

## Capítulo II

# Evolución del problema de sistema de referencia en nuestro país.

---

### 2.1.Introducción

Desde la antigüedad el hombre ha hecho uso de los sistemas de referencia por distintos motivos sociales.

La situación actual que vive la República Argentina en lo que respecta a los sistemas de referencia es, al igual que en muchos otros países sudamericanos, consecuencia de un enfrentamiento entre 2 estructuras, una que responde a los conceptos de la geodesia clásica y la otra a la aparición de la geodesia satelital.

Dentro de los conceptos de la geodesia clásica se encuentran limitantes que no permiten definir con la precisión necesaria que hoy se requiere, coordenadas de puntos en sistemas de referencia geocéntricos. Entre los cuales podemos mencionar:

- El desconocimiento de la deflexión de la vertical (ángulo entre la normal al elipsoide y la dirección de la vertical del lugar), necesaria ya que las coordenadas en un sistema geocéntrico están referidas a la normal al elipsoide, mientras que las mediciones en este concepto se realizan con instrumental clásico (óptico y/o electrónico), el cual se centra y nivela respecto a la dirección de la línea de la plomada en el lugar (dirección de la vertical). Este ángulo hace a la orientación del sistema de referencia.
- Por otro lado el desconocimiento preciso de la diferencia de nivel entre la superficie del elipsoide, al cual se refieren las coordenadas geodésicas y el geoide, que es la superficie que mejor se aproxima al campo de gravedad terrestre.

Debido al desconocimiento preciso de estas dos magnitudes se dio como solución, la definición de sistemas geodésicos locales o datums locales, lo cual consistía en considerar el valor de la deflexión de la vertical como cero en un determinado punto de la superficie terrestre, al cual se llamó Datum. Se admitió que las coordenadas astronómicas (determinadas sobre la vertical de ese topocentro) fuesen consideradas como sus coordenadas geodésicas y que el elipsoide de referencia sería coincidente con el geoide en ese punto, considerando una ondulación geoidal igual a cero,  $N=0$ . De esta manera el sistema de referencia resultante deja de ser geocéntrico para convertirse en local. Esta definición de datum se aplicó en distintos países y/o regiones sirviendo de solución en una época donde las necesidades de la representación cartográfica y la georreferenciación no sobrepasaban los límites nacionales.

Los elipsoides de estos datums regionales no fueron elegidos geocéntricos sino que el objetivo fue que se adaptasen lo mejor posible a la región de interés. Como resultado se emplearon en los distintos datums, diferentes elipsoides que en muchos casos no coinciden y que están rotados ligeramente unos con respecto a los otros.

En este contexto la República Argentina definió su propio datum nacional, el cual se denominó Campo Inchauspe, ubicado en el noroeste de la provincia de Buenos Aires ( $\varphi \cong -36^\circ$  y  $\lambda \cong -62^\circ$ ). Esta tarea fue realizada por el Instituto Geográfico Militar (IGM), durante el siglo XX, con el objeto de conformar una estructura geodésica básica de alta calidad, capaz de satisfacer las crecientes necesidades de la comunidad. Se comenzó con trabajos de triangulación aislados para luego integrarse en un sistema de referencia único.

La técnica de levantamiento utilizada fue la de triangulación generando 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 comenzó a utilizarse la técnica GPS.

A comienzos de la década del 90, especialistas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) 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 el establecimiento 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 Instituto Alemán de Investigaciones Geodésicas de Munich (DGFI, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) y la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, FCAG de la UNLP. Esta cooperación permitió mejorar POSGAR e integrarlo a SIRGAS'95 por medio de POSGAR'98. Su realización se vio impulsada por el desarrollo de una intensa cooperación entre la FCAG y el IGM.

En este capítulo se hace en primer lugar una breve descripción de la evolución del marco de referencia nacional clásico. En segundo lugar se describe el marco de referencia POSGAR'94, mostrándose algunos índices de calidad de la red. Luego se presenta una solución al problema de la transformación entre marcos de referencia de diferente naturaleza como son CAI'69 y POSGAR'94. En cuanto a la materialización y densificación de tales sistemas en algunas provincias argentinas, se detalla una compilación de información obtenida de distintas fuentes la cual muestra fehacientemente la escasa política de apoyo a la georreferenciación.

A continuación se presentan distintas redes de control geodésico establecidas en el país y finalmente se sintetiza el estado de integración entre la red geodésica nacional (PGAR'98), el sistema geodésico Sudamericano (SIRGAS) y el sistema global (ITRF) haciendo hincapié en la ventaja de tal integración.

## **2.2. Evolución del marco de referencia nacional.**

En esta sección 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].

Gran parte de la siguiente síntesis histórica ha sido extraída de [J. Moirano, 2000].

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 espaciados 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 un 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 Fe, 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 posteriores a 1932 partieron de la base y punto astronómico Itaembe-Miní. En Misiones las cadenas arrancaron de la misma base y punto astronómico que las de Corrientes. En Mendoza, de 1928 a 1936 se midió una cadena que va desde Neuquen hasta San Juan apoyada en la base y estación astronómica de 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 N° 12696, llamada Ley de la carta (año 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 constituyó 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 descritos 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 el 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 fue 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 N° 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.

La distancia entre puntos materializados varía para las distintas regiones del país. La ubicación de tales puntos responde a los criterios de elección de los sitios de la triangulación y poligonación: puntos dominantes, visuales despejadas, fuerza de las figuras, limitación de distancias. Estas condiciones localizaron los puntos dentro de los campos o en las cumbres de los cerros, con un acceso no siempre sencillo desde las rutas y caminos.

El desarrollo de la red fue realizado a través de cadenas de triángulos dobles superpuestos (cuadriláteros) con extensiones de unos 200 km formando un reticulado uniforme. En la intersección de las mismas se estableció un punto de Laplace y una base geodésica, medida con

alambres de invar inicialmente y luego con distanciómetros electro-ópticos. En los últimos tramos de la red se empleó la combinación de la medida de ángulos y lados en todas las figuras. El contralor de los electrodistanciómetros se llevó a cabo en la Base de Contraste para electrodistanciómetros establecida en Arrecifes en 1975.

Las técnicas de ejecución de las redes y las tolerancias de medición se las puede encontrar en las clásicas Instrucciones Técnicas para los Trabajos Geodésicos (I.T. 6a.) cuya primera edición data de 1946 y en las más modernas Instrucciones Técnicas para los Trabajos de Campo (ITTC), fascículo Triangulación y Poligonación, editadas en 1983, por el IGM.

En cada punto de la red, para poder observar los circundantes se erigía la torre de triangulación de sección cuadrada con alturas que alcanzaron los 36 metros. En el caso de vértices ubicados en las cumbres de las montañas, bardas o lomas se instaló la llamada torre de montaña de aproximadamente 1.20 m de altura que permite estacionar el teodolito.

Para encontrar los puntos se cuenta con las conocidas monografías elaboradas por los equipos de reconocimiento.

A pesar de su ubicación algunos de los puntos fueron utilizados por redes posteriores: Doppler, POSGAR y redes provinciales.

Todos los vértices de la red Campo Inchauspe tienen un punto cercano para la orientación de los trabajos derivados: el pilar de acimut, que tiene la característica adicional de estar ubicado en un sitio fácilmente identificable en las fotografías aéreas.

El tamaño y la forma del elipsoide de referencia asociado con el sistema de coordenadas argentino Campo Inchauspe se hizo coincidir con el del Elipsoide Internacional de 1924, que ya había sido adoptado por la Argentina junto con la proyección Gauss-Krüger mediante la Disposición Permanente Nro. 197 (24 abril 1925) del Instituto Geográfico Militar. Sus parámetros son:

- Semieje mayor,  $a = 6.378.388$  m.
- Aplastamiento,  $f = 1/297$
- Semieje menor,  $b = 6.356.911,946$  m
- Excentricidad primera,  $e = 0,081\ 991\ 889\ 98$
- Excentricidad segunda,  $e^* = 0,082\ 268\ 889\ 61$

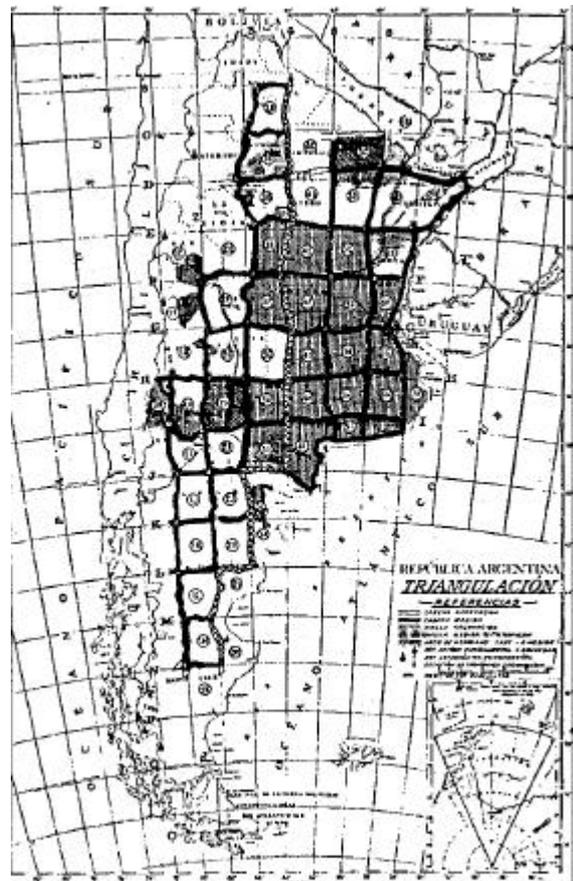
Su origen y orientación espacial se ajustaron regionalmente para que resultase tangente al geode en el punto ubicado en Campo Inchauspe ( en la provincia de Buenos Aires,  $\varphi \cong -36^\circ$ ,  $\lambda \cong -62^\circ$ )

### 2.2.1. Campo Inchauspe, la compensación de 1969

Quince años después, los polígonos cerrados eran 19. Se realizó entonces un recálculo de la estación astronómica Campo Inchauspe para reducirla al Origen Convencional Internacional (CIO.) recomendado por la U.G.G.I. en 1967 y el ajuste de la red (1000 puntos con 5000 observaciones: ángulos, distancias y acimutes) mediante el método de variación de coordenadas geográficas. La obra constituyó una etapa trascendente para la geodesia argentina. Es necesario significar el aporte de Esteban Horvat, Alfredo Elías y Alberto Christensen con el apoyo de Luis María Martínez Vivot, que por ese entonces era el jefe del Departamento Geodésico del IGM y David Byars del antiguo Army Map Service.

En la época la computación electrónica resolvía problemas de cálculo complejos y la metodología había evolucionado desde las ecuaciones de condición, a la variación de coordenadas geodésicas en este caso.

El error medio de la unidad de peso del ajuste fue  $0.42''$  y a la compensación de la red fundamental siguieron las compensaciones de las redes de densificación de primero y segundo orden medidas para la época. Esta red y sus coordenadas recibieron el nombre de Campo Inchauspe 1969. **Figura N° 2.1**



**Fig. 2.1 Red de triangulación del IGM-CAI69**

A continuación, y a medida que se cerraban polígonos o se completaban las redes de densificación se realizaba su compensación. Dentro del marco rígido de cada orden superior se calcularon y ajustaron las redes de tercero y cuarto orden y también se redujeron al mismo sistema los trabajos previos existentes en el país.

La finalización de los trabajos de triangulación y poligonación fue marcada por la aparición de la geodesia satelitaria. Los puntos con coordenadas Campo Inchauspe 1969 sumaban 18000 y la cantidad de anillos de primer orden cerrados 44.

La precisión de la red puede considerarse comprendida entre 3 y 10 ppm en base a los resultados estadísticos de las compensaciones parciales. También puede analizarse a partir de su comparación con patrones externos. Al respecto existen dos principales: la red Doppler 1978 y la red POSGAR 94.

La comparación de una decena de vectores (cuerdas) entre la red Doppler y la red Inchauspe presentó una discrepancia media de 2.7 ppm.

Al hacer un análisis similar respecto de la red POSGAR, esta vez cotejando 30 líneas geodésicas, la disparidad fue de 3.3 ppm.

### **2.2.2. Transición en busca de sistemas de referencia geocéntricos**

La georreferenciación en CAI69 fue suficiente hasta las décadas del 80 y 90, época en la cual se hacen notar las deficiencias del sistema local y la necesidad de un sistema más preciso.

Los avances en el campo de las comunicaciones y de la informática produjeron cambios importantes en la sociedad, como avances en las relaciones comerciales internacionales, desarrollo de macro emprendimientos entre países como ser túneles, gasoductos, electroductos, explotaciones forestales, mineras, etc. Todo esto denunciaba la necesidad y urgencia de contar con cartografía en sistemas de referencia únicos e internacionales, lo cual no existía hasta aquel momento, al menos no en Sudamérica. Simultáneamente se produjeron avances importantes en la geodesia espacial, con el desarrollo de los métodos de posicionamiento satelitales en primer lugar el sistema Doppler y posteriormente el GPS. Estos sistemas de posicionamiento permitían superar la precisión y los límites impuestos por los métodos clásicos, ya que se trataba de sistemas geométricos espaciales, referidos a la normal al elipsoide, independizándose casi por completo de la dirección de la gravedad en los puntos a materializar. Tales sistemas dieron lugar a la materialización de sistemas de referencia geocéntricos internacionales.

### ***Técnicas geodésicas aplicadas en el país.***

#### ***La Red DOPPLER.***

La tecnología satelital tuvo sus primeros aportes en nuestro país mediante la tecnología Doppler.

Los primeros trabajos dentro de esta tecnología Doppler en territorio argentino fueron realizados en el año 1971 mediante equipos ITT 5500 en dos estaciones de la red: Villa Dolores y Conesa. Los equipos y el personal pertenecían a U.S: Topocom y formaban parte de los trabajos de apoyo al estudio del Datum Sudamericano de 1969.

