

Aplicación web para

Georreferenciación utilizando servicios de posicionamiento en línea

y su aplicación en la Agrimensura

Santiago Pestarini

santiago@pestarini.com.ar

Agrimensura – FCElyA – UNR

1. sep. 2016

Edición 10. nov. 2016

Índice de contenido

Resumen.....	1
Palabras clave.....	1
Objetivos.....	2
Introducción.....	3
Qué es una aplicación web.....	3
Qué es georreferenciación.....	3
Qué son los servicios de posicionamiento en línea.....	3
Cómo aprovechar los servicios de posicionamiento en línea.....	5
Servicios de posicionamiento en línea.....	6
Fundamentos.....	6
Servicios de post-proceso de Posicionamiento Diferencial.....	6
Servicios de post-proceso de Posicionamiento Puntual Preciso.....	8
Cuadro comparativo.....	11
Correcciones.....	13
Modelos de velocidades.....	13
Desplazamientos sísmicos.....	18
Cambios de marco.....	19
La aplicación web.....	21
Origen, la <i>PPPCalc</i>	21
Evolución, versiones previas.....	21
Actualidad, versión 1.0.....	23
Líneas de trabajo a futuro.....	26
Casos de prueba.....	27
Exactitudes de la aplicación web desarrollada.....	27
Prueba automatizada.....	27
Conclusión.....	46
Referencias.....	47
Servicios de posicionamiento diferencial o relativo.....	47
Servicios PPP.....	47
Bibliografía.....	47



Este documento está disponible en la web: <https://goo.gl/3EYVCG>.

Índice de gráficas

Gráfica 1: Usuario midiendo por el método de Posicionamiento Diferencial o Relativo.....	4
Gráfica 2: Usuario midiendo por el método de Posicionamiento Puntual Preciso.....	4
Gráfica 3: Funcionamiento básico de los servicios de posicionamiento en línea. Imagen descriptiva del servicio CSRS-PPP del NRCan.....	6
Gráfica 4: En PPP los puntos de coordenadas conocidas son los satélites.....	8
Gráfica 5: Posicionamiento preciso a partir de un solo receptor.....	9
Gráfica 6: Series de tiempo de UNRO según el cálculo semanal de SIRGAS.....	14
Gráfica 7: Series de tiempo de UNRO según el cálculo diario del CPC-Ar del IGN.....	15
Gráfica 8: Modelo de Velocidades VMS2009 de SIRGAS.....	16
Gráfica 9: Modelos de Velocidades VMS2015 de SIRGAS.....	17
Gráfica 10: Movimientos horizontales estimados en la semana posterior al sismo de 2010.....	19
Gráfica 11: Zona de validez de la PPPCalc con velocidades homogéneas según VMS2009.....	22
Gráfica 12: Fajas para la corrección de la Longitud.....	22
Gráfica 13: Correcciones calculadas para 10 años (para la época 2016,668).....	24
Gráfica 14: Aspecto actual de la Calculadora.....	25
Gráfica 15: EP con ambos ejes de elipse de confianza menores que 5 cm.....	29
Gráfica 16: EP con algún eje de elipse de confianza mayor que 5 cm.....	29
Gráfica 17: EP procesadas con la Calculadora.....	30

Resumen

Se estudian los servicios de posicionamiento en línea y se toman como primer paso del post-proceso de observaciones. Sus resultados, que serán un par de coordenadas ITRF08 para la época de las observaciones procesadas, son los valores de ingreso para una aplicación web que se desarrolla con el fin de referir dichas coordenadas al Marco de Referencia oficial de la Argentina, y en particular de la provincia de Santa Fe: POSGAR07, época 2006.632.

Se describen las operaciones que la aplicación web, la llamada *Calculadora*, realiza sobre las coordenadas ITRF08 para *transformarlas* a POSGAR07, que se apoyan en los modelos de velocidades calculados por SIRGAS y los valores de los desplazamientos ocasionados por dos eventos especiales: el terremoto ocurrido la madrugada del 27 de febrero de 2010, con epicentro en el mar chileno a 150 km de Concepción; y otro de mucha menor envergadura, como fue el cambio de marco de referencia en el cual se expresan las coordenadas de SIRGAS.

Por último, se realizan pruebas automatizadas de exactitud de la aplicación web desarrollada, para comparar las coordenadas *verdaderas* u oficiales POSGAR07 de EP distribuidas en todo el país con coordenadas de las mismas EP, surgidas de los recálculos de la red SIRGAS-CON y *transformadas* a POSGAR07 con la *Calculadora*. Como conclusión se obtienen valores de desvíos estandar que reflejan en qué zonas del país es conveniente utilizar las *correcciones* de la aplicación web.

Palabras clave

georreferenciación, GNSS, GPS, PPP, posicionamiento puntual preciso, posicionamiento diferencial, servicios posicionamiento en línea, ITRF08, POSGAR07, VEMOS

Objetivos

Uno de los objetivos del presente trabajo es realizar una introducción al universo creciente de los **servicios de posicionamiento en línea**. Describirlos brevemente, entender sus fundamentos y cómo utilizar sus resultados y, finalmente, incorporarlos como una nueva herramienta.

Pero además, el fin es acercar al usuario final, a través de una sencilla e intuitiva **aplicación web**, las *correcciones* que se deben aplicar a los resultados de los servicios de posicionamiento en línea para referirlos a POSGAR2007, el Marco de Referencia oficial de Argentina y, en particular, de la provincia de Santa Fe.

En síntesis, aportar un recurso más, que en algunos casos podrá ser de primera opción y en otros una alternativa de verificación en la tarea de **georreferenciar objetos territoriales**.

Introducción

Antes de empezar, se intentan aclarar algunos conceptos.

Qué es una aplicación web

Una aplicación web es un programa de software al que se accede a través de un navegador web.

Es decir, sólo se debe ingresar una dirección web a través del navegador y así se accede a la aplicación, siempre en su versión más reciente. Con esto, no se requieren descarga, instalación o actualizaciones. Esta característica hace que la aplicación sea *multiplataforma*, que significa que es independiente tanto del sistema operativo, como del dispositivo en que se ejecute.

En resumen, cualquier dispositivo (PC o móviles) con cualquier sistema operativo (GNU/Linux, Windows, Android, iOS, etc.) y cualquier navegador web (Firefox, Chrome, Opera, Safari, Internet Explorer, etc.) es, o debería ser, apto para utilizar una aplicación web.

Qué es georreferenciación

La georreferenciación consiste en la identificación de todos los puntos del espacio mediante coordenadas referidas a un único sistema mundial.

Georreferenciar entonces es expresar las coordenadas de un punto, o de los puntos de un objeto, en referencia a la Tierra, o sea, a un sistema de referencia único relativo al planeta Tierra o Sistema de Referencia Global. Las coordenadas son algo así como el Documento Universal de Identidad de cada uno de los puntos del espacio.

Un Sistema de Referencia (SR) es una definición teórica ideal y su materialización o realización se denomina Marco de Referencia (MR). Si un SR es global, entonces su correspondiente MR también lo será. Pueden existir más de una materialización del mismo SR, por ejemplo, todas las realizaciones de ITRF (2000, 2005, 2008, 2010, 2014) o las de IGS (IGS05, IGS08, IGB08) son materializaciones de la misma definición de SR. Como en cualquier medición, puede haber más de un resultado.

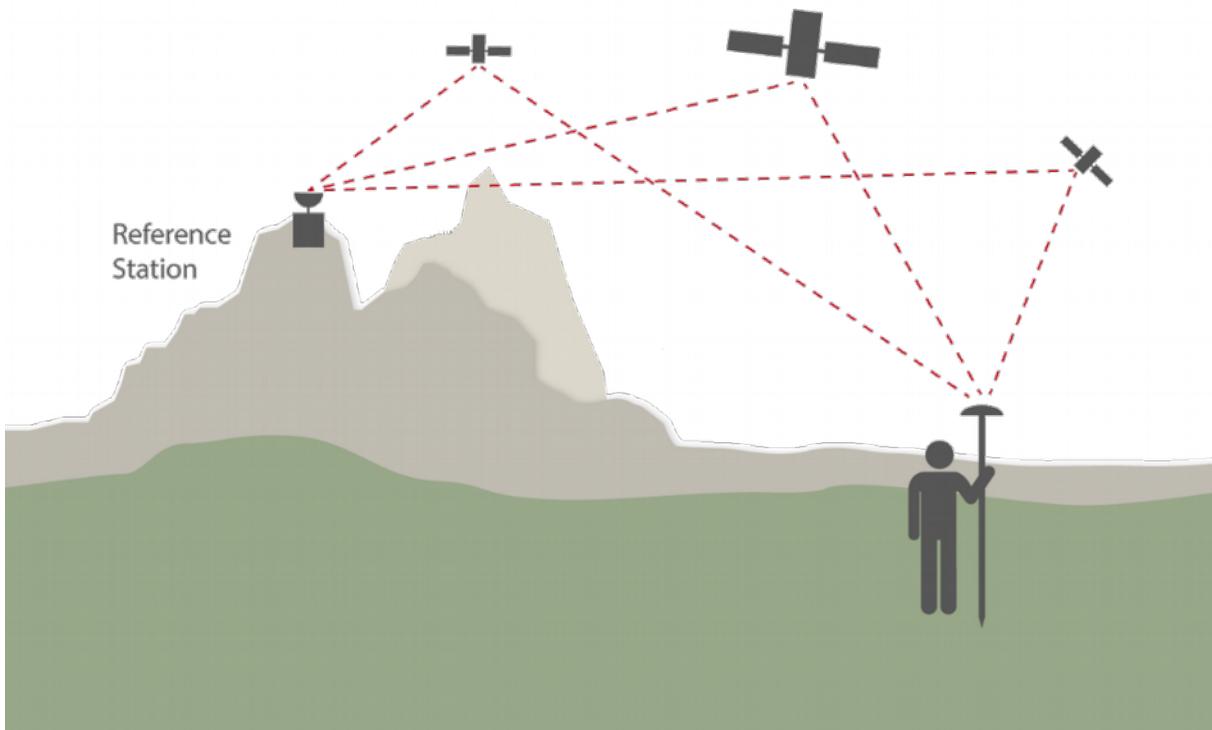
En Argentina, como en la provincia de Santa Fe, el Marco de Referencia adoptado como oficial es POSGAR07¹. Entonces, georreferenciar en Santa Fe, según la normativa de su Catastro, significa expresar las coordenadas POSGAR07 de un objeto.

POSGAR07 está basado en ITRF05, época 2006.632. Esto es, está definido en base al MR global denominado ITRF05 (International Terrestrial Reference Frame 2005), que es una realización del SR global denominado ITRS (International Terrestrial Reference System) y además está calculado para una época promedio que coincide con el día 18 de agosto de 2006, que expresado en años y fracción, es la época 2006.632.

Qué son los servicios de posicionamiento en línea

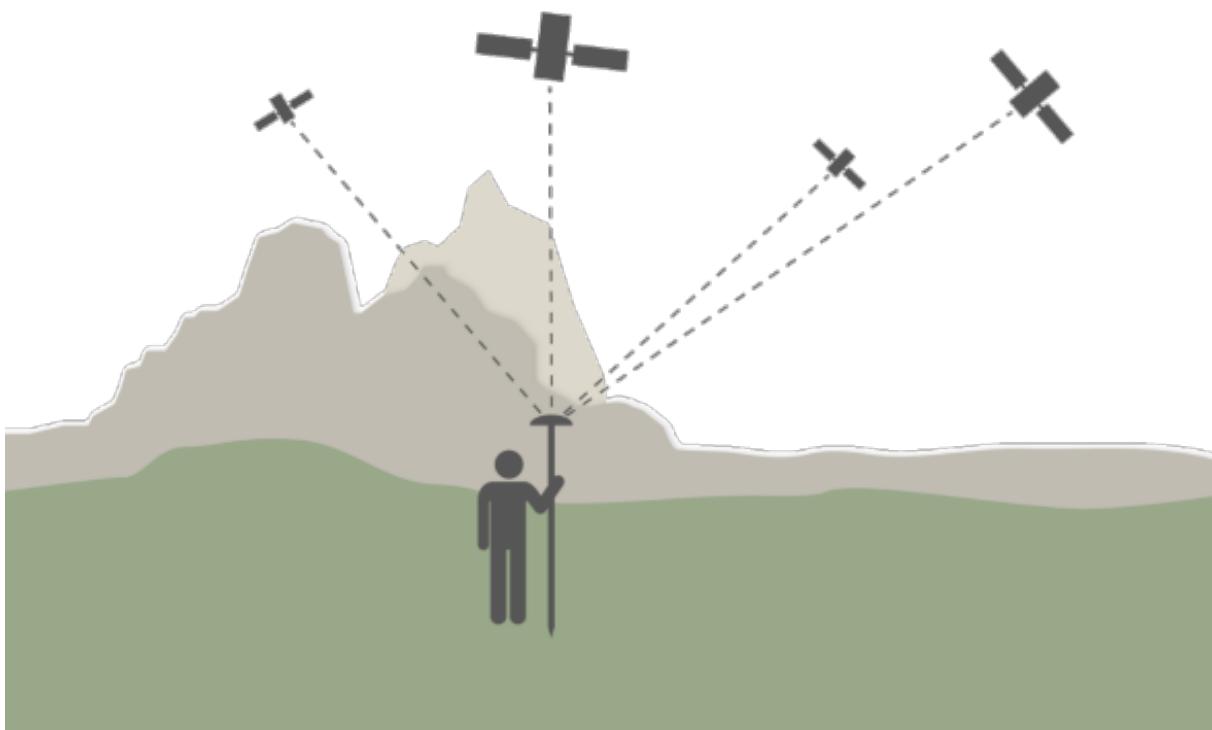
Los servicios en línea son servicios prestados por aplicaciones web a través de Internet. En particular, hay dos tipos de servicios de posicionamiento en línea, ambos son de post-proceso, es decir, están disponibles para su utilización luego de la recolección de observaciones GNSS.

1 POSGAR, Posiciones Geodésicas Argentinas: <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Posgar07>



Gráfica 1: Usuario midiendo por el método de Posicionamiento Diferencial o Relativo.

Uno es el llamado **posicionamiento diferencial o relativo**, es decir, involucra las observaciones en simultáneo de dos o más receptores a los mismos satélites, a las que utiliza para eliminar las influencias de las fuentes de error a través de la doble (o triple) diferencia entre observaciones, y luego calcular la posición de uno de los receptores en relación al/a los restante/s.



Gráfica 2: Usuario midiendo por el método de Posicionamiento Puntual Preciso.

El otro es de tipo absoluto y es el llamado **posicionamiento puntual preciso (PPP)**, es decir, involucra observaciones de un solo receptor, a las que debe aplicar modelos precisos de corrección

para todos los fenómenos físicos que las afectan, que se pueden agrupar en *efectos satelitales* y *efectos de desplazamiento local*. Por último, se obtiene la posición absoluta del receptor.

Hay algunas diferencias que se detallarán más adelante, pero lo más importante es que todos los servicios procesan observaciones (en el formato de archivos RINEX) y devuelven los resultados expresados en algún Marco de Referencia determinado y para una época determinada. En general, en ITRF08 y para la época de medición de las observaciones.

Esto significa que para hacer compatibles los resultados del procesamiento de alguno de estos servicios con POSGAR07, se debe aplicar una serie de correcciones.

Cómo aprovechar los servicios de posicionamiento en línea

Si bien se podrían estudiar para una gran variedad de aplicaciones, por ejemplo combinar PPP+RTK para posicionamiento preciso en tiempo real (Noguera & Mangiaterra, 2012), en este trabajo se intenta aprovechar todo su potencial como herramienta para georreferenciar una nube de puntos, o mejor dicho, georreferenciar la BASE de un relevamiento, es decir, referirla a POSGAR07, a partir de las observaciones GPS o GNSS de ese solo receptor, que incluso podría ser de simple frecuencia, con algunas precauciones especiales.

Esto puede ser de utilidad para usuarios con receptores de doble frecuencia, para contar con una herramienta de verificación o como alternativa para cuando no logren soluciones fijas con su software de post-proceso o la Estación Permanente más cercana haya fallado y no se cuente con una sesión de datos lo suficientemente buena como para obtener soluciones con EP más lejanas.

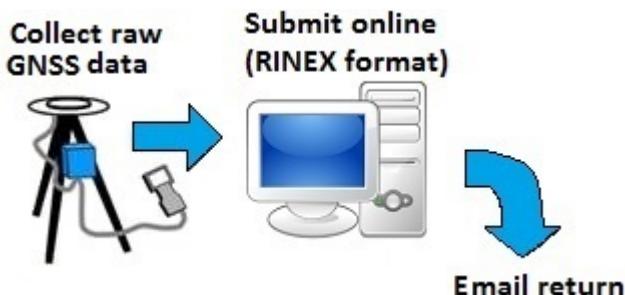
En ese sentido entonces, se estudian trabajos previos que demuestran sobradamente las excelentes prestaciones de los servicios en línea para posicionamiento estático con receptores GNSS de doble frecuencia y se desarrollan algunos casos de prueba para analizar la factibilidad de georreferenciar con un receptor GPS de simple frecuencia.

Servicios de posicionamiento en línea

Fundamentos

Los servicios en línea, son servicios prestados a través de Internet. En el caso de los servicios de posicionamiento, el servicio prestado es el de procesamiento de datos GNSS recolectados por el usuario y, como resultado, se devuelve un conjunto de coordenadas calculadas a partir de dichos datos.

Si bien cada servicio tiene sus particularidades, todos funcionan fundamentalmente de la misma manera (Gráfica 3): **reciben archivos RINEX de observaciones** GNSS recolectadas en campo (más unos pocos parámetros de configuración para el procesamiento) y **devuelven coordenadas ITRF08 para la misma época de dichas observaciones**, cual es el Marco de Referencia de los satélites. Por supuesto que cada servicio ofrece otros MR, en especial los oficiales de cada país de origen.



Gráfica 3: Funcionamiento básico de los servicios de posicionamiento en línea.

Imagen descriptiva del servicio CSRS-PPP del NRCan.

Servicios de post-proceso de Posicionamiento Diferencial

El posicionamiento diferencial o relativo es el más conocido y de uso mayormente difundido. El procedimiento de recolección de datos para utilizar este método de posicionamiento debe hacerse de forma simultanea por dos o más receptores y, dependiendo del tipo de los receptores, tener la precaución de que los mismos no estén demasiado alejados entre sí, en especial si son de simple frecuencia.

Esto es debido a que la técnica denominada de doble (o triple) diferenciación utilizada para el cálculo de las coordenadas del receptor remoto o *rover*, se hace en base al cálculo de un vector con origen en otro receptor, llamado *base*, o en varios receptores, que forman una *red*, todos *observando* a los mismos satélites durante la misma cantidad de *épocas* al mismo tiempo.

Es decir, las coordenadas parciales resultantes serán relativas a la *base* o a la *red*, cuyas coordenadas absolutas, por supuesto, deben ser *conocidas*. Esta forma de calcular garantiza la eliminación de la influencia de una gran variedad de fuentes de error, como los introducidos durante la propagación de la señal a través de la ionosfera y la troposfera, las imprecisiones en las efemérides de las órbitas y los relojes satelitales.

Los distintos servicios descriptos que utilizan esta metodología solicitan datos mínimos para su procesamiento, además de los archivos RINEX de las observaciones, pero sólo ofrecen soluciones para datos de doble frecuencia y de tipo estático. El servicio prestado en este caso es el de la

infraestructura de red de estaciones permanentes o CORS², con lo cual, el usuario puede obtener las coordenadas de un punto relevado (en modo estático) con un solo receptor (doble frecuencia), en relación a la infraestructura de estaciones monitoreada por cada servicio.

En todos los casos los resultados son coordenadas ITRF08, para la **época de las observaciones** enviadas para su post-proceso.

