

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>
www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 2025 - VOLUMEN 35 (2)



Estrategias para la georreferenciación de levantamientos GNSS dentro del marco geodésico nacional CR-SIRGAS

Strategies for the Georeference of GNSS Surveys Within the CR-SIRGAS National Geodetic Frame

Ana Gabriela Morales Quesada ¹ , Jorge Moya Zamora ² 

¹ Inspectora, Municipalidad de Poás, Alajuela, Costa Rica.

correo: gmq0798@gmail.com

² Docente e investigador, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

correo: jorge.moya.zamora@una.cr

Palabras clave:

Época, georreferenciación, Global Navigation Satellite System (GNSS), parámetros de transformación, Sistema de Georreferencia para las Américas de Costa Rica (SIRGAS).

Recibido: 25/09/2024
Aceptado: 05/05/2025

Resumen

En el año 2020, el Registro Inmobiliario de Costa Rica publicó las directrices DRI-001-2020 y DIG-001-2020, las cuales actualizan el vínculo de la información geoespacial al marco geodésico de referencia nacional CR-SIRGAS. Para acatar estas directrices, se debe transformar las coordenadas entre marcos geodésicos, debido a la definición de la primera versión de CR-SIRGAS, que emplea la época 2014, 59 del Marco Internacional de Referencia Terrestre 2008 (ITRF por sus siglas en inglés). Se presentan los resultados de seis variantes aplicadas para ir a la época 2019,24 y dos subvariantes para llegar hasta la época 2014,59 del marco geodésico CR-SIRGAS. Dichas variantes y subvariantes de georreferenciación fueron aplicadas a 31 levantamientos de puntos nuevos en modalidad estática y dos levantamientos en la modalidad RTK. Las variaciones consideradas entre cada procesamiento incluyeron el uso de parámetros de transformación oficiales del Instituto Geográfico Nacional, cálculo de parámetros propios, uso de efemérides rápidas y finales del Servicio Internacional de GNSS (IGS), además del uso de la plataforma web de postprocesamiento brindada por el Instituto Geográfico Nacional, denominada Spider Business Center. Dependiendo del procesamiento para ir desde su época de medición (t_i) hasta la época de referencia ($t_0 = 2019,24$), las diferencias en las coordenadas geocéntricas estuvieron en el orden de ± 4 mm hasta un máximo de ± 4 cm. Posteriormente, se realizó un análisis comparativo entre parámetros de transformación y valores en los residuales de cada variante y subvariante, al excluir el factor de escala del cálculo de parámetros de transformación propios.

Keywords:

Epoch, georeferencing, Global Navigation Satellite System (GNSS), Sistema de Georreferencia para las Américas de Costa Rica (SIRGAS), transformation parameters.

Abstract

In 2020, the Real Estate Registry of Costa Rica published guidelines DRI-001-2020 and DIG-001-2020, which update the linkage of geospatial information to the national geodetic reference frame CR-SIRGAS. To comply with these guidelines, coordinating transformations between geodetic reference frames are required, due to the definition of the first version of CR-SIRGAS, which uses epoch 2014.59 of the International Terrestrial Reference Frame 2008 (ITRF2008). This document presents the results of six variants applied to transform to epoch 2019.24 and two sub-variants to reach epoch 2014.59 of the CR-SIRGAS geodetic frame. These georeferencing variants and sub-variants were applied to 31 new point surveys using the static method and two surveys using the RTK method. The processing variations considered included the use of official transformation parameters provided by the National Geographic Institute (IGN), the calculation of custom parameters, the use of rapid and final ephemerides from the International GNSS Service (IGS), and the use of the web-based post-processing platform provided by the IGN, called Spider Business Center. Depending on the processing method used to transform from the measurement epoch (t_i) to the reference epoch ($t_0 = 2019.24$), differences in geocentric coordinates ranged from ± 4 mm to a maximum of ± 4 cm. Subsequently, a comparative analysis was conducted between transformation parameters and residual values for each variant and sub-variant, excluding the scale factor in the calculation of custom transformation parameters.

DOI: 10.15517/ri.v35i2.62017



I. INTRODUCCIÓN

En el año 2020, el Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica, como parte de sus actividades técnicas, decretó la actualización del marco geodésico nacional. De esta forma, con el objetivo de procurar un enlace entre las épocas de referencia de las dos versiones de CR-SIRGAS (Sistema de Georreferencia para las Américas de Costa Rica), se publica la directriz DIG-001-2020, donde se oficializan un conjunto de parámetros de transformación entre las épocas de referencia 2019,24 y 2014,59 [1], [2].

En ese mismo año, el Registro Inmobiliario publica la directriz DRI-001-2020 con el fin de actualizar la época y marco de referencia geodésico de los datos catastrales del país. Esta dicta que todo levantamiento con fines catastrales debe ser georreferenciado al marco geodésico oficial CR-SIRGAS, para la época 2014,59, a partir del 1 de febrero de 2021 [3].

Como resultado de la entrada en vigencia de las directrices, se estandariza el marco geodésico al que debe estar vinculada la información geoespacial del país. De esta manera, tanto la información existente como la que se genere a futuro estará vinculada a un marco geodésico nacional más actual.

Sin embargo, no existe una normativa que obligue a los profesionales a seguir un proceso en concreto para procesamiento de los datos de sus levantamientos GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Esto deja la posibilidad de que cada profesional realice el cálculo de parámetros de transformación según sea la necesidad del proyecto.

Las mediciones GNSS dependen de las coordenadas satelitales dentro del Marco Internacional Terrestre de Referencia vigente al momento de la captura de los datos. Por lo anterior, es imperativo que los profesionales conozcan cómo realizar el proceso de cálculo a sus datos recolectados hacia el marco geodésico deseado o al marco geodésico regulado, según lo establecido por el Registro Nacional. Esto debido a que infraestructuras de datos espaciales como el Sistema de Información del Registro Inmobiliario (SIRI) dependen de la calidad de la georreferenciación de la información recopilada. Lo anterior implicó que se analizaran distintas variantes de georreferenciación para cuantificar las diferencias en las coordenadas cartográficas. Con esto, se logra determinar y evaluar los resultados obtenidos de cada variante aplicada y la forma en que se procesa la información hacia el marco geodésico CR-SIRGAS, época 2014,59 [4].

II. METODOLOGÍA

Los datos utilizados se obtuvieron de cuatro fuentes diferentes. Primero, archivos de observación de las estaciones de medición continua que conforman el marco geodésico nacional CR-SIRGAS [5]. Segundo, mediciones GNSS realizadas directamente sobre varios puntos nuevos tomados en diferentes locaciones del país. Tercero, archivos de observación de estaciones de medición continua que pertenecen a la red del Consorcio de Universidades NAVSTAR (UNAVCO) [6], actualmente EarthScope.

