

Usando la red de estaciones SIRGAS de Costa Rica para la cuantificación de las discrepancias respecto de un procesamiento PPP en línea

Using the network of SIRGAS stations of Costa Rica for quantifying the discrepancies regarding PPP online processing

Jorge Moya Zamora

Escuela de Ingeniería Topográfica. Universidad de Costa Rica

Cristian Núñez Solís

Laboratorio de Hidrología Ambiental. Escuela de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional

Jéssica Cubero Quesada

Escuela de Ingeniería Topográfica. Universidad de Costa Rica

Recibido: 29 de junio 2016

Aceptado: 1 de febrero 2017

Resumen

Se cuantificaron las discrepancias en las coordenadas geocéntricas [X,Y,Z] obtenidas entre soluciones GPS procesadas en línea con el software del Canadian Space Reference System (CSRS) bajo la modalidad de Posicionamiento Puntal Preciso (PPP) y las soluciones semanales obtenidas de un postproceso científico generadas por el Sistema Geocéntrico para las Américas (SIRGAS). La red de trabajo contempló 10 estaciones de la red SIRGAS-CON de Costa Rica, de las cuales se usaron un año de datos diarios comprendidos entre las semanas 1803 (julio de 2014) de y 1854 (julio de 2015). La metodología implementada consistió en el procesamiento en línea de 3614 archivos rinex de 24 horas con el servicio CSRS. Los resultados permitieron cuantificar las discrepancias PPP diarias entre las coordenadas, las discrepancias de la solución promedio semanal PPP y finalmente las discrepancias de solución promedio respecto a la solución final semanal SIRGAS. Estas discrepancias se usaron para hacer una estimación nacional por medio de una interpolación con el método IDW. Los resultados de las soluciones PPP y SIRGAS se usaron para determinar los 6 parámetros de transformación para cada una de las semanas comprendidas en el estudio. Los resultados fueron significativos con valores de $-58,5 \text{ mm} \pm 17,5 \text{ mm}$, de $-34,3 \text{ mm} \pm 6,2 \text{ mm}$ y de $-161,6 \text{ mm} \pm 26,2 \text{ mm}$ para las traslaciones en [X,Y,Z] respectivamente y rotaciones promedio en los tres ejes de $0,003600'' \pm 0,000341''$. Estos resultados evidenciaron una traslación en la dirección norte-sur de la solución PPP respecto a SIRGAS. Los resultados PPP obtenidos se usaron para hacer una estimación de las componentes de la velocidad geocéntrica de cada una de las estaciones y su comparación con los valores dados por SIRGAS.



Keywords

Networks (geodetic), artificial satellites- navigation, geodetic, global positioning system, coordinates.

Abstract

Discrepancies in geocentric coordinates [X,Y,Z] obtained between GPS solutions processed online with the software of the Canadian Space Reference System (CSRS) in the form of Precise Point Positioning (PPP) and weekly solutions obtained were quantified by a scientific postprocessing generated by the geocentric system for the Americas (SIRGAS). The network has 10 stations SIRGAS-CON, network of Costa Rica, which used a year of daily data between weeks 1803 (July 2014) of and 1854 (July 2015). The implemented methodology processed 3614 online rinex files of 24 hours with the CSRS service. The results allowed to quantify the PPP discrepancies between the coordinates daily, average weekly discrepancies PPP solution and finally the average solution discrepancies regarding the final weekly SIRGAS solution. These discrepancies were used to make a national estimate by an interpolation with IDW method. The results of the PPP and SIRGAS solutions were used to determine the six transformation parameters for each week included in the study. The results were significant with values of -58.5 ± 17.5 mm, $-34.3 \text{ mm} \pm 6.2$ mm and $26.2 \text{ mm} \pm -161.6$ mm for translations at [X,Y,Z] respectively and average rotations in the three axes of $0.003600'' \pm 0.000341''$. These results showed a translation in the north-south direction of the PPP solution regarding SIRGAS. PPP results obtained were used to estimate the components of the geocentric speed of each station and are compared to the values given by SIRGAS.

Palabras clave

Redes (geodesia), satélites artificiales- navegación, geodesia, Sistema Global de Posicionamiento, coordenadas.

1. INTRODUCCIÓN

El denominado Sistema Global de Navegación por Satélites (GNSS) enmarca moderadamente varias constelaciones de sistemas de navegación satelital como el Global Positioning System (GPS), Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) y el Europeo Galileo entre otros adicionales (1). Los avances teóricos y técnicos que ha logrado la geodesia y especialmente la geodesia espacial y ciencias afines en las últimas décadas gracias al uso primario del GPS y actualmente del GNSS, han sido enormes. La invaluable información que se obtiene diariamente de estos sistemas ha contribuido no solo a una mejor definición del sistema Tierra, sino que además ha podido brindar datos sobre los cambios físicos que la afectan como productos de la naturaleza o de los cambios provocados por el hombre.

Toda la información que se genera con este tipo de técnicas y otras adicionales debe estar sustentada en un mismo sistema de referencia, el cual debe ser único y global. De esta manera, el denominado Sistema Internacional Terrestre de Referencia (ITRS) constituye la base teórica de un sistema de este tipo. La realización del ITRS la constituye el Marco Internacional Terrestre de Referencia (ITRF), el cual está compuesto por un conjunto global de estaciones, en las cuales se realizan mediciones repetidas basadas en las diferentes técnicas de la geodesia espacial. Las realizaciones del ITRF están conformadas, además de otra serie de parámetros, por las coordenadas geocéntricas de las estaciones mundiales $[X, Y, Z]$ y sus variaciones temporales $[VX, VY, VZ]$ y su correspondiente matriz de varianza-covarianza. Los datos de cada solución ITRF son válidos para una época específica y recopilan toda la información generada de las soluciones anteriores.