Se compararon las distancias obtenidas a partir de las observaciones satelitarias terrestres. La diferencia fue de 1m en una cuerda de 900 km.

Otro trabajo preliminar de poca magnitud fue cumplido en diciembre de 1976 con el apoyo de la empresa Decca Survey (latinoamerica), registrándose pasos de satélites con un equipo JMR1 en tres estaciones de la provincia de Buenos Aires. El objeto principal de este ensayo fue observar el comportamiento de los equipos en el terreno, las necesidades de apoyo y movilidad y la duración de las operaciones. A partir de allí se proyectó una red de 18 puntos DOPPLER que abarcaría la totalidad de la República Argentina con miras a:

- I. Obtener los parámetros de transformación entre el sistema nacional y el sistema NWL 9D (o el WGS'72), en que se expresaban las efemérides precisas de dichos satélites
- II. Comparar la red CAI'69 con los resultados DOPPLER.
- III. Realizar una nueva compensación global de la red CAI'69 incluyendo las estaciones existentes y tal vez otras mas a establecer.
- IV. Obtener información para la extensión de la red mediante el método Doppler.
- V. Observar el comportamiento de los equipos con miras a su adquisición como material de uso normal.
- VI. Analizar su incorporación con fines de apoyo cartográfico en áreas normales y particularmente en zonas dificultosas.
- VII. Analizar sus posibilidades para la vinculación de las islas oceánicas.
- VIII. Entrenar al personal en el manejo de los equipos.

Quedaron ubicadas 18 estaciones, según se señala en la **Figura N° 2.2**, las estaciones fueron en su mayoría puntos Laplace.

En cada estación se registraron 40 pasajes, de los satélites: 30120, 30140, 10190, 30200, que en la época de las observaciones, contaban con efemérides precisas. Ello redujo el tiempo de

permanencia en el terreno, cuyo promedio fue de tres días por estación. La totalidad del trabajo se cumplió en 15 días por estación (abril-mayo 77).

La antena del instrumento fue ubicada directamente sobre el pilar existente o sobre la torre de triangulación montada sobre la marca trigonométrica.

De las 18 estaciones CAI69, 15 integran la red con coordenadas en el sistema de punto datum sudamericano de 1969 (SAD69).

La información se envió a Estados Unidos para ser procesada por la DMA.

Se determinaron parámetros de transformación entre CAI'69 y NWL-9D que luego se utilizaron para la determinación de parámetros de transformación desde CAI'69 a WGS84. Este trabajo fue realizado también por la DMA y los parámetros resultantes fueron ampliamente difundidos, siendo aquellos a los que se refiere mas adelante en 2.3.

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 [Rodriguez, 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.

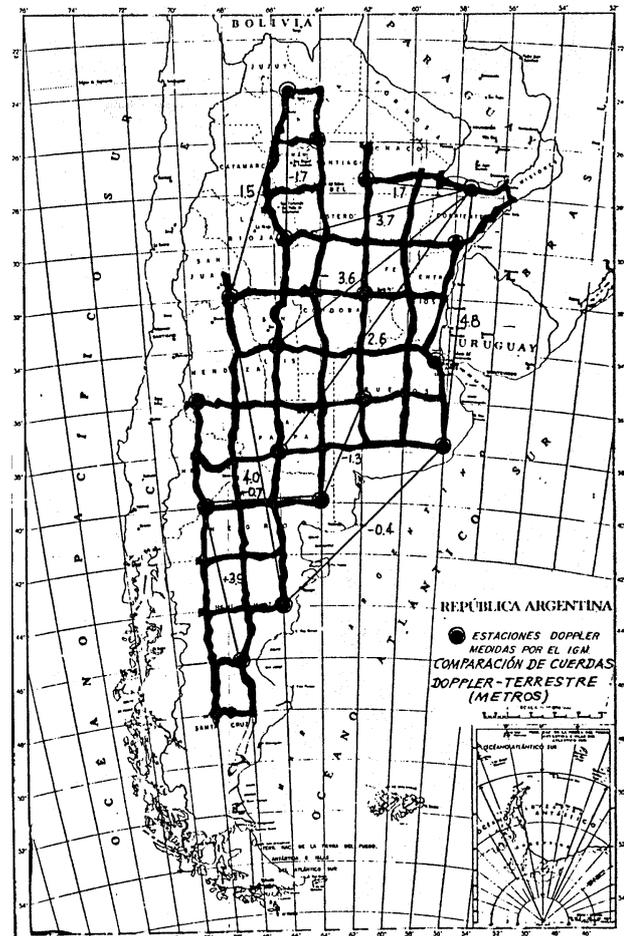


Figura 2.2. Estaciones Doppler- SAD69

### ***Transición entre el sistema clásico y los sistemas geocéntricos.***

La poca practicidad del sistema DOPPLER hizo que el mismo no fuese utilizado fuera del campo de la investigación. En contra partida llegó a nuestro país a mediados de la década del noventa un nuevo sistema de posicionamiento satelital denominado GPS, el cual en pocos años logró una gran popularidad. El GPS basó su posicionamiento en WGS'84, sistema que provenía de la evolución de WGS'72, en el que se apoyaba el sistema DOPPLER.

El GPS presenta una desventaja en comparación con el anterior, que para lograr precisiones geodésicas debe trabajar en relativo con un punto de coordenadas conocidas en el sistema en que opera, situación que no se encontraba materializada en ese momento en el país.

Frente a esta necesidad se vivió una primera transición en la cual se contaba con puntos que materializaban el sistema CAI'69 y con un grupo de parámetros de transformación que permitían llevar sus coordenadas al Sistema WGS'84 introduciendo errores que llevaban a determinar las coordenadas finales perdiendo en gran medida la alta precisión del posicionamiento satelital.

En pocos años se tomó conciencia de la necesidad de contar con puntos que materializaran dicho sistema y se emprendió la ejecución de una red geodésica medida con GPS, la cual recibió el nombre de POSGAR (POSiciones Geodésicas ARGENTINAS). Surgió una segunda etapa de transición lo cual permitió mejorar la situación de los usuarios GPS, ya que se determinaron nuevos parámetros de transformación [Brunini, 1996] utilizando más puntos, permitiendo transformar las coordenadas de puntos de triangulación del IGM, en POSGAR o WGS'84 con una precisión de pocos metros.

Esta transición se está viviendo y existirá en nuestro país hasta tanto se densifique el sistema POSGAR dentro de cada provincia o región, tarea que se está desarrollando desde 1994. Por lo cual podemos resumir que esta transición concluirá en muy poco tiempo, en beneficio de la geodesia y la cartografía nacional.

### **2.2.3. El Sistema POSGAR'94.**

La llegada del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y sus ventajas indudables alertó a los geodestas acerca de la necesidad de disponer de un marco de referencia básico compatible con las precisiones de la nueva tecnología y que fuese lo más cercano posible al sistema global WGS84.

Era evidente que someter las mediciones GPS al marco Inchauspe involucraba una degradación de la precisión de las nuevas mediciones satelitarias y en consecuencia era imprescindible disponer de una nueva red que cubriese la totalidad del país.

Surge de este modo el proyecto POSGAR. 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 CAI69. 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.

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 [J. Moirano, 2000]

Para la materialización de los puntos se apeló al recurso de utilizar las estaciones de la red Inchauspe que tuvieran un acceso fácil y su estabilidad fuera presuntamente confiable. Esta posibilidad la brindaban las estaciones astronómicas (puntos Laplace) y los extremos de bases invar, lo que se cumplió mayoritariamente. La ubicación de los puntos en coincidencia con la red Inchauspe brindaba la posibilidad adicional de poder determinar los parámetros de transformación entre el nuevo sistema y el que le precedió.

La decisión de desarrollar la red fue tomada por el Instituto Geográfico Militar y tuvo el apoyo expresamente manifestado del VIII Congreso Nacional de Cartografía y del VIII Congreso Nacional de Agrimensura así como de la comunidad geodésica nacional.

El proyecto preliminar contó con el aval del profesor Gunter Seeber, reconocido geodesta alemán en la materia, durante el Primer Seminario Panamericano de Cartografía realizado en Bogotá en 1988, donde fuera presentado un esbozo.

### ***La ejecución***

Los trabajos principales de campo los llevó a cabo el Instituto Geográfico Militar entre febrero y abril de 1993. Para ello contó con el aporte del proyecto geodinámico Andes Centrales

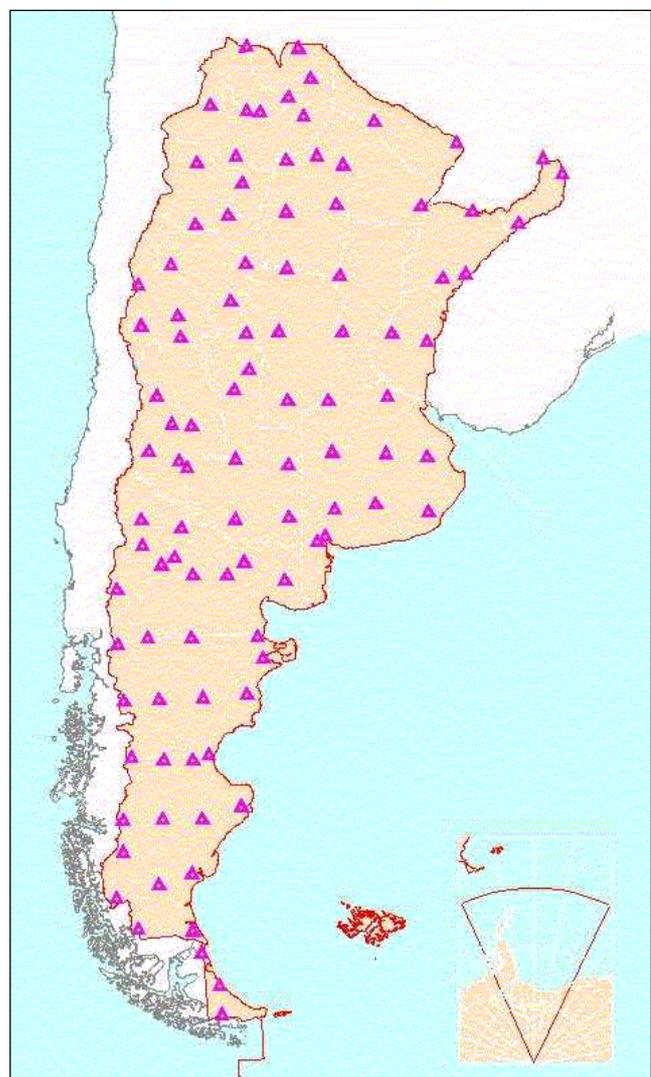
(CAP, Central Andes Project), de las Universidades de Memphis y Carolina del Norte, cuya red coincide con la red POSGAR en 23 estaciones. Este proyecto aportó un importante número de receptores.

Además de las estaciones del proyecto Andes Centrales, de las comunes con Inchauspe, fue necesario la materialización de algunas nuevas donde no llegaba Inchauspe (por ejemplo en Misiones, en el Oeste de la Patagonia y en Tierra del Fuego). También fueron parte de la red cinco mareógrafos de la costa atlántica y el de Ushuaia sobre el Canal de Beagle, en cuya medición participó el Servicio de Hidrografía Naval.

### ***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. 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



**Figura N°2.3 Red POSGAR- [IGM, 2002].**

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.

### ***El cálculo.***

El cálculo y la compensación de la red fueron ejecutados por el Observatorio Astronómico de La Plata. Las observaciones se calcularon mediante el software comercial GPPS. Se obtuvieron 660 vectores GPS. 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.

El sistema de referencia se introdujo mediante la inclusión de las coordenadas de 20 puntos con alto peso. 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.

El Instituto Geográfico Militar dio a conocer las coordenadas de la red en 1995 bajo el nombre de POSGAR'94 y el 9 mayo de 1997 lo definió como marco de referencia geodésico nacional [IGM, 1997].

### ***Los Resultados.***

Los errores de las coordenadas finales se encuentran en un 80% 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 observó que el 80 % tienen errores relativos inferiores a 1ppm, y el 95 % los tienen inferiores a 2 ppm.

### ***Consecuencias e impacto de POSGAR'94***

El marco de referencia como POSGAR'94 tiene las siguientes características:

- Es el único preciso y geocéntrico garantizado por los controles y las verificaciones realizados por los expertos en la materia y con puntos distribuidos en todo el país,
- Existen compromisos de mantenimiento y perfeccionamiento,
- Está vinculado al marco continental SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur)
- Se encuentran disponibles los parámetros de transformación con respecto a CAI69, y
- Tiene el apoyo de las entidades de fomento en la materia (agrimensura, cartografía y geodesia).

Por tales propiedades su valor aumenta ante la posibilidad de intercambio de información a escala nacional y global. Esta situación favorece el desarrollo de los sistemas de información geográfica y territorial sobre una base de referencia única y la informatización de la cartografía y su compatibilización.

El valor legal asignado a las coordenadas por la ley 24498, de actualización minera, encuentra en POSGAR'94 una referencia única para su aplicación.

Los proyectos recientes Provincias I (Programa de Saneamiento Financiero y Desarrollo Económico de las Provincias Argentinas) y PASMA (Proyecto de Asistencia Técnica para el Desarrollo del Sector Minero Argentino) son los ejemplos más representativos de aplicación del nuevo marco de referencia. Para ambos casos POSGAR'94 ofrece un marco único y confiable para el desarrollo de las redes de densificación, que abarcan la totalidad de las provincias argentinas.

Otro caso significativo es la contribución a la unificación de los sistemas de coordenadas en las áreas fronterizas, dado que POSGAR y SIRGAS (con extensión continental) serán de aplicación prácticamente indistinta.

Una ventaja adicional futura de POSGAR'94 será la de que frente a una evolución hacia POSGAR'98 (u otro) la transformación será simple y mínima pues se tratará de sistemas concéntricos y con el mismo elipsoide de referencia.