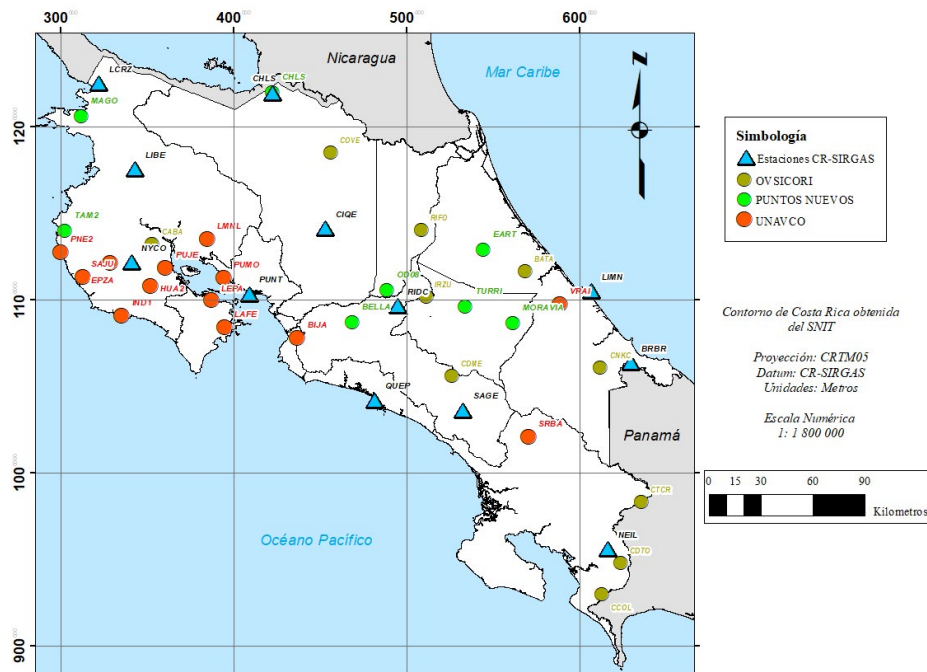


Fig. 1. Distribución geográfica de los datos utilizados en la investigación. Fuente: elaboración propia basado en [4].

Por último, mediante la solicitud de datos de estaciones por medio de consulta directa vía correo electrónico al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI). Para el procesamiento de datos crudos de los levantamientos, se utilizaron dos plataformas dependiendo de la variante aplicada. Por un lado, el *software* Trimble Business Center (TBC) con licencia de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia [7]. Por otro, el servicio de descarga y postprocesamiento en línea de la red de estaciones GNSS Registro Nacional e Instituto Geográfico Nacional [8]. Asimismo, las efemérides finales y rápidas fueron descargadas desde la página web del Sistema de Información de Datos de Dinámica de la Corteza (CDDIS) [9].

Todos los cálculos relacionados con la transformación entre épocas de medición se ejecutaron en el *software* de licencia libre Octave 6.1.0 [10]. En la Fig. 1, se puede observar la distribución geográfica de los datos de las estaciones GNSS utilizadas en la investigación. La simbología circular corresponde a puntos pasivos, mientras los triángulos representan estaciones de medición continua.

A. Variantes de georreferenciación

Las épocas de medición de los puntos nuevos estuvieron contenidas entre los años 2021 y 2022. La metodología desarrollada contempló el diseño de seis variantes para tratamiento de datos en la georreferenciación. Se usaron una serie de archivos RINEX de 24 horas como principal insumo de este trabajo. De acuerdo con la metodología planteada, se definieron dos subvariantes identificadas con las letras A y B.

Estas representan dos formas para ir desde CR-SIRGAS 2019,24 a CR-SIRGAS 2014,59. La A es el cálculo de parámetros propios eligiendo los puntos de amarre según ubicación del levantamiento, distancia a los puntos de amarre y comportamiento de los residuales de las estaciones seleccionadas durante el cálculo. La B consistió en hacer uso de los parámetros oficiales publicados por el de IGN [1]. Si bien es cierto que se tiene un conjunto de parámetros nacional, esta variante se desarrolló para la comparación de resultados. La descripción de cada variante se puede observar en el CUADRO I [4].

CUADRO I
DESCRIPCIÓN DE LAS VARIANTES DE CÁLCULO PARA GEORREFERENCIACIÓN

Variante	Condiciones	Desarrollo
1	Época de medición t_i Coordenadas de enlace en época t_i Órbitas finales para época t_i	i. Post procesamiento y enlace a época de medición t_i ii. Cálculo y aplicación de parámetros de transformación a la época 2019,24. iii. Aplicación de subvariantes A y B para ir a la época 2014,59.
2	Época de medición t_i Coordenadas de enlace en época t_i condicionadas por la plataforma Órbitas condicionadas por la plataforma	i. Envío de los datos al servicio de descarga de datos RINEX y \ postprocesamiento en línea del IGN, obteniendo coordenadas en la época 2019,24. ii. Aplicación de subvariantes A y B para ir a la época 2014,59.
3	Época de medición t_i Coordenadas de enlace en época t_0 2019,24 Órbitas finales para época t_i	i. Post procesamiento y enlace a época de medición t_0 ii. Aplicación de subvariantes A y B para ir a la época 2014,59.
4	Época de medición t_i Coordenadas de enlace en época t_0 2019,24 Órbitas rápidas para época t_i	i. Post procesamiento y enlace a época de medición t_0 ii. Aplicación de subvariantes A y B para ir a la época 2014,59.
5	Época de medición t_i Coordenadas de enlace en época t_0 2019,24 Órbitas finales para época t_i	i. Post procesamiento y enlace a época de medición t_i ii. Cálculo y aplicación de parámetros de transformación a la época 2019,24. iii. Aplicación de subvariantes A y B para ir a la época 2014,59.
6	Época de medición t_i Coordenadas de enlace en época t_0 2019,24 Órbitas finales para época t_i	i. Envío de los datos al servicio de descarga de datos RINEX y postprocesamiento en línea del IGN, obteniendo coordenadas en la época 2019,24. ii. Aplicación de subvariantes A y B para ir a la época 2014,59.

B. Postprocesamiento de datos

Los datos de los levantamientos GNSS fueron procesados en el *software* Trimble Business Center (TBC) [7], según las características de cada variante de georreferenciación aplicada y siguiendo el criterio de proximidad implementado en [11]. Se realizaron tres ajustes por cada punto nuevo en la modalidad de levantamiento GNSS estático. Esto según las variantes 1, 3, y 4, para un total de 93 ajustes. Para la metodología RTK, se utilizó un ajuste según la variante 5. En promedio, se trabajó con un total de $n = 12$ observaciones, correspondientes con cuatro puntos de enlace fijo por cada punto nuevo.

Además, un total de $u = 3$ incógnitas, las cuales consisten en las tres coordenadas geocéntricas del punto nuevo X, Y y Z. Esto permitió tener en cada procesamiento un total de $f = 9$ grados de libertad y pruebas estadísticas del 95 % de probabilidad [4], [12]. Para la selección de las estaciones de enlace, se empleó un criterio de proximidad entre el punto nuevo y las estaciones CR-SIRGAS [11].

C. Cálculo de parámetros de transformación

En la determinación de los parámetros de transformación entre las distintas épocas de medición, se utilizó el modelo de transformación de Molodensky-Badekas [11], [13] a través de un *script* realizado en el *software* libre Octave [10]. Para definir las tolerancias para los residuales determinados en los procesos de transformación, se calcularon parámetros de transformación desde todas las épocas de medición (t_i) a la época 2019,24. Así, se tomaron todos los puntos idénticos disponibles para realizar un análisis de residuales en sus coordenadas topocéntricas (n, e, u). Con esto, se asignaron las tolerancias que serán aplicadas para el análisis de los residuales de los procesos de transformación de cada punto nuevo, utilizando únicamente las cuatro estaciones de referencia más próximas para cada punto nuevo, según su ubicación geográfica. Las tolerancias se establecen con la finalidad de mantener la mayor semejanza entre las épocas por relacionar [14].

