado POSGAR'98. Este fue calculado enteramente a partir de observaciones GPS, está referido al ITRS a través del marco SIRGAS y eleva de 10 a algo más que 130 el número de puntos en el país referidos al ITRS manteniendo una distribución espacial aproximadamente homogénea. Su exactitud respecto de ITRF94 es del orden de pocos centímetros, mejorando en más que un factor diez la calidad del marco de referencia oficial actualmente en uso, POSGAR'94.

Se implementa asimismo en este trabajo, una metodología para el análisis de los residuos del ajuste de observaciones GPS. El análisis de los residuos constituye una herramienta útil en el posicionamiento de alta precisión con GPS. Esto se debe a que puede facilitar el análisis de los efectos que aún se encuentran deficientemente modelados en la ecuación de observación, como ser las ya mencionadas componentes del modelo de propagación o del movimiento de la estación.

En el primer capítulo de este trabajo se describen las características de los sistemas de referencia globales, de los cuales se toma el ejemplo del Sistema de Referencia Terrestre Internacional, detallándose su definición, sistema de convenciones asociado y su materialización.

El segundo capítulo está dedicado a la descripción de la técnica GPS, incluyendo la descripción de la metodología del posicionamiento geodésico y de todas las componentes que constituyen el estado del arte del posicionamiento de alta precisión.

El tercer capítulo está dedicado a la descripción de las características principales del paquete de procesamiento GPS de la Universidad de Berna, el Bernese GPS Software V4.0, extensivamente utilizado en este trabajo.

En el cuarto capítulo se presenta el nuevo marco de referencia POSGAR'98. Se describe en primer lugar la evolución del sistema de referencia terrestre nacional en la Argentina, desde los primeros sistemas de alcance regional, hasta Inchauspe'69, de cobertura nacional, los primeros intentos para materializar un sistema de referencia sudamericano, el surgimiento del posicionamiento satelitario y la medición y cálculo del marco POSGAR'94. Se describen también las implicancias de la transición de Inchauspe'69 al sistema global. En segundo lugar se describe el marco de referencia POSGAR'98,

incluyendo las campañas de observación GPS utilizadas, la metodología empleada, los resultados obtenidos, y un control de su exactitud realizado mediante observaciones independientes. Finalmente se comparan los dos marcos POSGAR entre sí y se analizan sus respectivas cualidades como control para redes geodésicas según su extensión. Esto último se realizó sobre la base de varias redes geodésicas extensas y de buena calidad recientemente establecidas en el país.

En el quinto capítulo se implementa una metodología para el análisis de los residuos del ajuste de observaciones GPS. En primer lugar se muestran residuos de dobles diferencias de fase para ejemplos seleccionados haciendo hincapié en su sensibilidad a los errores en el modelo de las observaciones. En segundo lugar, residuos de dobles diferencias de fase provenientes del ajuste de una red son tratados a fin de asignar correctamente las contribuciones correspondientes a cada satélite y estación participantes del ajuste. En tercer lugar se implementa un método para separar los efectos dependientes de la antena de los que se relacionan únicamente con el sitio pero serían idénticos para antenas diferentes emplazadas a poca distancia entre sí. Finalmente se muestran las cualidades del método mediante ejemplos con observaciones de alta calidad provenientes de redes geodésicas locales y regionales en Europa y Sudamérica.

En el sexto capítulo se resumen las conclusiones del trabajo y se describen los posibles trabajos futuros en lo referente al análisis de observaciones GPS y a la materialización y mantenimiento del Sistema de Referencia Terrestre Internacional en Argentina.

Finalmente se agregan dos grupos de anexos que contienen resultados y detalles técnicos referidos en los capítulos cuarto y quinto: Los primeros cinco anexos se refieren al cálculo de POSGAR'98, detallado en el cuarto capítulo. Los últimos dos anexos muestran resultados del análisis de residuos, referidos en el quinto capítulo.

El anexo I incluye las coordenadas y precisiones estimadas para los puntos que conforman el marco de referencia POSGAR'98. El anexo II detalla el esquema de ocupaciones de los puntos incluidos en el cálculo. El anexo III describe qué puntos constituyen el marco de referencia POSGAR'98. El anexo IV es un CD-ROM que incluye las observaciones originales utilizadas en el cálculo, las salidas de pre-procesamiento y procesamiento de todas las sesiones de observación que contribuyeron a POSGAR'98 y los resultados de la

compensación final. Finalmente el anexo V incluye las descripciones de las antenas GPS que se utilizaron en las mediciones de la red POSGAR.

El anexo VI incluye gráficos que muestran los resultados de la inversión de los residuos de dobles diferencias para dos estaciones muy cercanas vinculadas por medio de vectores de cientos de kilómetros durante cinco días. Se muestran los resultados para cada estación día por día y para cinco días. Allí se muestran las consecuencias de un error en el modelo de la posición del centro de fase de una de las antenas. En el anexo VII se muestran resultados del mismo cálculo luego de un proceso adicional que elimina los efectos que se repiten día a día a causa de la reiteración de la geometría receptor-antena. En este caso se muestran también los resultados día por día para dos estaciones durante cinco días.

Capítulo 1

Sistemas de referencia de la Geodesia actual

1.1 Introducción

La noción de sistema de referencia espacial es en general familiar. Parece natural que a cada punto del espacio se le pueda asociar un conjunto de coordenadas que definan su posición en forma unívoca y universal. Sin embargo, definir y poder usar un sistema de referencia en la realidad física no es trivial. Durante casi toda la historia del hombre, la necesidad de dar coordenadas a puntos se limitaba a un grupo de pocas pero relevantes aplicaciones como ser la navegación y en menor medida la delimitación de propiedades. En el ámbito de la ciencia, el desarrollo de los sistemas de referencia estuvo ligado a la Geodesia, en relación con problemas tales como la determinación de la forma y dimensiones de la Tierra, y a la Astronomía, en que se persigue la validación de teorías físicas o su refinamiento a partir de mediciones de las posiciones de objetos celestes. Fue finalmente el interés por la navegación en el último cuarto del siglo XX el que aportó los recursos que resultaron en el desarrollo actual de los sistemas de referencia terrestres.

Antes de la era espacial, distintos sistemas de referencia, apropiados a las necesidades arriba mencionadas, se desarrollaron independientemente: En la Astronomía se encaró el problema de la forma más general, ya que para esta ciencia se presentaba de la forma más compleja: desarrollar sistemas de referencia que sirvieran para expresar las posiciones de los objetos celestes que eran observadas desde la Tierra. Esto requiere conocer suficientemente bien los movimientos de la Tierra como para expresar las posiciones de

objetos y observadores respecto de un sistema inercial, que permita una descripción sencilla de fenómenos físicos de interés, como por ejemplo el movimiento orbital de los planetas. Estas investigaciones dieron un gran impulso al conocimiento de la rotación terrestre. Debido a que en Astronomía se pueden medir direcciones a los objetos con mucha exactitud pero no las distancias hasta ellos, los sistemas de referencia celestes solamente definen la orientación de los ejes coordenados, pero no definen la escala, siendo asimismo la posición del origen del sistema prácticamente arbitraria. Paralelamente, la geodesia clásica desarrolló para sus fines, sistemas de referencia terrestres que, debido a las limitaciones de las técnicas disponibles, mantenían una exactitud aceptable en regiones de a lo sumo algunos cientos de kilómetros y encontraban un obstáculo insalvable en los océanos. En la mayoría de los países se utilizaron estos sistemas de referencia como base para el ordenamiento de la información catastral y la cartografía.

A fines de la década del '50, el comienzo del uso de los satélites artificiales, y más tarde, la disponibilidad de relojes muy precisos, marcaron un punto de inflexión en la historia de los sistemas de referencia. Las órbitas de los satélites materializan naturalmente el centro de masa de la tierra como uno de los focos de sus órbitas. Los relojes atómicos permitieron la medición del tiempo de propagación de ondas electromagnéticas entre dichos vehículos y la Tierra con precisión mejor que un nanosegundo. Estas herramientas, sumadas a las ya existentes y complementadas por la disponibilidad de computadoras cada vez más veloces, dieron lugar a la construcción de una nueva generación de sistemas de referencia en la Astronomía y la Geodesia. En particular ya no puede hablarse de ellos como entes separados siendo que cada uno necesita del otro para poder ser materializado con la exactitud que las herramientas de medición actuales requieren. Los nuevos sistemas terrestres son por naturaleza globales. Su orientación en el espacio proviene mayormente de los sistemas celestes de la Astronomía, mientras que su escala y origen son aportados por determinaciones de posiciones de satélites artificiales.

Los sistemas de referencia modernos han alcanzado una precisión de pocos centímetros. Esto requiere no solamente modelar el movimiento de la Tierra en el espacio, sino también tener en cuenta movimientos mucho más sutiles pero que afectan en forma notoria a las posiciones de las estaciones de observación terrestres. Así ha sido necesario, por ejemplo, complicar el modelo de corteza terrestre: el uso de un modelo de corteza terrestre rígida ocasionaría la imposibilidad de integrar observaciones realizadas con algunos años de

diferencia en el mismo sitio sin degradar el sistema ya que las placas tectónicas tienen movimientos y deformaciones del orden de algunos centímetros por año. Esto obliga a un replanteo de lo que se considera como corteza terrestre, ya que al estar en movimiento es preciso separar a este de la rotación terrestre propiamente dicha. Los nuevos sistemas de referencia impulsan el conocimiento de la geodinámica global aportando mediciones directas de las velocidades de deriva de las placas tectónicas e incluso detectando deformaciones regionales en los márgenes activos de los continentes, donde estas son más intensas.

En este capítulo, se desarrollarán los conceptos fundamentales en que se basa la definición de los sistemas de referencia terrestres y celestes y la vinculación entre ellos. Luego se describirá el sistema de convenciones del Servicio Internacional de la Rotación de la Tierra (IERS), que define el estado del arte de la realización de los sistemas de referencia celeste y terrestre y su vinculación mutua. Seguidamente se describen brevemente las técnicas de observación que hacen posible la materialización de los sistemas de referencia modernos. A continuación y como ejemplo de la aplicación de las convenciones antes descritas, se resumen las características salientes de los últimos marcos de referencia producidos por el IERS. En la sección siguiente se describe brevemente la situación en Sudamérica y la Argentina respecto del acceso a estos marcos de referencia terrestres globales. Finalmente, por su masiva difusión entre los usuarios de los sistemas satelitales de posicionamiento, se describen algunos sistemas de referencia producidos por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

1.2 El marco conceptual

En la presente sección se desarrollan los principales conceptos relativos a la definición y realización de los sistemas de referencia globales en uso durante la última década. Tratamientos extensos de estos temas pueden encontrarse por ejemplo en [Kovalevski et al., 1989] y [Altamimi, 1990].

1.2.1 El sistema de referencia ideal

Un sistema de referencia se define primariamente mediante el *enunciado* de una propiedad general que los objetos referidos a él deberán cumplir. Esto es denominado “sistema de referencia ideal” y puede ser, por ejemplo, pedir que las ecuaciones de movimiento de todos los objetos puedan ser expresadas respecto de él sin necesidad de incluir términos de aceleración debidos al movimiento del sistema de referencia. El enunciado del sistema de referencia ideal requiere seguidamente de la *selección* de una estructura física o conjunto de objetos que cumpla con la o las propiedades requeridas con la mejor aproximación posible. Cumplido este paso, debe tenerse presente que se cuenta tan sólo con una definición, que sin embargo no provee a los usuarios de medio alguno para acceder al sistema de referencia.

1.2.2 El sistema de referencia convencional

Para hacer accesible el sistema de referencia antes definido, se debe dar coordenadas a objetos componentes de la estructura física referida en §1.2.1 a partir de observaciones. Esto requiere previamente la *selección* de un conjunto de modelos y constantes físicas que permitan describir adecuadamente los movimientos y/o posiciones de la estructura física previamente elegida, en relación con las técnicas de observación disponibles. Estas selecciones no son únicas ya que en general hay muchas maneras de modelar los fenómenos físicos, existiendo siempre cierto grado de arbitrariedad en la selección. Dicha arbitrariedad es natural debido a que los modelos científicos se encuentran en constante evolución. En consecuencia, es menester llegar a un *acuerdo* para utilizar algún conjunto particular de ellos en la definición de un sistema de referencia y que dicho acuerdo perdure en el tiempo, aunque los modelos sean perfeccionados rápidamente. Proceder de otro modo resultaría en la imposibilidad de combinar resultados provenientes de distintos grupos de trabajo e incluso de compararlos entre sí. Además de estas convenciones concernientes a los modelos y constantes, que caracterizan la física de la estructura a describir y las observaciones a realizar sobre sus componentes, se pueden utilizar convenciones adicionales a fin de que el sistema de referencia resultante sea lo más compatible posible con otros preexistentes. Un ejemplo en este sentido son las convenciones recomendadas para la orientación, escala y posición del geocentro de las futuras realizaciones del sistema

de referencia del IERS en [Blewitt et al., 1999]. Esto es importante a fin de poder utilizar con menor dificultad datos expresados en sistemas antiguos junto con otros expresados en el nuevo. El resultado de la adopción de todas estas convenciones constituye el “sistema de referencia convencional” llamado también más simplemente “sistema de referencia”. Sin embargo, en este punto no tenemos aún manera de referir los objetos de nuestro interés al él. El sistema de referencia permanece aún inaccesible a los usuarios ya que aún no es posible vincular objetos físicamente al él mediante observaciones.

1.2.3 El marco de referencia

El fin último de un sistema de referencia es dar la posibilidad de expresar cuantitativamente posiciones de objetos respecto de él. Para esto es indispensable contar con las coordenadas de un conjunto inicial de puntos. Estos deben, a su vez, permitir dar coordenadas a otros nuevos mediante observaciones adecuadas. Habiendo *definido* previamente un sistema de referencia, compuesto por un sistema de referencia ideal, una estructura física asociada, y un conjunto de convenciones o sistema de referencia convencional, se *materializa* esta idealización mediante un conjunto de coordenadas y su evolución temporal, lo que constituye un “marco de referencia”. Los puntos cuyas coordenadas se determinan están asociados a los objetos referidos en §1.2.1 como integrantes de la estructura física que cumple con las propiedades que conforman el sistema de referencia ideal. Las coordenadas se determinan mediante observaciones adecuadas y para su cálculo se aplican los modelos y constantes físicas que conforman el sistema de referencia convencional.

1.2.4 Densificación del marco de referencia

El esfuerzo requerido para la materialización de un sistema de referencia y los estrictos requisitos que deben cumplir los puntos que se utilizan hace que los marcos de referencia fundamentales estén constituidos por sólo un puñado de objetos o puntos. Esto hace necesario un trabajo posterior de densificación a fin de hacer el sistema accesible al mayor número posible de usuarios. En esta etapa se recomienda utilizar todos los parámetros establecidos en el sistema de referencia convencional. Sin embargo, según sea el fin de la

densificación, pueden tolerarse condiciones menos restrictivas sobre la exactitud de las coordenadas de los nuevos puntos en favor de lograr un mayor número de ellos.

1.3 Sistemas de referencia celestes y terrestres

Según que la estructura física elegida para cumplir la definición del sistema de referencia ideal sean ciertos cuerpos celestes en el espacio extraterrestre o puntos sobre la corteza terrestre, se estará ante la definición de un sistema de referencia celeste o terrestre respectivamente. Se mencionarán brevemente los dos casos, ya que en la práctica resultan interdependientes dado que ambos deben materializarse a partir de observaciones realizadas desde la Tierra.

1.3.1 Sistemas celestes

Existen dos tipos de definiciones mayormente utilizados: definiciones dinámicas y cinemáticas. Ambos tipos han sido empleados en Astronomía para la definición de sistemas de referencia. Las definiciones cinemáticas sin embargo han cobrado un indiscutible predominio a partir del establecimiento de nuevos métodos de medición, en especial la técnica VLBI. Ambos tipos de definiciones son equivalentes en que pueden establecer sistemas inerciales desde el punto de vista de la mecánica newtoniana.

Definición dinámica

Dada una estructura física, su dinámica es la solución de sus ecuaciones diferenciales de movimiento, expresadas respecto de una terna de ejes fijos en el espacio. Las leyes de la dinámica establecen ciertos puntos y direcciones que son especialmente convenientes para definir un sistema de referencia. Ese es el caso del baricentro del sistema, libre de aceleraciones en ausencia de fuerzas externas, y adecuado para establecer el origen del sistema. Por otra parte, la dirección del vector momento angular total del sistema permanece fija en el espacio si sobre el sistema no actúan torques externos, por lo que en general se la usa para definir uno de los ejes de la terna coordenada. Ejemplos de este tipo de sistema son los FK3 y FK4, basados en las teorías de Newcomb de la precesión y la dinámica del Sistema Solar [Kovalevski et al., 1989].

Definición cinemática

Este enfoque supone que el universo visible no rota como un todo. O sea que los movimientos propios de los cuerpos que lo componen no pueden ser interpretados como una rotación en bloque. En la práctica implica suponer que existe un conjunto de cuerpos que están fijos en el espacio y que cualquier movimiento aparente de los mismos pueda ser interpretado como un movimiento de la plataforma de observación.

Como ningún cuerpo físico puede tener una velocidad superior a la de la luz, un objeto situado suficientemente lejos de la Tierra tendrá un movimiento propio despreciable. En efecto, un cuerpo alejado de la Tierra más de 3.26×10^8 años luz que se moviera a la velocidad de la luz en forma tangencial al radio vector entre él y la Tierra, tendrá un movimiento aparente anual menor que 0.7 milisegundos de arco. De hecho, muchos cuásares se encuentran a distancias mucho mayores que 3.26×10^8 años luz y si consideramos que sus velocidades tangenciales deben ser menores que la de la luz, su movimiento aparente anual será indetectable con las técnicas actuales de observación. En consecuencia, es posible construir un sistema de referencia no rotante, mediante objetos tan lejanos que puedan considerarse fijos en el espacio. Es interesante notar que los objetos están igualmente fijos para un punto situado en el centro de la Tierra o en el baricentro del sistema solar o en cualquier otro punto del entorno espacial local, por lo que esta definición no aporta ningún punto preferente para definir el origen del sistema. Tampoco define ninguna dirección de preferencia respecto de la cual referir los ejes. Estos parámetros deberán elegirse independientemente más adelante.

1.3.2 Sistemas terrestres

Deben permitir expresar las coordenadas de puntos sobre la corteza terrestre teniendo en cuenta sus movimientos relativos a lo largo del tiempo. El problema sería más sencillo si la Tierra fuera rígida, pero no es así, ya que además de deformarse el planeta como cuerpo, también lo hace la corteza. En consecuencia se debe definir el sistema ideal mediante ciertas condiciones adicionales a fin de separar el movimiento de rotación terrestre de los desplazamientos relativos de los puntos sobre la corteza donde se realizan las mediciones. Esto puede lograrse por ejemplo exigiendo que la energía cinética total de la corteza sea mínima, como se expresa en (1.1).

$$\frac{1}{2} \int_C \left[\frac{d\vec{r}^7}{dt} \cdot \frac{d\vec{r}^7}{dt} \right] dS = \text{mín} \quad (1.1)$$

Donde \vec{r}^7 es el radio vector que va desde origen del sistema terrestre a un punto sobre la porción dS con masa dm de la superficie terrestre C , que es el dominio de integración. La condición anterior implica que la cantidad de movimiento y el momento cinético netos de la corteza sean nulas, como se expresa en (1.2).

$$\int_C \frac{d\vec{r}^7}{dt} dS = 0 \quad \int_C \vec{r}^7 \wedge \frac{d\vec{r}^7}{dt} dS = 0 \quad (1.2)$$

En la práctica, estas integrales son reemplazadas por sumas sobre los puntos de observación elegidos y puede considerarse que ellos se mueven en forma independiente o que forman parte de un número finito de placas rígidas en movimiento. La elección de uno de estos modelos determina el tipo de sistema de referencia ideal a utilizar. En, por ejemplo, [Altamimi, 1990] o [Bock, 1996] pueden hallarse tratamientos más detallados de este tema.

1.3.3 Sistemas intermediarios

Supóngase que se desea representar el movimiento de la Tierra en el espacio. Se tiene en consecuencia una terna de ejes fijos a la Tierra $[o,x,y,z]$ y una terna inercial $[O,X,Y,Z]$. El movimiento de la Tierra quedará descrito si se conocen las expresiones de las coordenadas de o y las direcciones de los ejes respecto del sistema $[O,X,Y,Z]$.

Por razones prácticas ha resultado muchas veces conveniente definir sistemas intermedios entre los dos antes considerados. Esto se hace por ejemplo para separar el movimiento del polo de la precesión y la nutación. La elección de este sistema es arbitraria y no hay un criterio intrínsecamente mejor que otro para hacerlo. Entre las propuestas más usadas están que el eje principal sea coincidente con la dirección del vector momento angular terrestre, con la posición del eje instantáneo de rotación, el eje de la figura, etc.

Estos sistemas intermedios no son sistemas de referencia como se ha definido antes en este capítulo, y conceptualmente se deberían considerar solamente los sistemas celeste y terrestre antes descriptos transformando entre ellos de manera directa sin intermediario alguno.

1.3.4 El enfoque relativista

Se debe mencionar en este punto que de acuerdo a la teoría de la relatividad general, todos los sistemas de referencia deben ser considerados como locales dependiendo de la distribución de masas que haya en su vecindad. Esto implica que llevar un sistema de coordenadas desde un punto a otro del espacio exige el conocimiento de la distribución de masas en cada punto del espacio. Es debido a esto que en rigor los sistemas de referencia ideales referidos más arriba deberían ser llamados cuasi-inerciales. En la práctica se trabaja como si el sistema fuera inercial y se agregan correcciones al concepto newtoniano cuando es necesario. Habiendo sido hecha esta aclaración, se seguirá utilizando el término inercial en el contexto de los sistemas de referencia a fin de no complicar excesivamente el lenguaje.

1.3.5 La referencia temporal

La mecánica de Newton postula la existencia de un único tiempo, válido para todo el universo. Esto equivale a decir que una única escala de tiempo o reloj puede definir la variable independiente de las ecuaciones de movimiento de cualquier cuerpo en el Universo. Si en cambio aceptamos como válida la teoría de la relatividad especial, el tiempo y el espacio quedan ligados, pero como su geometría es euclídea, esto no tiene efectos en los sistemas de referencia. La introducción de la teoría de la relatividad general en cambio, hace que la relación espacio-tiempo quede afectada por la gravedad. Esto complica la definición de las escalas de tiempo haciéndolas locales, y por consiguiente conviene tratar la definición del tiempo como se hizo para los sistemas de referencia espaciales identificando cinco pasos:

Concepto

Se basa en la teoría de la relatividad general. Se deja el nombre “tiempo” para el tiempo absoluto ideal newtoniano y se adopta la definición de “argumento temporal ideal”. Dos definiciones son de utilidad en este contexto: El *tiempo propio ideal*, que se define con relación a una partícula aislada en reposo respecto de la cual se cumplen las leyes de la mecánica cuántica y *tiempo coordinado ideal*, correspondiente a un cierto dominio del espacio-tiempo que es descrito por un tensor métrico tetradimensional de Einstein. De las

cuatro coordenadas, la que corresponde a la componente negativa de la diagonal del tensor es el tiempo coordinado.

Selección de una estructura física

Las definiciones anteriores de tiempo deben ser aplicadas a algún sistema físico. Por ejemplo para el tiempo propio sería un átomo aislado de Cs 133. Para el tiempo coordinado hay que definir dónde es válido ese tiempo, por ejemplo sobre una equipotencial cercana a la superficie de la Tierra resultando un tiempo ideal terrestre geocéntrico, en el baricentro del sistema solar, resultando un tiempo ideal baricéntrico, etc.

Modelado de la estructura

Como en el caso de los sistemas de referencia espaciales, se debe modelar la estructura física usando un conjunto de parámetros elegidos en forma convencional. En el caso del tiempo propio, se puede definir al segundo como el tiempo equivalente a 919631770 transiciones hiperfinas del Cs 133. En el caso del tiempo coordinado baricéntrico, se puede usar el mismo modelo de sistema solar que define el Sistema de Referencia Convencional baricéntrico. Se sugiere referirse a estos tiempos como argumentos temporales convencionales en analogía con los sistemas de referencia convencionales definidos antes.

Realización

La realización de un argumento temporal ideal convencional se hace a través de una escala de tiempo de la misma forma que un marco de referencia materializa a un sistema de referencia. Esto implica la necesidad de mediciones y comparaciones.

Densificación

La densificación de la escala de tiempo se realiza mediante la sincronización de varios relojes a una dada escala de tiempo de modo que esta sea accesible en el lugar en que se necesite. Como ejemplo puede citarse la diseminación del Tiempo Atómico Internacional (TAI) mediante el Tiempo Universal Coordinado (UTC).

Relación entre las escalas de tiempo y los sistemas de referencia

Para la construcción de los marcos de referencia convencionales y las escalas de tiempo se deben utilizar los mismos modelos físicos. Esto implica que ambos conceptos están asociados. Así, para la construcción de un sistema de referencia basado en la dinámica del

sistema solar, se necesita un tiempo referido al centro de masas del sistema: un argumento temporal baricéntrico. Si en cambio se pretende modelar los movimientos de satélites artificiales alrededor de la Tierra, se debería usar un argumento temporal geocéntrico. Un tratamiento más extenso de la referencia temporal y definiciones asociadas puede encontrarse en [Kovalevski et al., 1989].

1.3.6 Constantes fundamentales

La definición de estándares es necesaria a fin de unificar criterios si se desea construir y utilizar un sistema de referencia convencional. Esto implica definir un conjunto de constantes fundamentales y utilizarlas excepto en los casos en que se esté trabajando en el mejoramiento de las mismas. Son adoptadas usualmente por uniones científicas internacionales y se las llama constantes fundamentales. Como ejemplo se pueden mencionar: la constante gravitacional, la velocidad de la luz en el vacío, los valores de las masas del sol y los planetas del sistema solar, etc. Un ejemplo de tabla de constantes fundamentales utilizadas en la materialización de sistemas de referencia puede encontrarse en [McCarthy, 1996].

1.3.7 Cooperación internacional para establecer el sistema de referencia global

La definición de sistemas de referencia convencionales globales y de uso general exige que:

- a) Sean definidos de acuerdo al estado del arte de los modelos físicos y técnicas de medición disponibles.
- b) Aprovechen las observaciones realizadas en todo el mundo mediante las técnicas relevantes a su definición.
- c) Sean materializados de manera que puedan ser utilizados por la mayor cantidad posible de usuarios.
- d) Haya una política de mantenimiento constante.
- e) Exista consenso en la comunidad acerca de la conveniencia de su uso generalizado.

Esto exige un esfuerzo de cooperación científica internacional, tarea en que la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) y la Unión Astronómica Internacional (IAU) han adquirido experiencia durante todo el siglo XX como se detalla a continuación.

Desde 1899 a 1982 funcionó el servicio internacional de la Latitud (ILS) con el propósito de determinar el movimiento del polo mediante cinco estaciones dispuestas aproximadamente a la misma latitud y con los mismos instrumentos.

Desde 1912 funcionó el Servicio Internacional de la Hora (BIH) para la definición y diseminación del tiempo. Este servicio generó dos secciones sucesivas: desde 1955 a 1967 el Rapid Latitude Service (RLS) realizó determinaciones y predicciones de la posición del polo para realizar correcciones de tiempo. Desde 1967 a 1988 el servicio de los parámetros de rotación de la Tierra (Service of the ERP) realizó determinaciones simultáneas del movimiento del polo y la velocidad de rotación terrestre (UT1) usando todas las técnicas de observación disponibles.

Entre 1962 y 1988 el Servicio Internacional del Movimiento del Polo (IPMS) realizó determinaciones de la posición del eje de rotación instantáneo a partir de todos los datos disponibles de latitud. A partir del año 1977 también produjo determinaciones de UT1 derivadas de todas las observaciones disponibles de UT0.

A fines de la década del '80 estaban desarrolladas ya las técnicas VLBI y SLR, que permitirían realizar determinaciones de los parámetros de rotación terrestre con una precisión que haría obsoletos los métodos ópticos clásicos usados hasta entonces. A esto se sumaba la disponibilidad de sistemas satelitarios de navegación como TRANSIT y GPS, que permitirían un acceso sencillo y masivo a los sistemas de referencia globales. En estas condiciones, en el año 1988, se discontinuaron las actividades de los servicios del BIH, IPMS e ILS y se concentraron todas las actividades en el International Earth Rotation Service (IERS) que en adelante fue el encargado de la determinación de los parámetros de rotación terrestre: Movimiento del polo, UT1 y correcciones a los modelos de nutación y precesión sobre la base de observaciones VLBI, LLR y SLR, a las que más tarde se agregarían GPS y DORIS. Este servicio fue encargado también de la definición de los sistemas de referencia celeste, terrestre y dinámico convencionales así como también de su materialización. En el presente trabajo interesa especialmente la materialización del

Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) o Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).

1.4 Las técnicas de observación

Se describirán brevemente las técnicas de observación utilizadas para la materialización de sistemas de referencia en la actualidad con el sólo propósito de indicar sus características principales. Pueden encontrarse descripciones más detalladas en por ejemplo [Altamimi, 1990] y [Hase, 1999]. La técnica GPS será descrita en forma más extensa en el capítulo 2.

1.4.1 VLBI

La interferometría de muy larga base es la piedra fundamental del sistema de referencia celeste. Consiste en la observación de emisiones de radio provenientes de fuentes extragalácticas, como por ejemplo cuásares. Las observaciones a cada objeto se realizan mediante dos radio telescopios en forma simultánea y en las mismas bandas de frecuencia. En general se eligen estaciones de observación separadas por miles de kilómetros. Los registros de ambos observatorios son a posteriori correlacionados para obtener dos observables posibles: el retardo diferencial de la señal de radio y la diferencia de fase de la señal, para las bandas de recepción elegidas, entre las dos antenas.

En la ecuación (1.3) se ve la relación fundamental entre el retardo observado y el vector que media entre las dos estaciones receptoras.

$$\tau(t) = \frac{\vec{B} \cdot \vec{S}}{c} + \Delta\tau(t) \quad (1.3)$$

Donde $\tau(t)$ es el retardo observado entre las dos antenas para la llegada del mismo frente de onda, \vec{B} es el vector que une ambas antenas, \vec{S} indica la dirección a la radiofuente, c es la velocidad de la luz y el término $\Delta\tau(t)$ agrupa una suma de correcciones que incluye un offset entre los relojes de ambas estaciones, los retardos provocados por la propagación de la señal a través de la ionosfera y troposfera, efectos relativistas, efectos causados por la estructura no puntual de la radiofuente, etc, por mencionar solamente los más importantes.

La vinculación entre los sistemas de referencia terrestre y celeste que esta técnica aporta puede verse si expresamos la ecuación (1.3) en forma aproximada siguiendo a [Melbourne, 1980].

$$c \cdot \tau(t) = B_Z \cdot \sin(\delta) + B_e \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\alpha - \theta - \phi)$$

donde $B_e = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2}$ y $\tan(\phi) = \frac{B_Y}{B_X}$ (1.4)

Donde α y δ son la ascensión recta y declinación de la radiofuente respectivamente, θ es el tiempo sidéreo en Greenwich al tiempo t, y B_X , B_Y y B_Z identifican las componentes del vector entre las antenas respecto de una terna ecuatorial terrestre.

La calidad de los modelos y observaciones que se utilizan con esta técnica permite en el presente definir direcciones con una exactitud del orden de 0.1 msa, lo que implica estimar las componentes de los vectores entre estaciones con errores subcentimétricos [Ma et al., 1997]. Las estaciones VLBI que contribuyen a la realización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional se encuentran organizadas en el Servicio Internacional de VLBI (IVS). Su distribución presente puede verse en la figura (1.1).

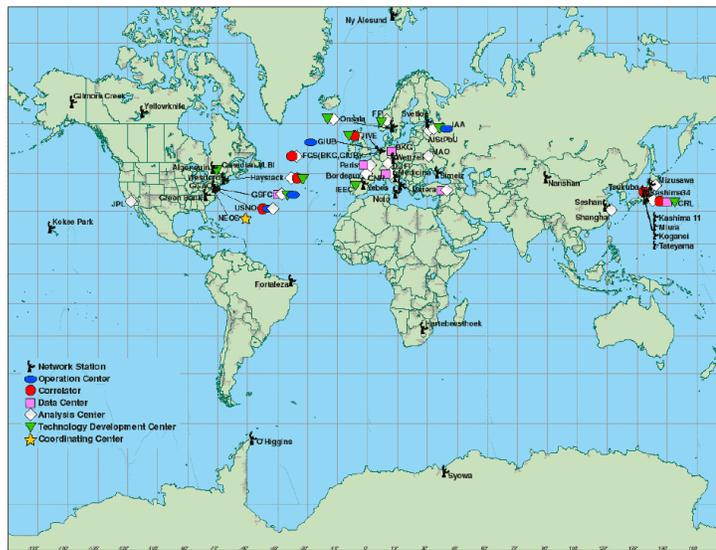


Figura 1.1: Red de estaciones VLBI que participan en el IVS [IVS, 1999].

1.4.2 LLR

El principio de esta técnica es la medición del tiempo de ida y vuelta de un pulso de luz LASER enviado desde una estación terrestre a alguno de cuatro retroreflectores

emplazados en la superficie lunar por las misiones Apollo (USA) y Lunakhod (URSS). La ecuación de observación de esta técnica relaciona el retardo de doble camino observado D , las coordenadas esféricas terrestres geocéntricas de la estación terrestre (r , θ , λ), las coordenadas ecuatoriales α , δ y ángulo horario H del retrorreflector lunar, y finalmente otros términos relativos al movimiento de rotación de la Tierra.

$$\begin{aligned}
 D - D_0 = & 2 \cdot \Delta \cdot r / D \cdot [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H) \cdot \partial((UT1 - UTC) - \lambda - \alpha)] \\
 & + \cos(\varphi) \cdot \cos(H) \cdot \partial A + \sin(\varphi) \cdot \partial B \\
 & + (\cos(\varphi) \cdot \cos(H) \cdot \sin(\delta) - \sin(\varphi) \cdot \cos(\delta)) \cdot \partial C + \partial D
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

En la ecuación (1.5), r es la coordenada radial lunar del reflector, Δ es el vector que une los centros de masa de la Luna y la Tierra y los símbolos ∂A , ∂B , ∂C y ∂D indican las correcciones a calcular para los valores a priori de los parámetros r , ϕ , Δ y δ respectivamente.

La técnica LLR puede materializar el sistema de referencia con errores de varios centímetros, como lo muestran comparaciones de soluciones respecto al marco ITRF96 para las cinco estaciones en operación [Boucher et al., 1998a]. Teniendo en cuenta además que estas soluciones no incluyen las velocidades de las estaciones de observación resulta evidente que su exactitud se encuentra por debajo de las demás técnicas.

1.4.3 SLR

Esta técnica es uno de los pilares fundamentales para la materialización del ITRS. Desde sus comienzos hasta el presente, la precisión de las observaciones fue mejorando desde varios metros en sus comienzos a menos que un centímetro actualmente [ILRS, 1999].

Para la realización del ITRS, es la técnica geocéntrica por excelencia, permitiendo la definición de la posición del centro de masa la Tierra con una exactitud centimétrica. Además, por provenir de mediciones de distancia, las soluciones de SLR tienen un gran peso en la materialización de la escala del sistema de referencia [Blewitt et al., 1999].

Se observa el retardo de ida y vuelta de un pulso LASER entre la estación de observación terrestre y un retrorreflector colocado a bordo de un satélite artificial.

El modelo del movimiento del satélite se expresa en general respecto de un sistema inercial debido a la simpleza de las expresiones. Sin embargo la determinación de las órbitas se realiza a partir de observaciones desde estaciones terrestres cuyas coordenadas se expresan respecto de un sistema fijo a la Tierra. Esto implica que es necesario conocer los movimientos de la Tierra en el espacio con gran exactitud.

Del ajuste de las observaciones se obtienen los parámetros orbitales del satélite, correcciones a los modelos de rotación terrestre y también algunos coeficientes del modelo de fuerzas cuyos valores no son conocidos con suficiente exactitud a priori. Los modelos de fuerza aplicados definen el sistema inercial, mientras que el sistema terrestre queda definido como sigue: el origen queda definido al considerar nulos los términos de grado uno del desarrollo del potencial terrestre; la escala está definida por el valor adoptado para la velocidad de la luz, la constante geogravitacional GM y las correcciones relativistas que se utilicen; la orientación del sistema queda definida fijando, para cierta época, los

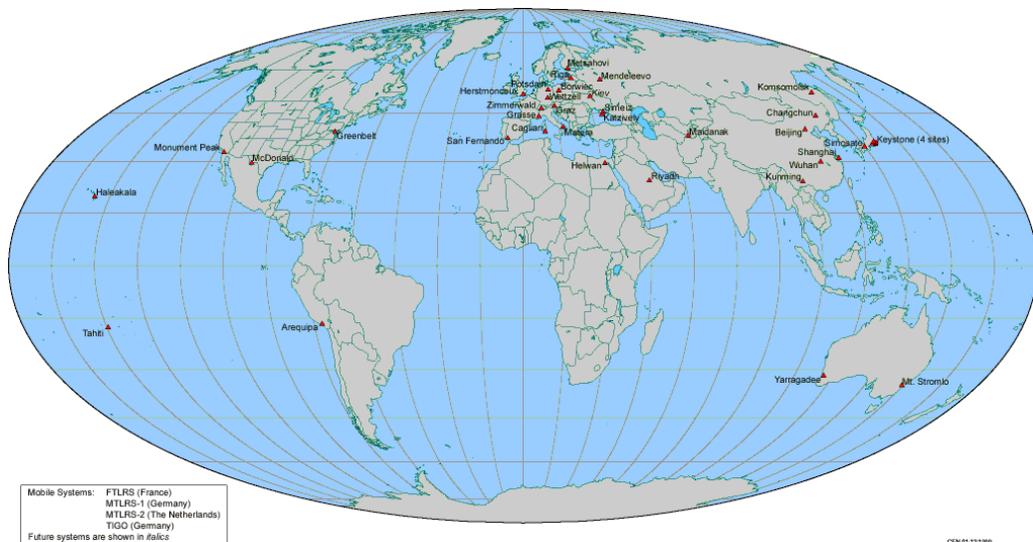


Figura 1.2: Red global de estaciones SLR participantes del ILRS [ILRS, 1999]

parámetros de rotación terrestre, o bien tres coordenadas de estaciones terrestres, al menos una longitud y dos latitudes. Esta forma de proceder es análoga en los casos de las técnicas SLR, GPS y DORIS, por lo que serán referidas muy brevemente en las secciones correspondientes. Las actividades de las estaciones SLR y LLR que contribuyen a la materialización del ITRS se encuentran coordinadas hoy por el Servicio Internacional de LASER Ranging o ILRS. La distribución global de las estaciones que participan en este servicio se muestra en la figura 1.2.

1.4.4 GPS

Es un sistema de satélites cuyo objetivo es brindar posición y velocidad en forma instantánea y precisa las 24 horas del día, en cualquier parte del mundo y bajo cualquier condición climática. El segmento espacial del sistema GPS consta de 24 satélites en órbitas casi circulares a 20.000 km de altura, distribuidos en seis planos orbitales equiespaciados en longitud y con una inclinación de 55 grados respecto del plano ecuatorial. El sistema está controlado por diez estaciones de rastreo que observan los satélites y permiten el cálculo y predicción de sus órbitas y correcciones a los estados de sus relojes. Éstos son luego transmitidos a los satélites para que a su vez las puedan enviar a los usuarios como efemérides transmitidas. Los usuarios reciben las posiciones y correcciones de reloj de los satélites y además pueden medir pseudo distancias a varios de ellos a la vez, lo que les permite calcular su propia localización. La observación es un retardo como en el caso de SLR, pero en este caso es de camino simple, por lo que se involucran la escala de tiempo del reloj del satélite y la del reloj de la estación receptora. El modelado de las fuerzas sobre el satélite es muy parecido al que se utiliza para SLR, adecuándolo a las características de los satélites GPS tales como la gran altitud de su órbita y la complejidad de la geometría de su superficie.