#### **2.2.4. 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. Hasta el momento no se cuenta con ondulaciones geoidales suficientemente precisas para convertirlas en alturas geodésicas y además en la mayoría de los casos dichos puntos altimétricos no coinciden con los puntos de triangulación.

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 en el sistema DOPPLER.

Una determinación mas precisa de los parámetros de transformación se obtuvo luego de la medición de POSGAR, basada en 50 puntos comunes con una mejor distribución geográfica. Se determinaron las siguientes fórmulas de regresión múltiple que permiten obtener valores localizados de las constantes de transformación [Brunini et al., 1996].

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

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

$$u = \frac{J + 37^\circ}{15^\circ}$$

$$v = \frac{I + 64^\circ}{8^\circ}$$

Recientemente estas fórmulas de transformación han sido adoptadas oficialmente por el IGM. Se estima que permiten convertir las coordenadas planimétricas con errores inferiores a  $\pm 1.5$  m ( $1\sigma$ ), 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  $\pm 1.5$  m ( $1\sigma$ ). [J. Moirano, 2000]

## **2.3. Distintas redes de control geodésico establecidas en el país.**

### **2.3.1. Redes provinciales establecidas con fines catastrales.**

En la década del 90 se conjugaron diversas razones que llevaron a invertir millones de dólares en la modernización de los catastros provinciales. Entre ellas podemos mencionar: la gran demanda de información cartográfica digital como base en la generación de sistemas de información geográfica, la necesidad de actualizar la información gráfica y alfanumérica que conforma las bases de datos catastrales fundamentales para la aplicación de un justo avalúo parcelario, etc.

Esta modernización fue financiada por organismos internacionales. El eje principal de dicha modernización fue la definición y materialización de redes de control geodésico provinciales.

Esta inversión se realizó en forma completamente autónoma en cada provincia, lo cual llevó a obtener resultados muy dispares, entre los cuales se podrían mencionar:

- En algunos casos, sobre todo en aquellas redes que se desarrollaron con anterioridad a 1995, las mismas se apoyaron en puntos de triangulación del IGM y abarcaban los principales centros urbanos, como fue por ejemplo el caso de Mendoza y San Juan.
- En otros casos, posteriores a la publicación de POSGAR94 las redes se apoyaron en puntos de este marco geodésico y en la mayoría de los casos cubren la totalidad de los territorios provinciales, como es por ejemplo el caso de Chubut, Buenos Aires, Santa Fe, Tierra del Fuego, Neuquen y Tucumán.
- En otros casos se contaba con puntos de redes ya existentes, como ser Catamarca que contaba con puntos de redes geodésicas para estudios de Geodinámica, como ser las redes SAGA (Actividades Geodinámicas Sud Americanas), y CAP (Proyecto Andes Centrales), y de mediciones locales. En estos casos se decidió mantener a estos puntos como materialización del marco de referencia.

Con el pasar de los años y presionadas por los avances de la tecnología, algunas provincias han continuado mejorando sus marcos de referencia mediante su vinculación a redes de orden superior, como ser POSGAR, SIRGAS, CAP, así es el caso por ejemplo de Mendoza.

A continuación se presentan en forma muy sintética las características principales de algunas redes geodésicas provinciales argentinas, a cuya información se ha podido acceder.

### **Tierra del Fuego**

La provincia de Tierra del Fuego cuenta con una red de 30 puntos distanciados entre 30 y 50 km. Los mismos están materializados con pila-res de concreto de 1m<sup>3</sup> con bulón demarcando el punto. Dicha red cubre la totalidad de la isla. Respecto al sistema de referencia, en 1993 se rea-lizó un primer cálculo considerando un único punto fijo EARG, Estación Astronómica Río Grande. Se utilizaron sus coordenadas



**Fig. N°2.4 Red Geodésica TDF95 [TDF, 1995]**

en WGS84. En cuanto a la precisión que dicen tener sus coordenadas en este ajuste es del orden de 1 cm en latitud y longitud y 2 cm en altura.

Con el objeto de que dicha red materializase el sistema oficial argentino se realizó un segundo cálculo a partir de cuatro puntos de la misma en el sistema POSGAR denominados HITO, EARG, VEGA y PENI. A esta nueva realización se la denominó TDF95, se considera que los puntos tienen una precisión de 2 a 3 cm en latitud y longitud y 4 cm en altura.

En la Figura N°2.4 se muestra la estructura de la misma. Esta información ha sido extraída de [TDF, 1995].

### ***Buenos Aires.***

Cuenta con una red geodésica, la cual se conforma por 140 puntos, 74 de los cuales son puntos dobles (tienen un punto próximo auxiliar medido por radiación tomando como referencia al primero). Todos los puntos tienen cota sobre el n.m.m.

La red se ajustó a la red de orden superior SAGA a partir de las coordenadas de tres puntos que formaban parte de la red. Con el objeto de llevar esta red (en ITRF) al marco POSGAR94 se aplicó una traslación de coordenadas cartesianas geocéntricas para hacer coincidir las coordenadas del punto IGM0, punto de la red POSGAR. Por lo tanto la red resultante está orientada y escalada en ITRF pero trasladada a POSGAR94 en el punto IGM0. Las coordenadas de los puntos POSGAR difieren de las publicadas oficialmente. Estas diferencias están dentro de los errores propios de POSGAR94.

Los puntos distan entre 50 y 60 km.

Las coordenadas son públicas. En el caso de la oficialización de un plano de vinculación se abona un arancel por el uso de las mismas. La reglamentación para la vinculación de levantamientos a la red está contenida en las Normas para la ejecución de mensuras de 1999.

Esta información ha sido extraída de “La vinculación de mensuras en la provincia de Bs.As comentarios sobre los aspectos técnicos. Revista Temas de Geociencia N°7. UNR. Editora.

### ***Chubut***

La Provincia del Chubut consta de una red principal de seis puntos y de una red secundaria de 35 puntos adicionales, lo que totaliza una cantidad de 41 puntos.

La red principal fue medida con una precisión de  $0,005 \text{ m} + D \cdot 10^{-7}$ , (donde D es la distancia en metros) (Equivale a 10,5 cm en 1000 Km de distancia)

La red secundaria fue medida con una precisión de  $0,005 \text{ m} + D \cdot 10^{-6}$ , (donde D es la distancia en metros) (Equivale a 10,5 cm en 100 km de distancia).

La compensación se realizó con el software científico GEONAP de la Universidad de Hannover (Alemania).

La red geodésica principal se vinculó a la red SAGA (South American Geodynamic Activities). Esta red a su vez está vinculada al ITRF 93. Los puntos de vinculación de la red del Chubut con la red SAGA, son los puntos Trelew (N°144) y Epuyén (N°99), este último ubicado en la zona cordillerana. Ambos puntos distan entre sí aproximadamente 510 Km. Partiendo de las coordenadas de los puntos SAGA, se calcularon las coordenadas de los 41 puntos de la red chubutense.

La red geodésica está vinculada a otros marcos de referencia como ser, dos puntos de la red geodésica de la provincia del Chubut están vinculados a la red SIRGAS. Se trata de los puntos El Maitén ubicado en el noroeste de la provincia próximo al paralelo  $-42^\circ$ , límite con la provincia de Río Negro, y del punto Lote 10B ubicado al suroeste de Comodoro Rivadavia, al sur del paralelo  $-46^\circ$ , límite con la provincia de Santa Cruz.

El punto Maitén también pertenece a la red CAP y a la red POSGAR, por lo tanto esta red provincial quedó vinculada a dichos marcos de referencia.

De las comparaciones surgidas de sus vinculaciones a los distintos marcos de referencia muy precisos se llegó a la conclusión que la red geodésica GPS de la Provincia del Chubut cuenta con una precisión mejor que los 5 cm en forma absoluta.

## ***Tucumán***

La provincia de Tucumán cuenta con una red geodésica desde 1998, conformada por 1000 puntos cuyas coordenadas están disponibles desde el año 2001. Dicha red cubre la totalidad de la provincia. Su marco de referencia es POSGAR 98, época 1995.4.

La distancia promedio entre puntos es en los centros urbanos, un punto por kilómetro y en las zonas rurales, un punto cada 25 km.

La precisión relativa en los centros urbanos es  $1 \text{ ppm} + 1 \text{ cm}$  y en las zonas rurales de  $0.1 \text{ ppm} + 5 \text{ cm}$ .

La precisión absoluta es mejor que 2 cm en el marco POSGAR 98 para la época 1995.4.

Se encuentra vinculada a redes de otras provincias y a ITRF94 a través de las redes de orden superior SIRGAS y POSGAR 98.

El estado actual de las marcas es bueno ya que son muy recientes. El mantenimiento de las mismas al igual que el de las coordenadas es responsabilidad de la Dirección Provincial de Catastro.

### Neuquen

La Provincia cuenta con una Red Geodésica Provincial y Poligonales de Apoyo Urbanas en 13 de las principales localidades.

El Datum de la Red Geodésica Provincial, que cubre la totalidad del territorio provincial (Figura N°2.5), es WGS'84 y se encuentra vinculado al Marco POSGAR'94. Paralelamente se determinaron los parámetros de transformación a Campo Inchauspe '69, para la provincia, por lo que también se encuentra referido a este sistema. Se cuenta también con las alturas ortométricas del 50% de los puntos.

La distancia promedio entre puntos es de 60 kilómetros aproximadamente, con una precisión de 1ppm. Cabe destacar que todos los puntos trigonométricos poseen su pilar de acimut.

La Dirección Provincial de Catastro e Información Territorial es la encargada del mantenimiento de las marcas, previéndose uno cada cuatro años. El último se realizó en los meses de noviembre y diciembre del año 2000, realizando un reconocimiento del 98% de los puntos, actualizando sus monografías y reponiendo los puntos destruidos.

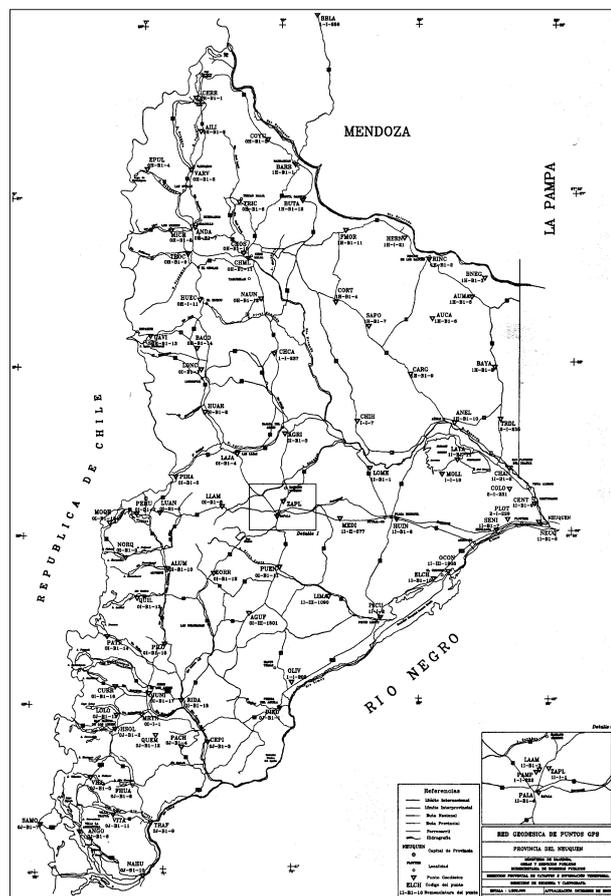


Fig. 2.5 Red Geodésica Neuquen [Neuquen, 1995].

Desde su construcción, en el año 1996, se incorporan puntos de densificación en la medida de las necesidades que van surgiendo.

Con relación a las Poligonales Urbanas, se construyeron en las 13 principales localidades de la provincia, con un total de 450 puntos, vinculados a la Red Geodésica Provincial y separados a una distancia de 400 metros.

Del mantenimiento de estos puntos se debe encargar cada uno de los municipios en los que se construyó la poligonal, realizando un informe anual por escrito a esta Dirección Provincial, del estado de la misma.

La información referida a las coordenadas como a las monografías de los puntos (Red Geodésica Provincial y Poligonales de apoyo Urbanas), es publica con arancelamiento, pudiendo solicitarse personalmente o por nota.

### ***Catamarca***

En este caso se ha accedido a cierta información gracias a la amabilidad del Agrimensor Haar. Si bien la provincia no cuenta con una red geodésica propia, se encuentran distribuidos en el territorio provincial una gran cantidad de puntos de apoyo pertenecientes a distintos marcos geodésicos. El siguiente cuadro sintetiza esta información.

<b>Estación</b>	<b>Designación</b>	<b>Red a la que pertenece</b>
Recreo	RECO	SAGA
Fria	FRIA	SAGA
Campamento Vialidad (Belén)	CAVI	SAGA
El Peñón	PENO	SAGA
Antofagasta de la Sierra	ANSI	SAGA
Salar del hombre muerto	HOMU	SAGA
Casa de Piedra	CPDR	CAP
Carranza	CARR	Universidad de Catamarca
Saujil	SAUJ	Universidad de Catamarca
Campo de los portezuelos	CAPO	Universidad de Catamarca
Paso de San Francisco	GUTA	Universidad de Catamarca
Chaschuil	CHAS	Universidad de Catamarca

Como puede apreciarse en la Figura N°2.6 la distribución de los puntos es bastante homogénea encontrándose distanciados entre 30 y 50 km.

Si bien se desconocen los motivos por los cuales esta provincia no ha desarrollado su propia red, podría deberse a que la misma cuenta con la estructura geodésica que se ha mencionado. Es oportuno mencionar la importancia de que las coordenadas de tales puntos materializasen el mismo sistema de referencia, de lo contrario se estaría incursionando en error en caso de utilizar como apoyo puntos de distinto marco de referencia.