Los criterios para definición de las tolerancias obedecieron a factores como el tiempo transcurrido entre las épocas estudiadas y la época a la que se desea trasladar. Además de la cinemática del país, puesto que, gracias a ser una zona de actividad sísmica frecuente, se deben considerar los cambios en las coordenadas de las estaciones de medición continua, producto de la dinámica nacional del marco geodésico. Las tolerancias definidas se pueden observar en el CUADRO II, en la sección de resultados.

Una vez que todos los datos están en la época 2019,24, se aplicaron las subvariantes A y B para cada variante de georreferenciación. Para el caso de la variante A, que corresponde al cálculo de parámetros propios, se repitió el análisis de residuales previo a la definición de tolerancias. Se calcularon parámetros de transformación entre la época 2019,24 y 2014,59, con todos los puntos idénticos que corresponden a estaciones de medición continua. Para un total de seis puntos idénticos entre

ambas épocas, se definió tolerancia y, obedeciendo el criterio de cercanía, se utilizan las cuatro estaciones más próximas como puntos idénticos para cada punto nuevo. Adicionalmente, se repitió todo el proceso de cálculo para obtener parámetros de transformación, pero descartando el factor de escala con el fin de analizar la influencia de este factor en los residuales [4]. Las tolerancias definidas se pueden observar en el CUADRO III, en la sección de resultados

III. RESULTADOS

A. Aplicación de las variantes de georreferenciación

Los resultados de los ajustes realizados a los datos crudos en la variante 1 mostraron que, al procesar los levantamientos con órbitas finales y coordenadas de enlace al marco nacional correspondientes con su época de medición, el valor usado fue menor al asumido inicialmente. Esto aplica, por un lado, en los casos donde no se efectuó un proceso de ponderación a la varianza inicial de referencia. Por otra parte, también se mostró en aquellos que sí requirieron de una ponderación de varianzas. Esto indicó que se necesitó modificar el modelo estocástico del ajuste a un valor menor que cumpla las exigencias de calidad que tienen las observaciones del levantamiento [11], [15].

Situación contraria se dio en las variantes 3, 4 y 6, en las que se realiza un amarre forzoso a la época 2019,24. La varianza de referencia inicial de estos ajustes tuvo aumentos muy importantes, lo que indica que, al realizar equilibrio de varianzas para aceptación del modelo matemático, se reduce la calidad de los resultados. Esto se debe a que el equilibrio de varianzas aumenta la varianza de referencia inicial para lograr que el modelo matemático sea aceptado [11]. Las variantes 3 y 4 mostraron resultados similares, lo cual se ve reflejado en la Fig. 2, donde se puede apreciar las diferencias entre los valores de la desviación estándar (s_0) empíricos obtenidos y comparados con la variante 1.

Debido a que las variantes 5 y 6 presentaron un comportamiento similar en el procesamiento en el *software* TBC, se presentan los resultados de forma conjunta. El procesamiento de líneas base, entre la base y puntos nuevos, puntos nuevos y estaciones de enlace resultó en muchas alertas de desacoplamiento. Esto significó que la línea base no cumple con las tolerancias permitidas por el *software* TBC. Dichas alertas se representan por una bandera roja, tal como se observa en la Fig. 3, lo cual implica que la observación no pudo ser tomada en cuenta en el ajuste para procesamiento de la red.

En consecuencia, se reportó una importante cantidad de líneas base con desacoplamiento entre puntos RTK y puntos de enlace. En el campo, estos puntos descartados fueron observaciones RTK que, por temas de edificios, árboles y demás objetos cercanos, tuvieron una disminución en la calidad de las observaciones. A pesar de los puntos descartados, se continuó con el experimento de cálculo con los puntos que sí lograron ser procesados, por lo que se realizó el ajuste.

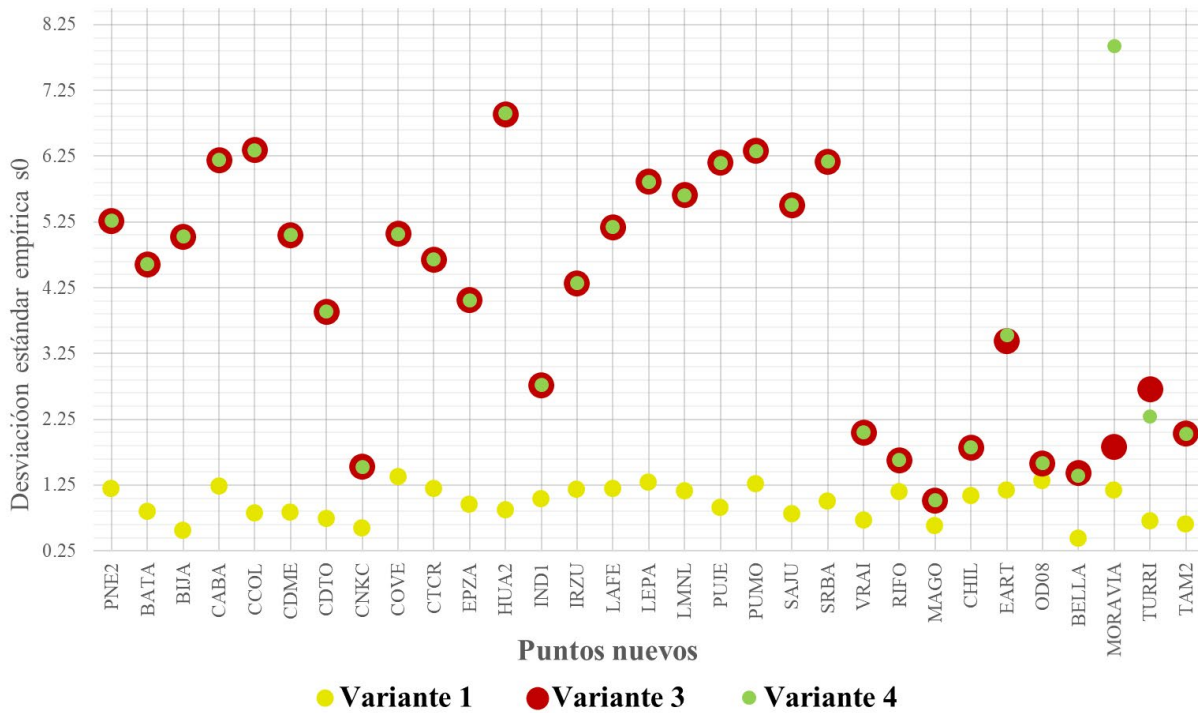


Fig. 2. Desviaciones estándar empíricas (s_0) obtenidas de los ajustes por mínimos cuadrados efectuados en el *software* TBC para los puntos nuevos, aplicando las variantes 1, 3 y 4.