El bajo costo relativo de los receptores respecto de las demás técnicas y el gran número de aplicaciones que se sirven de GPS han contribuido a que en menos de una década se desarrollara una red mundial de estaciones de rastreo integradas en el Servicio Internacional de GPS (IGS). Esta organización, patrocinada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), produce órbitas GPS precisas, parámetros de rotación

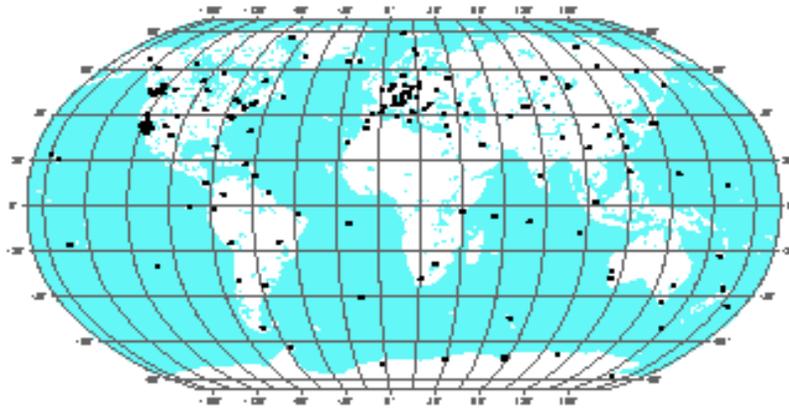


Figura 1.3: Red de rastreo GPS permanente del IGS [IGS, 1999b]

terrestre, coordenadas y velocidades de las estaciones de rastreo con exactitudes del orden de las que se obtienen con las demás técnicas descritas en esta sección. El servicio prestado por el IGS contribuye en forma decisiva a la disponibilidad actual del posicionamiento con GPS de exactitud centimétrica. La figura (1.3) muestra la distribución de las estaciones globales del IGS que contribuyen a la materialización del ITRS.

1.4.5 DORIS

El Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélite (DORIS) consta de un segmento espacial conformado por receptores montados a bordo de varios satélites artificiales. Estos reciben señales de una red que actualmente consta de 51 balizas instaladas sobre la superficie terrestre. Las estaciones de tierra emiten señales en dos frecuencias: $\nu_s = 2036.25$ MHz para la medición precisa del efecto Doppler y $\nu_2 = 401.25$ MHz para la corrección del retardo por efecto de la ionósfera. El receptor en el espacio mide el efecto Doppler sufrido por las señales de las balizas a causa del movimiento relativo emisor-receptor, calcula una solución de navegación para la posición del satélite con una exactitud métrica y envía todos los datos a la estación de control de Toulouse, Francia, donde se calculan órbitas precisas para los satélites, coordenadas para las balizas emisoras, parámetros de rotación terrestre, y otros productos. Por su concepción, el sistema DORIS tiene un funcionamiento muy centralizado. Los receptores y emisores tienen características muy uniformes y la red de rastreo tiene una distribución muy homogénea,

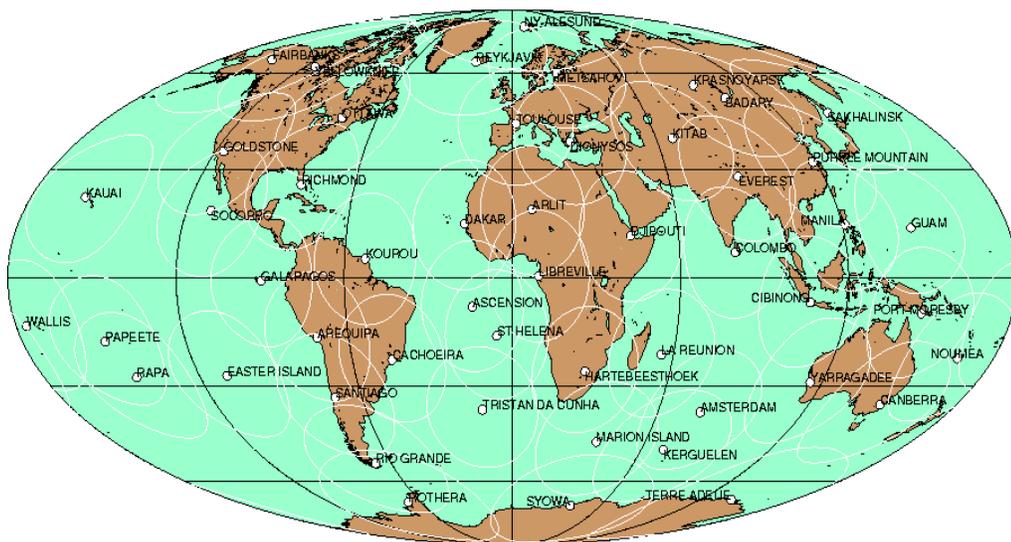


Figura 1.4: Red global de balizas DORIS [DORIS, 1999].

como se muestra en la figura (1.4). Actualmente hay receptores DORIS a bordo de los satélites SPOT2, SPOT3 y TOPEX, y se planea incluirlos también en las futuras misiones SPOT4, SPOT5, ENVISAT y los sucesores de TOPEX. Desde fines de 1995, las soluciones DORIS constituyen un aporte relevante a la materialización del ITRS [Boucher et al., 1996b][Boucher et al., 1998b].

1.5 El Sistema de convenciones del IERS de 1996

Este sistema de estándares, acordado entre la Unión Astronómica Internacional (IAU) y la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (IUGG), establece los sistemas de referencia convencionales celeste y terrestre a través de todos los modelos y constantes fundamentales necesarios para su materialización, especificando también su vinculación a través de la rotación terrestre. Para una descripción detallada de estas convenciones ver [McCarthy, 1996].

1.5.1 El Sistema de Referencia Celeste Convencional

Siguiendo las recomendaciones de la IAU de 1991 y 1992 [McCarthy, 1992], el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS) se materializó mediante el marco de referencia homónimo (ICRF) determinado por el IERS. Este consiste en las coordenadas ecuatoriales para la época J2000.0 de un conjunto de objetos extragalácticos, determinadas mediante observaciones de VLBI. Las direcciones de sus ejes son consistentes con las del catálogo FK5, el último marco de referencia celeste determinado por observaciones ópticas. La exactitud de esta consistencia es del orden de la del marco FK5. El origen fue ubicado en el baricentro del sistema solar teniendo en cuenta la teoría de la relatividad general para los modelos de las observaciones. La estabilidad rotacional del marco se basa en la suposición de que las radiofuentes no posean movimientos propios. El ICRS fue recomendado por la IAU para su uso bajo el nombre de Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS).

Ecuador

La IAU recomendó que el plano principal del sistema convencional fuera cercano al del ecuador medio en la época J2000.0 y además, que fuera consistente con el polo celeste establecido en el catálogo FK5.

Estas dos recomendaciones se contraponen en el sentido de que las técnicas de medición actuales (VLBI) permiten determinaciones cada vez más exactas de la posición del polo, por lo que determinaciones futuras podrían indicar errores sistemáticos actuales, y a su vez, las mediciones actuales arrojan diferencias significativas con el plano adoptado para J2000.0 por el marco FK5.

La solución elegida consiste en utilizar un plano ecuatorial convencional para J2000.0 dado por los modelos de nutación de [Wahr 1981], [Seidelmann, 1982] y las expresiones de la precesión dadas por [Lieske, 1977]. Este ecuador en J2000.0 coincide con el que se puede determinar con el estado del arte de la técnica de medición y cálculo VLBI actual sólo al nivel de la exactitud de los modelos antes mencionados. Si se quiere trabajar con orientaciones con una exactitud del orden de 1 msa se deben usar correcciones a los modelos que son calculadas y distribuidas en forma continua por el IERS.

El sistema FK5 se basa en mediciones ópticas, y tiene errores del orden de 50 msa, muy por encima de los errores internos del sistema actual. De todos modos, la diferencia entre los planos principales del sistema convencional elegido y del marco FK5 está dentro de la exactitud de este último. Esto permite combinar observaciones expresadas en ambos sistemas como si pertenecieran al mismo sin afectar la exactitud de las observaciones más antiguas.

Origen de las ascensiones rectas

La IAU recomendó que coincidiera con el equinoccio dinámico para J2000.0. El IERS fijó la dirección del eje x del sistema mediante las ascensiones rectas medias de 23 fuentes provenientes de varios catálogos compilados usando las coordenadas FK5 de un objeto arbitrario [Arias et al., 1988]. La incertidumbre de esta coordenada se estima en 80 msa. Los sistemas dinámicos, realizados por medio de efemérides de planetas en el sistema solar son de exactitud inferior a los realizados por medio de coordenadas de radiofuentes extragalácticas. Nuevamente, las comparaciones entre determinaciones modernas y

clásicas de la ascensión recta del equinoccio en J2000.0 muestran diferencias de 78 \pm 10 msa, lo que permanece dentro del error antes mencionado.

Precisión y exactitud

Las distintas soluciones que son integradas para obtener el ICRF mantienen la dirección de la definición de los ejes dentro de 0.1 msa. El error en la posición de una fuente individual se mantiene alrededor de 0.2 msa.

La integración de las soluciones se realiza utilizando correcciones a los modelos de nutación a fin de evitar errores de varios msa, límite de exactitud para el modelo convencional mencionado más arriba.

Disponibilidad del marco de referencia

Consta de las ascensiones rectas y declinaciones de aproximadamente 600 radiofuentes extragalácticas. Su importancia se incrementa por estar vinculado a otros marcos de referencia de uso generalizado en Astronomía y ciencias de la Tierra:

ITRF o marco de referencia terrestre internacional. Vinculado por medio de los modelos convencionales de precesión y nutación a los que se agregan los parámetros de rotación terrestre, estimados diariamente con una precisión de 0.5 milisegundos de arco, que equivale a una incerteza de 1,5 cm para las posiciones sobre la superficie terrestre.

HIPPARCOS o Marco de referencia galáctico. Vinculado a través de observaciones a radiofuentes que además emiten radiación en frecuencias ópticas.

Efemérides del JPL del sistema solar.

1.5.2 El Sistema de Referencia Terrestre Convencional

Definición

Es *geocéntrico*, definiendo al geocentro teniendo en cuenta las contribuciones oceánicas y atmosféricas. La *escala* queda definida por el uso del Tiempo Coordinado Geocéntrico (TCG) para un marco de referencia local en el contexto de la teoría de la relatividad general. La *orientación* coincide por la definida por el BIH para 1984.0. La *evolución*

temporal de las coordenadas de los puntos sobre la corteza terrestre se define de modo que no se generen rotaciones globales que se agreguen a la propia del planeta.

Realización

El CTRS se realiza mediante coordenadas de estaciones sobre la superficie terrestre. Para expresar las posiciones en coordenadas geodésicas se utiliza el elipsoide GRS80, geocéntrico, con un semieje mayor $a=6378137.0$ m y una excentricidad e tal que $e^2=0.00669438003$. Este CTRS, monitoreado por el IERS, es comúnmente llamado ITRS y fue especificado por resolución de la IUGG en su 20^{ma} asamblea general, en Viena, en 1991. La materialización del sistema se realiza mediante la combinación de resultados de varias técnicas de observación: VLBI, SLR, LLR, GPS y DORIS. La técnica VLBI posee el mayor peso en la definición de la *orientación*. El *origen* y la *escala* del sistema se determinan mediante el aporte de SLR, GPS y DORIS, todas técnicas que implican modelos dinámicos. Actualmente, las soluciones de LLR no toman parte en la combinación que materializa el ITRS [Boucher et al, 1996b][Boucher et al, 1998a].

Varios centros de cálculo contribuyen a la realización del ITRS. Las soluciones correspondientes son primero referidas a una realización particular del ITRS y luego combinadas para obtener una nueva realización. En estos marcos de referencia, la posición de un punto y su *evolución* sobre la superficie terrestre se expresa como en (1.6)

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \vec{V}_0 \cdot (t - t_0) + \sum_i \vec{X}_i(t) \quad (1.6)$$

donde el cero indica la época de definición del marco de referencia, V indica la velocidad del punto debida a los movimientos tectónicos y la suma al final de la expresión agrupa varios efectos variables en el tiempo que modifican la posición del punto como ser las mareas terrestres (marea permanente más componentes periódicas), efecto de la carga oceánica, levantamientos post-glaciales, carga atmosférica y en general cualquier fenómeno modelable que implique movimientos de las estaciones mayores que unos pocos milímetros.

Las materializaciones del ITRS producidas por el IERS consisten en una lista de coordenadas y velocidades para un conjunto de estaciones distribuidas sobre toda la Tierra y válidas para una época de referencia t_0 . Se llaman ITRFYY donde YY indica el año de los datos más recientemente incorporados al cálculo. La época de referencia del marco, que

es indicada en la expresión (1.6) con el subíndice 0, se agrega aparte; siendo ITRFYY solamente el ‘nombre’ del marco de referencia. Las características de cada marco de referencia terrestre producido por el IERS se indican en la serie IERS Technical Notes, por ejemplo, [Boucher et al., 1999]. Los estándares o convenciones que definen los sistemas de referencia del IERS se publican como IERS Conventions y sufren actualizaciones cada varios años. Las últimas dos actualizaciones son de 1992 y 1996 [McCarthy, 1992][McCarthy, 1996].

Dadas las características señaladas para los marcos de referencia producidos por el IERS en los últimos años (ITRFYY), se plantean dos tipos de conversiones de coordenadas: conversiones de marco a marco y conversiones de época sin mediar un cambio de marco. Como ejemplo, si se quiere comparar coordenadas de estaciones expresadas en ITRF93 (época de referencia 1998.0) con otras expresadas en ITRF97 (1997.0), primero se deben transformar las coordenadas ITRF93 a ITRF97 y luego transformar la época de las coordenadas resultantes a 1997.0 usando las velocidades ITRF97. Las transformaciones entre marcos de referencia se hace en general como sigue:

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Donde T indica traslación en cada componente del marco viejo al nuevo, D es el factor de escala diferencial entre ambos marcos de referencia y R son las rotaciones alrededor de los ejes indicados del marco nuevo expresadas en radianes. Esta es una expresión aproximada de la transformación, válida para rotaciones pequeñas entre los marcos de referencia, condición que siempre se cumple entre los marcos de referencia globales provenientes de las técnicas geodésicas espaciales que aquí se han mencionado. La transformación de época implica el conocimiento del comportamiento cinemático del área de la estación cuyas coordenadas se desea transformar. Esta información está contenida en primera aproximación en el modelo NNR-NUVEL1A [De Mets et al., 1994], adoptado en 1996 por el IERS como estándar, que divide a la superficie terrestre en 16 placas rígidas de rotación uniforme alrededor de sus polos de Euler. Este modelo representa un promedio de los movimientos de la corteza durante los últimos millones de años y es aproximadamente coincidente con los resultados de las observaciones actuales. En particular, no predice bien los movimientos de los puntos cercanos a los bordes activos de las placas, donde se han

observado deformaciones del orden de varios cm por año [Kendrick et al., 1999]. Por lo anterior, en general la velocidad de un punto debe ser considerada como se indica en (1.8), donde el primer término del segundo miembro es la velocidad horizontal de la placa según el modelo NNR-NUVEL1A

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_{\text{placa}} + \vec{V}_r \quad (1.8)$$

y el segundo es una velocidad residual que puede ser estimada junto con la posición si se cuenta con observaciones durante al menos unos pocos años en el sitio. Existen en la actualidad modelos de placas que tienen en cuenta la información geodésica y consideran zonas de la corteza en que las placas son rígidas y otras en que hay deformación como se muestra por ejemplo en [Drewes, 1998].

1.5.3 Transformaciones entre sistemas celestes y terrestres

Se ha afirmado en §1.3.1 que el eje de rotación terrestre materializa una dirección en el espacio que es muy adecuada para definir un sistema de referencia. Sin embargo, su posición en el espacio varía con el tiempo, y lo mismo sucede con su posición respecto de la superficie terrestre. Estas variaciones son complejas y su conocimiento es fundamental para lograr una materialización precisa de los sistemas de referencia Celeste y Terrestre.

La Tierra se mueve en el espacio de manera que la orientación de su eje de rotación se puede describir como la superposición de varios movimientos. Convencionalmente se define un eje de rotación o polo medio, fijo a la corteza terrestre. Los movimientos de este eje respecto del sistema inercial se agrupan bajo los términos de Precesión y Nutación. Por otra parte, los cambios del eje de rotación instantáneo respecto del convencional se denominan Movimiento del Polo. A estos movimientos se agrega la rotación terrestre propiamente dicha, compuesta por una velocidad de rotación media e irregularidades denominadas variaciones de la longitud del día (LOD).

Precesión lunisolar es el cambio secular en la posición del eje de los nodos de la órbita terrestre sobre la eclíptica. Se debe a la atracción del Sol y la Luna sobre los abultamientos ecuatoriales y otras desviaciones menores de la forma de la Tierra respecto de la esfera. Este efecto implica el movimiento de los equinoccios hacia el oeste a lo largo de la eclíptica a una velocidad de 50.3" por año, por lo que describen una circunferencia en

25.800 años, manteniendo una inclinación del plano ecuatorial de aproximadamente 23.5° . Hay otra componente de la precesión llamada planetaria, debida a la atracción de los cuerpos del Sistema Solar excepto el Sol y la Luna. Esta resulta en un movimiento de los nodos hacia el este de $12.5''$ por siglo y una disminución en la oblicuidad de la eclíptica de $47''$ por siglo. Los dos efectos descriptos se agrupan bajo la denominación genérica de precesión. El modelo convencional recomendado por el IERS [McCarthy, 1996] es el de [Lieske et al., 1977].

La nutación es un movimiento periódico en la posición del polo verdadero de la época (CEP) respecto del polo medio de la época definido por la precesión. Posee una componente principal de período 18,6 años y otras componentes de amplitudes y períodos menores. La amplitud máxima aproximada del efecto es de $9.2''$. Parte del movimiento puede ser predicho con mucha precisión por el modelo de Wahr (1981) y Seidelman (1982) que constituyen la Teoría de Nutación de la IAU de 1980 [McCarthy, 1996]. La parte restante del movimiento de nutación debe ser estimada a partir de observaciones de las técnicas descritas en §1.4.

Independientemente de la presencia de torques externos, el CEP se mueve respecto de un polo convencional fijo al marco de referencia terrestre, como por ejemplo el Conventional International Origin (CIO), ya en desuso, o el polo convencional actualmente usado por el IERS, que coincide con el que fuera definido por el BIH en 1984. Este fenómeno es denominado Movimiento del Polo y responde al intercambio de momento angular entre la tierra sólida, el mar y la atmósfera. Su componente puramente libre o efecto de Chandler, es un movimiento circular antihorario con un período dominante de aproximadamente 430 días y una amplitud que alcanza los 3.6 metros ($0.1''$ de arco). La componente forzada, debida al efecto de mareas, es un orden de magnitud menor, llegando a 36 cm o $0.01''$ de arco, con períodos aproximadamente diurnos. Finalmente, la componente debida a la interacción con la atmósfera, tiene una magnitud del orden del efecto de Chandler ($0.1''$ de arco). Los modelos actuales no pueden predecir el movimiento del polo con la exactitud requerida por la calidad de las observaciones, por esto se deben estimar correcciones a los modelos convencionales a partir de observaciones realizadas por las técnicas descritas anteriormente en §1.4.

La transformación completa para pasar del sistema inercial (Celeste) al rotante (Terrestre) puede escribirse como $\overset{7}{r}_{TRF} = T_{3 \times 3} \cdot U_{3 \times 3} \cdot \overset{7}{r}_{CRF}$ donde T y U contienen nueve rotaciones que se pueden separar en:

$$T = R_2(-x_p) \cdot R_1(-y_p) \cdot R_3(GAST) \quad (1.9)$$

$$[N] \cdot [P] = [R_1(-\epsilon - \Delta\epsilon) \cdot R_3(-\Delta\psi) \cdot R_1(\epsilon)] \cdot [R_3(-z_A) \cdot R_2(\theta_A) \cdot R_3(-\zeta_A)] = U \quad (1.10)$$

Donde $\Delta\epsilon$ describe la nutación en oblicuidad de la eclíptica y $\Delta\psi$ en longitud predichas por la teoría de Wahr y donde en general, la matriz $R_i(\alpha)$ representa una rotación de un ángulo α en una terna derecha alrededor del eje “i” considerada positiva si resulta antihoraria al ser observada hacia el origen desde el semieje “i” positivo. La matriz S contiene las componentes del movimiento del polo x_p e y_p y la rotación terrestre propiamente dicha, donde *GAST* es el Tiempo Sidéreo Aparente en Greenwich. Esto conforma prácticamente la totalidad de los movimientos que no son producto de torques externos T. La matriz U es aproximadamente el producto N*P que contiene la precesión y nutación. Un desarrollo más completo puede encontrarse en [Bock, 1996].

Finalmente, a fin de transformar coordenadas del sistema de referencia Celeste al Terrestre con una exactitud compatible con la de las observaciones de las técnicas descritas en §1.4 se deben incluir correcciones a la nutación (en longitud y oblicuidad) y las variaciones de la longitud del día (LOD). Estas cantidades, sumadas a las dos componentes del movimiento del polo, conforman un conjunto de cinco parámetros denominados EOP o parámetros de rotación terrestre, que son estimados diariamente por los servicios que contribuyen a la materialización del sistema de referencia terrestre.

1.5.4 Modelo de geopotencial

Se utiliza el JGM-3 [Tapley et al., 1996]. Este modelo expresa el potencial de gravedad terrestre como una suma de componentes armónicas esféricas con coeficientes hasta orden y grado 70. Esto permite modelar con suficiente exactitud las observaciones que se utilizan para la materialización del sistema de referencia. Para el satélite LAGEOS por ejemplo, utilizado para SLR, se necesitan solamente los coeficientes hasta grado y orden 20. El

valor de GM_{Tierra} a utilizar, que escala a todo el desarrollo, dependerá de que el sistema de tiempo que se use sea TCG o los clásicos TDT y TDB.

El modelo JGM-3 incluye los coeficientes C_{21} y S_{21} . Estos describen el efecto de la falta de coincidencia entre la posición del eje de simetría medio de la figura terrestre que define el modelo (considerándolo idéntico al polo de rotación medio en el período en que el modelo fue calculado) respecto del eje Z del sistema de referencia o polo medio convencional definido por el IERS para el ITRF. Estos coeficientes dependen de la separación entre los ejes referidos cuyas componentes llamaremos \bar{x} e \bar{y} , y pueden expresarse como sigue:

$$\bar{C}_{21} = \sqrt{3}\bar{x}C_{20} \quad (1.11)$$

$$\bar{S}_{21} = \sqrt{3}\bar{y}C_{20} \quad (1.12)$$

Al modelo de geopotencial JGM-3 deben agregársele efectos perturbadores debidos a variaciones temporales en la distribución de masas del planeta por las mareas terrestres, la marea causada por las deformaciones debidas al movimiento del polo, y el efecto de las mareas oceánicas. Tener en cuenta estos efectos es importante en el cálculo de las órbitas de algunos satélites geodésicos para SLR en que es preciso modelar el movimiento orbital con una exactitud centimétrica.

En todos los casos mencionados, las modificaciones al modelo JGM-3 se introducen mediante correcciones a los coeficientes del desarrollo del potencial. Para el caso de las mareas terrestres, las correcciones no despreciables (mayores que 3×10^{-12}) se concentran en los coeficientes de grado 2 y 3 y en menor proporción en los de grado 4. Los términos del desarrollo de mareas que los causan son los de grado 2 y 3. Los órdenes más afectados son el semidiurno, diurno y de largo período. Estas correcciones se calculan teniendo en cuenta un modelo de Tierra no puramente elástico por lo que para algunas componentes existe un retardo entre la fase de las fuerzas de marea y la deformación resultante [Eanes et al., 1983]. Parte del término de grado 2 y orden 0 es el efecto de una deformación por mareas llamada marea permanente. No debe ser incluida en las correcciones pues ya está presente en el modelo JGM-3.

El efecto gravitacional de la marea oceánica se introduce mediante correcciones a los términos del geopotencial. Estas son obtenidas calculando el efecto del desarrollo en

armónicos esféricos de la altura de océano sobre toda la superficie terrestre. Para los períodos semidiurnos y diurnos, se recomienda el modelo CSR-3.0 [Eanes et. al, 1996] obtenido a partir de mediciones de TOPEX-POSEIDON. Las componentes de largo período se obtienen del modelo de [Ray et al., 1994].

La marea del polo introduce correcciones variables con el tiempo en los coeficientes \bar{C}_{21} y \bar{S}_{21} en función de las componentes del movimiento del eje de rotación instantáneo respecto del polo convencional del IERS. Las correcciones para una Tierra viscoelástica se muestran en (1.13) y (1.14), donde las componentes del movimiento del polo están expresadas en segundos de arco.

$$\Delta\bar{C}_{21} = -1.348 \cdot 10^{-9} (\bar{x}_p + 0.0112 \cdot y_p) \quad (1.13)$$

$$\Delta\bar{S}_{21} = 1.348 \cdot 10^{-9} (\bar{y}_p - 0.0112 \cdot x_p) \quad (1.14)$$

Las correcciones a aplicar finalmente dependerán del satélite cuya órbita se desea modelar. Por ejemplo, en el caso de GPS, las perturbaciones significativas son el potencial de mareas y el debido a las deformaciones de la Tierra por mareas [Kleusberg et al., 1996, pp. 80]. Expresiones explícitas de estos modelos pueden encontrarse en [McCarthy, 1996].

1.5.5 Efectos que producen desplazamientos en los sitios de observación

Además del modelo de velocidades de las placas, mencionado en §1.5.2, el sistema de referencia terrestre convencional debe incluir también la manera de modelar otros efectos que modifican la posición de las estaciones de observación. Estos fenómenos afectan especialmente la coordenada vertical y son:

Mareas terrestres

La respuesta de la Tierra al potencial de mareas lunisolar puede expresarse en función de este último mediante los coeficientes de Love y de Shida. Estos dependen de la latitud de la estación y la frecuencia debido a la elipticidad de la Tierra y a su movimiento de rotación. Además, para períodos largos existe una dependencia adicional respecto de la frecuencia debido a la inelasticidad del manto terrestre. Esto hace que haya un desfase entre el potencial y la deformación para estas bandas. La búsqueda de exactitudes

milimétricas en la posición de las estaciones exige tener en cuenta estos efectos [McCarthy, 1996, pp. 56].

Deformación centrífuga por el movimiento del polo

El movimiento del polo provoca una perturbación en el potencial de rotación centrífugo. Sus efectos sólo se notan en las coordenadas absolutas de la estación o para vectores de miles de km de longitud, pero como el movimiento del polo no tiene una periodicidad sencilla, el efecto no se anula promediando los resultados de varios días de observación. La corrección que se recomienda es obtenida a partir de la perturbación causada por el movimiento del polo en el potencial de rotación centrífugo terrestre. La respuesta de la Tierra al mismo se calcula utilizando constantes de Love y Shida apropiadas, resultando finalmente las expresiones siguientes [McCarthy, 1996]:

$$S_r = -32 \cdot \sin 2\theta \cdot [x_p \cdot \cos(\lambda) - y_p \cdot \sin(\lambda)] \quad (1.15)$$

$$S_\theta = -9 \cdot \cos 2\theta \cdot [x_p \cdot \cos(\lambda) - y_p \cdot \sin(\lambda)] \quad (1.16)$$

$$S_\lambda = 9 \cdot \cos 2\theta \cdot [x_p \cdot \cos(\lambda) - y_p \cdot \sin(\lambda)] \quad (1.17)$$

Donde los desplazamientos resultan expresados en mm y las ecuaciones se evalúan en función de la latitud y longitud de la estación y las componentes del movimiento del polo en segundos de arco. Considerando que el movimiento del polo no presenta variaciones pico a pico mayores que 0.8 segundos de arco, estas deformaciones afectan la posición de las estaciones en hasta máximos de 25 mm en la dirección radial y 7 mm en la horizontal.

Efecto de las mareas oceánicas

Las mareas oceánicas constituyen una carga que deforma la corteza terrestre de acuerdo a su respuesta viscoelástica local. En consecuencia, su modelado a escala global implica conocer el comportamiento detallado de las mareas y además de cómo responde la corteza a esa carga en cada punto. Esto es especialmente problemático en la franja del continente distante menos que aproximadamente 50 km de la costa [Melchior et al., 1996]. El efecto es predominantemente en la dirección radial y puede alcanzar varios centímetros con frecuencias predominantemente semidiurnas y diurnas. Existen componentes de largo período pero su efecto es mucho menor. Entre los modelos de carga oceánica, se recomienda el debido a [Schwiderski, 1980] para las bandas de largo período y el de [Le

Provost et al., 1994] para las diurnas y semidiurnas. Estos modelos consideran una Tierra elástica, aproximación suficientemente exacta para los requerimientos del posicionamiento [Scherneck, 1991]. En cambio, el límite de la exactitud de esta corrección está puesto por el conocimiento que se tenga del comportamiento de las mareas oceánicas en la región de interés [Dodson et al., 1999].

Deformación por carga atmosférica

Es la deformación que se produce por la diferencia de presión atmosférica entre la zona circundante a la estación y el valor medio correspondiente a un entorno circular de 2000 km de radio. Este es un efecto que responde a campos de presión sinópticos, esto es en escalas espaciales de 2000 km y temporales de dos semanas.

El efecto se modela localmente ya que no hay modelos suficientemente buenos de la carga a escala global. El tamaño de este efecto es teóricamente de hasta 25 mm en dirección radial y menos que 1 cm en la horizontal [Rabbel et al., 1986]. Los mismos autores recomiendan calcular el desplazamiento radial mediante la expresión:

$$\Delta_r = -0.35p - 0.55\bar{p} \quad (1.18)$$

Donde las presiones son diferencias respecto de un valor de referencia de 1013 hPa. La presión media regional presente en el segundo término de (1.18) debe ser obtenida por algún método a partir de datos meteorológicos regionales. La metodología para el modelado de este efecto no está establecida aún y en muchos casos se han determinado expresiones de corrección locales aplicando una regresión lineal entre las series temporales de presión atmosférica y coordenadas de la estación [McCarthy, 1996].

Levantamiento postglacial

Este es un efecto causado por la redistribución de carga en la superficie terrestre causada por la deglaciación que ocurre desde el último máximo glaciario. Existen modelos globales de este fenómeno, calculados a partir de la convolución de modelos de carga, obtenidos a partir de registros geológicos, con funciones de Green globales [Peltier, 1994][Peltier, 1995].

1.6 Materializaciones del ITRS

El ITRS es hoy el sistema de referencia terrestre global materializado con mayor precisión y exactitud. Define al geocentro con un error estimado en 10 cm mientras que la precisión de las coordenadas que conforman el marco de referencia es del orden de un centímetro [Boucher et al., 1999]. Está conformado por un conjunto de estaciones distribuidas en todo el mundo en las que se realizan observaciones mediante al menos una de las técnicas VLBI, LLR, SLR, GPS o DORIS. Las materializaciones del ITRS, llamadas genéricamente ITRF o marco de referencia terrestre internacional constan de un catálogo de estaciones con coordenadas y velocidades a las que se asocia una época de referencia. Desde 1988 el IERS ha producido varios marcos de referencia, cuyas diferencias respecto de ITRF97 se muestran en la tabla 1.1 [Blewitt et al., 1997].

<i>Marco</i>	<i>TX</i> (cm)	<i>TY</i> (cm)	<i>TZ</i> (cm)	<i>E</i> (10-8)	<i>RX</i> (0.001'')	<i>RY</i> (0.001'')	<i>RZ</i> (0.001'')	<i>Época</i>
ITRF97	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	1997.0
ITRF96	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	1997.0
ITRF94	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	1993.0
ITRF93	0.6	-0.5	-1.5	0.04	-0.39	0.80	-0.96	1988.0
ITRF92	0.8	0.2	-0.8	-0.08	0.00	0.00	0.00	1988.0
ITRF91	2.0	1.6	-1.4	0.06	0.00	0.00	0.00	1988.0
ITRF90	1.8	1.2	-3.0	0.09	0.00	0.00	0.00	1988.0
ITRF89	2.3	3.6	-6.8	0.43	0.00	0.00	0.00	1988.0
ITRF88	1.8	0.0	-9.2	0.74	0.10	0.00	0.00	1988.0

Tabla 1.1 Diferencias entre distintas materializaciones del ITRS respecto de ITRF97

Donde TX indica traslación en la dirección del eje X, RX indica una rotación alrededor del eje X y E indica el factor de escala diferencial entre el marco de referencia listado e ITRF97. Puede verse que las diferencias con los sucesivos marcos de referencia son pequeñas y se van haciendo cada vez menores. Una excepción es ITRF93 ya que en este caso el IERS empleó un criterio distinto para fijar la orientación del sistema, permitiendo una rotación en bloque respecto del modelo tectónico NNR-NUVEL1A [Boucher, et al., 1996a]. Los últimos dos marcos de referencia del IERS, ITRF96 e ITRF97, fueron definidos de modo que sus ejes coincidan con los de ITRF94 [Boucher et al., 1998a] [Sillard et al., 1998][Boucher et al. 1999].

1.7 Densificación del marco ITRF en América del Sur

A pesar de que las materializaciones del ITRS tienen una buena distribución de puntos en el globo, sólo unos pocos se encuentran en Sudamérica. Por las características geográficas y económicas del continente, a principios de la década del noventa, solamente algunas zonas estaban cubiertas por un control geodésico clásico de buena calidad. La disponibilidad del Sistema de Posicionamiento Global GPS posibilitó la medición de nuevas redes geodésicas en los países de la región. Sin embargo fue necesaria una densificación del marco ITRF en el continente para que todos los países pudieran referir sus marcos de referencia nacionales al Sistema de Referencia Terrestre Internacional.

El proyecto Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur (SIRGAS) fue establecido en octubre de 1993 durante la Conferencia Internacional para la Definición del Datum Geocéntrico Sudamericano, en Asunción, Paraguay y es auspiciado por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) y la Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía (NIMA) de los Estados Unidos.

El gerenciamiento del proyecto se realiza a través de Comité Ejecutivo integrado por representantes de todos los países. De él dependen tres grupos de trabajo. Los dos primeros fueron creados en 1993 al comenzar el proyecto. El tercero fue creado en 1997 luego del éxito alcanzado en la ejecución de las primeras etapas.

El Grupo de Trabajo I tiene por objetivo definir el sistema de referencia geocéntrico para Sudamérica, materializarlo mediante una red de estaciones distribuidas en todos los países y mantenerlo en el tiempo mediante la medición de dicha red a intervalos de pocos años.

El Grupo de Trabajo II tiene por objetivo la densificación del marco de referencia de SIRGAS en cada uno de los países con un criterio unificado y consensuado de forma que los sistemas de referencia de todos los países de la región vayan convergiendo a SIRGAS con discrepancias de pocos centímetros.

El Grupo de Trabajo III tiene por misión la integración de los sistemas de alturas físicas de toda la región. Esto implica definir y materializar un sistema de alturas común y lograr que todos los países lo acepten y vinculen a él sus redes altimétricas.

Las mediciones que permitieron materializar el ITRS fueron realizadas entre mayo y junio de 1995 en 10 sesiones consecutivas de 24 horas de duración en alrededor de 60 estaciones. Durante el IV Congreso de Ciencias de la Tierra realizado en Santiago de Chile, en agosto de 1996, sesionaron los dos grupos del proyecto. El sistema de referencia elegido para la solución definitiva es el ITRS del IERS en su materialización ITRF94 y la época de las coordenadas se hizo coincidir con la época media de las observaciones, es decir 1995.4. La materialización se realizó mediante las coordenadas geocéntricas de estaciones permanentes de rastreo del IGS: Kouru (Guyana Francesa), Bogotá (Colombia), Fortaleza (Brasil), Arequipa (Perú), Brasilia (Brasil), Isla de Pascua (Chile), La Plata (Argentina), Santiago (Chile) y O'Higgins (Antártida). Una descripción detallada del marco de referencia SIRGAS95 puede encontrarse en [SIRGAS Project Committee, 1997].

En las sesiones del Grupo II se establecieron los procedimientos que los países deberían seguir para obtener redes geodésicas GPS con la más alta precisión y compatibilidad entre sí [SIRGAS WG II, 1997]. La aplicación de estas recomendaciones resultaría en marcos de referencia nacionales para los países del continente compatibles entre sí en el orden de pocos centímetros.

En la actualidad, Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela ya poseen redes geodésicas nacionales referidas a SIRGAS. Sólo Venezuela ha adoptado la nueva red como marco de referencia nacional oficial, encontrándose los demás países en diferentes situaciones intermedias del proceso de transición.

En el capítulo IV de este trabajo se describe la evolución del marco de referencia de Argentina, desde su versión clásica, Inchauspe'69 a POSGAR'94, basado en observaciones GPS, y se presenta un nuevo marco de referencia, consistente con el ITRS y SIRGAS en el orden de pocos centímetros, que ha sido denominado POSGAR'98.

1.8 Otros marcos de referencia globales

Es preciso mencionar por la amplia difusión que han alcanzado, los marcos de referencia terrestres en que se calcularon y se calculan las efemérides de los satélites TRANSIT

[Danchik, 1998] y GPS producidas por el Departamento de Defensa de los EE.UU. (DoD), que controla dichos sistemas de posicionamiento.

Los sistemas de referencia producidos por el DoD más usados son: WGS72, WGS84 y sus actualizaciones WGS84(G730) y WGS84(G873). Las efemérides de los satélites TRANSIT fueron referidas al marco de referencia correspondiente el primero de ellos. Los tres últimos fueron utilizados sucesivamente para referir las órbitas GPS [Malys et al., 1994] [Slater et al., 1998].

El SRC del sistema WGS84 implicaba orientar los ejes de coordenadas, fijar la escala y el geocentro a partir de los mejores sistemas de referencia disponibles en la época: el BTS del BIH y el NSWC-9Z2 del DoD. Fue realizado mediante observaciones a los satélites TRANSIT, por lo que la exactitud del sistema se encuentra entre 1 y 2 m. Esto no implica que las mediciones relativas entre puntos en este sistema tengan dicho error, pero sí que las diferencias de coordenadas en la superficie terrestre, respecto de un sistema que defina al geocentro con más exactitud, pueden ser de ese orden, según el lugar del planeta de que se trate. El marco de referencia POSGAR '94 fue referido a la materialización de WGS '84 disponible en Argentina para 1994, por lo que se encuentran diferencias sistemáticas de varios decímetros con respecto a ITRF. Estas diferencias pueden apreciarse al comparar POSGAR '94 y POSGAR '98 como se muestra en el capítulo 4.

El marco WGS84(G730) tiene un nuevo valor de GM que coincide con el utilizado por el IERS para la definición del ITRF y con el Sistema Geodésico de la IAG, GSR80. Su realización se llevó a cabo fijando las posiciones de varias estaciones que forman parte del marco de referencia ITRF91. Como consecuencia, el origen de esta nueva versión de WGS84 coincide con el de ITRF91 con una precisión decimétrica. La diferencia de orientación provocaría diferencias de menos de 20 cm en la superficie de la Tierra y el factor de escala entre ambos sistemas implica una diferencia de 3 mm en la superficie de la Tierra. Por último, en 1996 se agregaron dos estaciones de control al sistema y se recalcularon las coordenadas. Se refirió el ajuste a coordenadas ITRS de varias estaciones teniendo en cuenta los movimientos de las mismas por la deriva continental. Los cambios fueron adoptados en enero de 1997 con el nombre de WGS84 (G873). La consistencia entre WGS84 (G873) e ITRF es del orden de 5 cm.

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 desfasajes 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:

Observación de fase = φ_i^k (ciclos)

Pseudodistancia = $\lambda \cdot (\varphi_i^k + N_i^k) = \Phi_i^k + \lambda \cdot N_i^k$ (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.