AUSPOS - Online GPS Processing Service

- Operado por Geoscience Australia, dependiente del gobierno australiano.
- Gratuito, sin necesidad de registro.
- Los datos pueden ser enviados al servicio a través del **sitio web** o por ftp.
- Permite configurar tipo y altura de antena y la carga de hasta 20 archivos.
- Sólo acepta datos **GPS de doble frecuencia** observados en **modo estático** para una sesión de datos de más de **1 hora** (preferiblemente 2 horas) y menos de 7 días (168 horas).
- Utiliza un método relativo de posicionamiento mediante el ajuste de una red que consta de las 15 estaciones IGS y/o APREF más cercanas, utilizando los mejores productos IGS disponibles, tomados de archivos de datos GNSS propios.
- Utiliza Bernese GNSS Software Version 5.2 para el post-proceso.
- El informe incluye las coordenadas GDA94 e **ITRF2008** para la **época promedio de las observaciones** y más información sobre el procesamiento que es enviada por **correo electrónico** al usuario cuando el procesamiento termina, en menos de 5 minutos.
- Enlace: <http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl>

Trimble CenterPoint RTX (Real Time eXtended)

- Operado por la compañía Trimble Inc.
- Gratuito. Requiere registro anual.
- Carga de archivos de datos a través de la **página web** del servicio.
- Permite seleccionar Marco de Referencia de los resultados y Placa Tectónica para efectuar transformaciones entre distintos MR y épocas, pero advierte de la pérdida de precisión. Por defecto utiliza **ITRF08, época de las observaciones** con la que logra la mayor precisión.
- Procesa datos posteriores a 14/05/2011 de **doble frecuencia** recolectados en **modo estático** para sesiones mayores a 10 minutos (aunque recomienda al menos **60 minutos** de observaciones para obtener resultados óptimos).
- Utiliza software propio, desarrollado por Trimble.
- Acepta observaciones **GPS, GLONASS, QZSS** y **BeiDou**, este último sólo para datos desde el 04/06/2014.
- Los cálculos de posicionamiento se realizan en **ITRF2008, época de las observaciones**. Luego del procesamiento, un informe le es enviado al usuario por **correo electrónico**.
- Enlace: <http://www.trimblertx.com/UploadForm.aspx>

Online Positioning User Service (OPUS)

- Operado por la US National Geodetic Survey (NGS), dependiente del gobierno.
- Gratuito.
- Carga de datos a través de un formulario en su **página web**.
- Sólo procesa datos **GPS de doble frecuencia** recogidos en **modo estático**.
- Este servicio utiliza el **posicionamiento relativo** con respecto a tres CORS cercanas.

2 CORS, Continuously Operating Reference Station, en castellano: Estación de Referencia de Operación Continua. Lo que también solemos llamar *Estación Permanente*.

- Utiliza PAGES (Program for the Adjustment of GPS Ephemerides) para procesar en estático o RSGPS para estático-rápido, dependiendo de que la duración de la sesión sea mayor a 2 horas o no, respectivamente.
- La solución es enviada a través del **correo electrónico** proporcionado por el usuario, luego de unos pocos minutos.
- Enlace: <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS>

Scripps Coordinate Update Tool (SCOUT)

- Operado por el Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC), Institute of Geophysics and Planetary Physics, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego.
- Gratuito.
- Carga de datos a través de su **servidor FTP** o de algún otro dado por el usuario.
- Luego de un pre-proceso del archivo RINEX cargado al servidor FTP, permite ingresar tipo y altura de antena y modelo de receptor.
- Sólo procesa datos **GPS de doble frecuencia** recogidos en **modo estático** durante al menos 1 hora, aunque se recomiendan más de 3 horas.
- Este servicio utiliza el posicionamiento relativo, realizando un ajuste de red formada por:
 - las tres Estaciones Permanentes más cercanas (modo por defecto) o
 - tres EP (de cuatro dadas por el usuario) elegidas entre las procesadas por SOPAC.
- Utiliza el software GAMIT.
- La solución es enviada a través del **correo electrónico** proporcionado por el usuario.
- Enlace: <http://sopac.ucsd.edu/scout.shtml>

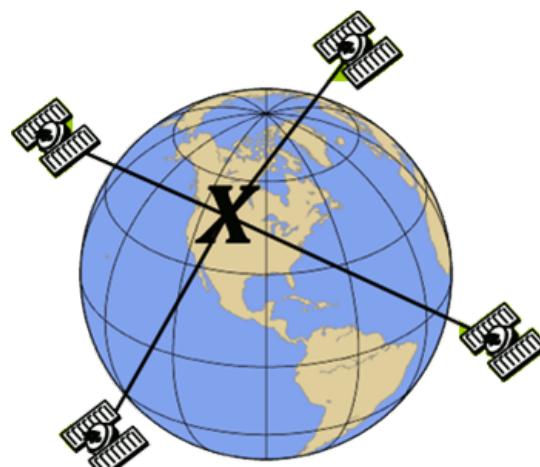
Servicio de Posicionamiento Diferencial GPS (LOPS)

- Operado por la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata.
- Fuera de servicio al momento de consulta (septiembre, 2016).
- No indica mayor detalle acerca del procesamiento, aunque se entiende que también procesa observaciones de simple frecuencia.
- Enlace: <http://www.fcaglp.unlp.edu.ar/lops>

Servicios de post-proceso de Posicionamiento Puntual Preciso

Este tipo de procesamiento se realiza en base a *observaciones no diferenciadas*, como se suelen llamar a las observaciones de un solo receptor, para resaltar el hecho de que no se utiliza la técnica de doble diferenciación, típica del posicionamiento relativo o diferencial. Por esto, se hace uso de gran cantidad de información adicional para contrarrestar el efecto de una variedad de fenómenos físicos que afectan a las observaciones introduciendo errores.

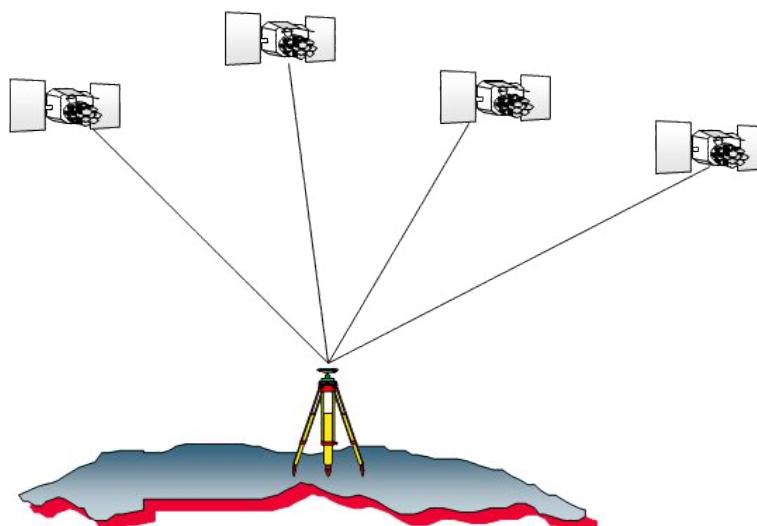
Los modelos de corrección aplicados se agrupan por la causa que origina los desplazamientos. Ellos son por efecto de los satélites, de los desplazamientos locales y de compatibilidad y convenciones IGS. A saber:



Gráfica 4: En PPP los puntos de coordenadas conocidas son los satélites.

- Efectos del satélite:
 - desplazamientos de la antena (antenna offsets) y
 - fin de fase de la portadora (carrier phase wind-up).
- Efectos del desplazamiento local:
 - mareas terrestres (solid Earth tides), producto de fuerzas gravitacionales;
 - mareas polares (polar tides), que produce deformación de la rotación debido al movimiento polar;
 - carga oceánica (ocean loading) y
 - parámetros de rotación terrestre (Earth Rotation Parameters, ERP).
- Compatibilidad y convenciones IGS: se refiere a la falta del estricto cumplimiento de las convenciones IERS de algunos modelos de corrección y a la pérdida de precisión en las distintas transformaciones y/o cálculos intermedios.

La mayoría de los servicios operan a través de un formulario web, aunque en algunos casos cuentan con una aplicación un poco más sofisticada, o un servidor FTP o directamente una interfaz vía correo electrónico para tomar los datos de observaciones. Algunos procesan sólo GPS y otros son multi-constelación. El método PPP permite procesar observaciones en modo estático o cinemático y en algunos casos, además de doble frecuencia, también de **simple frecuencia**.



Gráfica 5: Posicionamiento preciso a partir de un solo receptor.

Según qué servicio es elegido, se permiten establecer más o menos parámetros de configuración para el procesamiento. En lo que todos los coinciden es en que las coordenadas resultantes son expresadas en el MR de los satélites: **ITRF08**, para la **época de observación** de los datos.

Automatic Precise Positioning Service (APPS)

- Operado por la NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), Instituto de Tecnología de California.
- Gratuito. Usuarios registrados tienen más opciones de procesamiento.
- Carga de datos a través de su página web. También tiene interfaz por e-mail o FTP.
- Seleccionar modo de procesamiento **estático** o **cinemático** y algunos otros parámetros como usar código CA o P y otros más avanzados. Usuarios no registrados pueden procesar sólo estático.
- Procesa datos de **doble frecuencia** de **GPS** únicamente.
- Uso de productos de órbita y reloj GPS, *Final*, *Rapid* y *Ultra R/T* producidas por JPL.
- Utiliza el software GIPSY 6.4.

- Los resultados con las coordenadas **ITRF08** para la **época de observación** están disponibles luego del procesamiento en la misma página a través de enlaces de descarga.
- Enlace: http://apps.gdgps.net/apps_file_upload.php

Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-PPP)

- Operado por la Canadian Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada (NRCan) desde 2003.
- Gratuito, pero requiere registrarse en el sistema.
- Carga de datos a través de su página web.
- Seleccionar modo de procesamiento **estático o cinemático**, marco de referencia NAD83 o ITRF y, si es necesario, el modelo de geoide e incluso permite importar un modelo de carga de marea oceánica (Ocean Tidal Loading, OTL). En caso de seleccionar ITRF, se adopta ITRF08 y la misma **época de observación de los datos**.
- Procesa datos de **simple o doble frecuencia** de GPS y/o GLONASS.
- Utiliza las mejores efemérides disponibles para el procesamiento (finales, rápidas o ultra-rápidas, IGS o NRCan, dependiendo de la antigüedad de los datos enviados). Se pueden procesar datos aproximadamente 90 minutos después de su levantamiento.
- Los reportes que tienen no sólo las coordenadas resultantes, sino también un informe y diagramas de series de tiempo, se envían al usuario por **correo electrónico**.
- Enlace: <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>

GNSS Analysis and Positioning Software (GAPS)

- Operado por el Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick (UNB), desde 2007.
- Gratuito, sin registro.
- Carga de datos a través de su página web. Modo básico y modo avanzado.
- Seleccionar modo de procesamiento **estático o cinemático**, constelaciones, coordenadas *a priori* y ángulo de elevación de corte. El modo avanzado permite más opciones.
- Procesa datos de **doble frecuencia** de GPS, Galileo y BeiDou.
- Uso de amplia variedad de productos de órbita y reloj, según disponibilidad.
- Los resultados con las coordenadas **ITRF08** para la **época de observación** e informes con gráficas se reciben por correo electrónico poco después de enviar los archivos.
- Enlace: <http://gaps.gge.unb.ca/submitbasic.php>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE-PPP)

- Operado por el Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), hace uso de la aplicación CSRS-PPP de la NRCan ya descripta.
- Gratuito, sin necesidad de registro.
- Carga de datos a través de su página web.
- Seleccionar modo de procesamiento **estático o cinemático**, modelo y altura de antena (también permite tomarlos del archivo RINEX).
- Procesa datos de **simple o doble frecuencia** de GPS y/o GLONASS, posteriores al 25 de febrero de 2005, cuando Brasil adoptó SIRGAS2000 como marco oficial.
- Los resultados con las coordenadas SIRGAS2000 e **ITRF08** para la **época de observación** de los datos se pueden descargar a través de un enlace en la misma página, casi inmediatamente después del procesamiento.
- Enlace: <http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm>

magicGNSS

- Operado por la compañía española *gmv*.
- Gratuito, sin necesidad de registro.
- Interfaz vía correo electrónico (envío de datos y configuración). Existe la opción de registrarse y utilizar una interfaz más sofisticada.
- Seleccionar modo de procesamiento **estático** o **cinemático** en el asunto del correo, y algunos otros parámetros como qué información de órbitas y relojes utilizar (IGS o generadas internamente por *gmv*), cinemático terrestre o aeronáutico y qué constelación procesar.
- Procesa datos de **doble frecuencia** de **GPS** (desde 2009) y **GLONASS/Galileo** (desde 2014). También procesa **BeiDou** y **QZSS**.
- Los resultados con las coordenadas ETRS89 e **ITRF08** para la **época de observación** junto con un informe y diagramas son enviados al mismo correo electrónico que el usuario utilizó para enviar los datos.
- Enlace: <http://magicgnss.gmv.com/ppp/>, interfaz de correo: magicppp@gmv.com

Cuadro comparativo

Lo más relevante para el objetivo de este trabajo es rescatar los servicios que procesen observaciones de simple o doble frecuencia, de cualquier sistema satelital y tomadas en modo estático.

Seguramente los usuarios que cuenten con receptores doble frecuencia, contaran con más posibilidades y sumarán un nuevo recurso alternativo de verificación.

Según varios trabajos de comparación de servicios de posicionamiento en línea (Silver, 2013; Kumar Jha & al., 2016), todos los servicios producen soluciones de calidades muy similares, cuyos desvíos estándar o precisiones son de calidad centimétrica. No es necesario aclarar que a sesiones más extensas y a mejor calidad de observaciones, mejores serán los resultados.

En particular, en un estudio (Öcalan & al., 2013) realizado con archivos de 24 horas de observaciones GPS de doble frecuencia de ocho estaciones diferentes, se procesaron con varios servicios en línea y con el software científico Bernese, estas últimas fueron tomadas como *verdaderas*, y las diferencias con las calculadas por los servicios arrojaron menos de 10 mm para los de posicionamiento relativo y menos de 20 mm para los de PPP. En ese estudio, AUSPOS devolvió los mejores resultados (< 1 mm), lo que no es casualidad, teniendo en cuenta que también utiliza Bernese.

Otros estudios (El-Mowafy, 2011; Alkan & al., 2016) certifican que las estimaciones son siempre mejores que 10 cm en cualquier servicio (AUSPOS, CenterPoint RTX, OPUS, APPS, CSRS-PPP y magicGNSS), con certeza del 95%, para archivos de al menos 2 horas de observaciones doble frecuencia en modo estático.

[...] it can be concluded that the services all can provide a cm-level of accuracy especially from 2-hour and more of observations [...]

[...] se puede concluir que todos los servicios proveen precisión de nivel centimétrico, especialmente para observaciones de 2 horas o más [...]

– (Alkan & al., 2016)

Esta serie de trabajos consultados hablan de la confiabilidad de los resultados en exactitud y en precisión en tanto se procesen observaciones doble frecuencia.

Servicio	PD	PPP	L1	Modo		Entrada			Salida	Sesión (recom.)	Constelación
				Est.	Cin.	e-mail	FTP	form			
AUSPOS	x			x			x	x	e-mail	1h (2h)–168h	G
CenterPoint RTX	x			x				x	e-mail	10m(1h)–24h	G,R,B,Q
OPUS	x			x				x	e-mail	15m–48h	G
SCOUT	x			x			x		e-mail	>1h (>3h)	G
LOPS	x		x	x				x	ambos		G
APPS		x		x	x	x	x	x	enlace		G
CSRS-PPP		x	x	x	x			x	e-mail		G,R
GAPS		x		x	x			x	e-mail		G,E,B
IBGE-PPP		x	x	x	x			x	enlace		G,R
magicGNSS		x		x	x	x		x	e-mail		G,R,E,B,Q

Tabla 1: Comparativa de algunas características de los servicios de posicionamiento en línea.

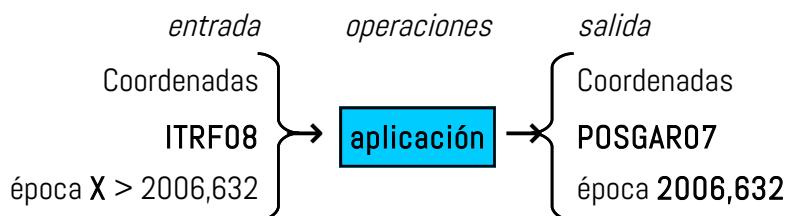
Referencias:

- **PD:** Servicio de Posicionamiento Diferencial
- **PPP:** Servicio de Posicionamiento Puntual Preciso
- **L1:** El servicio admite el post-proceso solo de observaciones de simple frecuencia
- **Modo**
 - **Est.:** Modo Estático
 - **Cin.:** Modo Cinemático
- **Entrada**
 - **e-mail:** El servicio admite una interfaz de entrada datos a través del correo electrónico
 - **FTP:** Se admite la carga de archivos de observaciones a través del protocolo FTP
 - **form:** La interfaz de carga de datos es a través de un formulario en una página web
- **Salida:** La entrega de resultados del procesamiento
- **Sesión (recom.):** Duración permitida de la sesión de observaciones. Entre paréntesis se indica la duración recomendada por el servicio para mejor calidad de los resultados.
- **Constelación:** Los sistemas de navegación satelital cuyas observaciones son utilizadas durante el procesamiento. Detalle:
 - **G:** GPS (Sistema Global)
 - **R:** GLONASS (Sistema Global)
 - **E:** Galileo (Sistema Global)
 - **B:** BeiDou (Sistema Global)
 - **Q:** QZSS (Sistema Regional)

Correcciones

Todos los servicios de posicionamiento en línea listados devuelven como resultado coordenadas ITRF08 para la misma época de las observaciones. Esta característica común hace que sea posible abstraerse de qué servicio se utilice, independizándose de la elección del usuario y delegándole la responsabilidad de la mejor elección, y entonces tomar esa hipótesis como punto de partida para el desarrollo de una aplicación.

Así planteada la situación, la aplicación deber hacer lo siguiente:



Pero entonces, la pregunta a responder es:

¿qué transformaciones se deben hacer a un par de coordenadas ITRF08 de una época más reciente para encontrar su expresión POSGAR07?

Dada la época de cálculo de POSGAR07, hace unos 10 años, y dado el movimiento de las placas tectónicas, se deberán aplicar los **modelos de velocidades** desde la época de observación hasta la época de referencia de POSGAR, en sentido contrario. Para la aplicación desarrollada se contemplan dos modelos de velocidades desarrollados ambos por SIRGAS³, la versión 2009 y la versión 2015.

Pero además, desde la época 2006.632 se registraron distintos **desplazamientos sísmicos** de importancia que afectaron de manera casi instantánea el movimiento modelado y ocasionando un *salto* en las series de tiempo y un cambio en el comportamiento lineal del desplazamiento de las placas tectónicas. Este tipo de desplazamientos sísmicos también se puede calcular y ocurre con distintas intensidades en diferentes sectores del continente, modificando incluso el comportamiento previamente modelado y dejándolo sin efecto o sin validez. Estos efectos también deben ser tenidos en cuenta para cada sector donde se deseé aplicar correcciones. En la "zona de validez" de la aplicación desarrollada, el único movimiento de consideración es el de febrero de 2010, en Chile.

Por último, los cambios o actualizaciones del marco de referencia global en el cual son expresadas las soluciones semanales de las coordenadas de la red SIRGAS-CON⁴, también ocasionan desplazamientos que deben ser tenidos en cuenta.

Modelos de velocidades

Las coordenadas de un punto, sea su expresión cartesiana tridimensional o sea su expresión sobre una superficie de referencia o *datum*, como puede ser un elipsoide de revolución, siempre es referida a un SR determinado de antemano. En la actualidad, además de la definición de un SR global, que atiende a las tres dimensiones del espacio, es necesario agregar la dimensión tiempo y definir una escala para la misma.

