

LAS ESTACIONES PERMANENTES GNSS, UN GRAN PARADIGMA EN LA GEODESIA. Una mirada desde Argentina y América Latina, en los últimos 30 años.

Maria Virginia Mackern^{1,2,3}

vmackern@mendoza-conicet.gob.ar

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo

²CONICET

³Facultad de Ingeniería y Enología, Universidad Juan Agustín Maza

RESUMEN

En los últimos 30 años la Geodesia ha evolucionado a pasos agigantados influenciada por el conocimiento que ha aportado principalmente la geodesia satelital. En una revisión de los últimos 30 años identificamos un cambio de paradigma en el “posicionamiento”. Ha surgido y se ha instalado en la sociedad una nueva expresión la “Georreferenciación”. Para los usuarios de coordenadas, requirió una etapa de adaptación y de capacitación acelerada. La tecnología de los Sistemas de Posicionamiento Satelital se impuso en la década del 90, no contándose con la infraestructura de base necesaria, ni tampoco con recursos humanos formados para su aprovechamiento eficiente.

Parados en este momento del tiempo, año 2021, recordamos y tratamos de escribir esa historia transcurrida, esa etapa de transición que fue necesario experimentar. Se ha tratado de dejar un legado en honor de los que nos precedieron y necesario para el conocimiento de los usuarios de coordenadas que vendrán.

En esta contribución se presenta una mirada específica de lo que fue la evolución de la infraestructura geodésica, centrados en la república argentina y su participación en el contexto continental e internacional. Acompañando a esa historia, se han tratado de exponer los procesos de capacitación de recursos humanos que permitieron aggiornar a los especialistas para afrontar las tareas de planificación, relevamiento y cálculo, que demandan las nuevas tecnologías de posicionamiento satelital.

Palabras claves: POSGAR, SIRGAS, Estaciones permanentes GNSS, RAMSAC, Argentina

INTRODUCCIÓN

En el año 1991 comenzaban a realizarse en Argentina los primeros relevamientos con GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y el requerimiento de contar con puntos de coordenadas conocidas en el sistema geocéntrico, compatible con las órbitas satelitales, para usar como base en el posicionamiento relativo, no se podía cubrir en gran parte del territorio nacional.

En esa época el marco de referencia oficial del país era Campo Inchauspe 69 (CAI69), una red de puntos pasivos, medidos (en fechas anteriores a 1969) en base a triangulaciones geodésicas clásicas, cuyas coordenadas surgidas de un ajuste realizado en 1969 materializaban el marco de referencia nacional, un marco geodésico local. Los primeros usuarios de GPS, georreferenciaban a puntos CAI69, a partir de sus coordenadas geodésicas, a las cuales les aplicaban los parámetros de transformación determinados por la DMA (Defense Mapping Agency). Se obtenían de esta forma

coordenadas cartesianas geocéntricas en WGS84, con precisión de algunas decenas de metros. En el mejor de los casos, en el oeste argentino se pudo contar con algunos puntos de la red CAP (Central Andes Project) que tenían coordenadas en WGS84. Frente a la globalización económica que surgía y la privatización de empresas de servicios, en Argentina, se incrementó la demanda de disponer de un marco de referencia geocéntrico y global.

En los años 1991 y 1992 comenzaron a surgir proyectos provinciales financiados por organismos internacionales que tenían como base la implementación de un marco de referencia geocéntrico global. En esa misma época se implementó una política de apertura a inversiones mineras y las empresas multinacionales también demandaban la georreferenciación y la cartografía en sistemas de referencia globales.

Por todo lo mencionado, a lo que se sumaron las demandas regionales para el uso de los sistemas de posicionamiento satelital, se fundamentó la instalación en una primera etapa de redes de puntos materializados (preexistentes o nuevos) medidos con GPS. De esta forma se definió el primer marco pasivo con coordenadas geocéntricas globales de Argentina, POSGAR94 (Posiciones Geodésicas Argentinas) Figura 1, al cual refirieron las densificaciones en algunas redes geodésicas provinciales (Jujuy, Santiago del Estero, Entre Ríos, San Luis, Neuquén y Río Negro) y la red PASMA (Proyecto de Apoyo al Sector Minero Argentino). El objetivo de esta última, fue generar una red de puntos de densificación en las áreas de interés minero a lo largo de todo el territorio nacional (Mackern, 2003).

En una segunda etapa, motivados por la evolución en el uso de la técnica GPS, se comenzaron a instalar las estaciones activas. El contexto internacional y el proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geodésico para las Américas) a nivel continental, alrededor del año 2000, mostraban las ventajas de contar con marcos activos de estaciones permanentes GPS, por sobre las redes pasivas. En Argentina se calculó POSGAR98, como una significativa mejora de la red POSGAR94, apoyada en las observaciones de las estaciones permanentes GPS que estaban operativas, y vinculada mediante vectores medidos con GPS, con la red continental SIRGAS (Moirano, et al., 1998).

