

# HACIA LA UNIFICACIÓN DE LAS REDES GEODÉSICAS ARGENTINAS

María Virginia Mackern<sup>1</sup>, Claudio Brunini<sup>2</sup>, Juan Moirano<sup>2</sup>, Rubén Rodríguez<sup>1</sup> y Eduardo Lauría<sup>3</sup>

- 1) Consultor independiente
- 2) Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata
- 3) Instituto Geográfico Militar

## Resumen

La Argentina cuenta hoy con un marco de referencia de “primer orden” materializado por aproximadamente 130 puntos y densificaciones provinciales que acumulan unos 2000 puntos distribuidos en todo el territorio. Estas densificaciones se han ejecutado con criterios dispares, tanto en la etapa de medición como en la de cálculo, produciendo redes de exactitud y precisión muy variada. Este trabajo brinda elementos de juicio cuantitativos que demuestran la conveniencia de unificar las redes existentes, mediante un cálculo riguroso que permita establecer un marco de referencia de exactitud consistente con SIRGAS e ITRF, aunque de precisión variable y asignar a cada punto del marco de referencia un estimador de precisión realista, imprescindible para cualificar las redes dentro de un sistema de estándares geodésicos.

## Abstract

The “first order” reference frame of Argentina is currently realized by about 130 points. Regional densifications up to about 2000 points were made, covering the whole country. Different criteria were used for both, field and calculus procedures, giving as a result densifications of different accuracies and precessions. This paper presents a quantitative analysis that shows the convenience to unify all the existing networks, performing a rigorously re-computation. This task will establish a frame consistent in accuracy with SIRGAS and ITRF, but with variable precision, and will assign to each point of the frame a realistic estimation of precision, necessary to qualify the networks in any system of geodetic standards.

## Introducción

La realización del marco de referencia terrestre ha experimentado a lo largo de la última década mejoras sustanciales tanto en su exactitud como en su cobertura global. Ejemplo de ello son los marcos de referencia SIRGAS [Rodríguez y Brunini, 2001], a escala regional, y POSGAR 98 [Moirano, 2000], a escala nacional. Otra mejora significativa es la realización a través de estaciones permanentes, cuya concreción en nuestro país se está llevando a cabo a través del proyecto RAMSAC [Lauría y Cimbaro, 1999].

Grandes esfuerzos han sido realizados por el Instituto Geográfico Militar (IGM) para dotar al país de un marco de referencia compatible con los avances internacionales. Tales esfuerzos, que han sido acompañados por la Universidad Nacional de La Plata y otras instituciones nacionales, se han traducido en los marcos de referencia POSGAR 94 [Usandivaras et al., 1995] y POSGAR 98. Las coordenadas POSGAR 94 fueron publicadas a comienzos de 1995 y adoptadas oficialmente por el IGM en mayo de 1997. Las coordenadas POSGAR 98 fueron difundidas a fines de 1998. Esta nueva realización supera significativamente en exactitud y precisión a su antecesora, POSGAR 94 [Brunini et al., 2002].

La evolución que el marco de referencia geodésico argentino ha experimentado en los últimos diez años es un proceso particularmente complejo debido a la coexistencia de numerosos proyectos tendientes al establecimiento de redes geodésicas con densidad y cobertura apropiada para solventar las necesidades de los catastros parcelarios y mineros provinciales [Georgiadou et al., 1998; Rodríguez et al., 2002]. Si bien los distintos proyectos han sido ejecutados en el marco de proyectos aglutinantes, como el Programa de Saneamiento Financiero y Desarrollo Económico de las Provincias Argentinas y el Programa de Asistencia Técnica al Sector Minero Argentino (PASMA), por diferentes circunstancias han dado lugar a redes geodésicas de diferente exactitud y precisión.

La diversidad es tal que actualmente coexisten redes vinculadas a los sistemas Inchauspe 69, POSGAR 94, POSGAR 98 y a sistemas regionales definidos con objetivos geodinámicos por los proyectos científicos CAP (Central Andes Project) y SAGA (South American Geodynamics Activities). Las redes difieren no sólo por

estar vinculadas a distintos marcos de referencia, sino también por haber sido medidas y calculadas con criterios muy disimiles, dando lugar a coordenadas cuya precisión es muy variable y, en algunos, casos, muy difícil de establecer de un modo realista.