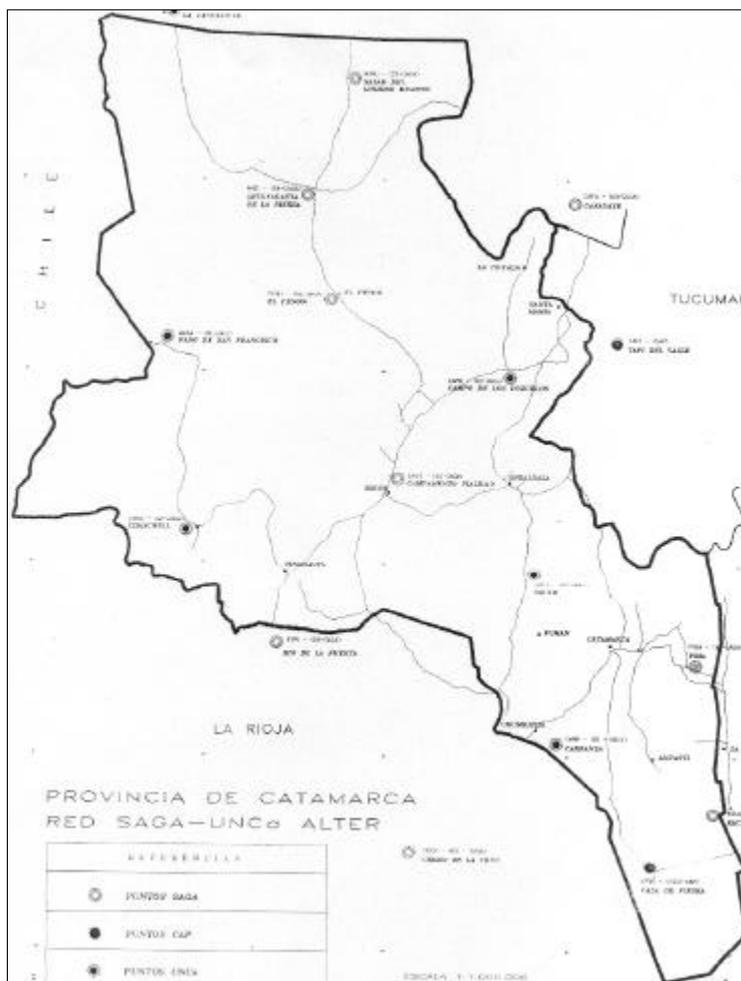
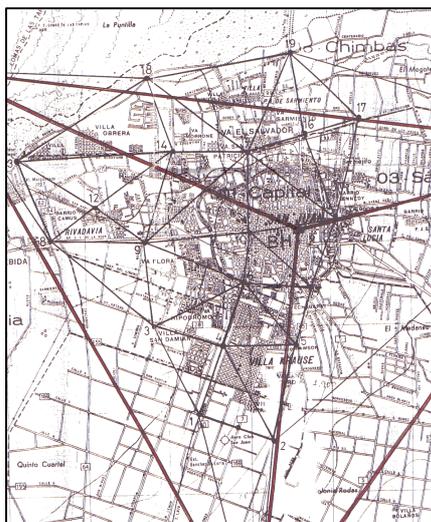


Fig. 2.6 Marco geodésico, Catamarca.

Puede contarse también con puntos de referencia ubicados en las provincias limítrofes como ser:

Estación	Designación	Red a la que pertenece	Provincia
Tafí del Valle	TAFI	CAP	Tucumán
Guasayán	GUAS	SAGA	Santiago del Estero
Cafayate	CAFA	SAGA	Salta
La Casualidad	CASU	Universidad de Catamarca	Salta
Cerro de la Cruz	CECR	SAGA	La Rioja
Río de la Puerta	RIPU	SAGA	La Rioja

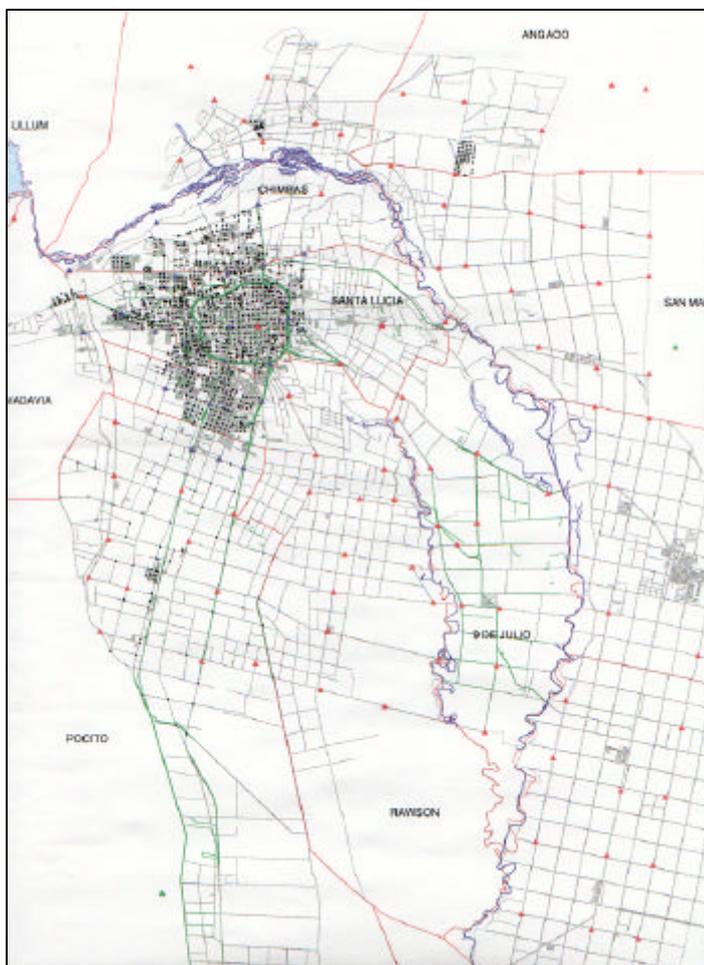
## San Juan



**Fig. 2.7 Red Principal, San Juan**  
[M.V. Mackern, 1993].

(Fig.N°2.7). El procesamiento de la misma se realizó en WGS'84 mediante los parámetros de transformación de la DMA pero las coordenadas finales han sido referidas a CAI'69. A partir de estos 19 puntos se midió una red secundaria de 169 puntos que cubren la principal zona urbana, los cuales conservan una distancia

La provincia de San Juan cuenta con una primera red principal medida con GPS, que consta de 19 puntos apoyados en 4 puntos trigonométricos del IGM



**Fig. 2.8 Red Geodésica, San Juan** [San Juan, 2001].

promedio de 1500 m. Posteriormente se amplió dicha red hacia las zonas rurales generando un total de 86 puntos que cubren los principales oasis cultivables de la provincia (Fig. N°2.8)

Si bien la red ha sido vinculada a POSGAR, obteniéndose un doble juego de coordenadas, las coordenadas oficiales se expresan en CAI'69.

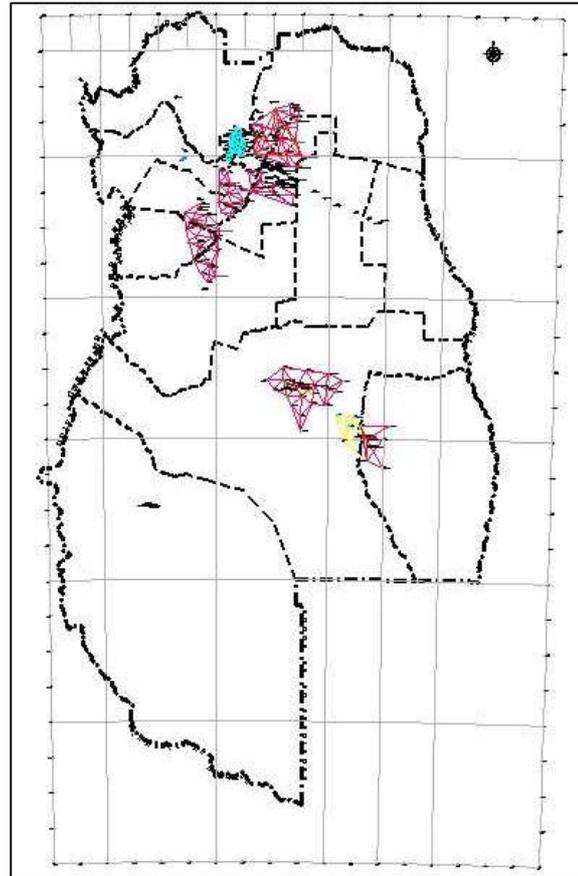
El mantenimiento de la red está a cargo de la DPC. Las coordenadas son públicas y se solicitan por nota gratuitamente.

## **Mendoza**

La provincia de Mendoza cuenta desde 1995 con redes locales urbanas y rurales que cubren los principales centros urbanos y oasis cultivables de la provincia, sumando un total de 200 puntos, densificados aún mas en las zonas urbanas mediante poligonales catastrales.

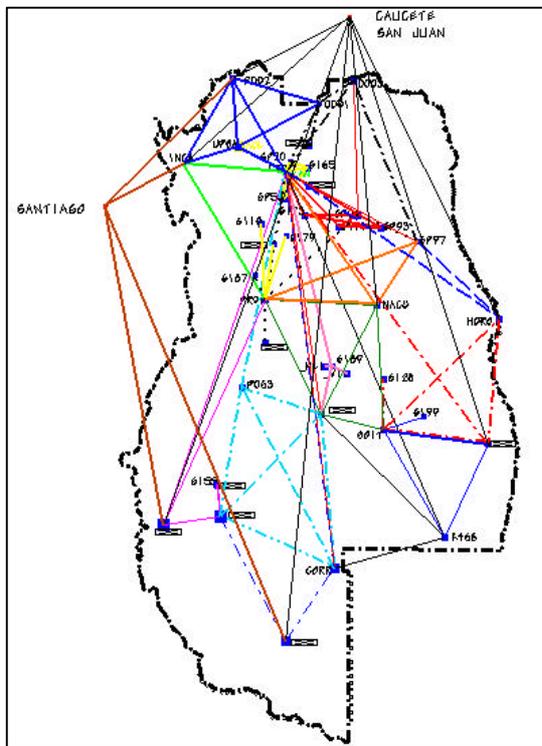
Estas redes fueron medidas con GPS entre los años 1991 y 1995, anteriores a POSGAR94, apoyándose localmente en puntos de triangulación del IGM, resultando sus coordenadas en CAI'69 (Figura N°2.9).

En el año 2001, vista la necesidad de cubrir la totalidad de la provincia, de georreferenciar a



**Fig. 2.9 Redes Catastrales, Mendoza**

**[DPC-Mendoza, 2001].**



**Figura N°2.10- Red Geodésica, Mendoza.**

**[UAGG-DPC,2002].**

catastrales en el mismo marco de referencia.

un sistema geocéntrico compatible con las nuevas tecnologías, y de integrar todas las redes existentes en la provincia, se realizó la medición de la Red Geodésica Básica (RGB) de la Provincia, con puntos distanciados entre 50 y 100 km, apoyada en POSGAR98. Dicho marco tiene un total de 22 puntos principales con una precisión de  $\pm 5$  cm en POSGAR98 (Figura N°2.10).

Conjuntamente con la medición de la RGB se vincularon algunos puntos de las redes existentes con el objeto de reprocesar las mismas en POSGAR y tener todos los puntos de control

La distancia promedio resultante entre puntos es menor que 1 km en la zona urbana, menor que 15 km en la zona rural y 75 km en la zona de secano.

En estos momentos la provincia se encuentre en una etapa de transición ya que debe mantener el doble juego de coordenadas (CAI'69 y PGAR98) por tener la cartografía referida al sistema tradicional.

El mantenimiento de los puntos es responsabilidad de la DPC. Cabe mencionar que la provincia cuenta con una estación permanente GPS mantenida por un convenio entre la DPC y la Unidad de Aplicaciones Geodésicas dependiente del IANIGLA, CONICET, la cual materializa el sistema de referencia y puede ser utilizada para georreferenciar al sistema.

El siguiente cuadro sintetiza la información recopilada.

Provincia	Cobertura	Puntos	Distancia	Sistema	Amojonamiento	Prec. relativa	Prec. absoluta
Tierra del Fuego	total	30	30 y 50 km	PGAR94	Pilares de hormigón	—	3 cm $\phi$ y $\lambda$ 4 cm h
Bs.As.	total	140	50 y 60 km	PGAR94	Pilares de hormigón	—	1 cm 2,5 cm h
Chubut	total	6 35	50 km	SAGA (ITRF93)	Pilares de hormigón	0.1ppm+ 5 mm 1ppm +5 mm	5 cm
Tucumán	total	1000	1 km (u) 25 km (ru)	PGAR98	Pilares de hormigón	1ppm+1cm 1ppm +5cm	2 cm
Neuquén	total	75 450 (u)	60 km 0,4 km (u)	PGAR94	Pilares de hormigón	1ppm	—
Catamarca	total	18	30 y 50 km			—	—
San Juan	parcial	188 (u) 86 (ru)	1,5 km (u) 5 km (ru)	PGAR94 y CAI'69	Pilares de hormigón	—	—
Mendoza	parcial (1995) total (2001)	200 (u y ru) 22 + 200	3 km (u) 15 km (ru) 75 km (sec) 3 km (u) 15 km (ru)	CAI'69  PGAR98	Pilares de hormigón	1ppm	5 cm
		(u) zona urbana	(ru) zona rural	(sec) zona de secano			

Como puede apreciarse es notable la diferencia de criterios adoptados en las distintas provincias argentinas lo cual es muestra concreta de la falta de una política federal respecto a

los conceptos geodésicos que derivan en los desfavorables resultados cartográficos que hoy en día son de público conocimiento.

### **2.3.2. Proyecto de Apoyo al Sector Minero Argentino (PASMA)**

El Programa de Asistencia al Sector Minero Argentino (PASMA) financiado por el Banco Mundial y auspiciado por el Programa Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), tuvo por objeto la organización y modernización de las instituciones públicas mineras y su marco técnico-legal, definiendo el Sistema Nacional de Catastro y Registro Minero.