Surgió para esas épocas, un nuevo paradigma “La Georreferenciación a redes continentales”, lo cual requirió cooperación y coordinación. En América se iniciaba la red SIRGAS-CON (Red de estaciones SIRGAS CONTinua) como un modelo de cooperación y el resultado de su eficiente coordinación se comprueba en la calidad y continuidad de sus productos (coordenadas y velocidades), por 30 años. De manera similar surgió y se fortaleció la red activa RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo) con coordenadas precisas en el sistema global y por sobre todo con la ventaja de su mantenimiento (física y matemáticamente) en el tiempo. RAMSAC, surgió siguiendo las recomendaciones del contexto internacional y las guías fundadas en la



Figura 1. Puntos POSGAR94 (azules), puntos CAP integrados en POSGAR94 (rojos) (Cimbaro, 2018)

cooperación continental de SIRGAS. En la actualidad es un marco geodésico preciso, accesible a los usuarios que requieren georreferenciación. A la vez ofrece información a la ciencia para estudios geodinámicos y atmosféricos, entre otros. Brinda servicios de tiempo real y realiza un aporte de reconocimiento internacional, encontrándose al nivel de las redes geodésicas activas más precisas del planeta.

Argentina cuenta hoy con una infraestructura geodésica de posicionamiento, que cumple con los estándares internacionales de precisión, control y mantenimiento. Es claro que la etapa de transición sobrellevada en estos 30 años, fue necesario recorrerla. Cabe mencionar que detrás del desarrollo tecnológico hubo un acompañamiento de la docencia universitaria que brindó la especialización tanto a nivel de grado, como la actualización a nivel de posgrado, siendo ambos fundamentales. Esta especialización permitió contar con profesionales que de alguna manera fueron faros que dieron luz y marcaron el rumbo a seguir. Gracias a ellos hoy Argentina cuenta con una infraestructura geodésica que nos enorgullece a nivel internacional. Esta revisión histórica trata de exponer una breve síntesis del quehacer geodésico, de estos 30 años, en el contexto señalado en esta introducción.

EL CONTEXTO NACIONAL E INTERNACIONAL

Analizando el contexto internacional, en 1987 se establecía el IERS (International Earth Rotation and Reference System Service), coordinando los esfuerzos de las comunidades internacionales de Astronomía, Geodesia y Geofísica. Su misión desde los orígenes fue proporcionar datos y estándares sobre los parámetros de rotación de la Tierra y definir los marcos de referencia terrestre y celeste. En 1991 en Viena la IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) definió y adoptó el Sistema de referencia terrestre internacional (ITRS) mediante su resolución N°2. Se establecieron los servicios internacionales de las distintas técnicas geodésicas, entre los cuales se fundó el Servicio Internacional de la técnica GNSS (refiriendo la G a GPS, en los orígenes). A fines de la década del 80 se contaba ya con los primeros marcos de referencia Internacionales. El ITRF88 fue computado incluyendo observaciones de las técnicas VLBI, LLR y SLR. La primera solución que incluyó GPS fue la combinación de 1991 y en 1994 se incluyeron observaciones de la técnica DORIS. Si miramos la Figura publicada por Bosy en 2014, en el ITRF88 América del Sur sólo contaba con 4 estaciones de coordenadas, no encontrándose ningún sitio ITRF88 en Argentina. Dicha figura es una muestra de la situación Geodésica al momento de la llegada de la técnica GPS a nuestro país. Los vínculos científicos internacionales establecidos por investigadores de las Universidades Nacionales de La Plata y Salta, gestionaron la instalación de las primeras estaciones GPS continuas: LPGS, en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, RIOG, en la Estación astronómica Rio Grande, en Tierra del Fuego, dependiente de la UNLP y UNSA, en la Universidad Nacional de Salta. Desde el Proyecto geodinámico "CAP, por su nombre en inglés *Central Andes Project*", se instalaron con el apoyo del por ese entonces IGM (Instituto Geográfico Militar) actual IGN de Argentina y algunos grupos de investigación locales, las estaciones GPS de CFAG (en Coronel Fontana, Provincia de San Juan), TUCU (en Tucumán), LHCL (en Lihuel Calel, La Pampa) y CORD (en Falda del Carmen, provincia de Córdoba). Para fines de la década del 90 desde un proyecto liderado por los Doctores Claudio Brunini y Juan Carlos Usandivaras de la UNLP se instalaron las estaciones GPS permanentes de VBCA (en la Universidad Nacional del SUR, en la ciudad de Bahía Blanca), MPLA (en Mar del Plata, provincia de Buenos Aires), RWSN (en Rawson, provincia de Chubut) y PDES (en Puerto Deseado, en la provincia de Santa Cruz). Estas últimas con el fin de vincular los mareógrafos (referencias altimétricas del nivel del mar) con alturas elipsoidales (referencias altimétricas a la superficie del elipsoide) y su monitoreo en el tiempo (Natali, et al., 2002).

En los 10 años transcurridos entre 1990 y 2000, las primeras estaciones GPS continuas mencionadas (Figura 2), disponían sus observaciones en bases de datos de las instituciones que las administraban (Tabla 1), que en una primera instancia no fueron públicas. Desde su incorporación a la red IGS comenzaron a publicar sus registros en la base de datos internacional, al igual que sus reportes de infraestructura (log file).