3 SIRGAS, Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas: <http://www.sirgas.org/>

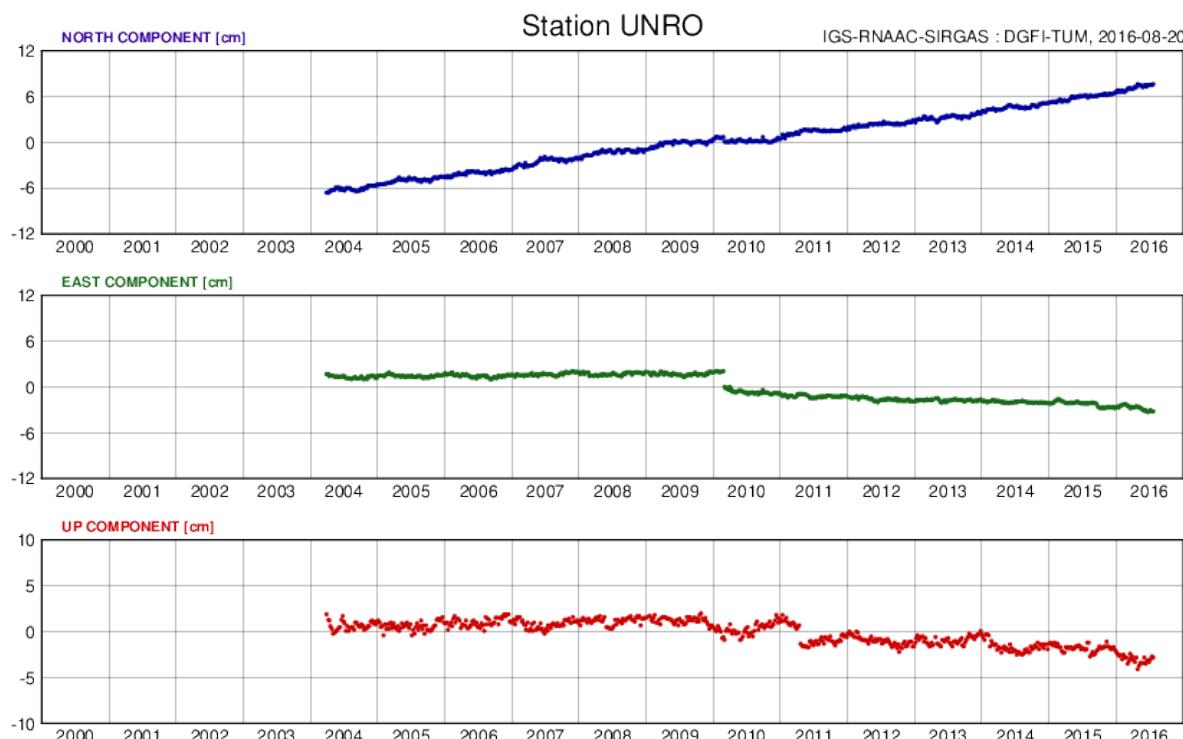
4 SIRGAS-CON, Red SIRGAS de operación continua: <http://www.sirgas.org/index.php?id=61>

El comienzo de la era satelital para las mediciones otorgó la posibilidad de medir constantemente las coordenadas de un mismo punto a través del tiempo, con lo que se conoce como Estación Permanente (EP), que no es más que un receptor GNSS de muy buena calidad, que opera en forma continua, recolectando datos de observación las 24 horas, todos los días. A partir del cálculo periódico (semanal) de las redes de EP, se observó con mayor minuciosidad algo que se intuía desde hacía mucho tiempo: los *puntos fijos* no son tales cuando se considera la dimensión tiempo. Esto es explicado por la creciente precisión del sistema de posicionamiento satelital.

La consecuencia inmediata es la noción de velocidad de cada punto del terreno. La cantidad de años acumulando observaciones a los satélites desde distintos puntos del planeta, ha permitido el modelado de las velocidades para cada porción del terreno, interpolando el comportamiento observado puntualmente de varias Estaciones Permanentes, para, por ejemplo, grillas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

Series de tiempo

Las llamadas series de tiempo son gráficas que muestran el desplazamiento de un sitio a través del tiempo, como resultado de la medición constante y el cálculo periódico. Son muy útiles para determinar visualmente y de manera muy sencilla el comportamiento de un determinado sitio.



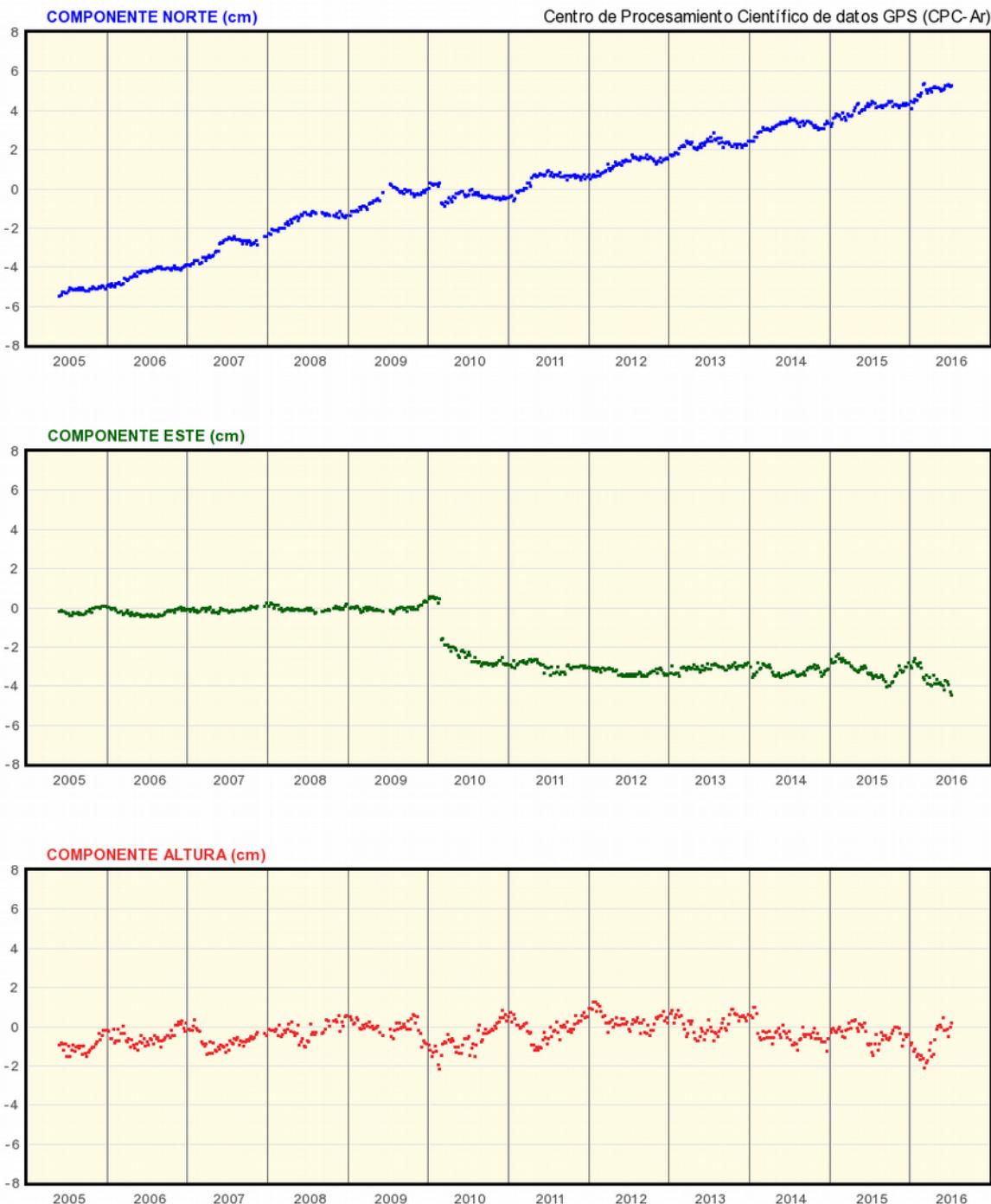
Gráfica 6: Series de tiempo de UNRO según el cálculo semanal de SIRGAS.

Por ejemplo, en las series de tiempo de la Estación Permanente UNRO⁵, calculadas por SIRGAS, permiten concluir rápidamente que el movimiento de la porción de terreno circundante a UNRO se desplaza hacia el Norte con un comportamiento constante y que en el sentido Este, permanecía invariable previo al terremoto de febrero de 2010 y que luego de él, se desplaza *muy lentamente* en sentido Oeste. La componente Altura muestra un comportamiento más irregular, debido a múltiples variables que exceden a este trabajo.

⁵ Estación Permanente UNRO, Facultad de Ingeniería, Ciencias Exactas y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario: <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/ep/unro>

Estación UNRO

Rosario, Santa Fe, Argentina



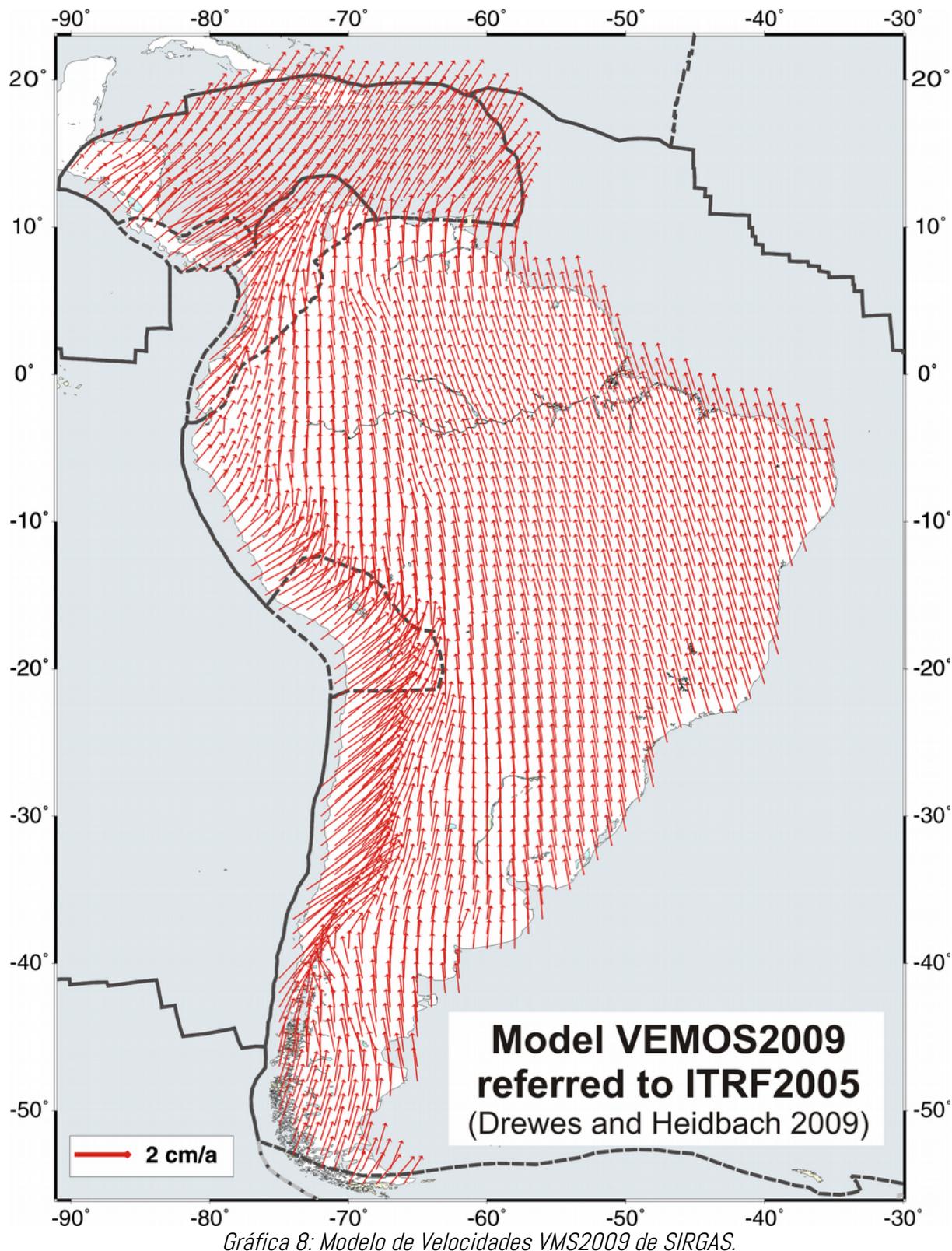
Gráfica 7: Series de tiempo de UNRO según el cálculo diario del CPC-Ar del IGN.

Si bien muestran residuos un tanto mayores, las gráficas calculadas por el CPC-Ar⁶ del IGN, en cierta forma, confirman lo revelado por SIRGAS, o se puede decir que se respaldan mutuamente.

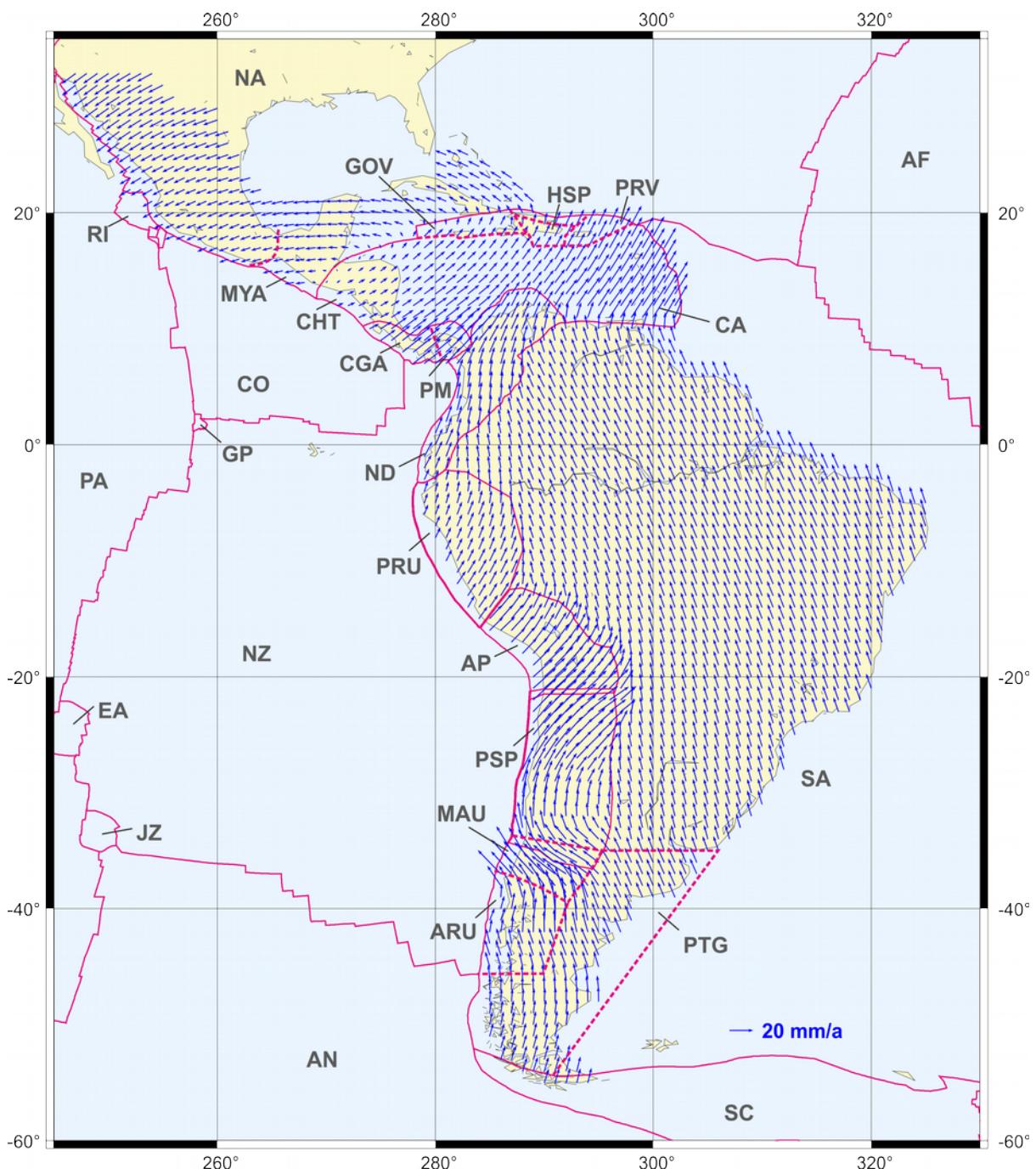
6 CPC-Ar, Centro de Procesamiento Científico de datos GPS, de Argentina: www.ign.gob.ar/content/introducción-1

VEMOS⁷ (SIRGAS)

Existen dos versiones del modelo de velocidades de SIRGAS. Ambos son utilizados en este trabajo dada la necesidad de aplicar correcciones a coordenadas actuales y referirlas a la época de definición de POSGAR07.



⁷ VEMOS, Velocity Model for SIRGAS: <http://www.sirgas.org/index.php?id=241>



Gráfica 9: Modelos de Velocidades VMS2015 de SIRGAS.

La reciente publicación del **Velocity Model for SIRGAS**, VEMOS2015 (Sánchez & Drewes, 2016) anunciada en el sitio de SIRGAS:

Un modelo de velocidades para SIRGAS (VEMOS2015) fue calculado a partir de mediciones GNSS (GPS+GLONASS) registradas después de los fuertes terremotos ocurridos en Chile y México en 2010. Este modelo se apoya exclusivamente en la solución multianual SIR15P01, la cual incluye 456 estaciones GNSS de operación continua y cubre el intervalo de tiempo entre marzo 14 de 2010 y abril 11 de 2015. VEMOS2015 se extiende desde 55°S, 110°W hasta 32°N, 35°W con una resolución espacial de 1° x 1°. La incertidumbre media de la predicción es ±0.6 mm/año en la dirección norte-sur y ±1.2 mm/año en la dirección este-oeste. La incertidumbre máxima es ±9 mm/año en la zona de deformación de Maule (Chile) y la mínima es ±0.1 mm/a en la

parte estable de la placa suramericana. VEMOS2015 está disponible en <https://doi-pangaea.de/10.1594/PANGAEA.863132>.

Era necesario contar con el sustento científico de un trabajo de esta magnitud para poder desarrollar la aplicación web que plantea este trabajo.

Pero además, también se hace uso del modelo VEMOS2009 (Drewes & Heidbach, 2012) ya *vencido*, para el traslado de coordenadas a la época 2006.632 de definición de POSGAR07, previa al terremoto de 2010:

VEMOS2015 es válido solamente para el periodo de marzo 2010 a abril de 2015. En las áreas de Chile y el oeste de Argentina, puede ser más apropiado el uso del modelo VEMOS2009 para el traslado de coordenadas en épocas anteriores al terremoto de 2010. VEMOS2009 fue calculado a partir de las coordenadas SIRGAS95 y SIRGAS2000, de las velocidades de las estaciones SIRGAS-CON determinadas por el IGS-RNAAC-SIR y de diferentes proyectos geodinámicos desarrollados en la región. La incertidumbre media de VEMOS2009 es aproximadamente 1.5 mm/año.

VEL-Ar⁸ (IGN Argentina)

Por su lado, el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la República Argentina desarrolló muy recientemente VEL-Ar, un modelo de velocidades para el territorio Argentino, calculado en base a su Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (RAMSAC). Incluso puso a disposición del usuario una *Calculadora online VEL-Ar*⁸.

En ese sentido, el Instituto Geográfico Nacional conjuntamente con las Universidades de Memphis (EEUU) y Ohio State (EEUU) han generado un modelo de velocidades denominado VEL-Ar que contempla las variaciones no lineales producidas por efectos post-sísmicos para el marco de referencia POSGAR 2007.

Este modelo es tan reciente, o al menos su publicación lo es, que no ha sido tenido en cuenta en este desarrollo, iniciado a mediados de 2013. En futuras versiones podría ser utilizado como alternativa de VEMOS2015.