1.1. Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS)

El ITRF está densificado en todo el planeta por medio de diferentes redes de estaciones principalmente continentales. En Latinoamérica, la densificación del ITRF está materializada por la red de estaciones GNSS de operación continua administrada y calculada por el Sistema Geocéntrico para las Américas (SIRGAS). Esta red continental de más de 400 estaciones se denomina como red SIRGAS-CON (SIRGAS Continously Operating Network). De ellas, 59 pertenecen a la red global del International GNSS Service (IGS). La operabilidad de esta red se da gracias a la colaboración de más de 50 entidades que han puesto en operación y administración las estaciones GNSS, cuyos datos son posteriormente puestos a disposición de los centros de procesamiento. La red es semanalmente calculada por estos centros de procesamiento que se encuentran distribuidos en diferentes países del continente (2).

Cada semana, los centros de procesamiento SIRGAS adelantan el cálculo de las soluciones semilibres de los diferentes sectores de la red SIRGAS-CON. El cálculo se efectúa cumpliendo una serie de estándares internacionales en cuanto al tipo de procesamiento de los datos por medio del uso programas como Bernese GNSS Software o GAMIT. Estos resultados constituyen las denominadas soluciones semanales semilibres de la red, que constituyen coordenadas geocéntricas que no están vinculadas a ningún

marco de referencia. Las soluciones semilibres son posteriormente combinadas en un solo ajuste para generar las llamadas soluciones semanales finales.

Las coordenadas geocéntricas ya integradas en el marco de referencia son válidas para la semana en que fueron calculadas. La importancia de las soluciones finales radica en el hecho precisamente de que ya están integradas dentro del marco de referencia y, por lo tanto, constituyen la posición real de la estación para cada semana. Este vector de coordenadas, ya tiene aplicabilidad práctica y científica.

1.2. Posicionamiento Puntual Preciso (PPP)

El posicionamiento diferencial clásico requiere de la combinación de observaciones usando al menos dos receptores GPS, uno de los cuales deberá estar ubicado en una estación con coordenadas conocidas. La posición de una estación, por lo tanto, puede estimarse desde uno o varios puntos usando observaciones de diferencia de fase en el procesamiento de las líneas bases. Esta es una forma efectiva para cancelar errores comunes entre los satélites y los receptores. Si a este método se le suma el uso de las órbitas precisas o finales, la exactitud en las coordenadas de las estaciones se incrementa notablemente. Sin embargo, existe una alternativa al posicionamiento diferencial de una estación. Este método inicialmente consideró órbitas precisas de satélites y mediciones Doppler y fue introducido a inicios de la década de 1970 con el nombre "Precise Point Positioning" (PPP) (3).

1.2.1. Ecuaciones de observación del PPP

La combinación libre de ionosfera para observables de pseudodistancias y fase relacionan la posición del observador, el reloj, el efecto troposférico y las ambigüedades de la siguiente manera (3):

$$\begin{aligned} I_p &= \rho + c(dt - dT) + Tr + \varepsilon_p \\ I_\Phi &= \rho + c(dt - dT) + N\lambda + \varepsilon_\Phi \end{aligned} \quad [1]$$

donde:

I_p : combinación libre ionosfera para L1 y L2 en pseudodistancias

I_Φ : combinación libre ionosfera para L1 y L2 en fase

dt : diferencia del reloj del receptor con el tiempo GPS

dT : diferencia del reloj del satélite con el tiempo GPS

c : velocidad de la luz en el vacío

Tr : retraso de la señal debido a la tropósfera

λ : longitud de onda

N : ambigüedad

$\varepsilon_p, \varepsilon_\Phi$: errores adicionales

La distancia geométrica r entre el satélite y el receptor se determina en función de las coordenadas del satélite $[X_s, Y_s, Z_s]$ y de la estación $[X, Y, Z]$. El procedimiento posteriormente expresa el Tr en función de la ruta del retraso (zpd), por medio de una función de mapeo (M) que relaciona el retraso troposférico con la elevación del satélite. Luego, se elimina la componente asociada con el reloj del satélite de manera de que el modelo matemático se puede expresar como (3):

$$\begin{aligned} f_p &= \rho + cdt + Mzpd + \varepsilon_p - l_p = 0 \\ f_\phi &= \rho + cdt + Mzpd + N\lambda + \varepsilon_\phi - l_\phi = 0 \end{aligned} \quad [2]$$

En donde el vector de incógnitas tendrá las coordenadas de la estación, el estado en el reloj del satélite, las componentes del retraso troposférico y las ambigüedades para los j -ésimo satélite (3):

$$X^T = [X \ Y \ Z \ dt \ zpd \ N^j] \quad [3]$$

La solución del procedimiento de ajuste, considerando previamente constreñimientos a los parámetros, está dada por (3):

$$\delta = -(P_{x^0} + A^T P_l A)^{-1} A^T P_l W \quad [4]$$

Con el vector δ , se obtienen los parámetros ajustados y su matriz de covarianza (3):

$$\hat{X} = X^0 + \delta ; C_{\hat{X}} = (P_{x^0} + A^T P_l A)^{-1} \quad [5]$$

Los valores del vector de parámetros se obtienen por medio de un ajuste por mínimos cuadrados, cuya secuencia se describe en (3). En este tipo de posicionamiento, se consideran los siguientes tres grupos de correcciones adicionales: efectos satelitales, efectos por el desplazamiento de la estación y consideraciones de compatibilidad (3).

El proceso ajuste, de manera que se obtenga el vector de parámetros, se describe en Kouba y Héroux (3). En este tipo de posicionamiento, se consideran los siguientes tres grupos de correcciones adicionales: efectos satelitales, efectos por el desplazamiento de la estación y consideraciones de compatibilidad (3).