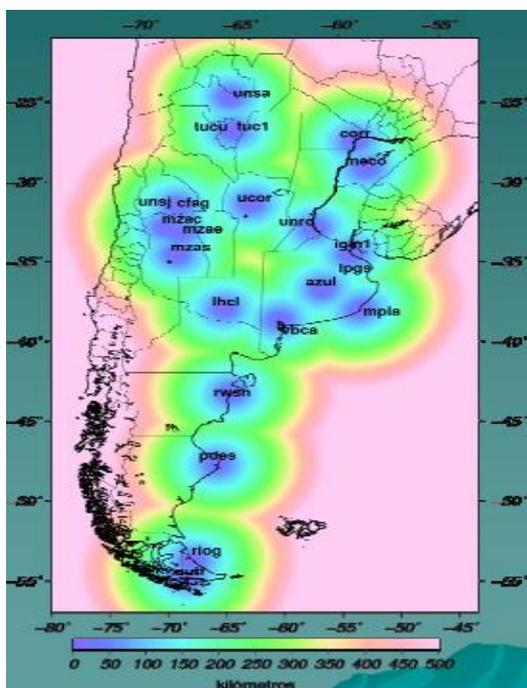


Figura 2. estaciones GPS permanentes operativas en Argentina en la creación de RAMSAC en el 2006 y radio de cobertura (escala de colores).

| N | EP GNSS | Entidad |
|----|---------|---------------------|
| 1 | RWSN | Catastro Chubut |
| 2 | CORR | Catastro Corrientes |
| 3 | MECO | Catastro Corrientes |
| 4 | TUC1 | Catastro Tucuman |
| 5 | MZAS | CatastroMza |
| 6 | MZAE | CatastroMza |
| 7 | AZUL | CPA/IGM |
| 8 | IGM1 | IGM |
| 9 | AUTF | IGM |
| 10 | LHLC | IGM/ Parques |
| 11 | CFAG | INPRES/IGM |
| 12 | MZAC | CRICYT |
| 13 | UCOR | UNCordoba |
| 14 | MPLA | UNCuyo/SHN |
| 15 | PDES | UNCuyo/SHN |
| 16 | LPGS | UNLP |
| 17 | RIO2 | UNLP |
| 18 | UNRO | UNRosario |
| 19 | UNAS | UNSalta |
| 20 | UNSJ | UNSan Juan |
| 21 | VBCA | UNSur /UNCuyo |
| 22 | TUCU | UNTucuman |

Tabla 1. Dependencia de las estaciones GPS que se integraron a RAMSAC en sus inicios. De Catastros provinciales (morado), IGM (amarillo) e Institutos de investigación o universidades (azul).

Desde Argentina durante esa primera década, no se estimaron coordenadas para dichas estaciones como parte del cálculo de una red geodésica nacional o regional vinculada al ITRF. La primera solución que incluyó estaciones GPS de Argentina, calculada como parte de un procesamiento riguroso con software científico fue desarrollada en la tesis doctoral de Juan F. Moirano en el 2000, la cual fue denominada POSGAR98. En la cual se siguió la metodología de densificación propuesta por el IERS y adoptada por el IGS para las soluciones de redes GPS (Moirano et al., 1998).

A nivel continental se había realizado la campaña GPS en América del Sur en mayo de 1995 y la misma se intentó repetir en mayo del año 2000. Esta última se extendió a América del Norte y Central, no pudiendo remedir en la totalidad de sitios de la primera campaña (Figura 3). De estas dos campañas se pretendía monitorear los desplazamientos geodinámicos, lo cual se pudo estimar, pero se concluyó en no volver a realizar mediciones sobre puntos pasivos a futuro, sino invertir en la instalación de estaciones continuas GPS. Fue así como se creó la red SIRGAS-CON (red de estaciones continuas GPS en América) y desde el 2000 al 2022 la misma se ha densificado, contando en la actualidad con más de 440 estaciones distribuidas en todo el continente (Figura 4).

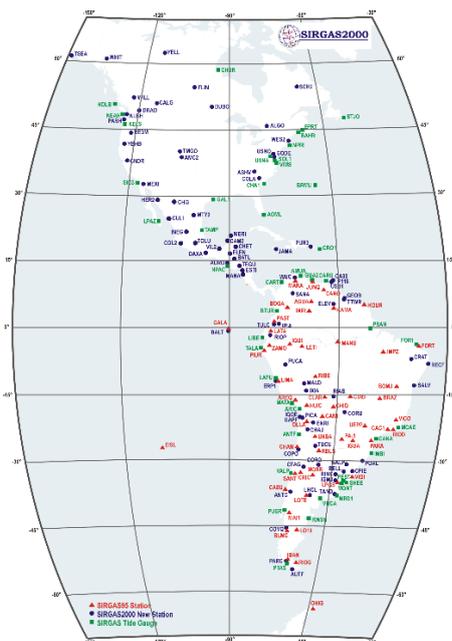


Figura 3. Estaciones SIRGAS2000 (azules), estaciones SIRGAS95 (rojos), estaciones GPS en mareógrafos

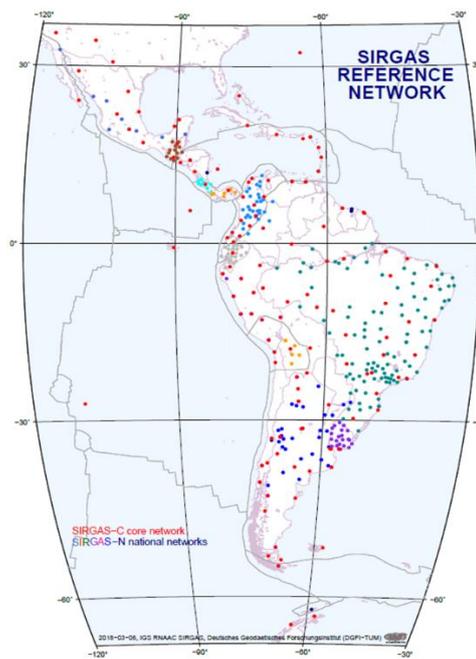


Figura 4. Red SIRGAS-CON, estaciones IGS (rojo), estaciones de densificación nacionales (diferentes colores) (www.SIRGAS.org)

El éxito de la red SIRGAS-CON es el resultado de un trabajo coordinado y colaborativo de las distintas organizaciones geodésicas que se fueron sumando en los diferentes países americanos. Empezando por América del Sur y sumando luego a los países de América Central e Islas del Caribe, incluyendo en el 2021 EEUU de América y Canadá.