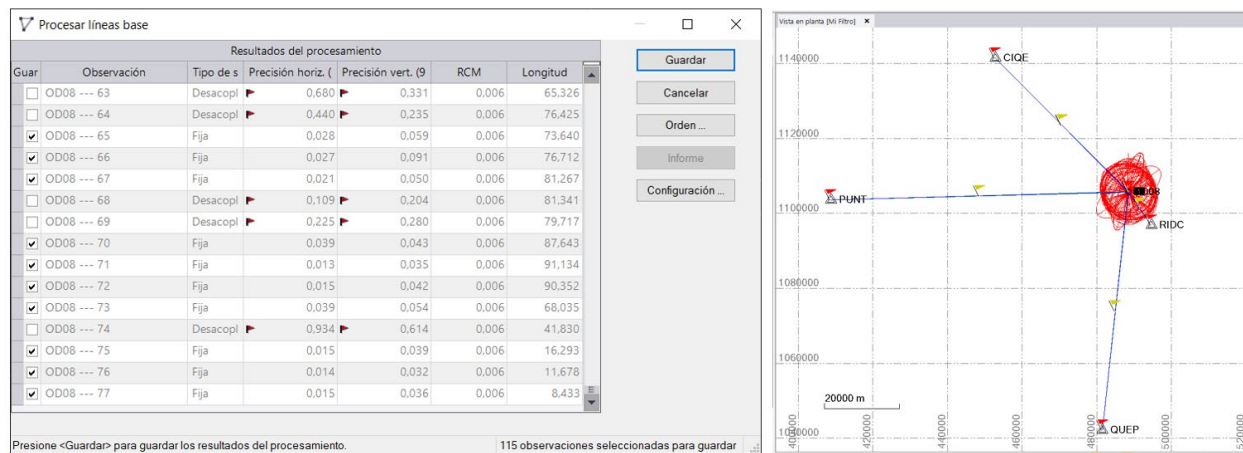


Fig. 3. Capturas de pantalla del TBC, procesamiento del levantamiento RTK del punto OD08, donde se aprecian desde una perspectiva más alejada los puntos de enlace con estaciones de medición continua CR-SIRGAS.[7]

B. Transformación de coordenadas desde la época t_i a 2019,24 CR-SIRGAS

Debido a la metodología de georreferenciación forzosa aplicada en las variantes 2, 3, 4 y 6, estas no necesitaron someterse a la transformación de coordenadas de la época t_i a la época 2019,24. Las variantes 1 y 5 fueron postprocesadas con las coordenadas de enlace en su respectiva época t_i , por lo que es necesario aplicar parámetros de transformación para llevar la información a la época 2019,24. Producto del cálculo de parámetros de transformación utilizando todas las estaciones de medición disponibles para la época de medición t_i , se analizaron los residuales obtenidos para cada estación. Con ello, se grafican los residuales topocéntricos (N, E, U) [16] en sus valores absolutos, como se ve en la Fig. 4. En esta, las columnas de datos se encuentran ordenadas de forma cronológica, iniciando de izquierda a derecha con la época 2021,05 y finalizando en la época 2022,67.

Los residuales representan la corrección que se le aplica durante el proceso de ajuste a las coordenadas de origen para llegar a las coordenadas de destino. Al realizar el cálculo general de parámetros de transformación entre cada época de medición t_i a la época 2019,24, con todos los puntos disponibles, se pueden observar patrones de crecimiento en los residuales conforme más tiempo transcurre desde la época 2019,24.

En la mayoría de las estaciones, se observa un incremento en sus residuales a medida que pasa el tiempo después de la época de 2019,24. Esto indica que, según avanza el tiempo desde la época de referencia, mayor es la corrección que se debe realizar a las coordenadas para trasladarse desde una época a otra. Con el valor de la magnitud de los residuales resultantes, calculada con los componentes este y norte de cada estación, se obtiene el mapa de interpolación (véase Fig. 5) por el método de Spline del *software* ArcGIS versión 10.8.2 [17].

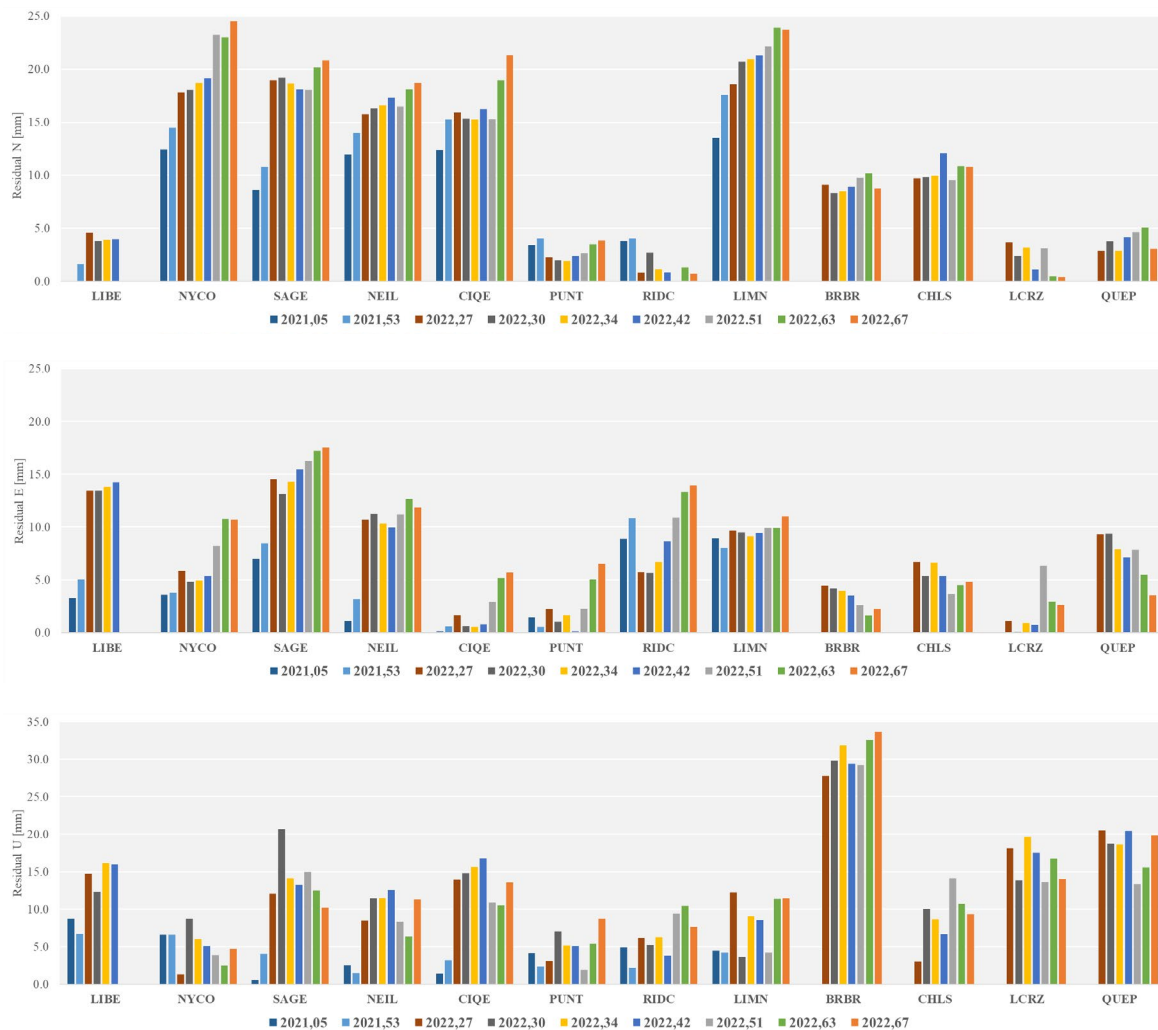


Fig. 4. Residuales topocéntricos N, E y U (mm) obtenidos de cada punto producto del proceso de cálculo de parámetros de transformación.

