

Hacia un nuevo Marco de Referencia

Eduardo Andrés Lauría*

Abstract

The Geodetic Reference Frames are advancing towards their definition by means of GPS Permanent Stations Networks compatible with internationally defined and global reference Systems.

The Argentine Republic has been a pioneer in South America, by adopting a Geocentric Reference Frame using the good opportunities provided by the satellite technology. Since it has been established, POSGAR 94 (1994 Argentine Geodetic Positions), has complied with the requests from users coming from very different sciences, who nourish from the information it provides.

The uninterrupted technological advances, together with the possibility of integrating to a unique regional system and the improvements in measurement and calculation methods, require our country to update its present reference frame to satisfy modern requirements of geodesy.

A modern, dynamic and versatile Geodetic Reference Frame will allow fulfilling all the technical, scientific and legal needs within our territory, and link to continental and superior order global frames.

Resumen

Los Marcos de Referencia Geodésicos avanzan hacia su definición a través de las Redes de Estaciones Permanentes GPS compatibles con Sistemas de Referencia definidos internacionalmente y de alcance global.

La República Argentina ha sido pionera en Sudamérica, adoptando un Marco de Referencia Geocéntrico utilizando las facilidades de la tecnología satelital. Desde su implementación, POSGAR 94 (Posiciones Geodésicas Argentinas 1994), ha satisfecho las demandas de los usuarios de las más variadas ciencias que se nutren de la información que proporciona.

* Teniente Coronel Ingeniero Geógrafo, Jefe División Geodesia IGMA, Vicepresidente Proyecto SIRGAS, Secretario Sección Nacional Argentina del IPGH, Avenida Cabildo 381, C1426AAD, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, República Argentina, correo electrónico: elauria@igm.gov.ar

Los continuos avances tecnológicos, la posibilidad de integrarse en un sistema regional único y las mejoras en las técnicas de medición y cálculo, requieren que nuestro país adecue su actual marco de referencia a las modernas exigencias de la geodesia.

Un Marco de Referencia Geodésico moderno, dinámico y versátil permitirá satisfacer todas las necesidades técnicas, científicas, y legales dentro de nuestro territorio y vincularnos a los sistemas de orden superior, a nivel continental y mundial.

Introducción

El advenimiento de la tecnología satelital significó un impacto revolucionario en la geodesia como ciencia dedicada al estudio de la forma y dimensiones de la Tierra.

Sin variar su origen conceptual debió responder desde entonces a un nuevo escenario materializado fundamentalmente por:

- La posibilidad de hacer determinaciones casi inmediatas y con mínimo esfuerzo.
- La explosiva proliferación y uso de los nuevos métodos de adquisición de datos por parte de los usuarios.
- La reformulación de las características de los Sistemas de Referencia.
- La posibilidad de cuantificar los movimientos de la corteza terrestre sin recurrir a modelos geofísicos o geodinámicos.

Esta nueva geodesia dinámica obligó a un replanteo integral en lo que hace a la definición y mantenimiento de los Marcos de Referencia y sus resultados impactan decididamente en todos los ámbitos relacionados, los cuales a su vez se encuentran en plena expansión.

Marcos y sistemas de referencia

Una primera y casi intuitiva aproximación al concepto de Sistema de Referencia Geodésico nos permitiría definir al mismo como el conjunto de convenciones, modelos y algoritmos matemáticos que permiten asignar coordenadas a un punto de la superficie terrestre.

Convengamos, en principio, que no disponiendo de los medios actuales a lo que oportunamente nos referiremos, resultaba imposible a la geodesia clásica formular esos algoritmos sobre la base un sistema cartesiano ortogonal y que por lo tanto resultó procedente recurrir a un modelo geométrico tridimensional (el elipsoide de revolución) sobre el cual desarrollarlos. Así, y definiendo un punto de arranque de las mediciones (Punto Datum), se tendieron las grandes redes geodésicas que surcaron el planeta.

Estas redes de puntos materializan el sistema de referencia y constituyen lo que denominamos Marco de Referencia Geodésico.

Proliferaron entonces elipsoides que, adoptados de acuerdo a su mejor conveniencia por los países, constituyeron la base sobre los cuales se realizaron las mediciones.

Queda claro que distintos países, aún vecinos, definiendo distintos sistemas dispusieron de coordenadas no compatibles entre sí.

Este problema surge no sólo entre países sino dentro del mismo territorio donde cuestiones coyunturales fueron marcando la necesidad de adoptar simultáneamente diferentes sistemas.

No constituyó ésta, de manera alguna, una dificultad insalvable para la geodesia ya que a través de sencillos pero trabajosos métodos de medición y cálculo fue posible vincular distintos marcos.

Las redes geodésicas fueron medidas con instrumentos de precisión que permitían determinar ángulos y distancias sobre la superficie y por lo tanto trabajaban en un espacio bidimensional. El problema de las determinaciones altimétricas quedó, por lo tanto, vinculado a la geodesia física.

El 17 de agosto de 1974, el gobierno de los Estados Unidos presentó el proyecto espacial más costoso de su historia. En 1991, NAVSTAR-GPS tuvo su bautismo de fuego en la Guerra del Golfo.

NAVSTAR-GPS es un proyecto geodésico concebido con fines militares y difundido a todas las ramas de la ciencia con una velocidad previsible, pero abrumadora en muchos casos, obligando a reformular conceptos que hasta entonces parecían inamovibles y abriendo horizontes de aplicación, aún en pleno desarrollo.

Nació un nuevo concepto en lo que a sistemas de referencia corresponde. Una constelación de satélites orbitando alrededor de la Tierra, con órbitas keplerianas transmitiendo constantemente su posición en un sistema de referencia cuasi-inercial solidario al centro de masas terrestre.

Con posiciones conocidas desde el mismo enunciado de las leyes de Kepler, con ondas portadoras de información que recorren los 20,000 km que separan la constelación de la superficie de la tierra a la velocidad de la luz y con receptores capaces de interpretar su señal, la resolución de la posición pasa por un cálculo trivial.

Ahora, el sistema cartesiano ortogonal es inmediato y el elipsoide de revolución asociado a este nuevo sistema (WGS 84) no es más que una convención para hacer "entendibles" las engorrosas cifras en X, Y, Z.