Uno de sus componentes estuvo dirigido a mejorar sensiblemente la seguridad jurídica de los inversores, a través de la definición técnica y legal de un conjunto de actividades que permitieran obtener un Catastro Minero moderno y eficiente. El fin perseguido por dicho Catastro es asegurar un sistema de información, que sea capaz de mantenerse actualizado en el tiempo y brindar seguridad jurídica, en el trámite de la concesión minera.

El criterio que los autores del proyecto fijaron fue el de reemplazar el sistema tradicional de pedimentos y localización espacial de los derechos mineros. El mismo que se definía por una descripción del lugar, vinculada a hechos existentes de dudosa perdurabilidad, por uno mucho más moderno y confiable en el que la concesión quedará definida por las coordenadas de los vértices de la misma en el sistema oficial de coordenadas de uso en el país.

Para poder compatibilizar un sistema con otro y establecer un marco geodésico adecuado, se acordaron, diseñaron, programaron y fijaron las especificaciones técnicas de un nuevo marco geodésico nacional para la referenciación de los pedimentos mineros en el país, respetando las normas y estándares del IGM. Cumplido este paso fundamental se llamó a un concurso internacional para la ejecución de una red geodésica y la reposición de los esquineros de las minas existentes en las distintas provincias. Se subdividió al país en distintas zonas con el objeto de licitar los trabajos e ir evaluando los resultados parcialmente, lo que dio lugar a que trabajaran en este programa distintas empresas nacionales e internacionales.

A continuación se describen las distintas etapas del programa según las zonas que abarcaron y las empresas concesionarias.

Etapa del PASMA	Región	Provincias que abarcó	Empresa
PASMA I	Unica	San Juan, La Rioja, Cata-marca y Salta.	ESTEIO-IFTA (Brasil- Argentina)
		Mendoza, San Luis	Geocart(Española) Subcontratista: C&M (Argentina)
PASMA II	Sur-Sur	Tierra del Fuego, Santa Cruz y Chubut	Geocart S. A.
	Sur-Norte	Bs.As., La Pampa, Neuquén y Rio Negro.	ICC (Inst. Cartográfico de Catalunia-España)
	Norte-este	Misiones, Corrientes, Entre Ríos, Sta.Fe, Chaco y Formosa.	
	Centro	Jujuy, Córdoba, Tucumán y Stgo. Del Estero.	D.M.T. (Alemania)

Dicho proyecto se desarrolló entre 1997 y 2001, y tuvo su marco legal en la ley de Actualización Minera N°24.498 y la Ley de Acuerdo Federal Minero N° 24.228.

Las actividades de dicho proyecto se organizaron entorno a cuatro áreas disciplinarias:

- Topo-Geodésica.
- Cartográfica.
- Jurídica.
- Sistematización de la Información.

En esta oportunidad nos compete principalmente las tareas del área Topo-Geodésica, cuya raíz fue el desarrollo de la red geodésica, en la cual se apoyaron todas las mediciones necesarias.

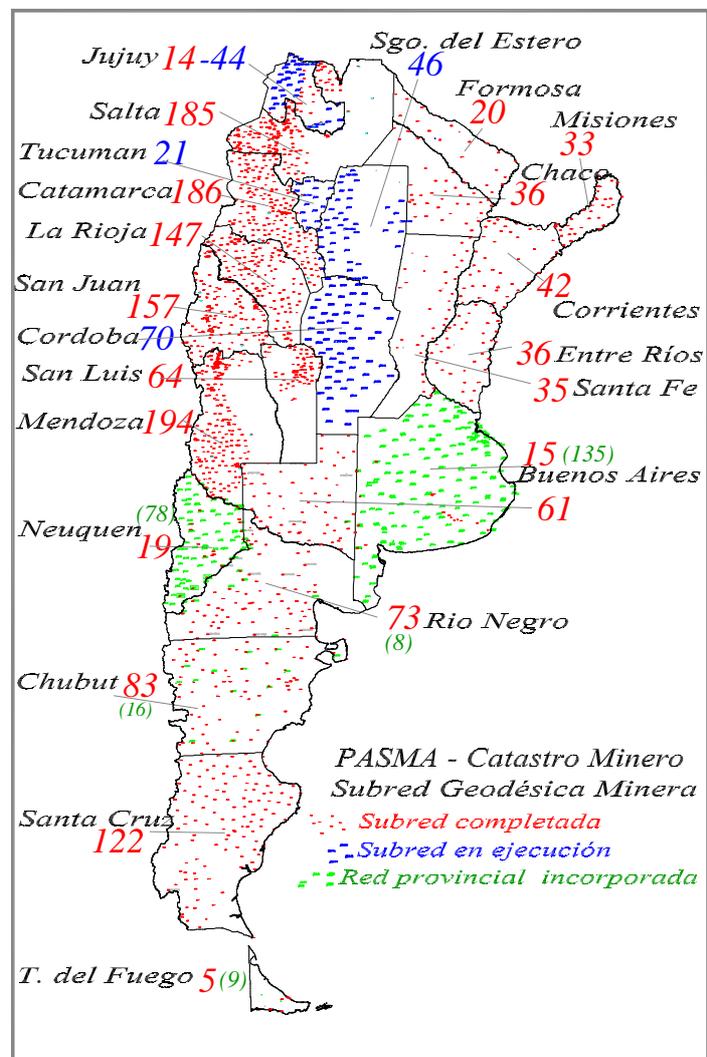


Fig.2.11. Subred Geodésica minera. de [PASMA, 2001].

La red GPS minera que surgió de este proyecto es posiblemente la mayor inversión en infraestructura geodésica básica realizada por el país en las últimas décadas, la misma se encuentra subdividida en distintas subredes por zonas (Figura N°2.11)

Las subredes geodésicas mineras, cuentan con un marco referencial constituido por la red POSGAR'94, puntos de nivelación del IGM, puntos de triangulación del IGM y mojones implantados para este proyecto. Cubre una superficie aproximada de **400.000** km<sup>2</sup> y sus cotas varían desde los 340 m sobre el nmm hasta 4560 m.

Esta red básica es mas precisa que POSGAR94 debido a la metodología de medición y procesamiento empleados. Esto permite auditar la precisión de la posición relativa de los vértices del marco oficial del país.

### **Diseño de la Red básica**

Al momento de diseñar la red básica, se consideraron los siguientes factores:

- distancia entre vértices menor que 50 km;
- 4 receptores geodésicos (L1, L2, P1, P2 y C/A) como mínimo operando simultáneamente;
- ocupación de dos o mas vértices POSGAR por sesión;
- tres a cuatro bases comunes entre sesiones adyacentes;
- sesiones de 3 hs a 10 hs. de duración.

Se recopiló toda la cartografía disponible de cada zona, al igual que las coordenadas y monografías de todos los vértices trigonométricos. Se diseñó también una ampliación de bases de datos a los efectos de poder seguir las distintas etapas del proyecto.

El diseño de cada subred por zona fue realizado por los profesionales del proyecto dando participación al personal de las distintas direcciones de minería de las provincias. En tal diseño se tuvo en cuenta que las subredes de zonas colindantes tuviesen puntos en común de manera de poder vincularlas al finalizar cada subred y conformar una única red geodésica minera, dicha red puede apreciarse en la figura N°2.11 donde se destacan las distintas zonas y sus ligaduras.

### **2.3.3. Actividades Geodinámicas Sud Americanas (SAGA)**

Siendo que el oeste de América del Sur es técnicamente una de las áreas más interesantes a nivel mundial por su gran actividad geodinámica el proyecto SAGA persigue investigar, mediante una importante red geodésica de control, la naturaleza de las deformaciones a lo largo de la zona de subducción andina, incluyendo variaciones temporales y espaciales.

Con este objeto se ha establecido una red de estaciones GPS conformada por 215 sitios que cubren todo Chile y parte del oeste argentino (Figura N°2.12)

Las observaciones planificadas y realizadas consisten en incluir mediciones repetitivas de los puntos a modo de campaña en algunas zonas y algunas estaciones permanentes localizadas en Antofagasta, Puerto Montt, Concepción, Isla Robinson Crusoe, Salta, La Plata, Río Grande y Córdoba.

La determinación de las deformaciones de campo se complementan con estudios neotectónicos y paleosismológicos en diferentes escalas espacial y temporal.

### Objetivos

Los principales objetivos asociados a la red SAGA son:

- Medir y monitorear la deformación tridimensional a lo largo de la zona de subducción andina y zonas de deformación adyacentes.
- Medir el movimiento relativo entre las placas de Nazca y Sudamericana y cuantificar en que extensión la convergencia se acomoda por diferentes procesos de deformación.
- Estudiar el largo período de deformación tectónica (por ejemplo formación de montañas, acortamiento de la corteza) mediante la evolución y la dinámica del proceso de subducción.

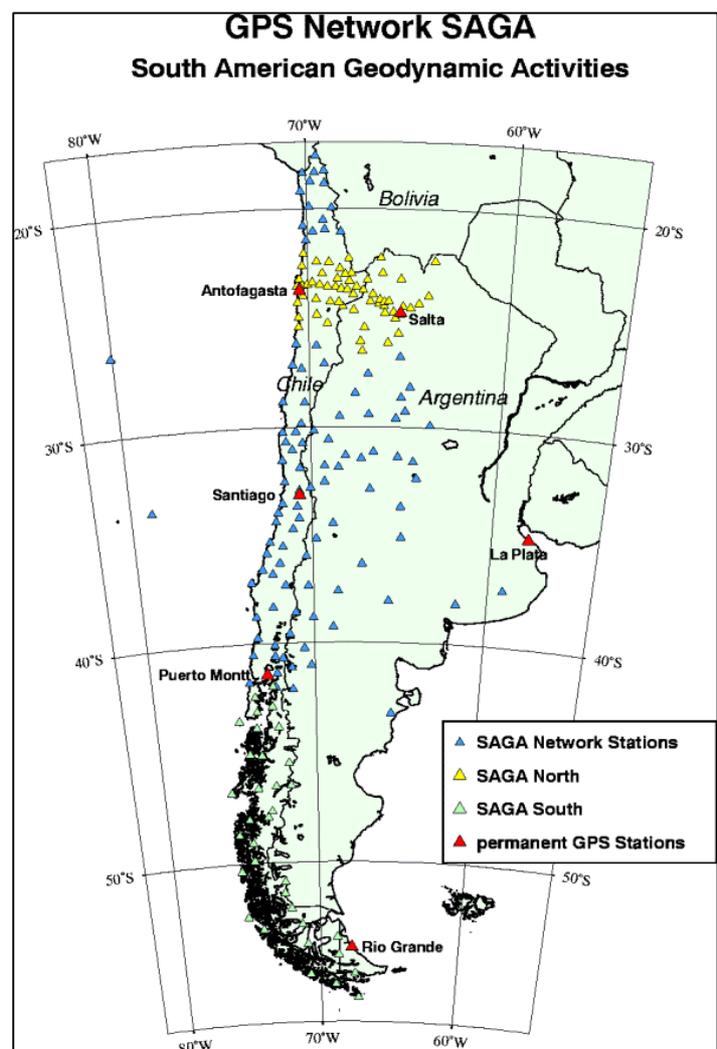


Figura N°2.12-Red SAGA- [SAGA, 2001].

- Monitorear la deformación tridimensional en dos regiones centradas alrededor de los terremotos de 1995 en Antofagasta y de 1960 en Chile, con el objeto de determinar la magnitud y extensión del fenómeno de relajación postsísmica.
- Estudiar el ciclo sísmico asociado con los terremotos de subducción y su implicancia en la determinación de zonas de riesgo sísmico.
- Contribuir en la definición de un marco de referencia geodésico.

### **Campañas**

Campaña	Época	Día GPS	Sitios	Zona	Reocupación
SAGA-93	1993	306	70	Entre $-22^{\circ}$ y $-26^{\circ}$ de latitud, entre la costa chilena y el Chaco argentino (SAGA-Norte)	
SAGA-94	1994	30	90	Entre SAGA-Norte y $-43^{\circ}$ de latitud.	
Cooperación CAP	1994	79	41	$-45^{\circ}$ y el Cabo de Hornos	
SAGA-95	1995	307		SAGA-Norte	1ra-remediación
SAGA-96	1996	304	90 17 15	Entre SAG-Norte y $-43^{\circ}$ de latitud. SAG-Norte Entre SAG-Norte y el borde peruano	1ra-remediación 2da-remediación parcial
SAGA-97	1997	337	70	SAG-Norte	2da-remediación total
SAGA-99	1999	337	70	SAG-Norte Parte norte.	3ra-remediación total 1ra-remediación

### **2.3.4. Proyecto Andes Centrales (CAP)**

Se trata de un proyecto Geodinámico, desarrollado por la Universidad de Memphis y la Universidad de Hawaii, en la zona oeste del continente americano. En la República Argentina colabora en el mismo el Instituto Geográfico Militar, a través de la red de estaciones permanentes RAMSAC.

Al igual que el proyecto SAGA, el Proyecto Andes Centrales persigue investigar, mediante una importante red geodésica de control, las deformaciones a lo largo de la zona de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sud Americana.

A través de mediciones realizadas con GPS se pretende determinar la posición con gran precisión (del orden del mm) de estaciones geodésicas materializadas de manera de asegurar su estabilidad. El objeto es determinar el cambio relativo de sus posiciones, expresado en mm/año.

Con este objeto se ha establecido una red de estaciones GPS conformada por una creciente cantidad de sitios que cubren principalmente la zona de los Andes y algunos sitios ubicados hacia el interior del continente, lejanos a la zona de deformación entre placas (Figura N°2.13)

Los círculos púrpura indican nuevos sitios propuestos por CAP-fase II.

Los cuadrados púrpura indican estaciones RAMSAC que colaboran con CAP.

Los círculos amarillos indican sitios en las sierras pampeanas atendidos por la Universidad Nacional de San Luis, en colaboración con CAP.

Los círculos verdes, naranja y rojos indican sitios CAP, SACRP y MATE.