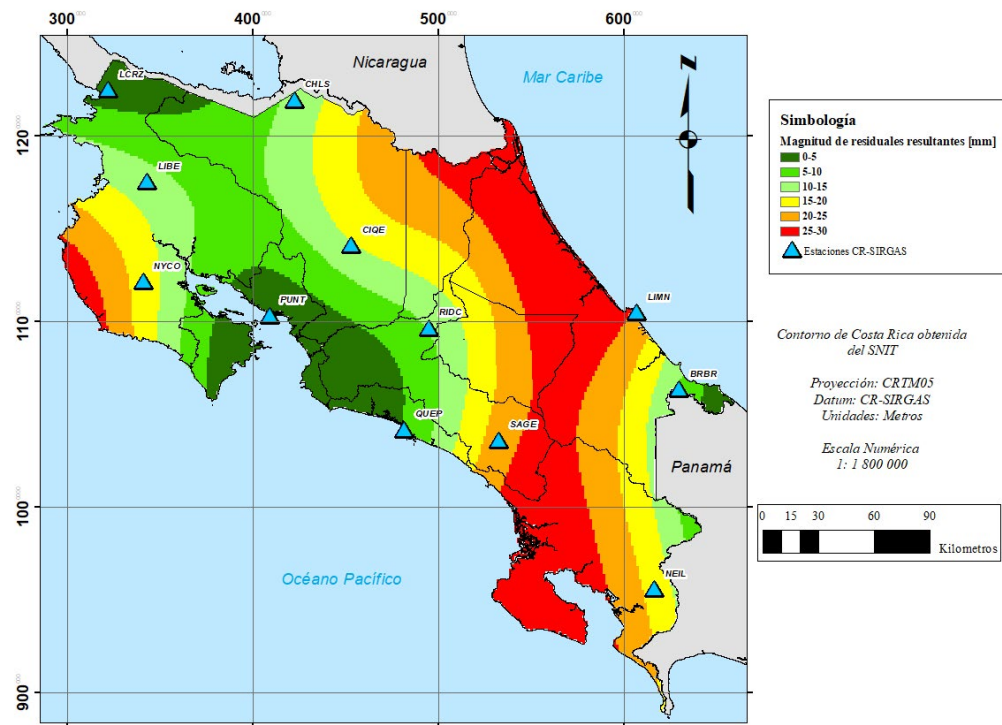


Fig. 5. Comportamiento de la interpolación de los residuales resultantes para el cálculo de parámetros de transformación a la época 2019,24 utilizando todos los puntos de enlace disponibles. Fuente: elaboración propia con el software ArcMap versión 10.8.2 [18] basado en [4].

CUADRO II

TOLERANCIAS PERMITIDAS A LOS RESIDUALES (N, E, U) SEGÚN EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN

Intervalo entre épocas estudiadas			Tolerancias		
Época origen	Época destino	Intervalo de tiempo	N (mm)	E (mm)	U (mm)
2022,67	2019,24	3 años, 5 meses y 3 días	15	15	20
2021,53	2019,24	2 años, 3 meses y 12 días	10	10	15

De manera complementaria al análisis de residuales, se consideraron las variables de tiempo transcurrido entre las épocas estudiadas, la cinemática del país como zona de gran actividad sísmica y el cambio en las coordenadas de las estaciones continuas, producto de la dinámica nacional del marco geodésico. Se tomó la última época medida 2022,67 del punto BELLA como referencia para los datos GNSS medidos en el año 2022, al ser la época más alejada en el tiempo a la época de destino. Los puntos solicitados a la UNAVCO y al OVSICORI comparten la misma época de medición 2021,53, por lo que comparten la tolerancia. Según lo anterior, se definieron las tolerancias de la manera explicada en el CUADRO II.

Se probaron diversas combinaciones de puntos idénticos hasta llegar a juegos de parámetros cuyos residuales fueran aceptados por las tolerancias definidas. En total, para ir a la época 2019,24, se utilizaron 13 juegos de parámetros repartidos entre las nueve épocas t_i . Los puntos nuevos que comparten la época t_i de 2021,53 se dividieron en tres grupos según ubicación, a excepción de los puntos COVE y BIJA, los cuales cuentan con sus propios parámetros, debido a sus respectivas ubicaciones geográficas. A continuación, se muestra en la Fig. 6 el comportamiento de los residuales, producto del cálculo de parámetros de transformación para cada punto, según su época de observación. Los datos se presentan en su valor absoluto.

