

METODOLOGIA DE GENERACIÓN DE SERIES TEMPORALES PARA TRES ESTACIONES CONTINUAS DE LA RED GLOBAL DEL IGS

Chiri Quispe, Juan Luis

e-mail: geomaticaser@hotmail.com

Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Tecnología, Centro de investigaciones y Aplicaciones Geomáticas
La Paz, Noviembre de 2014

RESUMEN: Existen varios servicios de posicionamiento GPS (Global Positioning System) por Internet donde brindan la posibilidad de obtener coordenadas resultantes de un Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) de una estación base para el procesamiento en línea, simplificando significativamente la logística de las tareas necesarias en aplicaciones clásicas con dos o más receptores. En este estudio se trabajó con archivos de observación de la red global del Servicio internacional GNSS (International GNSS Service, IGS) para tres estaciones continuas distribuidas estratégicamente en Bolivia desde el 2011 al 2014 aproximadamente.

Partiendo de las velocidades SIRGAS que son determinadas de una manera rigurosa, se efectuó una comparación con las velocidades estimadas de las estaciones con base en la metodología denominada como Precise Point Positioning (Zumberge, et al. 1997) y (Ebner y Featherstone, 2008), ofrecida en línea por el Canadian Spatial Reference System (CSRS). Se procesaron más de 2696 archivos, cuyas coordenadas y sus residuales fueron los insumos principales para el cálculo de las series temporales de las estaciones consideradas a partir de las cuales se pueden determinar los componentes de desplazamiento y de velocidad, que son los que permiten hacer la descripción de la estabilidad de las estaciones continuas.

PALABRAS CLAVE: SIRGAS, PPP, velocidad, estabilidad.

1 INTRODUCCIÓN

Siguiendo las convenciones y los estándares definidos por SIRGAS para garantizar la calidad de los productos SIRGAS-CON. Las soluciones generadas por los Centros de Análisis (en forma de coordenadas y velocidades, archivos RINEX, series de tiempo para las coordenadas de las estaciones, etc.) están a disposición de los datos que se requieran de forma gratuita, pero muy poco existen metodologías de desarrollo en lo que respecta en la generación de series de tiempo para su posterior análisis.

Los puntos fijos que conforman las redes geodésicas no son tan estables, es decir que se mueven por efectos del movimiento de la corteza terrestre. Si bien este fenómeno era bien conocido, los desplazamientos no fueron cuantificables con precisión hasta la aparición del posicionamiento satelital GPS. Para detectar y cuantificar el movimiento de los puntos sobre la superficie terrestre en cuanto a su dirección y

magnitud, se utilizan las estaciones GNSS permanentes que permiten detectar la variación de las coordenadas en el tiempo y determinar consecuentemente sus velocidades.

Por tal razón se participó con la ayuda de la sección CEPAG-GNSS dependiente del Instituto Geográfico Militar (IGM) con un tema denominado: "Metodología de generación de series temporales para tres estaciones continuas (SCRZ, URUS, YCBA) de la Red Global del IGS" en el Simposio SIRGAS, aportando en una temática referido al "**Aprovechamiento y uso de SIRGAS como marco de referencia en aplicaciones prácticas de georreferenciación**".

Se planteó como objetivo fundamental, analizar los movimientos registrados en una serie de estaciones GNSS por ejemplo la estación SCRZ, tomada de la página <http://www.sirgas.org/index.php?id=206> según la figura 1. Para lo cual se pretende determinar su posición con base en la metodología de posicionamiento denominada como Precise Point Positioning, técnica que ha sido depurada al grado de que es posible hacer una elaboración en línea. Estos programas son libres de costo para los usuarios y brindan un acceso casi ilimitado (Ghoddousi y Dare, 2005). De acuerdo con el análisis efectuado por Moya (2010), se usó la herramienta en línea que ofrece el Canadian Spatial Reference System (CSRS) como programa de cálculo.

Los sistemas de coordenadas mundiales responden a la dinámica terrestre y, por lo tanto, su definición es válida para una época específica; por medio de los parámetros de velocidad tridimensionales de cada una de las estaciones GNSS internacionales es posible predecir la posición que tendrá el marco de referencia en una época cualquiera.