Desplazamientos sísmicos

Una de las motivaciones del IGN para el cálculo de un modelo de velocidades fue el terremoto del 27 de febrero de 2010:

El día 27 de febrero de 2010 ocurrió un sismo con una magnitud de 8.8 en la región de Maule (República de Chile) que provocó un desplazamiento co-sísmico de la corteza terrestre entre las latitudes 28º S y 40º S, con valores superiores a los cinco metros en la zona del epicentro y de dos centímetros en la costa Atlántica. Como consecuencia de este sismo, las coordenadas de los puntos próximos al epicentro dejaron de evolucionar linealmente, comenzando a obedecer a un comportamiento sensiblemente logarítmico causado por la relajación viscoelástica de la corteza terrestre. La influencia de este fenómeno repercutió en forma diferencial a lo largo de todo el país de un modo inversamente proporcional a la distancia al epicentro, siendo en algunos sectores prácticamente imperceptible.

La deformación ocurrida a partir de este sismo invalidó los modelos de velocidades lineales utilizados hasta el momento, como por ejemplo el modelo VEMOS 2009

⁸ VEL-Ar, Modelo de Velocidades de Argentina: <http://www.ign.gob.ar/content/modelo-de-velocidades-vel-ar>

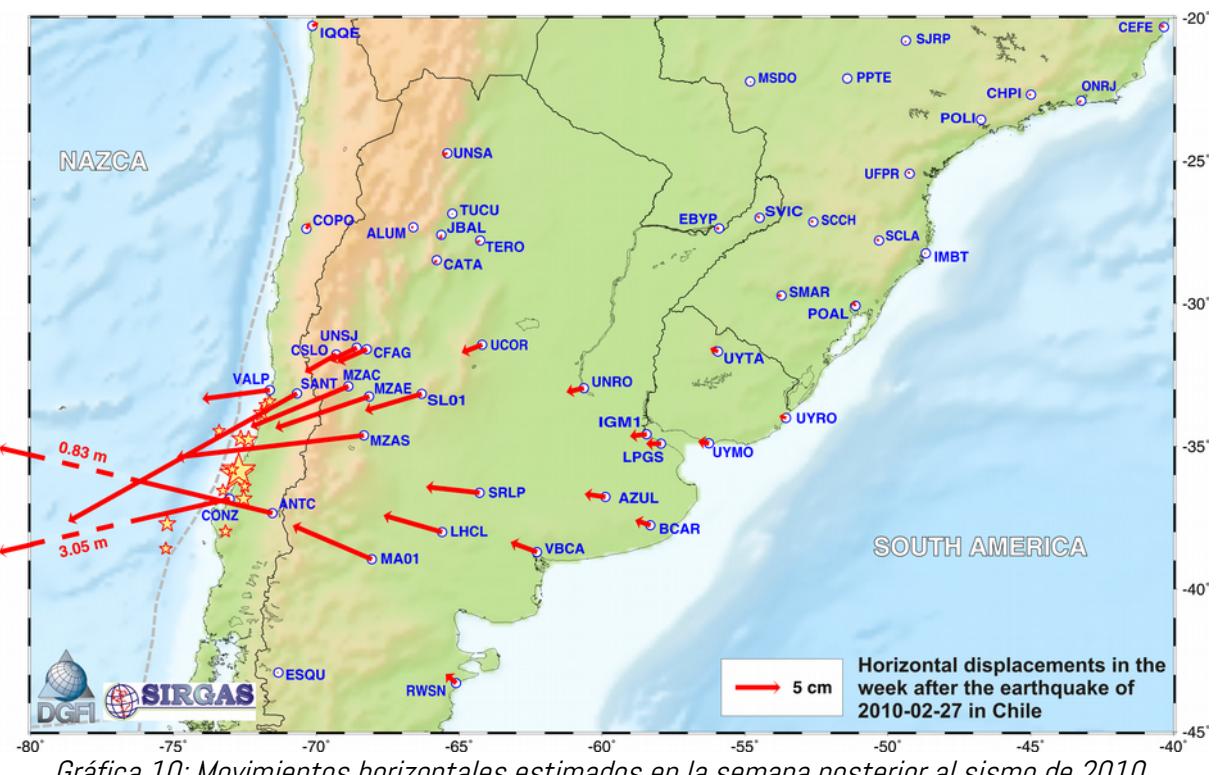
(Drewes & Heidbach, 2012) publicado por SIRGAS, y el uso de velocidades lineales para las estaciones GPS permanentes.

Lo que también motivó un trabajo (Sánchez, Seemüller & Drewes, 2010) publicado por SIRGAS.

Con el propósito de evaluar el impacto de este sismo en el marco de referencia SIRGAS, se calcularon posiciones diarias para una selección de estaciones SIRGAS-CON entre el 21 de febrero y el 6 de marzo de 2010. Este procesamiento incluyó como puntos fiduciales estaciones del marco de referencia global IGS05 ubicadas en América del Norte, Europa, África y Antártica.

Como resultado, se cuantifica el desplazamiento de varias EP de la red SIRGAS-CON. En particular, la diferencia entre las posiciones de UNRO para las semanas previa (1572, 24/02/2010) y posterior (1573, 03/03/2010) al sismo resultó ser en sus coordenadas Norte, Este y Altura, respectivamente de -7, -19 y -3 milímetros, según se observa en la Gráfica 10.

Los valores de este desplazamiento deben tenerse en cuenta para los propósitos de este trabajo, que es la corrección de coordenadas desde épocas actuales hasta la época 2006.632 de definición de POSGAR07. Pero como el terremoto afectó no solo instantáneamente, sino durante varios meses, desestabilizando las velocidades y ocasionando un cambio en su comportamiento lineal, el mejor criterio es el de calcular el salto en las series de tiempo entre dos épocas de velocidades estabilizadas. En este trabajo se toman las semanas 1567 y 1633. Esta última correspondiente a la época 2011.322, es decir, 27 de abril de 2011 al mediodía, fecha elegida con doble intención: asegurar una estabilidad en la evolución de las velocidades y ser posterior al cambio de marco de referencia global, que se verá a continuación.



Gráfica 10: Movimientos horizontales estimados en la semana posterior al sismo de 2010.

Cambios de marco

Las coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS-CON, base de los modelos de velocidades y fuente de información sobre el comportamiento del constante desplazamiento del continente,

son obtenidas de la combinación de las soluciones individuales proporcionadas por los Centros de Procesamiento SIRGAS.

Las coordenadas para las semanas previas al 16 de abril de 2011 (semana GPS 1631) se refieren al marco **IGS05⁹**, alineado a ITRF05. Desde 17 de abril de 2011 (semana GPS 1632) hasta el 6 de octubre de 2012 (semana GPS 1708) están dadas en el marco de referencia **IGS08**, alineado a ITRF08. A partir del 7 de octubre de 2012 (semana GPS 1709), las coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS-CON están dadas en el **IGb08**, cual es una actualización del anterior, IGS08.

El cambio de abril de 2011 (semana GPS 1632), de IGS05 a IGS08, generó un *pequeño salto* casi imperceptible en las series de tiempo de las EP, que puede ser cuantificado. Este valor debe ser aplicado como corrección, dado que la intención de la aplicación es transformar coordenadas de épocas actuales a una época anterior a este cambio de marco.

⁹ Cronología de los Marcos de Referencia IGS (International GNSS Service): <http://acc.igs.org/igs-frames.html>

La aplicación web

Origen, la *PPPCalc*

La idea original era la de utilizar los resultados del post-proceso PPP del servicio canadiense CSRS-PPP para corregirlos y expresarlas en el Marco de Referencia oficial Argentino, también adoptado por la provincia de Santa Fe. La intención era investigar tanto la calidad del método de posicionamiento puntual para obtener coordenadas, como la forma de referirlas a POSGAR07.

Para ello, un primer paso sería calcular los valores de dichas correcciones. No se contemplaban otros métodos de obtención de coordenadas con observaciones de un solo receptor, como los demás servicios de PPP o de posicionamiento diferencial, y no se contaba con un modelo de velocidades válido, dada la caducidad del comportamiento lineal reportado por VEMOS2009, provocada por el terremoto de Chile en febrero de 2010.

Evolución, versiones previas

En una primera instancia, en 2013, se utilizaron valores definidos empíricamente (Pagani, 2013) para las correcciones que se debían aplicar a las coordenadas calculadas con PPP. Se detectó para ese entonces que se debía diferenciar entre las componentes Este y Norte: la primera afectada por el sismo de 2010; la segunda afectada por el movimiento constante y casi lineal de las placas tectónicas en dirección Norte. En este caso no existía un modelo de velocidades de sustento científico vigente y no se podía utilizar para corregir directamente los valores del Modelo de Velocidades VEMOS 2009, cuya validez se había *vencido* en febrero de 2010 con el mencionado sismo.

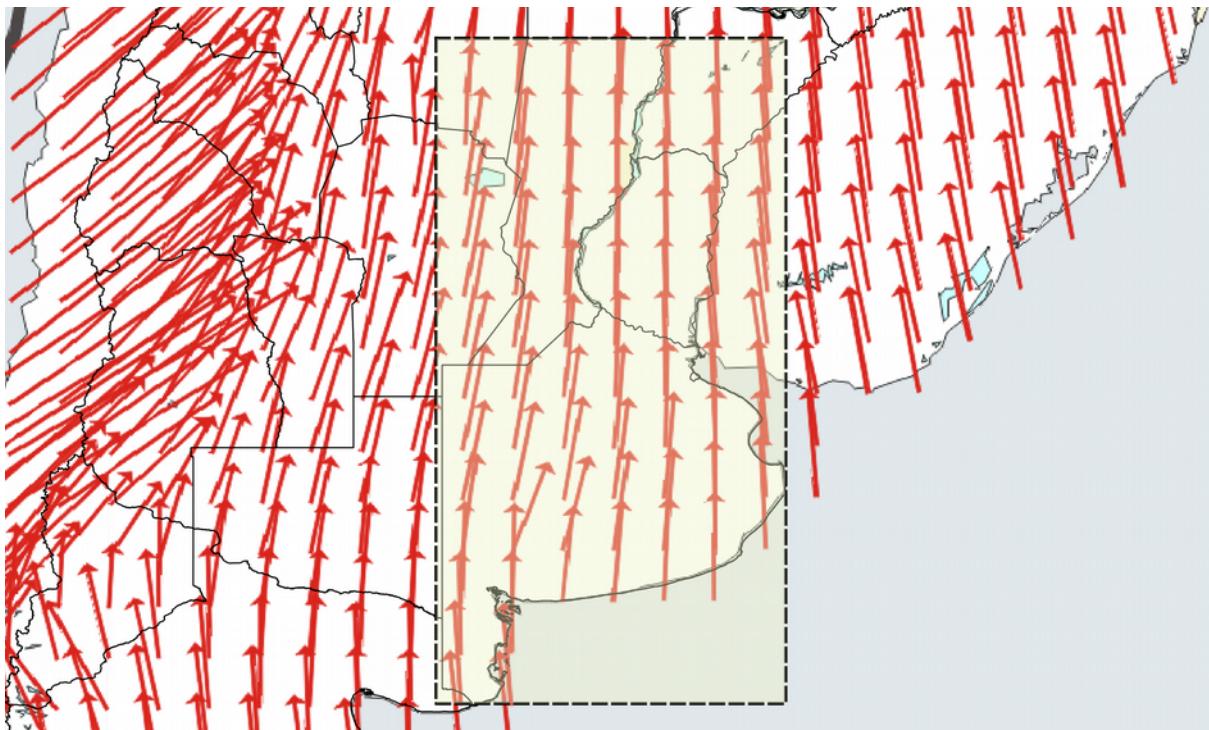
Entonces a partir de la experimentación realizada con observaciones de Estaciones Permanentes para los años 2012 a 2015, distribuidas en el territorio de la provincia de Buenos Aires y comparando con sus coordenadas oficiales POSGAR07, se definió lo siguiente:

- la coordenada Latitud se ve afectada de manera casi idéntica que como anticipaba VEMOS2009, o sea, se desplaza a velocidad constante hacia el Norte;
- la coordenada Longitud se ve afectada en mayor magnitud a medida que la misma disminuye, es decir, hacia el Oeste.

Por lo tanto, se definen una corrección dependiente del tiempo en la coordenada Latitud (1,1 cm por año, con validez 2012-2015) y tres fajas de extensión Norte-Sur con distintas magnitudes de corrección en la coordenada Longitud, mayor hacia el Oeste, menor hacia el Este, según los valores calculados empíricamente (Pagani, 2013).

La evolución inmediata se plantea en llevar esta solución a una aplicación web, llamada *Calculadora PPP¹⁰* o *PPPCalc* (cuya primera versión se publicó el 18 de septiembre de 2014). Pero además, para que tuviera mayor sentido, se extiende tanto la zona como el período de validez de los valores de corrección, fundamentada por experimentación realizada (Cornaglia, 2014) con datos de las Estaciones Permanentes de la zona y período añadidos. La zona de validez (ver Gráfica 11) incorpora entonces a toda la extensión de las provincias de Santa Fe y Entre Ríos y el Este de la provincia de Córdoba, donde el modelo de velocidades es homogéneo y el efecto del sismo de Chile de 2010 no altera demasiado considerablemente su comportamiento en los años subsiguientes, según los cálculos. Luego se añaden los años 2016 y 2017.

¹⁰ Calculadora PPP: <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/pppcalc/>. Se pueden revisar todas las versiones previas.



Gráfica 11: Zona de validez de la PPPCalc con velocidades homogéneas según VMS2009.

Más específicamente, la corrección es aplicable en el período que abarca desde 2012 a 2017, en la zona comprendida por:

- Latitudes entre 28° S y 41° S
- Longitudes:
 - Faja 1: 59° 15' 0 y 56° 40' 0
 - Faja 2: 61° 30' 0 y 59° 15' 0
 - Faja 3: 63° 30' 0 y 61° 30' 0

Es decir, abarca los territorios de:

- Provincia de Buenos Aires
- Provincia de Entre Ríos
- Provincia de Santa Fe
- Este de la Provincia de Córdoba

Las primeras versiones de la aplicación no aceptaban el ingreso de coordenadas fuera de la *zona de validez*. Esa decisión de diseño no permitía efectuar pruebas con la *Calculadora*, o la comprobación de la calidad de las *correcciones* en comparación con coordenadas conocidas, por ejemplo. Por tal motivo se decidió, en las versiones siguientes, delegar al usuario esa responsabilidad, permitiendo el ingreso de coordenadas sin restricciones, a riesgo de obtener resultados de menor calidad si se utiliza en regiones “inestables”.

En 2016, ya contando con el modelo de velocidades VMS2015, cuya validez cubre un período de cinco años entre 2010-03-14 y 2015-04-11, se tiene la fundamentación científica para la siguiente versión de la aplicación, siguiendo su línea evolutiva de la manera que nos indica dicho modelo de velocidades. Si bien la *validez oficial* del modelo llega hasta mediados de 2015, en zonas donde



Gráfica 12: Fajas para la corrección de la Longitud.

no haya afectado un evento sísmico de manera considerable (cuestión detectable rápidamente por el recálculo semanal de la red SIRGAS-CON) puede seguir aplicándose. Más adelante, en *Casos de prueba*, se verá en qué zonas se detecta inestabilidad y en qué regiones el modelo sigue *valiendo*.

Actualidad, versión 1.0

Se trata entonces de que la aplicación web ofrezca las correcciones necesarias basadas en la información brindada por el modelo de velocidades VEMOS 2015, los cálculos de desplazamientos ocasionados por el sismo de febrero de 2010, el cambio de marco de referencia de IGS05 a IGS08 en abril de 2011 y el modelo de velocidades VEMOS2009.

Con esto, en la actualidad, la aplicación tomó la forma de un

Programa para transformar coordenadas ITRF08 (épocas posteriores a 2011.322) a POSGAR07 (ITRF05, época 2006.632), preferentemente aplicable en zonas ubicadas hacia el Este de nuestro país o en zonas de baja o nula acción sísmica.

Se pueden dividir a las distintas *correcciones* que realiza la aplicación según etapas o segmentos de tiempo, a saber:

- **desde la época de las observaciones hasta 2011.322**, se aplica VEMOS2015¹¹ en sentido contrario y
- **desde 2011.322 hasta 2006.632**, época de definición de POSGAR07, se aplica, como una corrección fija, la suma¹² de las siguientes:
 - el cambio de marco, a la inversa, es decir, de IGS08 a IGS05, para la época 2011.290 (16 de abril de 2011, semana GPS 1631);
 - el efecto del sismo de feb. 2010, calculado como un *salto* en sentido contrario entre dos épocas de velocidades consideradas *estables*, las épocas 2011.322 y 2010.056, correspondientes a las fechas 27 de abril de 2011 y 20 de enero de 2010, o a las semanas GPS 1633 y 1567;
 - VEMOS2009, en sentido contrario, desde 2010.056 hasta 2006.632 (semana GPS 1388).

La forma de implementar las operaciones fue a través de matrices de dos dimensiones, Latitud y Longitud, que emulan a la grilla de $1^\circ \times 1^\circ$ sobre la cual fueron presentados los modelos de velocidades, y que almacenan las correcciones expresadas en metros, con lo cual, para transformarlas a grados sexagesimales (o segundos), se calculan a lo largo de arcos de meridiano o paralelo correspondientes a la Latitud local. Todo esto en un simple script en JavaScript¹³.

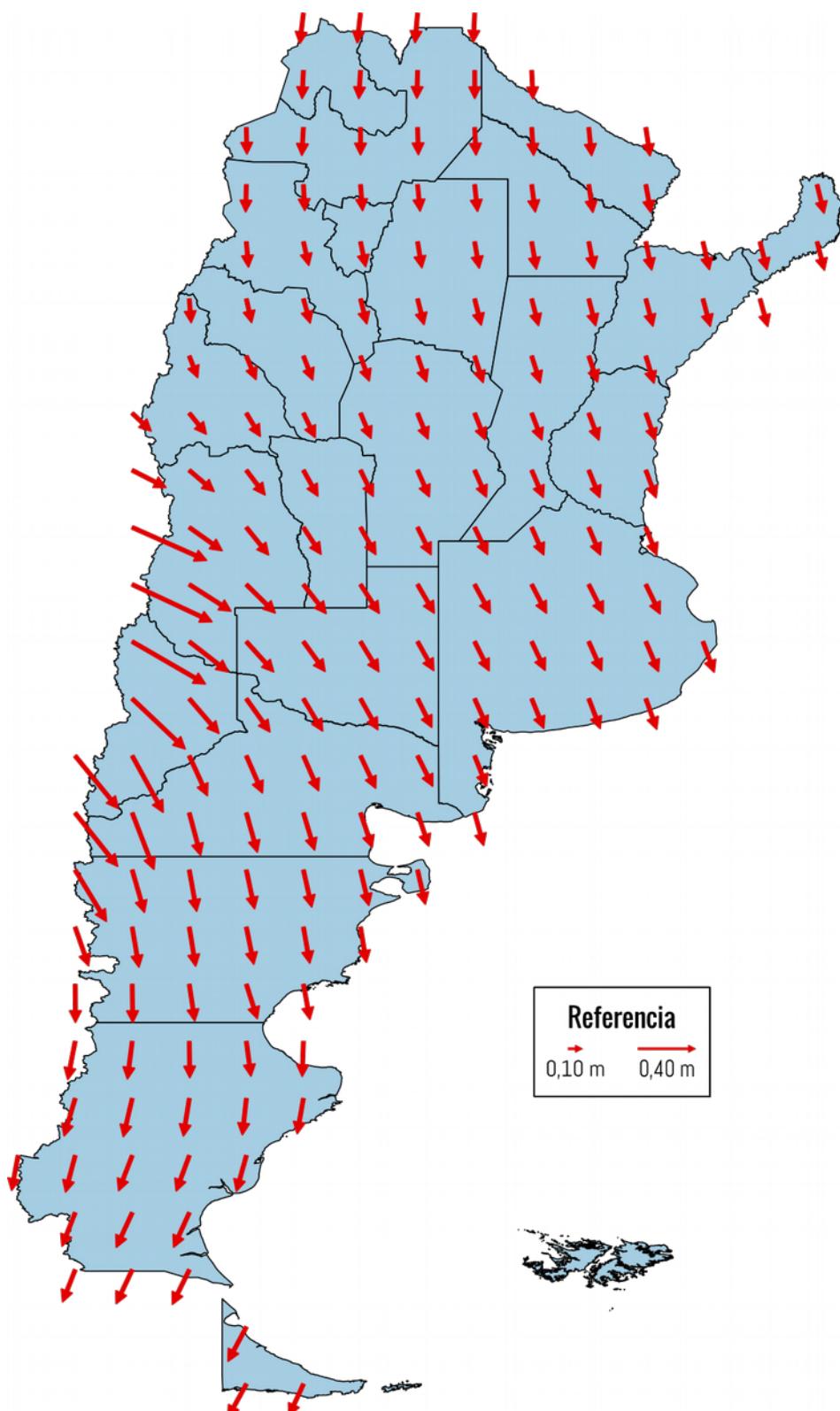
Las *correcciones por saltos* (cambio de MR y terremoto 2010) fueron calculadas tomando coordenadas de EP comunes entre RAMSAC y SIRGAS-CON para las mencionadas semanas (previa y posterior) a cada salto. Con esos puntos de referencia se calculó una grilla de $1^\circ \times 1^\circ$ por el método de interpolación por triángulos. Luego estas matrices, sumadas a la compuesta por VEMOS2009, forman una corrección fija desde 2011.322 hasta 2006.632.