Los cuadrados rojos representan estaciones permanentes. [R.Smalley, et al. 2000]

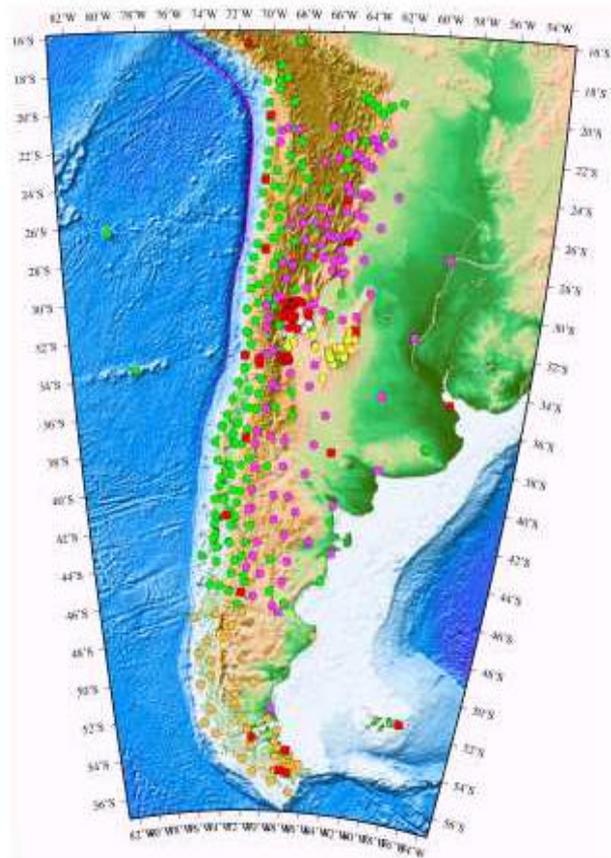


Figura N°2.13. Los Andes: Interacciones entre placas y deformaciones corticales.

## 2.4. Diferentes proyectos que intentaron establecer un datum común en Sudamérica.

### 2.4.1- Definición del Datum Sud Americano de 1969 (SAD'69)

EL proyecto SAD'69 se llevó acabo con el objeto de determinar un datum común para todos los países de América del Sur. La necesidad de su implementación fue presentada repetidas veces desde la tercera consulta del IPGH en 1946, donde se mencionó que el punto datum

debía considerarse en el centro del continente, en una zona que abarcara parte de los territorios de Argentina, Bolivia, Brasil y Paraguay, para disminuir los errores por propagación.

Se propusieron dos métodos diferentes para determinar el datum:

- La construcción a partir de un número adecuado de estaciones astronómicas distribuidas convenientemente y ligadas entre sí por una red de triangulación precisa y
- La selección de un punto datum por observaciones gravimétricas en la zona del datum propuesto.

Las dificultades que la zona elegida tenía para la ejecución de los costosos relevamientos, 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 seleccionar el punto datum 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 SAD'69 se derivó del primer método, por su practicidad ya que se trabajaría con datos ya existentes.

También se consideraron otras especificaciones como por ejemplo que tuviese una altura geoidal muy pequeña.

Se adoptó el elipsoide SA1969 en conformidad con la resolución N°1 del IUGG

Elipsoide SA1969 :  $a= 6.378.160$  m.

$$f = 1/ 298,25$$

El punto considerado como Datum fue CHUA. En la siguiente planilla se enuncian las coordenadas del mismo.

Coordenadas	ASTRONÓMICAS	GEODESICAS
$\varphi$	$-19^{\circ} 45' 41.34'' \pm 0.05''$	$-19^{\circ} 45' 41.6527''$
$\lambda$	$-48^{\circ} 06' 07.80'' \pm 0.08''$	$-48^{\circ} 06' 04.0639''$
Acimut de Uberabai	$271^{\circ} 30' 05.42'' \pm 0.21''$	$271^{\circ} 30' 04.05''$
N	0	0

### ***Un Sistema de control continental coherente***

El proyecto SAD estuvo conformado por 2 partes:

1. El establecimiento de un datum de referencia (sistema de coordenadas) y
2. El ajuste de un control geodésico coherente sobre el datum.

La primera parte consistió en la definición del datum y del elipsoide de referencia , lo cual ya fue especificado en los párrafos anteriores.

La segunda parte estaba ligada a posteriores densificaciones, extensiones y desarrollo de redes de control, considerando el incremento necesario de precisiones.

Se realizó en primer lugar un breve análisis del estado de las redes de los distintos países y su vinculación a SAD'69, considerando la información que suministraba cada país participante.

Esta vinculación se subdividió según su distribución geográfica (Figura N° 2.14) en dos anillos principales, uno del Sur y otro por el Norte.

#### ***1) Anillo del Sur***

El anillo del sur estaba formado por una rama Este desde Chua a través del Sur de Brasil, Paraguay, Uruguay y Argentina hasta la frontera chilena y un ramal Oeste desde Chua a través del oeste brasileño, Bolivia y Chile.

El ramal del oeste se extendió desde la red de Brasil en una simple cadena a través del oeste brasileño hasta Bolivia, ascendiendo a la red montañosa al oeste de San Lorenzo y gira hacia el sur hacia Chile.

El ajuste de SAD69 se realizó a partir del modelo de ajuste realizado en la investigación del Datum astronómico Chua y se incorporaron algunos refinamientos.

Las posiciones astronómicas fueron ajustadas al polo medio para lograr una total consistencia, lo



**Figura N°2.14- Datum Sudamericano-  
[Fischer et al., 1965]**

cual generó cambios en la deflexión de la vertical y por consiguiente en la altura geoidal. Se agregaron nuevas estaciones de deflexión para dar mas detalle.

El error de cierre al vincular ambos ramales fue de aproximadamente 0,8" en latitud y 0,7" en longitud entre las posiciones derivadas del lado argentino versus las del lado chileno. El chequeo del acimut entre dos estaciones (Quilipin y Mingre) dio una diferencia de 1" de arco, y en la longitud difirió en 2 metros.

El error de cierre se distribuyó a través de las áreas montañosas, manteniendo San Lorenzo en el ramal oeste y las posiciones argentinas en el límite argentino-chileno.

En el caso de la triangulación más austral de Chile, estaba conformada por una red independiente en Tierra del Fuego, referida al datum local Hito XVIII. En el C° Sombrero y Punta Arenas se contaba con estaciones de rastreo para el BC-4, Doppler y sistema miniaturizado Doppler que permitieron vincular esta red con la continental.

## ***II) Anillo del Norte.***

Después de que la red boliviana había sido ajustada en el anillo del sur, se usaron como puntos de arranque en el anillo norte las estaciones en el límite con Perú. Se incluyeron 20 nuevas posiciones sobre la costa peruana en el cálculo del geoide. EL anillo del norte continuó a través de Ecuador y al este colombiano en las montañas en el límite con Venezuela.

La sección este se extendió desde el norte de Chua y contenía algunos ajuste adicionales. La red HIRAN, entre el este de Brasil y Venezuela fue reconstruida completamente desde las planillas de campo originales.

En el ajuste se fijaron cuatro estaciones en el extremo sur-este de la red y en el extremo norte que se vinculaba a la triangulación venezolana, se encontró un error de cierre de 0,7" en longitud.

## ***Transformación de datum .***

La **tabla N° 2.1** lista los parámetros de transformación entre SAD'69 y algunos datums utilizados en Sudamérica.

Desde(datum viejo)	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)	$\Delta z$ (m)	$\Delta a$ (m)	$\Delta f$ ( $10^4$ )	País
Chua Astro	-77	+239	+5	-228	-0.14111498	Brasil y Paraguay
Corrego Alegre	-184	+137	+21	-228	-0.14111498	Brasil
Yacaré	-90	+160	+78	-228	-0.14111498	Uruguay
Campo Inchauspe	-83	+130	+120	-228	-0.14111498	Argentina
Hito XVIII	+87	+198	+125	-228	-0.14111498	Sur de Chile
Bogotá	+354	+228	-283	-228	-0.14111498	Colombia
La Canoa	-225	+102	-326	-228	-0.14111498	Venezuela
Aerodist	-222	+108	-317	-228	-0.14111498	Guyana
MMD 68	+74	+9	+39	+10	+0.00562000	Global

**Tabla N° 2.1**

Para calcular las coordenadas en el datum nuevo a partir de las coordenadas en un datum viejo (u otro) se utilizan las siguientes fórmulas, las cuales consideran los parámetros de transformación correspondientes al par de datums en juego (nuevo - viejo).

$$\Delta N_m = \Delta x \cdot \cos j \cdot \cos I + \Delta y \cdot \cos j \cdot \sin I + \Delta z \cdot \sin j + (a\Delta f + f\Delta a) \sin^2 j - \Delta a$$

$$\Delta j = \frac{206265}{m} \left[ -\Delta x \cdot \sin j \cdot \cos I - \Delta y \cdot \sin j \cdot \sin I + \Delta z \cdot \cos j + (a\Delta f + f\Delta a) \sin^2 j \right]$$

$$\Delta I = \frac{206265}{n \cos j} \left[ -\Delta x \cdot \sin I + \Delta y \cdot \cos I \right]$$

Donde  $\mu$  = radio de curvatura en el meridiano (en metros )

$v$  = radio de curvatura en el primer vertical (en metros)

$\Delta a$  = diferencia entre los semiejes mayor, en metros (nuevo-viejo)

$\Delta f$  = diferencia entre achatamiento, (nuevo-viejo)

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  : traslación (nuevo-viejo).

#### **2.4.2. El Proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur)**

El proyecto SIRGAS fue iniciado en la Conferencia Internacional para la Definición de un Datum Sud Americano Geocéntrico, realizada desde el 4 al 7 de octubre de 1993 en Asunción, Paraguay, por invitación de la Asociación Internacional de Geodesia, IAG, el Instituto Pan-Americano de Geografía e Historia ,PAIGH y la Agencia cartográfica de defensa

de los Estados Unidos, DMA ( hoy NIMA). Participaron de la Conferencia representantes de las organizaciones patrocinantes y de los países Sud Americanos presentes.

Los objetivos establecidos para el proyecto fueron los siguientes:

- Definir un sistema de referencia para América del Sur.
- Establecer y mantener una red de referencia y
- Definir y establecer un datum geocéntrico.

Las metas a alcanzar fueron:

- ⇒ Lograr los objetivos definidos en 1997, coincidiendo con la Asamblea Científica de la Asociación Internacional de Geodesia, con la excepción del mantenimiento, el cual es un objetivo a largo plazo.
- ⇒ Promover y coordinar los esfuerzos de cada país de Sud América para lograr los objetivos definidos.
- ⇒ Establecer una red GPS de alta precisión, en concordancia con los objetivos de la Resolución N°2 del 10<sup>mo</sup> Encuentro de los directores de Institutos Geográficos Sud Americanos (DIGSA), realizado en La Paz, Bolivia, en 1993.
- ⇒ Concentrar la atención en el comienzo del Datum Horizontal y
- ⇒ Facilitar la conexión de redes preexistentes.

Las siguientes definiciones de sistema de referencia y de datum geocéntrico para el continente, fueron adoptadas por los participantes de la Conferencia en Asunción.

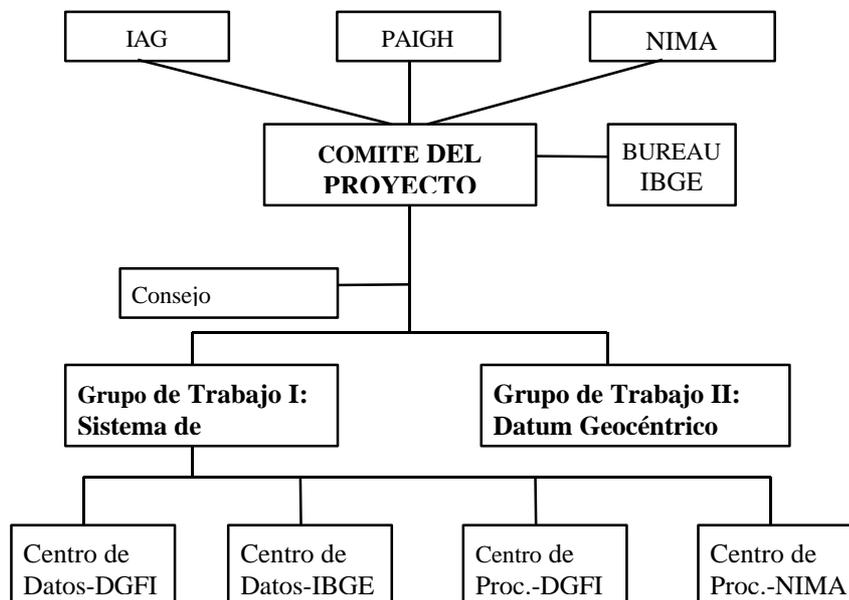
- ***Sistema de Referencia SIRGAS: Marco de referencia terrestre internacional del IERS.***
- ***Datum geocéntrico: ejes de coordenadas basados en el Sistema de referencia SIRGAS y parámetros del elipsoide del Sistema de Referencia Geodésico (GRS) 1980.***

Las actividades del proyecto SIRGAS han sido designadas para desarrollar una red de referencia continental con una precisión y exactitud compatibles con las técnicas de posicionamiento modernas, principalmente aquellas asociadas con GPS. Considerando el aumento en la utilización del GPS, se decidió que sería ínfimo el malgaste de recursos para vincular las nuevas mediciones a la estructura geodésica existente, la cual se basa en métodos de medición clásicos (triangulación, poligonación, trilateración, etc.) y en los cuales la

precisión es por lo menos 10 veces peor que la obtenida fácilmente con GPS. Además la coexistencia de una gran cantidad de sistemas geodésicos clásicos definidos por los países Sud Americanos genera problemas como por ejemplo en la definición de límites internacionales. La adopción del ITRF como sistema de referencia común garantizaría la homogeneidad de los resultados dentro del continente y permitiría la consistente integración de la red SIRGAS con las redes de otros continentes, lo cual contribuiría al desarrollo de la geodesia global.

