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-Miní. 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 1º a 4º 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. Constaba 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: 19º 45' 41.6527" y 48º 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 del a 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 de1993.

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.

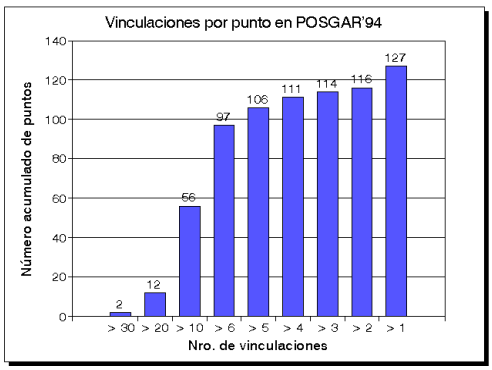

Figura 4.1: Vinculaciones por punto

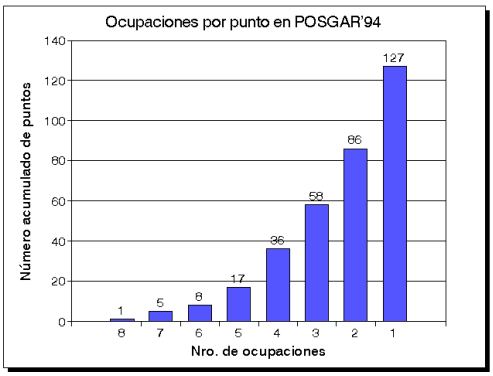

Figura 4.2: Nro. de ocupaciones por punto

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	$\Delta\varphi$ [cm]	$\Delta\lambda$ [cm]	Δh [cm]
Lote 10B	51	35	-17
Lote 24	51	9	-22
El Maitén	42	19	32
El Morro	52	18	36
V. Robles	55	18	4
R. Grande	86	17	-133

Vector Lote 10B-	Distancia [km]	Δ Dist. [ppm]
Lote 24	900	0.03
El Maitén	498	-0.01
El Morro	1438	0.03
V. Robles	2040	-0.01
R. Grande	862	0.30

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 varia 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:

ΔX=-148 m ΔY=136 m ΔZ=90 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]:

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

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:

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

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, BDSD 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.