De repente, y sin abordar cuestiones específicas que trataremos más adelante, aquellas limitaciones que señaláramos en los sistemas locales, desaparecen.

En efecto, GPS es un sistema tridimensional que proporciona coordenadas planimétricas (latitud y longitud) y altimétricas (altura sobre el elipsoide de revolución).

Las trabajosas tareas de determinaciones geodésicas se transforman en sencillos procedimientos.

GPS ofrece un marco global y único, quien recibe la señal emplea los mismos parámetros en cualquier lugar del planeta.

Los niveles de precisión en la determinación convergen siempre a un mejor valor y a su vez el complemento de una informática cada vez más potente conduce a resultados sorprendentemente rápidos y siempre mejores.

El impacto fue inmediato, pero la reacción requirió y requiere de tiempo físico para acomodar las antiguas estructuras al presente.

Los marcos de referencia modernos

Para comprender las características de los modernos marcos de referencia es necesario mantener omnipresentes algunos conceptos básicos.

Todos los puntos de la superficie terrestre se mueven por efecto del desplazamiento de las placas continentales que conforman la corteza.

Este era un efecto conocido, pero no cuantificable desde el punto de vista geodésico hasta la llegada del GPS.

Si un punto se mueve y ese movimiento puede detectarse en el tiempo, entonces es posible determinar su velocidad.

Solo pueden compararse velocidades medidas en un mismo sistema de referencia (principio elemental de relatividad especial).

La inmediata conclusión de la aplicación de estos principios es que la coordenada “velocidad” pasa a formar parte necesaria del conjunto de valores que sirven para identificar unívocamente cualquier punto sobre la Tierra.

Definición de Sistemas y Marcos

Sistemas y Marcos globales

Asumimos un sistema de referencia global, analicemos la definición del mismo.

Establecido conjuntamente por la International Astronomical Union (IAU) y la International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) en 1988, el IERS (International Earth Rotation and Reference System Service) tiene por misión proveer al mundo científico y a la comunidad técnica valores de referencia para los parámetros de orientación de la Tierra (EOP) que surgen al considerar el movimiento del polo y las variaciones de la velocidad de rotación terrestre. Para ello contribuyen las siguientes técnicas espaciales geodésicas:

- VLBI: medición de radiofuentes extragalácticas por medio de radiotelescopios.
- SLR: medición de distancias láser a satélites específicos desde telescopios especiales.

- LLR:** medición de distancias láser a la Luna desde telescopios especiales.
- GPS:** medición de distancias a satélites GPS con receptores específicos.
- DORIS:** medición de variación de distancias desde satélites específicos a balizas orbitográficas.

El ITRS (International Terrestrial Reference System) es definido por IERS, siendo un sistema ideal correspondiendo al Sistema de Referencia Terrestre Convencional (<http://www.iers.org>).

A partir de una solución combinada de los resultados obtenidos por estas técnicas, el IERS define un ITRF (International Terrestrial Reference Frame) para un instante determinado, normalmente coincidente con el primer día del año, así por ejemplo, el ITRF 94 constituye la realización del ITRS para el 1 de enero de 1994. Para ello, utiliza la información procedente de más de 200 estaciones de rastreo del IGS (International GNSS Service) distribuidas en todo el planeta (Figura 1).

Simultáneamente la NGA (National Geospatial - Intelligency Agency) de los Estados Unidos de Norteamérica, define el sistema WGS 84 (World Geodetic System 1984).

Este sistema geodésico estuvo estrechamente ligado al desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) sirviendo durante mucho tiempo para expresar las posiciones tanto de los puntos terrestres como de los satélites integrantes del segmento espacial. El WGS 84 no es sólo un sistema geocéntrico fijado a la tierra de ejes X, Y, Z sino, además, un sistema de referencia para la forma de la tierra (elipsoide) y un modelo gravitacional. El WGS 84 se ha popularizado por el uso intensivo de GPS y se han determinado parámetros de transformación para convertir coordenadas a todos los marcos de referencias locales y otros marcos geocéntricos. La DMA llegó a la definición de este sistema después de haber ensayado otros tres anteriores: WGS 60, WGS 66 y WGS 72.

Resulta importante entender que ITRF y WGS 84 fueron inicialmente y hasta el año 2001 dos sistemas de referencia globales y distintos (Figura 2) y por lo tanto de acuerdo a lo expresado en "Marcos y sistemas de referencia", no son válidas las comparaciones entre las velocidades de los puntos medidos en uno y otro sistema.

Las diferencias entre ambos sistemas fueron reduciéndose con el transcurso de los años y en 2002, WGS 84 adopta oficialmente ITRF. Este constituye un punto de inflexión en la definición de los sistemas y representa la integración definitiva del sistema "celeste" (GPS) y el marco "terrestre" (ITRF). En la práctica significa que desde entonces todos los puntos de la superficie de la Tierra cuyas coordenadas están referidas a ITRF y los satélites de la constelación se encuentran en un único sistema de referencia.