1.3. El Sistema de Referencia Espacial de Canadá (CSRS)

La función principal del Servicio Geodésico de Canadá (CGS) es definir, mantener, mejorar continuamente y facilitar el acceso eficaz a la red de Referencia Espacial Canadiense (CSRS) a través de diversas herramientas geodésicas y productos (4). Una de ellas es el CSRS-PPP, el cual permite el procesamiento de observaciones GPS ya sea

con una o dos frecuencias y en la modalidad estática o cinemática. La exactitud en los resultados del procesamiento CSRS-PPP está basada en el uso de productos del IGS tales como órbitas finales, parámetros del reloj y mapas ionosféricos (5, 6), así como offsets de antenas y modelos para el retraso troposférico que incluyen las componentes húmedas y secas (7). El CSRS-PPP genera una versión resumida y una versión detallada con los resultados del procesamiento los cuales se pueden descargar desde el vínculo respectivo, el cual es enviado por medio de correo electrónico. El uso del servicio es sumamente sencillo y el mismo se puede acceder desde la siguiente dirección: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ppp>

En la actualidad, el CSRS-PPP tiene a su disposición una versión ejecutable que permite subir una enorme cantidad de archivos al mismo tiempo. Los usuarios pueden enviar los datos de observación RINEX de receptores de una o dos frecuencias, ya sean mediciones estáticas o cinemáticas. Se da la posibilidad de generar las soluciones dentro del marco de referencia canadiense o dentro del ITRF.

2. METODOLOGÍA

La metodología que se desarrolló tomó como base, fundamentalmente, los resultados derivados de los procesamientos en línea con el servicio CSRS. Las coordenadas geocéntricas que se obtuvieron de este proceso son denominadas internamente como soluciones PPP, mientras que las coordenadas geocéntricas finales obtenidas de la web de SIRGAS son denominadas como soluciones SIR. De esta manera, cada una de las 10 estaciones consideradas en el estudio contaba con dos juegos de coordenadas geocéntricas (PPP y SIR).

2.1. La red de estaciones GNSS

Las 10 estaciones costarricenses escogidas para el estudio pertenecen a la red SIRGAS-CON y son procesadas semanalmente por el Centro Nacional de Procesamiento de Datos GNSS (CNPDG de Costa Rica). Las estaciones son administradas por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia de la Universidad Nacional (ETCG. UNA) y el Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica (IGNCR).

2.2. Recuperación de los archivos de observación de las estaciones GNSS

Los archivos de observación de las 10 estaciones de la red SIRGAS de Costa Rica fueron facilitados por el CNPDG. Los archivos suministrados estaban en formato rinex de 24 horas y previamente formateados a observaciones cada 30 segundos contemplando mediciones GPS y GLONASS, principalmente. El procedimiento para el cálculo con el servicio CSRS se hizo en etapas para no hacer una saturación del sistema. El CSRS dispone en la actualidad de una herramienta denominada CSRS-PPP que instala y permite el envío simultáneo de gran cantidad de archivos para su procesamiento.

Tabla 1. Administrador, domes number y coordenadas elipsoidicas aproximadas de las estaciones de la red SIRGAS de Costa Rica

Estación	Administrador	Domes Number	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altura elipsoidal
AACR	AyA	40602M001	9,938848°	-84,117917°	1123,94 m
CRCP	CeNAT	40612M001	9,950879°	-84,125016°	1084,39 m
ETCG	ETCG. UNA	40612M002	9,999484°	-84,105896°	1193,61 m
LIBE	IGNCR	40604M001	10,630612°	-85,437882°	163,79 m
LIMN	IGNCR	40605M001	9,993092°	-83,026368°	25,05 m
NEIL	IGNCR	40606M001	8,644353°	-82,944390°	66,52 m
NICY	IGNCR	40607M001	10,142458°	-85,454552°	151,56 M
PUNT	IGNCR	40608M001	9,979878°	-84,832135°	23,65 M
RIDC	IGNCR	40609M001	9,919684°	-84,049072°	1212,15 M
SAGE	IGNCR	40610M001	9,373137°	-83,704255°	723,16 M

2.3. Resultados del servicio de procesamiento CSRS

Los resultados del procesamiento con CSRS son enviados al correo electrónico seleccionado. En este mensaje, se adjunta un archivo comprimido que contiene una serie de archivos con diferente información en formatos: un *.pdf, con un resumen del procesamiento, un *.csv con las correcciones al reloj del receptor, un *.pos con las posiciones según el intervalo del rinex y un *.sum del cual se extraen las coordenadas de la estación y el sector de la matriz de varianza-covarianza. Los valores del archivos *.sum son trasladados a un archivo común en formato *.xlsx. En este archivo *.xlsx se consignaron manualmente, por lo menos durante la ejecución del proyecto, los datos de fecha, coordenadas geocéntricas y valores de la submatriz de varianza-covarianza.

2.4. Comparación de las diferentes soluciones

Las coordenadas PPP y las coordenadas SIR se integraron en el mismo archivo para calcular las siguientes variantes:

- Diaria PPP: La cuantificación de estas diferencias toma los datos provenientes directamente de las soluciones PPP. La variabilidad en las coordenadas diarias de cada una de las estaciones permite observar cómo cambian las soluciones en función del tiempo.
- Promedio semanal PPP: Los datos de las soluciones PPP diarios fueron promediados, es decir, una solución PPP válida para el día miércoles de cada semana.
- Promedio semanal PPP y finales semanales SIR: La comparación final se da entre las coordenadas geocéntricas PPP promediadas y las soluciones semanales finales de SIRGAS, cuya época es el día miércoles de cada semana a las 12:00:00 UT.