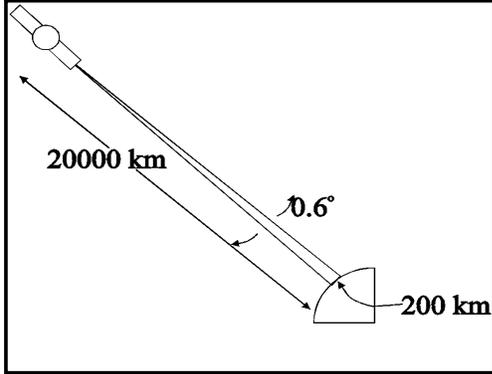


Figura 2.1: Escalas relevantes para el posicionamiento diferencial

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).

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

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

$$\Delta\Phi_{ij}^k = \tilde{\mu}_i^k \cdot \delta \tilde{x}_{ij}^k + \tilde{\mu}_j^k \cdot \delta \tilde{x}_j^k + c \cdot \delta t'_{ij} + \lambda N_{ij}^k + \tilde{\mu}_{ij}^k \cdot \delta \tilde{x}^k - \Delta I_{ij}^k + \Delta T_{ij}^k + \Delta dm_{ij}^k + \varepsilon_{ij}^k \quad (2.6)$$

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

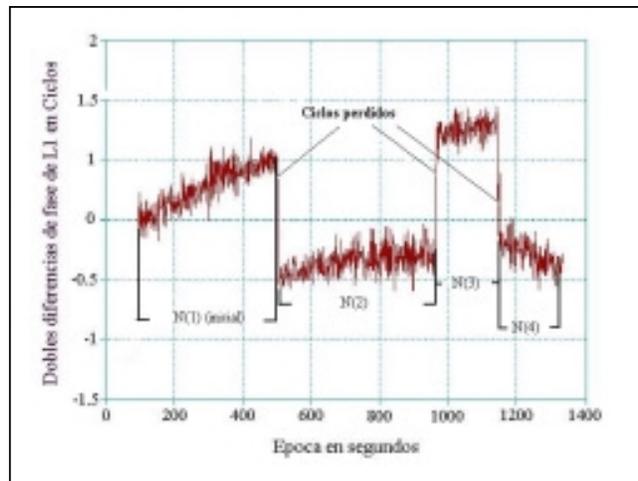


Figura 2.2: Ciclos perdidos en dobles diferencias de L_1

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

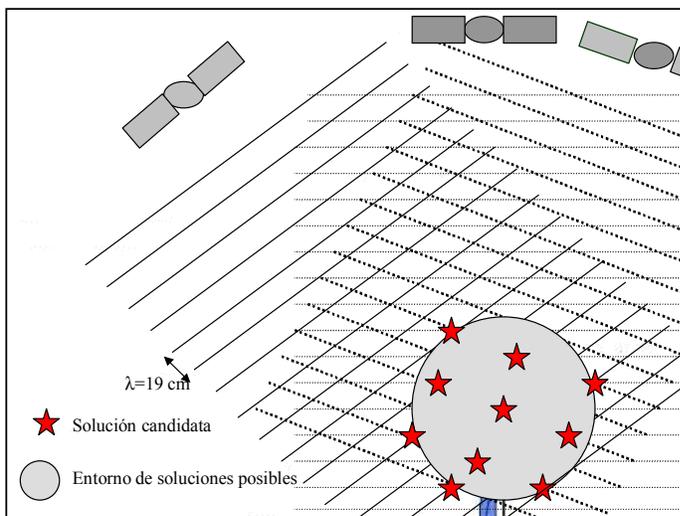


Figura 2.3: Soluciones posibles con ambigüedades enteras de L_1 a partir de una posición a priori de exactitud métrica.

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

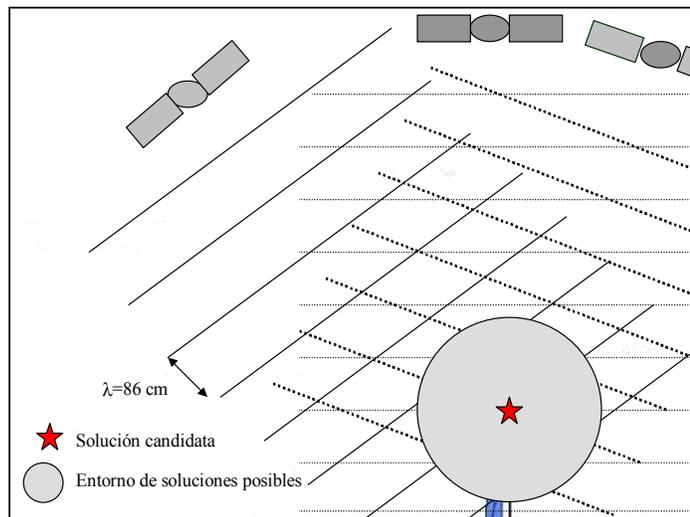


Figura 2.4: Soluciones posibles con ambigüedades enteras de L_{Δ}

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

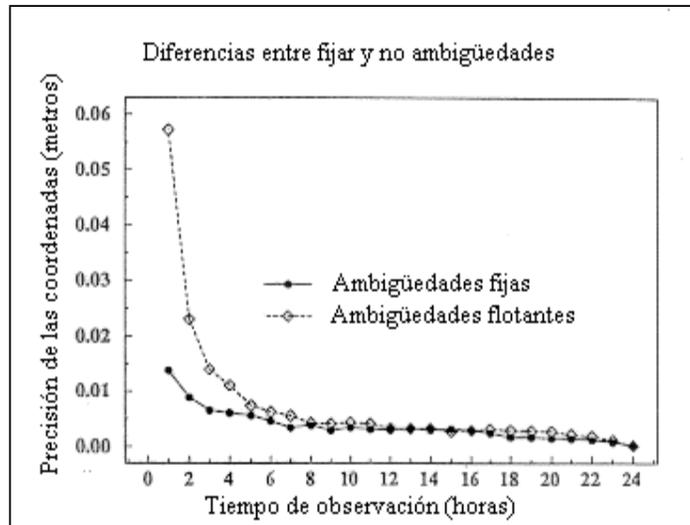


Figura 2.5: Ventaja de la solución de ambigüedades enteras en función de la longitud de la sesión [Rothacher et al., 1996b]

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 descritos 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].

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 como 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.

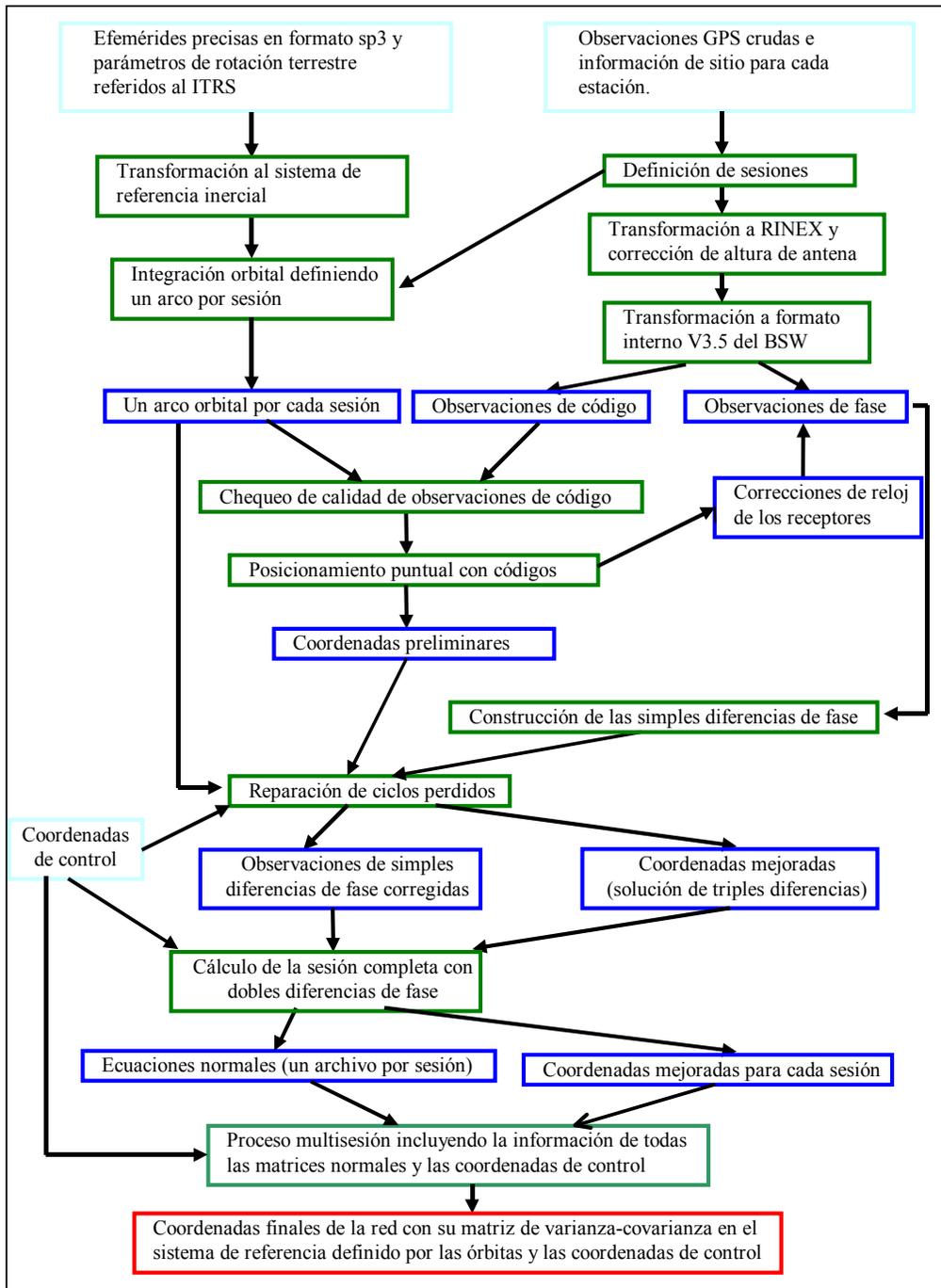


Figura 3.1: Esquema del flujo de procesamiento del Bernese GPS software V 4.0

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.

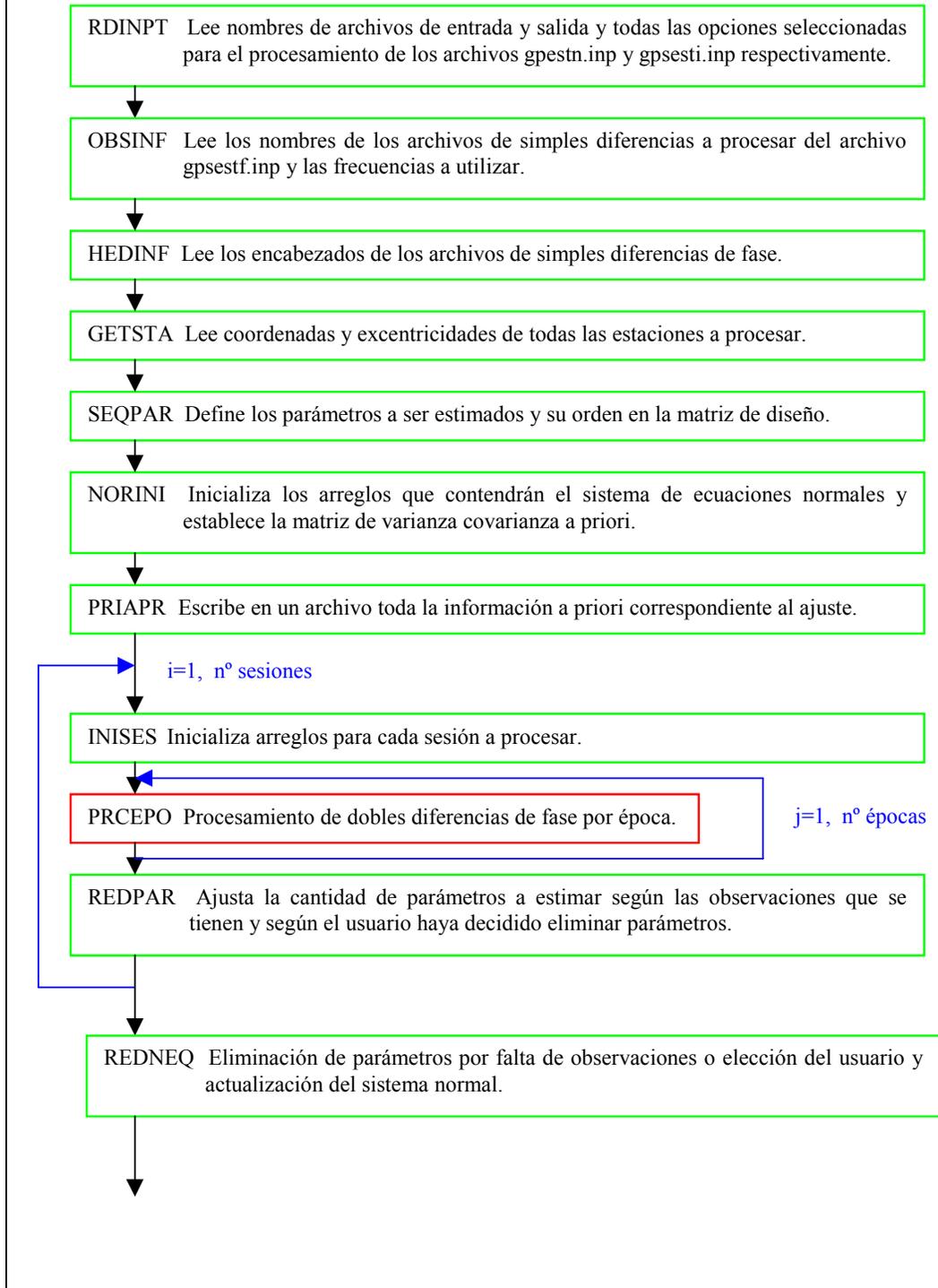
$$w = \frac{\sigma_{L1}^2}{\sigma_{Coord}^2} \cdot \frac{1}{n} \quad (3.6)$$

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.

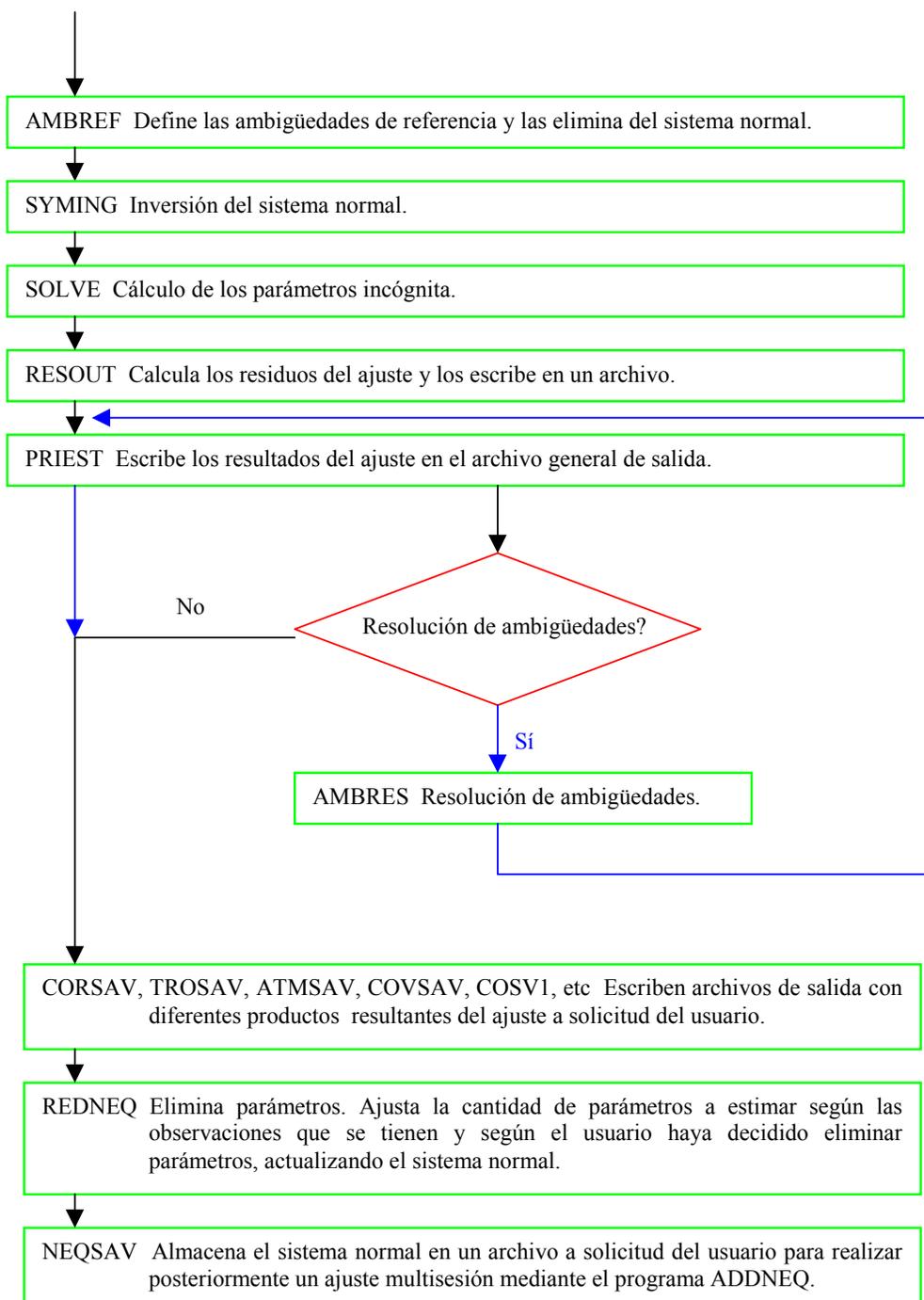
3.4.2 Estructura del programa principal de estimación de parámetros del BSW

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.)



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.

Capítulo 4

El marco de referencia POSGAR'98

4.1 Introducción

Durante todo el siglo XX se ha realizado en la Argentina un enorme esfuerzo para la conformación de una estructura geodésica básica de alta calidad, capaz de satisfacer las crecientes necesidades de la comunidad. Este trabajo fue realizado por el IGM. Se comenzó con trabajos de triangulación aislados en las zonas en que las necesidades eran más urgentes para luego integrarse todo en un sistema de referencia único. El resultado de este proceso fue el sistema Campo Inchauspe. Su origen fue definido por el punto astronómico fundamental del mismo nombre, ubicado en el noroeste de la provincia de Buenos Aires ($\varphi \cong -36^\circ$, $\lambda \cong -62^\circ$). La técnica de levantamiento utilizada fue la de cadenas fundamentales meridianas y paralelas equiespaciadas dos grados. El elipsoide asociado adoptado fue el Internacional de 1924. En 1969 se realizó la compensación que dio el nombre al marco Campo Inchauspe'69 (CAI69), en adelante el marco de referencia oficial del país. Luego se le fueron agregando nuevas observaciones hasta que ya en la década del ochenta llegó finalmente a cubrir prácticamente todo el país.

Al término de los trabajos de triangulación y poligonación, los puntos con coordenadas CAI69 sumaban 18.000 y la red constaba de 44 anillos cerrados. Investigaciones posteriores permitieron inferir que el sistema se hallaba unos 200 metros desplazado del geocentro y que su precisión relativa variaba entre 3 y 10 partes por millón. En esos años

comenzaron a utilizarse en el país las técnicas de medición satelitaria Doppler y ya cerca de fines de los ochenta comienza a utilizarse la técnica GPS.

Al comienzo de la década del 90, especialistas de la Universidad Nacional de La Plata discutían con el IGM la posibilidad de materializar un nuevo marco de referencia utilizando observaciones GPS. Diversos trabajos presentados en congresos de la especialidad fueron producto de esas discusiones y marcaron el nacimiento del Proyecto POSGAR (Posiciones Geodésicas Argentinas) [Rodríguez, 1989] [Brunini et al., 1991], [Rodríguez et al., 1991]. El objetivo era la materialización del marco de referencia argentino, tan cercano como fuera posible al sistema global WGS84, mediante observaciones GPS.

Cambios tecnológicos, políticos y económicos crearon el medio ambiente propicio donde el Proyecto fue creciendo y tomando forma:

La década estuvo signada por la difusión masiva de los sistemas de información geográfica y territorial y la adopción de la tecnología de posicionamiento GPS como herramienta casi excluyente para el posicionamiento geodésico y topográfico.

La demanda ejercida desde un mundo cada vez más tecnificado sobre los recursos naturales y el medio ambiente fue creciendo en forma sostenida, acrecentando paralelamente la demanda de información territorial precisa y actualizada. La transferencia desde el sector público al privado de grandes redes de distribución y comercialización de productos y servicios contribuyó sostenidamente a incrementar dicha demanda.

El detonante lo constituyó el apoyo económico prestado por organismos financieros internacionales para el desarrollo de programas de modernización que involucraron directamente la producción de información territorial. La modernización de los catastros provinciales, financiada con una inversión de alrededor de 150 millones de dólares, involucró la definición y materialización de redes de control geodésico en varias provincias argentinas.

El Proyecto POSGAR se concretó entre 1993 y 1997. Durante ese período se realizaron las observaciones GPS y se llevaron a cabo los cálculos que dieron lugar a las coordenadas definitivas del marco POSGAR'94, que fue oficialmente adoptado por el IGM en mayo de 1997 [IGM, 1997].

Durante el mismo período, se desarrolló en Sudamérica el proyecto SIRGAS, que produjo una materialización precisa del sistema de referencia terrestre internacional ITRS y además una cooperación científica entre el DGFI y la FCAG. Esta cooperación permitió mejorar POSGAR e integrarlo al nuevo marco de referencia continental SIRGAS. El resultado de esta tarea constituye el nuevo marco de referencia POSGAR'98, presentado en este capítulo. Su realización se vio impulsada por el desarrollo de una intensa cooperación entre la FCAG y el IGM.

Se hace aquí en primer lugar una breve descripción del desarrollo del marco de referencia nacional con anterioridad a la adopción de las técnicas de la geodesia satelital. En segundo lugar se describe el marco de referencia POSGAR'94, mostrándose algunos índices de la calidad de la red. Luego se presenta una solución al problema de la transformación entre marcos de referencia de muy diferente naturaleza, como son Inchauspe'69 y POSGAR'94. Se hace a continuación una descripción de la metodología utilizada en el nuevo cálculo de POSGAR y su vinculación a SIRGAS. Junto con los resultados finales, se incluyen algunas comparaciones que indican la calidad del nuevo marco de referencia: POSGAR'98. Finalmente se muestran las diferencias entre POSGAR'94 y POSGAR'98 y se analiza el impacto de una eventual adopción futura del nuevo marco. En el texto se encontrarán referencias a varios anexos, en los cuales se encuentra toda la información referente al cálculo: desde las observaciones hasta las coordenadas finales.

4.2 Desarrollo histórico del marco de referencia nacional

Esta sección pretende resumir someramente el desarrollo de las materializaciones del sistema de referencia nacional. Sólo se describen algunas características de las principales redes geodésicas que fueron establecidas en el territorio argentino a fin de que se comprenda la situación de la Geodesia en el país en el momento de la aparición de las técnicas satelitarias. Descripciones más detalladas pueden encontrarse por ejemplo en [IGM, 1979].

Entre 1910 y 1914 se proyectó en el IGM una red de triangulación para el país. La precisión propuesta fue de 1:100000 y constaba de triángulos con lados de entre 40 y 60 km. Los instrumentos a utilizar serían teodolitos, cintas y alambres de invar. Se propuso en principio la medición de cadenas a lo largo de un meridiano y un paralelo medios en el

territorio, estructura que serviría de base para el desarrollo de la totalidad de una futura red compuesta por cadenas siguiendo meridianos y paralelos espaciadas dos grados. Sin embargo, las dimensiones de la obra propuesta y los medios disponibles hicieron que su ejecución se dilatara. Mientras tanto, las necesidades de control geodésico surgidas en varias regiones del territorio dieron lugar a la materialización de diferentes sistemas de referencia. Entre ellos se destacan algunos que fueron luego aprovechados al menos parcialmente por el IGM para la conformación de la futura red geodésica nacional: la red de triangulación de Capital Federal partió de una base y un punto astronómico medidos en Campo de Mayo. En la Provincia de Buenos Aires se partió del lado Mahón-Tres Flores, medido entre 1909 y 1912. En Santa Fé, las triangulaciones provinciales arrancaron de la base Santa Teresa-Cepeda; las coordenadas en cambio se calcularon a partir de un punto astronómico expeditivo en Paraná. En Entre Ríos, a partir de 1924 las triangulaciones arrancaron de la base y estación astronómica de Ubajay. En Corrientes, las triangulaciones posteriores a 1932 partieron de la base y punto astronómico Itaembe-Minié. En Misiones las cadenas arrancaron de la misma base y astronómico que las de Corrientes. En Mendoza, de 1928 a 1936 se midió una cadena que va desde Neuquén hasta San Juan apoyada en la base y estación astronómica de Chos Malal. En San Juan se midió la cadena norte-sur antes mencionada referida al sistema Chos Malal y además otra este-oeste que se calculó partiendo del observatorio de Córdoba. En la misma provincia de Córdoba, los puntos situados al este del Observatorio de la ciudad de Córdoba estaban en el sistema Ubajay. El observatorio de Córdoba sirvió de origen para todos los puntos de la provincia situados al oeste del mismo.

La Ley nacional nro. 12696, llamada Ley de la carta (1941) dio al IGM el mandato de confeccionar la cartografía del país y le asignó el presupuesto necesario. Esto urgió a la definición de un sistema de referencia nacional y a su realización mediante una red geodésica que se constituyera en la base de todos los trabajos cartográficos.

Para ese entonces, el IGM contaba ya con un marco de referencia que incluía las redes de triangulación interconectadas de la época. Este marco materializaba el sistema Castelli, cuyas coordenadas se publicaron oficialmente en 1948. En él se integraron los sistemas provinciales descriptos en el párrafo anterior [Helbling, 1948]: se calcularon nuevamente las coordenadas de todos los vértices tomando como único origen o punto de tangencia entre el Geoide y el elipsoide al extremo SE de la base de Castelli en la provincia de Buenos Aires. Se calcularon, a partir de ese punto y el elipsoide internacional de 1924, las

coordenadas geográficas y planas Gauss-Krüger de los puntos trigonométricos de 1° a 4° orden determinados hasta 1943 para las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos, Corrientes, Terr. Nac. de Misiones, San Juan y Mendoza.

El sistema Castelli era de carácter provisional, ya que debía realizarse aún una discusión más a fondo acerca de un origen más adecuado para la red. No se podía encontrar un punto que hiciera mínima la suma de los cuadrados de las desviaciones de la vertical en toda la red de triangulación planeada porque esta no estaba aún terminada. En consecuencia se decidió elegir un punto que cumpliera las siguientes condiciones: Pertenecer a las cadenas de triangulación de primer orden existentes. Estar localizado en una zona libre de efectos topográficos que pudieran causar una desviación apreciable de la vertical. No estar afectado por anomalías de la gravedad significativas debidas a irregularidades en la distribución de masas en el subsuelo. El punto trigonométrico que fue finalmente propuesto por reunir las condiciones señaladas es el extremo de la extensión de la base de Pehuajó llamado Campo Inchauspe, cercano a la intersección del paralelo -36 y del meridiano -62. Este punto fue declarado el origen del sistema de triangulación nacional por disposición permanente nro. 440 del IGM en 1946.

Elegido el futuro origen de la red, se continuaron los trabajos de triangulación y poligonación hasta que en 1954 se realizó la primera compensación de la red. Consta de 10 anillos que cubrían prácticamente la totalidad de Córdoba, centro y sur de Santa Fé y la totalidad de Buenos Aires. Esta compensación, que involucró más de 1000 incógnitas, se realizó manualmente, constituyéndose así el marco Campo Inchauspe'54. Los trabajos continuaron y se fueron agregando nuevos anillos a la red en forma provisoria, considerando los resultados de la compensación de 1954 como fijos.

En 1969 se recalculó la posición del punto datum Campo Inchauspe utilizando un nuevo y más preciso catálogo de estrellas a la vez que se aplicaron correcciones por el movimiento del polo en el cálculo de las coordenadas. Para entonces se habían completado ya 19 anillos que fueron compensados en el U.S Army Map Service por A. Christensen y A. Elías, del IGM, quienes desarrollaron además los programas que se utilizarían en adelante en dicho instituto para la adición de nuevos anillos a la red [Christensen et al., 1973]. Estos nuevos anillos fueron agregados en lo sucesivo manteniendo siempre fijos los puntos incluidos previamente en la red.

Configuración final del marco de referencia Inchauspe'69

Luego de finalizados los trabajos de triangulación y poligonación, la red Inchauspe cuenta con 44 anillos cerrados, compensados manteniendo fijas las coordenadas resultantes del cálculo de 1969, incluyendo un total de 18000 puntos. Los estimadores internos de exactitud de la red, que se utilizaron para controlar el trabajo, indicaron errores de aproximadamente 15 cm para lados de 30 km de longitud promedio, lo que implica entre 3 y 10 ppm. Comparaciones posteriores respecto de sistemas independientes indican exactitudes en los vectores de entre 2.7 ppm y 3.3 ppm [Rodríguez, 1999].

SAD 69

En 1944 la comisión de cartografía del IPGH declaró la necesidad de establecer un marco de referencia continental en América del Sur utilizando un conjunto de estaciones astronómicas distribuidas por todo el continente, conectadas mediante cadenas de triangulación de alta precisión. Se utilizaría la infraestructura geodésica existente en los distintos países y habría que conectar las redes geodésicas entre ellos para lograr un marco de referencia suficientemente rígido. Dos años después se recomendó que el punto dátum estuviera aproximadamente en el centro del continente, en una zona que abarca parte de los territorios de Argentina, Bolivia, Brasil y Paraguay. Se encargó la ejecución de observaciones gravimétricas en la región por los cuatro países a fin de determinar deflexiones de la vertical. Las dificultades que la zona elegida tenía para la ejecución de los costosos relevamientos necesarios, determinaron que el proyecto no presentara avances significativos hasta bien entrada la década del sesenta. En 1965, a partir de un trabajo de [Fischer et al., 1965] sobre el geoide en América del Sur, se decidió cambiar de estrategia y seleccionar el punto dátum dentro de los ya existentes en el continente de manera tal que produjera las menores desviaciones de la vertical y ondulaciones geoidales posibles una vez ajustadas todas las redes en forma conjunta. Entre 1967 y 1969 se mejoraron las redes de control de los países y se midieron gran cantidad de estaciones astronómicas. Se realizó luego un cálculo siguiendo dos circuitos fundamentales: el circuito sur partió del sur de Brasil hacia Argentina y Uruguay, luego hacia el norte y al oeste hasta Chile pasando por Bolivia, y nuevamente hacia el este hasta Brasil. El circuito norte partió de Bolivia, pasando por Perú, Ecuador, Colombia, Venezuela, y volviendo por último a Brasil para conectarse con el otro circuito en el sur de ese país. Los errores de cierre de estos dos circuitos, de miles de kilómetros de extensión, alcanzaron varios metros, que fueron repartidos por toda la red en una compensación. Una vez lograda esta red continental

homogénea, se le aplicaron transformaciones de dátum a fin de encontrar el que fuera más adecuado para el continente manteniendo mínimas las ondulaciones del geoide. El resultado del trabajo fue presentado y aprobado en 1969 en “XIth Pan American Consultation on Cartography” como “South American Datum 1969”, o simplemente SAD69. El punto adoptado como dátum fue el de Chua, en Brasil, cuyas coordenadas son: 19° 45' 41.6527" y 48° 06' 04.0639" y cuya altura geoidal N fue considerada nula. El elipsoide adoptado fue $a=6378160$ m $1/f= 298.25$. Se determinaron parámetros de transformación entre el nuevo marco de referencia y los de los países de la región. Estas transformaciones fueron en general tres traslaciones y el error medio de una coordenada transformada fue inferior a dos metros, para zonas de escasa altura en el este del continente, y hasta un máximo de cuatro metros en la zona occidental. Controles con técnicas de geodesia satelital realizados poco después, mostraron por ejemplo en un triángulo sobre la zona central de la Argentina, diferencias en las distancias (cuerdas) de 1 metro en vectores de varios cientos de kilómetros [Fischer, 1972]. Respecto a la posición geocéntrica del SAD69, se determinaron correcciones en X, Y y Z para llegar a él desde Inchauspe'69. Estas son respectivamente: -83m, 130m y 120m. A pesar de contar con coordenadas SAD69 en muchos puntos de la red Inchauspe'69, este sistema no fue finalmente adoptado en nuestro país por el IGM ni tampoco lo adoptaron oficialmente las comisiones de límites internacionales. Más detalles acerca de SAD69 pueden hallarse en [Fischer, 1972].

Otros sistemas de referencia no reducidos a Inchauspe

Existe aún en la actualidad una serie de sistemas de referencia menores distribuidos en el territorio nacional. Fueron construidos en respuesta a necesidades de origen diverso en zonas a las que el marco de referencia nacional no llegaba. Su calidad no es homogénea ya que estuvo determinada por las necesidades que, en cada caso, motivaron su establecimiento y por las técnicas disponibles en la época. Algunos de estos sistemas locales fueron recuperados a Inchauspe'69. Este trabajo fue hecho por el IGM principalmente sólo para el primer orden, permaneciendo en muchos casos las densificaciones y cartografía asociadas sin transformar. Un buen ejemplo de esto es el sistema Chos Malal, recuperado parcialmente en sus cuatro órdenes [Rodríguez et al., 1987]. Las coordenadas de estos sistemas recuperados son mantenidas por el IGM en una base de datos separada de CAI69 debido a que su calidad, principalmente en cuanto a precisión y monumentación, no siempre cumple los estándares de Inchauspe'69. La

información referente a los sistemas no recuperados por el IGM debe buscarse en las instituciones o empresas que los construyeron. Más información referente a este tema puede encontrarse en [Rodríguez, 1999].

La red DOPPLER

A fines de los años setenta, se realizaron mediciones con el sistema satelital de navegación TRANSIT en muchos países latinoamericanos, resultando parámetros de transformación entre el sistema de referencia global NWL-9D en que se expresaban las efemérides precisas de dichos satélites, y los sistemas locales entre los que se incluyó también el sistema SAD69 [Walker, 1977]. En la Argentina durante 1978 se ocuparon 18 estaciones Laplace de la red Inchauspe por la entonces DMA utilizando dos receptores propios. Se determinaron parámetros de transformación entre Inchauspe'69 y NWL-9D que luego se utilizaron para la determinación de parámetros de transformación desde Inchauspe'69 a WGS84. Este trabajo fue realizado también por la DMA y los parámetros resultantes fueron ampliamente difundidos, siendo aquéllos a los que se refiere más adelante en §4.3. Los resultados de la red DOPPLER mostraron la capacidad de los métodos de la geodesia satelital para la materialización de marcos de referencia de gran extensión ya que se logró determinar coordenadas respecto de un sistema de referencia global con un error de poco más que un metro [Rodríguez, 1987]. Sin embargo habría que esperar a la aparición del sistema GPS para que, merced a sus ventajas técnicas y logísticas, los métodos satelitales desplazaran definitivamente a los clásicos en la materialización del sistema de referencia geodésico nacional.

4.3 POSGAR'94

En 1993 las provincias argentinas necesitaban coordenadas de arranque en el sistema WGS84 y también un mejor marco de referencia que el brindado por el sistema clásico Inchauspe'69. Esto era necesario a fin de proveer un control adecuado para las nuevas redes geodésicas provinciales, a ser establecidas en el marco del “Programa de Desarrollo Económico y Saneamiento Financiero de las Provincias Argentinas”. Con este objetivo, se propuso establecer una red geodésica a partir de mediciones GPS con una precisión relativa de 1 ppm que materializara el sistema de referencia WGS84.

La realización del marco de referencia POSGAR'94 fue producto de la cooperación de varias instituciones entre 1993 y 1995. Las mediciones estuvieron principalmente a cargo del Instituto Geográfico Militar con la colaboración del Servicio de Hidrografía Naval y el consorcio de universidades UNAVCO. El cálculo fue realizado en la FCAG con el apoyo del Programa de Desarrollo Económico y Saneamiento Financiero de las Provincias Argentinas.

Como resultado, POSGAR'94 consta de 127 puntos bien distribuidos en el territorio nacional a razón de aproximadamente un punto cada doscientos kilómetros tanto en latitud cuanto en longitud. Las coordenadas finales se encuentran en el sistema WGS84 y fueron distribuidas por el IGM en 1995 [IGM, 1995].

4.3.1 Las observaciones

Las mediciones utilizadas en el cálculo de la red POSGAR surgen de la realización de tres campañas de medición GPS: POSGAR 1993 y CAP 1993, realizadas simultáneamente, y POSGAR 1994.

Las observaciones de POSGAR 1993 se realizaron entre febrero y abril de ese año, mientras que la red CAP se observó entre febrero y principios de marzo. Las sesiones tuvieron una duración de 6 horas para las estaciones POSGAR, pero para los vectores entre estaciones de CAP se aprovecharon las 22 horas de duración de esas sesiones. Se contó con hasta seis receptores a los que se agregaron varios más en las sesiones comunes con el proyecto CAP. Los receptores usados fueron de doble frecuencia equipados con la técnica

de cuadratura de la señal para recuperar la portadora L2. Se emplearon equipos TRIMBLE 4000 SST y TOPCON GPRD1. La máscara de elevación empleada para el almacenamiento de las observaciones fue de 10 grados.

La campaña POSGAR 1994 se realizó entre marzo y mayo de 1994. En este caso las sesiones tuvieron una duración de 6 horas, contando con tres receptores que midieron en forma simultánea. Se usaron sólo receptores TOPCON de las mismas características que los empleados en la campaña de 1993.

4.3.2 El cálculo

Las observaciones se calcularon mediante el software comercial GPPS. Se obtuvieron 660 vectores GPS. El observable modelado fue las dobles diferencias de fase de la combinación de L_1 y L_2 libre de efecto ionosférico. La máscara de elevación fue de 15 grados. Las ambigüedades fueron estimadas como números reales. El efecto troposférico fue tratado mediante el modelo incluido en GPPS [Remondi, 1984], usando datos meteorológicos tomados al principio y al final de la medición.

El ajuste final y el establecimiento del sistema de referencia WGS84 se llevaron a cabo mediante un programa de ajuste de redes desarrollado en la FCAG [Usandivaras et al., 1992]. El sistema de referencia se introdujo mediante la inclusión de las coordenadas de 20 puntos con alto peso [Usandivaras et al., 1995]. Los puntos de control fueron:

La estación EARG, con coordenadas provenientes de una vinculación entre el punto ocupado en POSGAR y la baliza DORIS que allí opera.

Las coordenadas de 19 puntos de la red CAP transformadas a WGS84, obtenidas a través de una comunicación personal con Robert Smalley de la Universidad de Memphis.

4.3.3 Los resultados

Número de vinculaciones de cada punto

La figura 4.1 presenta el número de vinculaciones por punto a partir de los 660 vectores utilizados en el ajuste de 1994. Un indicio más realista de la redundancia dentro de la red

es el número de veces que cada punto fue ocupado. Esta información se presenta en la figura 4.2

Acuerdo interno de la solución

Los errores de las coordenadas finales se encuentran en un 80 por ciento de los casos por debajo de los 30 cm con un nivel de confianza del 95 %.

A partir de los errores en las coordenadas finales, se calculó el error en la distancia para cada uno de los vectores usados en la compensación. Como resultado se vió que el 80 % tiene errores relativos inferiores a 1 ppm, y el 95% los tiene inferiores a 2 ppm.