Como corolario de los trabajos realizados, la Argentina cuenta hoy con una marco de referencia de “primer orden” (POSGAR 98), materializado por aproximadamente 130 puntos distribuidos en el país, y densificaciones provinciales, de exactitud y precisión variables, que acumulan unos 2000 puntos en el territorio argentino.

Teniendo en cuenta el enorme esfuerzo invertido para la ejecución de los trabajos de campo que dieron lugar a estas redes –esfuerzos que cuantificados en términos económicos suman millones de pesos–, vale la pena preguntarse si tiene sentido realizar un esfuerzo adicional, comparativamente pequeño, tendiente a unificar las redes existentes dentro de un marco de referencia común. Dicho trabajo tendría dos objetivos fundamentales:

- extraer el máximo beneficio del material proveniente de las observaciones existentes para establecer un marco de referencia de exactitud consistente con SIRGAS e ITRF, aunque de precisión variable; y
- asignar a cada punto del marco de referencia un estimador de precisión realista, imprescindible para calificarlo dentro de un sistema de estándares geodésicos.

Este trabajo brinda elementos de juicio cuantitativos, obtenidos a través del análisis de un problema concreto consistente en una sub-red de aproximadamente cincuenta puntos pertenecientes a las redes del proyecto Pasma en las provincias de San Juan, Catamarca, La Rioja y Salta. El trabajo evalúa las mejoras que un cálculo riguroso permitiría alcanzar en la precisión y la exactitud de las coordenadas.

### Un caso de estudio: integración de una sub-red geodésica a POSGAR 98.

La sub-red fue medida entre los meses de julio y agosto de 1997 por la Unión Transitoria de Empresas Esteio-IFTA, en el marco del Pasma (figura 1). Consta de 65 puntos que conforman líneas de base de entre 60 y 120 km. Se midió utilizando seis receptores GPS simultáneos, todos de doble frecuencia y código P. Las sesiones de observación tuvieron una duración de entre 10 y 12 horas cada una. Fue procesada en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, utilizando el *software* científico Geonap [Gillone and Brunini, 1999]. La sub-red fue ajustada al marco POSGAR 98, pero cumpliendo con las exigencias del pliego de licitación elaborado por las autoridades del Pasma, las coordenadas finales fueron transformadas al marco POSGAR 94, desaprovechando la calidad intrínseca de las mediciones GPS.

Frente a la hipótesis de que, por sus características de medición, la sub-red en cuestión tenía mejor precisión que POSGAR 94, se encaró un reprocesamiento tratando de mejorar sus debilidades, mediante dos emprendimientos que no requirieron la realización de tareas de campo adicionales: lograr un diseño más rígido mediante la incorporación de cinco esta-