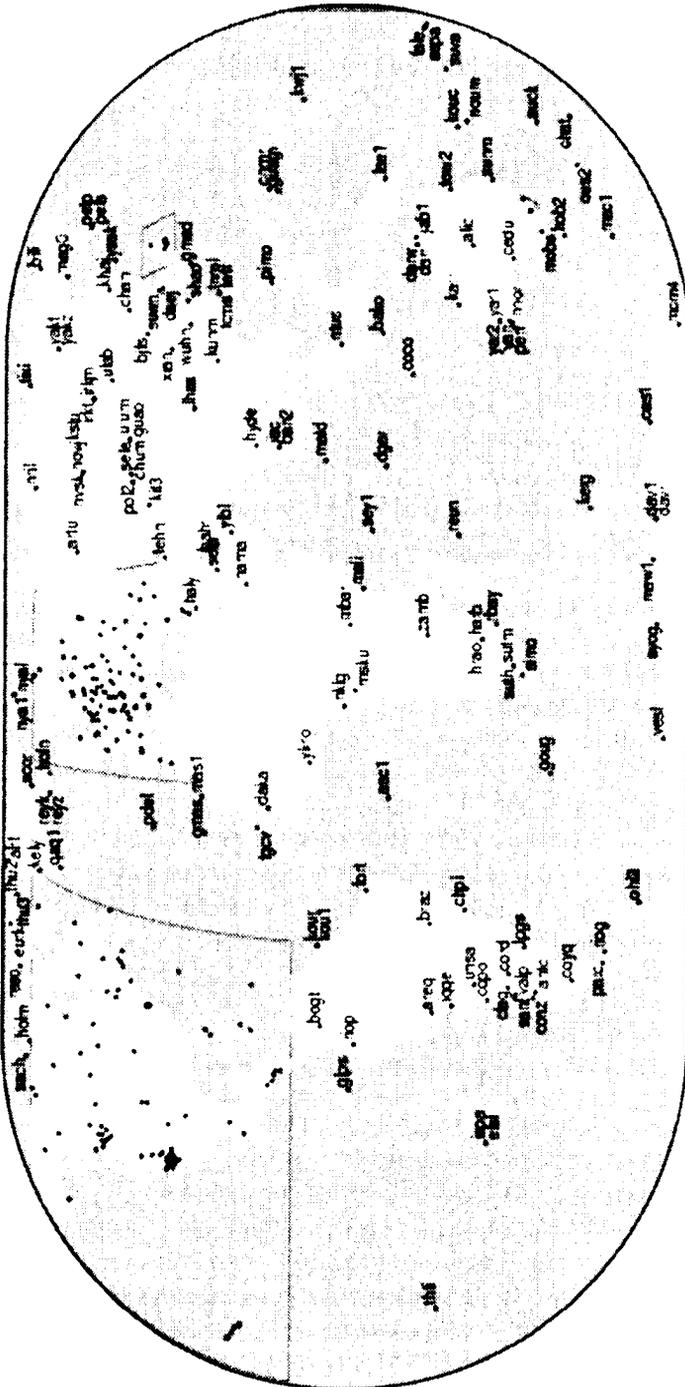


Fig. 1. Red ICS (http://igsb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html).

Figura 1. Red ICS (<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>).

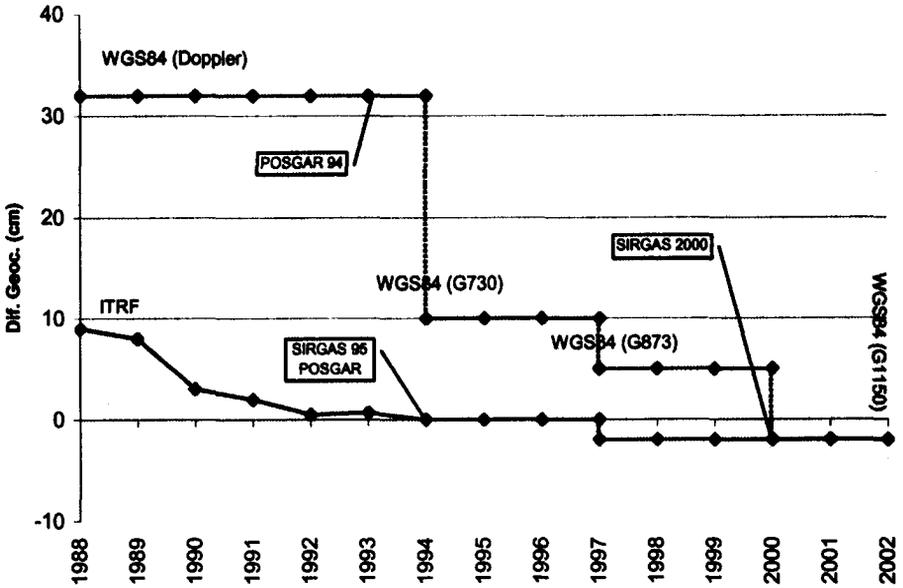


Figura 2. Evolución ITRF, WGS 84, Realizaciones regionales y Nacionales (elaborado por el autor).

Las coordenadas de los puntos ITRF incluyen sus velocidades respectivas y por lo tanto, tratándose de un mismo sistema, siempre es posible convertir coordenadas entre sus distintas realizaciones. ITRF proporciona los parámetros de transformación entre las mismas.

Sobre una misma realización de ITRF es posible definir distintos marcos en distintos momentos. La diferenciación entre ellos vendrá dada por el instante de su definición. Esta particularidad se ve reflejada en la “Época” de realización, así tendremos por ejemplo marcos ajustados a ITRF 2000, con época 200x.y, que resulta de “llevar” para el procesamiento los puntos ITRF al momento 200x.y de la definición a través de la aplicación de los valores de velocidad establecidos.

Marco Regional

En octubre de 1993, con la asistencia de representantes de la mayoría de los países de Sudamérica y auspiciado por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) y la entonces National Imagery Mapping Agency (NIMA), hoy NGA se crea en Asunción del Paraguay el Pro-

yecto Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur (SIRGAS), estableciéndose que sus objetivos serían:

- Definir y establecer un sistema geocéntrico para el continente.
- Definir y establecer un datum geocéntrico.
- Definir y establecer un datum vertical unificado.

Para dar cumplimiento a estos objetivos, entre el 26 de mayo y el 4 de junio del año 1995 se ejecuta la que se denominaría "Primera Campaña SIRGAS", midiéndose simultáneamente 58 estaciones distribuidas en el continente, que luego de procesadas darían lugar a una de las redes geodésicas más precisas del mundo y cuyos resultados finales fueron presentados en la Asamblea Científica de la IAG llevada a cabo en la ciudad de Río de Janeiro en el año 1997 y denominándose SIRGAS 95 (Figura 3).

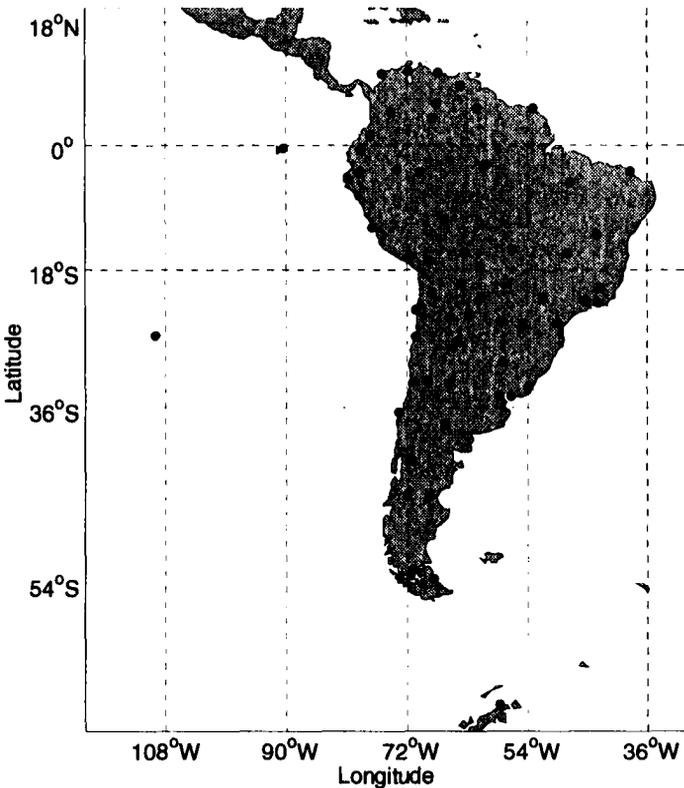


Figura 3. SIRGAS 95 (<http://sirgas.igm.gov.ar>).