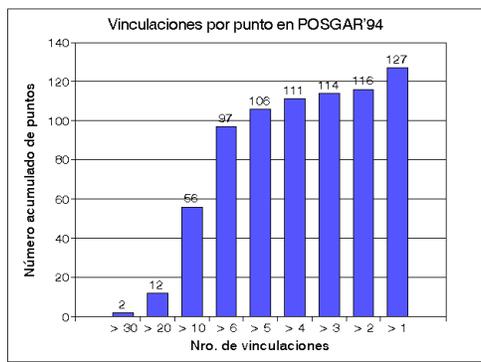


Figura 4.1: Vinculaciones por punto

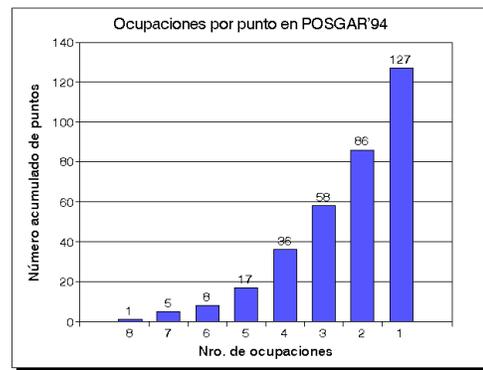


Figura 4.2: Nro. de ocupaciones por punto

4.3.4 POSGAR'94 y SIRGAS

En la época en que se calculó POSGAR'94 había en el país muy pocos puntos con coordenadas precisas respecto de sistemas de referencia globales que permitieran contrastar los resultados obtenidos. Durante 1995 y 1996 se tuvo acceso a comparaciones aisladas en las provincias argentinas de Río Negro y Buenos Aires entre POSGAR'94 y la red SAGA. Los resultados de las mismas indican que POSGAR'94 materializa el geocentro con un error de alrededor de un metro. No fue sino hasta disponer de los resultados de SIRGAS que esto se confirmó para un conjunto de puntos bien distribuidos en el territorio.

Como fuera mencionada en §1.7, el proyecto SIRGAS se estableció en la Conferencia Internacional para la Definición de un Datum Geocéntrico Sudamericano, en Asunción en 1993. Sus dos principales objetivos fueron: el establecimiento de una red de control

geodésico continental de alta precisión, tarea a cargo del Grupo de Trabajo I del proyecto, y la integración de las redes geodésicas nacionales al sistema materializado por SIRGAS; objetivo del Grupo de Trabajo II.

En este contexto y desde 1994 la FCAG y el DGFI mantienen un acuerdo de cooperación con el objetivo de establecer un marco de referencia geocéntrico en Argentina en conexión con el marco de referencia de SIRGAS. Dicho acuerdo ha implicado la participación de la FCAG en la medición, en el procesamiento de la red SIRGAS realizado en el DGFI [Kaniuth et al., 1998b] y continuó luego con la integración de la red POSGAR a SIRGAS según las recomendaciones del Grupo de Trabajo II [SIRGAS, 1996][SIRGAS WGII, 1997].

En setiembre de 1997 fueron presentados oficialmente los resultados de la red SIRGAS [SIRGAS, 1997]. De los diez puntos SIRGAS que existen en La Argentina, seis son comunes a las redes SIRGAS95 y POSGAR'94. A fin de evaluar en forma externa la calidad del marco POSGAR'94, se tomaron las coordenadas de los puntos comunes entre ambas redes y se calcularon los vectores que definen en ambos casos para luego realizar comparaciones cuyo resultado puede verse en la tabla 4.1

Tabla 4.1: Diferencias de coordenadas absolutas y distancias entre POSGAR'94 y SIRGAS

Punto	$\Delta\phi$ [cm]	$\Delta\lambda$ [cm]	Δh [cm]	Vector	Distancia	Δ Dist.
				Lote 10B-	[km]	[ppm]
Lote 10B	51	35	-17	Lote 24	900	0.03
Lote 24	51	9	-22	El Maitén	498	-0.01
El Maitén	42	19	32	El Morro	1438	0.03
El Morro	52	18	36	V. Robles	2040	-0.01
V. Robles	55	18	4	R. Grande	862	0.30
R. Grande	86	17	-133			

Estos resultados confirman lo mencionado anteriormente en el sentido de que POSGAR'94 es un marco de referencia cercano a WGS84 que define al geocentro con un error de aproximadamente un metro respecto de ITRF y tiene una precisión de una ppm (1σ).

4.4 La transición entre el sistema Inchauspe'69 y POSGAR'94

La situación en Argentina a partir de mediados de 1995 fue la coexistencia de Campo Inchauspe'69 (CAI69) y otros sistemas clásicos menos difundidos, frente a POSGAR'94

(PGA94). Surgió la necesidad entonces de estudiar la manera de transformar entre los dos tipos de marco de referencia minimizando la pérdida de precisión, con el objeto de lograr el máximo aprovechamiento de los trabajos referidos a sistemas clásicos realizados previamente al establecimiento de POSGAR'94. Para el estudio del problema se utilizó Inchauspe'69 por ser el más importante y extendido.

4.4.1 Parámetros de transformación entre CAI69 y POSGAR'94

La transformación entre ambos marcos de referencia plantea varios problemas que obedecen a distintas razones:

POSGAR'94 es un marco de referencia geocéntrico materializado con una precisión del orden de 1 m, mientras que CAI69 es un marco de referencia local cuyo origen se halla unos 200 m desplazado del geocentro.

La precisión relativa del marco de referencia POSGAR'94 es del orden de 1 ppm, mientras que la de CAI69 varía entre 3 y 10 ppm, presentando errores sistemáticos a lo largo de su extensión que presentan una clara correlación espacial [Brunini et al., 1996].

POSGAR'94 es un marco de referencia tridimensional en el que se dispone de las tres coordenadas geométricas en todos los puntos, mientras que CAI69 es un sistema bidimensional en el que no se cuenta con alturas geodésicas.

Las alturas asociadas al sistema CAI69 son las cotas de la red de nivelación del IGM y no se cuenta con ondulaciones geoidales suficientemente precisas para convertirlas en geodésicas.

La conversión de coordenadas entre los sistemas CAI69 y WGS84 se realizaba habitualmente introduciendo en las fórmulas de Molodensky las constantes de transformación:

$$\Delta X = -148 \text{ m} \quad \Delta Y = 136 \text{ m} \quad \Delta Z = 90 \text{ m}$$

Cuyos valores fueron determinados por la Agencia Cartográfica de Defensa (DMA) de los Estados Unidos de América (hoy NIMA) utilizando 19 puntos pertenecientes a CAI69,

cuyas coordenadas WGS84 se obtuvieron a partir de observaciones realizadas con el sistema TRANSIT.

Basándose en 50 puntos comunes con una distribución geográfica aceptable se determinaron fórmulas de regresión múltiple que permiten obtener valores localizados de las constantes de transformación [Brunini et al., 1996]:

$$\Delta\alpha = A_{\alpha 0} + A_{\alpha 1}u + A_{\alpha 2}v + A_{\alpha 3}u^2 + A_{\alpha 4}v^2 + A_{\alpha 5}uv + A_{\alpha 6}u^3 + A_{\alpha 7}v^3 + A_{\alpha 8}u^2v + A_{\alpha 9}uv^2 + \dots$$

donde α representa una cualquiera de las tres coordenadas X,Y,Z; $A_{\alpha i}$ son coeficientes constantes; u y v son la latitud y la longitud normalizadas:

$$u = \frac{\varphi + 37^\circ}{15^\circ} \quad v = \frac{\lambda + 64^\circ}{8^\circ}.$$

Recientemente estas fórmulas de transformación han sido adoptadas oficialmente por el IGM. Se estima que permiten convertir las coordenadas planimétricas con errores inferiores a ± 1.5 m (1σ), lo que permite su uso en diversas aplicaciones:

Transformar la mayor parte de la cartografía oficial del país editada por el Instituto Geográfico Militar, levantada en el sistema de CAI69, teniendo en cuenta que la mayor escala disponible es 1:50.000.

Integrar levantamientos georreferenciados en un sistema de información geográfica o territorial. Esto requiere como condición la vinculación de los mismos a un sistema de referencia espacial único. La red POSGAR'94 constituye hoy la mejor referencia espacial existente en la Argentina, pero su densidad es baja (en promedio, 1 punto cada 200 km). Los puntos CAI69 transformados a POSGAR'94 pueden proveer una referencia satisfactoria para los usuarios que solo requieran bajas o moderadas precisiones.

Proveer coordenadas de suficiente exactitud a fin de asegurar una precisión relativa de 1 ppm en los levantamientos GPS. Los puntos CAI69 transformados a POSGAR'94 pueden brindar coordenadas de arranque satisfactorias para este fin, aunque no permitan vincular el levantamiento a POSGAR'94 con una exactitud mejor que ± 1.5 m (1σ).

4.5 El marco de referencia POSGAR'98

4.5.1 La integración de La Argentina en el marco SIRGAS

En 1997 el Grupo de Trabajo II del proyecto SIRGAS recomendó que la vinculación de las redes de referencia nacionales al marco materializado por la red SIRGAS se hiciera en forma individual por cada país empleando para ello al menos todos los puntos SIRGAS incluidos en el territorio de cada nación. A esto se sumó la recomendación de utilizar procedimientos análogos a los empleados en el cálculo de la red SIRGAS para la vinculación de los marcos de referencia nacionales [SIRGAS WGII, 1997]. La FCAG asumió el compromiso de realizar el trabajo de vinculación a SIRGAS siguiendo las especificaciones antes indicadas, en el marco de su cooperación científica con el DGFI.

Lo primero que se debía saber era si para el caso de POSGAR, las diferencias entre el cálculo realizado en 1994 y otro realizado con los procedimientos científicos recomendados en el proyecto SIRGAS serían significativas. Esto determinaría si era justificable un recálculo completo de POSGAR con la metodología recomendada previo a su integración a SIRGAS, o si podían, por ejemplo, reajustarse directamente los vectores componentes del marco POSGAR'94 a las nuevas coordenadas de control. Se realizó entonces una prueba consistente en el cálculo de tres partes diferentes de la red utilizando la metodología recomendada por el GTII de SIRGAS.

En los tres casos se observaron diferencias sistemáticas de varias decenas de centímetros respecto de POSGAR'94 para las alturas de las estaciones, siendo las diferencias en latitud y longitud de bastante menor tamaño. Estando convencidos de que las diferencias observadas se debían a la mejora en la metodología de procesamiento de las observaciones se decidió emprender un recálculo completo de la red previo a la realización de la vinculación a SIRGAS.

El esquema del trabajo planteado fue el siguiente:

Cálculo de las observaciones de las campañas POSGAR 1993 y POSGAR 1994.

Vinculación de los 4 puntos SIRGAS no coincidentes con POSGAR.

Ajuste al marco de referencia SIRGAS utilizando todos los puntos disponibles.

Verificación de los resultados mediante observaciones independientes.

La conveniencia de realizar un control de la red mediante observaciones independientes se encuentra fundada en la información que se muestra en la figura 4.2 donde se ve que el esquema de ocupación de la red no es homogéneo y que además hay muchas estaciones ocupadas solamente una vez. Esto hace que los residuos de que se dispone en los puntos SIRGAS no permitan inferir condiciones similares para todos los puntos del resto de la red.

4.5.2 Las observaciones

El banco de datos que participó del cálculo de POSGAR'98 se constituye en su gran mayoría por las mismas observaciones empleadas en el cálculo de POSGAR'94.

A estas observaciones, cuyas características fueron ya mencionadas en §4.3.1, se agregaron observaciones correspondientes a las estaciones TRES, BDSO y TNDL en Argentina y BMNS, SANT, LEBU, CALD y ARIC, en Chile. Estas observaciones pertenecen al proyecto CAP, son contemporáneas a las observaciones de POSGAR en 1993 y permitieron agregar vectores que aumentaron la rigidez de la parte noroccidental de la red. La incorporación de Santiago de Chile (SANT) tiene gran relevancia, ya que se trata de un punto SIRGAS, con lo que se mejoró la calidad de la integración entre el marco de referencia continental y POSGAR. Las sesiones de observación de estos puntos fueron de 22 horas durante varios días, como todas las estaciones de CAP, lo que asegura su vinculación en forma muy fuerte al resto de la red.

Se debieron incorporar además las observaciones correspondientes a las vinculaciones SIRGAS-POSGAR en La Plata (LPGS), Iguazú (IGUA), Mendoza (CRIC) y Salta (UNSA).

En el caso de La Plata, se realizó una vinculación de tres días de observación en diciembre de 1996 con el punto IGM0, que pertenece a POSGAR'94.

UNSA fue vinculada en setiembre de 1997 por el IGM con la colaboración del proyecto SAGA mediante dos sesiones de 8 horas de duración cada una a los puntos POSGAR'94 LMAS y ELLA.

En todas las vinculaciones se utilizaron receptores de doble frecuencia. En el caso de CRIC y LPGS los equipos contaban con acceso al código P, no así para las vinculaciones de UNSA e IGUA, en las que los equipos contaban con recuperación de L_2 por cuadratura.

Las ubicaciones de los puntos, así como la conformación de los vectores involucrados en el cálculo, pueden verse en la figura 4.3. En rojo se ven los vectores formados entre puntos de la campaña POSGAR 1993, en azul los de POSGAR 1994, mientras que en amarillo se ven los vectores correspondientes a las cuatro vinculaciones a SIRGAS. En el anexo II se encuentra la tabla de ocupación de las campañas POSGAR 1993 y 1994. En el anexo III se encuentra el detalle de los puntos que conforman el marco POSGAR'98.

Como observaciones independientes para control del cálculo se contó con las cedidas por el proyecto CAP, que comprendieron las cinco estaciones GPS permanentes que dicho proyecto ha instalado en territorio argentino y varios puntos de la red POSGAR. Los períodos de observación fueron de entre 24 y 48 horas en una campaña de 22 días de duración entre setiembre y noviembre de 1997. También se obtuvieron observaciones en cuatro puntos de la provincia de Neuquén, cada uno ocupado al menos dos veces con períodos de observación de 11 horas. Los equipos GPS utilizados en todos los casos fueron de doble frecuencia con código P.

4.5.3 El cálculo

Se realizó enteramente en la FCAG con el paquete de procesamiento GPS Bernese V4.0 [Rothacher et al., 1996b], con el asesoramiento del DGFI y la colaboración, en la etapa de cálculo de las vinculaciones SIRGAS-POSGAR, de personal de la División de Geodesia del IGM. Asimismo, el IGM colaboró en la gestión y el procesamiento de los datos del proyecto CAP utilizados para el control final de la red referido en §4.5.5.

El flujo de procesamiento fue descrito con más detalle en el capítulo 3. El procedimiento utilizado en el cálculo de todas las campañas descriptas es similar. Se comentarán a continuación sus características más relevantes.

El software utilizado emplea dobles diferencias de fase. Esto permite por un lado eliminar el efecto de los errores en los relojes de los receptores y por otro hacer despreciables las consecuencias de los errores de los relojes de los satélites como ya se explicó en §2.2.3.

Las distancias medias entre puntos de la red POSGAR son de cientos de kilómetros, por lo que el efecto de la ionosfera sobre las señales debe ser tenido en cuenta. En consecuencia, el observable modelado en el procesamiento fue la doble diferencia de fase de la combinación de portadoras libre de efecto ionosférico.

Se utilizaron efemérides precisas del Centro de Determinación Orbital de Europa (CODE) para las campañas de 1993 y del IGS en 1994. Esto se hizo debido a que en la época de la campaña POSGAR'93 no estaba disponible aún el servicio de efemérides precisas del IGS. Para las campañas de vinculación SIRGAS-POSGAR y control final de la red, más recientes, se utilizaron las efemérides precisas combinadas del IGS. Para conocer la posición del satélite en todos los instantes de observación, se calcula un arco de órbita para cada sesión y cada satélite definido por quince parámetros, seis para definir la orientación y forma de la órbita y nueve adicionales para modelar el efecto de la presión de radiación solar. El ajuste del arco se realiza tomando las efemérides precisas como si fueran observaciones directas de las coordenadas satelitales tomadas cada 15 minutos.

La máscara de elevación utilizada en el procesamiento final fue de 15 grados. Esto fue el resultado de un compromiso entre la mejora de la geometría del problema de posicionamiento y el aumento del ruido en las observaciones, hechos ambos asociados a la disminución de la máscara de elevación. Esta decisión fue prácticamente forzada por el hecho de que el ruido a bajas elevaciones es especialmente alto para los receptores que cuadran la señal de L_2 .

Ya fue explicada en §2.3.3 la dificultad que presenta la definición exacta del punto de recepción efectiva de la señal GPS y sus consecuencias en el posicionamiento. En el presente cálculo, las variaciones mencionadas fueron modeladas utilizando los valores recomendados por el IGS para las antenas utilizadas en las mediciones. Se contó en muchos casos con vectores definidos por antenas diferentes. En el anexo V se listan las antenas que fueron utilizadas en las mediciones de POSGAR. Se incluyen también los modelos de corrección por variación de la altura del centro de fase en función de la elevación del satélite que fueron utilizados en el cálculo.

Respecto al tratamiento del retardo troposférico, se mencionó en §2.3.4 que los modelos no son capaces de predecir el efecto con suficiente exactitud, por lo que es menester calcular una corrección variable en el tiempo para cada estación a partir de las mismas observaciones. En el presente cálculo, el retardo troposférico cenital a priori fue calculado utilizando el modelo de [Saastamoinen, 1973] y se usó la función de mapeo de [Niell, 1996] para calcular el retardo en la dirección del satélite. Este modelo a priori fue evaluado en un estado atmosférico en superficie extrapolado por medio de la atmósfera estándar ya descrita en §3.4.1. A la estimación del retardo cenital calculada a priori le fue sumada una corrección para cada estación. Esta última está acompañada también por una función de mapeo para convertirla a la dirección satélite receptor para cada observación. La función de mapeo utilizada en el cálculo de POSGAR'98 fue la incluida en la distribución original del BSW, y es $1/\cos(z)$, donde z es la distancia cenital del satélite observado. Se estimaron correcciones a intervalos de a lo sumo cinco horas a fin de absorber las variaciones temporales del retardo troposférico, producidas por cambios en las condiciones meteorológicas sobre la estación a lo largo del tiempo.

Las ambigüedades fueron estimadas como números reales debido a que en primer lugar las sesiones fueron en general de duración mayor que seis horas por lo que no era esperable una mejoría significativa en los resultados si se estimaban estas incógnitas como enteros como se mencionó en §2.2.4. En segundo lugar, los vectores fueron en general de cientos y hasta miles de kilómetros de longitud, lo que dificulta en gran medida la resolución de ambigüedades por los efectos de la ionosfera. Finalmente, el hecho de contar con receptores que en su mayoría cuadraban la señal de L_2 hizo que el ruido medio de las observaciones fuera suficientemente alto como para hacer extremadamente dificultosa la resolución de las ambigüedades *widelane* y *narrowlane*.

En el pre procesamiento, la tarea más delicada y laboriosa fue la detección y reparación de ciclos perdidos, ya que a pesar de que el software posee un módulo especializado en esta tarea, en muchos casos hubo problemas que obligaron a realizar un procesamiento vector por vector, marcando observaciones y definiendo nuevas ambigüedades en forma manual según lo observado en los residuos de un cálculo preliminar del vector. Estas dificultades se agudizaron particularmente en algunos días de 1993, al punto que debieron eliminarse las sesiones de tres de ellos por ser imposible obtener soluciones satisfactorias. Ningún punto de la red fue perdido por esa causa ya que todos habían sido ocupados en otras sesiones. En el caso de las vinculaciones de los puntos LPGS, CRIC, UNSA e IGUA y las

campañas de control final de la red, el pre procesamiento tuvo menos dificultades pero se utilizó la misma metodología para resolver los problemas que se presentaron. Se puede decir que más del 70% del tiempo que demandó el cálculo de POSGAR'98 fue empleado en el pre procesamiento de las observaciones de fase. En el Anexo IV se incluyen los resultados y elementos de análisis generados durante esta etapa del cálculo.

Luego del pre proceso de fase, las sesiones diarias fueron calculadas en forma casi libre, esto es aplicando pesos bajos a las coordenadas iniciales de las estaciones involucradas. En estas condiciones se eliminaron las ambigüedades y se guardaron las ecuaciones normales. Seguidamente se obtuvo una solución casi libre de la red completa, en la que el sistema de referencia quedó definido sólo débilmente por las órbitas. Esta solución combinada fue utilizada para controlar de calidad de los resultados hasta allí obtenidos por comparación con las sesiones individuales. En el caso de las campañas de control, las soluciones libres combinadas fueron consideradas finales. Tanto las soluciones individuales de las sesiones como su comparación con la combinación libre constituyen el control último del pre procesamiento de fase.

En el anexo IV se incluyeron todas las salidas del cálculo por sesión al finalizar del pre procesamiento. En esta instancia, el parámetro más importante a controlar fue la estimación a posteriori del error de la observación de simples diferencias, que fue considerada aceptable de encontrarse en el orden o menor que 6 mm ya que se consideró a las observaciones de las campañas de 1993 y 1994 con una desviación estándar a priori de 4 mm en las observaciones de fase.

4.5.4 Introducción del sistema de referencia

El sistema de referencia que materializa POSGAR'98 es el ITRS. Se accede a él a través las coordenadas del marco de referencia SIRGAS'95, que a su vez densifica al marco ITRF94 en América del Sur [SIRGAS Project Committee, 1997]. Las coordenadas se encuentran referidas a la época 1995.4. Esta elección respetó lo acordado con el resto de los países sudamericanos en el marco del proyecto SIRGAS con el fin de garantizar la máxima compatibilidad posible de POSGAR'98 con los marcos de referencia de los países de la región una vez que ellos adopten el marco SIRGAS95. Se utilizaron para la

vinculación la totalidad de los puntos SIRGAS en territorio argentino a los que se sumó la estación IGS SANT (Santiago de Chile).

Para el establecimiento del sistema de referencia en el cálculo se siguió el procedimiento que se esquematiza en la figura 4.4. Se realizó primero el cálculo de las vinculaciones de

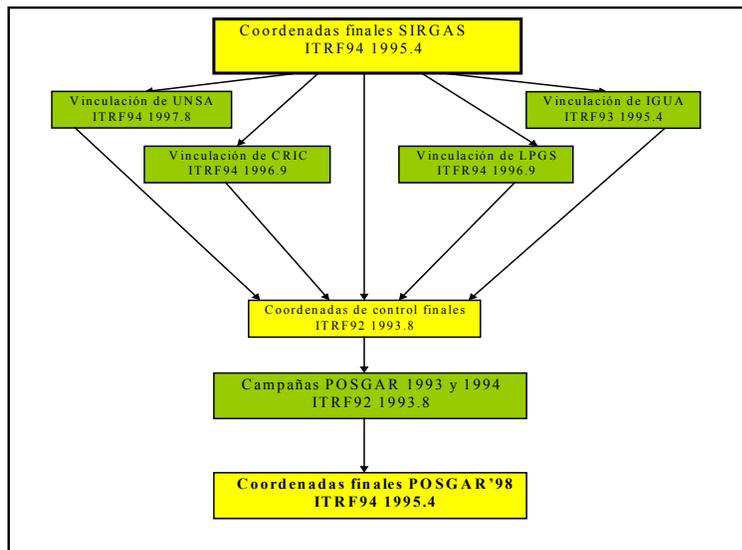


Figura 4.4: Establecimiento del sistema de referencia en el cálculo de POSGAR'98

los puntos SIRGAS no pertenecientes a la red POSGAR. En cada una de las campañas se transformaron las coordenadas SIRGAS a la época central de las observaciones. Una vez hecho esto, se calculó cada vinculación. Luego, las coordenadas de todos los puntos vinculados directamente a SIRGAS fueron llevadas a la época central de observaciones de las campañas 1993-1994. Esto es 1993.8. Además, dado que las efemérides precisas disponibles para 1993-1994 se refieren al marco de referencia ITRF92, se debió finalmente transformar las coordenadas de control a ese marco mediante parámetros producidos por el IERS (Se utilizó una compilación realizada por [Nash et al., 1995]). Llegado este punto, se acumularon las ecuaciones normales de todas las sesiones de 1993-1994 y se calculó la red completa. El ajuste final se realizó asignando pesos a las coordenadas de los puntos SIRGAS comunes a POSGAR. Se utilizaron también las coordenadas surgidas de las vinculaciones de los puntos CRIC, IGUA, LPGA y UNSA. La metodología para seleccionar los pesos correctos fue la descrita en §3.5. La distribución de los puntos de control disponibles para realizar el cálculo final, identificados los SIRGAS con rótulos rojos y los vinculados directamente a ellos con vectores amarillos, puede verse en la figura 4.3. Las coordenadas resultantes del ajuste, fueron transformadas finalmente al sistema ITRF94 época 1995.4, lo que constituye el resultado final del cálculo. Considerando la

calidad superior de las coordenadas SIRGAS y vinculaciones SIRGAS-POSGAR; en el listado final de coordenadas (Anexo I) estos puntos aparecen con sus coordenadas y errores originales en lugar de los que resultan del ajuste.

Las transformaciones de época se realizaron utilizando el modelo geofísico NNR NUVEL1A [De Mets et al., 1994] para todos los puntos excepto en el caso de SANT, en el que se utilizaron las velocidades publicadas en la definición del marco ITRF94 [Boucher et al., 1996b] ya que se sabe que ese punto se encuentra en una zona de intensa deformación debida a la subducción de la placa de Nazca y esto no está contemplado por el modelo NNR NUVEL1A.

4.5.5 Resultados

Acuerdo interno

Se analizó la coherencia de la solución final respecto de cada una de las 66 sesiones calculadas. Para ello se determinaron transformaciones de tres parámetros entre ellas. El análisis se limitó a traslaciones porque en general cada sesión abarca una región de pocos cientos de km para la que pequeñas diferencias de orientación de la solución final respecto

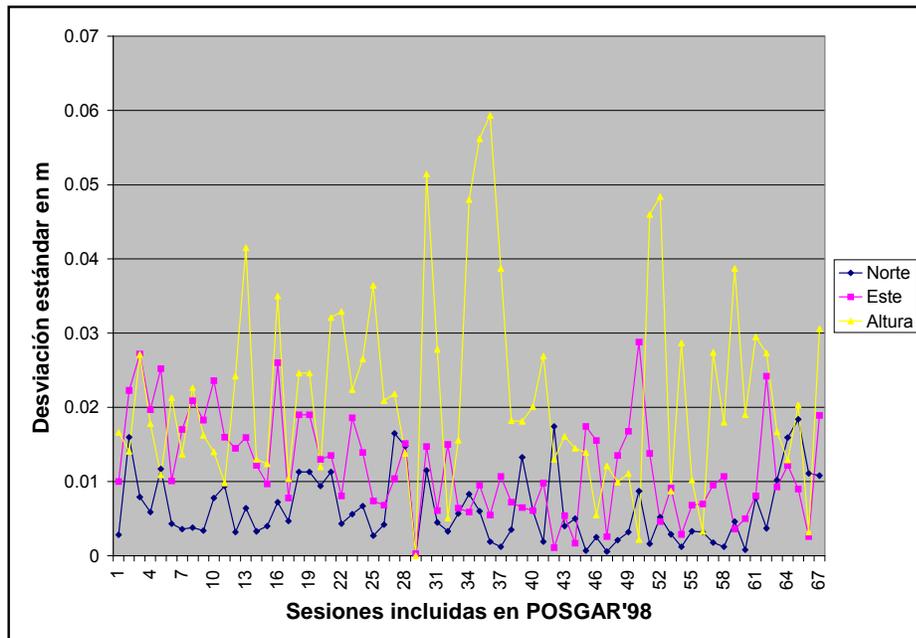


Figura 4.5: Repetibilidad de las coordenadas de POSGAR'98 a través de las desviaciones estándar de los residuos en las direcciones Norte, Este y Altura

de la de cada sesión no son significativas. Las cantidades de interés en este análisis son los residuos de la transformación estimada para cada estación y en cada dirección: Norte, Este y Altura. En la figura 4.5 pueden verse las desviaciones estándar de los residuos para cada sesión y en cada dirección. Se ve allí que las mayores diferencias se presentan en la altura, para la cual en ningún caso se tienen valores por encima de 8 cm. Se ve también que para la coordenada Este el acuerdo entre las sesiones y la solución final es mejor que 3 cm y en la dirección Norte, es mejor que 2 cm.

También puede obtenerse una medida del acuerdo interno de la red calculando la repetibilidad de las coordenadas de los puntos que han sido ocupados al menos dos veces, condición que cumple la mayoría de los puntos POSGAR.

El resultado puede verse en la figura 4.6. Allí se muestran las desviaciones estándar de las coordenadas calculadas para las direcciones Norte, Este y Altura, de cada estación. Se ve que para la altura, casi la totalidad de los casos se encuentran por debajo de los 5 cm. Para la coordenada Este la repetibilidad es mejor que 4 cm, y en la coordenada Norte prácticamente todos los valores son menores que 2 cm.

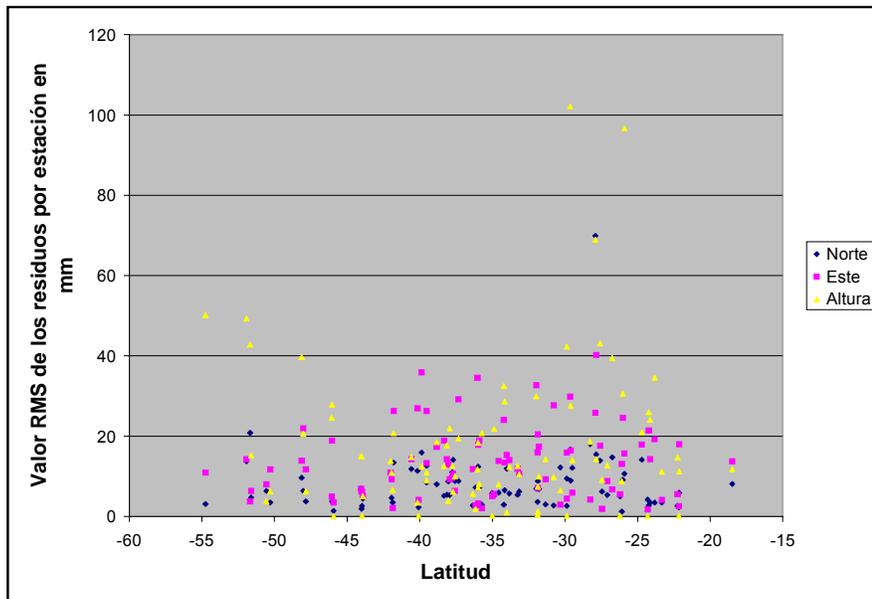


Figura 4.6: Desviaciones estándar de transformaciones de tres parámetros entre las soluciones por sesión y la que resulta de la combinación de todas. Se discrimina por sesión y por componente

Acuerdo externo

Se comparan aquí dos soluciones de la red POSGAR. La primera surgió de aplicar pesos muy bajos a las coordenadas de control. Esto permitió obtener una solución casi libre donde el sistema de referencia fue definido prácticamente por las órbitas. La segunda solución se obtuvo fijando todos los puntos de control, esto es los siete puntos SIRGAS comunes con POSGAR más los vinculados a los cuatro puntos SIRGAS restantes. La comparación de estas dos opciones extremas para el ajuste de la red permiten ver las inconsistencias entre las coordenadas de control que se están utilizando y la red calculada a fin de detectar problemas.

En la figura 4.7 se muestran los residuos de una transformación de siete parámetros entre estas dos soluciones discriminados en latitud, longitud y altura y ordenados por la latitud de la estación.

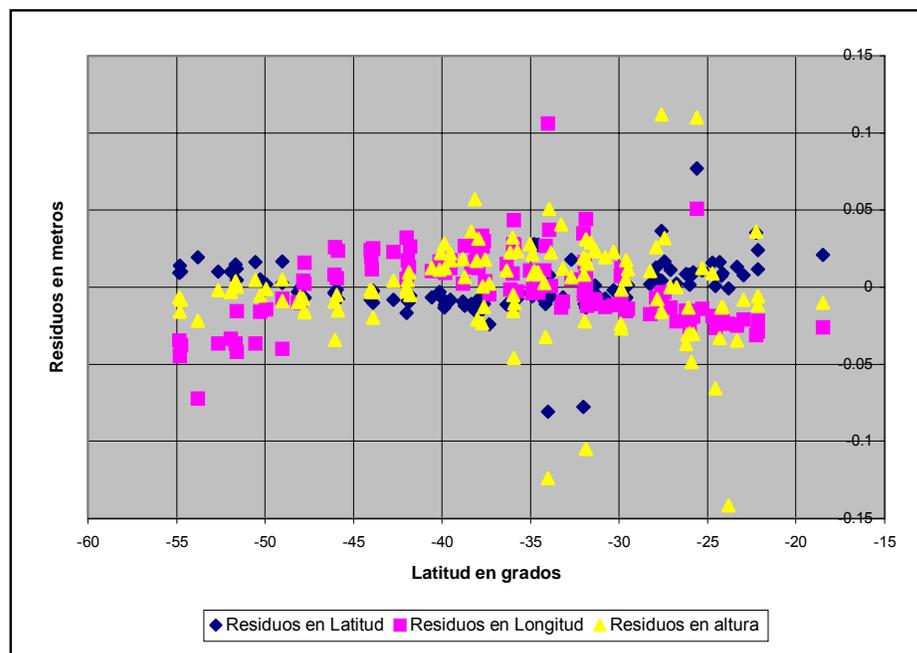


Figura 4.7: Residuos de una transformación de 7 parámetros entre solución libre de POSGAR'98 y otra obtenida de fijar todos los puntos de control disponibles

En la solución fija se han tomado 17 puntos de control conformados por los puntos SIRGAS y los resultados de las vinculaciones. Se ve allí que el residuo máximo es menor que 15 cm y que muy pocos puntos tienen residuos mayores que 5 cm. Los pocos puntos que muestran residuos muy por encima de los 5 cm pertenecen a las campañas de vinculación de las estaciones IGUA y UNSA. Se revisaron los cálculos correspondientes y

finalmente se optó por prescindir de ellos como control en el ajuste final. Esto no implica perder la conexión a los puntos SIRGAS mencionados ya que en ambos casos existe al menos otro punto de vinculación que sí fue utilizado. Si restringimos ahora la comparación a los puntos de control excluyendo el grupo con problemas, con lo que quedan trece puntos con una buena distribución en el territorio (ver figura 4.3), los residuos después de una transformación de siete parámetros quedan como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Residuos de una transformación de 7 parámetros entre la solución libre de POSGAR'98 y trece puntos de control.

Punto	Latitud	Longitud	Altura
BSON	0.0185	0.0113	0.0060
LOTE	0.0096	0.0151	-0.0635
MORR	0.0078	-0.0130	-0.0259
UPSA	-0.0148	0.0062	0.0190
RBLS	-0.0119	-0.0022	-0.0259
LMAS	-0.0085	-0.0341	0.0347
SANA	0.0260	-0.0153	-0.0064
IGZU	0.0071	0.0203	0.0492
IGM0	-0.0366	-0.0039	-0.0283
L10B	0.0017	0.0109	0.0447
EARG	-0.0037	-0.0287	0.0163
PRDT	-0.0092	0.0411	-0.0350
SANT	0.0125	-0.0089	0.0152
RMS	0.0165	0.0206	0.0341
RMS Global de la transformación:			0.0264

Este fue el conjunto final de puntos de control utilizados para el ajuste final de la red. La solución final elegida constituye un punto intermedio entre las dos comparadas en la figura 4.7. En el ajuste final no se fijaron los puntos de control. En el caso de los puntos SIRGAS, se utilizaron los errores de los puntos publicados en el informe final del cálculo [SIRGAS Project Committee, 1997]. Las coordenadas de los puntos vinculados directamente a SIRGAS se ingresaron en el ajuste con los errores resultantes de dichas vinculaciones. Las coordenadas finales y sus desviaciones estándar para todos los puntos que conforman POSGAR'98 se encuentran listados en el anexo I.

Comparación con observaciones externas

Se muestra a continuación el resultado de los controles realizados sobre la red con observaciones independientes mencionada en §4.5.2. Se ven en la tabla 4.3 los residuos de una transformación de 7 parámetros entre la solución final de POSGAR'98 y una solución

libre de la red de control calculada a partir de las observaciones cedidas por el proyecto Andes Centrales.

La red usada para el control incluye catorce puntos bien distribuidos en el territorio, desde Tierra del Fuego hasta la frontera con Bolivia y desde Buenos Aires hasta la Cordillera de los Andes. Se ve que los residuos no superan los 6 cm en ningún caso, siendo las dispersiones en las tres componentes inferiores a 2.5 cm.

Punto	Latitud (m)	Longitud (m)	Altura (m)
ADLS	-0.0051	-0.0166	-0.0116
CENT	0.0031	-0.0015	-0.0275
CERE	-0.0196	0.0304	0.0326
CORR	0.0002	-0.0101	0.0034
LOTE	0.0209	0.0009	0.0565
LPGS	0.0289	0.0269	0.0083
LVLE	-0.0064	0.0286	-0.0181
OLCP	-0.0149	0.0043	-0.0234
PALO	0.0001	-0.0272	0.0118
RIOG	-0.0011	-0.0151	-0.0363
TNDL	-0.0144	0.0003	-0.0046
TRES	-0.0019	-0.0084	0.0060
YAV1	0.0052	-0.0119	-0.0072
ZAPL	0.0103	-0.0021	0.0102
RMS	0.0133	0.0176	0.0245
RMS global de la transformación: 0.0201 m			

Tabla 4.3: Residuos de una transformación de 7 parámetros entre la solución libre de POSGAR'98 y la solución libre de la red de control

Se compararon también las coordenadas de cuatro puntos de la provincia de Neuquén. Los residuos que se muestran en la tabla 4.4 provienen de una transformación de tres parámetros entre la solución de la red de control y la solución libre de POSGAR'98.

Punto	Latitud	Longitud	Altura
CHCA	0.0006	-0.0067	-0.0454
TRDL	-0.0064	-0.0161	0.0183
PICU	-0.0048	0.0092	0.0135
MRTN	0.0112	0.0135	0.0129
RMS	0.0080	0.0138	0.0302
RMS global de la transformación: 0.0197 m			

Tabla 4.4: Residuos de una transformación de tres parámetros entre la solución libre de la red local y la solución libre de POSGAR'98

Se ve aquí que los residuos entre las dos redes tienen el mismo orden de magnitud que en el caso anterior.

Estos resultados indican una coherencia entre puntos de la red de muy pocos centímetros en las tres coordenadas. En el primer caso el área analizada abarca todo el territorio nacional. En el segundo caso, la comparación se extiende dentro de la provincia de Neuquén solamente.

4.5.6 POSGAR'94 - POSGAR'98, una transición notoria en ciertos casos prácticos

Diferencias entre POSGAR'94 y POSGAR'98

A diferencia de lo que sucede con Inchauspe'69, la transición del uso de POSGAR'94 a POSGAR'98 resultaría muy poco traumática. En efecto, las diferencias entre las dos materializaciones son del orden del error de geocentricidad de POSGAR'94. Esto fue mostrado ya en la tabla 4.1 por lo que sabemos que es del orden de 1 metro. En la figura 4.8 se muestran las diferencias crudas entre las coordenadas de los dos cálculos de POSGAR.