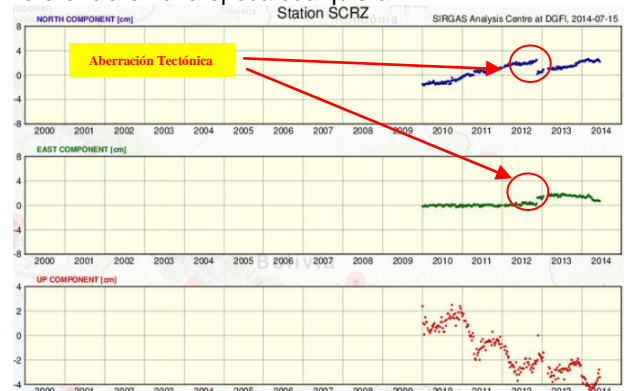


Figura 1. La imagen fue modificada con el fin de mostrar la discontinuidad en la serie de tiempo provocada por una aberración tectónica en 2012. Fuente. SIRGAS

2 METODOLOGIA DE GENERACION DE SERIES DE TIEMPO

2.1 Adquisición, almacenamiento y procesamiento de los datos

Al momento Bolivia tiene incorporado seis estaciones continuas espacialmente en sección de "series de tiempo" del entorno SIRGAS; del cual se seleccionó tres estaciones por tener vigencias largas, ubicación estratégica, consistencia en las observaciones GNSS. El presente trabajo se desarrolló considerando la época de referencia, que corresponde a la semana GPS 1661 del mes de noviembre el año 2011 hasta la semana GPS 1795 de junio del año 2014, que corresponden aproximadamente 135 semanas que a su vez representan a 2.6 años o sea unos 945 días de observación; mismo que será información base para poder realizar la estimación de las velocidades. Para lo cual se realizó el siguiente itinerario:

- **Datos de la Red Global IGS.**

El primer paso consiste en la descarga de 2826 archivos de observación en formato hatanaka o rinex de los datos diarios de las tres estaciones continuas, misma que están disponibles las observaciones GNSS en la red global del IGS: <http://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/daily/>

- **Herramienta de procesamiento CSRS-PPP.**

Se ha utilizado el servicio de cálculo en línea del Canadian Spatial Reference System (CSRS) en su página web: <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>, como uno de los mejores servicios de posicionamiento preciso online la cual devuelve coordenadas resultantes de un Posicionamiento Puntual Preciso (PPP). La aplicación del método PPP es una estrategia muy poderosa para estimar los parámetros de una estación, con la ventaja de que minimiza los tiempos de procesado, ya que al aumentar el número de estaciones el tiempo de cálculo crece de manera lineal a diferencia de lo que pasa con la solución de red, en la que el tiempo se incrementa de manera exponencial. A diferencia de los modelos diferenciales consiste en determinar época a época, las coordenadas absolutas.

- **Transferencia y organización de los resultados en una base datos**

Luego de recibida la información con los datos de coordenadas diarias juntamente con sus residuales, se traslada de manera manual información de resultados del procesamiento PPP a un archivo de Excel.

Para facilitar el cálculo de las series temporales de cada una de las estaciones, se organizaron los datos definitivos en un formato estándar para hacer su lectura posterior desde un programa. Para cada estación se creó una hoja electrónica en un mismo archivo Excel con los campos siguientes: época de medición, coordenadas XYZ en metros, residuales para las coordenadas XYZ en metros, el número de la semana GPS, el día juliano (DJ) y las diferencias en XYZ con respecto al primer valor obtenido, N, E y h como se observa en la figura 2.