SIRGAS 95 utiliza como marco ITRF 94, Época de referencia 1995.4.

Del 10 al 19 de mayo del año 2000 se realiza la “Segunda Campaña SIRGAS” remidiéndose los puntos de la Primera Campaña a fin de obtener la información necesaria para la determinación de velocidades e incorporándose estaciones hasta un total de 184 abarcando todo el continente americano. Muchas de las nuevas estaciones fueron establecidas sobre marcas de mareógrafos con la finalidad de coleccionar los datos necesarios para satisfacer el objetivo del Proyecto consistente en la definición del datum vertical.

Los resultados finales de esta campaña fueron presentados en febrero de 2003 conociéndose a esta realización como SIRGAS 2000 (Figura 4).

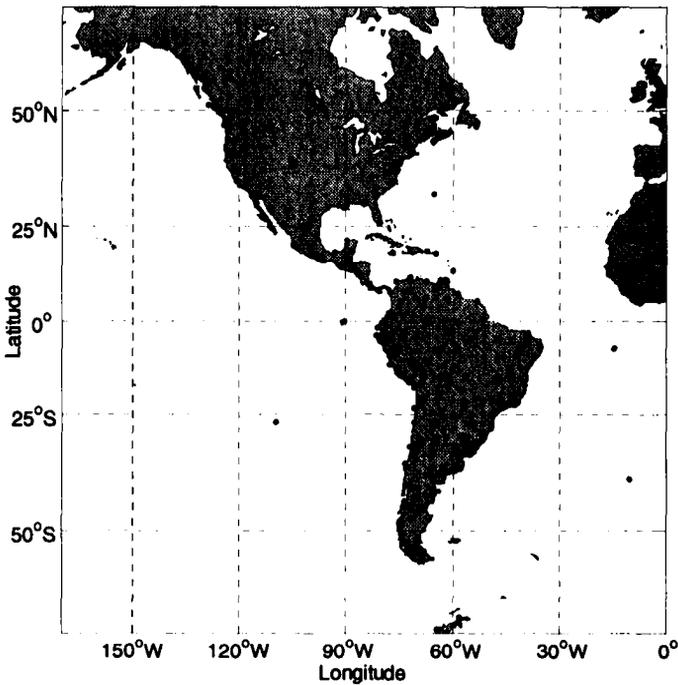


Figura 4. SIRGAS 2000 (<http://sirgas.igm.gov.ar>).

SIRGAS 2000 utiliza como marco ITRF 2000, Época de referencia 2000.4.

Desde 2001, el Proyecto, manteniendo su acrónimo, pasó a denominarse “Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas”.

En los años 2001 y 2005, las VII y VIII Conferencias Cartográficas Regionales para las Américas de las Naciones Unidas recomendaron a los países de la región la adopción de SIRGAS como marco de referencia geodésico nacional.

En noviembre del año 2003 fue publicado el campo de velocidades de América del Sur (Figura 5), utilizándose para su determinación los resultados de las campañas SIRGAS 95, SIRGAS 2000, velocidades determinadas por IGS, velocidades determinadas por el Centro Regional de Cálculo Asociado al IGS-SIR (Drewes y Heidbach, 2004) y resultados de varios proyectos de geodinámica en el continente.

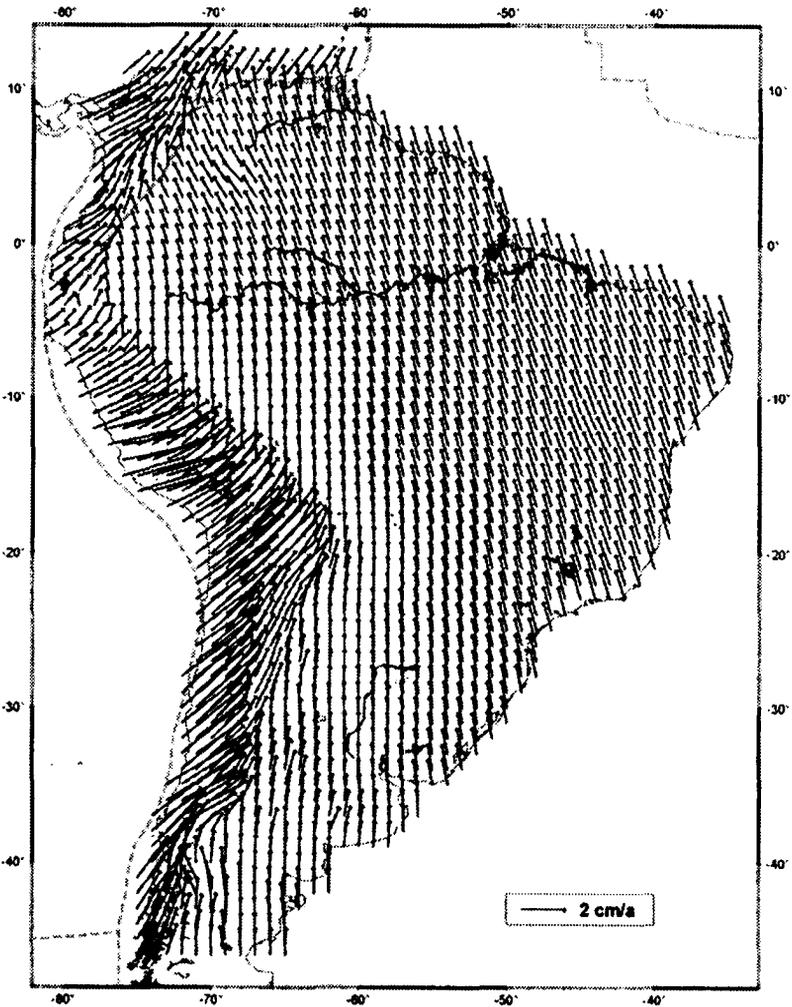


Figura 5. Campo de velocidades de América del Sur referido a SIRGAS2000 (Drewes y Heidbach, 2004).