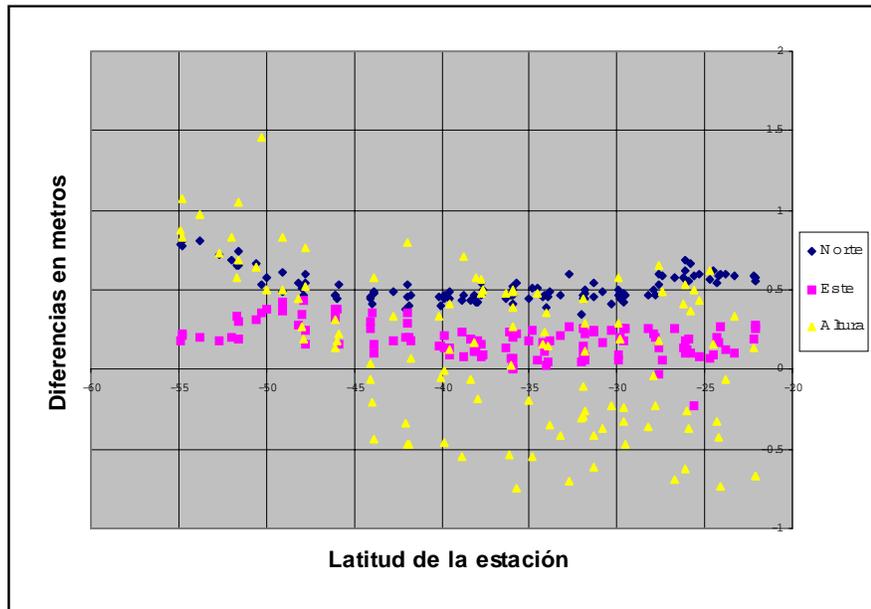


Figura 4.8: Diferencias entre coordenadas POSGAR'94 y POSGAR'98

Se ve que en las direcciones Norte y Este hay diferencias sistemáticas del orden de 50 cm y 25 cm respectivamente. Para la dirección Norte se observa una dispersión que está por debajo de 20 cm. En la dirección Este la dispersión alcanza valores de entre 20 y 30 cm. Las diferencias en las alturas son bastante mayores alcanzando un máximo levemente inferior que 1,5 metros y presentan una dispersión mucho mayor que las otras dos

componentes. Debe notarse que las coordenadas de POSGAR '98 y en particular la altura han sido controladas con redes independientes de muy buena calidad y los residuos en ningún caso superaron los 6 cm como se mostró en las tablas 4.3 y 4.4. En consecuencia, la dispersión de las diferencias de coordenadas y en especial de las alturas entre POSGAR '94 y POSGAR '98 se debe a la inferior calidad del primer marco respecto del segundo. Esto se muestra con más detalle a continuación y es corroborado por la comparación de ambos marcos de referencia con resultados de otras redes geodésicas de buena calidad.

El control geodésico mediante los marcos de referencia POSGAR '94 y POSGAR '98

A fin de evaluar la diferencia entre utilizar uno u otro marco como control para una red geodésica de alta precisión, se utilizaron los resultados de las redes presentadas antes en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4. A esta información se agregó la solución final de una red que es parte del Proyecto de Asistencia al Sector Minero Argentino (PASMA), con períodos de observación de más de 10 horas y que fue procesada con el software científico Geonap [GEO++®, 1994][Brunini et al., 1997b]. También se contó con los resultados de la Red Geodésica de Alta Precisión de la Provincia de Buenos Aires, con períodos de observación entre dos y tres horas, vectores de pocas decenas de km, que fue procesada con GPSurvey y compensada con WAVE [MOSP-FCAG, 1998]. Se compararon sucesivamente las cinco redes mencionadas con POSGAR '94 y POSGAR '98 mediante sus puntos comunes. Se utilizaron transformaciones de similaridad a fin de absorber las diferencias sistemáticas debidas a cualquier diferencia entre los sistemas de referencia que materializan. En la tabla 4.5 se resumen las características de los residuos de las transformaciones realizadas.

		RMS: N	RMS: E	RMS: h	Resmax N	Resmax E	Resmax h
Neuquén 4 puntos 3 Parám.	PGA '94	0.0083	0.0328	0.1570	0.0104	-0.0441	-0.1946
	PGA '98	0.0065	0.0105	0.0332	0.0074	-0.0116	-0.0491
	Cociente	1.3	3.2	4.7	1.4	3.8	4.0
Red de BA 9 puntos 3 parám.	PGA '94	0.0632	0.0430	0.1987	0.1261	0.0714	0.3404
	PGA '98	0.0325	0.0358	0.0461	0.0568	0.0795	-0.0814
	Cociente	1.9	1.2	4.3	2.2	0.9	4.2
PASMA 19 puntos 7 Parám	PGA '94	0.0540	0.0839	0.1681	-0.0957	-0.1771	-0.3211
	PGA '98	0.0205	0.0387	0.0437	-0.0361	-0.0907	0.0943
	Cociente	2.6	2.2	3.8	2.7	2.0	3.40
Test CAP 10 puntos 7 Parám.	PGA '94	0.0377	0.0661	0.0977	0.0565	-0.1271	0.1641
	PGA '98	0.0133	0.0176	0.0245	0.0289	0.0304	0.0565
	Cociente	2.8	3.8	4.0	2.0	4.2	2.9
SIRGAS 11 puntos 7 parám.	PGA '94	0.0745	0.1265	0.2679	-0.1286	-0.1891	0.4221
	PGA '98	0.0176	0.0277	0.0274	-0.0410	0.0589	0.0439
	Cociente	4.2	4.6	9.8	3.1	3.2	9.6

Tabla 4.5: POSGAR '94 y POSGAR '98 como control de redes extensas y precisas

Se ve en general un mejor acuerdo de las distintas redes con POSGAR'98. La diferencia respecto del control con POSGAR'94 es variable dependiendo del tamaño de la red de que se trate: En la red ubicada en Neuquén, la menos extendida, se ve que las diferencias de precisión son muy poco significativas en latitud y longitud, no así en la altura en que sí son importantes. Para la red de la Provincia de Buenos Aires, algo mayor que la red de Neuquén, se ve que el control con POSGAR'98 arroja una mejoría en el acuerdo que resulta leve en latitud y longitud, pero es bastante más marcada en altura, en que los residuos se reducen a la cuarta parte respecto del control con POSGAR'94. En el caso de los 19 puntos de PASMA, que abarcan las provincias de Salta, Catamarca, La Rioja y San Juan, se ve que el acuerdo mejora para POSGAR'98 en un factor alrededor de dos para latitud y longitud llegando a cuatro en la altura. La siguiente red en orden de extensión es la de los puntos de control de CAP. En este caso se ven mejorías para POSGAR'98 en factores que van de entre 3 y 4. Por último, para el caso de once puntos de control SIRGAS comunes a POSGAR'98 y POSGAR'94, distribuidos por todo el territorio, se ve que la mejoría de POSGAR'98 en precisión para latitud y longitud se mantienen en un factor algo mayor que cuatro, no así para la altura, que alcanza un factor cercano a diez.

4.6 Conclusiones

Se ha presentado en el presente capítulo el nuevo marco de referencia POSGAR'98.

Primero se presentaron los antecedentes y el desarrollo del anterior sistema de referencia del país, Campo Inchauspe'69. Se vió que su marco de referencia tiene una exactitud para los vectores de entre 3 y 10 ppm y un inexactitud en la materialización del geocentro de aproximadamente 200 m respecto del ITRS.

En segundo lugar se describió el actual marco de referencia argentino POSGAR'94, habiéndose mostrado que tiene una precisión de 1 ppm y que define al geocentro con un error de aproximadamente un metro.

Se analizó en tercer lugar el problema de transformar coordenadas desde Inchauspe'69 a POSGAR'94. La técnica presentada, desarrollada por [Brunini et al., 1996] para resolverlo permite absorber parte de los errores sistemáticos de Inchauspe'69, por lo que la

transformación a POSGAR'94 resultante tiene errores entre 1.5 m (1σ), frente a los 5 m (1σ) de error que tiene la transformación de la DMA.

A continuación se describió el cálculo del nuevo marco de referencia POSGAR'98 y se presentaron los resultados finales. A partir de los índices de calidad disponibles, esto es, las comparaciones con las coordenadas de control SIRGAS y sus vinculaciones, unidas a las comparaciones con las observaciones independientes ya descriptas, que implican el control de la red sobre aproximadamente el 20% de sus puntos, puede decirse que el nuevo marco de referencia POSGAR'98 materializa al Sistema de Referencia Terrestre Internacional con un error medio cuadrático (1σ) de menos que 2 cm en latitud y longitud y de menos que 3 cm (1σ) en altura elipsoidal.

También pudo verse que los cambios que se producirían al pasar de POSGAR'94 a POSGAR'98 son en latitud y longitud inferiores a 0,80 m siendo la componente más afectada la altura, que de todas maneras presenta diferencias siempre inferiores a 1,5 m. Esto indica que las diferencias absolutas entre las dos materializaciones de POSGAR presentadas son apreciables solamente en las aplicaciones de posicionamiento submétrico.

Las comparaciones de POSGAR'98 con 18 puntos de control pertenecientes a dos redes de muy alta calidad permiten afirmar que la dispersión observada en las diferencias de coordenadas entre las dos materializaciones de POSGAR es debida a los errores de POSGAR'94.

Al analizar las prestaciones de ambos marcos como redes de control geodésico se mostró que las distorsiones de POSGAR'94 en latitud y longitud son prácticamente despreciables en áreas menores que una provincia. Las distorsiones en altura de POSGAR'94 sin embargo son notables en todas las comparaciones realizadas por lo que se concluye que si se desea disponer de un control alta precisión en las tres coordenadas sería ventajoso usar el nuevo marco de referencia. En cambio, si se trabaja en áreas menores que la de una provincia y no se requieren altas precisiones para las alturas elipsoidales, no habrá mayor diferencia entre usar uno u otro marco de referencia como control en cuanto a las deformaciones que los puntos de control producen en la red de vectores al someterla a un ajuste.

En general se ve que el marco POSGAR'98 es más exacto que POSGAR'94 en factores que llegan a algo más que cuatro en latitud y longitud y hasta diez en altura elipsoidal.

Resta para el futuro el manejo de problemas que trascienden lo estrictamente técnico: en primer lugar, se deberá manejar adecuadamente la coexistencia en el país de sistemas de referencia de muy diferente calidad. Esto es evidentemente problemático al enfrentar POSGAR con Inchauspe'69 u otros antiguos sistemas locales.

Un segundo problema consiste en analizar la forma en que va a ser mantenida o mejorada la calidad del actual marco de referencia y cómo esos cambios serán transmitidos a los usuarios. Esto es evidentemente necesario si deseamos mantener una precisión y exactitud respecto de ITRF/SIRGAS del orden de pocos centímetros ya que estos valores se encuentran en el orden de magnitud de las deformaciones y desplazamientos de la corteza terrestre acumulados a lo largo de menos de una década.

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

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

Campaña	Estación	Receptor	Antena
SIRGAS			
	Red Ashtech	Ashtech Z-12	ASH700718 y 228
	Red Leica	SR299	LEISR299 INT
	Red Rogue	ROGUE	AOAD/M_T/_B/_R
COLLOC	Ídem SIRGAS	Ídem SIRGAS	Ídem SIRGAS
ALPEN'98			
	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
WETTZELL			
	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.

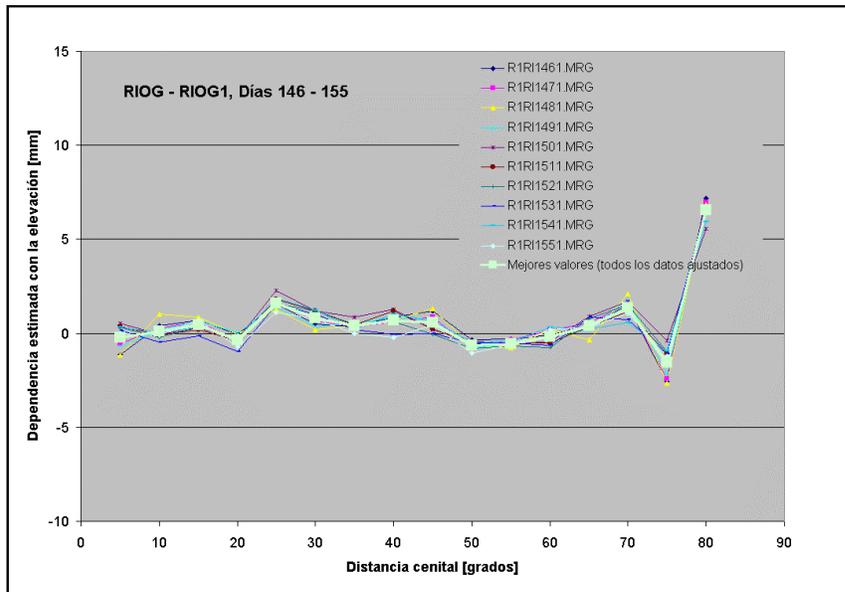


Figura 5.1: Dependencia de los residuos de dobles diferencias con la distancia cenital en un vector corto

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

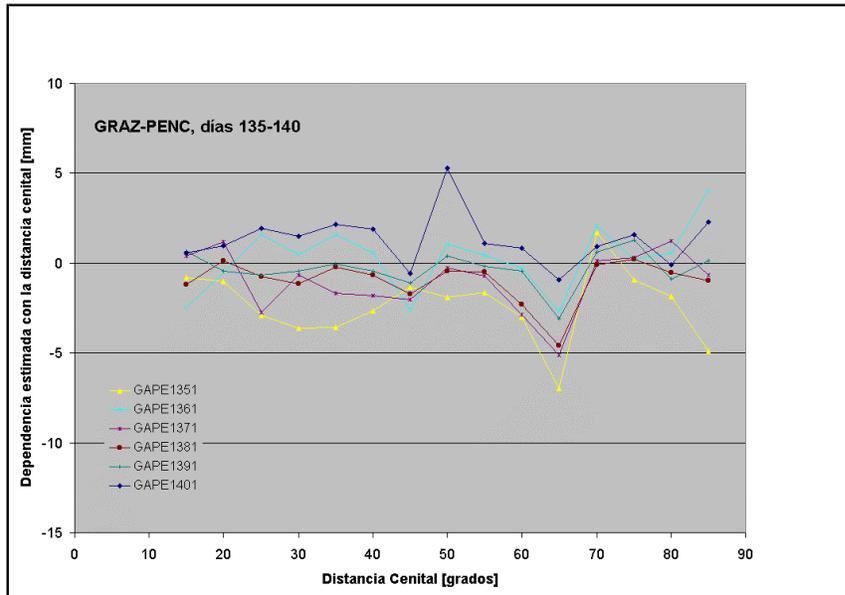


Figura 5.2: Dependencia de los residuos de dobles diferencias con la distancia cenital en un vector largo

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.

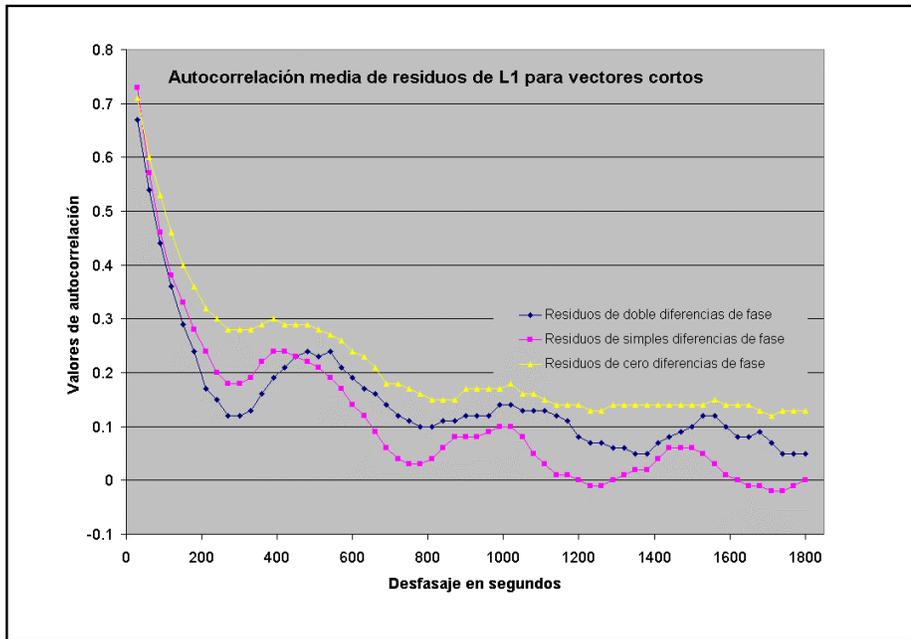


Figura 5.3: Autocorrelación para series de residuos en vectores cortos

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

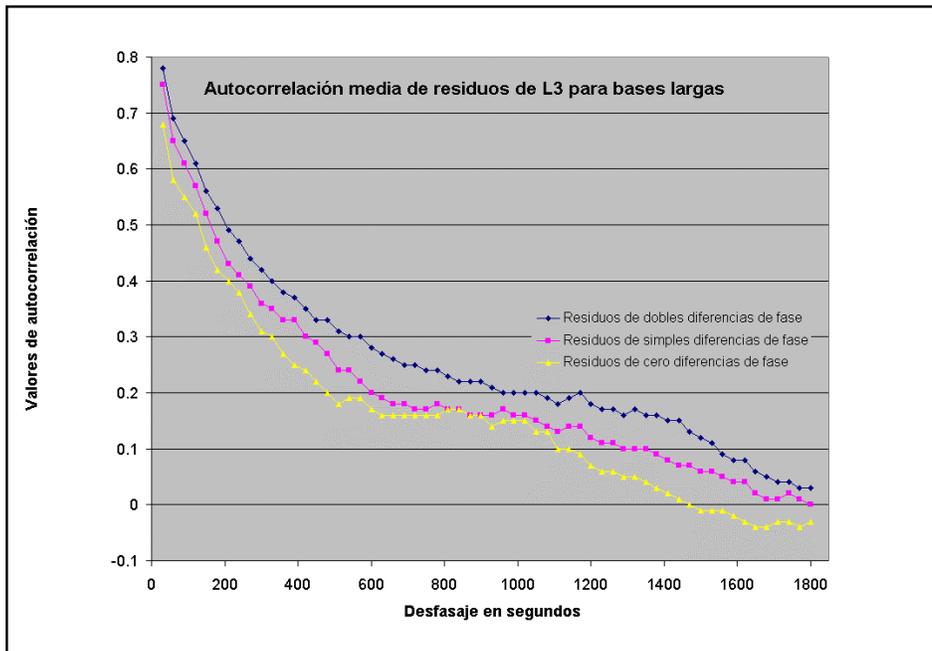


Figura 5.4: Autocorrelación para series de residuos en vectores largos

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.

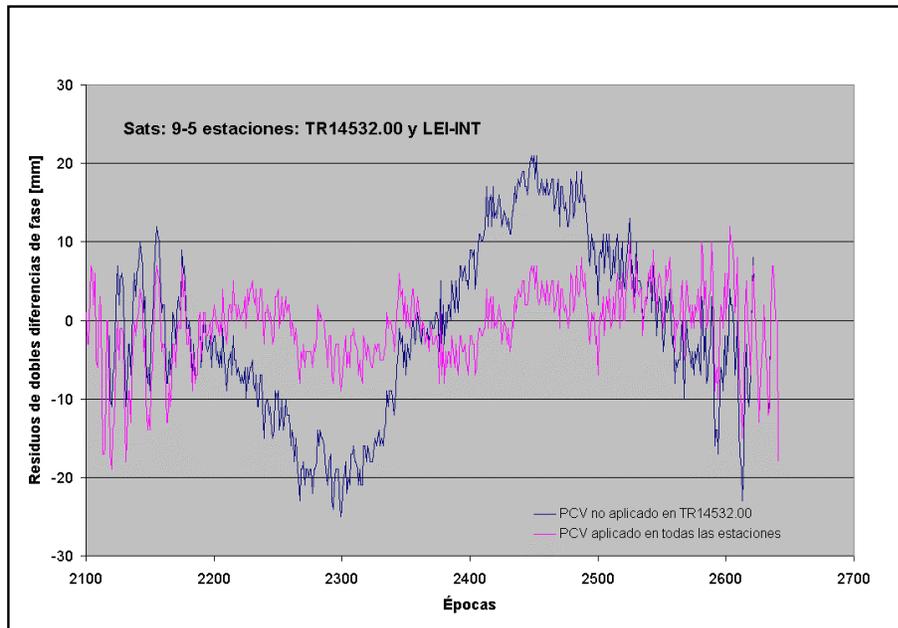


Figura 5.5: Residuos de dobles diferencias entre TR14532.00 y LEI-INT, satélites 5 y 9

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.

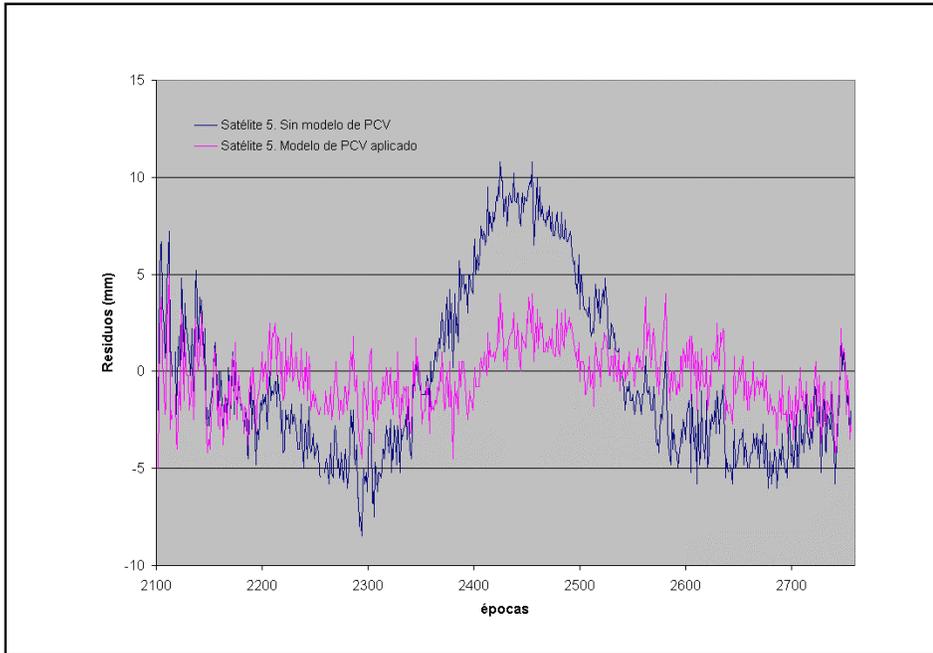


Figura 5.6: Residuos de cero diferencias para el satélite 5 en TRM14532.00

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

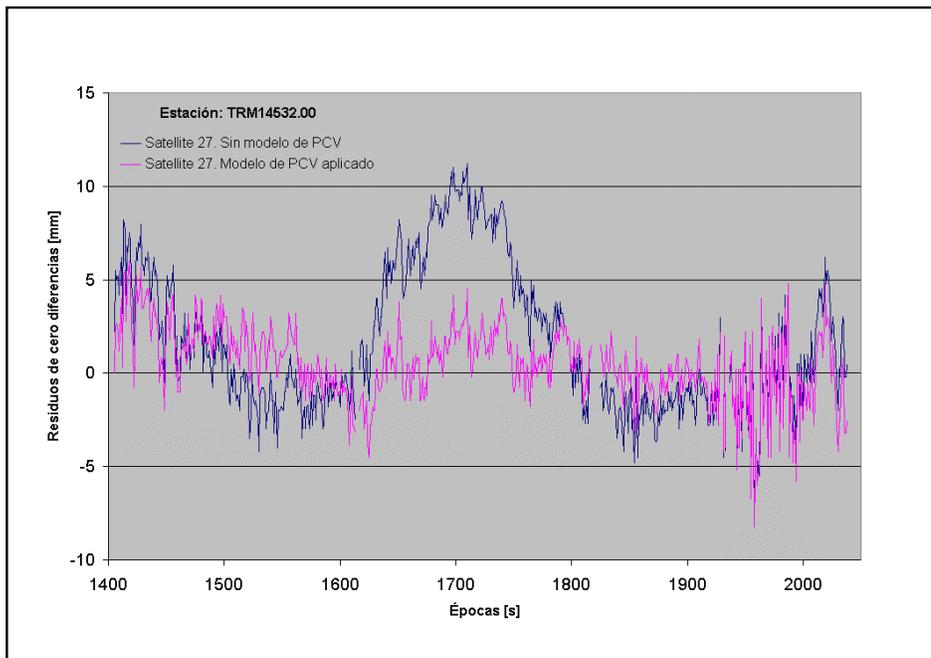


Figura 5.7: Residuos de cero diferencias para el satélite 27 en TRM14532.00

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.

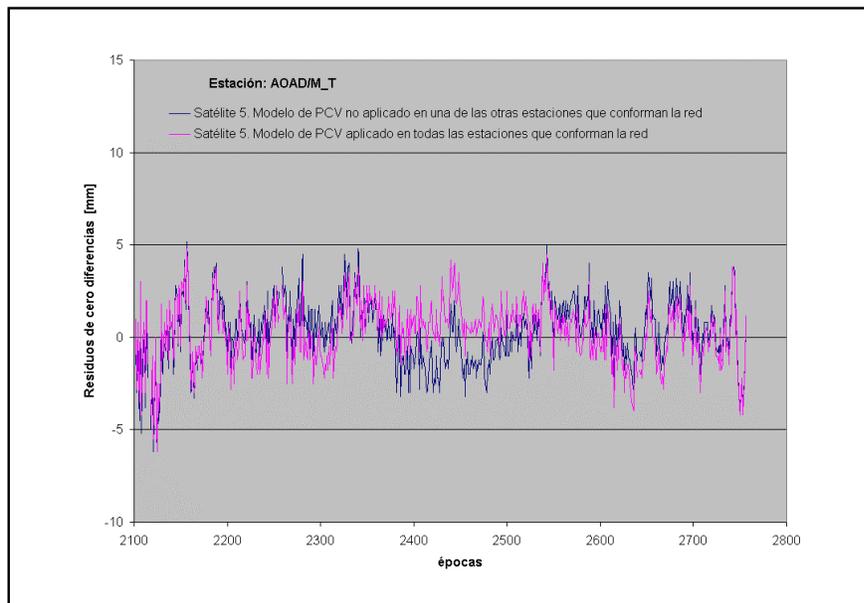


Figura 5.8: Residuos de cero diferencias respecto en AOAD/M_T para el satélite 5

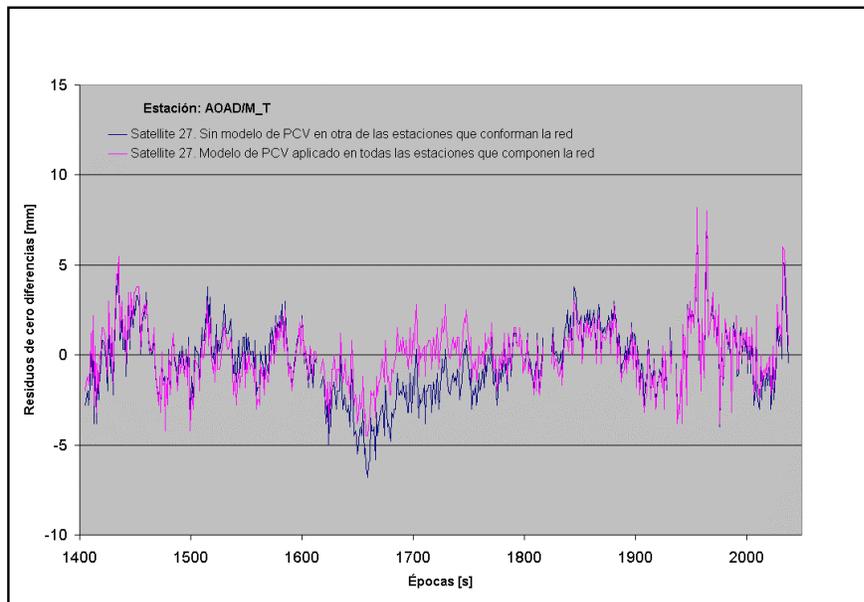


Figura 5.9: Residuos de cero diferencias respecto en AOAD/M_T para el satélite 27

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.

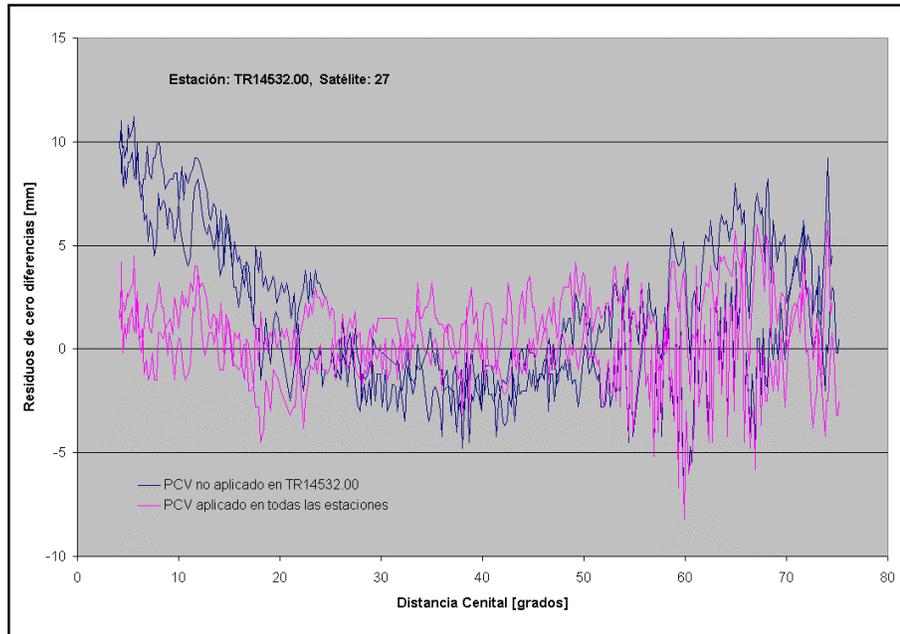


Figura 5.10: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en TRM14532.00 para el satélite 27

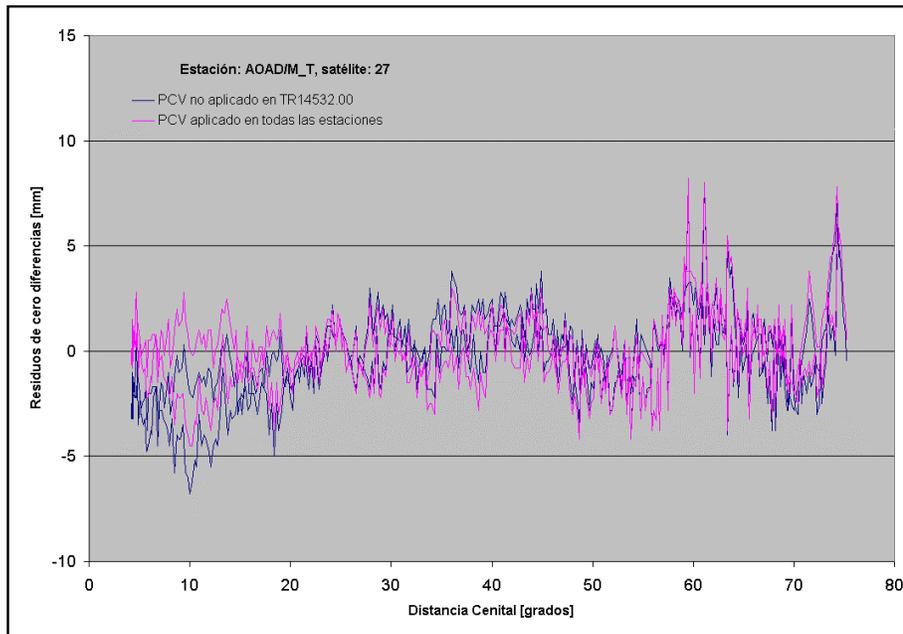


Figura 5.11: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en AOAD/M_T para el satélite 27

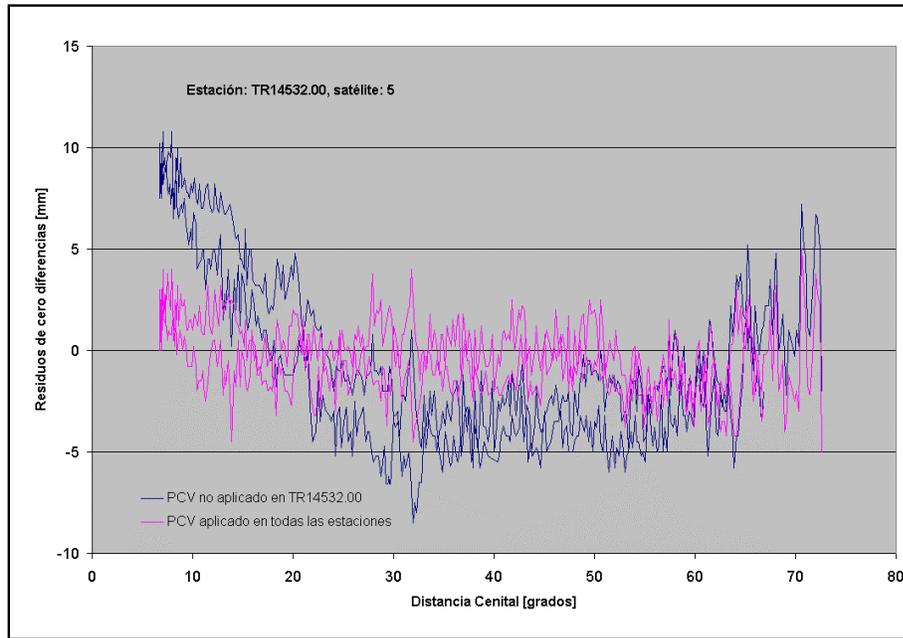


Figura 5.12: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en TRM14532.00 para el satélite 5

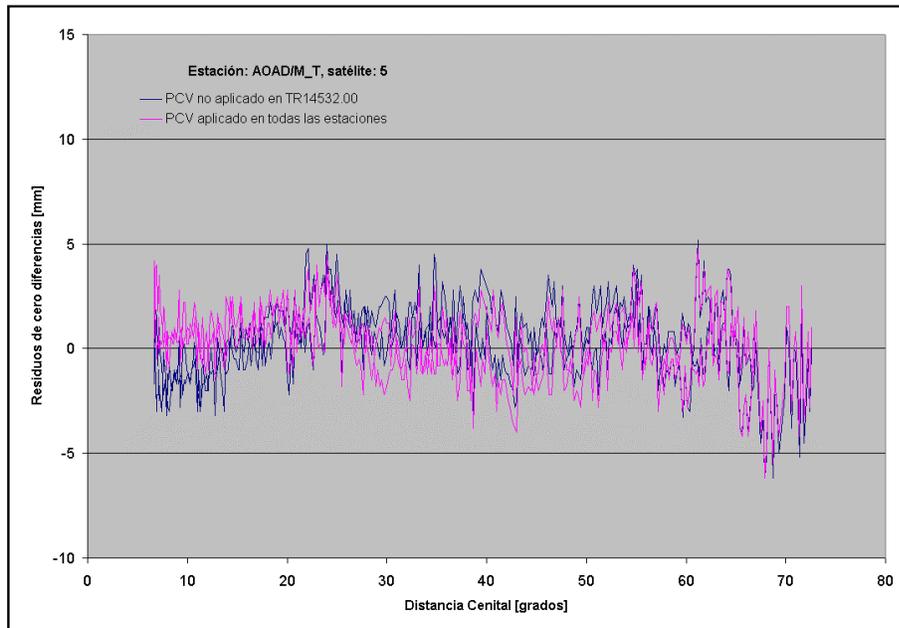


Figura 5.13: Residuos de cero diferencias respecto de la distancia cenital en AOAD/M_T para el satélite 5

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

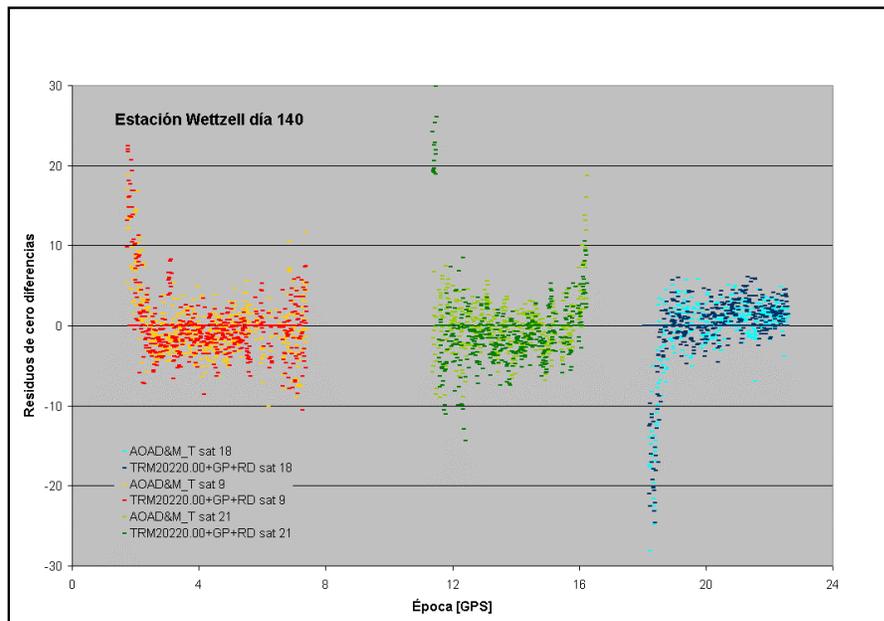


Figura 5.14: Residuos de cero diferencias (valores medios diarios sustraídos) estaciones TRM20220.00+GP+RD y AOAD/M_T (Wettzell), día 140

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.

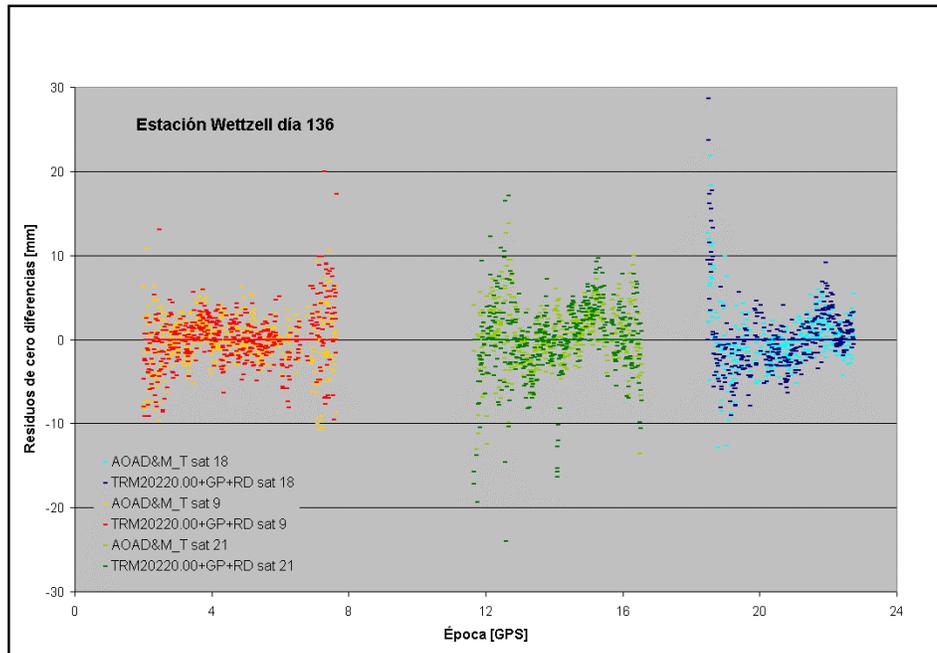


Figura 5.15: Residuos de cero diferencias (valores medios diarios sustraídos) estaciones TRM20220.00+GP+RD y AOAD/M_T (Wetzell), día 136

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

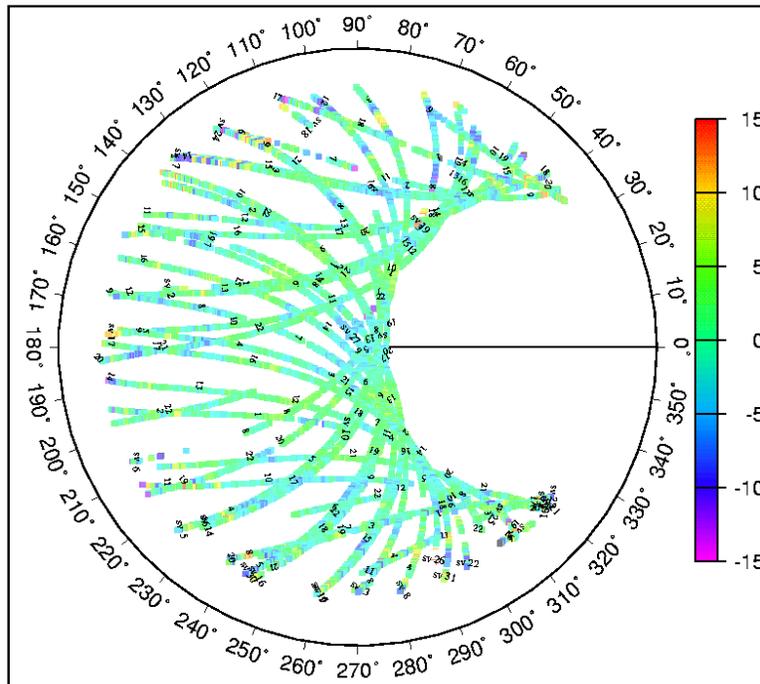


Figura 5.16: Residuos medios de cero diferencias para la estación AOAD/M_T (Wetzell)

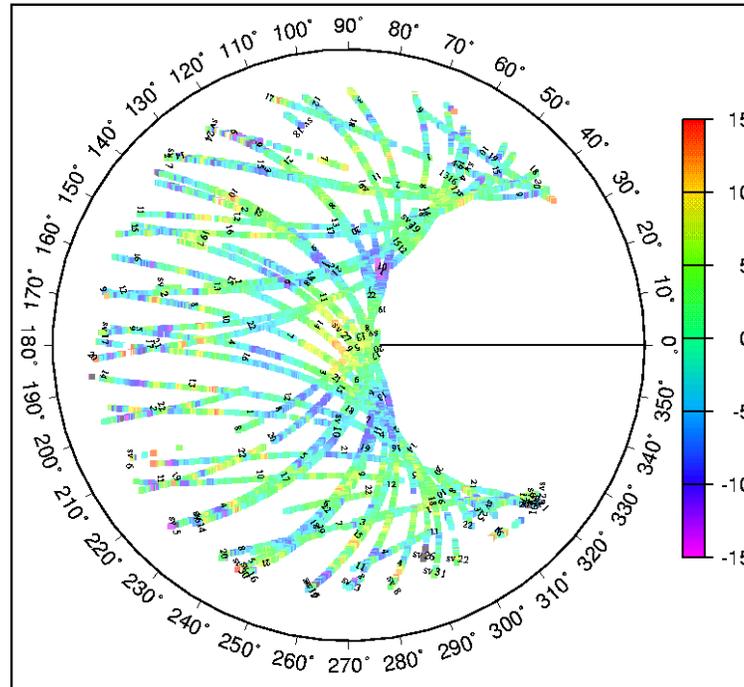


Figura 5.17: Residuos medios de cero diferencias para la estación TRM20220.00+GP+RD (Wetzell)

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.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1 El marco de referencia Posgar'98

La transición del sistema de referencia nacional Campo Inchauspe'69, materializado por la red geodésica homónima, al sistema WGS84 materializado por el marco de referencia POSGAR'94, constituyó un paso relevante en la evolución de la geodesia en la Argentina. A partir de la adopción de POSGAR'94 en 1997 [IGM, 1997], el país posee un marco de referencia compatible con los métodos de posicionamiento satelital. El principal obstáculo en el desarrollo de esta transición ha sido el cambio de aproximadamente 200 m que implica en las coordenadas.