En los 22 años transcurridos entre la segunda campaña SIRGAS del 2000 y la actualidad, en la comunidad geodésica de América Latina se ha trabajado constantemente, no sólo instalando mas estaciones continuas, sino mejorando el equipamiento, el cual se ha ido reemplazando por receptores que adquieren observables de GPS, conjuntamente con GLONASS, y en algunos casos Galileo y otras constelaciones. Se ha invertido también en algunos países, en Centros de datos Nacionales, los cuales aseguran la disponibilidad de los registros observacionales bajo los estándares internacionales. Se impulsaron Centros de Análisis (CA) regionales, los cuales en una primera etapa fueron 3 y a la fecha ya son 8 CA activos y 1 CA de atmósfera neutra.

Todo el esfuerzo colaborativo impulsado por SIRGAS, sus reuniones científicas y talleres de capacitación permitieron la formación de recursos humanos en los diferentes países de América. Desde la cooperación de los CA se incluyeron las normativas que establecía el IERS y el IGS en la implementación de marcos de referencia que densifican al ITRF hacia el interior de los continentes y países. Fue en este contexto en el cual las redes activas de GNSS fueron apareciendo como redes de georreferenciación y desplazaron a las redes pasivas (puntos materializados a remedir con instrumental propio para usar como punto de coordenadas conocidas).

LA EVOLUCIÓN QUE DIO LUGAR A LA RED RAMSAC EN ARGENTINA

Desde las primeras estaciones GNSS que se instalaron en la década del 90 en Argentina a la actual red RAMSAC, hay una inmensurable evolución. Tratando de cuantificar esa transición de

mencionar como primeros maestros de la geodesia satelital en Argentina a los doctores Víctor Haar, Juan Carlos Usandivaras y Eduardo Patiño quienes brindaron en las universidades argentinas los primeros fundamentos del posicionamiento satelital. Junto a científicos extranjeros realizaron las primeras experiencias de medición en el país. A ellos se sumaron el Agrimensor Ruben Rodriguez desde el IGM y los astrónomos Raúl Perdomo, Claudio Brunini y Daniel Del Cogliano de la Universidad Nacional de La Plata. Todos ellos, junto a una nueva generación de discípulos entre quienes me incluyo, junto a Juan Moirano, Aldo Mangiaterra, Raúl Márquez, Gustavo Noguera, Mauricio Gende, Amalia Mesa, Hernán Alvis Rojas, Ana María Pacheco, Darío Terluk, Luis Lenzano, Carlos Giobellina y seguramente muchos otros hacia el interior del país, impulsamos las primeras instancias de capacitación que incluyeron la definición y materialización de marcos de referencia geocéntricos precisos, ¿cómo medir mediante GPS?, ¿cómo procesar las observaciones?, ¿cómo diseñar una red geodésica regional y nacional? Y por sobre todo ¿cómo vincular coordenadas de los sistemas antiguos al nuevo marco de referencia nacional POSGAR94?

Mediante la participación en las campañas POSGAR de 1993 y de 1994, SIRGAS de 1995 y del 2000, como también desde las campañas GPS llevadas a cabo en las diferentes provincias argentinas y la extensa red PASMA, se fueron capacitando profesionales en las distintas regiones del país. Cabe destacar la importante contribución que realizaron los colegas de la Universidad Nacional de Rosario, de San Juan, de Mendoza y de Córdoba, quienes se comprometieron a brindar cursos de actualización entre los profesionales de la Ingeniería de las distintas provincias. Desde el IGM los colegas Eduardo Lauría y Sergio Cimbaro, formalizaron liderados por el Dr. Claudio Brunini de la UNLP, los Talleres Nacionales de estaciones GNSS permanentes. En los mismos se delinearon las principales demandas a resolver, en colaboración con los diferentes grupos del país que disponían y/o administraban las estaciones GNSS permanente, en un concepto federal. Los dos primeros talleres se realizaron en Buenos Aires en el 2003 y 2004, a los cuales siguieron 5 más organizados por distintos referentes del país (en Mar del Plata en 2005, en Bahía Blanca en 2006, en Mendoza en 2007, en Tucumán en 2008 y en San Luis en 2009) de los cuales surgió como principal demanda la necesidad de contar con un Centro de datos nacional, donde las estaciones continuas pudiesen brindar públicamente sus registros de observación. Se analizaron los estándares internacionales a cumplir y se establecieron requerimientos de integración a la futura red GPS nacional. Estos talleres fueron el paso previo a la creación de la red RAMSAC. Paralelamente se organizaron 5 talleres de usuarios de estaciones GPS. Su objetivo fue difundir y capacitar en el uso de las mismas. Fue el caso de los talleres desarrollados en Mendoza en el 2004, en Corrientes y La Plata en el 2005 y en Córdoba en el 2006. En todas estas instancias se fortalecieron los vínculos entre los grupos de investigación de diferentes instituciones nacionales, docentes de las casas de estudio y por sobre todo con las autoridades y profesionales que concretaron la creación de la red RAMSAC desde el Instituto Geográfico Militar (hoy Instituto Geográfico Nacional)