3. RESULTADOS

3.1. Cuantificación de las diferencias

Las diferencias en coordenadas geocéntricas, producto de las comparaciones establecidas, se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Valores mínimos, máximo y promedio de las diferencias de coordenadas según la metodología

EST.	Diarias PPP [mm]			Promedios PPP [mm]			SIRGAS [mm]		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
AACR	-16,4	-55,9	-10,9	-2,7	-40,4	-1,4	-7,8	-30,6	-4,8
	23,7	19,7	23,5	18,4	8,5	23,6	7,1	18,8	7,9
	4,3	-14,6	9,6	5,5	-15,5	13,3	-1,1	-4,1	2,3
CRCP	-12,2	-55,2	-11,2	-2,5	-9,3	-3,5	-8,4	-10,4	-9,3
	50,0	42,8	64,2	24,1	23,2	24,1	17,7	26,7	6,4
	7,9	8,7	5,3	9,0	4,1	9,1	1,2	2,2	-1,7
ETCG	-17,9	-35,8	-9,8	-0,7	-6,3	-4,1	-6,2	-7,7	-3,5
	18,5	41,0	20,8	13,9	22,4	17,1	8,3	20,5	8,3
	6,3	5,7	6,9	5,7	6,5	8,5	0,4	3,7	1,1
LIBE	-14,3	-20,4	-10,7	-1,8	-5,3	-4,9	-3,8	-7,7	-3,3
	13,5	42,9	14,2	8,9	16,5	10,8	7,6	16,2	5,9
	-1,0	11,1	2,7	3,3	3,5	2,5	1,7	3,8	0,9
LIMN	-13,5	-44,1	-16,4	-3,9	-8,2	-3,3	-3,6	-15,8	-2,6
	39,2	54,1	13,7	24,2	19,7	10,1	10,7	18,5	8,1
	10,7	8,6	-1,8	8,1	6,7	4,3	3,6	2,0	0,8
NEIL	-10,4	-12,6	-8,2	-0,2	-6,6	-3,2	-2,2	-10,4	-2,6
	28,9	47,2	24,0	23,9	18,4	17,8	12,5	7,2	5,5
	11,5	16,1	6,9	11,8	6,2	10,1	3,0	-0,8	0,7
NICY	-16,9	-23,9	-8,6	-4,8	-12,7	-2,2	-4,7	-13,5	-4,1
	14,1	38,4	13,1	10,2	9,2	8,8	8,5	9,4	3,7
	0,9	5,2	2,5	2,9	-0,6	3,6	3,1	-0,5	0,5
PUNT	-9,0	-10,8	-12,0	-2,8	-4,4	-1,3	-3,0	-14,4	-2,3
	27,0	58,8	20,6	14,9	24,2	13,9	8,0	9,1	12,0
	8,6	14,7	5,9	5,7	9,4	7,5	2,1	0,1	0,6
RIDC	-28,6	-33,7	-9,7	-5,8	-18,3	0,0	-5,1	-17,0	-2,4
	19,1	39,3	17,2	14,3	14,6	19,7	8,6	8,3	3,5
	5,1	6,9	4,7	5,1	1,9	10,6	1,7	0,0	0,2
SAGE	-18,9	-26,1	-9,0	-1,0	-10,6	-2,1	-5,4	-8,9	-15,3
	29,6	23,3	22,2	27,3	14,3	21,5	7,2	9,6	6,8
	9,7	0,5	8,5	11,3	1,5	12,0	0,6	0,4	-0,8

3.2. Interpolación de las discrepancias PPP y SIRGAS

Los mapas de interpolaciones se realizaron con el programa ArcMap 10.4 de ESRI, mediante la extensión Geostatistical Analysis. El método seleccionado fue de la media Ponderada por el Inverso de la Distancia (Inverse Distance Weight IDW), la cual es una técnica determinística de tipo exacta basada en operaciones matemáticas. La misma da resultados certeros y de mejor ajuste cuando se tiene poca cantidad de puntos de muestreo. Este método asume que los elementos que están más cercanos son más parecidos mientras que entre más lejos las similitudes son mínimas. De este modo, los valores de los sitios más próximos al que se va a predecir tendrán mayor influencia y por lo tanto más peso a la hora de pronosticar un dato no muestreado (8-10). El modelo general está dado por:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \gamma Z(s_i) \quad [6]$$

Donde el valor $Z(S_0)$ es el valor que intentamos predecir para el s_0 . N es el número de puntos de muestreo que se usarán para la predicción y γ es el peso asignado a cada punto de muestra, el cual decrece con la distancia. $Z(S_i)$ es el valor observado del lugar i (11). En el método IDW cuando la distancia de los puntos muestrales se incrementa respecto del punto a predecir, el peso es reducido por un factor p . Entre mayor sea p , mayor peso es dado a los puntos más cercanos y por consiguiente se obtienen superficies más continuas o suaves y las predicciones tienden hacia el promedio de la muestra (12). Los valores p usualmente están entre 1 y 3, donde 2 es el más común (13); de acuerdo a resultados de este mismo autor, la exactitud del IDW se ajusta con mayor certeza en $p = 2$. En la tabla 3 se presentan los resultados estadísticos de la interpolación realizada.

Tabla 3. Variables obtenidas del proceso de interpolación IDW para el procesamiento PPP y soluciones SIRGAS

Variable	Residuos	Procesamiento PPP [mm]		Procesamiento SIRGAS [mm]	
		[n,e]	[n,e,u]	[n,e]	[n,e,u]
Media	0,006	-0,615	-0,834	-0,155	-0,144
Desviación estándar	0,624	3,653	5,273	1,109	1,357

El método IDW se utilizó para generar superficies a nivel nacional respecto a las discrepancias en los componentes [n,e] y [n,e,u] encontradas individualmente en el procesamiento PPP (ver figuras 1 y 2) y el procesamiento SIRGAS (ver figuras 3 y 4).