El marco de referencia POSGAR'98, presentado en el capítulo 4 y los anexos I al V, constituye la densificación argentina del marco continental SIRGAS95, que a su vez lo es del marco ITRF94, de cobertura global. Su época de definición es 1995.4 como fuera propuesto en el proyecto SIRGAS [SIRGAS WGII, 1997] para asegurar la máxima compatibilidad de las redes geodésicas nacionales de Sudamérica. Se ha mostrado en §4.5.5, sobre la base de controles independientes realizados sobre una muestra de puntos de buena distribución, que POSGAR'98 materializa al sistema de referencia ITRS para la época 1995.4 con una exactitud media (1σ) del orden de dos centímetros en latitud y longitud y de tres centímetros en altura elipsoidal. Las indicaciones de exactitud obtenidas del cálculo mismo que se incluyen en §4.5.5 confirman lo anterior e implican que es posible extrapolar esta conclusión al resto de los puntos de la red. También se ha mostrado

que las diferencias en las coordenadas absolutas respecto de POSGAR'94 son de sólo pocas decenas de cm en latitud y longitud y hasta algo más que un metro en altura elipsoidal. Esto implica que el uso del nuevo marco requiere una transición bastante menos traumática que la ya vivida para el caso de POSGAR'94 dado que las diferencias son significativas sólo para un puñado de aplicaciones.

Se ha mostrado mediante ejemplos en §4.5.6 que entre las aplicaciones que se beneficiarían de poseer un control geodésico de mayor exactitud que POSGAR'94 se encuentra el establecimiento de redes geodésicas de control de alta precisión que abarcan áreas de tamaño mayor que una provincia. Especial mención debe hacerse del caso de las redes de control del proyecto PASMA: Estas abarcan grandes áreas de la mayoría de las provincias argentinas y la gerencia del proyecto ha manifestado la intención de ajustarlas conjuntamente. En un caso así, sería ventajoso llevar a cabo el ajuste general de la red utilizando POSGAR'98 como control, sin perjuicio de realizar luego una transformación de similitud a POSGAR'94 que es en definitiva el marco de referencia oficial del país. Otro caso en que la utilización POSGAR'98 es altamente recomendable es en la resolución de problemas de control geodésico en áreas compartidas por dos países, ya sea para el control de obras de ingeniería o bien para la demarcación de los límites internacionales mismos. En estos casos, el valor de POSGAR'98 se acentúa por el hecho de ser una densificación del marco de referencia sudamericano SIRGAS95, cuya utilización tiene amplio consenso por parte de las autoridades geodésicas y cartográficas en todo el continente como fuera mencionado en §1.7.

En definitiva, y como conclusión general, puede decirse que aún cuando pueda parecer poco práctico plantear un nuevo cambio en el marco de referencia del país para todas las aplicaciones, se debe señalar que hay en el presente problemas que requieren un control geodésico de mayor calidad y o mayor compatibilidad con los marcos de referencia de otros países. POSGAR'98 puede constituir una herramienta útil para la autoridad geodésica del país a fin de dar una respuesta adecuada a dicha clase de necesidades.

6.2 Análisis de residuos de observaciones GPS

Se implementó una técnica de análisis de residuos que logra separar las contribuciones individuales de satélites y estaciones involucrados en el ajuste de una red, a los residuos de

las dobles diferencias de fase. Se mostró que esta técnica permite separar efectos provocados por errores de modelo en estaciones individuales del orden de dos milímetros para el procesamiento con L_1 y del orden de cinco milímetros al analizar residuos del observable libre de ionosfera L_3 . Las posibles aplicaciones de esta técnica son múltiples:

Agrega una herramienta para el análisis de problemas en el procesamiento de redes geodésicas de alta precisión con el paquete Bernese GPS Software (BSW4.0). En ese sentido, los programas desarrollados se encuentran instalados junto a dicho software en la FCAG y pueden ser utilizados en el procesamiento de redes geodésicas con fines científicos.

Permite encarar el análisis de los varios efectos que aún degradan los resultados de GPS respecto de la precisión de la observación misma enfocándose al mejoramiento del modelo de las observaciones sin perder de vista su significación en el ajuste de las observaciones.

Se ha mostrado en el capítulo 5 que problemas como errores en los modelos de las variaciones en la posición de los centros de fase en las antenas GPS pueden ser identificados y separados con esta técnica. Por otra parte, se mostró que el estudio de efectos dependientes del sitio en redes regionales puede también ser abordado con este método.

Problemas de dinámica compleja como variaciones rápidas o con asimetría acimutal del retardo troposférico (gradientes troposféricos) o efectos de carga sobre las estaciones requerirán trabajo adicional a fin de lograr una mejor visualización de las variaciones temporales de los residuos. El carácter discontinuo del modelo troposférico implementado actualmente en el BSW4.0 implica un obstáculo en el desarrollo del análisis de los residuos. En ese sentido se podrían estudiar alternativas en el modelado de este retardo en el programa GPSEST, cuya estructura interna fuera explicada en §3.4.2, o fraccionar el análisis en el tiempo respetando los períodos de validez asignados a los parámetros de corrección troposférica estimados.

El proyecto SIRVEMAS [Kaniuth et al, 1999a] en que cooperan la FCAG y el DGFI desde hace dos años para el control de la definición del sistema de referencia vertical en Argentina, pone especial énfasis en la determinación de alturas muy exactas con GPS, por lo que constituye una buena oportunidad para aplicar las técnicas implementadas.

6.3 El futuro del marco de referencia terrestre en Argentina

El sistema de referencia terrestre ha evolucionado de estar definido localmente a ser global y estar materializado sobre la base de la cooperación internacional. También ha pasado de ser conocido y usado por un pequeño grupo de especialistas a difundirse y ser utilizado por un creciente número de usuarios en el ámbito de muy diversas disciplinas. Más aún, la reciente eliminación de la Disponibilidad Selectiva en los satélites GPS [IGS, 2000], el éxito de la implementación del sistema de posicionamiento ruso GLONASS en cuanto a su compatibilidad con GPS [Slater, 1999] y la reciente decisión de la Comunidad Europea de establecer el sistema de posicionamiento satelital GALILEO [Ashkenazi, 2000] hace previsible un mayor e irreversible aumento en el número de usuarios del sistema de referencia global.

Es claro que el sistema de referencia ya no es un producto local o regional, ni siquiera es nacional. Es una herramienta global. Pero su materialización en el país es un servicio estratégico que sí requiere la implementación de una política local de mantenimiento físico y matemático a mediano y largo plazo que contemple la formación de recursos humanos especializados.

El mantenimiento físico de redes de control densas es costoso y poco redituable en zonas despobladas. Por otra parte, los medios tecnológicos actuales permiten el desarrollo de servicios de estaciones GPS permanentes que con relativamente pocos puntos podrían cubrir la mayor parte de las necesidades de vinculación al sistema de referencia en las concentraciones urbanas. El proyecto RAMSAC [Lauría et al., 1998], en proceso de implementación por el IGM, es un importante paso en ese sentido. El mantenimiento matemático del sistema es más costoso aún que el físico por la necesaria inversión en capital humano que requiere, pero es mucho más redituable a mediano y largo plazo porque el conocimiento ayuda a lograr un mejor aprovechamiento de los recursos y a la generación de nuevos servicios y productos de alto valor agregado. Una posibilidad interesante para encarar esta tarea por parte de la autoridad geodésica y cartográfica nacional es el desarrollo de una fuerte vinculación con las universidades. En este sentido, la cooperación desarrollada entre el IGM y la UNLP a lo largo de este trabajo resulta un auspicioso antecedente. Otra posibilidad que debería ser aprovechada es la de aunar esfuerzos con universidades y autoridades geodésicas de los demás países de la región a fin de, por ejemplo, conformar una organización que logre la capacidad de mantener el marco

SIRGAS y sus densificaciones nacionales. A esto podrían en el futuro sumarse otras actividades relacionadas como las que realizan los centros asociados al IGS [IGS, 1999a] para contribuir al mantenimiento del ITRF. Este bien podría ser el futuro del proyecto SIRGAS.

Referencias citadas en el texto

- Altamimi Z., Combinaison de techniques spatiales pour la détermination et la maintenance d'un système de référence terrestre centimétrique, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, 1990.
- Arias E., M. Feissel and J. Lestrade, An extragalactic celestial reference frame consistent with the BIH terrestrial system, BIH annual report for 1987, pp. DD-113-DD-121, 1988.
- Azkenazi V., Galileo Challenge and opportunity, Galileo's World, Vol. 1 No. 1, Advanstar Communications, pp. 42-44, 2000.
- Baby H., P. Gole, J. Lavergnat, A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements, Radio Science (23), 6, pp. 1023-1038, 1988.
- Bar Sever J., P. Kroger, A. Borjesson, Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver, Journ. Geophys. Res., (103) No. B3 pp. 5019-5035, 1998.
- Beutler G., GPS Satellite Orbits, Capítulo 2 en GPS for geodesy, Kleusberg A. y P. Teunissen (Eds), Lecture notes in Earth Sciences No. 60, pp. 95-97, Springer-Verlag, 1996.
- Blewitt G., Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km, Journ. of Geophys. Research, (94) No. B8 pp. 10187-10203, 1989.
- Blewitt G., C. Boucher, R. Eanes, M. Feissel, M. Heflin, T. Herring, J. Kouba, C. Ma, H. Montag, J. Ray, P. Willis, IERS Working Group on the ITRF Datum, Interim Report, Jim Ray, Comunicación personal, 1997.
- Blewitt G., C. Boucher, R. Eanes, M. Feissel, M. Heflin, T. Herring, J. Kouba, C. Ma, H. Montag, J. Ray, P. Willis, IERS Working Group on the ITRF Datum, Final Report, <ftp://hpiers.fr/iers/itrf/ITRF-WG.Report>, 1999.
- Bock, Y., Reference Systems, Capítulo 1 en GPS for geodesy, Kleusberg A. y P. Teunissen (Eds), Lecture notes in Earth Sciences No. 60, pp. 1-36, Springer-Verlag, 1996.
- Boucher C., Z. Altamimi; International Terrestrial Reference Frame, GPS WORLD, september, pp. 71-74, 1996a.
- Boucher C., Z. Altamimi, M. Feissel, P. Sillard, Results and analysis of the ITRF94. IERS Paris, Technical Note No. 20, 1996b.
- Boucher C., Z. Altamimi, P. Sillard, Results and analysis of the ITRF96, IERS Paris, Technical Note No. 24, 1998a.
- Boucher C., Z. Altamimi, P. Sillard, CONTRIBUTION OF DORIS TO THE INTERNATIONAL TERRESTRIAL SYSTEM ITRS, Institut Géographique National/LAREG, France, Presentado en DORIS Days 98, 1998b.
- Boucher C., Z. Altamimi, P. Sillard, The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97), IERS Paris, Technical Note No. 27, 1999.

- Braun J., C. Rocken, R. Ware, C. Alber, A technique for determining single satellite, single station information from double difference GPS residuals, University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)/GPD research Group, 1998.
- Brunini C. y J. Usandivaras, Medición de la Red Geodésica Nacional mediante GPS, 8° Congreso Nacional de Cartografía, Paraná, 1991.
- Brunini C., J. Olondríz y R. Rodríguez, Determinación de parámetros de transformación entre los sistemas de Campo Inchauspe 1969 y WGS84 en Argentina, IV Congreso Internacional Ciencias de la Tierra, Santiago, 1996.
- Brunini C., F. Azpilicueta, M. P. Natali, J. Olondríz. Red GPS básica para la sub-red GPS minera en las provincias de San Juan, La Rioja, Catamarca y Salta. Estrategia para el cálculo multisesión. Primeras Jornadas de Catastro Minero, San Juan, 29 de octubre de 1997b.
- Brunini C., Global Ionospheric models from GPS measurements, Tesis Doctoral, FCAG, Universidad Nacional de La Plata, 1998.
- Brunner F. and P. Tregoning, Tropospheric propagation effects in GPS height results using meteorological observations, Aust. Journ. Geod. Photogram. Surv. No. 60 pp. 49-65, 1994.
- Chen G., T. Herring, Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, Journ. Geophys. Res. (102) 20489-20502, 1997.
- Christensen A. y A. Elías, Programación de la compensación de las redes del Instituto Geográfico Militar, CNUGGI, Buenos Aires, 1973.
- Clark T., B. Schupler, What are phase center variations and why should I worry? Presentación en GPS'99, Tsukuba, Japón, Comunicación personal, 1999.
- Danchik R., An overview of Transit development, Johns Hopkins APL Technical Digest Vol. 19 no. 1, 1998. Accesible en <http://techdigest.jhuapl.edu/td/td1901/index.htm>
- Davis T., T. Herring, I. Shapiro, A. Rogers and G. Elgered, Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modelling errors on estimates of baseline length, Radio Science, Vol. 20, No. 6, pp. 1593-1607, 1985.
- DeMets C., R. Gordon, D.F. Argus, S. Stein, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, Geophys. Res. Lett. (21) 2191-2194, 1994.
- Dodson A., P. Shardlow, L. Hubbard, G. Elgered, P. Jarlemark, Wet tropospheric effects on precise relative GPS height determination, Journal of Geodesy (70) 188-202, 1996.
- Dodson A. and D. Curtis, Ocean tide loading effects on height, Proceedings of the meeting: Geodesy Surveying in the Future, The Importance of heights, Gävle, Sweden, 15th-17th of March, 1999.
- DORIS, <http://schubert.ign.fr/CIAG/WDORIS/index.WDORIS.html>, 1999.
- Drewes H., Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models, Springer, IAG Symposia, No. 119, 377-382, 1998.
- Duan J. and M. Bevis, P. Fang, and Y. Bock, S. Chiswell and S. Businger, C. Rocken, F. Solheim, T. Van Hove and R. Ware, S. McClusky, T. Herring, and R. King, GPS

- Meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water, *Journ. of Appl. Meteorology*, Vol. 35 No. 6, 1996.
- Eanes R., B. Schutz, B. Tapley, Earth and ocean tide effects on Lageos and Starlette, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Earth Tides*, T. Kuo (Ed.), E. Schweitzerbart'sche Verlagbuchhandlung, Stuttgart, 1983.
- Eanes R., and S. Bettapudur, The CSR3.0 global ocean tide model, in preparation, comunicación personal, 1996
- Fischer I. y M. Slutsky, Un estudio del geoide en Sud América, *Revista Cartográfica* nro. 14, Publ. Nro. 293 del IPGH, 1965.
- Fischer I., The basic framework of the South American Datum of 1969, *Revista Cartográfica del IPGH*, pp. 29-47, 1972.
- GEO++® GmbH, GEODetic NAVSTAR Positioning Quick reference, 1994.
- Gradinarski L., R. Haas, J. Johansson, G. Elgered, Comparison of atmospheric parameters estimated from VLBI, GPS and microwave radiometer data, *Procc. of the 13th working meeting on European VLBI for Geodesy and astrometry*, Viechtach, 1999.
- Gurtner, W., RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2, <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex2.txt>, 1997.
- Hase H., *Theorie und Praxis globaler Bezugssysteme*, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 1999.
- Helbling, O. *Coordenadas provisionales, geográficas y planas conformes de puntos trigonométricos de 1° y 2° orden "Sistema Castelli"*, Parte I, Dirección General del Instituto Geográfico Militar, 1948.
- Herring T., Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data, en De Munk and Spoelstra (Eds.), *Refraction of transatmospheric signals in geodesy*, Publ. Netherland Geodetic Commission 36: 157-16, 1992.
- Hopfield H., Tropospheric refraction effects on satellite range measurements, *APL Technical Digest*, Vol. 11 No. 4, pp. 11-19, 1972.
- IGM, 100 años en el quehacer cartográfico del país, Instituto Geográfico Militar, Buenos Aires, 1979.
- IGM, La Red POSGAR; Instituto Geográfico Militar; marzo de 1995.
- IGM, Disposición permanente N°13/97, Instituto Geográfico Militar, Buenos Aires, 1997.
- IGS Annual Report 1998, Jet Propulsion Laboratory, JPL publication 400-839, 1999a.
- IGS, <http://igscb.jpl.nasa.gov>, 1999b.
- IGS, Statement by the president of the United States regarding the decision to stop degrading the Global Positioning System accuracy, IGSMail#2816, <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/mail/igsmail/2816>, 2000.
- ILRS, <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>, 1999.
- IVS, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>, 1999.

- Janes H., R. Langley, R. Newby, Analysis of tropospheric delay prediction models: Comparisons with ray tracing and implications for GPS relative positioning, *Bulletin Géodésique*, Vol. 65, No. 3 pp. 151-161, 1991.
- Johansson J., GPS antenna and site effects, *IAG Symposia*, Vol. 118, pp. 228-236, 1998.
- Kaniuth, K., H. Drewes, K. Stuber, H. Tremel, J. Moirano, Results of the SIRGAS 95 GPS network processing at DGFI/I. Springer, *IAG Symposia*, No. 118, 180-186, 1998a.
- Kaniuth K., D. Kleuren and H. Tremel, Sensitivity of GPS height estimates to tropospheric delay modelling, *AVN No. 6*, 1998b.
- Kaniuth K., W. Bosch, H. Drewes, J. Moirano, C. Brunini, P. Natali; The vertical reference system of Argentina, 22nd General Assembly of the IUGG, Birmingham, 18 al 30 de julio de 1999a.
- Kaniuth K., D. Kleuren, H. Müller, Improving the GPS height and troposphere estimation capabilities in the context of the Bernese Software, *EUREF Publication 7/I*, 247-251, 1999b.
- Kaniuth K., K. Stuber, Einfluss von Antennen-Radomen auf die GPS-Höhenbestimmung, *AVN 7*, 234-238, 1999c.
- Kaniuth.K., K. Stuber, On the accuracy and reliability of height estimates in regional GPS networks, *Proceedings 2nd Int. Symp. Geodynamics of the Alps-Adria Area by Means of Terrestrial and Satellite Methods*, 131-144, Zagreb 1999d.
- Kendrick E., M. Bevis, R. Smalley Jr., O. Cifuentes, F. Galban, Current rates of convergence across the Central Andes, Estimates from continuous GPS observations. *Geophys. Res. Lett.* (26) 541-544, 1999.
- Kleusberg A., P. Teunissen (Eds.), *GPS for Geodesy, Lecture notes on Earth Sciences*, 60, Springer, 1996.
- Kovalevsky J., I. Mueller, B. Kolaczek (eds.), *Reference frames in astronomy and geophysics*, Kluwer Academic Publ., 1989.
- Kuang D., B., Schutz, M. Watkins, On the structure of geometric positioning information in GPS measurements, *Journ. of Geodesy*, (71): 35-43, 1996.
- Lanyi G., Tropospheric calibration in radio interferometry, *Proc. int. symp. on space techniques for geodynamics*, Sopron, Hungary, Vol. 2, 184-195, 1984.
- Lauría E., S. Cimbaro, Proyecto RAMSAC Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo, Presentado en la jornada: "Presente y futuro de la geodesia en Argentina" IGM-UNLP, Instituto Gográfico Militar, 2 de Diciembre de 1998.
- Le Provost C., M. Genco, F. Lyard and P. Vincent, P. Canceil, Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model, *Journ. of Geophys. Res.* (99), C12, pp. 24777-24797, 1994.
- Leick A., *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons, New York , Second Edition, 1995.
- Lieske J., T. Lederle, W. Fricke and B. Morando, Expression of the precession quantities based on the IAU (1976) system of astronomical constants, *Astron. and Astrophys.*, 58 pp. 1-16, 1977.

- Ma C., M. Feissel (Eds), Definition and realization of the International Celestial Reference System by VLBI astrometry of extragalactic objects, IERS, Paris, Technical notes No. 23, 1997.
- Malys S, J. Slater; Maintenance and enhancement of the World Geodetic System 1984; DMA, Proceedings of the ION-GPS, 1994.
- McCarthy D., IERS Standards (1992). IERS Paris, Technical Note 13, 1992.
- McCarthy D., IERS Standards (1996). IERS Paris, Technical Note 21, 1996.
- Melbourne W., Very Long Baseline Radio Interferometry, Project MERIT-A, review of the techniques... , Wilkins (Ed.), Roy. Greenwich Obs, 1980.
- Melchior P., O. Francis, Comparison of recent ocean tide models using ground based tidal gravity measurements, *Marine Geodesy* (19), pp. 291,330, 1996.
- Mendes V., R. Langley, Zenith wet tropospheric delay determinations using prediction models: Accuracy analysis, *Cartografia e cadastro*, N° 2 junho, 1995.
- Mendes V. And R. Langley, Tropospheric zenith delay prediction accuracy for high precision GPS positioning and navigation, *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 46, No. 1, pp. 25-34, 1999.
- Menge F. and M. Schmitz, AOAD/M_T choke ring antenna absolute phase center variations: results of absolute PCV field calibrations at ife and Geo++, http://www.ife.uni-hannover.de/~web/AOA_DM_T, 2000.
- MOSP-FCAG, Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Pcia. de Bs. As., FCAG-UNLP, PNUD ARG 96/006, Red geodésica de alta precisión de la provincia de Buenos Aires, Informe técnico, diciembre de 1998.
- Nash D., P. Whiffen, K. Dixon, Surveying Kazakhstan's rich resources with GPS, *GPS WORLD*, p. 27, february, 1995.
- Niell A., Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths. *Journ. Geophys. Res.* (101) 3227-3246, 1996.
- Peltier W., Ice age paleotopography, *Science*, 265, pp. 195-201, 1994.
- Peltier, W., VLBI baseline variations from the ICE-4G model of postglacial rebound, *Geophys. Res. Lett.*, 22, pp. 465-468, 1995.
- Rabbel W., H. Schuh, The influence of atmospheric loading on VLBI experiments, *Journ. Geophysics*, No. 59, pp. 164-170, 1986.
- Ray R., D. Cartwright, Satellite altimeter observations of the M_f and M_m ocean tides, with simultaneous orbit corrections, in *Gravimetry and Space Techniques Applied to Geodynamics and Ocean Dynamics*, Geophysical monograph 82, IUGG vol. 17, pp. 69-78, 1994.
- Remondi B., Using the global positioning system (GPS) phase observable for relative geodesy: modeling, processing and results, Doctoral dissertation, Section 2.6: Tropospheric propagation delay, pp. 37-49, 1984.
- Rocken C., J. Braun, C. Meertens, R. Ware, S. Sokolovskiy, T. Van Hove, Water vapor tomography with low cost GPS receivers, UNAVCO, <http://www.gst.ucar.edu/gpsrg/arm.pdf>, 1999.

- Rodríguez R., H. Scampini, El sistema Chos Malal reducido a Inchauspe 69, Revista del Instituto Geográfico Militar, año 2 nro. 3, Julio-Diciembre de 1987.
- Rodríguez R., El establecimiento de estaciones DOPPLER en la Red Fundamental Argentina, IPGH Revista Cartográfica nro. 31, pp. 165-184, México, 1987.
- Rodríguez R., Una red GPS para el país: El proyecto POSGAR, Revista del IGM N°6, 1989.
- Rodríguez R., C. Brunini and J. Usandivaras, South american net project for the southern cone, 2nd Joint Symposium of the IAG/PAIGH, Viena, 1991.
- Rodríguez R., El sistema Campo Inchauspe, capítulo 2 de: Sistemas Geodésicos, Grupo de Trabajo Sistemas Geodésicos, CNUGGI, en prensa, 1999.
- Rothacher M, S. Schaer, L. Mervart, G. Beutler, Determination of antenna phase center variations using GPS data, IGS workshop proceedings on special topics and new directions, G. Gendt y G. Dick (Eds.) pp. 77-92, GFZ, Potsdam, Germany, 1995.
- Rothacher M., G. Mader, Combination of antenna phase center offsets and variations, antenna calibration set IGS_01. International GPS Service for Geodynamics, ftp://ubecclu.unibe.ch/AIUB\$FTP/ANTENNAS, 1996a.
- Rothacher M. and Leos Mervart (Eds.), G. Beutler, E. Brockmann, S. Frankhauser, W. Gurtner, J. Johnson, L. Mervart, M. Rothacher, S. Shaer, T. Springer, R. Weber, Bernese GPS Software Version 4.0, Astronomical Institute-University of Berne, 1996b.
- Rothacher M. and G. Beutler, The role of GPS in the study of global change, en “Recent Contribution of GPS to Earth rotation and reference frames”, Tesis de habilitación de M. Rothacher, pp. 121-123, Astronomical Institute University of Berne, 1998a.
- Rothacher M., T. Springer, S. Schaer, G. Beutler, Processing strategies for regional GPS networks, en “Recent Contribution of GPS to Earth rotation and reference frames”, Tesis de habilitación de M. Rothacher, pp. 107-116, Astronomical Institute University of Berne, 1998b.
- Saastamoinen J., Contribution to the theory of atmospheric refraction. Part II, Refraction corrections in satellite geodesy. Bull. Géod. (107) 13-34, 1973.
- Schaer S., G. Beutler, M. Rothacher, L. Mervart and A. Springer, Daily global ionosphere maps based on GPS carrier phase routinely produced by CODE analysis centre, Paper presented at the IGS AC Workshop, Silver Spring, MD, USA, 1996.
- Scherneck H., A parametrized solid earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurements. Geophys. J. Int. (106) 677-694, 1991.
- Schuh H. (Ed.), Explanatory Supplement to the IERS Conventions 1996. Chapters 6 and 7, DGF report No. 71, 1999.
- Schupler B., R. Allhouse, T. Clark, Signal characteristics of GPS user antennas, Navigation, Vol. 41, No. 3, pp. 277-295, 1994.
- Schwiderski E., On charting global ocean tides, Reviews of Geophysics and space physics, 18, 243, 268, 1980.
- Seidelmann P., 1980 IAU nutation: The final report of the IAU working group on nutation, Celest. Mech., 27, pp. 79-106, 1982.

- Sillard, P., Z. Altamimi, C. Boucher, The ITRF96 realization and its associated velocity field. *Geophys. Res. Lett.* (25) 3223-3226, 1998.
- SIRGAS; Boletín informativo nº 4; diciembre de 1996.
- SIRGAS WGII; Recomendaciones del Grupo de Trabajo II de SIRGAS para la integración de las redes nacionales; Comunicación privada, enero de 1997.
- SIRGAS Project Committee, SIRGAS Final Report, Working Groups I and II. IBGE, Rio de Janeiro, 96 pp., 1997.
- Slater J., and S. Malys, WGS 84 – Past, present and future, Springer IAG Symposia, No. 118, pp. 1-7, 1998.
- Slater J., P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, W. Lewandowski, C. Noll, R. Weber, R. Neilan, G. Hein, The International GLONASS Experiment (IGEX-98): Organization, Preliminary Results and Future Plans, Presented at ION GPS-99, Nashville, Sept. 14-17, 1999.
- Sovers O., J. Border, Observation model and parameter partials for the JPL geodetic GPS modelling software “GPSOMC”, JPL publication 87-21 rev. 2, 1990.
- Tapley B., M. Watkins, J. Ries, G. Davis, R. Eanes, S. Poole, H. Rim, B. Schutz, C. Shum, R. Nerem, F. Lerch, J. Marshall, S. Klosko, N. Pavlis, R. Williamson, The Joint Gravity Model 3. *Journ. Geophys. Res.* (101) 28029-28049, 1996.
- Teunissen P., Carrier phase ambiguity fixing concepts, en Kleusberg A., P. Teunissen (Eds.), *GPS for Geodesy, Lecture notes on Earth Sciences*, 60, Springer, 1996.
- UNAVCO, The effect of antenna covers on GPS baseline solutions. http://www.unavco.ucar.edu/science_tech/publications/dome_report, 1997.
- Usandivaras J. y Brunini C., Programa general de compensación por mínimos cuadrados, 17ma reunión científica de la AAGG, Buenos Aires, 1992.
- Usandivaras J., Brunini C., Canosa D., Mondinalli C., Gende M., Moirano J. y Alvarez J., Cálculo de la red geodésica nacional argentina, estrategia y resultados, *Actas del XVII Congreso Brasileño de Cartografía*, Salvador, Bahía, Agosto de 1995.
- Van Dierendonck A., S. Russel, E. Kopitzke, M. Birnbaum, The GPS navigation message, *Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 25 No. 2 pp. 147-165, 1978.
- Wahr J., The forced nutations on an elliptical rotating, elastic and oceanless Earth, *Geophys. J., Royal Astron. Soc.* 64, pp. 705-727, 1981.
- Walker J., Derivation and application of datum transformations relating DOPPLER positions to local and national datums in Latin America, XIII Pan American consultation on cartography, PAIGH, Quito, Ecuador, 1977.
- Webb F. and J. Zumbege, An introduction to GYPSY/OASIS-II, JPL publication D-11088, 1997.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, *EOS Trans. AGU*, 72, 441, 1991.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith, The Generic Mapping Tools (GMT) version 3.0 Technical Reference & Cookbook, SOEST/NOAA, 1995.
- Wübbena G.; Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsgestimmung, Universidad de Hannover, 1991.

ANEXO I El marco de referencia POSGAR'98

POSGAR'98 (ITRS-SIRGAS época: 1995.4)

COORDENADAS CARTESIANAS (errores en metros y en el sistema local N,E,U)

Punto	X	Y	Z	σ_x	σ_y	σ_z
5-49	1363534.1263	-3419377.3673	-5191142.4947	0.0053	0.0059	0.0058
ABMO	2217941.9301	-4515359.6314	-3907991.5948	0.0052	0.0053	0.0052
ACOL	2212197.4163	-5018898.0347	-3245575.3220	0.0051	0.0052	0.0051
ADLS	2202268.4017	-5295585.1129	-2788963.7873	0.0051	0.0052	0.0051
ARGO	1400641.9606	-3713567.9971	-4976114.3074	0.0053	0.0058	0.0057
ARIC	2036670.3744	-5698255.8900	-2008925.6973	0.0051	0.0052	0.0051
AUXI	2684422.6109	-5062313.7237	-2792386.3112	0.0058	0.0058	0.0053
BDSH	1978209.9807	-5065014.3513	-3324001.1639	0.0052	0.0054	0.0052
BHBL	2322112.5412	-4409269.5885	-3967592.0440	0.0054	0.0061	0.0055
BJGE	2549686.0202	-4779787.8629	-3355453.0055	0.0052	0.0053	0.0052
BMNS	1358663.6459	-4656459.1938	-4127788.2388	0.0051	0.0051	0.0051
BTNS	1737417.5976	-4251338.9934	-4411576.5345	0.0052	0.0052	0.0052
CALD	1863059.5953	-5368702.7040	-2886405.9055	0.0051	0.0051	0.0051
CARO	2724179.5579	-4391461.9880	-3725776.5054	0.0059	0.0057	0.0055
CENT	2454054.3474	-5279360.4994	-2601546.8296	0.0051	0.0052	0.0051
CERE	2604021.4597	-4884440.5265	-3158496.0725	0.0053	0.0057	0.0052
CERR	2251119.8498	-4926103.2942	-3358011.3399	0.0052	0.0053	0.0051
CFLR	1593770.2194	-4309661.0757	-4409763.4832	0.0052	0.0053	0.0052
CHCA	1716151.2782	-4736060.5338	-3900924.8573	0.0052	0.0054	0.0052
CHTE	1830567.5401	-4549800.7296	-4065155.5802	0.0055	0.0057	0.0054
CHUR	2427520.7406	-5286701.7113	-2609914.2621	0.0052	0.0055	0.0052
CLDA	3079882.1724	-4878580.0549	-2710335.7603	0.0055	0.0055	0.0052
CLTO	1450191.1960	-4021340.9937	-4718550.8288	0.0052	0.0055	0.0054
CNGT	1916702.7661	-5103696.9484	-3302165.5859	0.0051	0.0052	0.0051
CONA	2729553.6607	-4494705.7496	-3597371.3314	0.0060	0.0058	0.0056
CORR	1902182.0023	-4793257.3890	-3742701.4654	0.0051	0.0051	0.0051
CPDR	2299288.0567	-5051831.7377	-3132132.9191	0.0051	0.0051	0.0051
CQUI	2739557.2130	-4806846.4109	-3162782.8799	0.0056	0.0065	0.0055
CRES	2597016.5343	-4888632.5340	-3157787.9226	0.0053	0.0055	0.0052
CRLS	2238408.3924	-4938431.5857	-3348328.6021	0.0053	0.0055	0.0052
CRMN	2592680.3326	-4475194.7742	-3720057.8494	0.0055	0.0054	0.0053
CVGA	1585305.6434	-3958929.1171	-4727254.8227	0.0052	0.0056	0.0054
DBLO	1623452.8000	-4472745.9181	-4234941.0492	0.0052	0.0052	0.0052
DSDO	1754144.7022	-3921794.6081	-4698375.1513	0.0053	0.0059	0.0056
DVTO	2437848.7053	-4984430.4994	-3136156.9560	0.0053	0.0053	0.0052
EDBO	2508865.6184	-5157811.4805	-2781259.8772	0.0052	0.0054	0.0052
ELCD	2692187.4412	-5053687.2561	-2800448.9810	0.0052	0.0056	0.0052
ESBB	2675058.7216	-4282515.2075	-3883828.8066	0.0055	0.0054	0.0053
FDC1	1278956.1076	-3989448.9283	-4793548.1012	0.0053	0.0060	0.0058
FDCA	1278997.2193	-3989458.5703	-4793539.6601	0.0053	0.0057	0.0056
FSCO	2085596.4645	-4724856.3223	-3730623.6934	0.0052	0.0053	0.0052
GERO	1196581.1835	-3879625.1686	-4902908.4302	0.0053	0.0057	0.0056
GNDL	2044035.4936	-5167607.1918	-3122228.5810	0.0051	0.0052	0.0051
GRDE	1787624.9254	-4403759.9671	-4241027.1366	0.0052	0.0054	0.0053
HITO	1414205.9498	-3609816.1347	-5047671.5787	0.0053	0.0058	0.0057
HUEM	1425943.0816	-4209290.0237	-4560347.9457	0.0052	0.0055	0.0053
IAR2	2765232.6014	-4449692.1079	-3625759.6499	0.0085	0.0071	0.0064
INCY	2738098.0708	-4471502.8371	-3619551.2397	0.0058	0.0057	0.0055
INPE	2412611.4689	-4570273.7770	-3725634.7883	0.0052	0.0053	0.0052
JUNA	1353011.0632	-3853279.8342	-4883405.1728	0.0052	0.0056	0.0055
KLMO	2014584.4860	-5032970.8890	-3350071.9945	0.0053	0.0055	0.0053
KM90	2602464.5775	-5188575.0781	-2634994.2570	0.0068	0.0065	0.0058
LEBU	1425279.1395	-4856257.6729	-3868577.0710	0.0051	0.0051	0.0051
LMTS	2846582.5861	-5050661.8340	-2650099.0011	0.0052	0.0053	0.0051
LNJ2	1892496.5646	-4196490.1820	-4400203.5956	0.0059	0.0055	0.0055
LNJA	1895642.5749	-4194185.0047	-4401044.9201	0.0052	0.0053	0.0053
LOBO	2000688.7473	-4304649.0424	-4245787.4940	0.0055	0.0054	0.0054
LPGR	2268651.5873	-4615472.2055	-3760076.1347	0.0052	0.0054	0.0052