En virtud de lo expuesto puede concluirse:

- El proyecto SIRGAS engloba todas las actividades necesarias para establecer una estructura geodésica moderna en el continente compatible con las mejores técnicas de medición disponibles en la actualidad.
- La adopción de un marco de referencia geocéntrico (ITRF), garantiza la permanente actualización de SIRGAS acorde a las más exigentes técnicas de georreferenciamiento.

Siendo WGS 84 actualmente coincidente con ITRF, los resultados de las mediciones GPS, se encuentran automáticamente referidas a SIRGAS 2000.

Marco Nacional

Entre los años 1993 y 1994 en el marco de un convenio firmado con el consorcio de Universidades Norteamericanas UNAVCO, destinado a investigaciones geodinámicas, el Instituto Geográfico Militar mide, empleando la tecnología GPS, 125 puntos distribuidos a lo largo de territorio nacional, constituyendo los mismos la base sobre la cual se sustentaría el futuro sistema de referencia geocéntrico.

Del procesamiento de los mismos, realizado en la Universidad Nacional de La Plata con la colaboración del Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI) de Alemania, surgen las "Posiciones Geodésicas Argentinas 1994" (POSGAR 94) (Figura 6).

En el mes de mayo del año 1997, por resolución del Director del Instituto Geográfico Militar en su carácter de entidad responsable del establecimiento y mantenimiento del Marco de Referencia Geodésico Nacional, la República Argentina adopta POSGAR 94 en reemplazo del antiguo sistema local Campo Inchauspe 69.

Vale destacar que esta resolución convierte a nuestro país en el primero de Sudamérica en adoptar oficialmente un marco de referencia geocéntrico.

Mediante la medición sobre 50 puntos comunes entre ambos sistemas se determinan los correspondientes parámetros de transformación entre Campo Inchauspe 69 y POSGAR 94.

Las diferencias entre los valores de coordenadas entre sistemas oscilan en el orden de los 200 m.

Esta, constituyó sin dudas una decisión de notable impacto en la comunidad geográfica. La adaptación de los usuarios a las nuevas técnicas y definiciones implicó un reacomodamiento que, más allá de resultar exitoso con el tiempo, requirió de un notable esfuerzo por parte del Instituto Geográfico para su implementación.

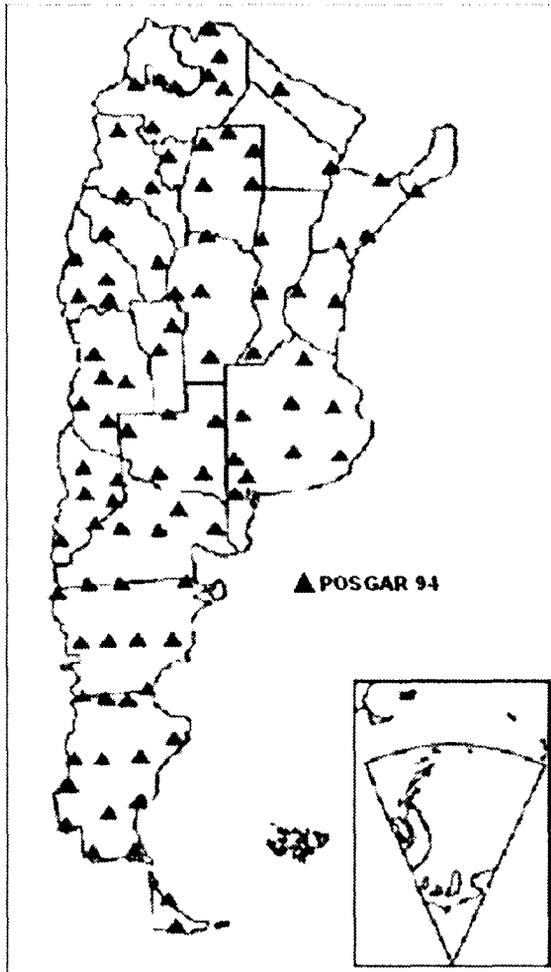


Figura 6. POSGAR 94.

POSGAR 94 utiliza como sistema de referencia WGS 84.

Sobre la base de las mediciones que dieran origen a POSGAR 94, en el año 1998, la Universidad Nacional de La Plata calcula POSGAR 98 utilizando como sistema de referencia ITRF 94, Época 1993.8, ajustado a SIRGAS 95 (ITRF 94, Época 1995.4)

POSGAR 98 constituye un significativo avance en lo que hace a la definición del marco de referencia nacional y mejora sensiblemente los resultados de su antecesor, al estar definido sobre ITRF permite determinar velocidades de desplazamiento compatibles con los marcos globales y regionales. No obstante, ello, y

en función de que POSGAR 94 satisface adecuadamente las necesidades la gran mayoría de los usuarios, atendiendo a requerimientos legales de mantenimiento de un único juego de coordenadas fijas, y reconociendo los inconvenientes de instrumentación práctica que un nuevo cambio significaría, la República Argentina decide mantener a POSGAR 94 como marco oficial, recomendando el empleo de POSGAR 98 para aquellos casos en que los índices de precisión necesarios superan las capacidades de aquel (50 cm de planimetría y submétricas en altimetría).

A mediados de la década del 90 comienza a instalarse definitivamente un concepto ya vigente en el ámbito de la geodesia e íntimamente ligado a la definición de los marcos de referencia; el de las estaciones permanentes.

Una estación GPS permanente está constituida por:

- Un receptor geodésico que opera las 24 horas, los 365 días del año, recibiendo información proveniente de la constelación.
- Una infraestructura informática capaz de almacenar y hacer disponibles los datos.
- Preferentemente capacidad de transmisión de los datos a través de Internet.
- Personal técnico idóneo para su administración.