Esta decisión de implementación del programa impone un límite de tiempo para las coordenadas que se pueden ingresar: la aplicación no aceptará coordenadas cuya época de observación sea previa a 2011.322, o sea, anterior al 27 de abril de 2011.

11 VEMOS2015: <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/calc/src/js/vms2015.js>

12 Suma de sismo+cambio de marco+VEMOS2009: <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/calc/src/js/sumBL.js>

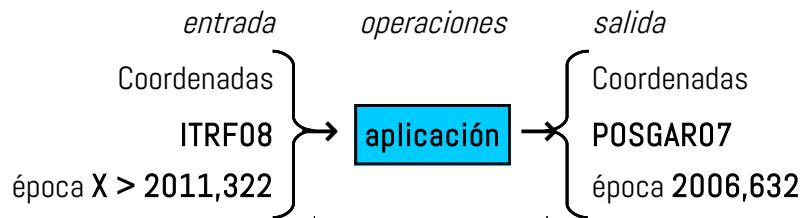
13 Código fuente JavaScript de la *Calculadora*: <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/calc/src/js/toPOSGAR07.js>



Gráfica 13: Correcciones calculadas para 10 años (para la época 2016,668).

Por otra parte, la decisión de diseño matricial para emular grillas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ le otorga a la aplicación la habilidad de incorporar fácilmente nuevas correcciones localizadas, para cualquier sector del territorio, ya sea porque fue afectado por un sismo, o porque en una determinada provincia o país se utiliza otro MR u otra época. La característica de cargar modelos de corrección propios de un usuario, será seguramente el objetivo de futuras versiones.

Así planteada la situación, la aplicación desarrollada, hace lo siguiente:



El sentido de las flechas de la Gráfica 13 es el opuesto a la suma de los vectores de los modelos de velocidades (Gráfica 8 y Gráfica 9) y el desplazamiento ocasionado por el sismo de Chile de 2010 (Gráfica 10).

La magnitud de las deformaciones para la zona de las provincias de Santa Fe, Buenos Aires, Entre Ríos y el Este de Córdoba, ronda los 12 a 14 cm para la época 2016.6, es decir, 10 años después de la época de definición de POSGAR07. Fuera de esa zona, sobre todo hacia el Oeste, los desplazamientos escapan a los modelados, mayormente por la constante acción sísmica, con lo cual, no conviene quedarse sólo con estas correcciones.

Acceso a la *Calculadora*

Debido a estos cambios sustanciales, la nueva versión de la *Calculadora* es accesible bajo la dirección web <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/calc>, o ingresando en la solapa *Software* y a través de su enlace en la sección *Software producido por el GGSR* dentro del sitio del Grupo de Geodesia Satelital de Rosario (GGSR).

Calculadora ITRF08 → POSGAR07: <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/calc>

La captura de pantalla muestra la interfaz web de la calculadora. En la parte superior, hay un menú con enlaces a GGSR, Proyectos, Cursos, Extensión, Publicaciones, Software y Contacto, así como un enlace a "Código fuente".

El contenido principal es la "Calculadora ITRF08 → POSGAR07 – versión 1.0". Se pide ingresar las coordenadas ITRF08 y la época de medición. Los campos son "Latitud,Longitud" (-32.95935194,-60.62842564) y "Fecha de medición" (dd/mm/aaaa). Hay botones para "Restablecer" y "Corregir". A la derecha, hay un mapa regional que incluye Argentina, Uruguay y partes de Brasil y Chile, con marcadores para Santiago, Montevideo y Buenos Aires.

En la parte inferior, se incluyen los créditos: "Universidad Nacional de Rosario || Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura || Escuela de Agrimensura || Departamento de Geotopocartografía" y "Contenidos © 2016 GGSR - Empoderado por Nikola".

Gráfica 14: Aspecto actual de la *Calculadora*.

Por razones de *compatibilidad* con anteriores trabajos y publicaciones (Noguera & al., 2016), también siguen disponibles las versiones precedentes de la calculadora en <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/pppcalc>.

Líneas de trabajo a futuro

- Continuar la experimentación respecto de la calidad obtenida.
- Realizar experimentación y validación para GPS simple frecuencia.
- Capacidad de cargar archivos con modelos de correcciones locales.
- Incorporarlo *oficialmente*: Contactar a NRCan y a SCIT.
- Resultados compatibles con otros Marcos de Referencia:
 - Arrojar resultados compatibles con otros MR para países de SIRGAS.
- Procesamiento masivo y/o procesamiento de archivos de reportes de los servicios.

Casos de prueba

Exactitudes de la aplicación web desarrollada

Asegurada ya la calidad centimétrica, por distintos trabajos ya citados, tanto en exactitud como en precisión o confiabilidad interna para archivos estáticos, doble frecuencia y sesiones mayores a 2 horas, se quiere comprobar ahora que las operaciones que realiza la aplicación web desarrollada no empeoran esa calidad.

Una forma de verificar la calidad de los resultados de la *Calculadora*, es darle como entrada coordenadas resultantes de las soluciones semanales SIRGAS, que están expresadas en el MR de los satélites, es decir IGb08, o lo que es lo mismo, ITRF08.

Se seleccionan entonces EP de la red SIRGAS-CON que también tienen coordenadas oficiales en POSGAR07, distribuidas en todo el país (Gráfica 17), para corroborar la validez de las correcciones.

La selección fue hecha en base al mapa publicado por SIRGAS con los desplazamientos provocados por el terremoto de Chile, Gráfica 10. Se eligieron EP que estuvieran funcionando desde antes de esa fecha, 27 de febrero de 2010. A saber:

ALUM	Minera Alumbrera, Catamarca	AZUL	Azul, Buenos Aires
BCAR	Balcarce, Buenos Aires	CATA	San Fernando del Valle de Catamarca
EBYP	Posadas, Misiones	ESQU	Esquel, Chubut
IGM1	Ciudad Autónoma de Buenos Aires	LHCL	Parque Nacional Lihué Calel, La Pampa
LPGS	La Plata, Buenos Aires	MA01	Neuquén, Neuquén
MZAC	Mendoza, Mendoza	RWSN	Rawson, Chubut
SL01	San Luis, San Luis	SRLP	Santa Rosa, La Pampa
TUCU	San Miguel de Tucumán, Tucumán	UCOR	Univ. Nac. de Córdoba, Córdoba
UNRO	Univ. Nac. de Rosario, Santa Fe	UNSA	Univ. Nac. de Salta, Salta
UYTA	Termas del Arapéy, Salto, Uruguay	VBCA	Bahía Blanca, suroeste de Bs. As.

Pero además, se incluyeron algunas EP que comenzaron a funcionar posteriormente a la fecha del sismo, cuyas coordenadas oficiales POSGAR07 son una extrapolación y fueron calculadas por IGN teniendo en cuenta el desplazamiento ocasionado por el terremoto de 2010. Se listan a continuación:

CORD	Falda del Carmen, Córdoba	GUAY	Villaguay, Entre Ríos
MPL2	Mar del Plata, sureste de Bs. As.	NESA	General Conesa, Río Negro
PEJO	Pehuajó, centro de Bs. As.	PRNA	Paraná, Entre Ríos
RECO	Reconquista, norte de Santa Fe	UYPA	Paysandú, Paysandú, Uruguay
UYSO	Mercedes, Soriano, Uruguay	UYTD	Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay

Prueba automatizada

Para automatizar esta prueba, se realizan scripts bash y python a medida¹⁴ que se encargan de:

- la descarga de datos desde la página de SIRGAS (coordenadas SIRGAS-CON para las semanas 1640, 1650, 1660, ..., 1890, 1900 y 1909 y para las EP listadas en la Gráfica 15),
- las conversiones previas de las coordenadas, de cartesianas geocéntricas a geodésicas,
- la aplicación de las correcciones, es decir, la transformación a POSGAR07,

14 Scripts y archivos utilizados: <https://github.com/quijot/calc-test>

- el cálculo de desvíos en cada componente, Latitud y Longitud,
- confeccionar la gráfica de desvíos y ellipse de confianza (99%) para cada EP y
- confeccionar gráficas con EP cuyos valores de $3\sigma < 5 \text{ cm}$ y $3\sigma > 5 \text{ cm}$.

Se descargaron en total 685 registros¹⁵, entre todas las EP, cada entrada contiene los desvíos en cada componente, entre las coordenadas SIRGAS-CON, semana X, *corregidas* o transformadas a POSGAR07 y las coordenadas oficiales POSGAR07 de las Estaciones Permanentes listadas.

Dado que se descargaron las soluciones de 28 semanas y dado que se eligieron 30 EP, la cantidad de registros de la planilla final debió haber sido 840. La explicación de que fueran finalmente 685, es que para algunas semanas, las soluciones de algunas de las EP no fueron calculadas, lo que puede haber sido porque la misma no haya estaba aún en funcionamiento o porque los datos que recolectó para esa semana, hayan sido insuficientes.

Como se ve en la siguiente planilla, por ejemplo, para la semana 1640 (15/06/2011) sólo figuran las coordenadas de 21 EP sobre un total de 30 seleccionadas.

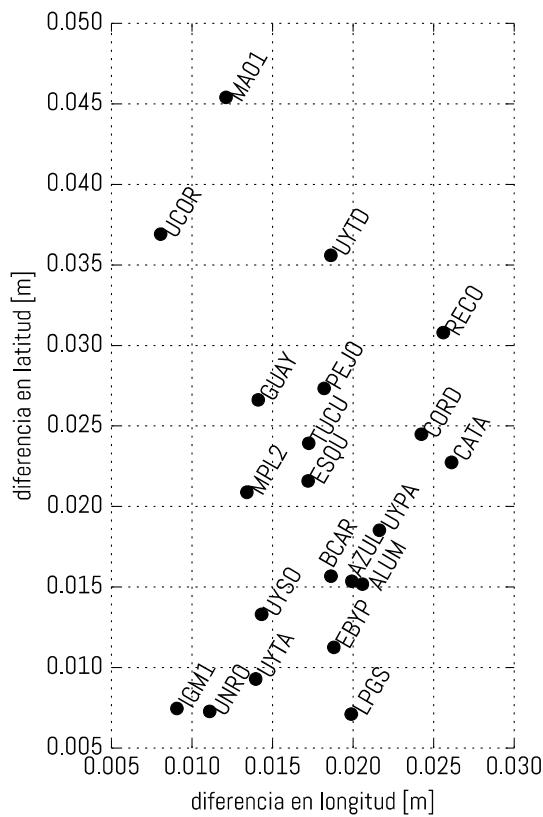
La planilla resultante se ve así:

	ep	d_lat [m]	d_lon [m]	fecha [yyyy-mm-dd]
/	ALUM	-0.000	0.003	2011-06-15
	AZUL	0.003	-0.009	2011-06-15
	BCAR	-0.008	-0.009	2011-06-15
	CATA	-0.001	-0.006	2011-06-15
	EBYP	-0.006	-0.007	2011-06-15
	ESQU	-0.001	-0.013	2011-06-15
	IGM1	0.002	-0.005	2011-06-15
	LHCL	-0.002	-0.009	2011-06-15
semana	LPGS	0.001	-0.003	2011-06-15
1640	MZAC	0.008	0.015	2011-06-15
	RWSN	-0.005	-0.009	2011-06-15
21 registros	SL01	-0.078	-0.032	2011-06-15
faltan 9 EP	SRLP	-0.000	-0.018	2011-06-15
	TUCU	-0.004	-0.001	2011-06-15
	UCOR	-0.001	-0.015	2011-06-15
	UNRO	0.000	-0.002	2011-06-15
	UNSA	-0.002	-0.023	2011-06-15
	UYTA	0.001	-0.004	2011-06-15
	VBCA	0.004	-0.020	2011-06-15
	UYPA	0.000	-0.003	2011-06-15
\	UYSO	0.002	0.002	2011-06-15
664 registros más...				

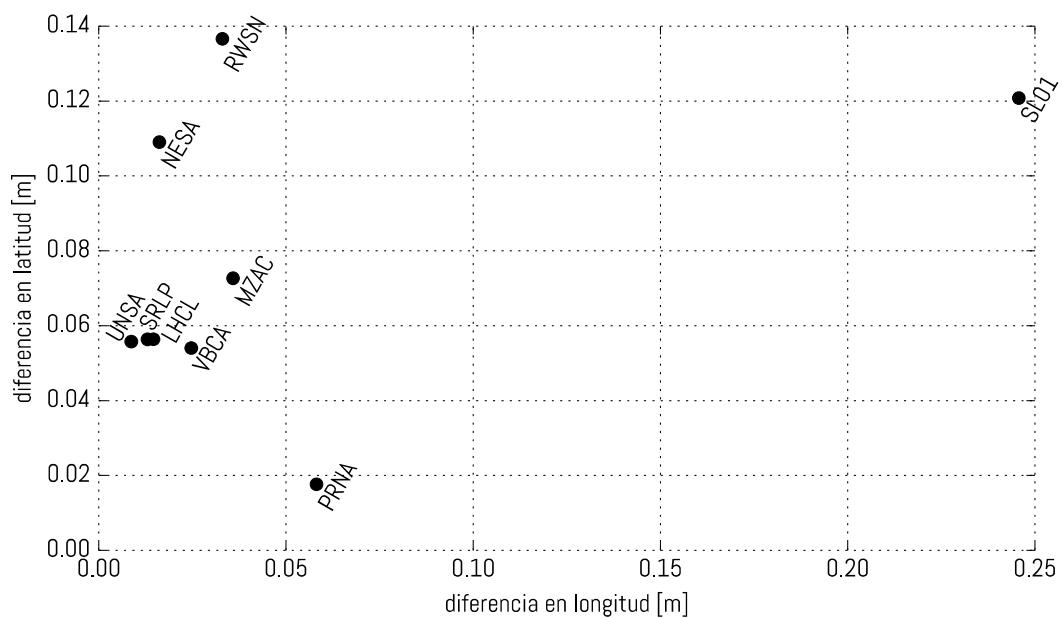
De todos los devíos o errores entre las coordenadas *corregidas* y las *verdaderas* u oficiales, se calcularon los desvíos estandar y en base a ellos, las elipses de 99% de confianza.

Los resultados de esta prueba son bastante concluyentes respecto de cómo funciona la *Calculadora* en las distintas zonas del país y se puede utilizar como una guía a la hora de utilizarla.

15 Planillas con todos los desvíos: https://github.com/quijot/calc-test/blob/master/desvios/_ALL.tsv



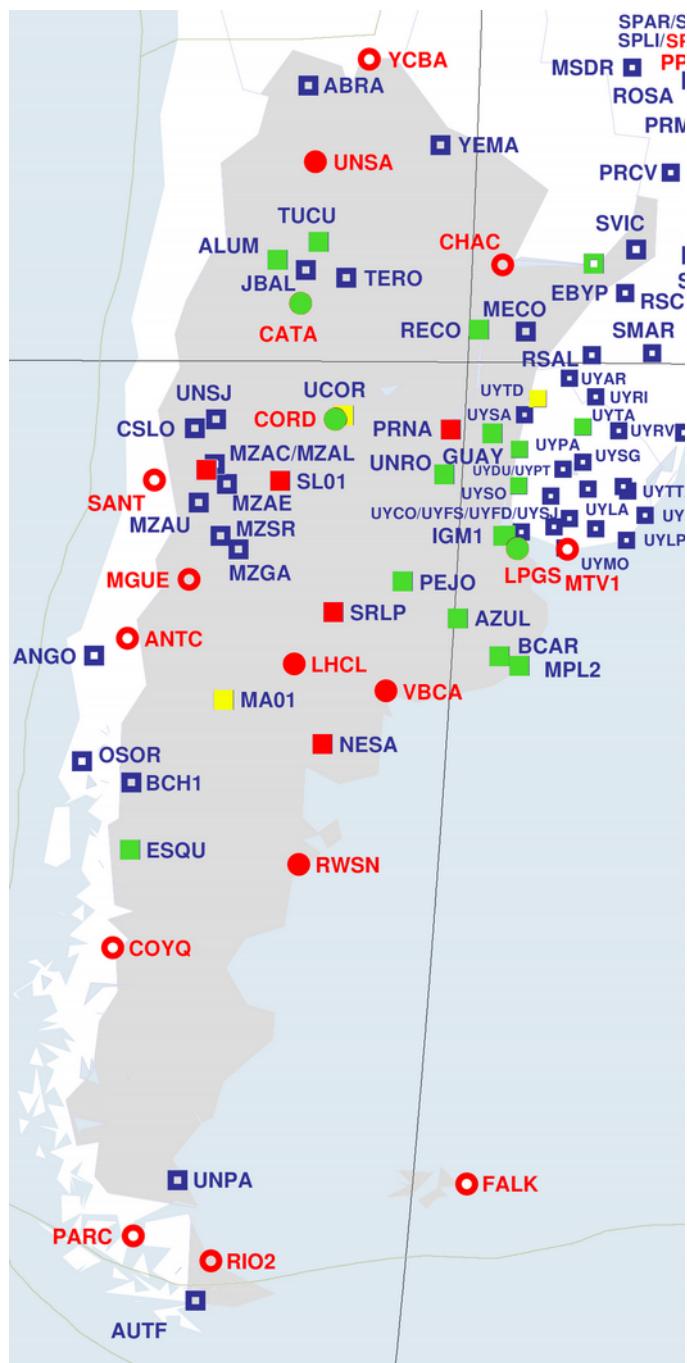
Gráfica 15: EP con ambos ejes de elipse de confianza menores que 5 cm.



Gráfica 16: EP con algún eje de elipse de confianza mayor que 5 cm.

ep	99% d_lat [cm]	99% d_lon [cm]
ALUM	1.5	2.0
AZUL	1.5	2.0
BCAR	1.6	1.8
CATA	2.3	2.6
CORD	2.4	2.4
EBYP	1.1	1.9
ESQU	2.1	1.7
GUAY	2.6	1.4
IGM1	0.7	0.9
LHCL	5.6	1.4
LPGS	0.7	2.0
MA01	4.5	1.2
MPL2	2.1	1.3
MZAC	7.2	3.6
NESA	10.8	1.6
PEJO	2.7	1.8
PRNA	1.7	5.7
RECO	2.9	2.4
RWSN	13.4	3.2
SL01	12.0	24.3
SRLP	5.6	1.3
TUCU	2.4	1.7
UCOR	3.7	0.8
UNRO	0.7	1.1
UNSA	5.5	0.9
UYPA	1.8	2.1
UYSO	1.3	1.4
UYTA	0.9	1.4
UYTD	3.6	1.9
VBCA	5.4	2.4

En la Gráfica 17 se ven: en rojo las EP con valores de 3σ mayores a 5 cm; en amarillo, valores entre 3 y 5 cm y en verde, valores menores a 3 cm.



Gráfica 17: EP procesadas con la Calculadora.