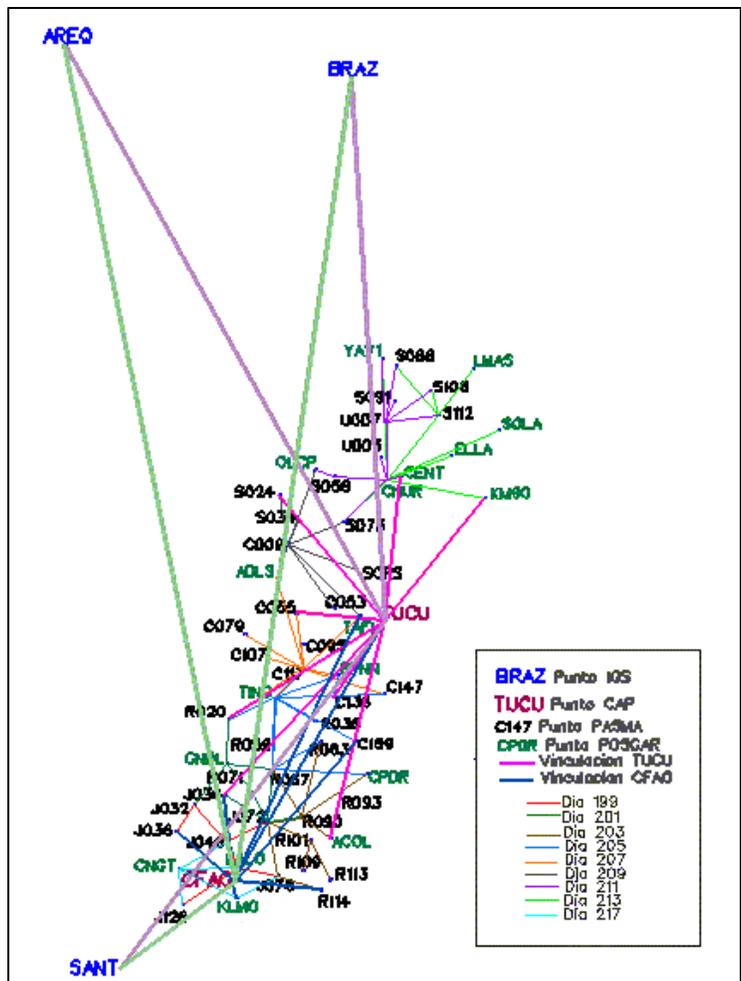


Figura1. Sub-red geodésica y estaciones permanentes.

ciones permanentes; y vincular la sub-red al ITRF, obteniendo un control riguroso sobre la calidad de las coordenadas resultantes.

El primer emprendimiento se llevó a cabo agregando observaciones de tres estaciones permanentes del International GPS Service (IGS) y dos estaciones permanentes de la Red Argentina de Monitoreo Satelitario Continuo (RAMSAC), todas ellas operativas en la región durante la época de las campañas PASMA (figura 1). Estas observaciones permitieron sumar cinco líneas de base independientes en cada sesión de observación.

La incorporación de las estaciones permanentes del IGS SANT (Santiago de Chile), AREQ (Arequipa) y BRAS (Brasilia), permitió la concreción del segundo emprendimiento: la vinculación de la sub-red a marcos de referencia modernos muy precisos, tales como los ITRF 94 y 97 [<ftp://ign.schubert.fr/pub/itrf>].

El procesamiento de las observaciones GPS se realizó con el *software* científico Bernese [Beutler et al., 2000], modelando rigurosamente los distintos factores que inciden en la precisión de las coordenadas calculadas, por ejemplo, correcciones por las variaciones del centro de fase de las antenas, corrección minuciosa de ciclos perdidos, estimación de parámetros troposféricos, etc. Como resultado final de esta etapa se obtuvo una red libre, esto es, una red en la que no se introdujeron coordenadas de control, dejando que el marco de referencia quedara definido solamente a través de las efemérides satelitales. La Tabla 1 presenta una estimación realista de la precisión de las coordenadas basada en su repetitividad a lo largo de distintas sesiones de medición.

	Horizontal	Vertical
Desvío estándar	±3 mm	±4 mm
Desvío máximo	11 mm	15 mm

Tabla 1. Precisión de las coordenadas .

## Resultados

Luego de evaluar la precisión de la sub-red libre se realizaron distintos ajustes ponderados con el objeto de definir el marco de referencia y evaluar la precisión de las coordenadas resultantes. Para la introducción del marco de referencia se tuvieron en cuenta las correcciones a las coordenadas de los puntos de control para llevarlas desde la época del marco de referencia a la época de las observaciones. En este cálculo se consideraron las velocidades del modelo NUVEL 1 A [De Mets et al., 1994] para los puntos POSGAR y las correspondientes geodésicas ITRF 94 ó ITRF 97 [Boucher et al., 1999] para los puntos IGS. En esta etapa se consideraron las siguientes alternativas:

- ITRF 94, definido a través de AREQ, SANT y BRAS. La ventaja de esta opción consiste en que es el mismo marco al que se vinculó la red POSGAR 98. Su desventaja es la época de referencia (1993.0), muy distante de la época de la campaña PASMA (1997.6). Las coordenadas de control quedarían afectadas por los errores de las velocidades, mayores que  $\pm 2$  mm/año, multiplicados por los 4.6 años que median entre las dos épocas. Recordemos además que sólo AREQ y SANT poseen velocidades geodésicas ITRF 94, siendo necesario utilizar el modelo NUVEL 1 A para estimar las velocidades de BRAS.
- ITRF 97 definido a través de AREQ, SANT y BRAS. Se consideró esta opción ya que sus coordenadas han sido definidas para la época de referencia 1997.0, casi coincidente con la de la campaña PASMA. Además de ello, los tres puntos poseen velocidades geodésicas en este marco de referencia.
- POSGAR 98 definido a través de 20 puntos distribuidos en la región de la sub-red. Si bien las coordenadas están referidas al marco ITRF 94, su precisión es algo menor. Además de ello, sólo se cuenta con velocidades estimadas utilizando el modelo NUVEL. El interés para utilizar este marco se fundó en la hipótesis de que una mejor distribución y una mayor cantidad de puntos de control podrían redundar en una mejor solución.
- POSGAR 94. Se consideró esta opción por tratarse del actual marco de referencia oficial del país y porque permitiría, además, evaluar las mejoras debidas al uso de otros marcos de referencia.

La figura 2 presenta una estimación realista de la precisión de las coordenadas obtenidas luego de vincular la sub-red a los distintos marcos de referencia considerados. Como indicadores de precisión se utilizaron los

desvíos de las coordenadas horizontales y vertical, luego de una transformación de similitud de siete parámetros entre cada uno de los ajustes y la sub-red libre. La figura 2 muestra el desvío estándar y el desvío máximo (en valor absoluto) para las componentes horizontales y vertical de las coordenadas.

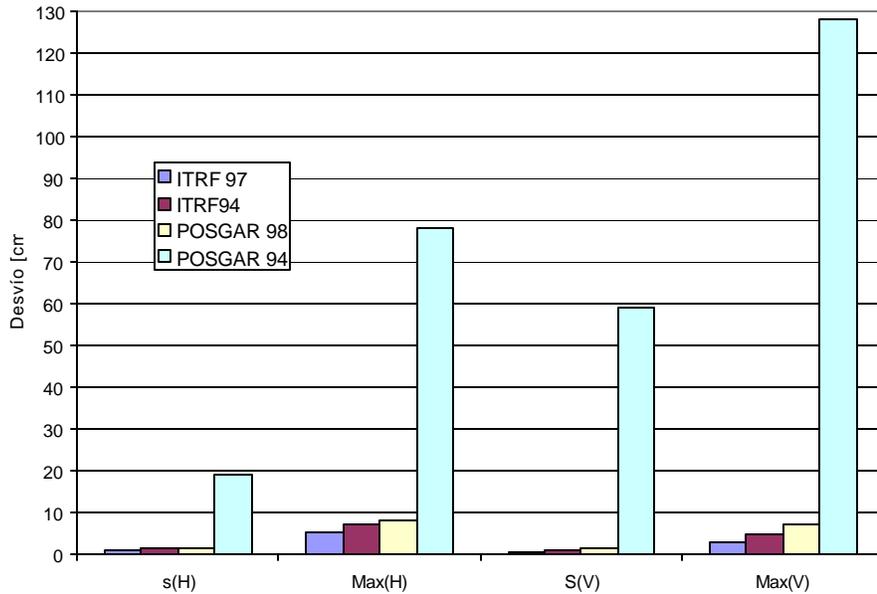


Figura 2. Precisión de las coordenadas obtenidas vinculando la sub-red a distintos marcos de referencia.

Se puede apreciar que la precisión mejora sensiblemente cuando se utilizan los marcos de referencia POSGAR 98, ITRF 94 ó 97. Vale la pena notar, sin embargo, que la densidad de puntos que materializan dichos marcos es muy reducida, lo cual nos llevó a evaluar la posibilidad de adoptar POSGAR 98 como control geodésico, obteniendo también en este caso resultados muy satisfactorios. Estos resultados demuestran, una vez más, la conveniencia de adoptar definitivamente POSGAR 98 como control geodésico para todo levantamiento preciso, particularmente cuando la coordenada vertical reviste interés.

### Conclusiones.

Se ha mostrado en forma cuantitativa, y a través de un ejemplo concreto, las mejoras que pueden alcanzarse en la precisión y en la exactitud de una red geodésica mediante un cálculo riguroso de las observaciones GPS, sin requerir trabajos de campo adicionales.