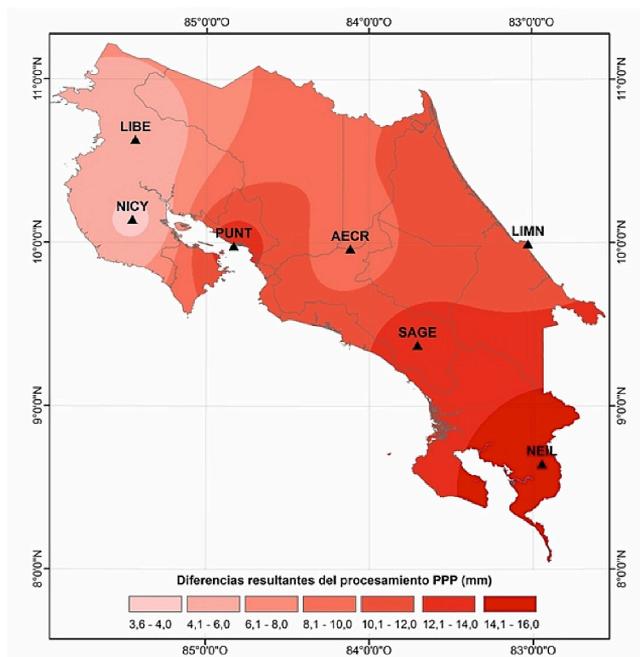


Figura 1. Diferencias horizontales [n,e] producto del procesamiento PPP.
Elaboración propia a partir de cartografía digital del Atlas de Costa Rica, ITCR, 2014

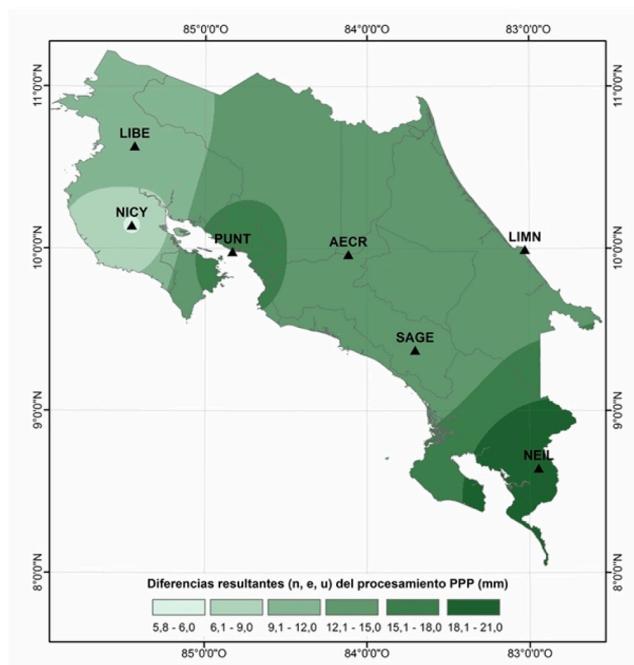


Figura 2. Diferencias tridimensionales [n,e,u] producto del procesamiento PPP.
Elaboración propia a partir de cartografía digital del Atlas de Costa Rica, ITCR, 2014

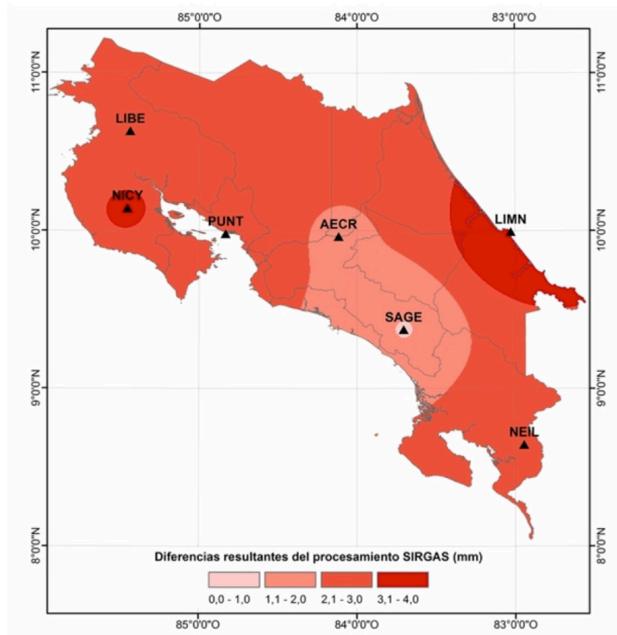


Figura 3. Diferencias horizontales [n,e] producto del procesamiento SIRGAS
Elaboración propia a partir de cartografía digital del Atlas de Costa Rica, ITCR, 2014

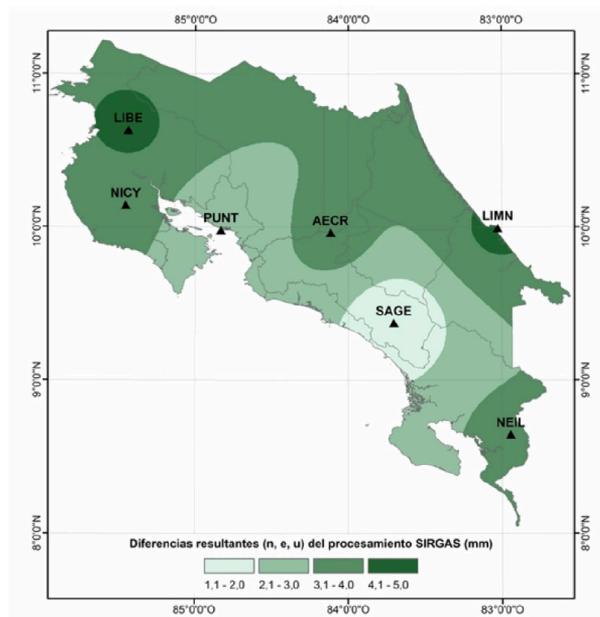


Figura 4. Diferencias tridimensionales [n,e,u] producto del procesamiento SIRGAS
Elaboración propia a partir de cartografía digital del Atlas de Costa Rica, ITCR, 2014