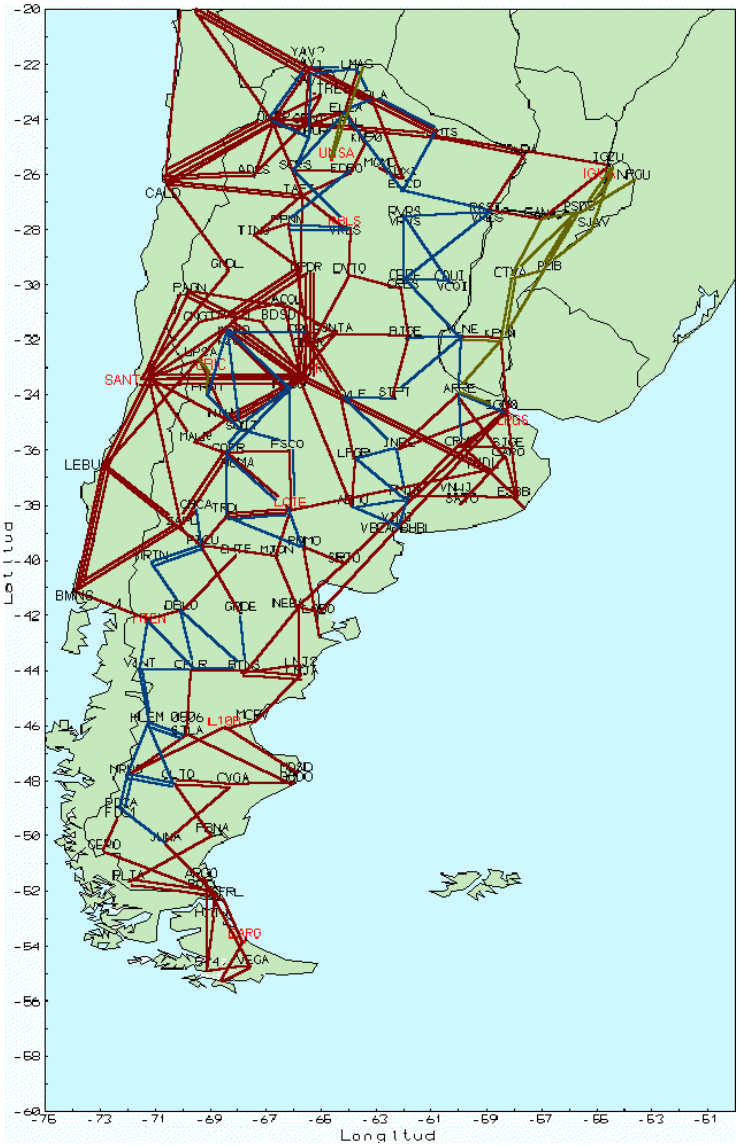

Figura 4.3: Vectores calculados en POSGAR'98. En rojo, vectores POSGAR 1993 y CAP; en azul, vectores POSGAR 1994; en amarillo, vinculaciones POSGAR-SIRGAS. Los puntos SIRGAS se indican en rojo

CRIC fue vinculada en noviembre de 1996 mediante dos sesiones de observación de 11 horas de duración que incluyeron los puntos POSGAR'94, PRDT y UPSA respectivamente.

IGUA fue vinculada mediante una campaña realizada por el IGM a principios de 1995. Esta campaña abarcó toda la Mesopotamia argentina, con períodos de observación de más de 6 horas y no menos de dos ocupaciones por punto. Se ocuparon los puntos POSGAR'94: SANA, IGZU, NPGU, CTVA, VLNE, KPLN, ARRE e IGM0.

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 descripto 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 descripta 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 Commitee, 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

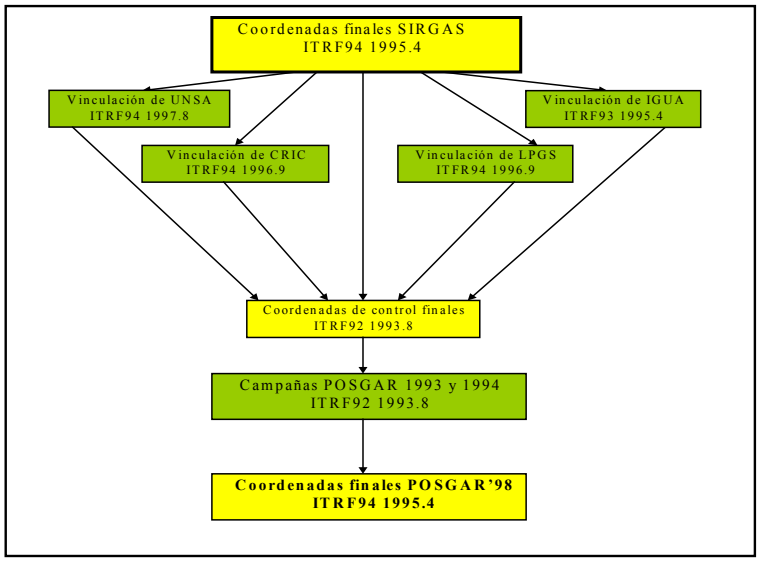

Figura 4.4: Establecimiento del sistema de referencia en el cálculo de POSGAR'98

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, LPGS y UNSA. La metodología para seleccionar los pesos correctos fue la descripta 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