Punto	X	Y	Z	σ_x	σ_y	σ_z
LVLE	2321693.0501	-4742579.2749	-3565808.5084	0.0052	0.0053	0.0052
MALR	1812288.7436	-4858172.1827	-3704651.8940	0.0051	0.0052	0.0051
MCRV	1705168.8101	-4109772.1967	-4554478.6588	0.0052	0.0057	0.0055
MDSJ	1753693.5528	-3921659.8072	-4698640.6066	0.0053	0.0065	0.0060
MDYN	1979755.9816	-4251564.3091	-4308200.5145	0.0056	0.0057	0.0055
MJON	1947124.4776	-4499114.4233	-4066882.9995	0.0052	0.0053	0.0052
MMDP	2701065.4769	-4246102.8721	-3905515.0758	0.0068	0.0060	0.0058
MQMD	2623611.4272	-5112095.9274	-2759648.1677	0.0059	0.0060	0.0054
MRNO	1323054.6283	-4079410.8598	-4706485.9851	0.0052	0.0055	0.0053
MRTN	1580313.7049	-4625482.1161	-4084845.3004	0.0052	0.0055	0.0053
MUSH	1362912.6329	-3423055.6339	-5188887.6164	0.0053	0.0059	0.0059
NEBA	1951942.2221	-4343782.7654	-4229244.4292	0.0052	0.0052	0.0052
NIHL	1919676.7528	-4874137.1774	-3628167.5598	0.0051	0.0051	0.0051
OLCP	2303780.5009	-5352777.6251	-2593836.9851	0.0051	0.0052	0.0051
PAGN	1908376.1255	-5172848.1937	-3203275.0395	0.0051	0.0052	0.0051
PALO	2028408.8331	-5062432.5888	-3297655.1828	0.0051	0.0051	0.0051
PBNA	1480069.9401	-3838001.1129	-4858230.2651	0.0053	0.0059	0.0057
PICU	1742359.6662	-4608870.6660	-4037142.6796	0.0051	0.0053	0.0052
PLDO	2144575.1300	-4851739.0331	-3530962.6146	0.0052	0.0053	0.0052
PLTA	1227293.8592	-3768587.9596	-4980764.8834	0.0053	0.0057	0.0055
PNIR	2377383.6814	-4458835.6262	-3879430.4937	0.0052	0.0053	0.0052
POMO	2034523.2061	-4486378.5803	-4038016.4006	0.0052	0.0055	0.0052
PPNN	2279247.4106	-5163319.1600	-2962610.7350	0.0052	0.0054	0.0052
QNTA	2342361.1563	-4894872.4542	-3341578.6251	0.0051	0.0052	0.0051
RGLL	1408225.8843	-3710670.5406	-4976123.0191	0.0053	0.0061	0.0058
RSST	2915342.2231	-4856552.2080	-2922102.3148	0.0052	0.0053	0.0051
RVRS	2660539.6824	-4992222.0630	-2936663.3288	0.0052	0.0054	0.0052
SATO	2536637.6853	-4375408.0198	-3873471.0012	0.0068	0.0058	0.0057
SCRS	2342838.4796	-5243119.2995	-2769625.8277	0.0052	0.0055	0.0052
SFRL	1404778.1660	-3682265.5597	-4998078.9094	0.0052	0.0056	0.0055
SJGE	2722951.6752	-4393755.1025	-3723984.5096	0.0076	0.0067	0.0061
SOIT	1970507.4469	-4844438.8814	-3639540.8161	0.0052	0.0054	0.0052
SOLA	2644718.8473	-5228848.7103	-2511181.9710	0.0052	0.0054	0.0051
SRTO	2129205.0767	-4392906.8336	-4091234.5752	0.0054	0.0055	0.0053
STLA	1528930.4948	-4161549.6257	-4570576.4176	0.0052	0.0054	0.0053
STPT	2454344.1185	-4679388.3180	-3560401.8818	0.0052	0.0055	0.0052
TAFI	2339288.5787	-5200549.5902	-2854353.2430	0.0051	0.0051	0.0051
TINO	2158718.7273	-5192232.7375	-3002458.8490	0.0051	0.0052	0.0051
TNDL	2609018.9436	-4357000.6989	-3846200.4880	0.0051	0.0051	0.0051
TRDL	1845932.3882	-4657295.5008	-3935407.8469	0.0051	0.0052	0.0051
TRES	2440002.3399	-5348023.9951	-2476082.6343	0.0052	0.0053	0.0051
VEGA	1394000.2333	-3415304.3349	-5185906.6957	0.0053	0.0058	0.0057
VINT	1455289.2269	-4362584.5326	-4405903.7882	0.0052	0.0055	0.0054
YAV1	2453537.6060	-5381116.0237	-2389918.6154	0.0051	0.0052	0.0051
YAVI	2453118.2324	-5380591.6320	-2391548.0566	0.0052	0.0055	0.0052
ZAPL	1699993.3076	-4676771.6410	-3978098.7313	0.0051	0.0051	0.0051
BSON	1529296.1950	-4493524.8830	-4247352.5840	0.0030	0.0030	0.0040
EARG	1429883.0260	-3495363.2680	-5122698.7720	0.0030	0.0030	0.0050
IGMO	2751801.0764	-4479882.6822	-3598917.3568	0.0040	0.0040	0.0040
IGZU	3335126.8193	-4691312.6009	-2738751.9737	0.0030	0.0040	0.0040
L10B	1627558.4820	-4126035.1900	-4569051.3350	0.0030	0.0030	0.0040
LMAS	2616900.0500	-5295645.8433	-2399612.4877	0.0040	0.0050	0.0070
LOTE	2035975.3840	-4592847.6310	-3916827.4080	0.0030	0.0030	0.0040
MORR	2216022.7900	-4857391.5810	-3479484.1550	0.0030	0.0030	0.0040
PRDT	1891687.1622	-4948120.4957	-3542286.2540	0.0030	0.0030	0.0040
RBLS	2462064.8850	-5074756.6070	-2967964.5110	0.0030	0.0030	0.0040
SANA	3079186.2130	-4744549.8985	-2937930.4150	0.0030	0.0040	0.0050
SANT	1769693.3140	-5044574.1460	-3468321.0770	0.0030	0.0030	0.0040
UPSA	1895456.0725	-5029125.6004	-3426316.9945	0.0040	0.0040	0.0040
CRIC	1932215.1930	-5001352.6440	-3444510.8280	0.0040	0.0040	0.0030
LPGS	2780102.9790	-4437418.8450	-3629404.6040	0.0040	0.0040	0.0040
IGUA	3337066.7300	-4688978.5500	-2740427.1100	0.0030	0.0040	0.0030
UNSA	2412830.3700	-5271936.6960	-2652209.1460	0.0030	0.0030	0.0030
ELLA	2553742.7387	-5250332.9748	-2560280.9948	0.0045	0.0054	0.0043
ARRE	2647737.7226	-4582547.6277	-3547739.1668	0.0045	0.0043	0.0038
CTVA	2925080.5300	-4704432.0843	-3150771.9268	0.0043	0.0039	0.0036

Punto	X	Y	Z	σ_x	σ_y	σ_z
IGUA	3337066.7300	-4688978.5500	-2740427.1100	0.0040	0.0036	0.0034
KPLN	2827413.6076	-4616612.3420	-3361267.3121	0.0044	0.0039	0.0036
NPGU	3393701.3222	-4610643.7685	-2804103.4636	0.0044	0.0043	0.0037
PLIB	3008298.6148	-4655084.2606	-3145716.1844	0.0043	0.0040	0.0036
PSDS	3171668.3586	-4696605.3974	-2916752.1916	0.0042	0.0038	0.0035
SJAV	3220031.9401	-4635704.1647	-2960551.4363	0.0042	0.0042	0.0036
VLNE	2720971.7983	-4690053.2947	-3347575.1313	0.0047	0.0042	0.0038
CFAG	2016584.7953	-5050165.6100	-3323308.9133	0.0055	0.0064	0.0058
TUCU	2386117.1313	-5171223.2721	-2862949.2636	0.0055	0.0064	0.0058
LHCL	2079355.5879	-4582903.4227	-3905925.8030	0.0055	0.0064	0.0057
PNTF	1345182.5107	-3426192.4520	-5191434.2965	0.0056	0.0065	0.0057
AUTF	1360918.8008	-3420457.8800	-5191175.3322	0.0056	0.0065	0.0057

POSGAR'98 (ITRS-SIRGAS época: 1995.4) Elipsoide GRS-80

COORDENADAS GEODESICAS (errores en metros y en el sistema local N,E,U)

Punto	Latitud	Longitud	Altura elip.	σ_ϕ	σ_λ	σ_h
5-49	-54 50 22.63486	-68 15 34.30219	24.356	0.0058	0.0054	0.0058
ABMO	-38 1 40.04377	-63 50 23.12535	190.563	0.0052	0.0052	0.0053
ACOL	-30 47 0.14494	-66 12 48.18457	569.759	0.0051	0.0051	0.0052
ADLS	-26 5 4.16192	-67 25 8.76022	3392.653	0.0051	0.0051	0.0052
ARGO	-51 36 42.30657	-69 20 6.32360	27.277	0.0057	0.0054	0.0057
ARIC	-18 28 50.42130	-70 19 55.54752	38.902	0.0051	0.0051	0.0052
AUXI	-26 7 58.88823	-62 3 50.66489	194.708	0.0054	0.0058	0.0057
BDSO	-31 36 31.79927	-68 39 58.30393	822.458	0.0052	0.0052	0.0053
BHBL	-38 42 48.09180	-62 13 36.35153	87.036	0.0057	0.0056	0.0058
BJGE	-31 56 46.95433	-61 55 23.39726	124.098	0.0052	0.0052	0.0053
BMNS	-40 35 13.83268	-73 44 1.63884	110.776	0.0051	0.0051	0.0051
BTNS	-44 2 24.65399	-67 46 16.94627	394.699	0.0052	0.0052	0.0052
CALD	-27 4 57.70097	-70 51 43.50640	63.945	0.0051	0.0051	0.0051
CARO	-35 58 22.37517	-58 11 13.94159	33.306	0.0056	0.0058	0.0057
CENT	-24 13 17.43135	-65 4 8.91243	2119.570	0.0051	0.0051	0.0052
CERE	-29 52 32.83875	-61 56 12.37055	108.620	0.0053	0.0054	0.0055
CERR	-31 58 18.41566	-65 26 26.34538	441.626	0.0052	0.0052	0.0052
CFLR	-44 0 51.49962	-69 42 17.75930	760.765	0.0052	0.0052	0.0052
CHCA	-37 56 25.19285	-70 4 53.72717	1141.739	0.0053	0.0052	0.0053
CHTE	-39 50 40.84538	-68 4 59.14810	618.107	0.0055	0.0055	0.0056
CHUR	-24 18 24.90263	-65 20 11.76122	1488.437	0.0052	0.0053	0.0054
CLDA	-25 18 41.17169	-57 44 7.77057	79.417	0.0053	0.0055	0.0054
CLTO	-48 0 57.44544	-70 10 10.16535	655.779	0.0054	0.0052	0.0054
CNGT	-31 22 27.88012	-69 24 58.46387	1458.768	0.0051	0.0051	0.0052
CONA	-34 33 19.19275	-58 43 49.60493	39.799	0.0057	0.0059	0.0058
CORR	-36 9 14.26976	-68 21 16.47423	1190.153	0.0051	0.0051	0.0051
CPDR	-29 36 3.78095	-65 31 40.24000	271.850	0.0051	0.0051	0.0051
CQUI	-29 55 14.10100	-60 19 11.87731	72.578	0.0057	0.0058	0.0061
CRES	-29 52 6.26941	-62 1 16.17915	111.196	0.0053	0.0053	0.0054
CRLS	-31 52 9.38730	-65 37 1.09584	376.710	0.0053	0.0053	0.0054
CRMN	-35 54 32.47168	-59 54 51.73222	64.610	0.0053	0.0055	0.0054
CVGA	-48 8 13.73010	-68 10 37.05551	252.531	0.0055	0.0053	0.0055
DBLO	-41 51 39.00851	-70 3 3.04384	1253.869	0.0052	0.0052	0.0052
DSO	-47 45 5.89426	-65 54 6.95973	28.687	0.0057	0.0054	0.0057
DVTO	-29 38 26.41623	-63 56 13.48563	688.374	0.0052	0.0053	0.0053
EDBO	-26 1 14.08462	-64 3 38.73019	339.497	0.0052	0.0052	0.0053
ELCD	-26 12 50.94834	-61 57 17.97336	185.323	0.0053	0.0053	0.0055
ESBB	-37 45 9.79675	-58 0 33.04145	80.619	0.0053	0.0055	0.0054
FDC1	-49 2 16.57871	-72 13 29.80875	294.511	0.0059	0.0054	0.0059
FDCA	-49 2 15.86837	-72 13 28.02619	302.383	0.0056	0.0053	0.0056
FSCO	-36 1 28.86855	-66 10 58.37225	367.909	0.0052	0.0052	0.0053
GERO	-50 33 42.14972	-72 51 31.76788	249.171	0.0056	0.0053	0.0056

Punto	Latitud	Longitud	Altura elip.	σ_p	σ_λ	σ_h
GNDL -29	29 36.54424	-68 25 7.81048	1223.668	0.0051	0.0051	0.0052
GRDE -41	56 4.92041	-67 54 22.37972	1221.215	0.0053	0.0052	0.0053
HITO -52	39 32.62975	-68 36 23.05965	64.406	0.0057	0.0054	0.0057
HUEM -45	55 51.42661	-71 17 8.25674	605.506	0.0054	0.0052	0.0054
IAR2 -34	52 0.11159	-58 8 28.97044	29.049	0.0068	0.0081	0.0072
INCY -34	47 54.73394	-58 31 8.50632	26.109	0.0056	0.0058	0.0057
INPE -35	58 14.95934	-62 10 14.80894	106.967	0.0052	0.0052	0.0053
JUNA -50	17 2.45753	-70 39 7.83901	480.363	0.0055	0.0052	0.0055
KLMO -31	53 12.04504	-68 11 5.60538	574.421	0.0053	0.0053	0.0054
KM90 -24	33 38.03689	-63 21 45.92602	273.427	0.0059	0.0067	0.0064
LEBU -37	34 45.35448	-73 38 36.20046	60.971	0.0051	0.0051	0.0051
LMTS -24	42 39.89784	-60 35 38.89498	152.160	0.0051	0.0052	0.0052
LNJ2 -43	53 55.92656	-65 43 33.57314	291.295	0.0055	0.0058	0.0055
LNJA -43	54 33.68479	-65 40 42.58358	293.654	0.0053	0.0052	0.0053
LOBO -42	0 7.25697	-65 4 20.00021	25.804	0.0054	0.0055	0.0054
LPGR -36	21 17.44865	-63 49 27.88864	171.383	0.0053	0.0052	0.0053
LVLE -34	12 34.81924	-63 54 58.67227	185.447	0.0052	0.0052	0.0053
MALR -35	43 36.33031	-69 32 33.04371	1764.505	0.0051	0.0051	0.0052
MCRV -45	51 37.81843	-67 27 58.13491	21.261	0.0056	0.0053	0.0056
MDSO -47	45 19.03690	-65 54 24.09080	18.627	0.0062	0.0055	0.0061
MDYN -42	45 45.75160	-65 1 50.85107	22.069	0.0056	0.0056	0.0056
MJON -39	52 2.69405	-66 35 52.90233	289.508	0.0052	0.0052	0.0052
MMDP -38	0 2.21525	-57 32 18.28670	28.075	0.0060	0.0066	0.0061
MQMD -25	48 14.73998	-62 49 56.50314	251.775	0.0055	0.0059	0.0059
MRNO -47	51 5.07967	-72 1 50.98450	917.937	0.0054	0.0052	0.0054
MRTN -40	4 28.59307	-71 8 13.45481	803.200	0.0054	0.0052	0.0054
MUSH -54	48 16.38406	-68 17 22.89440	17.346	0.0058	0.0054	0.0059
NEBA -41	47 56.37701	-65 48 9.13224	387.460	0.0052	0.0052	0.0052
NIHL -34	53 11.11376	-68 30 10.87833	1100.614	0.0051	0.0051	0.0051
OLCP -24	8 14.00502	-66 42 48.42945	4099.063	0.0051	0.0051	0.0052
PAGN -30	19 21.89940	-69 44 59.59025	3895.603	0.0051	0.0051	0.0052
PALO -31	19 50.01244	-68 9 54.27405	771.665	0.0051	0.0051	0.0051
PBNA -49	56 5.49607	-68 54 41.70267	132.817	0.0058	0.0054	0.0058
PICU -39	31 6.32635	-69 17 28.18002	410.151	0.0052	0.0051	0.0052
PLDO -33	49 37.96317	-66 9 12.66992	756.877	0.0052	0.0052	0.0053
PLTA -51	40 36.03639	-71 57 41.14565	241.434	0.0056	0.0053	0.0056
PNIR -37	42 3.70385	-61 56 2.89019	309.019	0.0052	0.0052	0.0052
POMO -39	31 50.43622	-65 36 22.43574	134.157	0.0053	0.0053	0.0054
PPNN -27	51 15.11623	-66 10 54.71849	815.989	0.0052	0.0052	0.0053
QNTA -31	47 47.68524	-64 25 38.34006	564.071	0.0051	0.0051	0.0052
RGLL -51	36 43.14992	-69 13 4.40307	17.742	0.0059	0.0054	0.0059
RSST -27	26 42.22951	-59 1 26.42118	71.787	0.0051	0.0052	0.0052
RVRS -27	35 33.87390	-61 56 42.70878	174.986	0.0052	0.0052	0.0053
SATO -37	38 1.39506	-59 53 49.33119	234.098	0.0058	0.0066	0.0059
SCRS -25	53 52.92732	-65 55 22.69201	1651.664	0.0052	0.0053	0.0054
SFRL -51	55 48.67563	-69 7 5.63001	78.270	0.0055	0.0053	0.0055
SJGE -35	57 10.51195	-58 12 43.81333	34.650	0.0064	0.0074	0.0067
SOIT -35	0 54.94791	-67 51 56.31212	500.087	0.0053	0.0052	0.0053
SOLA -23	20 14.92303	-63 10 12.00039	258.509	0.0051	0.0052	0.0053
SRT0 -40	9 18.13326	-64 8 27.31646	119.030	0.0054	0.0054	0.0054
STLA -46	3 51.64390	-69 49 37.00185	504.748	0.0053	0.0052	0.0053
STPT -34	9 3.79991	-62 19 22.59209	136.495	0.0053	0.0053	0.0054
TAFI -26	44 40.01243	-65 46 51.74110	3101.249	0.0051	0.0051	0.0051
TINO -28	15 36.57982	-67 25 28.02016	1114.582	0.0051	0.0051	0.0052
TNDL -37	19 27.23552	-59 5 10.93603	216.145	0.0051	0.0051	0.0051
TRDL -38	20 17.96853	-68 22 44.25479	708.392	0.0051	0.0051	0.0052
TRES -22	58 47.14597	-65 28 31.63848	3653.754	0.0051	0.0052	0.0053
VEGA -54	45 23.62235	-67 47 47.55681	139.737	0.0057	0.0054	0.0057
VINT -43	57 51.65717	-71 33 7.61916	954.320	0.0054	0.0052	0.0054
YAV1 -22	8 16.50398	-65 29 21.22572	3590.015	0.0051	0.0051	0.0052
YAVI -22	9 13.51785	-65 29 26.94721	3601.176	0.0052	0.0053	0.0054
ZAPL -38	49 39.88738	-70 1 26.17332	1053.887	0.0051	0.0051	0.0051
BSO0 -42	0 50.07787	-71 12 17.46060	897.413	0.0036	0.0030	0.0035
EARG -53	47 7.74247	-67 45 5.45150	31.220	0.0038	0.0030	0.0044
IGM0 -34	34 19.91527	-58 26 21.71804	48.857	0.0040	0.0040	0.0040
IGZU -25	35 42.46313	-54 35 25.40119	169.766	0.0039	0.0034	0.0038

Punto	Latitud	Longitud	Altura elip.	σ_ϕ	σ_λ	σ_h
L10B	-46 2 32.70314	-68 28 21.78180	736.102	0.0035	0.0030	0.0036
LMAS	-22 14 35.67711	-63 42 11.61845	653.937	0.0067	0.0042	0.0052
LOTE	-38 7 41.47540	-66 5 33.51957	293.177	0.0037	0.0030	0.0034
MORR	-33 16 8.15978	-65 28 36.26378	1000.942	0.0037	0.0030	0.0033
PRDT	-33 56 53.04638	-69 4 40.56825	1104.314	0.0037	0.0030	0.0033
RBLS	-27 54 42.56907	-64 7 9.22977	193.237	0.0038	0.0030	0.0032
SANA	-27 36 21.80893	-57 0 59.96055	87.465	0.0048	0.0033	0.0040
SANT	-33 9 1.04296	-70 40 6.80197	723.061	0.0037	0.0030	0.0033
UPSA	-32 41 34.39242	-69 20 55.63303	1800.541	0.0040	0.0040	0.0040
CRIC	-32 53 36.49929	-68 52 35.51831	858.974	0.0033	0.0040	0.0037
LPGS	-34 54 24.28679	-57 55 56.27728	29.859	0.0040	0.0040	0.0040
IGUA	-25 36 42.47104	-54 33 40.26647	192.455	0.0031	0.0034	0.0036
UNSA	-24 43 38.84730	-65 24 27.51764	1257.793	0.0030	0.0030	0.0030
ELLA	-23 49 12.96997	-64 3 42.77249	484.433	0.0045	0.0047	0.0051
ARRE	-34 0 49.05332	-59 58 52.40806	70.931	0.0040	0.0045	0.0042
CTVA	-29 47 43.62084	-58 7 40.22348	110.827	0.0037	0.0042	0.0039
IGUA	-25 36 42.47104	-54 33 40.26647	192.455	0.0035	0.0039	0.0037
KPLN	-32 0 30.40035	-58 30 53.60507	78.883	0.0037	0.0043	0.0039
NPGU	-26 14 52.98800	-53 38 41.19185	830.515	0.0038	0.0044	0.0042
PLIB	-29 44 34.69330	-57 7 40.31490	98.665	0.0037	0.0042	0.0040
PSDS	-27 23 25.34897	-55 58 6.30512	135.528	0.0036	0.0041	0.0038
SJAV	-27 50 11.22996	-55 12 56.00632	130.254	0.0037	0.0042	0.0041
VLNE	-31 51 45.91186	-59 52 46.18068	112.752	0.0040	0.0046	0.0042
CFAG	-31 36 7.80722	-68 13 57.53552	702.580	0.0059	0.0056	0.0062
TUCU	-26 50 35.72374	-65 13 49.26713	485.068	0.0059	0.0057	0.0062
LHCL	-38 0 9.57912	-65 35 42.89025	404.585	0.0059	0.0057	0.0061
PNTF	-54 50 39.04443	-68 33 51.00527	23.878	0.0062	0.0057	0.0059
AUTF	-54 50 22.29408	-68 18 12.84371	71.945	0.0062	0.0057	0.0059

Vinculaciones mediante sólo un vector corto con receptores de una frecuencia

0506	X	1532476.2387	0.0159
	Y	-4172246.8905	0.0162
	Z	-4559788.4464	0.0160
	HEIGHT	570.6278	0.0162
	LATITUDE	- 45 55 26.543042	0.0160
	LONGITUDE	- 69 49 53.744822	0.0159
VBCA	X	2319240.8223	0.0098
	Y	-4411743.8843	0.0100
	Z	-3966484.2683	0.0100
	HEIGHT	59.5345	0.0102
	LATITUDE	- 38 42 2.770612	0.0098
	LONGITUDE	- 62 16 9.216475	0.0096
VINI	X	2323038.1943	0.0098
	Y	-4412386.7248	0.0100
	Z	-3963585.4005	0.0100
	HEIGHT	71.8899	0.0103
	LATITUDE	- 38 40 2.019671	0.0098
	LONGITUDE	- 62 14 2.555197	0.0096
HUMA	X	1926348.5917	0.0337
	Y	-4769176.5452	0.0348

	Z	-3760354.0870	0.0344
	HEIGHT	845.0684	0.0359
	LATITUDE	- 36 21 12.559077	0.0336
	LONGITUDE	- 68 0 19.476113	0.0334
K261	X	2015316.8532	0.0031
	Y	-5033036.1867	0.0031
	Z	-3349535.9584	0.0031
	HEIGHT	573.8899	0.0032
	LATITUDE	- 31 52 51.562278	0.0031
	LONGITUDE	- 68 10 40.660637	0.0031
VCQI	X	2746805.9526	0.0189
	Y	-4800515.9260	0.0194
	Z	-3166090.5221	0.0187
	HEIGHT	74.5113	0.0200
	LATITUDE	- 29 57 18.022205	0.0183
	LONGITUDE	- 60 13 20.110794	0.0185
VELL	X	2553117.5926	0.0174
	Y	-5245361.6064	0.0186
	Z	-2570955.0740	0.0169
	HEIGHT	466.3997	0.0194
	LATITUDE	- 23 55 32.609132	0.0164
	LONGITUDE	- 64 2 45.765653	0.0170
VNWX	X	2520458.2969	0.0194
	Y	-4386536.8346	0.0184
	Z	-3871469.6868	0.0177
	HEIGHT	240.7385	0.0182
	LATITUDE	- 37 36 39.275716	0.0175
	LONGITUDE	- 60 7 7.587435	0.0198
VRES	X	2918360.6434	0.0094
	Y	-4854501.5468	0.0094
	Z	-2922581.7918	0.0094
	HEIGHT	112.1900	0.0095
	LATITUDE	- 27 26 59.100565	0.0094
	LONGITUDE	- 58 59 13.745484	0.0093
VRLS	X	2461420.3053	0.0039
	Y	-5074817.7279	0.0042
	Z	-2968393.2755	0.0047
	HEIGHT	193.9599	0.0041
	LATITUDE	- 27 54 58.318837	0.0048
	LONGITUDE	- 64 7 31.413626	0.0038
VRVS	X	2661064.3884	0.0065
	Y	-4992089.3301	0.0066
	Z	-2936413.8280	0.0065
	HEIGHT	174.3452	0.0067
	LATITUDE	- 27 35 24.739342	0.0065

	LONGITUDE	- 61 56 23.549024	0.0065
VCAP	X	2453537.6745	0.0557
	Y	-5381116.0267	0.0575
	Z	-2389918.6698	0.0547
	HEIGHT	3590.0645	0.0587
	LATITUDE	- 22 8 16.505238	0.0543
	LONGITUDE	- 65 29 21.223592	0.0551
VYAV	X	2455878.0838	0.0556
	Y	-5380415.3488	0.0575
	Z	-2388862.9901	0.0549
	HEIGHT	3501.6369	0.0588
	LATITUDE	- 22 7 40.643230	0.0543
	LONGITUDE	- 65 27 56.819672	0.0550

Anexo III Las estaciones que conforman el marco POSGAR'98

Puntos principales comunes a ambos marcos de referencia:

111 puntos comunes

Total: 111 puntos principales comunes a POSGAR'94 y POSGAR'98.

Puntos vinculados a POSGAR'98 mediante vectores cortos y cuyas coordenadas provienen de vectores aislados calculados con L1.

Vinc. Pto.POSGAR principal Descripción de la vinculación

0506à	STLA	2.5 hs. de datos L1 día 074 1994,15.60 Km.
HUMAà	CORR	1.5 hs. de datos L1 día 094 1994,38.40 Km.
K261à	KLMO	1.7 hs. de datos L1 día 103 1994, 0.90 Km.
VRLSà	RBLS	1.8 hs. de datos L1 día 108 1994, 0.78 Km.
VELLà	ELLA	1.6 hs. de datos L1 día 112 1994,11.80 Km.
YAV2à	YAVI	1.5 hs. de datos L1 día 114 1994, 3.80 Km.
VRESà	RSST	2.4 hs. de datos L1 día 124 1994, 3.70 Km.
VRVSà	RVRS	2.0 hs. de datos L1 día 126 1994, 0.96 Km.
VCQIà	CQUI	2.0 hs. de datos L1 día 127 1994,10.20 Km.
VBCAà	BHBL	2.0 hs. de datos L1 día 136 1994, 3.95 Km.
VINIà	BHBL	1.8 hs. de datos L1 día 136 1994, 5.20 Km.
VNWJà	SATO	2.0 hs. de datos L1 día 139 1994,19.70 km.

Cuatro puntos no incluidos en el presente cálculo y el punto POSGAR'98 más cercano:

LOB1: Puerto Lobos, Hito 1 del paralelo 42. Cercano a LOBO.
Distancia: 0.226 Km.

CHCN: El Chocón (Red de Río Negro). Cercano a PICU. Distancia:
42.979 Km.

PARA: Hito 35 Paralelo 42. Cercano a GRDE. Distancia: 20.040 Km.

EPUY: EpuYén (Red de Río Negro). Cercano a BSON. Distancia: 21.692
Km.

Total de puntos no incluidos entre los principales: 16

Total de puntos POSGAR'94: 127 = 111 principales comunes a ambos marcos + 12 comunes vinculados con L1 + 4 puntos no comunes a ambos marcos de referencia.

Nuevos puntos CAP incluidos en POSGAR'98

BDSB: Baños de Salud.

TRES: Tres cruces.

TNDL: Tandil, Pcia. de Bs. As.

Nuevos puntos POSGAR incluidos en la red

MMDP: Mareógrafo de Mar del Plata.

CONA:

IAR2: Instituto Argentino de Radio Astronomía.

INCY:

Puntos SIRGAS que no eran parte de POSGAR'94 y son integrados a la red

IGUA Iguazú, Misiones.

UNSA Universidad Nacional de Salta, Salta.

CRIC CRICyT, Mendoza.

LPGS Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, La Plata
(IGS-ITRF)

Puntos agregados en las campañas de vinculación del punto IGUA (SIRGAS)

PSDS Posadas

SJAV San Javier

Total de puntos principales POSGAR'98

111 comunes con POSGAR'94.

3 nuevos CAP.

4 nuevos POSGAR.

4 nuevos SIRGAS.

2 nuevos por vinculación de IGUA.

12 vinculaciones realizadas con L1 con un solo vector.

136 puntos en total

Además, la red fue ajustada conjuntamente con la estación Santiago de Chile, SANT (SIRGAS-ITRF) por lo que las coordenadas SIRGAS de SANT pueden considerarse parte de POSGAR'98.

ANEXO IV Información relativa al cálculo de POSGAR'98

El anexo IV consiste en un CD-ROM que contiene los archivos de observaciones en el formato interno del Bernese, archivos RINEX, salidas de pre-procesamiento de fase, archivos finales del cálculo por sesión, salida del cálculo de las vinculaciones POSGAR-SIRGAS, y finalmente la salida de procesamiento de la solución final del marco de referencia POSGAR'98.

Anexo V Posiciones de los centros de fase de las antenas utilizadas en el procesamiento de POSGAR'98

MODEL NAME: IGS_01 30-JUN_96 -----

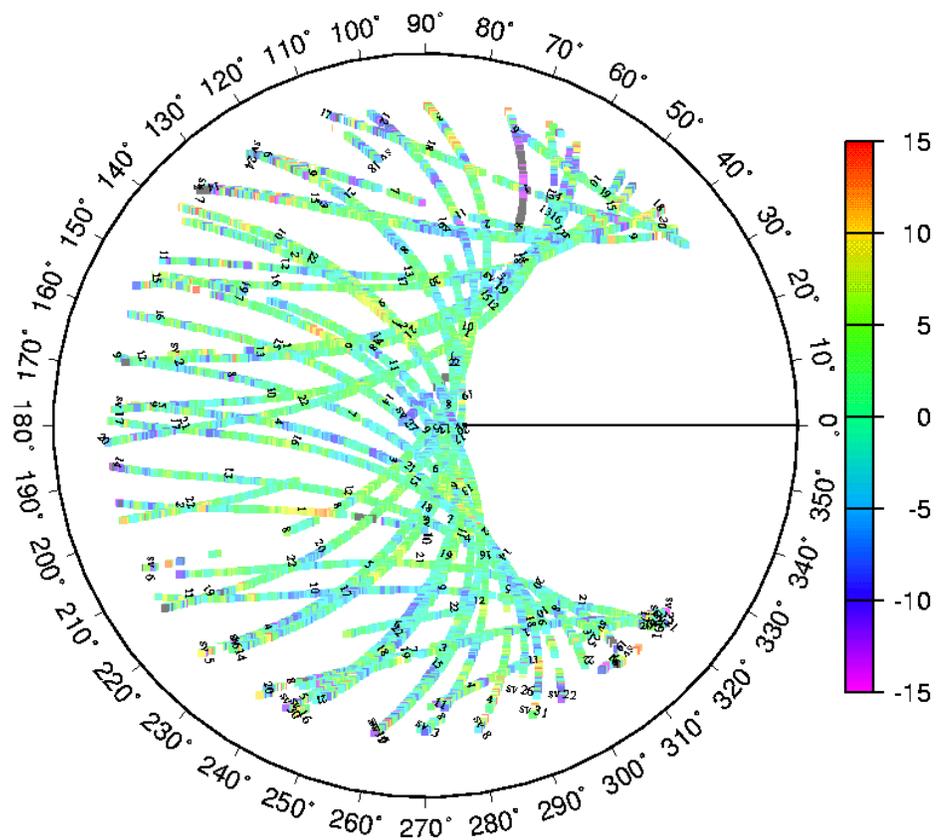
RECEIVER TYPE	FREQ	PHASE CENTER OFFSETS (M)	ELEVATION DEPENDENCE OF PHASE CENTER (MM)																					
ANTENNA TYPE	L *	NORTH	EAST	UP	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	05	00	
*****	*	*****	*****	*****	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
ROGUE DORNE MARGOLIN B	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ROGUE DORNE MARGOLIN R	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ROGUE DORNE MARGOLIN T	1	0.0	0.0	0.0	0.110																			
	2	0.0	0.0	0.0	0.128																			
TRIMBLE	1	0.0015	-0.0012	0.0751	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TR GEOD L1/L2 GP	2	-0.0011	0.0017	0.0692	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TRIMBLE	1	0.0000	-0.0030	0.0780	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ST L1/L2 GEOD	2	-0.0031	-0.0013	0.0744	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ASHTECH	1	0.0005	0.0003	0.0159	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GEODETIC L1/L2 700228	2	-0.0012	0.0008	0.0152	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ASHTECH	1	0.0	0.0	0.0460																				
DORNE MARGOLIN T	2	0.0	0.0	0.0640																				

Los offsets medios de los centros de fase se refieren al ARP o punto de referencia de la antena en cada caso.
 Los offsets verticales del centro de fase en las antenas Ashtech fueron corregidos con -64 mm para reducir al ARP ya que en POSGAR las alturas de antena ASHTECH se refieren siempre al tope del plato y no al ARP.
 En el caso de los equipos TRIMBLE, las alturas de antena medidas (al plato) fueron corregidas al ARP al transformar a RINEX.

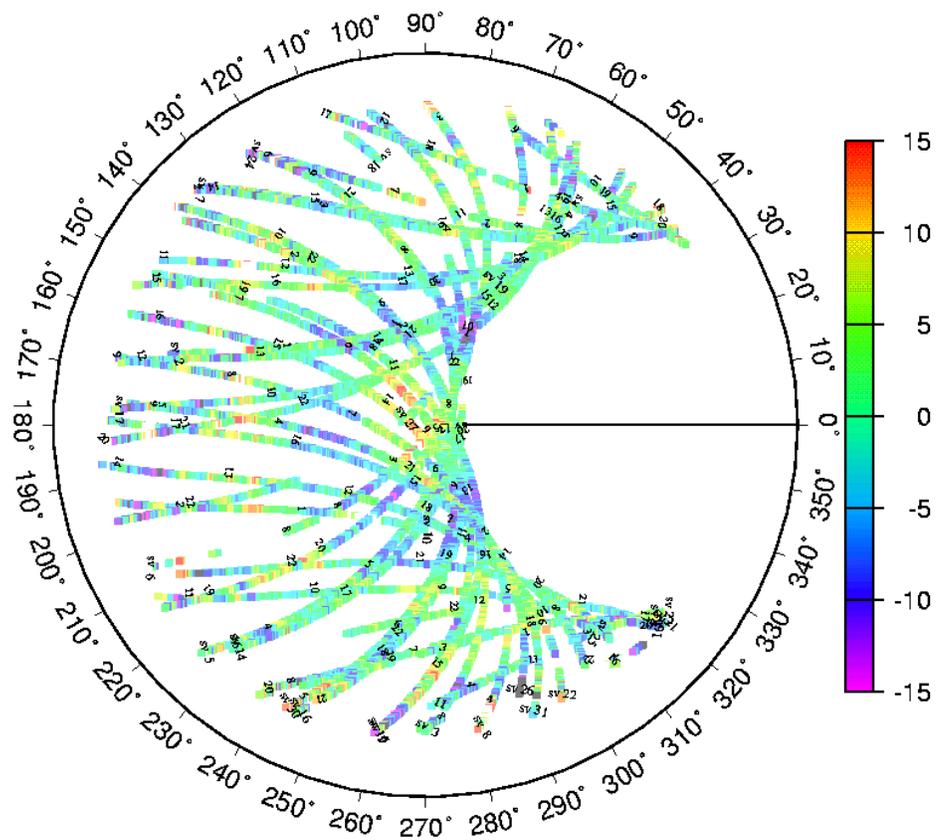
Anexo VI Residuos de cero diferencias en Wettzell

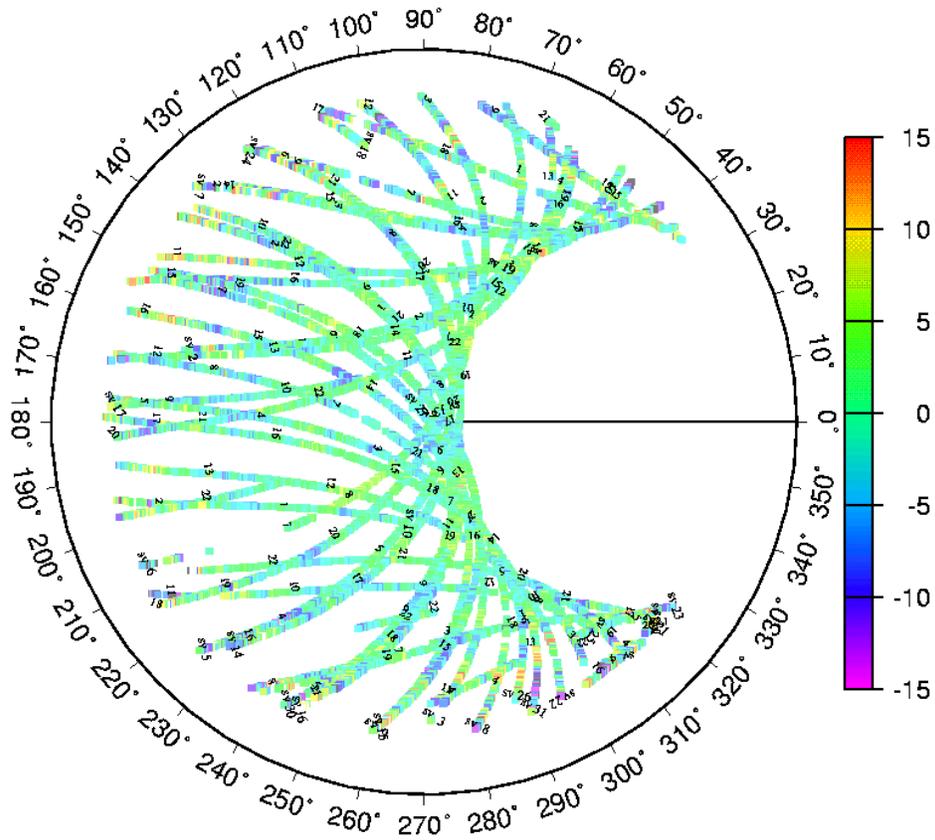
Se muestran aquí los resultados del análisis de los residuos de cero diferencias para dos antenas ubicadas en la estación Wettzell que participaron en el ajuste de una red regional en cinco días consecutivos como se describió en §5.2.4.

Los residuos se muestran en proyección polar alrededor de la estación. El norte se encuentra en la dirección a la derecha de la página y el Este es hacia la parte superior. La distancia cenital varía linealmente de 0° en el centro del gráfico hasta 90° en el borde circular, que representa al horizonte local. Los residuos se representan en una escala que va desde -15 a 15 mm. A lo largo de los arcos, se indican las horas UT enteras con etiquetas orientadas perpendicularmente a dichos arcos. En el inicio de cada arco, y perpendicularmente a él, se identifica al satélite correspondiente.