AÑO	X	Y	Z	DX	DY	DZ	SEMANA GPS	DJ	DX_O	DY_O	DZ_O
2010.2027	2743005.930	-5420745.272	-1937117.091				1575	74			
2011.8548	2743005.920	-5420745.280	-1937117.075	0.002	0.007	0.013	1661	312	0.000	-0.008	0.018
2011.8575	2743005.923	-5420745.283	-1937117.075	0.002	0.008	0.013	1661	313	0.003	-0.011	0.016
2011.8603	2743005.929	-5420745.285	-1937117.073	0.002	0.008	0.014	1661	314	0.009	-0.013	0.018
2011.8630	2743005.923	-5420745.282	-1937117.072	0.002	0.007	0.013	1661	315	0.003	-0.010	0.019
2011.8658	2743005.929	-5420745.280	-1937117.073	0.002	0.008	0.014	1661	316	0.009	-0.008	0.018
2011.8685	2743005.917	-5420745.276	-1937117.074	0.002	0.007	0.013	1662	317	-0.003	-0.004	0.017
2011.8712	2743005.922	-5420745.286	-1937117.074	0.002	0.008	0.014	1662	318	0.002	-0.014	0.017
2011.8740	2743005.919	-5420745.277	-1937117.071	0.002	0.007	0.013	1662	319	-0.001	-0.005	0.020
2011.8767	2743005.924	-5420745.282	-1937117.073	0.002	0.008	0.014	1662	320	0.004	-0.010	0.018
2011.8795	2743005.926	-5420745.288	-1937117.074	0.002	0.008	0.013	1662	321	0.006	-0.016	0.017
2011.8822	2743005.911	-5420745.267	-1937117.067	0.002	0.008	0.014	1662	322	-0.009	0.005	0.024
2011.8849	2743005.918	-5420745.273	-1937117.073	0.002	0.007	0.013	1662	323	-0.002	-0.001	0.018
2011.8877	2743005.923	-5420745.278	-1937117.075	0.002	0.007	0.013	1663	324	0.003	-0.006	0.016
2011.8904	2743005.918	-5420745.281	-1937117.067	0.002	0.007	0.013	1663	325	-0.002	-0.009	0.024
2011.8932	2743005.922	-5420745.275	-1937117.074	0.002	0.007	0.013	1663	326	0.002	-0.003	0.017
2011.8959	2743005.922	-5420745.277	-1937117.070	0.002	0.008	0.014	1663	327	0.002	-0.005	0.021
2011.8986	2743005.919	-5420745.276	-1937117.072	0.002	0.007	0.013	1663	328	-0.001	-0.004	0.019
2011.9014	2743005.916	-5420745.268	-1937117.069	0.002	0.007	0.013	1663	329	-0.004	0.004	0.022
2011.9041	2743005.928	-5420745.279	-1937117.074	0.002	0.007	0.013	1663	330	0.008	-0.007	0.017
2011.9068	2743005.927	-5420745.280	-1937117.074	0.002	0.007	0.013	1664	331	0.007	-0.008	0.017
2011.9096	2743005.924	-5420745.277	-1937117.070	0.002	0.007	0.013	1664	332	0.004	-0.005	0.021
2011.9123	2743005.919	-5420745.274	-1937117.073	0.002	0.007	0.013	1664	333	-0.001	-0.002	0.018
2011.9151	2743005.914	-5420745.267	-1937117.066	0.002	0.007	0.014	1664	334	-0.006	0.005	0.025

Figura 2. Recorte del archivo SCRZ con los datos iniciales. Fuente: Modificado MOYA, 2011

- **Depuración de los archivos resultantes**

Se efectuó una revisión preliminar de los resultados obtenidos con el objetivo fundamental de encontrar inconsistencias con los valores de coordenadas resultantes.

Este proceso consistió, principalmente, en calcular las diferencias de cada una de los días procesados con respecto al valor inicial (época de referencia), se verificaba, de manera previa, que este valor se encontrara dentro del rango de ± 5 cm con respecto a la solución estricta dada por SIRGAS para la estación. (Moya, 2013)

Estación	Total efectivo de archivos								Total archivos usados
	2011	%	2012	%	2013	%	2014	%	
SCRZ	48	89	328	90	313	86	155	98	844
URUS	54	100	354	97	362	99	148	94	918
YCBA	52	96	363	99	363	99	156	99	934
TOTAL									2696

Tabla 1. Cantidad de archivos procesados efectivamente. Fuente: Modificado MOYA.