3.3. Transformación de coordenadas

Dos sistemas cartesianos tridimensionales se pueden relacionar por medio de las coordenadas conocidas de un conjunto de puntos en ambos sistemas. La relación entre ambos sistemas tridimensionales está por medio de 7 parámetros de transformación, que corresponden con un vector de tres traslaciones (DX, DY, DZ); entre los orígenes de ambos sistemas, una matriz de rotación R que reúne los giros RZ, RY, RX, respectivamente; y un factor de escala m (1). En este caso particular se determinaron 6 parámetros entre las soluciones PPP y SIRGAS por provenir de mediciones GNSS (ver ecuación 7).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SIR} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+m) \begin{bmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{PPP} \quad [7]$$

Para las 54 semanas de datos se determinaron los 6 parámetros de transformación con ayuda del Bernese GNSS Software, versión 5.2. En cuadro 4 se presentan los valores ajustados de los 6 parámetros de transformación y sus errores, obtenidos de un proceso de ajuste ponderado.

Tabla 4. Parámetros de transformación entre las soluciones PPP y SIRGAS

Parámetro	$v^T P v$	s_0	Valor ajustado	Error
Traslación en X	55,52	1,08	-58,47 mm	± 17,5 mm
Traslación en Y	51,84	1,04	-34,32 mm	± 6,2 mm
Traslación en Z	45,03	0,97	-161,60 mm	± 26,2 mm
Rotación en X	27,61	0,76	0,006500 "	± 0,000676 "
Rotación en Y	3,50	0,27	0,000837 "	± 0,000860 "
Rotación en Z	24,85	0,72	0,003594 "	± 0,000386 "

3.4. Estimación de velocidades

La realización de los marcos de referencia actualmente está dada por las coordenadas X_0, Y_0, Z_0 para una época fija t_0 y sus variaciones lineales en el tiempo $dX/dt, dY/dt, dZ/dt$ y las coordenadas X de una época t_1 se extrapolan por medio por medio de:

$$X(t_i) = X_0 + \frac{dX}{dt}(t_i - t_0) \quad [8]$$

Las velocidades así determinadas siguen un modelo lineal, que no corresponde exactamente con el comportamiento real de muchas de las estaciones, que pueden estar afectadas eventualmente de otras fuentes externas de carácter físico (14, 15). El tiempo requerido para la estimación de la velocidad de una estación GNSS de operación continua debe ser de al menos dos años, de manera que se puedan contemplar los posibles efectos de carácter cíclico como por ejemplo cargas por lluvia o nieve, entre otras. La estimación de la velocidad de las 10 estaciones SIRGAS de Costa Rica se hizo únicamente para tener una idea de su cinemática derivada del procesamiento PPP y como comprobación de los valores dados por las soluciones semanales SIRGAS para el período comprendido. Esta determinación se hizo con base en la rutina VelMIC, y cuyo algoritmo se puede seguir en Moya *et al* (16, 17). En la tabla 5 se presentan las diferencias en las componentes topocéntricas del vector velocidad, mientras que en la Fig.5 se muestran los vectores velocidad.

Tabla 5. Componentes topocéntricas de la velocidad derivada de los procesamientos PPP y SIRGAS y sus diferencias

EST.	Procesamiento PPP [m/a]			Procesamiento SIR [m/a]			Diferencias SIR y PPP [m/a]		
	Vn	Ve	Vu	Vn	Ve	Vu	DVn	DVe	DVu
AACR	0,0231	0,0151	0,0119	0,0170	0,0137	-0,0026	-0,0061	-0,0014	-0,0145
CRCP	0,0209	0,0222	-0,0096	0,0167	0,0178	0,0016	-0,0042	-0,0044	0,0112
ETCG	0,0219	0,0115	-0,0123	0,0189	0,0114	0,0000	-0,0030	-0,0001	0,0123
LIBE	0,0143	0,0056	-0,0121	0,0103	0,0030	0,0038	-0,0040	-0,0026	0,0159
LIMN	0,0107	0,0200	-0,0201	0,0097	0,0175	-0,0088	-0,0010	-0,0025	0,0113
NICY	0,0202	0,0247	-0,0143	0,0102	0,0083	0,0029	-0,0100	-0,0164	0,0172
NEIL	0,0097	0,0099	-0,0066	0,0214	0,0200	-0,0072	0,0117	0,0101	-0,0006
PUNT	0,0124	0,0126	0,0007	0,0159	0,0114	-0,0075	0,0035	-0,0012	-0,0082
RIDC	0,0189	0,0181	-0,0139	0,0170	0,0152	-0,0030	-0,0019	-0,0029	0,0109
SAGE	0,0223	0,0253	-0,0093	0,0244	0,0223	-0,0055	0,0021	-0,0030	0,0038

4. DISCUSIÓN

- La variabilidad del procesamiento PPP diario, presentó valores promedio entre los -28,6 mm y los 50,0 mm para la coordenada X; entre los -55,9 mm y los 58,8 mm para la coordenada Y y de los -16,4 mm y los 64,2 mm en la coordenada Z. Esto respresenta unos 79,0 mm, 115,0 mm y 81,0 mm de intervalo de diferencias diarias en el período de tiempo seleccionado. Los valores son completamente normales cuando se aplica este tipo de procesamiento.