Una red de estaciones permanentes queda establecida a través de la integración de dos o más receptores a través de un administrador quien regula los parámetros que rigen sus técnicas de adquisición, almacenamiento, distribución, etc.

Si a la estructura de la red se le adiciona la capacidad de procesar los datos almacenados, entonces, independientemente de las múltiples sub-aplicaciones que tiene la información así obtenida, desde el punto de vista geodésico, las redes de estaciones permanentes pasan a constituir la base fundamental sobre la que se definen y regulan los nuevos marcos de referencia.

Entonces, una red de estaciones permanentes que dispone de un programa científico para su ajuste permitiría establecer nuevos y sucesivos marcos de referencia con la frecuencia que se desease.

Más aún, la capacidad de conocer las mejores velocidades disponibles, es decir velocidades "medidas", permitiría el permanente juego de trasladarse entre uno y otro marco manteniendo un elevadísimo orden de precisión.

Estaríamos en presencia ya de "marcos activos" cuyos valores de coordenadas variarían día a día.

Este es un concepto revolucionario para la geodesia práctica que, más allá de los indudables beneficios que originaría para vastos campos de la ciencia, como contrapeso implicaría complicaciones innecesarias para la enorme mayoría de los usuarios.

Veremos más adelante las mejores soluciones disponibles a este aspecto.

En el año 1998, el Instituto Geográfico Militar comienza a ejecutar el Proyecto Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (RAMSAC) (Figura 7), integrando en una red los datos provenientes de las primeras estaciones permanentes instaladas en el país por el Proyecto CAP (Central Andes Project, <http://www.igm.gov.ar/node/12>), que bajo la dirección de los doctores Robert Smalley de la Universidad de Memphis y Mike Bevis de la Universidad de Hawai opera en convenio con el IGM desde el año 1993.

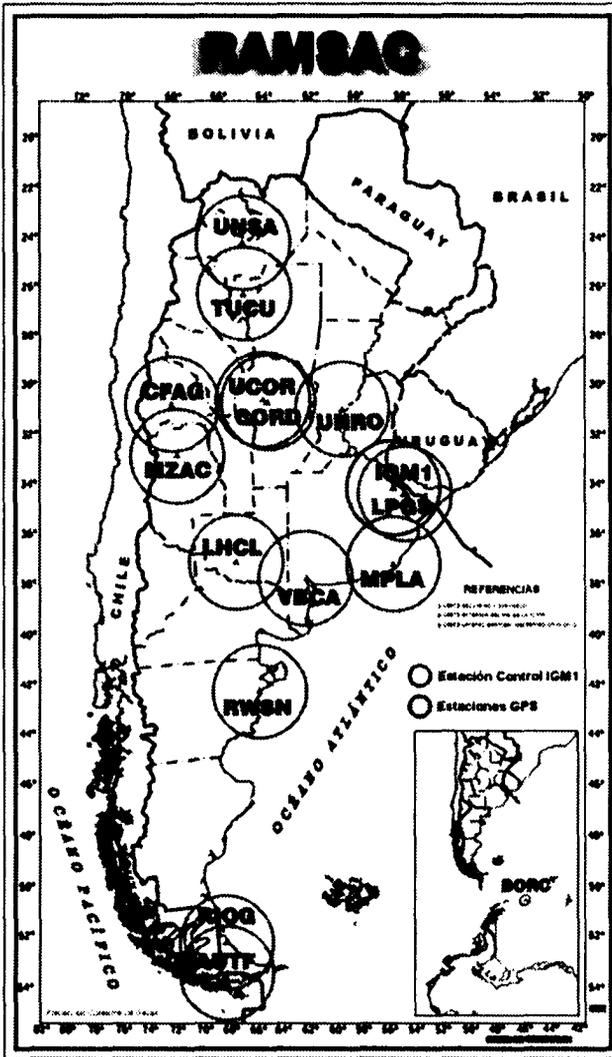


Figura 7. Proyecto RAMSAC (Radios de círculos de 200 km).

La posterior integración, el esfuerzo mancomunado de numerosas instituciones nacionales y la siempre activa y cooperante acción de la Universidad Nacional de La Plata con la colaboración del Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI) de la República de Alemania, a través del convenio conjunto SIRVE MAS (Sistema de Referencia Vertical en Argentina) hicieron que la red se extendiera a mayo de 2006 a un total de 16 estaciones y con excelentes perspectivas en lo que hace a la continuidad de su expansión.

Simultáneamente, y a propuesta del Dr. Claudio Brunini, Presidente del Grupo de Trabajo I, de SIRGAS, la República Argentina ha obtenido la aceptación por parte de dicho Proyecto para constituir un centro regional de cálculo de estaciones permanentes. Actualmente la Universidad Nacional de la Plata y el Instituto Geográfico Militar se encuentran abocados conjuntamente a la implementación del mencionado centro (SIRGAS, Boletín Informativo No. 10).

La problemática actual

Las siguientes características enmarcan la situación actual de nuestro País:

- La República Argentina posee un marco de referencia geodésico geocéntrico de buena calidad y que satisface los requerimientos de la mayoría de los usuarios.
- Este marco se encuentra desactualizado en lo que a las exigencias de la geodesia moderna se refiere:
 - No se ajusta a las recomendaciones internacionales.
 - Tiene niveles de precisión no compatibles con los sistemas modernos.
 - No responde adecuadamente para estudios científicos de alta definición.
 - No permite transformaciones de coordenadas confiables a otros sistemas globales
- El rápido crecimiento de la tecnología satelital y la necesidad de adaptación al nuevo escenario ha provocado una situación lógica, pero en parte anárquica. Así al día de hoy conviven en nuestro país, diversos marcos:
 - POSGAR 94 como marco oficial, adoptado por la mayoría de las provincias, sobre el cual se conforma la cartografía del IGM y base de la mayoría de los Sistemas de Información Geográfica desarrollados o en desarrollo. Adoptado también por una importante red geodésica de más de 2000 puntos generada por el Proyecto PASMA (Proyecto de Asistencia al Sector Minero Argentino).

- Campo Inchauspe, mantenido aún como oficial en algunas provincias.
- POSGAR 98, reconocido como de mejor definición que POSGAR 94, no oficial, reservado para fines científicos y adoptado por algunas provincias para sus determinaciones catastrales.
- Sistemas Locales, como los utilizados en cuestiones limítrofes por la Comisión Nacional de Límites y necesarios para resolver sus problemas en tanto no existe aún plena integración a SIRGAS de todos los países de la región.
- El sistema propio de las estaciones permanentes no compatible con el oficial.