Gráficas de dispersión de los desvíos de cada Estación Permanente

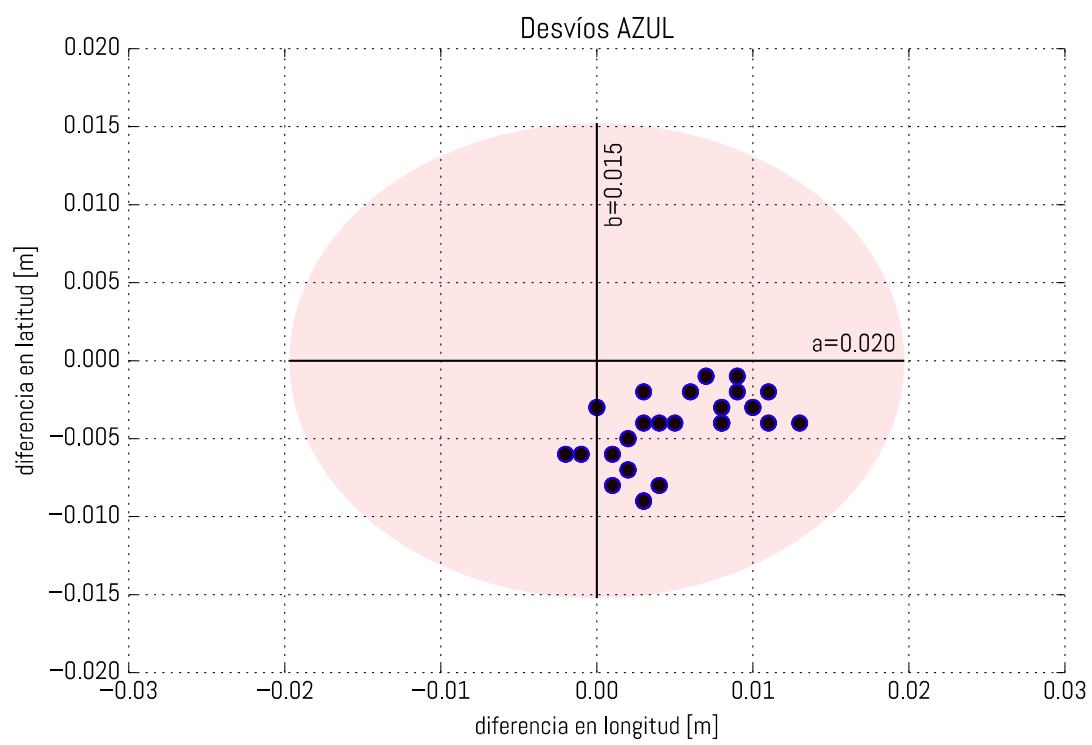
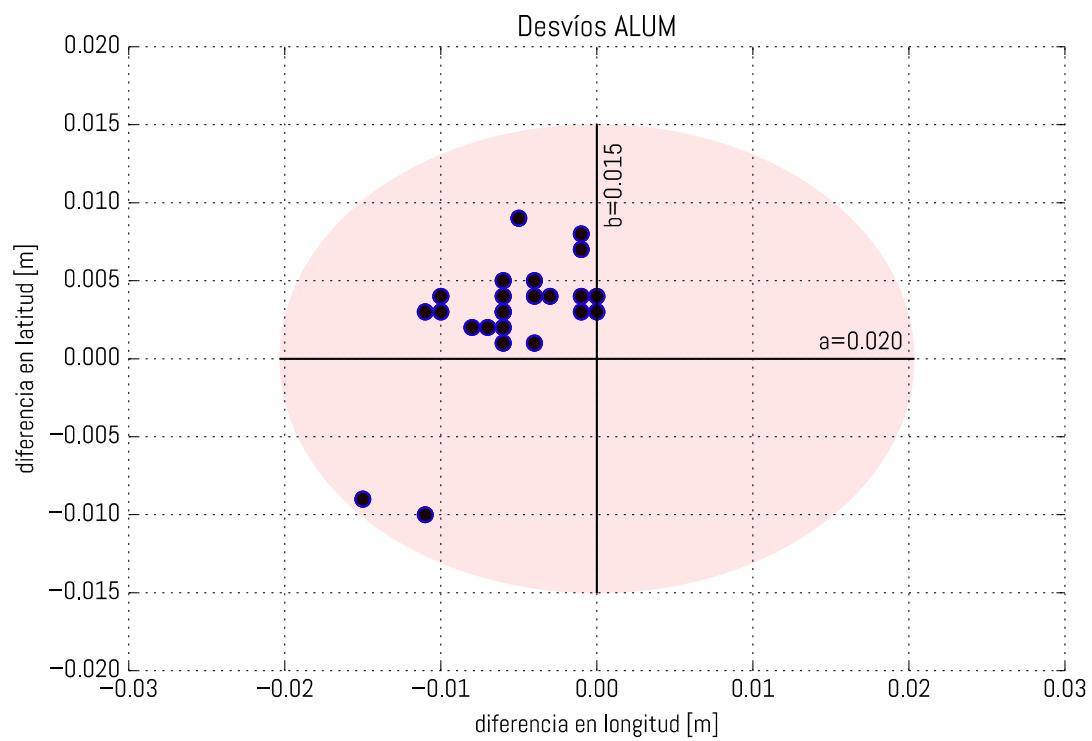
A continuación se imprimen las gráficas con las dispersiones de los desvíos entre las coordenadas SIRGAS corregidas por la *Calculadora* y las coordenadas *verdaderas*, las oficiales según de POS-GAR07. Además en la misma gráfica, se muestra la elipse de confianza del 99%, cuyos ejes son los valores de 3σ en las coordenadas Latitud y Longitud.

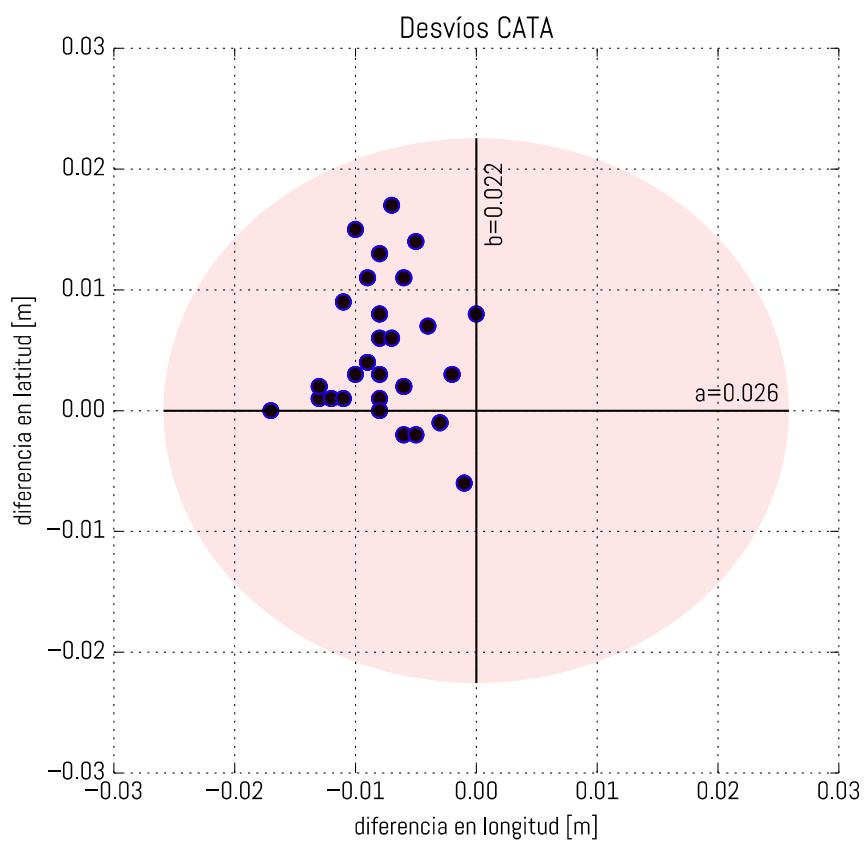
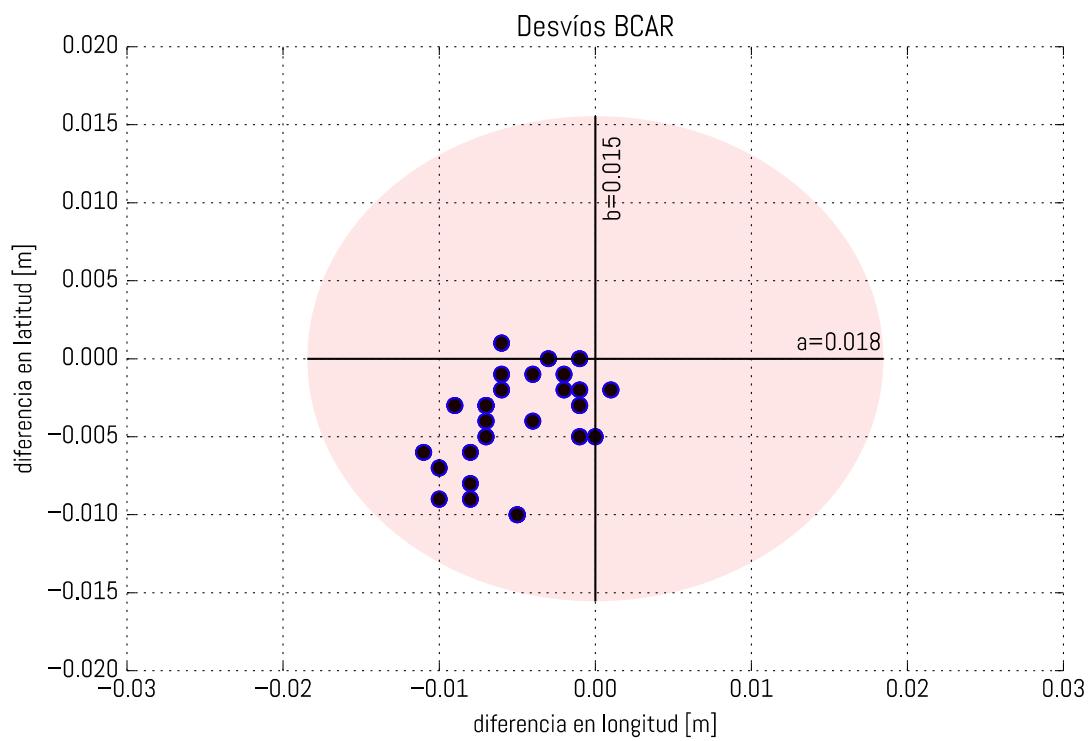
Se observan saltos en la sucesión de desvíos de las EP de Córdoba¹⁶, Mendoza¹⁷ y San Luis¹⁸ a partir de noviembre de 2015, que pueden corresponder a desplazamientos sísmicos.

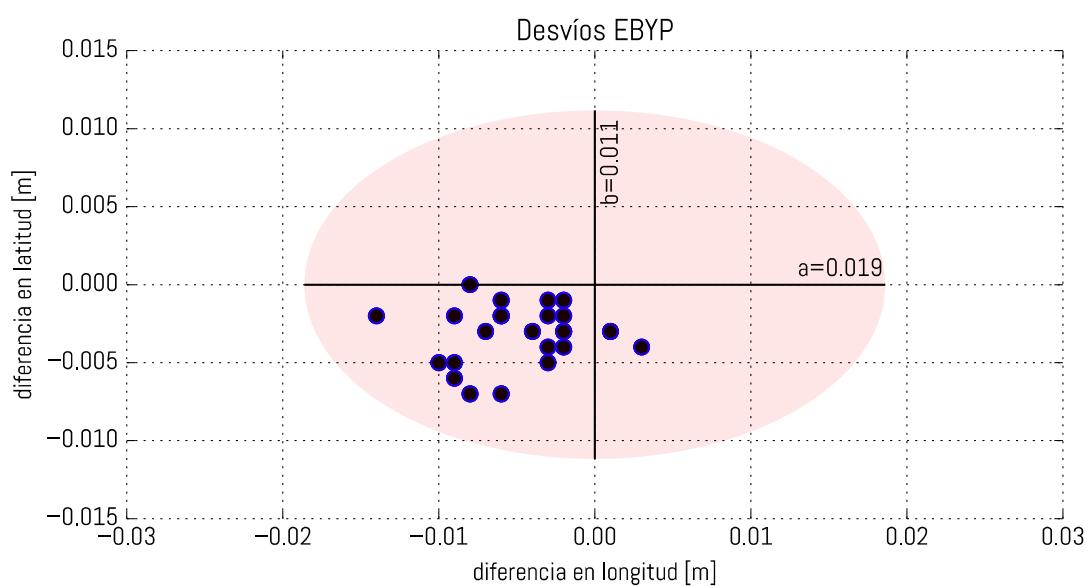
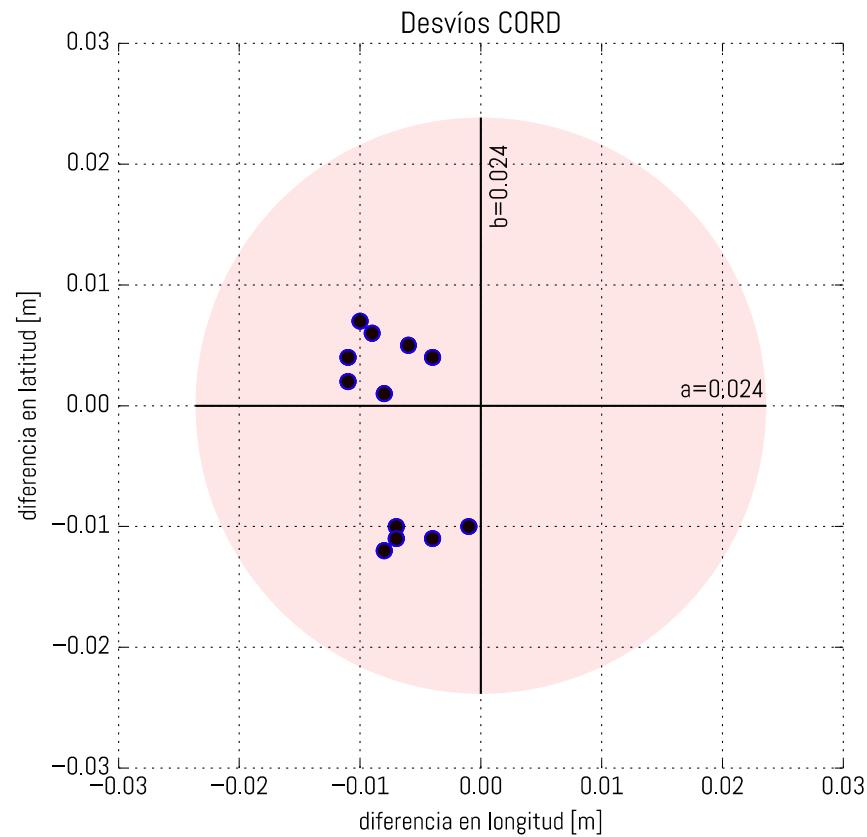
¹⁶ UCOR y CORD: <https://github.com/quijot/calc-test/blob/master/desvios/UCOR.tsv>, <https://github.com/quijot/calc-test/blob/master/desvios/CORD.tsv>

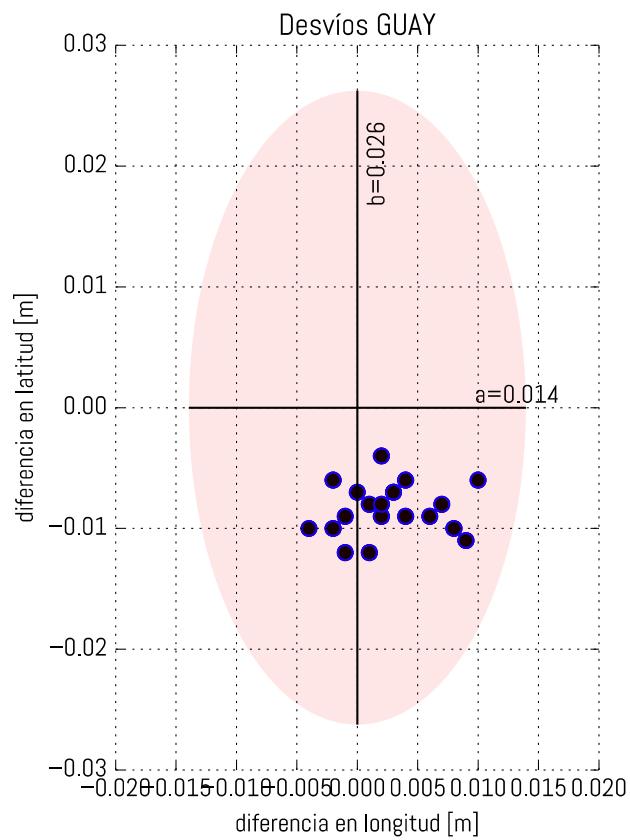
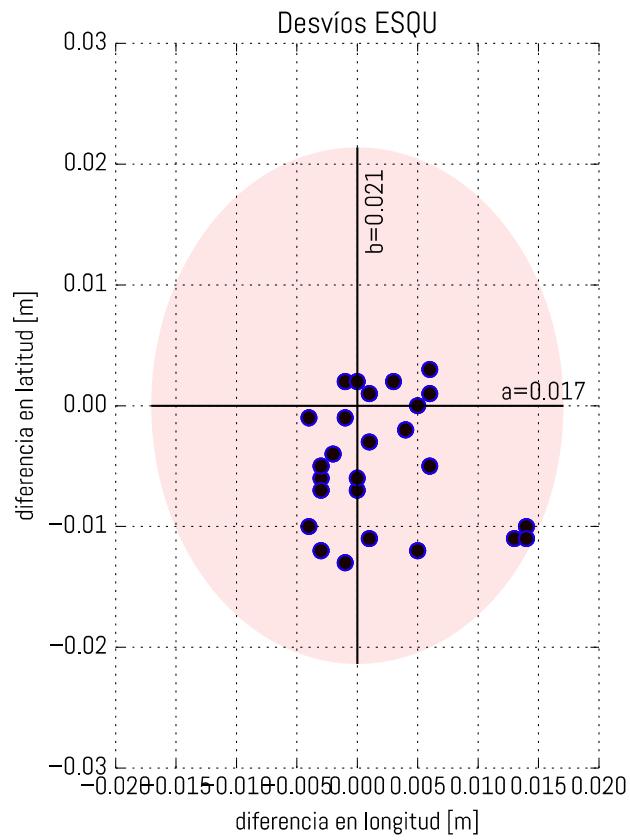
¹⁷ MZAC: <https://github.com/quijot/calc-test/blob/master/desvios/MZAC.tsv>