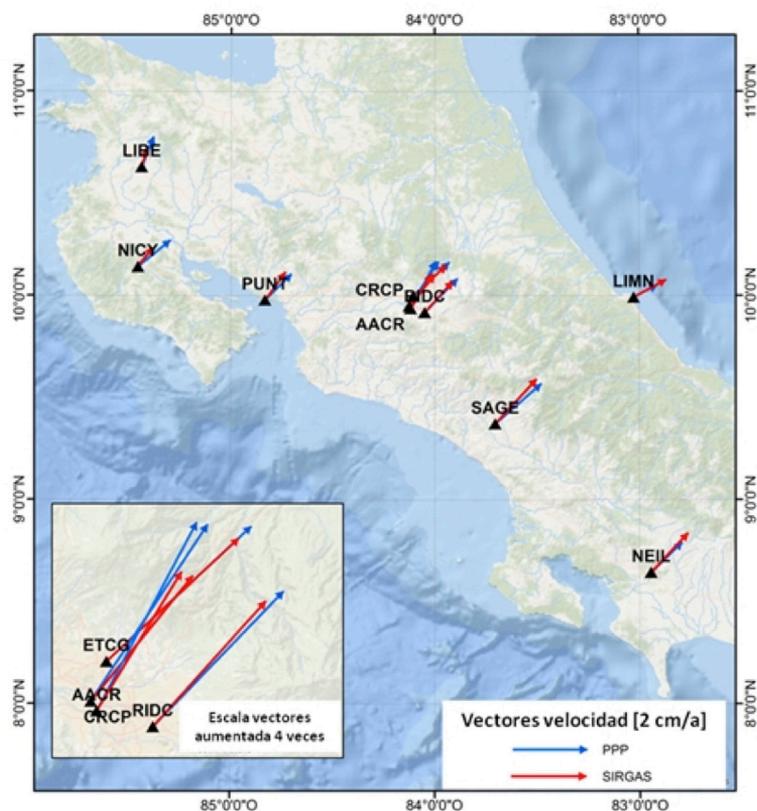


Figura 5. Comparación de los vectores velocidad producidos de los procesamientos PPP y SIRGAS
Elaboración propia a partir de cartografía digital en línea de los recursos de ESRI,
a través del licenciamiento Campus, UNA, 2016

- La variabilidad del procesamiento PPP diario, respecto a la posición promedio semanal reducida a los días miércoles, presentó valores promedio entre los -5,8 mm y los 27,3 mm para las coordenadas X; entre los -40,4 mm y los 24,2 mm en la coordenada Y y entre los -4,9 mm y los 24,1 mm para la coordenada Z. Estos valores representan unos 33,0 mm, 65,0 mm y 29,0 mm de intervalo para las coordenadas [X,Y,Z], respectivamente. Se nota cómo estos valores decrecen en un promedio de 46 mm, 50 mm y 52 mm para las coordenadas [X,Y,Z]. Es notable cómo se obtuvo una diferencia prácticamente sistemática de 50 mm al comparar la variabilidad diaria, respecto al valor reducido.
- La variabilidad de los valores calculados por SIRGAS (soluciones semanales) poseen una alta consistencia, lo que permitió que estas series temporales sean un excelente parámetro de comparación para los resultados derivados del procesamiento PPP. Se aprecia una alta consistencia representada por valores promedio para la coordenada X de entre los -8,4 mm y los 17,7 mm; entre los -30,6 mm y los 26,7 mm para la coordenada Y, y de -15,3 mm y los 12,0 mm en la coordenada Z. Estos límites representan en promedio unos 26,0 mm en X; de unos 57,0 mm en Y

y de 27,0 mm en la coordenada Z. Los valores anteriores muestran en principio un desplazamiento prácticamente igual en las componentes horizontales topocéntricas y un desplazamiento vertical de casi 6,0 cm y comprueban de manera preliminar las diferencias entre ambas determinaciones.

- Los resultados del procesamiento semanal PPP y SIRGAS de cada una de las estaciones y su interpolación con el método IDW para las componentes horizontales [n,e] y comportamiento tridimensional [n,e,u], son una estimación, la cual depende principalmente de los datos obtenidos y en gran medida de la distribución espacial de los puntos. Lo anterior confirma el hecho fundamental de poder contar más estaciones en sectores clave del país que permitan hacer una mejor interpolación de las variables. Sin embargo, los resultados brindan una idea general para los usuarios que deseen conocer valores a priori del método PPP usado en las mismas condiciones.
- Los mapas dados en las figuras 1, 2, 3 y 4 presentan prácticamente la determinación de las zonas de influencia de los valores obtenidos en cada una de las estaciones. Por ejemplo, se aprecia como en la Fig. 1, las diferencias horizontales del procesamiento diario PPP aumenta en dirección oeste-este, destacando una franja que cubre todo el sector caribeño y centro sur del país. En el caso de la Fig. 2, las diferencias tridimensionales PPP de tres zonas: el sector occidental de Costa Rica dado por las estaciones NICY y LIBE, una zona central de casi 2° de ancho dado por los valores de las estaciones centrales, más SAGE y LIMN. Y una tercera zona en sector suroriental dado por la estación NEIL.
- El mapa de la Fig. 3 define prácticamente dos zonas importantes: la que se ubica en el sector centro-sur del país dado por las estaciones centrales y SAGE con los valores más bajos. El resto del país se ve representado por los valores de las estaciones LIBE, NEIL, PUNT con valores intermedios, con dos zonas pequeñas concéntricas en las estaciones NICY y LIMN con las mayores diferencias. Las diferencias tridimensionales del procesamiento SIRGAS, representadas en la Fig. 4, muestran un comportamiento en el que los mayores valores están dados en la zona occidental, norte y Caribe del país; mientras que los valores intermedios están ubicados en la zona sur de Costa Rica, con las menores diferencias alrededor de la estación SAGE.
- La determinación de los 6 parámetros de transformación entre las soluciones PPP y las soluciones SIR, brindó para las 54 semanas de trabajo valores totalmente significativos. destacando un valor promedio de $-162 \text{ mm} \pm 26 \text{ mm}$ en la traslación en la coordenada Z, representando un desplazamiento en dirección norte-sur del sistema PPP respecto al marco SIRGAS.
- Los resultados obtenidos se usaron para hacer una estimación de las componentes geocéntricas de la velocidad de las estaciones procesadas. Aunque se sugiere nominalmente tener al menos 2,5 años de datos procesados, con el objetivo de conocer y descartar posibles efectos cíclicos en las series temporales, en este proyecto se utilizaron los valores diarios del procesamiento PPP y los valores semanales del procesamiento SIRGAS. Se debe aclarar que los resultados obtenidos con las soluciones semanales SIRGAS, no son oficiales, ya que SIRGAS trabaja con un procedimiento complejo y muy estructurado para dar estos valores. Sin embargo, se obtuvo una

alta consistencia en la velocidad resultante y la dirección como se aprecia en la Fig. 5, notándose cómo los vectores de color rojo y azul son prácticamente paralelos en dirección noreste.