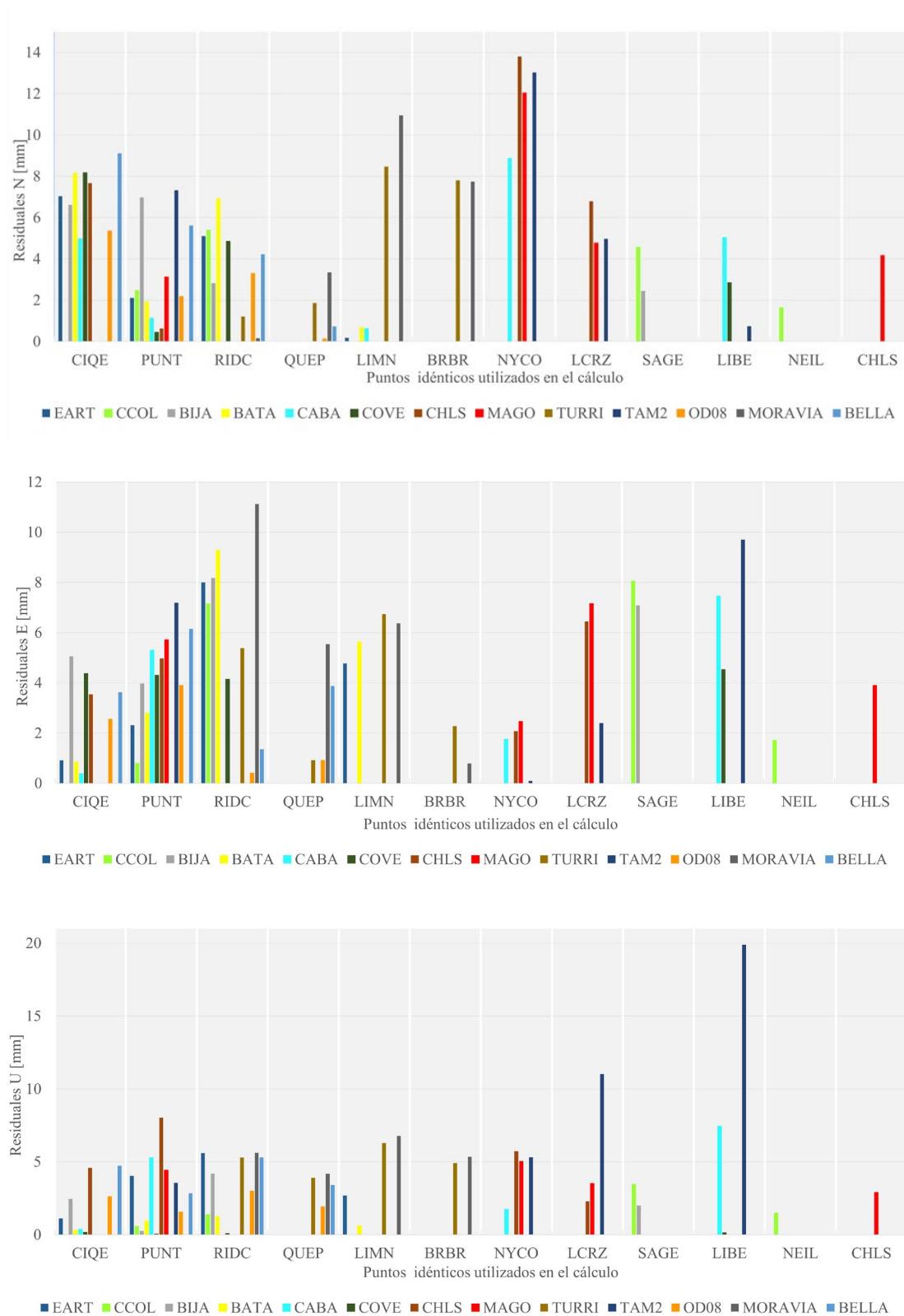


Fig. 6. Residuales topocéntricos N, E y U (mm) obtenidos de cada punto, producto del proceso de cálculo de parámetros de transformación.

C. Diferencias de coordenadas entre las variantes para la época 2019,24

Al comparar las coordenadas CR-SIRGAS en la época 2019,24, producto de la aplicación de todas las variantes, se observa que las coordenadas de la variante 2 muestra mayores diferencias respecto de las demás. Esto puede deberse al método de procesamiento que utiliza el servicio de descarga de datos RINEX y postprocesamiento en línea de la red de estaciones GNSS del Registro Nacional e Instituto Geográfico Nacional, en relación con el ajuste que se realiza en el TBC.

Adicionalmente, los datos del TBC sufren un proceso de transformación al aplicar parámetros propios de transformación. Por un lado, las mayores diferencias de la variante 1 con las

variantes 3 y 4 se registran en los $\pm 2,5$ cm para la coordenada geocéntrica Y. Por otro lado, las diferencias entre las variantes 1 y 2 alcanzan hasta los 4 cm. Lo mismo sucede al comparar la variante 2 con las variantes 3 y 4. Por su parte, entre las variantes 5 y 6 las diferencias en las coordenadas no superan 1 cm, alcanzando un máximo de 4 mm.

D. Transformación de coordenadas desde la época 2019,24 a 2014,59 CR-SIRGAS

Aplicando la subvariante A, se calculan parámetros de transformación propios, utilizando todos los puntos disponibles entre 2019,24 y 2014,59. De este proceso, se analiza el comportamiento de los residuales, el cual se puede ver en la Fig. 7.

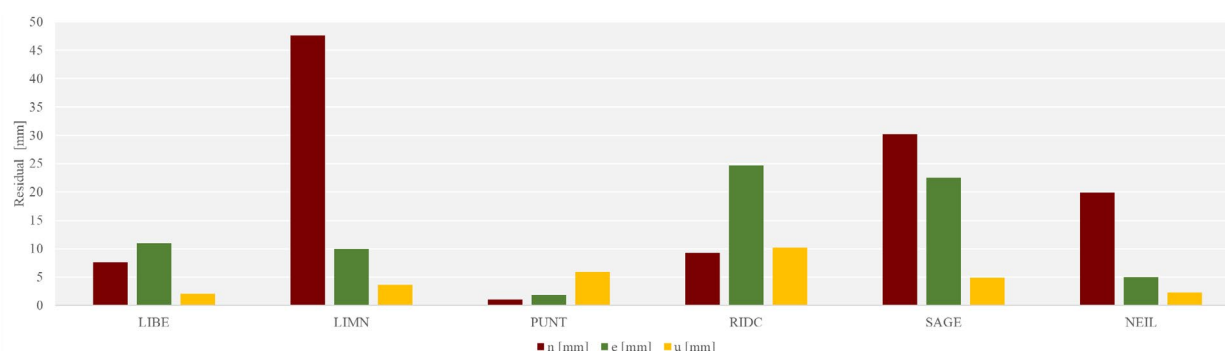


Fig. 7. Comportamiento de los residuales al calcular parámetros de transformación entre las épocas 2019,24 y 2014,59.

Se puede observar que, de los residuales, la componente N es la que presenta mayores valores de corrección para las estaciones LIMN, SAGE y NEIL. Estas estaciones son las ubicadas en la zona sur del país.

La estación de LIMN es la que posee el mayor valor de residual, alcanzando casi 5 cm. Le sigue SAGE, con 3 cm, y NEIL, con 2,5 cm. La componente E presenta un comportamiento de valores más bajos respecto a la N. Su mayor valor alcanzado corresponde a 2.5 cm para la estación SAGE. La componente U presenta menores valores para todas las estaciones, alcanzando un punto máximo de 1 cm en la estación RIDC.

Para el proceso de transformación a la época 2014,59, se tiene principalmente una mayor limitación en cuanto a la cantidad de puntos fijos respecto a la época 2019,24. La causa de dicha limitación es que para la época 2014,59 existían menos estaciones de medición continua que para la época 2019,24. Debido a esto, se agruparon puntos según su ubicación geográfica respecto a los puntos fijos, nombradas estas tres agrupaciones como BELLA, PNE2 y COVE. Así, se definió la tolerancia en los residuales mediante el cálculo de parámetros utilizando cada punto idéntico disponible. En el CUADRO III, se puede ver el detalle de la tolerancia definida.

CUADRO III
TOLERANCIAS PERMITIDAS A LOS RESIDUALES (N, E, U) SEGÚN EL
PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE LA ÉPOCA 2019,24 A LA ÉPOCA 2014,59

Intervalo entre épocas estudiadas			Tolerancias		
Época origen	Época destino	Intervalo de tiempo	N (mm)	E (mm)	U (mm)
2019,24	2014,59	4 años, 7 meses y 25 días	25	25	30

Las estaciones de LIMN y NEIL no tenían una buena interacción cuando se les incluía en un grupo en común, ya que se aumentaban considerablemente los residuales y sobrepasaban la tolerancia establecida. Esta situación puede deberse a que dichas estaciones se encuentran en zonas costeras de importante movimiento sísmico, además del factor de tiempo transcurrido entre ambas épocas.

Adicionalmente, estas estaciones de medición continua hasta hace poco tiempo eran únicas en sus respectivas zonas. LIMN para la parte caribe del país y NEIL para toda la extensión sur. En la Fig. 8, se observa el comportamiento de los residuales, producto del cálculo de parámetros de transformación para cada punto, según ubicación geográfica respecto a los puntos fijos.