De lo expuesto se concluye la necesidad de adoptar un nuevo marco de referencia; moderno, dinámico y versátil. De acuerdo a los fundamentos ya expuestos, el mismo deberá reunir las siguientes condiciones:

- Satisfacer todas las exigencias:
 - De los usuarios de la geodesia práctica, permitiéndoles:
 - Moverse en un único sistema de referencia (materializado por el ITRF 2000 y sucesivos)
 - Aprovechar sin limitaciones los servicios brindados por las estaciones permanentes.
 - Poseer un marco moderno adaptado a las mayores exigencias de la geodesia actual.
 - Legales, manteniendo un juego de coordenadas fijo para la resolución de cuestiones vinculadas a aspectos catastrales, limítrofes, etc.
 - Científicas, satisfaciendo requerimientos de alta precisión geodésica.
 - Internacionales, adaptado a las recomendaciones de integración regional:
 - Utilizando como base la estructura actual de las estaciones permanentes del Proyecto RAMSAC.
 - Calculado con programas científicos (BERNESE, GAMIT)
 - Remidiendo los puntos de la red POSGAR 94 y densificando los mismos a fin de obtener una distribución más homogénea y la determinación de parámetros de transformación para todos los sistemas en uso actualmente.

- Ajustado a SIRGAS 2000.
- Con época de referencia al momento de su cálculo.
- Estableciendo un modelo de velocidades sobre la base de las determinadas por las estaciones permanentes comparadas con las correspondientes a SIRGAS 2000.

Puntos en movimiento, coordenadas fijas

Nos hemos referido anteriormente al movimiento de los puntos y sus velocidades.

Este constituye sin dudas uno de los elementos distintivos de los marcos de referencia modernos.

No obstante ello, suele transformarse también en un elemento de preocupación para aquellos usuarios que requieren coordenadas fijas o bien no necesitan, por el ámbito de aplicación, de sus mediciones del dato "velocidad".

Consideramos por lo tanto importante aclarar las distintas situaciones que pueden presentarse y aportar las respectivas soluciones.

El principio básico que adoptaremos consiste en establecer que las coordenadas del nuevo sistema serán FIJAS desde el momento de su definición.

El acuerdo entre WGS 84 e ITRF permite asegurar que el nuevo sistema (que en adelante denominaremos POSGAR) será definitivo y no exigirá nuevos cambios.

En la práctica podrán presentarse tres situaciones:

1. Mediciones geodésicas de alta precisión: En este caso debe tenerse en cuenta que:
 - a) Las coordenadas de los satélites vienen dadas en el sistema y época actual (actualmente ITRF 2000, época 200x.y).
 - b) Las coordenadas de los puntos se referirán a la época definición del nuevo marco POSGAR (ITRF 2000)
 - c) Para un cálculo preciso, las coordenadas de los satélites y de los puntos deben encontrarse en un mismo marco y referidas a una misma época.
 - d) La solución será entonces, aplicar las velocidades conocidas a los puntos (medidas en primer término y de modelo cuando no se dispusiera de aquellas), procesar en el marco y época "actuales" y retransformar siguiendo el mismo esquema para referir al marco oficial (POSGAR). La Figura 8 proporcionada por el Dr. Hermann Drewes ilustra este caso.

Transformación entre sistema terrestre (época de referencia) y sistema satelital (época actual)

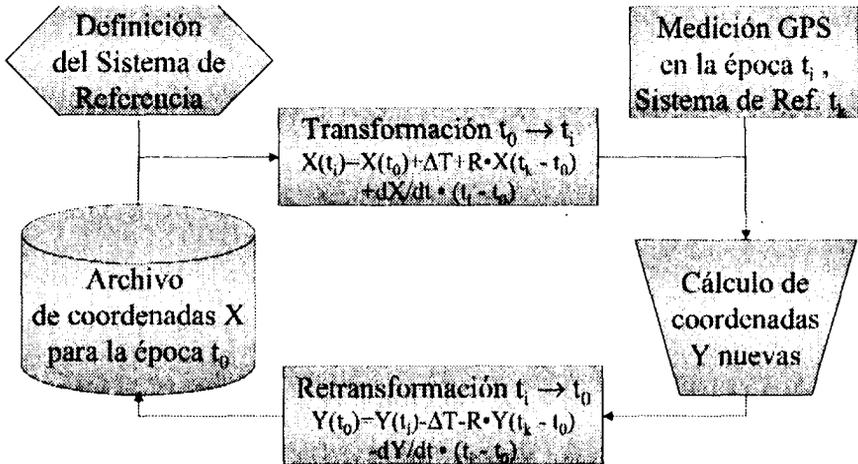
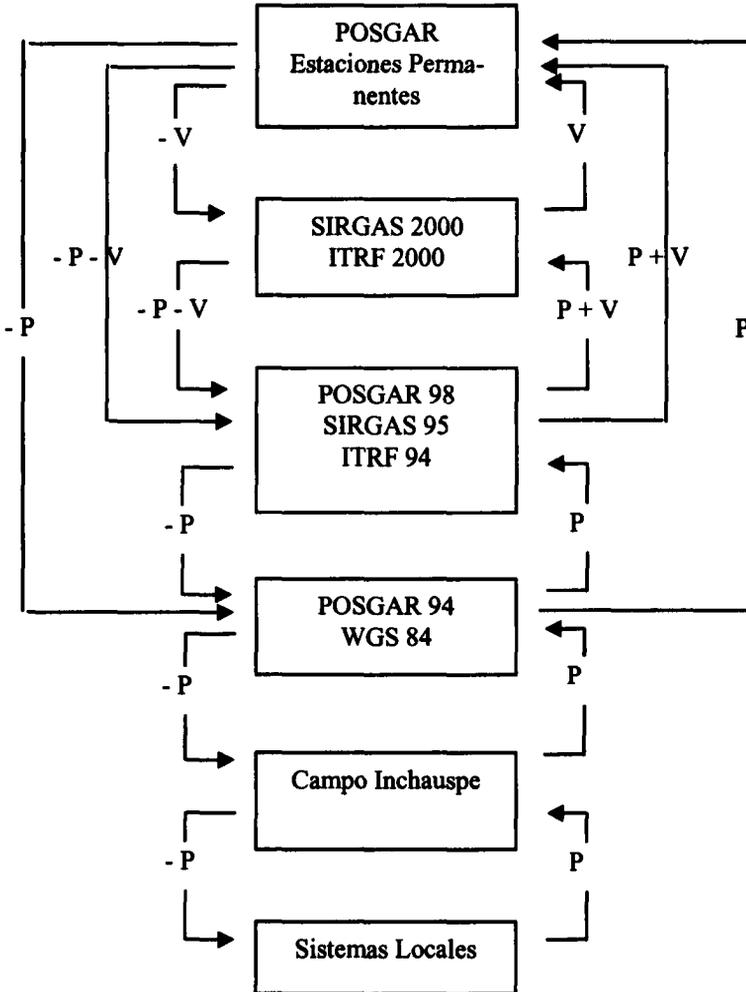