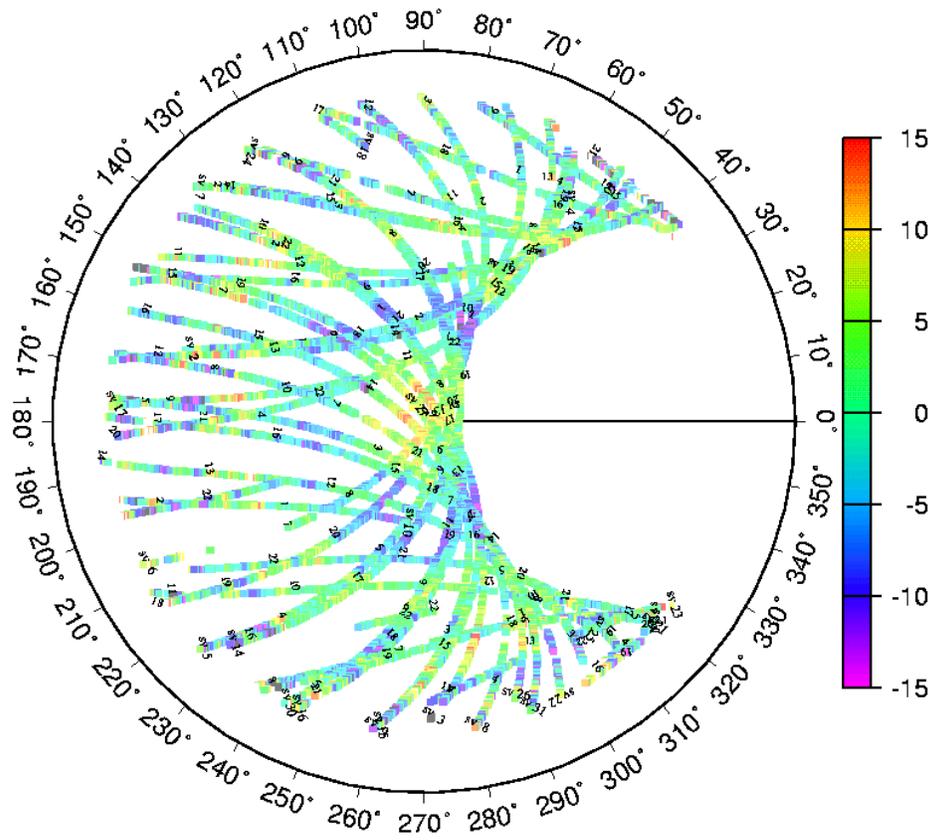


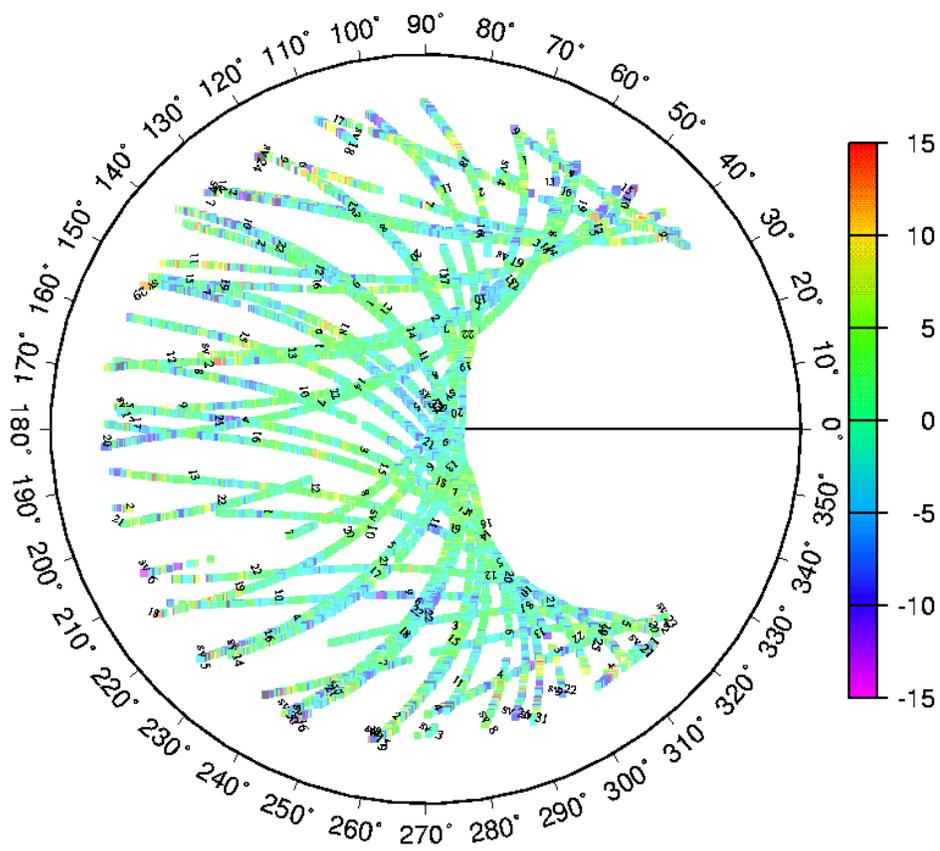
Dia 134. Fig. VI-1 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-2 (abajo): TRM20220.00+GP+RD



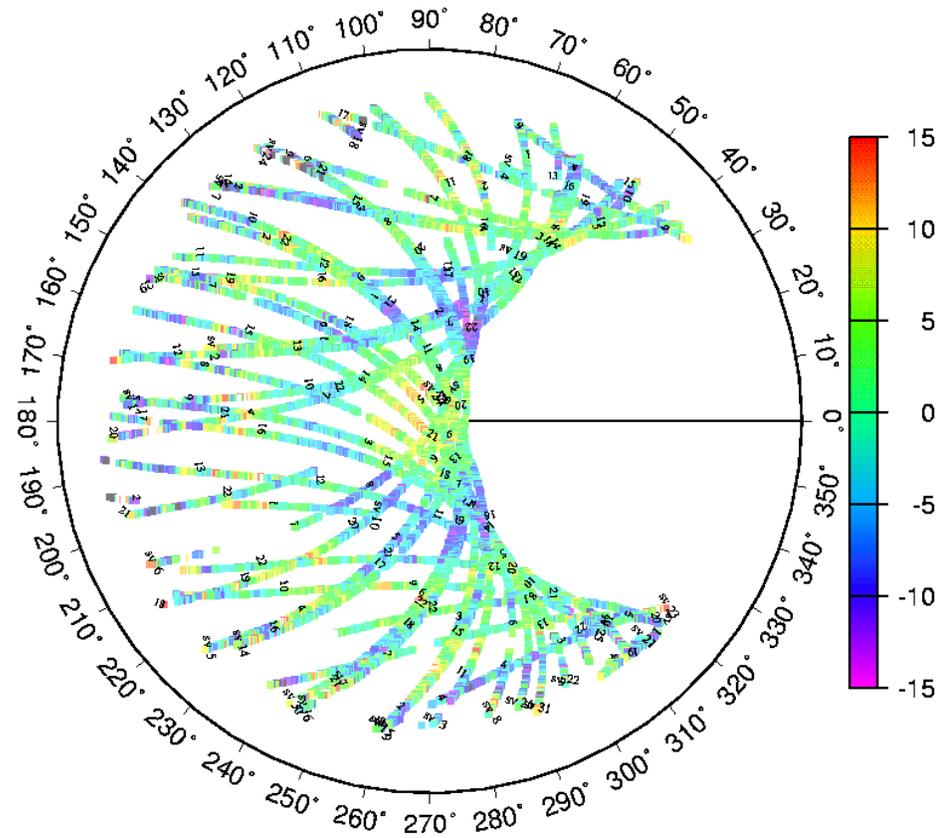


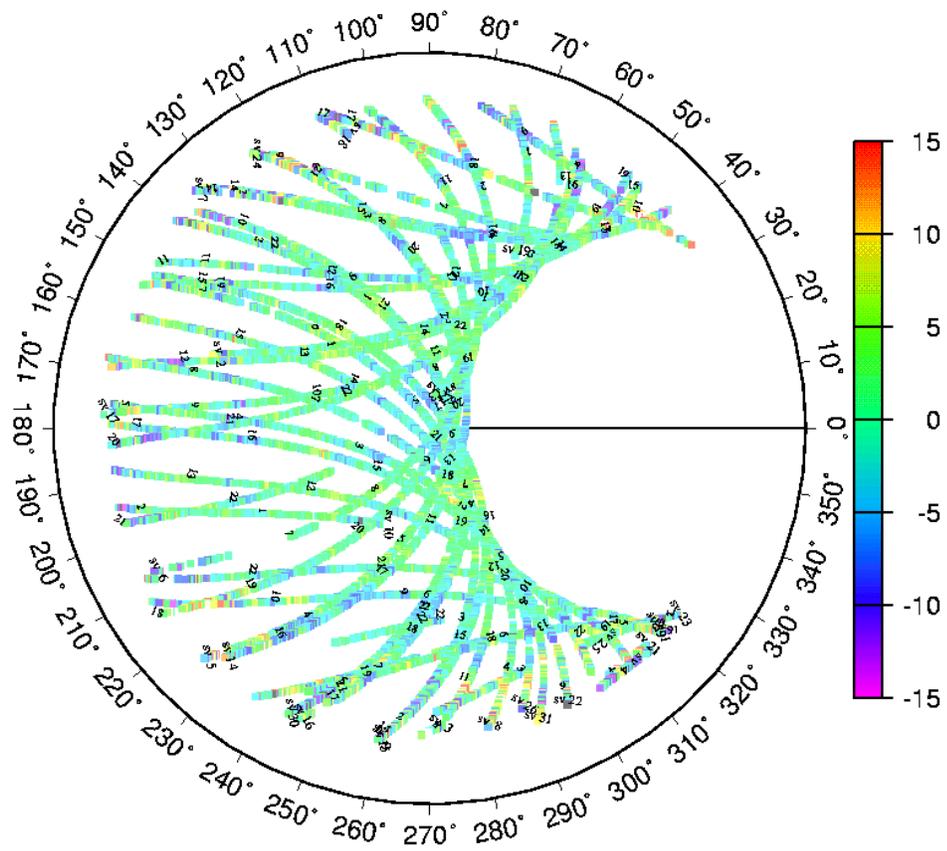
Día 136. Fig. VI-3 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-4 (abajo): TRM20220.00+GP+RD



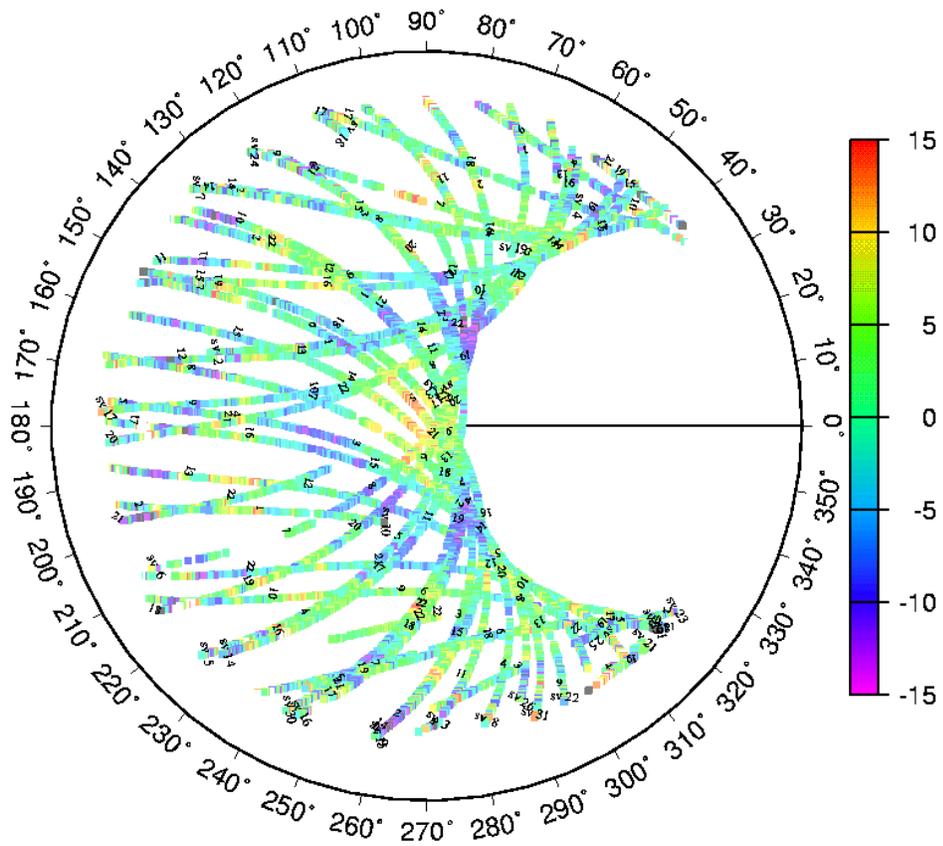


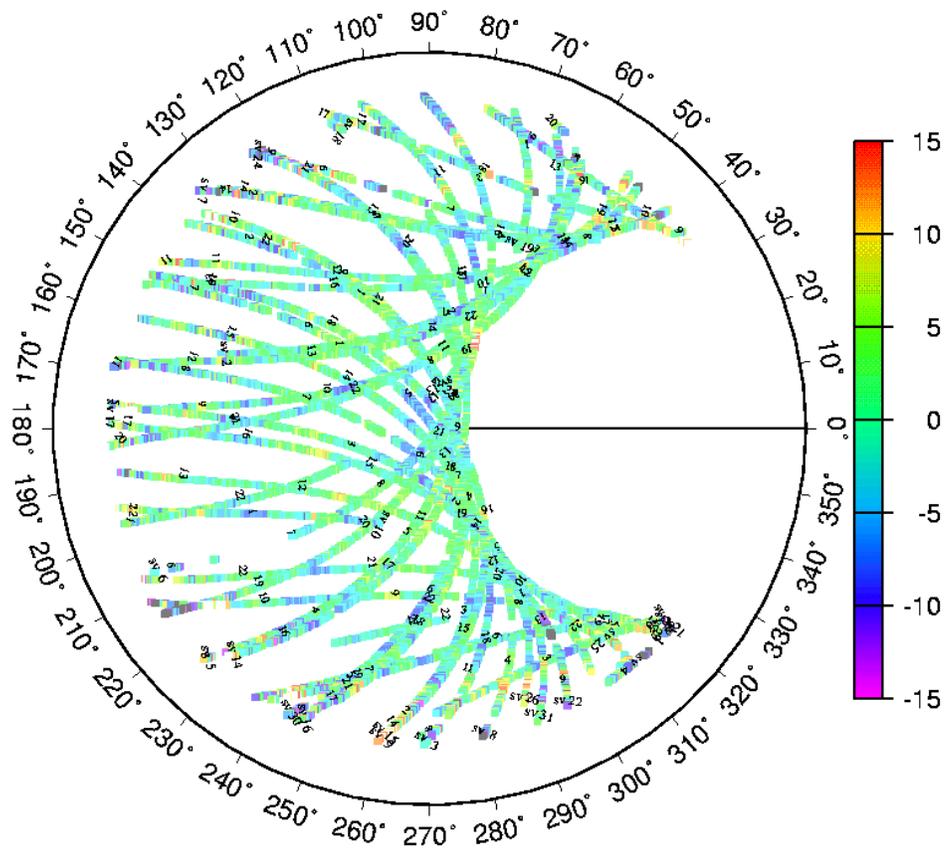
Día 138. Fig. VI-5 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-6 (abajo): TRM20220.00+GP+RD



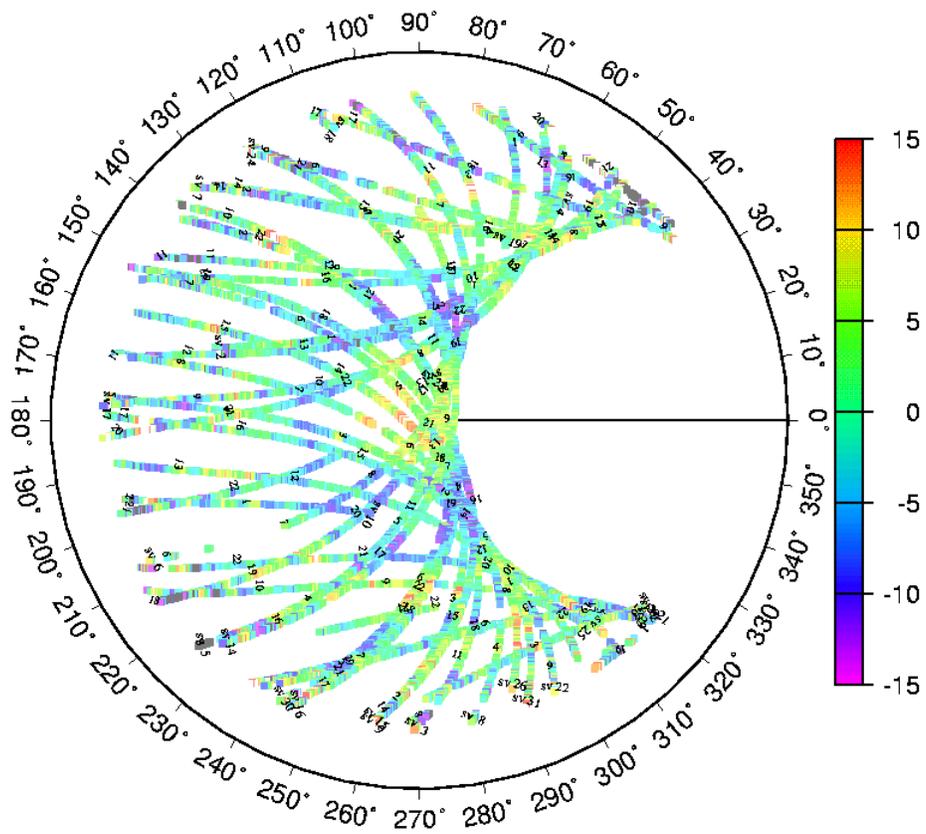


Día 139. Fig. VI-7 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-8 (abajo): TRM20220.00+GP+RD





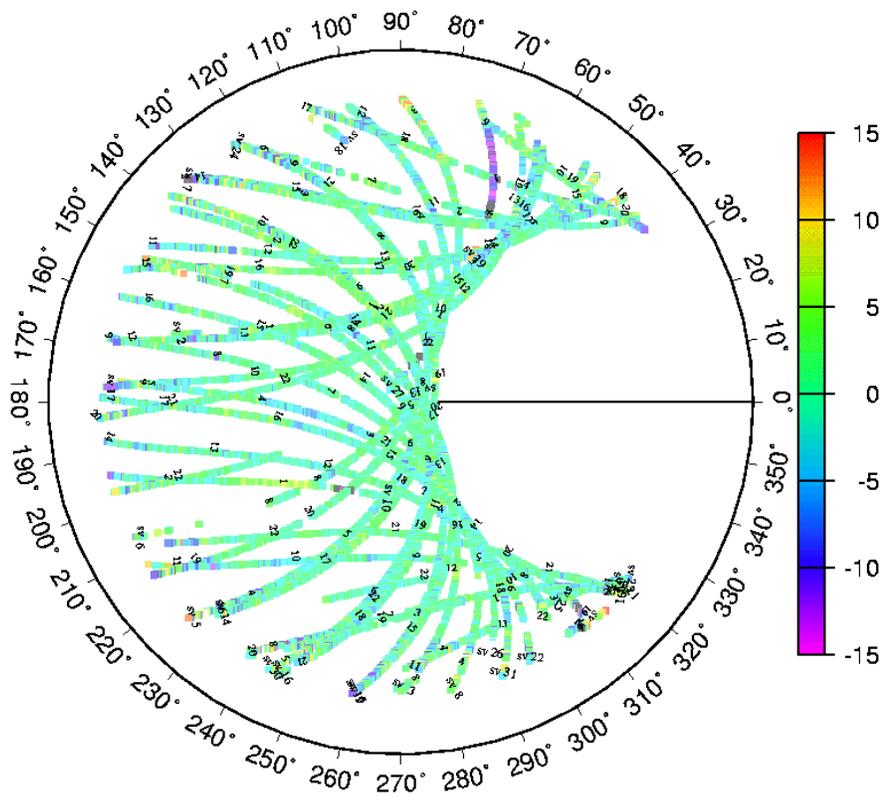
Dia 140. Fig. VI-9 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VI-10 (abajo): TRM20220.00+GP+RD



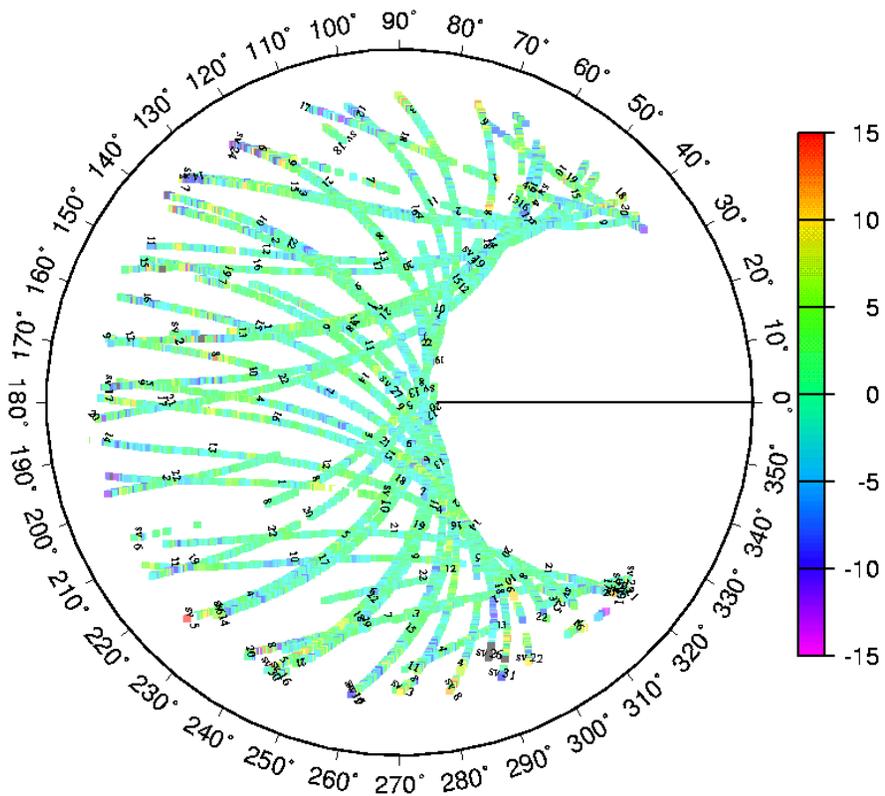
Anexo VII Residuos de cero diferencias (valores medios extraídos)

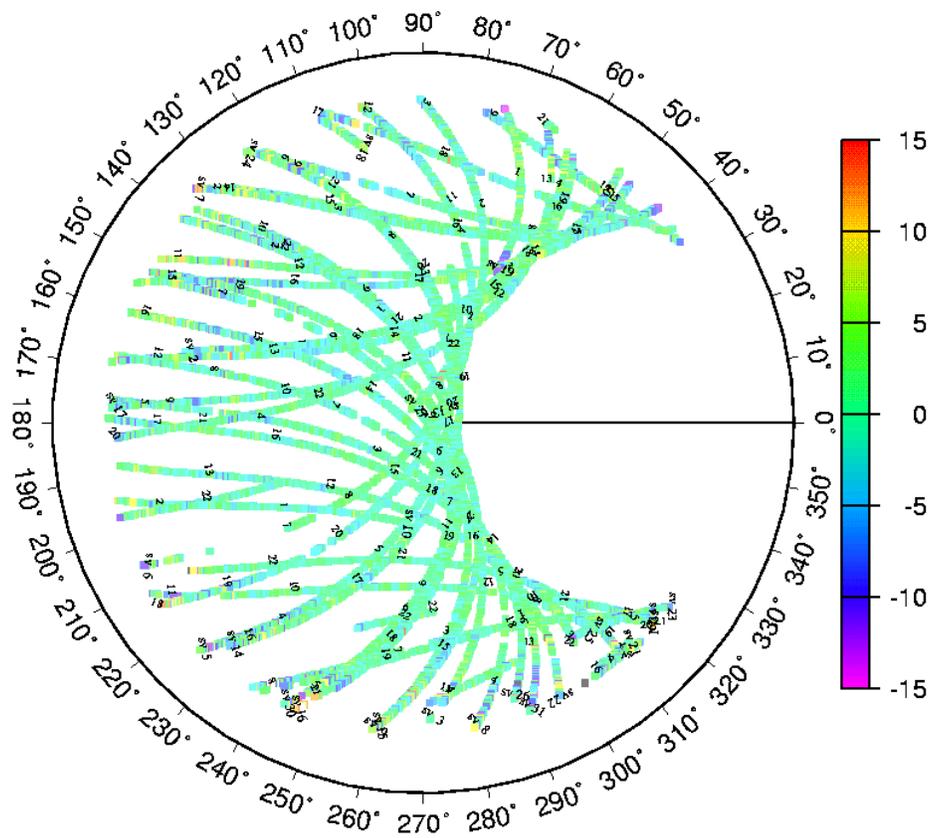
Se muestran aquí los resultados del análisis de los residuos de cero diferencias para dos antenas ubicadas en la estación Wettzell que participaron en el ajuste de una red regional en cinco días consecutivos como se describió en §5.2.4. A diferencia de los resultados mostrados en el anexo VI, aquí los residuos resultan de haberles sustraído sus valores medios a lo largo de los cinco días como se explica en §5.2.5.

Los residuos se muestran en proyección polar alrededor de la estación. El norte se encuentra en la dirección a la derecha de la página y el Este es hacia la parte superior. La distancia cenital varía linealmente de 0° en el centro del gráfico hasta 90° en el borde circular, que representa al horizonte local. Los residuos se representan en una escala que va desde -15 a 15 mm. A lo largo de los arcos, se indican las horas UT enteras con etiquetas orientadas perpendicularmente a dichos arcos. En el inicio de cada arco, y perpendicularmente a él, se indentifica al satélite correspondiente.

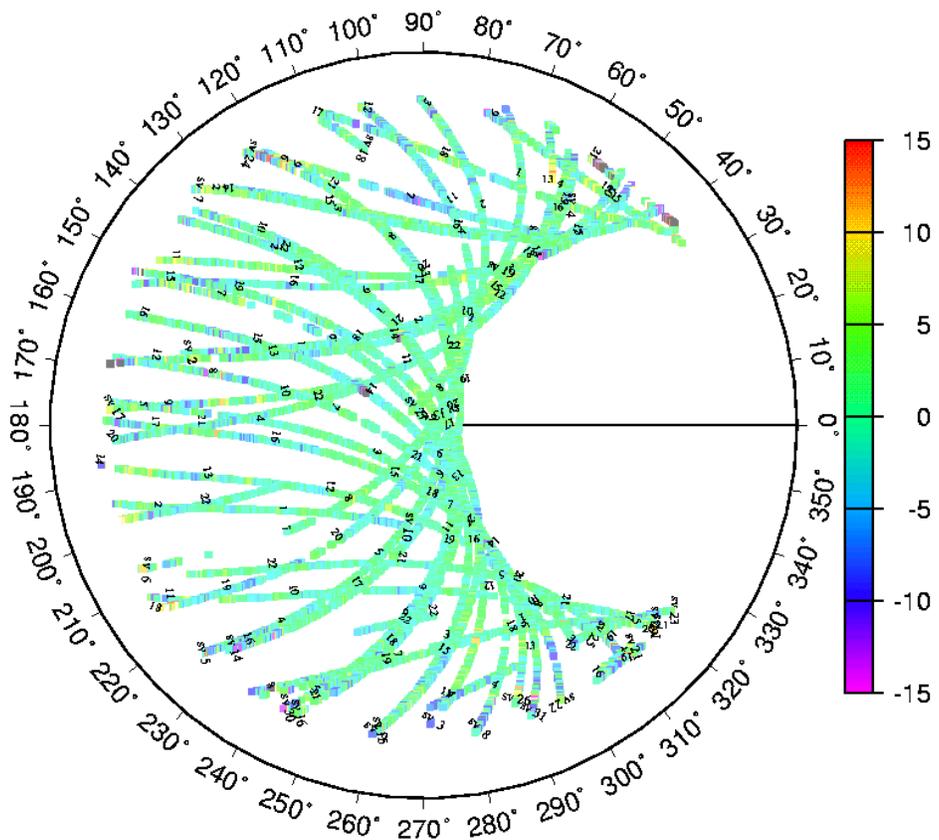


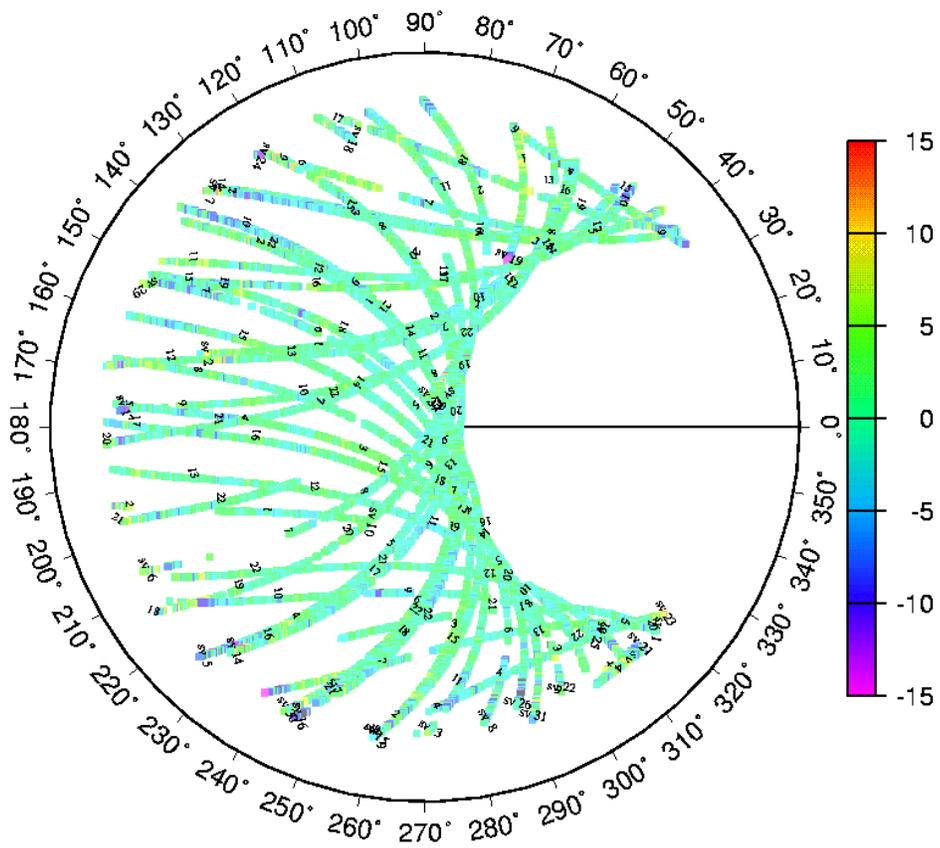
Dia 134. Fig. VII-1 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-2 (abajo): TRM20220.00+GP+RD



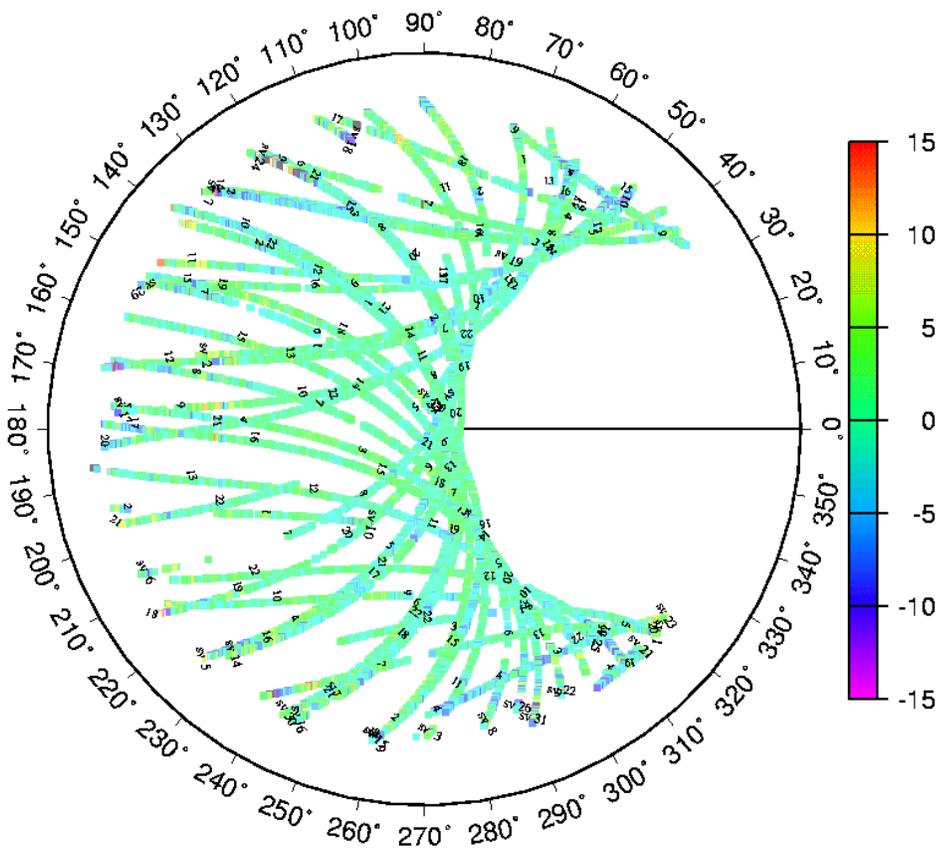


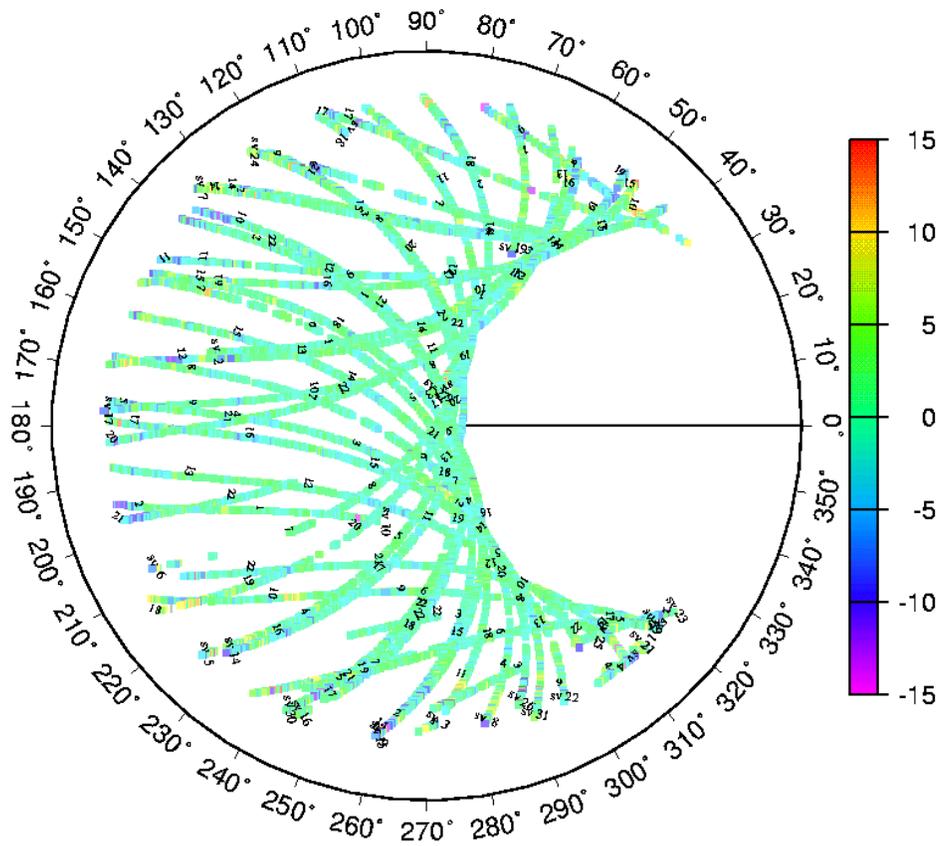
Día 136. Fig. VII-3 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-4 (abajo): TRM20220.00+GP+RD



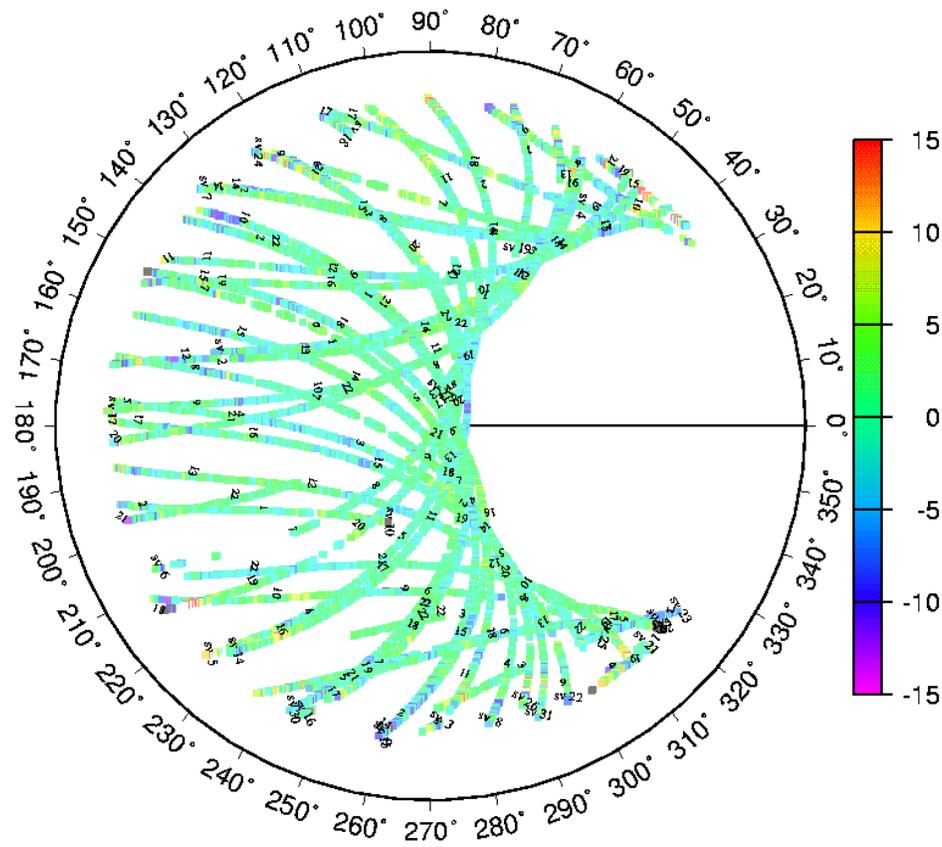


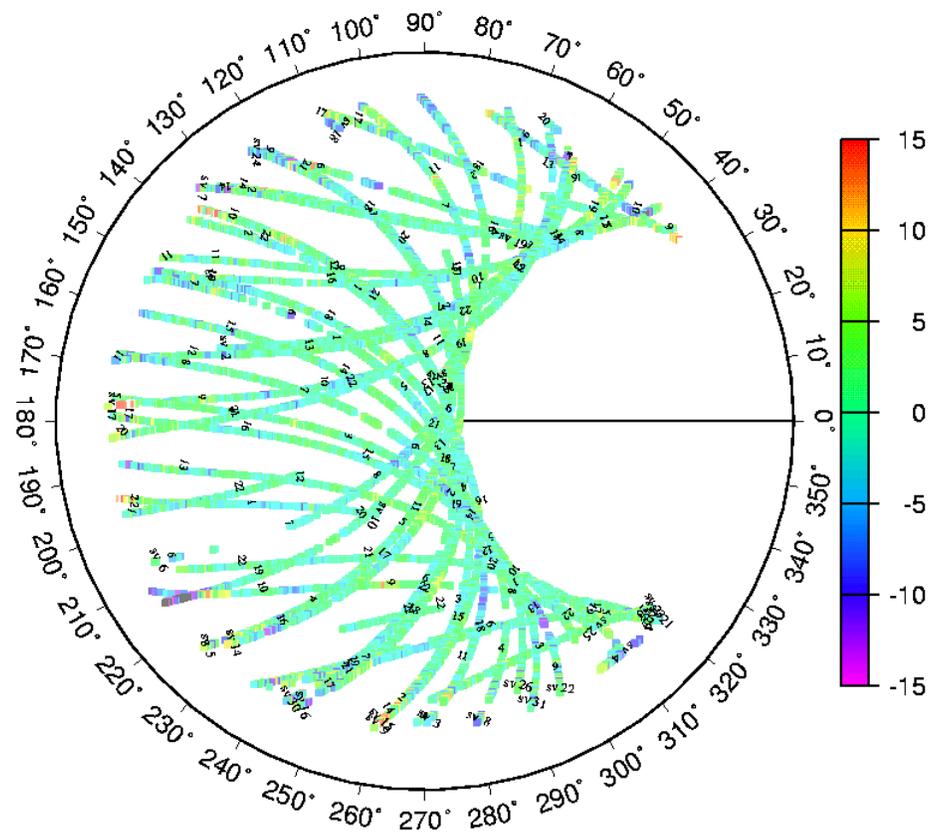
Día 138, Fig. VII-5 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-6 (abajo): TRM22020.00+GP+RD





Día 139. Fig. VII-7 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-8 (abajo): TRM20220.00+GP+RD





Día 140. Fig. VII-9 (arriba): AOAD/M_T, Fig. VII-10 (abajo): TRM20220.00+GP+RD