2.2 Estimación de la velocidad y desplazamiento

- **CÁLCULO DE LA LÍNEA DE MÍNIMOS CUADRADOS O ECUACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE**

La estimación de vectores de posición X y la velocidad V de una época de referencia t, a partir de la posición X_{t1} , X_{t2}, \dots, X_{tn} , con las respectivas matriz de variancia covarianza (MVC), con todas las estimaciones a partir de datos GNSS se obtiene los datos en el proceso de ajuste por el método paramétrico de proceso de ajuste, de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 X_{t1} &= X_t + V_t(t - t_1) \\
 X_{t2} &= X_t + V_t(t - t_2) \\
 X_{t3} &= X_t + V_t(t - t_3) \\
 &\vdots \\
 X_{tn} &= X_t + V_{Xt}(t - t_n)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Donde:
 X_t , Y_t , y Z_t : Vector de posición de partida (Incógnita)

V_t : Pendiente que representa la velocidad en la componente X de la estación (Incógnita)
 $t = t_0$: Época o sistema de referencia (datos: p.e.: época referencia = 2010.2082)
 t_n : Época de levantamiento GNSS (datos: p.e.: época final = 2014.4329)
 X_{tn} : Vector de observaciones

• **MODELO LINEAL:** $nV_1 = nA_u uX_1 + nL_1$ (2)

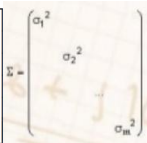
• **CALCULO DE PARAMETROS:**

$X_{(estim)} = -N^{-1}U = -(A^T P A)^{-1} A^T P L$ (3)

✓ **Matriz de pesos (P):** la cual se determina:

$P = \sigma_0^2 (\sum L_b)^{-1}$, sabiendo $\sigma_0 = 1$

y sean $\sum L_b$ los errores estándar de las observaciones. La matriz varianza-covarianza L_b es:

$$\sum L_b = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \sigma_n^2 \end{bmatrix}$$


$$\sum L_b^{-1} = P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 & & & \\ & p_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & p_n \end{bmatrix}$$

Esta ecuación es el modelo estocástico, en la mayoría de los casos las covarianzas son nulas, en consecuencia esta ecuación citada es una matriz diagonal donde los elementos de la diagonal principal son las varianzas de las observaciones. La inversa es la matriz de los pesos de las observaciones.

✓ **Matriz de diseño o de coeficientes del modelo matemático (A):**

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & (t-t_1) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & (t-t_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & (t-t_1) \\ \dots & & & & & \\ \dots & & & & & \\ \dots & & & & & \\ 1 & 0 & 0 & (t-t_n) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & (t-t_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & (t-t_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

✓ **Vector de observaciones reducidas (L):**

$L = F(X_0) - L_b = L_0 - L_b$ (5)

Dónde: L_0 : Coordenadas aproximadas del vector y
 L_b : Vector de observaciones

✓ **Calculo de los residuos (V):**

$V = AX_{(estim)} + L$ (6)

✓ **Vector de parámetros ajustados ($X_{(estim)}$):**

$$X_{(estim)} = \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \\ Z_t \\ V_{Xt} \\ V_{Yt} \\ V_{Zt} \end{bmatrix} \quad (7)$$

• **VECTOR DE PARÁMETROS AJUSTADOS (X_a):**

$X_a = X_{(estim)} + X_0$ (8)

Dónde: X_0 : Vector de valores aproximados

• **VECTOR DE OBSERVACIONES AJUSTADAS (L_a):**

$L_a = F(X_a) = V + L_b$ (9)

• **MATRIZ DE VARIANZA-COVARIANZA (MVC = $\sum X$):**

Donde: $\sigma_0^2 = \frac{V^T P V}{n-u}$ (10)

✓ **Matriz cofactor de los parámetros estimados:**

$Q_X = N^{-1}$
 $\sum X = (\sigma_0)^2 Q_X$ (11)

La matriz varianza covarianza ($\sum X$) es el resultado de multiplicar la desviación típica al cuadrado por la matriz cofactor. La raíz de los términos de su diagonal nos indica los errores asociados a cada incógnita del sistema creado, en este caso para X, Y, Z y VX, VY, VZ (6 parámetros).