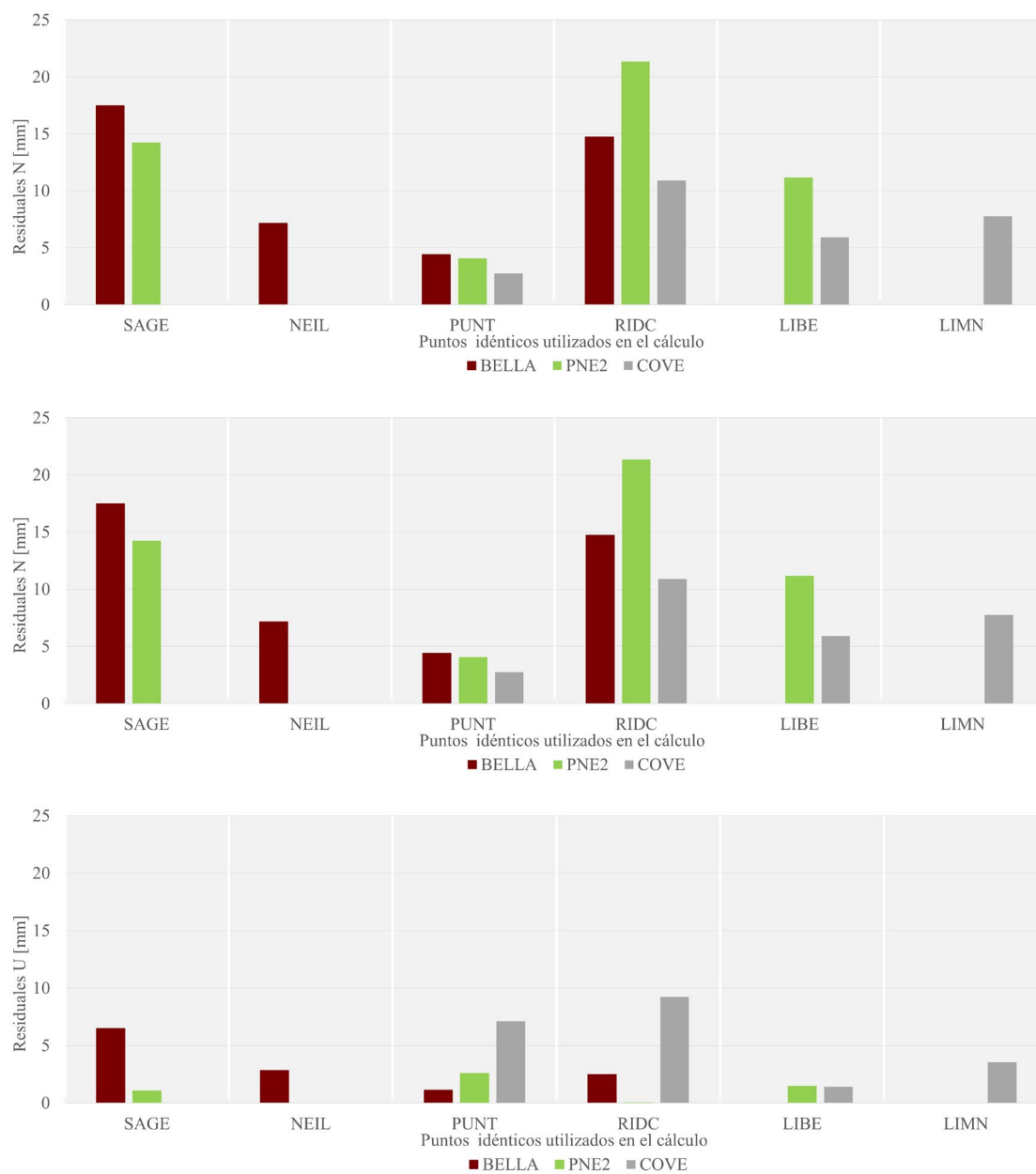


Fig. 8. Comportamiento de los residuales N, E y U (mm) para cada estación, según el grupo de parámetros calculado para ir a la época 2014,59.

E. Análisis de las diferencias entre las coordenadas geocéntricas obtenidas a partir de las subvariantes A y subvariante B

Al restar las coordenadas 2014,59 obtenidas por medio de la aplicación de las subvariantes A y B, se presenta un patrón de repitencia en las diferencias de las coordenadas geocéntricas. Al comparar las diferencias entre las subvariantes de la variante 1 respecto a las de la variante 2, se encuentran los mismos valores en las diferencias. El sistematismo se puede deber al hecho de que cada subvariante A de cálculo de parámetros propios aplica los mismos parámetros para todas las variantes. Lo mismo ocurre con la subvariante B, donde los parámetros aplicados en cada caso fueron los parámetros oficiales del IGN. Al ser la aplicación

de parámetros una operación matemática a las coordenadas, las diferencias entre coordenadas resultantes aparentemente siempre serán las mismas.

El mismo sistematismo se presenta al comparar entre sí las coordenadas de todas las subvariantes A. Las diferencias de coordenadas tienden a ser idénticas. Esto indica que, aunque las coordenadas no sean iguales, si nacen de diferentes metodologías de georreferenciación y, posteriormente, por separado son sometidas a dos juegos de parámetros de transformación, las diferencias de coordenadas representan las diferencias que existen entre los parámetros. Lo anterior se puede ejemplificar en el CUADRO IV, donde para el punto OD08 se tienen las siguientes coordenadas redondeadas al metro: X = 645247, Y = -6249820, Z = 1100457 y se presentan las diferencias en la parte decimal.

CUADRO IV
COMPORTAMIENTO PARA EL PUNTO OD08 ENTRE LAS DIFERENCIAS DE COORDENADAS GEOCÉNTRICAS PRODUCTO DE LAS SUB VARIANTES A Y B

Variante	Subvariante A			Subvariante B			Diferencias		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (mm)	Y (m)	Z (m)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	0,412	0,551	0,033	0,414	0,540	0,043	-2,30	-10,30	-10,30
2	0,402	0,512	0,027	0,404	0,501	0,037	-2,30	-10,30	-10,30
3	0,411	0,554	0,031	0,413	0,543	0,041	-2,30	-10,30	-10,30
4	0,411	0,554	0,031	0,413	0,543	0,041	-2,30	-10,30	-10,30
5	0,403	0,478	0,014	0,405	0,467	0,024	-2,30	-10,30	-10,30
6	0,401	0,479	0,011	0,403	0,468	0,021	-2,30	-10,30	-10,30

F. Influencia de la exclusión del factor de escala en el cálculo de parámetros de transformación

Los parámetros calculados sin considerar el factor de escala muestran que los valores de traslaciones y rotación no se ven afectados respecto a la contraparte de cálculo con escala. Sin embargo, sí se observa un aumento en los valores de error de las rotaciones. Esto se puede observar al comparar los CUADROS V y VI.

En los modelos presentados en la investigación, la ausencia del factor de escala se refleja en los residuales, ya que tienden a aumentar cuando se excluye la escala del cálculo. Se entiende que la designación de los cuadros anteriores se refiere

obviamente a la zona de trabajo, en la cual se incluye tanto a las estaciones de vínculo como al punto nuevo. Tal es el caso de los puntos BELLA, EART y el grupo de BATA, para el cálculo de parámetros a 2019,24, cuyos residuales aumentaron más allá de la tolerancia establecida al no considerar el factor de escala. Este fenómeno se debe tomar en consideración al efectuar un cálculo entre distintas épocas de medición, puesto que afecta la tolerancia definida y, por ende, afectará la selección de puntos.