Las observaciones de las estaciones permanentes operativas durante las campañas de medición contribuyen a mejorar la redundancia de la red, lo que se traduce principalmente en una estimación de errores más realista, y posibilitan controles muy rigurosos gracias a la vinculación con algún marco de referencia de exactitud superior. El cálculo preciso de las largas líneas de base (miles de kilómetros) que conectan a la red con las estaciones permanentes del IGS es totalmente factible con la sola condición de utilizar un software apropiado y poseer la experiencia de procesamiento adecuada.

Las estrategias para lograr la unificación de las diversas redes geodésicas existentes en el país dentro de un marco de referencia homogéneo y consistente son variadas y no es trivial elegir la mejor. Con un cálculo riguroso la precisión intrínseca de las coordenadas puede llegar, en algunos casos, al orden de muy pocos milímetros. Diferentes estrategias de unificación cambian la exactitud de las coordenadas ajustada desde el orden de los pocos milímetros al orden del metro. Desde un punto de vista técnico, es indiscutible que las redes no deben unificarse bajo el marco de referencia POSGAR 94. Unificarlas bajo otro marco de referencia (POSGAR 98 ó ITRF 97) no impediría transformar las coordenadas ajustadas a POSGAR 94, si se deseara trabajar en ese marco de referencia. La inversa no es cierta, sin degradar la calidad intrínseca de las observa-

ciones GPS. Cómo y cuándo se cambiarán las coordenadas oficiales del país es una discusión política que no impide que se calcule el mejor marco de referencia posible, aunque para algunos fines se siga usando POSGAR 94.

El trabajo necesario para realizar la unificación de las redes existentes es mínimo comparado con el esfuerzo ya invertido para ejecutar los trabajos de campo. Si compartimos el criterio de que la GEODESIA debe apuntar a dotar al país del mejor marco de referencia que la tecnología y los recursos materiales y humanos permitan alcanzar, no debemos dudar en buscarlos a fin de que nos permitan afrontar exitosamente esta etapa.

## Referencias

- Beutler, G., E. Brockmann, S. Frankhauser, W. Gurtner, J. Johnson, L. Mervart, M. Rothacher, S. Shaer, T. Springer, R. Weber, Bernese GPS Software Version 4.2. Astronomical Institute-University of Berne, 2000.
- Boucher, C., Z. Altamimi and P. Sillard, The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF 97). IERS Technical Notes 27, Observatoire de Paris, 1999.
- Brunini, C., J. Moirano, H. Drewes and K. Kaniuth, Improvements in the ellipsoidal heights of the Argentine reference frame. In Vertical Reference Systems Symposium, International Association of Geodesy, H. Drewes (ed.), Springer, 2002.
- De Mets C., R. Gordon, D.F. Argus, S. Stein, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.* (21) 2191-2194, 1994.
- Georgiadou, Yola, L. Hothem, and C. Brunini, Spatial Reference Systems in Argentina. In *Developing the profession in a developing world, the International Federation of Surveyors*, L. Hothem (ed.), 1998.
- Gillone, R. and C. Brunini, Setting boundaries. *GPS World*, Vol. 10, Num. 2, Advanstar Communications, 1999.
- Lauría, E. y S. Cimbaro, Proyecto RAMSAC, *Revista Cartográfica*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, No 68, Enero-Junio de 1999.
- Moirano, J., Materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional en Argentina mediante observaciones GPS. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, agosto de 2000.
- Rodríguez, R. y C. Brunini, SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur. En *Georreferenciación*, Vol. 7 en la serie Temas de Geociencias, A. Introcaso (ed.), UNR Editora, 2001.
- Rodriguez, R., C. Brunini and A. Christensen, The national mapping act and the status of cartography in the Argentine Republic. In *Proceedings of the FIG Congress 2002*, Washington DC, Apr. 19-26, 2002.
- Usandivaras, J. C., C. Brunini, D. Canosa, C. Mondinalli, M. Gende, J. Moirano y J. L. Alvarez, Cálculo de la red geodésica nacional argentina: estrategia y resultados. En *Actas del XVII Congreso Brasileño de Cartografía*, Salvador, 2 al 8 de septiembre de 1995.