✓ **Matriz cofactor de los residuos estimados:**

$Q_V = P^{-1} - AN^{-1}A^T$

$\sum V = (\sigma_0)^2 Q_V$ (12)

✓ **Matriz cofactor de las observación ajustadas:**

$Q_{L_a} = Q_{L_b} - Q_V$

Donde la matriz cofactor Q_{L_b} de las observaciones:

$Q_{L_b} = \frac{1}{\sigma_0^2} \sum L_b$

$\sum L_a = (\sigma_0)^2 Q_{L_a}$ (13)

• **OTRA ALTERNATIVA: MODELO CUADRATICA**

Forma Cuadrática

x	y	$y = a + bx + cx^2$	$v = (A^T A)^{-1} (A^T Y)$
x_1	y_1	$A = \begin{pmatrix} x_1^0 & x_1^1 & x_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^0 & x_n^1 & x_n^2 \end{pmatrix}; Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}; v = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$	
\vdots	\vdots		
x_n	y_n		

• **EVALUAR EL DESCRIINANTE EN MODELO LINEAL Y CUADRATICA**

Discriminante

$RSS = \ Av - Y\ $	$RS = 1 - \frac{RSS}{Y^T Y - n\bar{y}^2}$
--------------------	-------------------------------------------

ACEPTABLE: $RS > 0.95$ o $RS > 0.70$

• **DESPLAZAMIENTO PROMEDIO DE LA ESTACION EN 2.58 AÑOS**

Fórmulas para conversión de coordenadas cartesianas ajustadas (X, Y, Z) a planas o topocentricas (N, E, h o u). Los parámetros del elipsoide a emplear son los del GRS80:

✓ **Cartesianas a Geodésicas**

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{Z + e^2 b \operatorname{sen}^3 \theta}{p - e^2 a \operatorname{cos}^3 \theta} \right]$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right)$$

$$h = \left(\frac{p}{\operatorname{cos} \varphi} \right) - N$$

En donde:

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2}; \theta = \tan^{-1} \left(\frac{Za}{pb} \right); N = \frac{a}{\sqrt{1 - (e * \operatorname{sen} \varphi)^2}}$$

a es el semieje mayor del elipsoide (6378137 m)

e2 es la primera excentricidad al cuadrado (0.006 694 380 022 90)

Inversa de aplanamiento (1/e)= 298.257 222 100 8827 m

b=a(f-1)= 6356752.314140

✓ **Geodésicas a Planas o Topocéntrico Local**

Para la transformación de coordenadas geodésicas coordenadas topográficas por las rotaciones y traducciones, en la misma escala, las formulaciones matemáticas se dan por (Andrade, 1998, p 98.)

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\operatorname{sen} \varphi & \operatorname{cos} \lambda & 0 \\ -\operatorname{sen} \varphi \operatorname{cos} \lambda & -\operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \lambda & \operatorname{cos} \varphi \\ \operatorname{cos} \varphi \operatorname{cos} \lambda & \operatorname{cos} \varphi \operatorname{sen} \lambda & \operatorname{sen} \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Donde:

E, N y h son las coordenadas planas transformadas en PTL.

φ y λ es la latitud y la longitud geodésica del punto ajustado;

X, Y y Z son las coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionales de un punto de inflexión; X0, Y0 y Z0 son las coordenadas geodésicas cartesianas en tres dimensiones del punto elegido para el sistema de origen.

• **CALCULO DE DESPLAZAMIENTO Y AZIMUT**

$$d = \sqrt{E^2 + N^2 + h^2}; Az = \tan^{-1} \left(\frac{E}{N} \right)$$

Donde:

d: distancia geométrica

Az: representa el acimut geodésico

2.3 Comparación con los resultados dado por SIRGAS

Una comparación estricta basada en un análisis estadístico no es posible por dos razones fundamentales:

- los resultados obtenidos provienen de las metodologías de medición, pero no han sido procesados de manera semejante (SIRGAS de forma relativa con el software Bernese y este trabajo de investigación con PPP y un software en línea).

- El segundo aspecto es, evidentemente, la dispersión de los resultados y su exactitud.

A pesar de estas dos condiciones, se hizo solamente la comparación en cuanto a la magnitud del desplazamiento y dirección. Las series temporales SIRGAS están disponibles en <http://www.sirgas.org/index.php?id=154>, en las cuales se pueden apreciar las direcciones de los desplazamientos.