5. CONCLUSIONES

Los resultados generados permitieron cuantificar principalmente las diferencias en coordenadas geocéntricas obtenidas de un procesamiento PPP en línea con el servicio CSRS de Canadá y los resultados derivados del procesamiento semanal científico efectuado primariamente por los Centros de Procesamiento y Centros de Combinación SIRGAS. Aunque en principio los dos métodos de procesamiento de datos GNSS no son comparables desde el punto de vista de la exactitud puntual, los resultados encontrados en el proyecto permitieron concluir que:

- Existe una diferencia sistemática promedio de 50,0 mm al comparar coordenadas promediadas PPP con los datos diarios derivados del mismo procesamiento, y que de la comparación entre los resultados promediados por semana de la solución PPP comparados con las soluciones finales SIRGAS demostraron diferencias de 26 mm en las coordenadas [X,Y], mientras que en la coordenada [Z] su valor fue de 57 mm.
- Lo anterior evidencia que para trabajar haciendo posicionamiento PPP con CSRS, es necesario contemplar en promedio diferencias del orden anterior para una adecuada georreferenciación de la información espacial, si se considera como referencia el marco SIRGAS.
- Se logró generar un conjunto de parámetros de transformación derivados de 54 semanas de datos cuyos valores están en la tabla 5. Los valores encontrados son totalmente significativos, pero los mismos están afectados de la propia cinemática del marco SIRGAS, es decir, la alta exactitud de la referencia interviene a la hora de definir un solo conjunto de datos en marco SIRGAS.
- Adicionalmente, los resultados obtenidos se usaron para hacer una estimación de la cinemática de las estaciones por medio de la determinación de las componentes geocéntricas de la velocidad, tanto con resultados PPP como con resultados SIRGAS.
- Los resultados generados con un procesamiento PPP en línea son una solución práctica, gratis y rápida, y ofrecen una alta potencialidad si se usa correctamente. No alcanza las exactitudes de la geodesia moderna, pero en otras aplicaciones puede brindar una opción a tener en cuenta.
- Los productos generados contribuyen a los trabajos efectuados en Costa Rica por Moya *et al.* (16), en los cuales se hizo uso de la técnica de procesamiento en línea bajo la modalidad PPP en la evaluación de la cinemática de un conjunto de estaciones ubicadas sobre la zona de Placa Caribe; y por Moya y Bastos (15), donde los resultados del procesamiento PPP sirvieron para la generación de una serie de recomendaciones de las potencialidades del este procesamiento en diferentes aplicaciones geodésicas.

6. REFERENCIAS

1. Hoffmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger y E. Wasle. GNSS Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo & more. New York: Springer Wein; 2008. 568 p.
2. SIRGAS. Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS). 2016. Disponible en: <http://www.sirgas.org>
3. Kouba, J. y P. Héroux. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. GPS Solutions. 2001;5(19):12-28.
4. NRCAN. Natural Resources Canada. 2016. Disponible en: <http://www.nrcan.gc.ca/home>
5. Alves Costa, S.M., A. Da Silva, N. J. De Moura, M. Gende y C. Brunin. Differential and Precise Point Positioning in the South American Region with Ionosphere maps. Observing our Changing Earth. International Association of Geodesy Symposia 133. 2009:605-613.
6. Mireault, Y., P. Tétreault, F. Lahaye, P. Héroux y J. Kouba. Online Precise Point Positioning. A New, Timely Service from Natural Resources Canada. GPS World. 2008;19(9):59-64.
7. Guo, Q. Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation. GPS Solutions. 2015;19:537-44.
8. Bosque, J. Sistemas de información geográfica. Madrid, Rialp. 1992. 451 p.
9. Cressie, N. Geostatistical: a tool for environmental modelers, environmental modelling with GIS. Nueva York, Oxford University Press. 1993;414-421.
10. Haining, J. Spatial data analysis. Cambridge, Cambridge University Press. 2003. 393 p.
11. Moreno, A. Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Editorial Rama. Madrid. 2005. 895 p.
12. Villatoro, M, C. Henríquez, F. Sancho. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. Revista Agronomía Costarricense. 2008.32(1):95-105.
13. Gotway C.A., R. B. Ferguson, G. W. Hergert, T. A. Peterson. Comparison of Kriging and Inverse Distance Methods for mapping soil parameters. Soil Science Society of American Journal. 1996;60:1237-47.
14. Moya, J. Desarrollo, Implementación y Análisis de un Modelo Cinemático Local de Velocidades para Costa Rica Basado en la Integración y Homogenización de Datos de Estaciones GNSS Continuas. [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid, España. 2015:129 p.
15. Moya, J., S. Bastos. Procesamientos GNSS en línea como potenciales alternativas a diferentes aplicaciones geodésicas. Revista UNICIENCIA. 2015;29(2):1-14.
16. Moya, J., Bastos, S., Rivas, M. J. y Gamboa, G. Evaluación del comportamiento cinemático de una serie de estaciones del Sistema Geocéntrico para las Américas procesadas con Precise Point Positioning en línea. Revista UNICIENCIA. 2014;28(1):2-19.
17. Moya, J., S. Bastos, M. J. Rivas. Cálculo, mediante la aplicación del algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados, de los componentes de velocidad para estaciones GNSS continuas. Revista UNICIENCIA. Universidad Nacional. 2014;28(2):1-14.