### ***Estructura del proyecto.***

La estructura organizacional se muestra en la figura siguiente



El Comité del proyecto está compuesto por representantes de cada país del continente y uno por cada organización patrocinante. Es responsable de establecer la dirección del proyecto y de analizar los resultados obtenidos por los grupos de trabajo.

El Bureau trabaja como un comité general, dirigido por un Presidente con tareas propias.

El Consejo científico está compuesto por profesionales destacados en la geodesia, de la comunidad internacional, quienes están encargados de asistir al Comité y a los Grupos de Trabajo en sus análisis y decisiones.

El Grupo de Trabajo I ha sido responsable de establecer el Sistema de Referencia. Con este propósito se organizó una campaña GPS, llevada a cabo desde el 26 de Mayo al 4 de Junio de 1995.

El procesamiento de los datos de la red fue realizado por el Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut (DGFI) y por la National Imagery and Mapping Agency (NIMA).

El Grupo de Trabajo II ha sido el encargado de coordinar la integración de las redes geodésicas nacionales de cada país sudamericano al marco de referencia SIRGAS.

### ***Sistema de Referencia.***

En el primer encuentro de trabajo del proyecto, en Asunción, Paraguay, se estuvo de acuerdo en que el sistema de referencia debería coincidir con el del IERS y que el marco de referencia debería realizarse por medio de observaciones desde una red de estaciones GPS altamente precisas.

La campaña de observación GPS fue desarrollada acorde a las especificaciones establecidas por el G.T.I. Un total de 58 estaciones fueron observadas. Después de recolectar y preparar los datos observados, lo cual fue realizado por el DGFI en Munich, se realizó el procesamiento de los datos en el DGFI, IBGE y NIMA.

DGFI y NIMA presentaron sus resultados finales en Margarita, en abril de 1997. En este encuentro fue definida una solución final y única.

Las principales actividades que estuvieron a cargo del G.T. I. fueron:

- Recolectar la información necesaria de cada país.
- Seleccionar las estaciones que formarían parte de la red GPS.
- Formular las especificaciones técnicas para la ejecución de la campaña GPS.
- Planificar y organizar la campaña GPS.
- Planificar el procedimiento de recolección de datos y el procesamiento de datos.
- Organizar la evaluación y el procedimiento para llegar a los resultados finales.

### ***Campaña de observación.***

El criterio inicial asumido para seleccionar las estaciones, fue incluir en la red todos los observatorios existentes en Sud América de LASER, VLBI, DORIS y GPS. También se tuvo en cuenta que tuviese un cubrimiento homogéneo continental, que se garantizase el fácil acceso a los sitios y que fuese posible medir con GPS. Finalmente se seleccionaron algunos puntos que coincidían con las redes geodésicas de cada país.

Se preparó una planilla tipo, para recolectar la información de cada estación en forma homogénea.

Se solicitó a cada país la descripción de las estaciones seleccionadas, el tipo de marcación, etc, y con estos elementos se realizó una selección preliminar, resultando una red de 52 estaciones.

Se seleccionaron cuatro tipo de receptores: Ashtech ZXII, Leica 200, Rogue/Turbo Rogue y Trimble SSE. Esta selección incluyó los receptores que operan en las estaciones de la Red IGS en la región.

La distribución de receptores sobre los sitios se muestra en la Figura N°2.15.

Debido al uso de diferentes tipos de receptores fue necesario aplicar correcciones por la variación de la ubicación del centro de fase de las antenas. Tales correcciones no son conocidas de manera internacionalmente aceptada (sólo están

disponibles recomendaciones del IGS), por lo tanto se decidió ubicar diferentes tipos de receptores en algunos sitios y determinar exactamente sus distancias tridimensionales por



Figura N°2.15- Red SIRGAS. [SIRGAS, 1995]

mediciones de vinculación. Por esta razón, nueve sitios fueron ocupados por dos o tres receptores diferentes.

Se seleccionó en cada país un centro de datos y dos centros de datos globales para recolectar las observaciones.

Las observaciones se realizaron durante 10 días desde el 26 de mayo a las 0:00 UT hasta el 4 de junio a las 24:00 UT de 1995. Finalmente se determinaron 58 estaciones principales y 9 estaciones excéntricas en 11 países.

### ***Preparación de los datos de observación y archivo de los mismos.***

Todos los datos de la campaña GPS SIRGAS 1995 fueron archivados en el DGFI y el IBGE.

Todos los archivos fueron revisados en el centro de datos global.

### ***Coordenadas finales del Marco de referencia SIRGAS 1995.4***

Las observaciones de SIRGAS fueron procesadas y ajustadas por dos centros de cálculo en forma independiente, una fue el DGFI en Alemania y otra NIMA en Estados Unidos, ambos centros presentaron sus resultados y finalmente fueron combinados con el objeto de obtener una solución única final. Los detalles respecto al cálculo de cada uno de los grupos se encuentra en [SIRGAS, 1995].

En ambos casos las órbitas IGS combinadas usadas en el ajuste SIRGAS se refieren a ITRF93, debido a que todos los centros de análisis del IGS, en el cálculo de sus órbitas, fijan 13 estaciones a sus posiciones ITRF93 extrapoladas a la época de la medición aplicando las velocidades individuales.

Desde 1996 está disponible la nueva solución ITRF94 la cual incluye observaciones hasta fines de 1994 y debería proveer posiciones y velocidades mas precisas, en particular, para aquellas estaciones que nos conciernen. Sin embargo los sistemas de referencia fundamentales de ITRF93 e ITRF94 no son totalmente idénticos. Por lo cual en ambos casos se calculó el ajuste final a dicho marco.

A continuación se presenta una síntesis de las principales diferencias entre las soluciones mencionadas y los pasos que se siguieron para obtener la solución final:

- El DGFI había utilizado para fijar al marco ITRF93 las órbitas precisas y correcciones de reloj determinadas por el IGS, en cambio NIMA había utilizado las determinadas por el JPL.
- La solución del DGF incluía las correcciones a las variaciones del centro de fase de cada tipo de antena receptora utilizada, en cambio la de NIMA no lo consideraba.

Por lo tanto se decidió combinar ambas soluciones para llegar a una solución única, de la siguiente forma:

1. Se calcularon grupos de 7 parámetros de transformación entre la solución del DGFI y cada subred correspondiente a cada tipo de antena receptora de la solución de NIMA.
2. Se aplicaron transformaciones, con los parámetros obtenidos en el paso anterior, a los 5 subgrupos de coordenadas de la solución de NIMA.

Las diferencias entre las coordenadas DGFI y las transformadas de NIMA se redujeron de  $\pm 1,0$  a  $0,7$  cm en X, de  $\pm 1,4$  a  $0,9$  cm en Y y de  $\pm 0,7$  a  $0,6$  cm en Z.

3. Se calcularon las coordenadas medias entre las del DGFI y las transformadas según el ítem anterior, para producir un grupo de coordenadas en ITRF93.
4. Para obtener las coordenadas finales en ITRF94, se calcularon parámetros de transformación entre las coordenadas obtenidas en el ítem 3, referidas a ITRF93 y las coordenadas ITRF94 de estaciones pertenecientes simultáneamente a SIRGAS y a la red Global (6 del IERS y 3 de IGS).

Solo 4 estaciones (Arequipa, Fortaleza, Kourou y Santiago) de América del Sur estaban incluidas en la solución oficial ITRF94 del IERS, con coordenadas de estación en la época 1993.0 y velocidades para extrapolar a la época 1995.4. Fueron consideradas insuficientes para obtener buenos parámetros de transformación. Por lo tanto se realizó otra prueba agregando 2 estaciones cercanas que pertenecían a SIRGAS y que tenían coordenadas y velocidades determinadas por el IERS (Easter Island y O'Higgins), pero se encontraron considerables distorsiones en la red.

Por otro lado al momento de finalizar los cálculos de SIRGAS, estaban disponibles dos soluciones de 1996 del IGS, la del Centro de Análisis CODE (Berne) y la de JPL, ambas referidas a ITRF94 e incluyendo 3 estaciones adicionales de SIRGAS, ubicadas en América del Sur (Bogotá, Brasilia y La Plata).

Se decidió utilizar como puntos fiduciales el promedio entre las coordenadas calculadas en CODE y en JPL (ambas referidas a ITRF94 y extrapoladas a la época 1995.4). Las diferencias máximas entre las coordenadas de CODE y JPL para las 9 estaciones fueron de 3,6 cm para el caso de Bogotá y Easter Island y 3,8 cm en Santiago.

5. La solución final de SIRGAS fue calculada por una transformación de 7 parámetros entre las coordenadas medias CODE/JPL en ITRF94 a la época 1995.4 y las coordenadas combinadas de la solución DGFI/NIMA, referidas a ITRF93, calculadas en el ítem 3, usando las nueve estaciones IGS. Estos parámetros de transformación fueron aplicados a las coordenadas combinadas DGFI/NIMA para calcular las coordenadas finales en ITRF94 a la época 1995.4.

### ***Utilización futura de las coordenadas en el Marco de referencia SIRGAS.***

Uno de los objetivos principales del proyecto SIRGAS es establecer y mantener una red de referencia continental, realización del sistema de referencia geocéntrico, por un marco de estaciones posicionadas en forma muy precisa.

La principal razón de este objetivo es la aplicación de técnicas satelitales globales en el posicionamiento geodésico (GPS). La determinación de posiciones de estaciones terrestres desde observaciones a satélites geodésicos requiere la consistencia entre los sistemas de referencia terrestre y satelital.

Como las órbitas de los satélites están generalmente referidas a ITRF (el cual es prácticamente idéntico que WGS84 actualizado), se necesitan las coordenadas de puntos fiduciales en el mismo sistema. Este requerimiento es el que lleva a proveer las coordenadas SIRGAS en ITRF.

La red SIRGAS fue observada en Mayo/Junio de 1995 (época  $t_0=1995.4$ ). Las coordenadas de las estaciones se refieren por lo tanto a esta época específica. Las estaciones materializadas sobre la superficie terrestre, se están moviendo debido a recientes movimientos de la corteza terrestre. Como consecuencia las coordenadas de las estaciones terrestres son válidas sólo para la época 1995.4. Por otro lado las órbitas de los satélites no están afectadas por los movimientos de la corteza, por lo tanto el marco de referencia irá divergiendo del marco satelital.

El mantenimiento del marco de referencia SIRGAS incluye además de la conservación de la monumentación de cada sitio, la evolución de sus correspondientes coordenadas en el tiempo, para garantizar la consistencia entre los sistemas terrestre (SIRGAS) y satelital.

Para esto se requiere contar con las velocidades de las estaciones,  $\underline{V}$  (variación de coordenadas  $dX/dt$ ,  $dY/dt$  y  $dZ/dt$ ) para cada estación. Estas velocidades pueden provenir tanto de observaciones repetidas y su correspondiente determinación de coordenadas, como de modelos de deformación de la corteza terrestre.

### ***Velocidades de las estaciones a partir de la repetición de observaciones.***

Las estaciones del IGS, incluidas en la red SIRGAS están equipadas con receptores GPS operando permanentemente. Los grupos de datos de observación son rutinariamente evaluados y proveen de coordenadas de las estaciones semanalmente.

El DGFI es uno de los 6 centros de análisis asociados de redes regionales (RNAAC) que opera con las observaciones de América del Sur, procesando todos los datos disponibles desde las estaciones permanentes de observación en la región. Hasta mayo de 1997 incluía 14 estaciones SIRGAS. Estos resultados son luego combinados con todos los de los demás centros de análisis para obtener la solución global. De esta forma se cuenta con coordenadas semanales para todas las estaciones permanentes de SIRGAS en ITRF y con las cuales se pueden calcular las velocidades de tales estaciones. Se ha recomendado instalar tantos receptores GPS permanentes como sea posible en los sitios SIRGAS.

Para calcular las velocidades de las estaciones no equipadas con receptores permanentes, se necesitaría repetir mediciones en el tiempo " $t_i$ ", de tal manera de calcular nuevas coordenadas de las estaciones. La variación de las coordenadas dividida por el intervalo de tiempo entre observaciones sucesivas permitiría calcular las velocidades de cada estación.

$$\underline{\Delta X} (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = \underline{X} (t_i) - \underline{X} (t_0) ; \quad \underline{V} = \underline{\Delta X} / \Delta t \quad ; \quad \underline{V} (V_x, V_y, V_z)$$

Para mejorar la precisión en la estimación de velocidades, el intervalo de tiempo entre las distintas campañas GPS no debe ser muy corto, se recomienda no menor a 5 años.

### ***Velocidades de estación desde los modelos de deformación de la corteza terrestre.***

En los casos en que no se cuenta con coordenadas repetidas en las estaciones, las velocidades no pueden determinarse en forma empírica. Para propagar las variaciones de coordenadas en el tiempo deben utilizarse modelos de deformación aproximados.

El IERS adoptó el modelo de placas cinemático NNR NUVEL-1A para todas las estaciones a las cuales las velocidades no han sido determinadas en forma empírica en ITRF. El territorio Sud Americano está cubierto por dos placas en este modelo: La placa Sud Americana y la Caribbean. Las islas del Pacífico (estación SIRGAS Galápagos e Isla de Pascua) están situadas en la placa de Nazca y O'Higgins en la Antártica. Los parámetros de rotación de estas placas se muestran en la **tabla N°2.2**

Placa	$\Omega_x$ [rad/10 <sup>9</sup> a]	$\Omega_y$ [rad/10 <sup>9</sup> a]	$\Omega_z$ [rad/10 <sup>9</sup> a]
Sud Americana	-1.038	-1.515	-0.870
Caribbean	-0.178	-3.385	1.581
Nazca	-1.532	-8.577	9.609
Antártica	-0.821	-1.701	3.706

**Tabla N°2.2**

La hipótesis de una placa rígida es sólo una aproximación, difiere de los movimientos reales de las estaciones. Esto sucede principalmente en los bordes de las placas donde hay deformaciones considerables, ya que los bordes de las placas no pueden modelarse como cuerpos rígidos. El oeste del continente Sudamericano a lo largo de la cordillera de Los Andes presenta una zona de deformación.