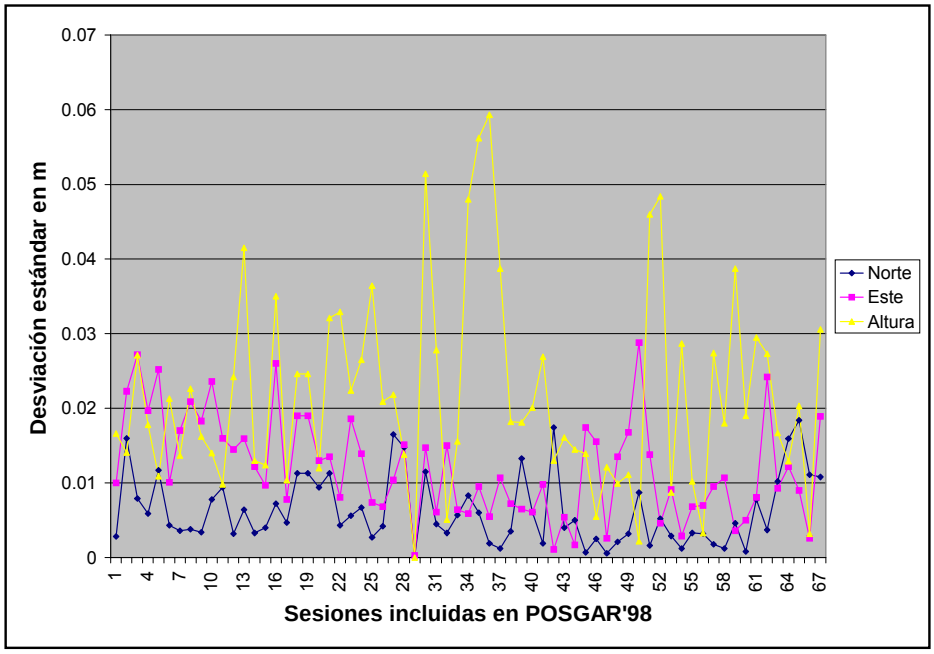

Figura 4.5: Repetibilidad de las coordenads de POSGAR'98 a través de las desviaciones estándar de los residuos en las direcciones Norte, Este y Altura

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.

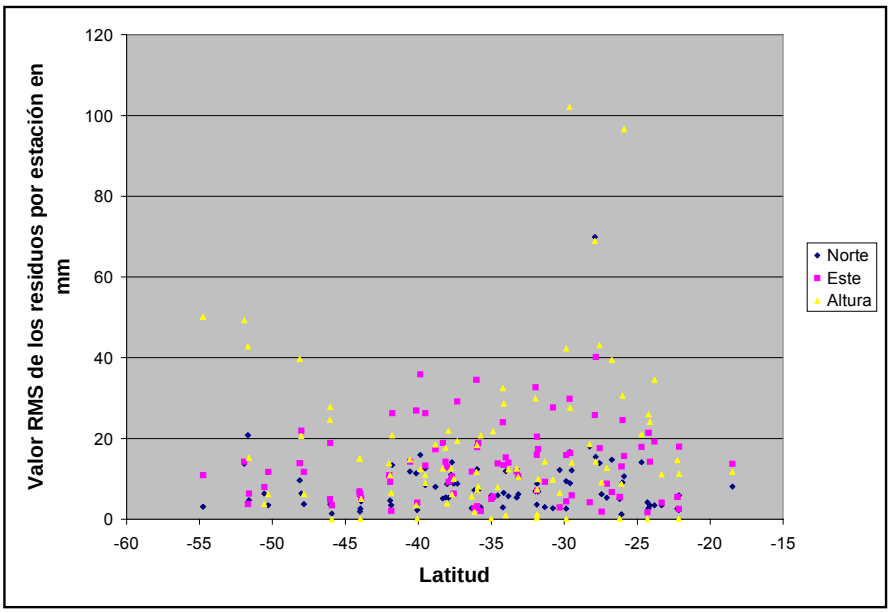

Figura 4.6: Desviaciones estándar de transformaciones de tres parámetros entre las soluciones por sesión y la que resulta de la combinación de todas. Se discrimina por sesión y por componente

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.