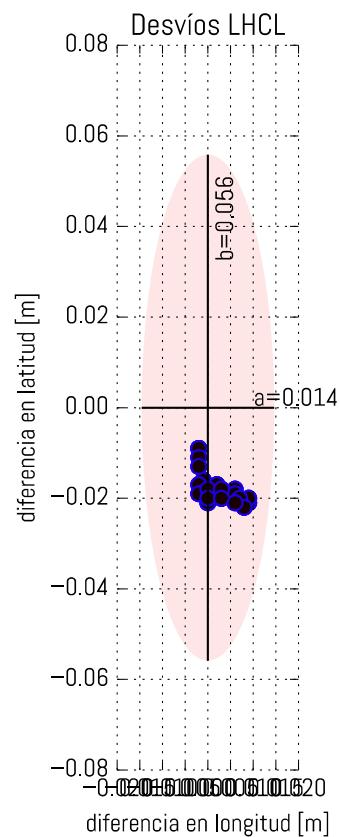
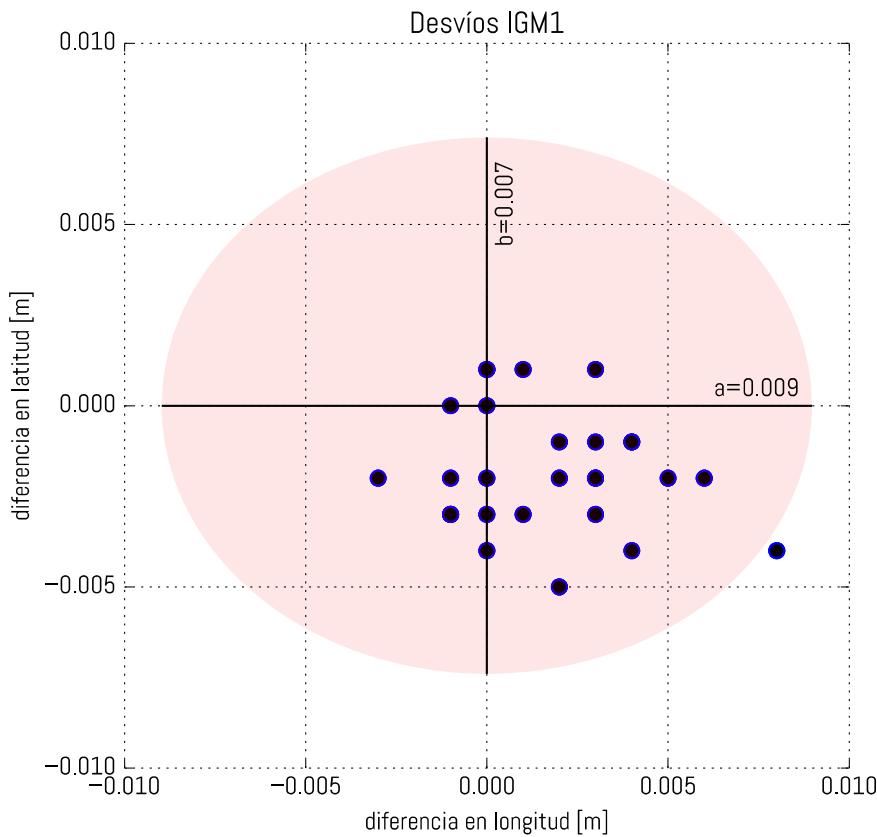
¹⁸ SL01: <https://github.com/quijot/calc-test/blob/master/desvios/SL01.tsv>

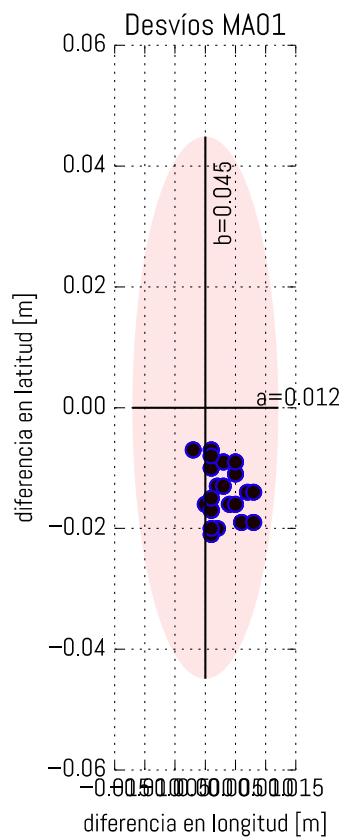
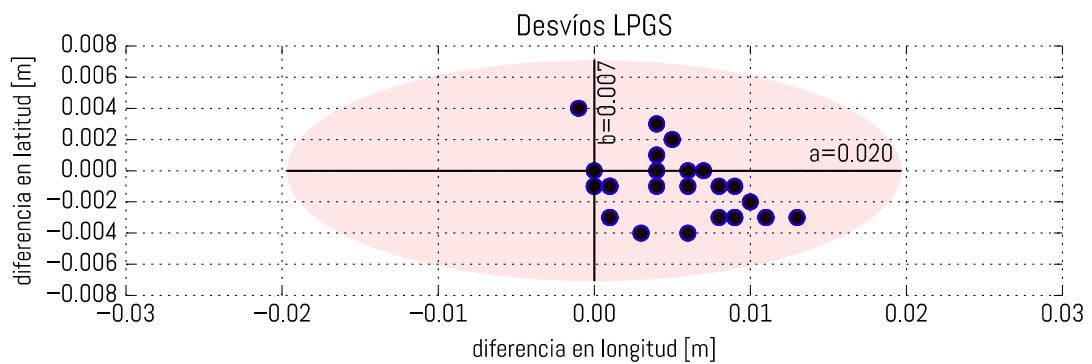


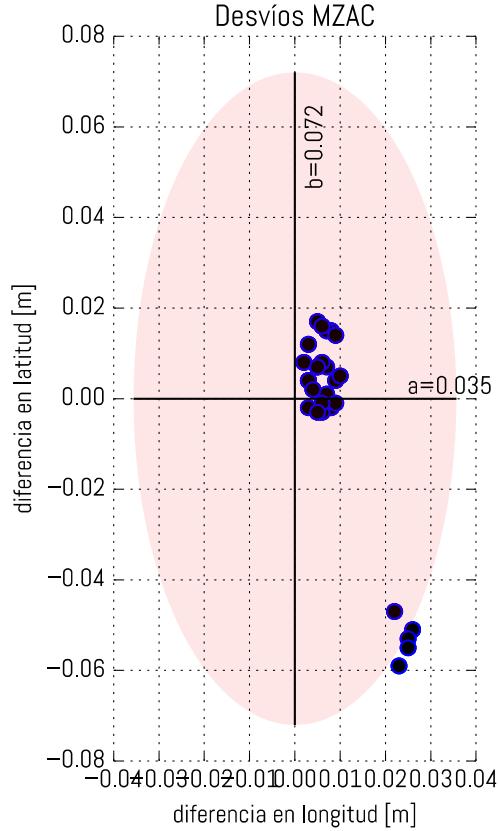
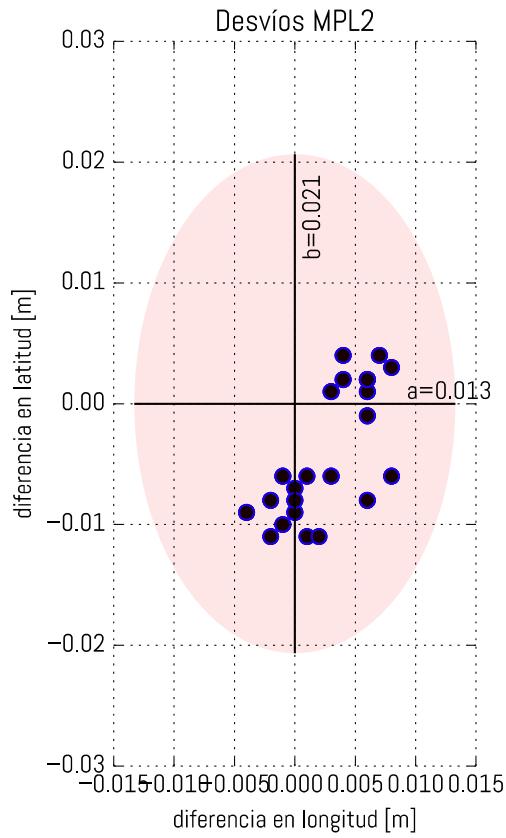


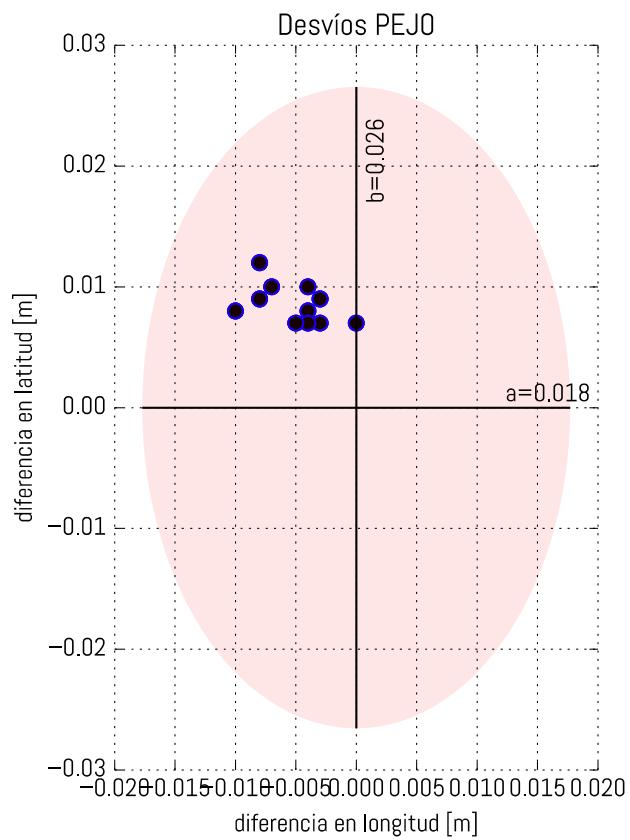
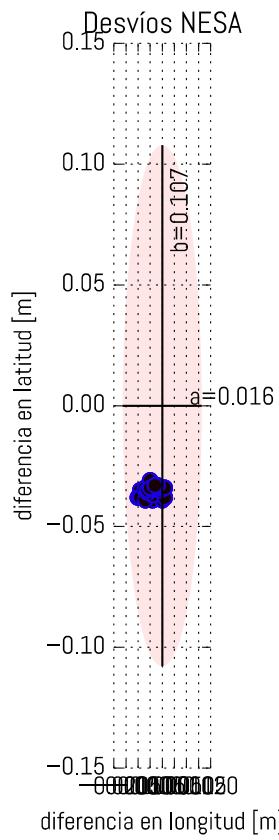


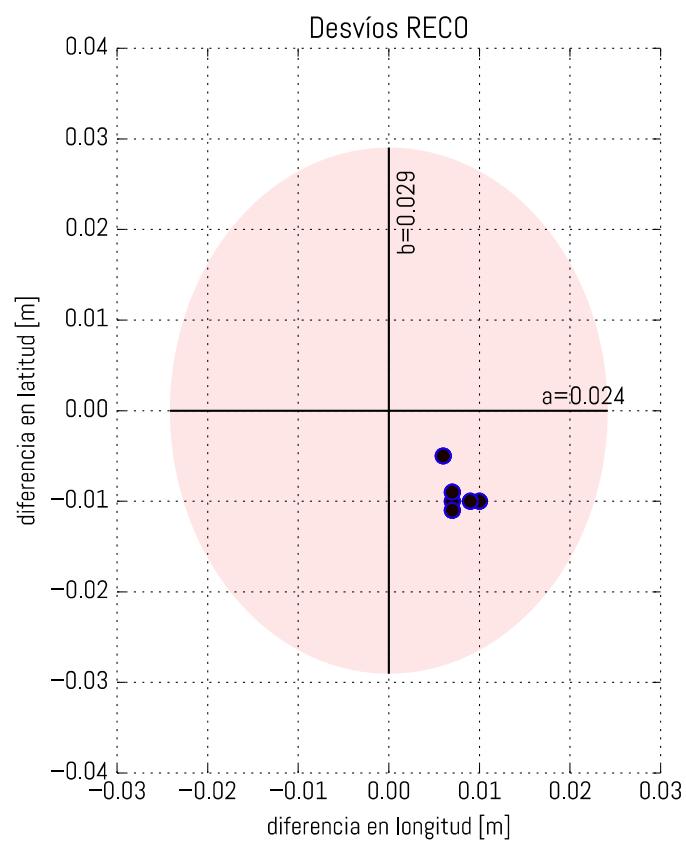
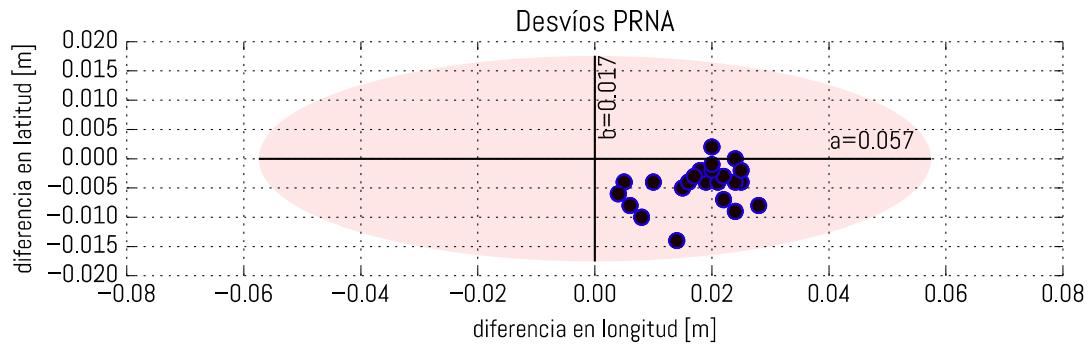


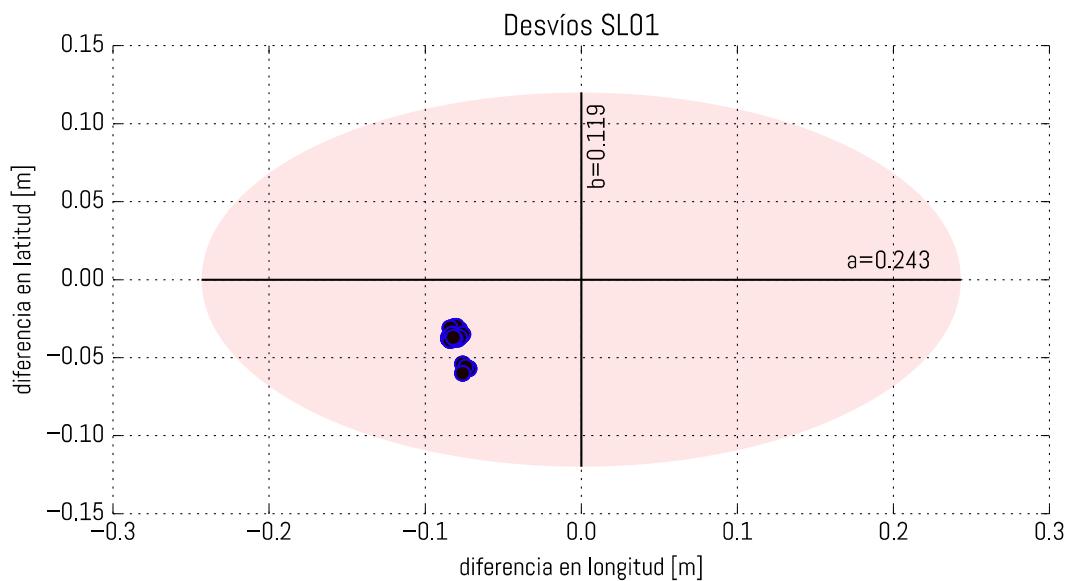
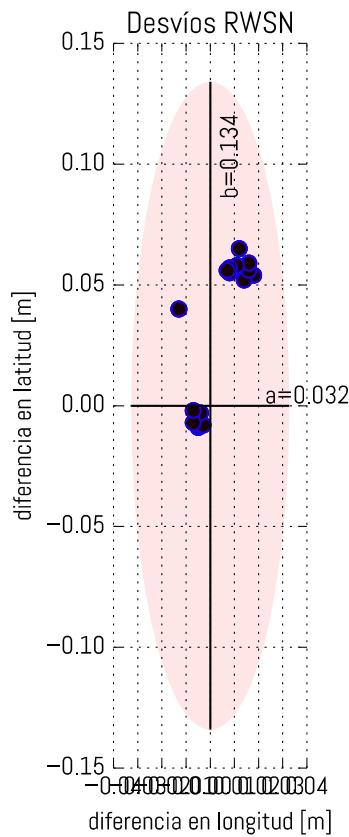


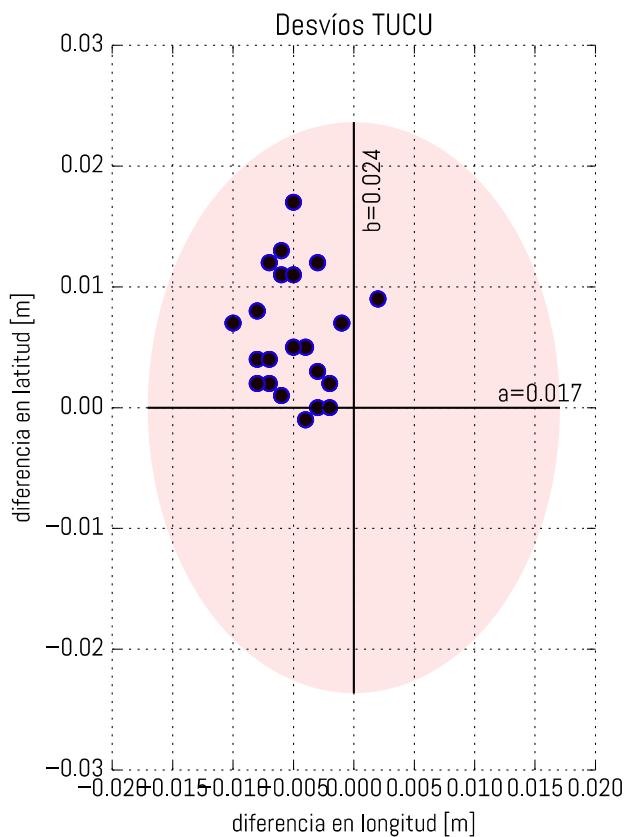
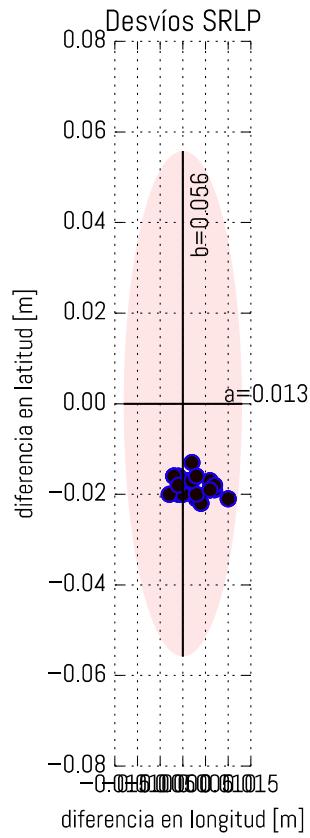


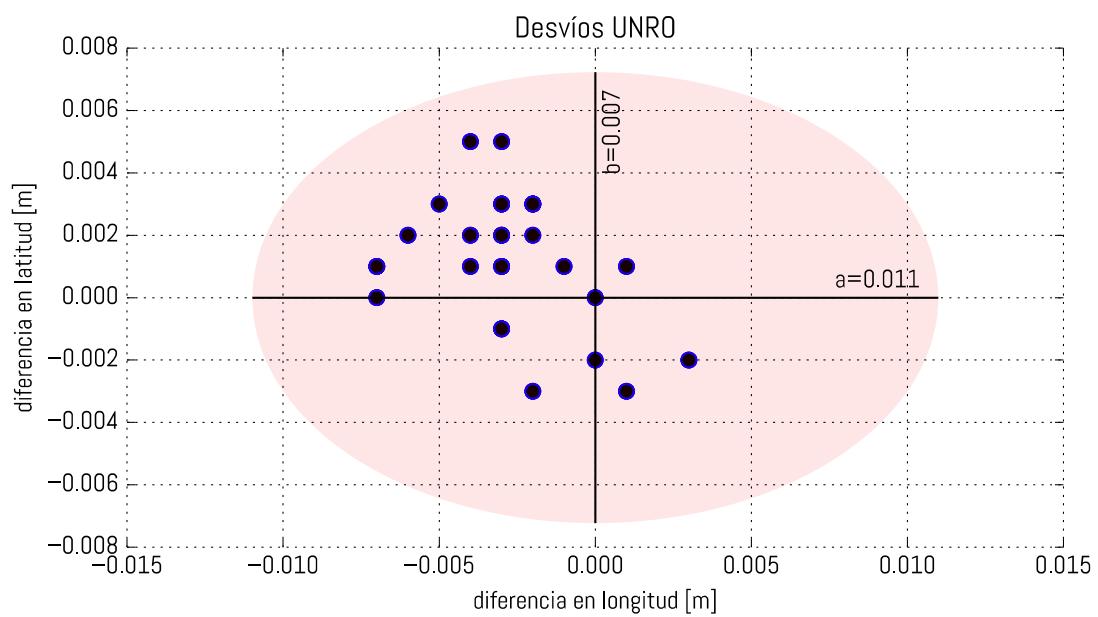
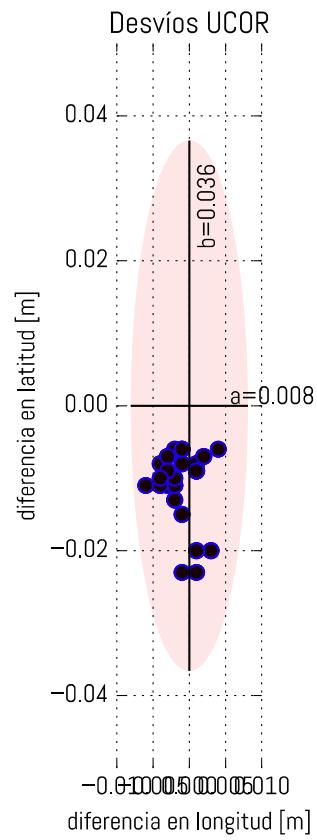