3 RESULTADOS

La fuente de ruido en los datos se corrige por medio de modelos, con lo cual se obtiene, como resultado, que la variación de una solución a otra es solo producto de los propios movimientos de la corteza terrestre. En este trabajo de investigación, la solución PPP no es estrictamente científica en cuanto a la refinación de los modelos empleados, pues la posición de cada estación es calculada con base en las coordenadas de los satélites, sin considerar otras estaciones terrestres.

La serie temporal para cada una de las tres coordenadas de cada estación es una gráfica de la variación en cada una de las componentes con respecto al tiempo. Este gráfico es fundamental en el estudio cinemático y dinámico de las placas terrestres, pues permite conocer el comportamiento de la estación con respecto al tiempo generando distorsiones y logra, adicionalmente, estimar su comportamiento futuro así como cuantificar, de manera estricta, los desplazamientos sufridos en la estación.

Es importante aclarar que las coordenadas tridimensionales XYZ de cada una de las estaciones son geocéntricas, es decir, conforman un sistema de mano derecha. Así por ejemplo en Bolivia, el componente desde el origen en dirección: al eje X es positivo la cual está sobre el plano del Ecuador y coincide con el meridiano de Greenwich, el eje Y es negativo porque está en el Hemisferio oeste y finalmente el eje Z es negativo por estar en el Hemisferio Sur de la Tierra.

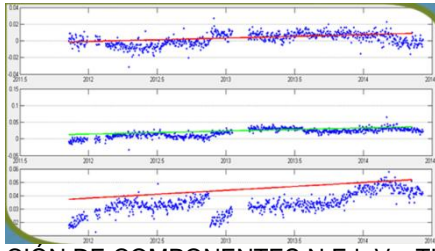
En el cuadro de la siguiente página se resumen los datos de velocidades cartesianas resultantes de esta investigación y los datos oficiales de SIRGAS que tienen una exactitud de ± 0,3 mm/a, que indican la diferencia entre los dos valores de velocidades y la concordancia obtenida en la dirección del vector de desplazamiento. Se presenta, además, el promedio de las diferencias de velocidades. Las columnas de dirección de desplazamiento representan la dirección en las componentes norte-sur y este-oeste en las que se desplazó la estación durante el período de estudio. Los signos "más" (+) y "menos" (-) indican la parte positiva del eje norte y este, respectivamente.

Estación	Coordenadas Cartesianas			Velocidades [mm/a]						Diferencias [mm/a]			
	X [m]	Y [m]	Z [m]	Resultados PPP			SIRGAS			X	Y	Z	
SCRZ	2743005.9221	-5420745.2528	-1937117.0563	4.2	12.2	6.9	2.5	-6.0	11.5	1.7	18.2	-4.6	
URUS	2361785.5566	-5595048.6755	-1954576.6297	4.5	-1.3	14.3	7.8	-1.8	13.5	-3.3	0.5	0.8	
YCBA	2623233.4255	-5303044.8054	-2376415.9765	0.7	-3.1	13.9				0.7	-3.1	13.9	
Diferencias promedio:											-0.3	5.2	3.4

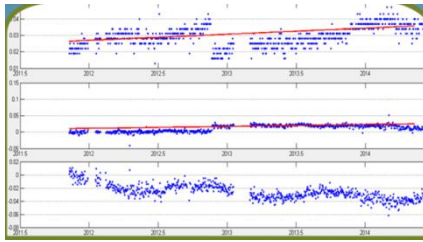
Tabla 2. Desplazamientos, azimuts y comparación de vectores velocidades derivados del procesamiento PPP y los dados por SIRGAS.

• ILUSTRACION GRÁFICA DEL MODELO LINEAL DE LA ESTACION SCRZ

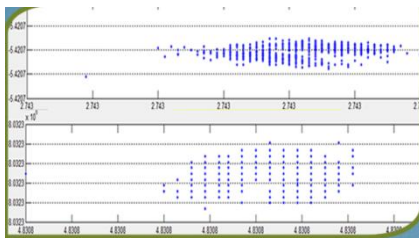
- ✓ VARIACIÓN DE COMPONENTES X,Y,Z Vs. TIEMPO – INDEPENDIENTEMENTE



- ✓ VARIACIÓN DE COMPONENTES N,E,h Vs. TIEMPO



- ✓ EN PLANO X Vs. Y – N Vs. H



Nota: Mas información se ilustra en el banner presentado en su momento.