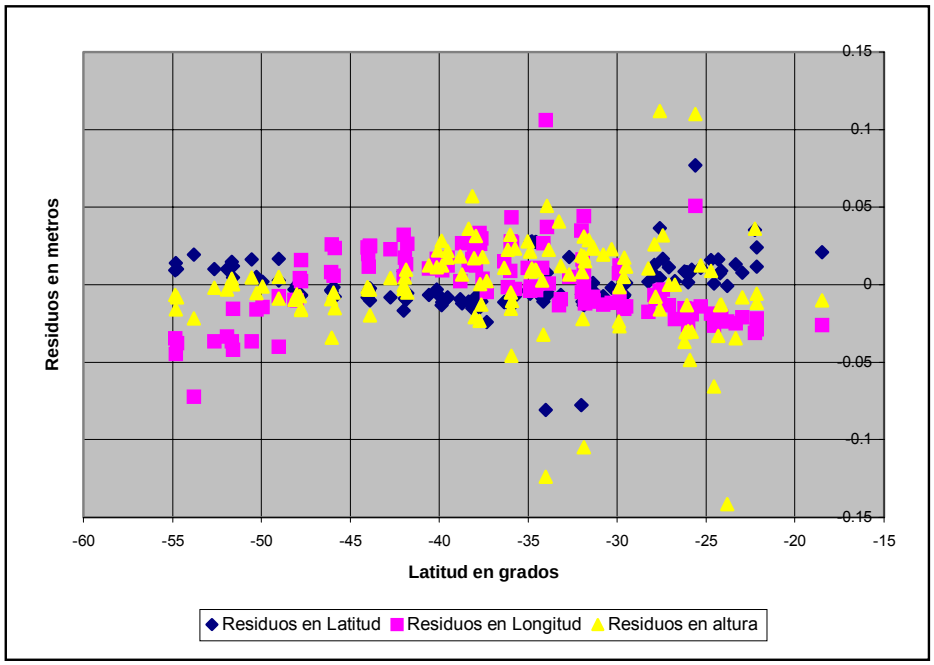

Figura 4.7: Residuos de una transformación de 7 parámetros entre solución libre de POSGAR'98 y otra obtenida de fijar todos los puntos de control disponibles

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 Commitee, 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.

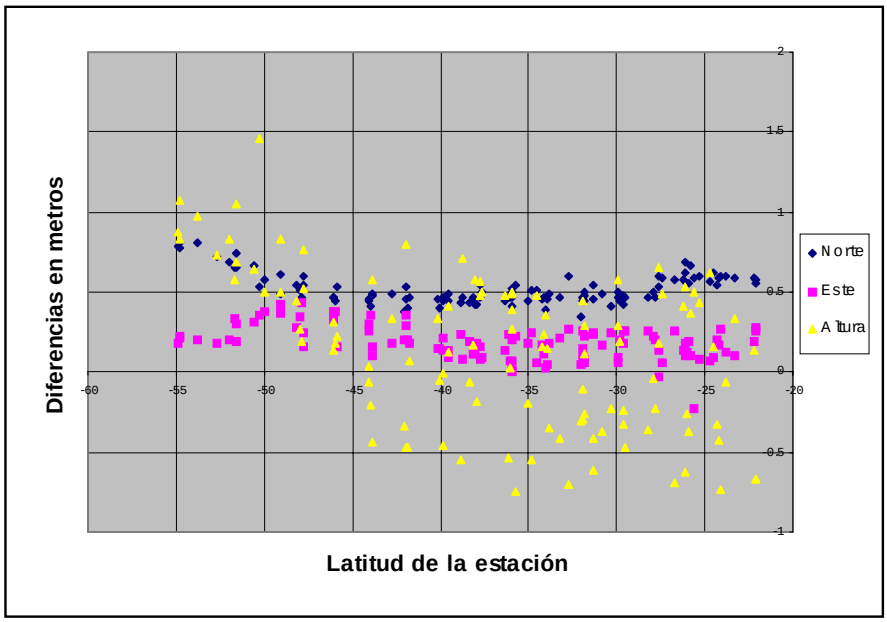

Figura 4.8: Diferencias entre coordenadas POSGAR'94 y POSGAR'98

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