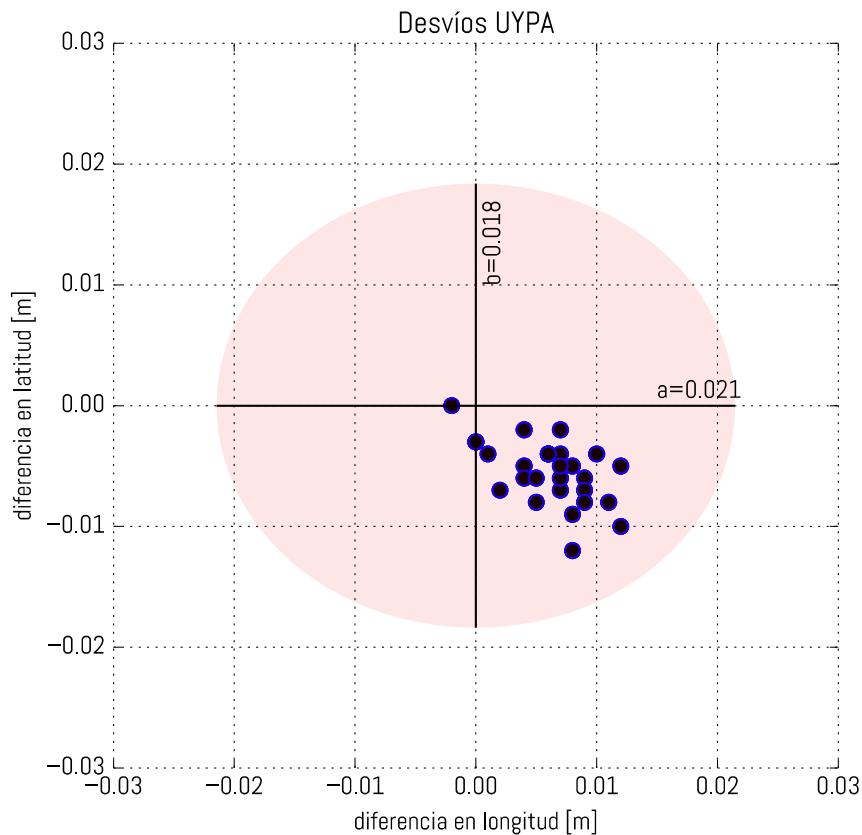
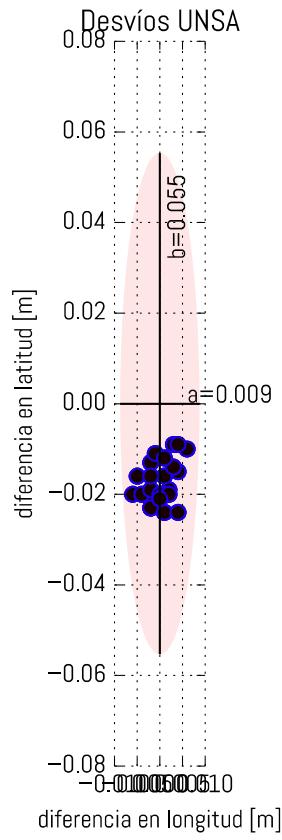


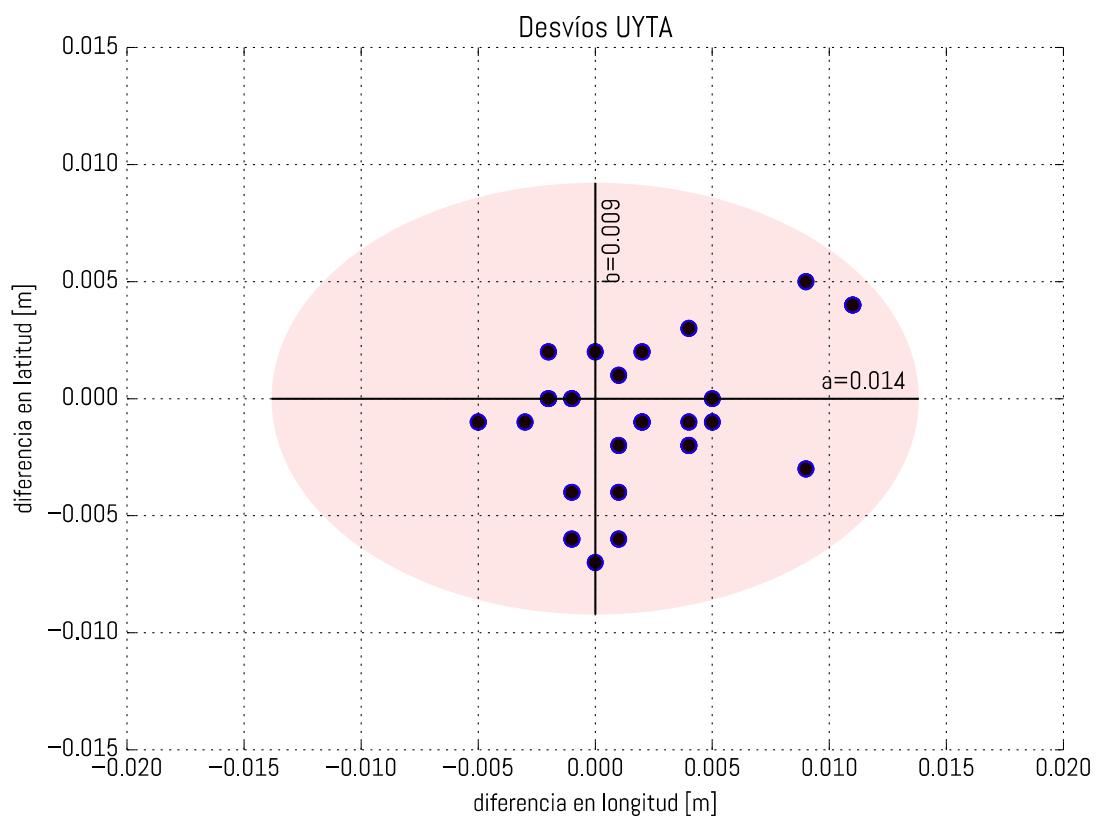
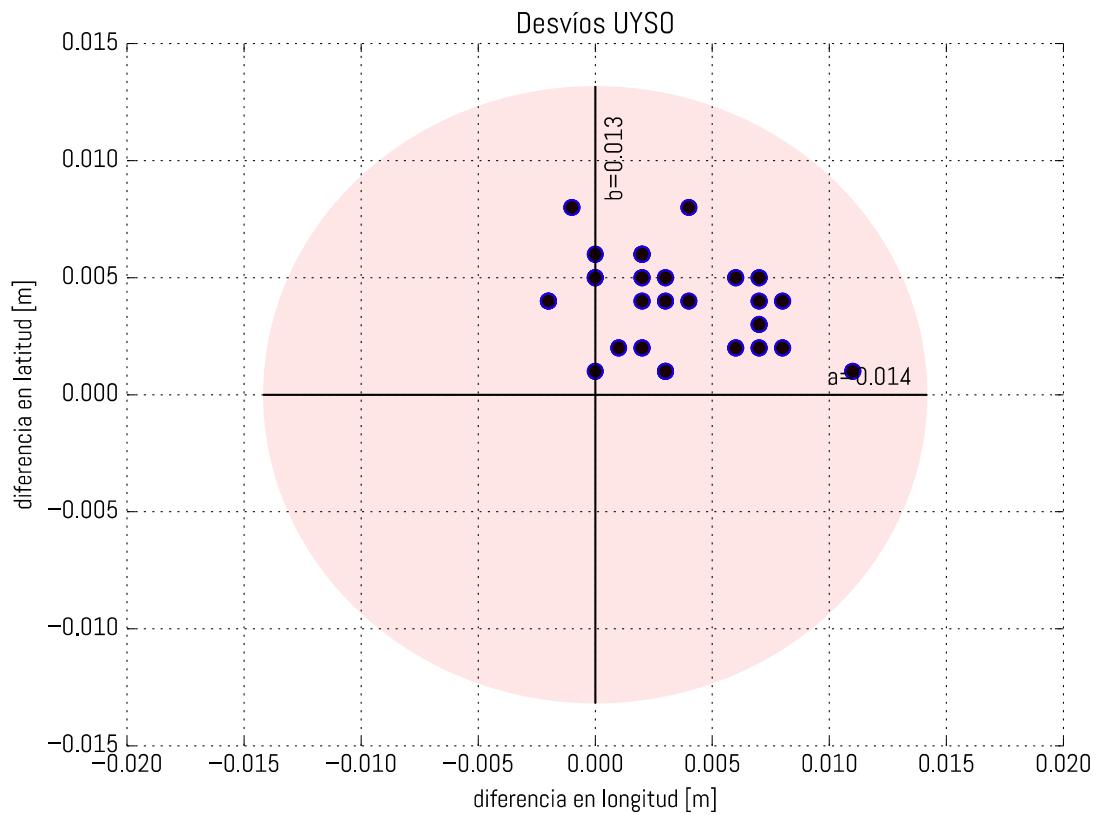


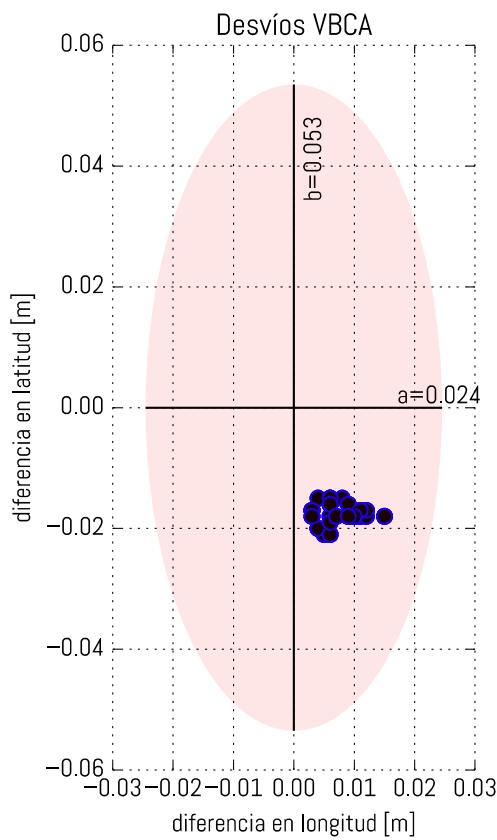
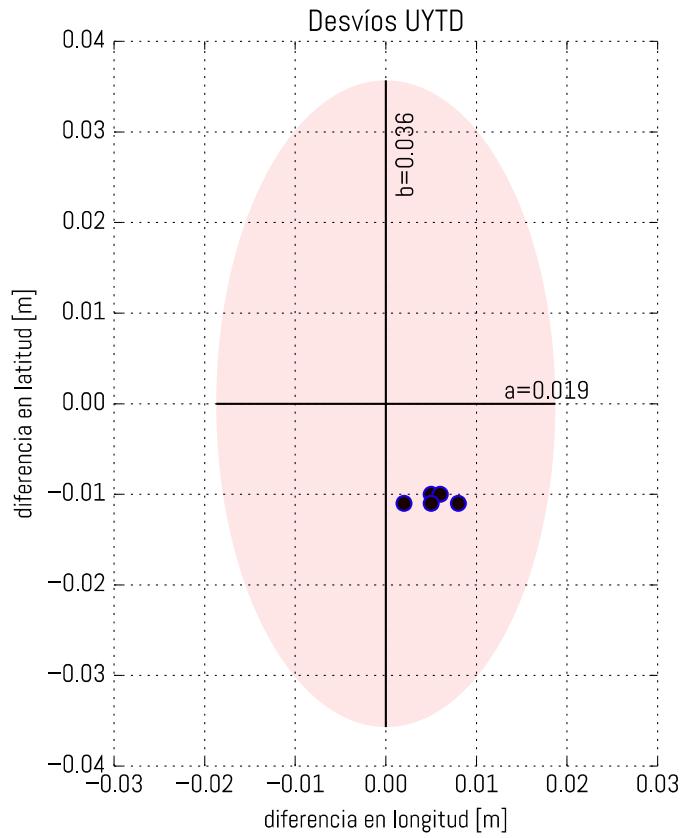












Conclusión

Los servicios de posicionamiento en línea son una herramienta muy útil y su constante evolución, sobre todo los de PPP, otorga una amplia variedad de aplicaciones, incluso en combinación con otros métodos o técnicas como RTK, pueden potenciarse y abrir un nuevo mundo de posibilidades.

La calidad de sus resultados, especialmente para datos de doble frecuencia, estáticos y de sesiones extensas (mayores a 2 horas) en conjunto con la aplicación web desarrollada para este trabajo, son una excelente alternativa para georreferenciar las bases de relevamientos cumpliendo las tolerancias exigidas para mensuras.

Las precauciones que se deben tener antes de utilizar la *Calculadora*, además de contar con observaciones de buena calidad, son debido a los desplazamientos sísmicos y a la invalidez de los modelos de velocidades en ciertos sectores del territorio. La aplicación no tiene un mérito matemático en sí, dado que aplica operaciones sencillas, sino que se vale de la calidad de la matemática que se utilizó para modelar los distintos desplazamientos de las placas tectónicas y los terremotos que las afectaron.

Referencias

Servicios de posicionamiento diferencial o relativo

AUSPOS, Online GPS Processing Service. Geoscience Australia. <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>

CenterPoint RTX, Trimble™ CenterPoint™ RTX™ Post-Processing. <http://www.trimblertx.com/>

OPUS, Online Positioning User Service. National Geodetic Survey (NGS, NOAA, US Goverment). <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>

SCOUT, Scripps Coordinate Update Tool. Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC). University of California, San Diego (UCSD). <http://sopac.ucsd.edu/scout.shtml>

LOPS, Servicio de Posicionamiento Diferencial GPS (LOPS), Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. <http://www.fcaglp.unlp.edu.ar/lops>

Servicios PPP

APPS, The Automatic Precise Positioning Service of the Global Differential GPS System. NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). <http://apps.gdgps.net/>

CSRS-PPP, Canadian Spatial Reference System - Precise Point Positioning. Natural Resources Canada (NRCan). <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>

GAPS, GPS Analysis and Positioning Software. University of New Brunswick (UNB). <http://gaps.gge.unb.ca/>

IBGE-PPP, Instituto Brasileiro de Geografia e Estadística - Posicionamiento por Ponto Preciso. <http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm>

magicGNSS. gmv. <http://magicgnss.gmv.com/>

Bibliografía

Huerta, Eduardo; Mangiaterra, Aldo; Noguera, Gustavo. (julio, 2005). GPS, POSICIONAMIENTO SATELITAL. 1^a Ed. – Rosario, UNR Editora – Universidad Nacional de Rosario. ISBN 950-673-488-7. <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/librogps/>

Sánchez L., Seemüller W., Drewes H. (17 de marzo, 2010). SIRGAS Y EL TERREMOTO DEL 27 DE FEBRERO DE 2010 EN CHILE. *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGF)*. http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/SIRGAS_y_Terremoto_en_Chile_20100227.pdf

gmv (2011). PPP STANDARDS. *esa navipedia*. http://www.navipedia.net/index.php/PPP_Standards

El-Mowafy, Ahmed. (octubre, 2011). ANALYSIS OF WEB-BASED GNSS POST-PROCESSING SERVICES FOR SHORT DURATION STATIC AND KINEMATIC POSITIONING SHORT DATA SPANS. *Survey Review*. 43 (323): pp. 535-549. Department of Spatial Sciences, Curtin University of Technology, Perth, Australia.

Noguera, G.; Mangiaterra, A.. (octubre, 2012): PPP-RTK UNA ALTERNATIVA DE POSICIONAMIENTO PRECISO EN TIEMPO REAL EN REGIONES DE ESTACIONES PERMANENTES POCO DENSAS. *Reunión SIRGAS 2012*. http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol17/Noguera_Mangiaterra_PPP-RTK.pdf

Öcalan, Taylan; Erdogan, Bahattin; Tunalioglu, Nursu (junio, 2013) ANALYSIS OF WEB-BASED ONLINE SERVICES FOR GPS RELATIVE AND PRECISE POINT POSITIONING TECHNIQUES. *Yildiz Technical University*,

- Faculty of Civil Engineering, Department of Geomatic Engineering, Esenler-İstanbul-Turkey.
<http://www.scielo.br/pdf/bcg/v19n2/a03v19n2.pdf>
- Ivars, Leonardo (18 de julio, 2013). EL POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO (PPP) EN LA PRÁCTICA. *Café Geodésico*. <http://cafegeodesico.blogspot.com.ar/2013/07/el-posicionamiento-puntual-preciso-ppp.html>
- Silver, Mark (7 de octubre, 2013). A COMPARISON OF FREE GPS ONLINE POST-PROCESSING SERVICES. *GPS World*. <http://gpsworld.com/a-comparison-of-free-gps-online-post-processing-services/>
- Drewes H., Heidbach O. (2012). THE 2009 HORIZONTAL VELOCITY FIELD FOR SOUTH AMERICA AND THE CARIBBEAN. In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", IAG Symposia, 136: 657-664.
- Pagani, Gustavo Aníbal. (diciembre, 2013). POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO Y SU APLICACIÓN EN AGRIMENSURA. FCEIyA, UNR.
- Alkan, Reha Metin; İlçi, Veli; OZULU İ. Murat. (mayo, 2016). WEB-BASED GNSS DATA PROCESSING SERVICES AS AN ALTERNATIVE TO CONVENTIONAL PROCESSING TECHNIQUE. FIG Working Week 2016, Recovery from Disaster, Christchurch, New Zealand, May 2–6, 2016. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2016/ppt/ts07b/TS07B_alkan_ilci_et_al_82_70_ppt.pdf.
- Sánchez, Laura; Drewes, Hermann. (2016): VEMOS2015: VELOCITY AND DEFORMATION MODEL FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN, doi: [10.1594/PANGAEA.863131](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.863131), supplement to:
- Sánchez, L.; Drewes, H. (2016): CRUSTAL DEFORMATION AND SURFACE KINEMATICS AFTER THE 2010 EARTHQUAKES IN LATIN AMERICA. JOURNAL OF GEODYNAMICS, doi: [10.1016/j.jog.2016.06.005](https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.06.005).
- Noguera, Gustavo; Pestarini, Santiago; Cornaglia, Laura y Pagani, Gustavo. (junio, 2016). MODELO Y CALCULADORA "EN LÍNEA" PARA LA CORRECCIÓN POR VELOCIDADES EN LA GEOREFERENCIACIÓN CON PPP EN AGRIMENSURA. *Resúmenes en CD, 2º Encuentro Nacional de Investigadores de Agrimensura (ENIA2016)*. Universidad Nacional del Litoral (UNL) Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Juan Agustín Maza (UMAZA) Facultad de Ingeniería. 2 y 3 de junio de 2016 - Santa Fe, Argentina. http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/publicaciones/ENIA2016_ResumenPublicado.pdf.
- Manas Kumar Jha, Saurabh Singh, Nisha Upadhyay, Nishant Khare. (2016). COMPARATIVE STUDY OF ONLINE GPS POST PROCESSING SERVICES AND EFFECTS ON DGPS DATA PROCESSING. *International Research Journal of Management Science & Technology*. Vol 7 Issue 1. ISSN 2250 – 1959. <http://www.irjmst.com>.