4 CONCLUSIONES

1. El procesamiento PPP en línea de más de dos años de datos diarios fueron usados para hacer establecer series temporales, las cuales permitieron hacer una descripción cinemática del comportamiento de las tres estaciones continuas, sin entrar a cuestionar o postular el origen de los movimientos, se puede decir que los resultados obtenidos demuestran que la zona de estudio, durante el periodo analizado presentó un movimiento en dirección Nor-Este en SCRZ, Nor-Oeste URUS y al Norte YCBA, presumiendo eventualmente una posible rotación a partir de la Cordillera de los Andes. (Ver Mapa de Vectores).
2. Las velocidades determinadas a partir de la dispersión de las coordenadas diarias ajustadas responde a un modelo lineal, pueden representar o no fielmente la realidad de la estación. Los saltos en las series que pueden ser productos de correlaciones con procesos físicos como la precipitación o cargas de nieve entre otros no son detectados por el algoritmo y su influencia es notoria en la estimación de la velocidad.

3. Como se muestra en la tabla de comparación, permite validar los resultados obtenidos reflejando una concordancia aproximada obtenida entre los resultados PPP en línea y los de alta calidad ofrecidos por SIRGAS. Las diferencias varían entre los -3.3 mm/a y 1.7 mm/a para la componente X, entre -3.1 mm/a y 18.2 mm/a en la componente Y y entre -4.6 mm/a y 13.9 mm/a para la componente Z, con esta metodología se cuantifico la variación de coordenadas.

5 REFERENCIAS

IBGE (2009). Coordenação de Geodésia-Diretoria de Geociências, 2009. Manual do Usuário Posicionamento por Ponto Preciso. Disponible en <http://www.ibge.gov.br/espanhol/>

Gemael, C. (1994). Introdução ao Ajustamento de Observações. Aplicações Geodésicas. (Introducción al ajuste de observaciones. Aplicaciones geodésicas). Brasil: UFPR.

Moya Zamora Jorge (2013). Evaluación del comportamiento cinemático de una serie de estaciones del Sistema Geocéntrico para las Américas procesadas con Precise Point Positioning en línea, disponible en: <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/articulo/view/5589>

Moya, J., Bastos, S. & Rivas, M. J. (2013). Cálculo de las componentes de velocidad para estaciones GNSS continuas mediante la aplicación del algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados.

Natural Resources Canada (2012). Online Global GPS Processing Service (CSRS-PPP), Drewes and Heidbach 2009 disponible en: http://www.geod.nrcan.gc.ca/index_e.php [Links]

Perez, J. A. S., Monico, J. F. G. y Chaves, J. C. (2003). Velocity field estimation using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case [Estimación del campo de velocidades usando posicionamiento de punto preciso GPS: El caso de la placa Suramericana]. Journal of Global Positioning System, 2(2), 90-99.

Silva Perez, J., A. (2002). Campo de velocidade as estacoes da RBMC e do IGS localizadas na placa sulamericana: estimativa a partir do processamento de dados GPS. (Campo de velocidades de las estaciones RBMC e IGS localizadas en la placa Suramericana: Estimación a partir de un procesamiento de datos GPS). Tesis doctoral. Universidade Estadual Paulista. Brasil.

Leick, A. (1995). GPS satellite surveying, Ed. John Wiley & Sons, 1995.

6 AGRADECIMIENTOS

Expresar los profundos agradecimientos a:

- CEPAG-IGM: Centro de Procesamiento y Análisis de Datos GNSS del Instituto Geográfico Militar (Bolivia) – Cnl. Arturo Echalar e Ing. Wilson Soria.
- Centro Nacional de Procesamiento de Datos GNSS. Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia. Universidad Nacional. Costa Rica - Jorge Moya Zamora
- Carrera de Informática. Universidad Mayor de San Andrés – Univ. Winston Quispe Yujra