Inmersos en este contexto, se crea la red RAMSAC en el 2006 y las diferentes estaciones continuas preexistentes se integran a la misma (Figura 2). Comienza de esta manera a desarrollarse e implementar, la base de datos nacional como ventana de búsqueda para los usuarios de todo el país, al igual que el monitoreo de las mismas, desde un conector federal (Figuras 5 y 6).

| Fecha | Hora | Nombre de Archivo |
|------------------------------------|-------|----------------------------------|
| jueves, 18 de noviembre de 2004 | 12:23 | <dir> AHIF |
| martes, 22 de junio de 2004 | 11:43 | <dir> BORC |
| martes, 23 de noviembre de 2004 | 10:33 | <dir> CFAG |
| jueves, 10 de junio de 2004 | 10:32 | <dir> CORD |
| lunes, 08 de marzo de 2004 | 17:23 | 21578 CXZKXK.SIP |
| martes, 26 de octubre de 2004 | 8:28 | <dir> LOMO |
| martes, 23 de noviembre de 2004 | 9:06 | <dir> TCHI |
| jueves, 17 de junio de 2004 | 11:46 | <dir> LRLC |
| miércoles, 10 de noviembre de 2004 | 15:10 | <dir> LPGS |
| martes, 02 de noviembre de 2004 | 16:15 | <dir> MPLA |
| miércoles, 24 de noviembre de 2004 | 9:08 | <dir> WZAG |
| jueves, 14 de octubre de 2004 | 15:23 | <dir> MEAN |
| sábado, 19 de junio de 2004 | 14:57 | <dir> MST |
| viernes, 16 de agosto de 2002 | 11:01 | 327578 LIMRX.SIP |
| miércoles, 17 de noviembre de 2004 | 16:19 | <dir> RLOG |
| martes, 23 de noviembre de 2004 | 7:53 | <dir> EWSN |
| miércoles, 17 de noviembre de 2004 | 18:31 | <dir> TUCU |
| sábado, 07 de agosto de 2004 | 13:40 | <dir> MCOB |
| viernes, 19 de noviembre de 2004 | 10:23 | <dir> UNFO |
| martes, 23 de noviembre de 2004 | 9:46 | <dir> UNSA |
| martes, 23 de noviembre de 2004 | 18:43 | <dir> VBCA |

Figura 5. Sitio de descarga de los archivos de observación GNSS, previo a la creación de RAMSAC (Captura en noviembre 2004) estaciones SIRGAS95 (rojos), estaciones GPS en mareógrafos (verdes)(www.SIRGAS.org)



Figura 6. Sitio de descarga de los archivos de observación GNSS de estaciones RAMSAC (Captura junio 2022). El menú incluye: estado de las estaciones, mapa, estadísticas de descarga, etc. (https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/DescargaRinex)

NO SOLO OBSERVACIONES, SINO COORDENADAS, VELOCIDADES Y MONITOREO ATMOSFERICO

En la segunda década analizada (2000 al 2010) Argentina ya contaba con la red de observaciones GPS, el siguiente desafío fue establecer una estrategia rigurosa de cálculo de coordenadas y velocidades para asegurar la precisión del marco de referencia nacional en el tiempo. El liderazgo que para ese entonces tenía SIRGAS como referente geodésico a nivel de América Latina, y la participación activa de colegas argentinos en el Comité ejecutivo de SIRGAS (Lauría y Brunini) hicieron que en Argentina se conformaran 3 grupos, que recibieron el entrenamiento apropiado para estimar coordenadas y velocidades mediante un cálculo riguroso con software científico. Fue así que se conformó el Centro de Procesamiento de La Plata (CEPLAT) en 2005, luego el Centro de Procesamiento de Ingeniería en Mendoza Argentina (CIMA) oficializado en el 2008 y finalmente el Centro de Procesamiento del Instituto Geográfico Nacional (GNA) en el 2010.

Desde el 2006, como parte del procesamiento semanal de la red SIRGAS se calculan las observaciones de las estaciones RAMSAC incorporadas en SIRGAS (en la actualidad se incluyen en SIRGAS un 30% del total de estaciones argentinas operativas de RAMSAC). De esta forma se introduce a la red nacional el marco de referencia internacional y se mantiene su monitoreo en el tiempo.

Dentro del contexto de SIRGAS se estiman soluciones semanales y multianuales las cuales incluyen coordenadas para una determinada época y velocidades geodésicas en cada estación. Luego mediante las mismas, se estima un modelo de velocidades que permite la actualización de coordenadas en cualquier sitio de América Latina. A la fecha se cuenta con los modelos de velocidades VEMOS, siendo el más reciente VEMOS17 (Drewes y Sánchez, 2017).

Desde el 2006, GNA realiza el cálculo diario del total de estaciones GNSS de RAMSAC en Argentina, vinculado a las coordenadas de las SIRGAS. Esto permite el monitoreo geodinámico en las distintas regiones del país. Como ejemplo de la ventaja que este monitoreo ofrece, se tienen las

publicaciones realizadas sobre los desplazamientos ocurridos durante los sismos y las deformaciones posteriores a los terremotos de Maule en 2010, de Illapel en 2015, de San Juan en 2021, entre los más significativos (Figura 7). El modelo VELAr (Gómez, D., et al. 2016) es también un aporte muy importante que muestra un producto surgido del esfuerzo y cooperación, mantenido en esta escala geodésica (precisión y monitoreo en el tiempo) (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/VEL-Ar>).