Figura 8. Transformación entre sistemas proporcionado por el Dr. Hermann Drewes.

2. Mediciones geodésicas diferenciales “locales”: Consideramos incluidas en las mismas a aquellas en que los vectores medidos no superen los 100 km y suponiendo que los extremos del mismo se encuentran ambos sobre la misma placa continental y no cerca de zonas de deformación (tal como la Andina).
 - a) En este caso asumiremos que la longitud del vector es independiente del sistema de referencia utilizado y que ambos puntos se mueven de la misma forma.
 - b) No es necesario, por lo tanto la aplicación de velocidades y el entorno del error es el propio del vector ($1 \cdot 10^{-7}$ o su equivalente 1cm para vectores de 100 km).
3. Posicionamiento absoluto (navegadores): En este caso la diferencia entre los sistemas terrestre y satelital queda completamente absorbido por el error en la determinación de las coordenadas.

Soluciones entre sistemas

Definido el nuevo marco, las soluciones para las transformaciones de coordenadas vendrán dadas por el esquema que se muestra a continuación:



Donde P son los parámetros de transformación entre sistemas y V las velocidades a aplicar según corresponda.

Conclusiones

- Nuestro país dispone de un Marco de Referencia geocéntrico y confiable para la mayoría de las aplicaciones que requieren los usuarios, pero DESACTUALIZADO.
- Existe consenso generalizado y recomendaciones expresas a los países de la región para la adopción de SIRGAS.

- Existen los recursos técnicos, científicos y humanos necesarios como para definir, procesar y establecer un nuevo marco acorde a las exigencias geodésicas actuales.
- Un nuevo marco de referencia significaría un último cambio. El acuerdo entre ITRF y WGS84 son suficiente prueba de ello.
- La densificación de las redes geodésicas evoluciona hacia el establecimiento de ESTACIONES PERMANENTES GPS.
- Una red de Estaciones Permanentes GPS constituye la base fundamental para la definición de un marco de referencia geodésico moderno, dinámico y versátil.
- La definición de un MODELO DE VELOCIDADES asociado a un marco fijo, cubre el espectro de TODAS las exigencias de los usuarios, considerando las aplicaciones legales, prácticas y científicas.

Bibliografía

- Brunini, C., Moirano, J. y Mackern, M. V. (2000), "Comparación entre los marcos de referencia POSGAR '94 y POSGAR '98", *Actas de la 20ª Reunión Científica de Geofísica y Geodesia*, Mendoza, Argentina, 25 al 29 de septiembre.
- Brunini, C, Moirano, J, Lauría, E., Rodríguez, R. (2002), "Contribución Argentina al desarrollo del Proyecto SIRGAS" , *Actas de la XXI Asamblea AAGG*, Rosario.
- Drewes, H., Heidbach, O. (2004), "Deformation of the South American crust estimated from finite element and collocation methods", in: Sanso, F. (Ed.), *Geodesy*, IAG Symposia, Springer , Vol.128.
- Kendrik, E., Bevis, M., Smalley Jr., Brooks, B., Vargas, R., Lauría, E., Fortes, L. (2003), "The Nazca – South American Euler Vector and its Rate of Change", *J. South Am. Earth Sci.*
- Kaniuth K., Drewes, H., Tremel, H., Stuber, K., and Moirano, J. (1998), "Results of the SIRGAS 95 GPS network processing at DGF/II. Advances in Positioning and Reference Frames", Springer, pp. 180-186.
- Lauría, E. y Cimbaro, S. (1999), "Proyecto RAMSAC", *Revista Cartográfica*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, No. 68.
- (2004), "Presente y futuro de los sistemas de referencia geodésicos", *Actas de la XXII Asamblea AAGG*, Buenos Aires.
- Moirano, J., Brunini, C., Drewes, H. and Kaniuth, K. (1998), "Realisation of a geocentric reference system in Argentina in connection with SIRGAS. Advances in positioning and reference frames", Springer, pp. 199-204.
- (1998), "Evolución del sistema de referencia argentino en el marco del proyecto SIRGAS", *Actas del V Congreso Internacional Ciencias de la Tierra*, Santiago, Chile, 10 al 14 de agosto.

- (1999), “Definición del marco de referencia geodésico argentino mediante observaciones GPS como materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS)”, *Contribuciones a la Geodesia en la Argentina de fines del siglo XX. Homenaje a Oscar Parachu*, ISBN 950-673-201-9, Editora, Antonio Introcaso (Ed.), Argentina. pp. 75-97, UNR.
- Moirano, J. (2000), “Materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional en Argentina mediante observaciones GPS”, *Tesis doctoral en Geofísica*, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, p. 182 y anexos.
- Rodríguez, R. y Brunini (2001), “C. SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur”, Vol. 7, *Georreferenciación, en la serie Temas de Geociencias*, ISSN 15144149, UNR Editora), UNR Editora, Antonio Introcaso (Ed.), Argentina, pp. 32-50, (86).
- Smalley, Jr., Kendrik, E., Bevis, M., Dalziel, I., Taylor, F., Lauría, E., Barriga, R., Cassasa, G., Olivero, E., Piana, E. (2003), “Geodetic determination of relative plate motion and crustal deformation across the Scotia – South America plate boludary in eastern Tierra del Fuego, *Geochemistry Geophysics Geosystems*”, *An electronic journal of the earth sciences*, Volume 4, Number 9.