En esta región no se puede utilizar el polo de rotación dado para la placa sudamericana. Una mejor aproximación es un vector rotación derivado de observaciones geodésicas espaciales [Drewes, 1998].

Zona Andes  $\Omega_x = -1,0 \text{ rad}/10^9 \text{ a}$  ,  $\Omega_y = -4,0 \text{ rad}/10^9 \text{ a}$  ,  $\Omega_z = 1,4 \text{ rad}/10^9 \text{ a}$

La diferencia entre las velocidades calculadas en los Andes Centrales utilizando este vector rotación y el vector rotación correspondiente a la placa es 2 cm / a , en 5 años produciría una diferencia en las coordenadas de 10 cm. Por esto se recomienda determinar verdaderas velocidades a las estaciones a partir de nuevas determinaciones de coordenadas. Junto a las deformaciones continuas, se deben considerar movimientos discontinuos producidos por movimientos particulares, por ejemplo por terremotos. Un ejemplo es el terremoto de Antofagasta, el 30 de Julio de 1995 (dos meses después de la campaña SIRGAS) donde se

observó un desplazamiento horizontal de 70 cm. Las coordenadas SIRGAS deben ser corregidas por tales movimientos antes de ser utilizadas como marco de referencia.

### ***La utilización de las coordenadas SIRGAS como un marco de referencia.***

Las siguientes recomendaciones son una síntesis de los pasos a seguir para utilizar las coordenadas SIRGAS como estaciones fiduciales en la utilización de técnicas espaciales en el posicionamiento geodésico en América del Sur.

Se asume que se ha realizado una campaña de observación en el tiempo  $t_i$ , ocupando nuevas estaciones y simultáneamente se ha medido sobre puntos de SIRGAS. El resultado del procesamiento de los datos será obtener las coordenadas de las nuevas estaciones en el sistema de referencia SIRGAS, por ejemplo en una densificación nacional. En este caso se deberán seguir los siguientes pasos:

1) Propagar las coordenadas de las “S” estaciones SIRGAS desde la época 1995.4 a la época de la observación  $t_i$ , con las velocidades de las estaciones  $V_s$  provenientes de observaciones repetidas o bien de modelos de deformación:

$$\underline{X}_s(t_i) = \underline{X}_s(1995.4) + \underline{V}_s \cdot (t_i - 1995.4)$$

2) Desarrollar un ajuste de coordenadas utilizando las observaciones a la época  $t_i$  en conexión con las coordenadas SIRGAS  $\underline{X}_s(t_i)$ .

3) Transformar las coordenadas de las N estaciones desde la época de observación  $t_i$  a la época de referencia  $t_0 = 1995.4$ , para tener coordenadas homogéneas a la época SIRGAS

$$\underline{X}_N(1995.4) = \underline{X}_N(t_i) - \underline{V}_N \cdot (t_i - 1995.4)$$

Como las velocidades  $V_N$  de las nuevas estaciones no son conocidas tendrán que derivarse de un modelo de deformación. Esto demuestra la necesidad de incluir un modelo de deformación de la corteza en el sistema de referencia SIRGAS. Si no se reducen las nuevas coordenadas a la época de referencia  $t_0$ , se tendrán grupos de coordenadas no homogéneas referidas a épocas diferentes. La diferencia es 1 o 2 cm por intervalo de tiempo de 1 año desde 1995.4. Para desarrollar la reducción se necesita un modelo de deformación continuo para todo el continente. Por esto se recomienda continuar el proyecto de monitoreo y modelación de deformaciones de la corteza en América del Sur.

### ***Datum Geocéntrico.***

La misión del G.T II fue designar y establecer a través del Datum geocéntrico la densificación de la red SIRGAS y la red Geodésica de cada país participante.

Se determinó que deberían considerarse para el datum geocéntrico los ejes de coordenadas basados en el sistema de referencia SIRGAS y los parámetros del elipsoide de referencia geodésico (GRS) de 1980. También se estableció que el sistema de referencia SIRGAS estaría basado en ITRF.

Se realizó un diagnóstico de la situación específica de cada país miembro, detectando situaciones muy diferentes. Finalmente en agosto de 1996, se concluyó que el desarrollo de la integración de las redes geodésicas de cada país sería individualmente implementado bajo las recomendaciones técnicas y la coordinación del G.T. II.

## **2.5. Estado actual de la integración de la red geodésica nacional POSGAR al sistema sudamericano SIRGAS y al sistema global ITRF.**

El marco de referencia actual para Argentina es conocido como POSGAR'94, consiste en 127 puntos. Aproximadamente el 50 % coincide con puntos del sistema geodésico local, denominado CAI69.

La campaña de observación GPS de POSGAR tuvo lugar en 1993 y 1994. A comienzos de 1995 finalizaron los cálculos de POSGAR'94. Se utilizó para el cálculo un software comercial y se obtuvieron precisiones entre 1 y 0,5 ppm, resultando en el sistema WGS'84 con un margen de error de 1 m.

Un nuevo cálculo de la totalidad de la red POSGAR se realizó entre 1996 y 1999, siguiendo las recomendaciones del G.T. II de SIRGAS. Los objetivos que se pretendieron fueron los siguientes:

- Integrar individualmente la red nacional POSGAR a SIRGAS.
- Integrar nuevas mediciones a POSGAR.
- Coordinar las necesidades del país con respecto al ajuste y transformación de coordenadas.

- Encontrar la solución apropiada para definir las coordenadas de la red clásica en el nuevo sistema, acorde a las especificaciones de SIRGAS

Las tareas fueron realizadas íntegramente en el país en la FCAG de la UNLP, con asistencia científica del 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 una prueba para tres partes diferentes de la red, 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 de trabajo planteado fue el siguiente:

- 1-Cálculo de las observaciones de las campañas POSGAR 1993 y POSGAR 1994.
- 2-Vinculación de los 4 puntos SIRGAS no coincidentes con POSGAR.
- 3-Ajuste al marco de referencia SIRGAS utilizando todos los puntos disponibles.
- 4-Verificación de los resultados mediante observaciones independientes.

A las observaciones utilizadas en el cálculo de POSGAR'94 se sumaron observaciones pertenecientes al proyecto CAP, contemporáneas a las observaciones de 1993 que permitieron agregar vectores que aumentaron la rigidez de la parte noroccidental de la red. Las sesiones fueron de 22 hs durante varios días y corresponden a:

- Las estaciones TRES, BDSO y TNDL en Argentina.
- Las estaciones BMNS, SANT, LEBU, CALD y ARIC, en Chile.

Además se incorporaron las observaciones correspondientes a las vinculaciones SIRGAS-POSGAR en La Plata (LPGS), Iguazú (IGUA), Mendoza (CRIC) y Salta (UNAS).

En el caso de La Plata se realizó una vinculación de tres días de observación en diciembre de 1996 con el punto IGM0.

CRIC fue vinculada en noviembre de 1996 por personal del CRICYT, a los puntos PRDT y UPSA.

IGUA fue vinculada mediante una campaña que abarcó toda la Mesopotamia, realizada por el IGM en 1995.

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.

El cálculo se realizó en la FCAG con el paquete de procesamiento GPS Bernese V4.0, 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.

El observable seleccionado para el cálculo fue la combinación lineal libre de ionósfera, utilizando la solución de ambigüedades flotantes. Se utilizaron efemérides precisas del Centro para determinación de órbitas de Europa (CODE) para la campaña de 1993 y del IGS en 1994. Para las campañas de vinculación y control final de la red, mas recientes, se utilizaron las efemérides precisas combinadas del IGS.

La máscara de elevación utilizada en el procesamiento final fue de 15 grados. Las correcciones por excentricidad de centro de fase de las antenas fueron aplicadas utilizando el modelo de valores recomendado por el IGS.

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. 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.

Se realizó una edición detallada de los datos para corregir ciclos perdidos.

Las sesiones se procesaron una por una teniendo en cuenta las correlaciones entre los diferentes vectores que la comprenden. Las coordenadas iniciales que se utilizaron fueron las de POSGAR94, a las cuales se les asignó un peso muy bajo. Esto permitió obtener un grupo de sub-redes libres. Las ecuaciones normales de las mismas se conservaron para su posterior ajuste. Durante esta fase, se eliminaron las ambigüedades de las ecuaciones normales y sólo se estimaron las coordenadas de las estaciones y las correcciones troposféricas. 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 control de la calidad de los resultados hasta allí obtenidos por comparación con las sesiones individuales.

### ***Introducción del sistema de referencia.***

El sistema de referencia que materializa POSGAR'98 es el ITRS. Se accede a él a través de las coordenadas del marco de referencia SIRGAS'95, que a su vez densifica al marco ITRF94 en América del Sur. Las coordenadas se encuentran referidas a la época 1995.4. Esta elección respetó lo acordado con el resto de los países sudamericanos en SIRGAS, con el fin de garantizar la compatibilidad de los marcos de referencia de los países de la región. Se utilizaron para la vinculación la totalidad de los puntos SIRGAS en territorio argentino a los que se sumó la estación IGS SANT (Chile).

Para el establecimiento del sistema de referencia se realizó primero el cálculo de las vinculaciones de 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 (1997.8 para UNAS, 1995.4 para IGUA y 1996.9 para CRIC y LPGS). Una vez hecho esto se calculó cada vinculación. Luego, las coordenadas de todos los puntos vinculados fueron llevadas a la época central de observaciones, esto es 1993.8. Además, dado que las efemérides precisas disponibles para 1993-1994 se refieren al marco ITRF92, se debió transformar las coordenadas de control a ese marco mediante parámetros producidos por el IERS. Se acumularon las ecuaciones normales de todas las sesiones y se calculó la red completa. El ajuste final se realizó asignando pesos a las coordenadas de los puntos SIRGAS. Las coordenadas resultantes del ajuste, fueron transformadas de ITRF92 a ITRF94 y de la época

1993.8 a 1995.4. Considerando la calidad superior de las coordenadas SIRGAS y vinculaciones SIRGAS-POSGAR, para estos puntos se adoptaron sus coordenadas y errores originales en lugar de los que resultaron del ajuste.

Las transformaciones de época se realizaron utilizando el modelo geofísico NNR NUVEL1A para todos los puntos excepto en el caso de SANT, en el que se utilizaron las velocidades publicadas en la definición del marco ITRF94, ya 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.

## **Resultados**

A partir de las comparaciones con las coordenadas de control SIRGAS y sus vinculaciones, junto a las comparaciones con observaciones independientes, implicando el control de aproximadamente el 20% de sus puntos, puede decirse que el marco POSGAR98 materializa el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) con un error medio cuadrático ( $1\sigma$ ) menor que 2 cm en latitud y longitud y menor que 3 cm ( $1\sigma$ ) en altura elipsoidal.

También se concluyó 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 mas afectada la altura, que presenta diferencias inferiores a 1,5 m.

Se encuentra en análisis la forma en que va a ser mantenida o mejorada la calidad del actual marco de referencia. Esto es necesario si se desea mantener una precisión y exactitud respecto de ITRS/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.

## **2.6. El Sistema de referencia vertical en el contexto del proyecto SIRGAS.**

Estos conceptos han sido extraídos de [R. Rodríguez y C. Brunini, 2001]

Dentro del proyecto SIRGAS, se presenta la necesidad de definir un Sistema de referencia vertical único para todo América del sur, por lo cual se ha conformado el Grupo de Trabajo III, que tiene a su cargo la definición y materialización del mismo. Frente a esta necesidad se ha analizado el estado del arte de los Sistemas verticales, de cuyo estudio han surgido las siguientes conclusiones y recomendaciones impartidas al proyecto y a los países participantes:

Se recomienda que la definición del Sistema de Referencia Vertical para América del Sur se fundamente en dos tipos de alturas: las elipsoidales y las normales.

Los argumentos se resumen en:

Las alturas elipsoidales son suficientes para definir un marco de referencia vertical preciso. No obstante, al ser esencialmente geométricas, éstas deben ser complementadas con un conjunto de alturas de tipo físico que permitan satisfacer las necesidades prácticas de los usuarios comunes.

Dentro de las alturas de tipo físico, se destacan las alturas normales y las ortométricas. Sin embargo, las normales se prefieren, ya que; a pesar de tener aplicación práctica similar a las ortométricas, en su determinación no se requiere de la formulación de hipótesis o modelos geofísicos de la densidad de las masas internas terrestres, facilitándose su evaluación a partir de los números geopotenciales y de la formulación matemática del campo de gravedad normal.

Las alturas normales utilizan como plataforma de referencia el cuasi-geoide, el cual se calcula normalmente por métodos gravimétricos y satelitales. Mientras que, el geoide, superficie de referencias de las alturas ortométricas, demanda de la formulación de modelos geofísicos para su determinación, lo que se traduce en la variación de las alturas, cada vez que cambie la hipótesis de estimación.

Las alturas normales se obtienen más fácilmente, que las ortométricas, a partir de las mediciones GPS, ya que las alturas elipsoidales son disminuidas por cantidades calculadas matemáticamente.

Las alturas normales facilitan la combinación de las obtenidas a partir del posicionamiento GPS y sus correspondientes, calculadas mediante nivelación geométrica reducida a través de correcciones gravimétricas normales. Esta condición, garantiza una extensión más homogénea del control vertical en los diferentes países de América del Sur, sin descuidar la consistencia de un marco de referencia vertical único. La superficie de referencia debe definirse de acuerdo con

el tipo de alturas seleccionado, la cual, en este caso corresponde con el cuasi-geoide. Es conveniente que éste sea determinado de manera conjunta en todos los países de América del Sur.

Finalmente, con el propósito de vincular sistemas clásicos de referencia vertical, es necesario determinar las alturas normales de los mareógrafos que constituyen los diferentes datum. Para el efecto, deben combinarse rastreos GPS, altimetría satelital y alturas anómalas del modelo cuasi-geoidal.