Por último, es oportuno mencionar el aporte que la red de estaciones GNSS ofrece en el monitoreo atmosférico. Desde los Centros de análisis de la Universidad de La Plata y de Mendoza (CIMA), se encaminaron en la última década (2010 al 2020) investigaciones orientadas a monitorear desde las observaciones GNSS el contenido de electrones en la ionosfera y el retardo troposférico. Como productos del monitoreo atmosférico se dispone de las grillas y mapas de Contenido total de electrones vertical, VTEC (Figuras 8 y 9), calculados con el modelo LPIM (Brunini, et al., 2009), disponibles hasta el 2013

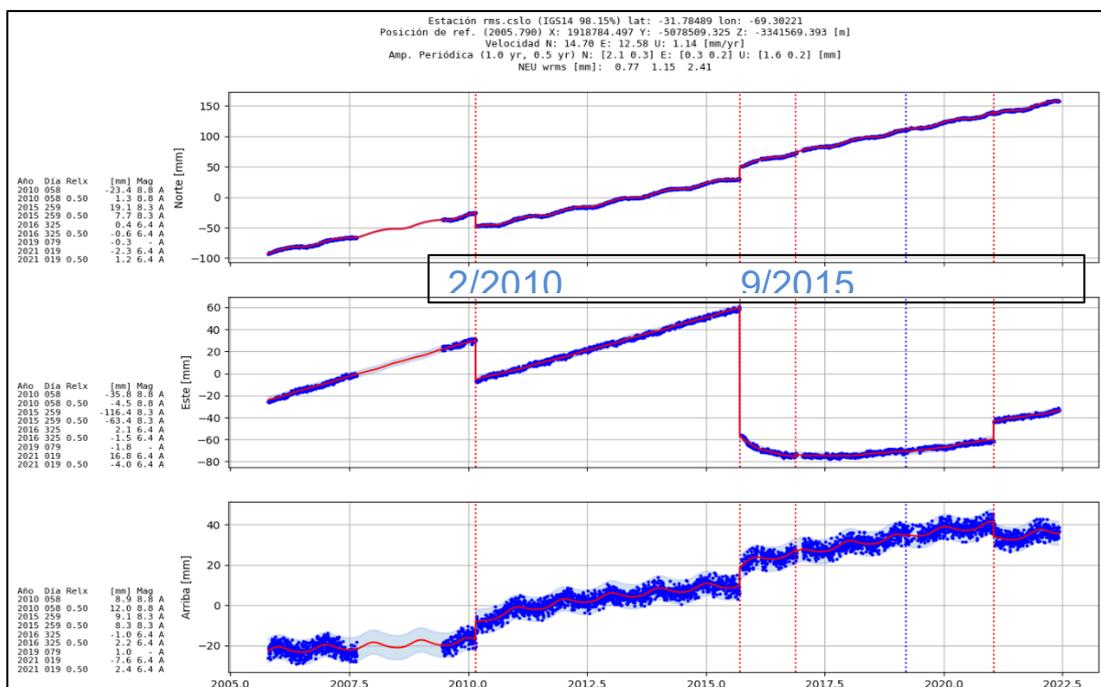


Figura 7. Serie temporal de coordenadas Norte, Este y altura. Estación CSLO (Casleo, Barreal, San Juan). Se marcan las fechas de los 3 terremotos más significativos. Se observan los desplazamientos y deformación post-sísmica en cada uno (<https://www.ign.gob.ar/archivos/ramsac/estacion2.php?estacion=CSLO>)

Desde el Laboratorio MAGGIA de la UNLP, se estima el VTEC en cuasi tiempo real, cada 15 minutos, desde las observaciones GNSS disponibles online (Mendoza, et al., 2019). Se puede acceder a los mismos desde el sitio web de MAGGIA (https://www.maggia.unlp.edu.ar/articulo/2017/1/6/monitoreo_ionosfera).

Se dispone también, de los retardos cenitales troposféricos (ZTD) estimados en la Facultad de Ingeniería de la UNCuyo, por CIMA, con un registro horario en cada estación GNSS operativa de SIRGAS. Los mismos se encuentran publicados en la página web de SIRGAS, bajo los estándares que establece el IGS (<https://sirgas.ipgh.org/productos/retrasos-troposfericos/>). Otro aporte al

monitoreo atmosférico es el cálculo del vapor de agua integrado (IWV) en cada sitio, sus series temporales (Figura 10) y los mapas horarios de IWV (Figura 11) (Mackern et al., 2021).

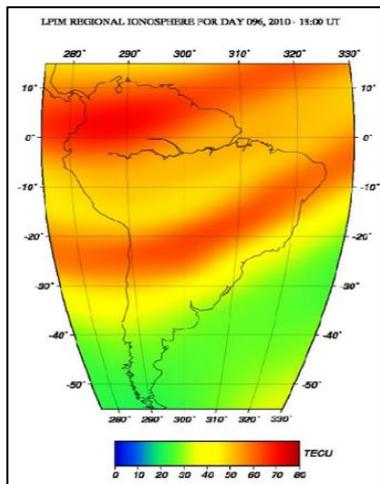


Figura 8. VTEC calculado desde GNSS por LPIM, para el día 096 del año 2010.

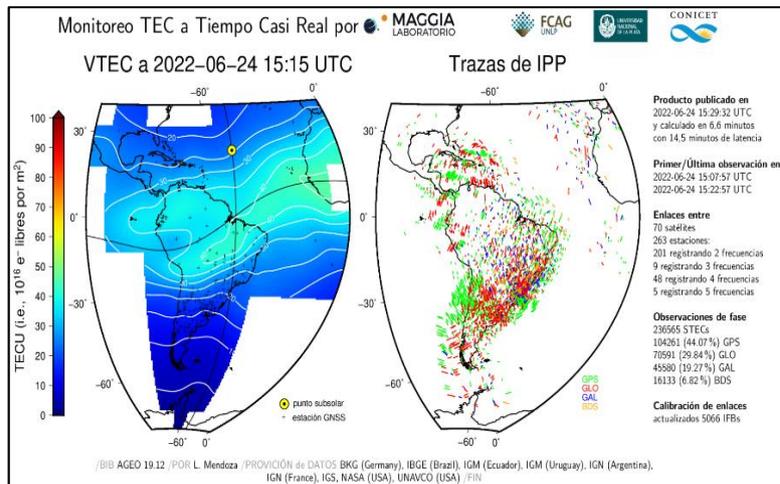


Figura 9. VTEC a cuasi tiempo real, calculado desde GNSS por MAGGIA (fecha 24 de junio 2022, 15:15 UTC) (<http://wikilen.fcaglp.unlp.edu.ar/ion/ultimo.png>)

A modo de ejemplo se han mencionado algunos aportes científicos realizados a partir de las observaciones GNSS disponibles de las redes nacionales como RAMSAC y la continental SIRGAS-CON, con el objetivo de mostrar el valor agregado que estas redes han incrementado.

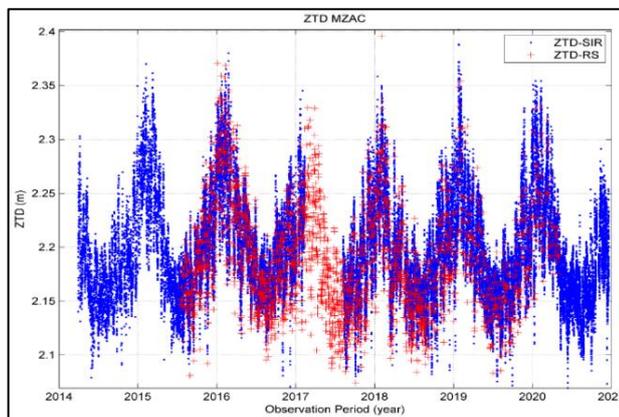


Figura 10. Serie de tiempo del ZTD, estación MZAC (Mendoza, Capital) (azul). Validación con ZTD calculado en estación de radiosondeo SAME (rojo).

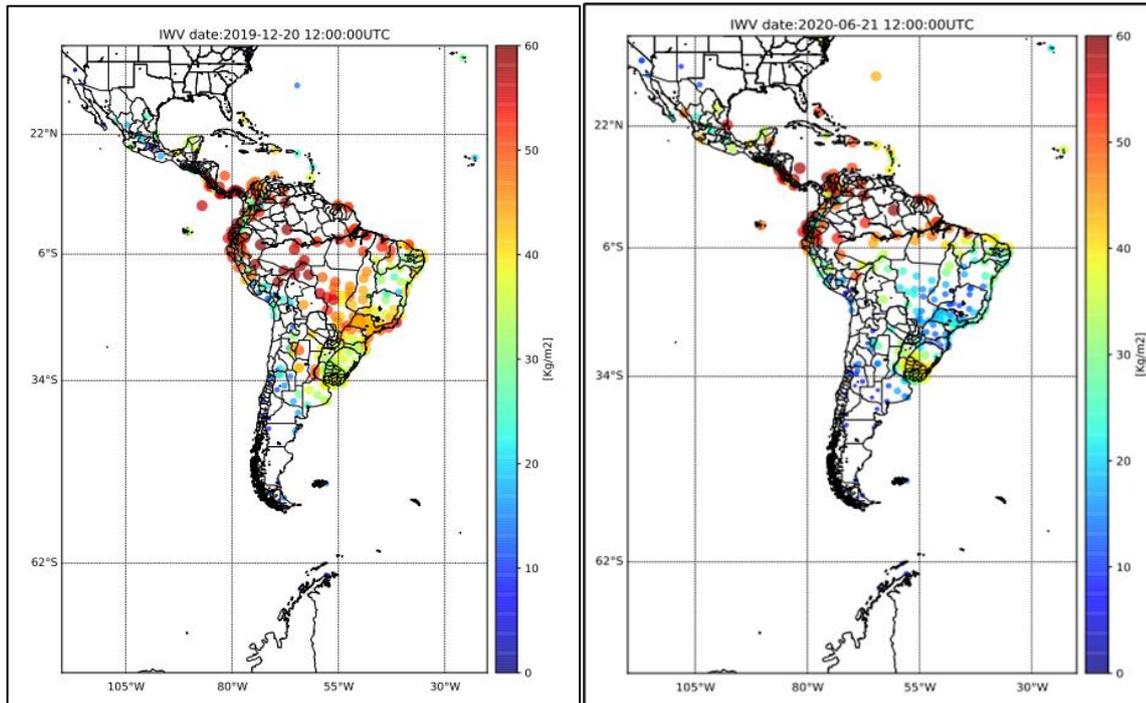


Figura 11. Vapor de agua integrado (IWV), calculado por CIMA desde el ZTD en estaciones SIRGAS. Verano en Argentina, 20 de diciembre 2019 (izquierda). Invierno en Argentina, 21 de junio 2020 (derecha). En ambos casos 12 h UTC.

El

MARCO LEGAL Y LOS NUEVOS SERVICIOS

No demos dejar de mencionar por la importancia que tuvo en el desarrollo y mejora de la red RAMSAC, la promulgación de la ley 26209 “Ley federal del catastro”. En la misma se establece la obligatoriedad de la georreferenciación de los inmuebles. Esta ley impone el marco legal que estaba faltando para fundamentar la existencia de actualizar el marco de referencia oficial. Surge así la oficialización de POSGAR2007. Marco nacional vinculado a SIRGAS y a ITRF a través del procesamiento continuo de la red RAMSAC. Desde el IGN en coordinación con los catastros provinciales se establecen acuerdos para el mantenimiento conjunto, de las estaciones GNSS de RAMSAC. Se desarrollan talleres de capacitación orientados a los usuarios, bajo el título de talleres de “Georreferenciación”.

Frente a los avances de la tecnología GNSS y las comunicaciones se desarrolla e implementa a partir del 2010, el servicio a tiempo real denominado RAMSAC-NTRIP, como nuevas estrategias orientadas a la georreferenciación precisa y eficiente (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/RamsacNtrip>)

CONCLUSIONES

De todo lo expuesto, se desprende que Argentina cuenta con una infraestructura geodésica, la red RAMSAC de gran potencial geodésico. Los resultados que se empiezan a obtener son el producto de un poco más de 30 años de esfuerzo, de cooperación, de gestión, de capacitación.

Hoy nos preocupan nuevos desafíos: integrar todas las constelaciones GNSS, combinar la red GNSS con las dos estaciones SLR (Oafa, de San Juan y AGGO, de La Plata). Desarrollar aplicaciones combinando técnicas, a partir de las estaciones SLR mencionadas, DORIS (en Rio Grande y en San Juan) y VLBI (actualmente en AGGO y próxima en CART, en San Juan). La

comunidad académica de la Geodesia nacional y continental se prepara para esos desafíos. Se ha identificado la necesidad de formar más especialistas porque no serán suficientes. Esto mismo que sucedió con GPS en las décadas descritas, nos afectará en un futuro no tan lejano frente a la demanda que presentan las estaciones geodésicas de AGGO, Oafa y CART. Nos preguntamos: ¿cómo instalar y poner operativas estaciones SLR, DORIS y VLBI?, ¿cómo vincular las soluciones entre técnicas?, ¿estamos en condiciones de determinar los vínculos locales, "local ties"?, ¿estamos preparados para procesar todo ese tipo de observables?

Mi conclusión, es que, si podremos aggiornarnos, como lo hicimos en el pasado, desde luego tomando como patrón del éxito la cooperación internacional y la colaboración entre agentes involucrados, comencemos.

REFERENCIAS

- Bosy, J. Global, Regional and National Geodetic Reference Frames for Geodesy and Geodynamics. *Pure Appl. Geophys.* 171, 783–808 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0676-8>
- Brunini, C.; Azpilicueta, F.; Gende, M.; Aragón Ángel, A.; Hernández Pajares, M.; Juan, J. M.; Sanz, J. (2009). Toward a SIRGAS service for mapping ionosphere electron density. *IAG Symposia* 136: 753-760.
- Drewes, H. y Sánchez, L. (2017). Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017, Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM), IGS RNAAC SIRGAS
- Gómez, DD, Piñón, DA, Smalley, R. et al. Acceso al marco de referencia bajo los efectos de grandes terremotos: un enfoque de colocación de mínimos cuadrados para la evolución post-sísmica no secular. *J Geod* 90, 263–273 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0871-8>
- Mackern M.V., Mateo M.L., Camisay M.F., Morichetti P.V. (2020). Tropospheric Products from High-Level GNSS Processing in Latin America. *International Association of Geodesy Symposia Series, Vol 152*, open access, [doi: 10.1007/1345_2020_121](https://doi.org/10.1007/1345_2020_121).
- Mendoza, L. P. O., Meza, A. M. y Aragón Paz, J. M. (2019). A multi-GNSS, multi-frequency and near real-time ionospheric TEC monitoring system for South America", *Space Weather*, 17, <https://www.doi.org/10.1029/2019SW002187>;
- Moirano J., Brunini C., Drewes H., Kaniuth K. (1998). Realización de un sistema geodésico de referencia en Argentina en conexión con SIRGAS. *Serie de Simposios de la Asociación Internacional de Geodesia*; Springer, Berlín, Heidelberg; vol. 118:199-204, https://doi.org/10.1007/978-3-662-03714-0_32.
- Natali M., Brunini C., Kaniuth K., Drewes H. (2002). Monitoreo de puntos de referencia de mareógrafos en Argentina por GPS. *Serie de Simposios de la Asociación Internacional de Geodesia*; Springer, Berlín, Heidelberg, vol. 124:255-258, https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8_48.