Las coordenadas a partir de los parámetros que no contemplan el factor de escala son idénticas a sus contrapartes que sí consideran dicho factor. No se encuentra mayor influencia del factor de escala en el cálculo de coordenadas para los experimentos desarrollados en el proyecto.

CUADRO V
COMPORTAMIENTO MUESTRA DE PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN PARA IR DESDE
LA ÉPOCA T₁ HASTA LA ÉPOCA 2019,24 SIN CONSIDERAR EL FACTOR DE ESCALA

Punto	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	RX (")	RY (")	RZ (")	X0	Y0	Z0	Época
	S _{DX} (m)	S _{DY} (m)	S _{DZ} (m)	S _{RX} (")	S _{RY} (")	S _{RZ} (")	(m)	(m)	(m)	
BELLA	-0,045	-0,025	-0,051	0,042	-0,009	0,029	616474,008	-6253541,815	1090695,149	2022,67
	0,005	0,005	0,005	0,030	0,020	0,032				
OD08	-0,044	-0,029	-0,053	0,037	-0,004	-0,008	616474,008	-6253541,810	1090695,151	2022,51
	0,004	0,004	0,004	0,023	0,016	0,024				
TURRI	-0,045	-0,039	-0,046	0,105	0,041	0,044	709983,469	-6246522,163	1071892,690	2022,34
	0,004	0,004	0,004	0,036	0,013	0,014				

CUADRO VI
COMPORTAMIENTO PARA EL PUNTO OD08 ENTRE LAS DIFERENCIAS DE COORDENADAS
GEOCÉNTRICAS PRODUCTO DE LAS SUB VARIANTES A Y B

Punto	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	m (ppm)	RX (")	RY (")	RZ (")	X0	Y0	Z0	Época
	S _{DX} (m)	S _{DY} (m)	S _{DZ} (m)	sm (")	S _{RX} (")	S _{RY} (")	S _{RZ} (")	(m)	(m)	(m)	
BELLA	-0,045	-0,025	-0,051	0,133	0,042	-0,009	0,029	616474,008	-6253541,815	1090695,149	2022,67
	0,004	0,004	0,004	0,076	0,023	0,016	0,025				
OD08	-0,044	-0,029	-0,053	0,135	0,037	-0,004	-0,008	616474,008	-6253541,810	1090695,151	2022,51
	0,002	0,002	0,002	0,044	0,013	0,009	0,014				
TURRI	-0,045	-0,039	-0,046	0,048	0,105	0,041	0,044	709983,469	-6246522,163	1071892,690	2022,34
	0,004	0,004	0,004	0,057	0,034	0,013	0,013				

IV. CONCLUSIONES

En primer lugar, la densificación de la red geodésica nacional brinda mejor soporte para levantamientos en cualquier parte del país, además de permitir tener mayor disponibilidad de datos para fines académicos o ingenieriles. Agregar más estaciones de medición continua en las zonas costeras del país permitirá evitar la dependencia de la zona a una única estación, como ocurría con las estaciones de LIMN y NEIL, las cuales debían abarcar una amplia extensión del territorio nacional. Con la adición de las estaciones BRBR y CAPO para la zona de Limón, así como PJMZ en la península de Osa, se subsana la dependencia de la región a una única estación de medición continua. Los esfuerzos del Instituto Geográfico Nacional y demás instituciones implicadas tanto en la expansión como en el mantenimiento de la red geodésica nacional son un importante aporte a la comunidad científica; además de facilitar las tareas de agrimensura y acceso a la información geoespacial del país.

Asimismo, la metodología de postprocesamiento que sea aplicada a los datos obtenidos por medio de levantamientos GNSS tiene un alto grado de influencia sobre la calidad de resultados que se obtendrán. El utilizar estaciones de enlace y efemérides a la época correspondiente brindará como resultado coordenadas de mayor calidad para ser usadas en proyectos de control geodésico. Estos pueden ser de análisis de movimientos tectónicos del país, control de obras civiles, entre muchos otros relacionados con información geoespacial nacional.

Adicionalmente, la realización de un postprocesamiento respetando la época de medición de los levantamientos GNSS impacta en gran medida en la calidad de resultados obtenidos. En caso de necesitar resultados de alta calidad y exactitud, es necesario utilizar coordenadas de enlace y efemérides precisas concordantes con la época de medición. La mayoría de los puntos fueron aceptados por el ajuste sin necesidad de equilibrar y los que necesitaron equilibrio de varianzas lo hicieron para adaptarse a un mejor modelo estocástico.

Por otro lado, las variantes 3 y 4 presentaron un comportamiento significativamente similar, solamente variando en unos pocos valores de s_0 , como lo fueron el caso del punto MORAVIA y EART. Para el caso de MORAVIA, sí se muestra una gran discrepancia entre el uso de efemérides rápidas y finales para su época específica t_i 2022,63, ya que presenta valores de 1,83 y 7,92, respectivamente. Con esto, se ve una importante influencia que tienen las coordenadas que se utilizan de enlace al marco geodésico nacional a la hora del procesamiento de los datos de los puntos nuevos.

De igual forma, la influencia de las efemérides utilizadas en las variantes 3 y 4 se ven opacadas por el amarre forzoso a la época 2019,24. Por lo tanto, en los resultados, no se reflejan las correcciones que se supone aportan las efemérides al postprocesamiento de los datos de los levantamientos GNSS. Las mayores magnitudes obtenidas en los residuales del proceso de transformación a la época 2019,24 desde la época t_i se concentran en la provincia de Limón y sector sur de la provincia

de Puntarenas. Esto coincide con el sector más boscoso del país y de difícil acceso, por lo que las configuraciones disponibles para las redes de ajuste son muy limitadas. Así, se genera tensión en el ajuste y se propicia el aumento del valor de los residuales en la zona. Las magnitudes de residuales que se mantienen por debajo de los ± 15 mm para las transformaciones desde la época t_i se concentran en el sector central y pacífico del país. Dicho sector es el más beneficiado por la red geodésica nacional, pues posee una variedad de puntos de estaciones de medición continua que permite flexibilidad en las configuraciones de red. Esto da más control a los puntos nuevos de cualquier levantamiento GNSS y reduce así la magnitud de los residuales.

Por otra parte, los valores de los parámetros de transformación calculados desde la época t_i a la época 2019,24 respondieron a los efectos cinemáticos que sufre el marco. Lo anterior es una consecuencia clara de que estos efectos causan cambios en las coordenadas de las estaciones de referencia y los parámetros de transformación reflejan esos instantes particulares. Esto sin considerar eventos sísmicos de gran magnitud que pudieran ocurrir entre la época del levantamiento GNSS nuevo y el marco geodésico al que se desea georreferenciar la información.

Además, las mayores diferencias entre coordenadas al comparar las diferentes soluciones de las variantes a la época 2019,24 se presentan entre la solución de las variantes 1 y 2. Esto puede deberse al método de procesamiento que utiliza el servicio de descarga de datos RINEX y postprocesamiento en la modalidad PPP en línea de la red de estaciones GNSS del Registro Nacional e Instituto Geográfico Nacional, respecto al ajuste que se realiza en el TBC. Adicionalmente, los datos del TBC sufren un proceso de transformación al aplicar parámetros propios de transformación.

Asimismo, el sistematismo entre las subvariantes indica que las variaciones en las coordenadas representan las diferencias que existen entre los parámetros de transformación aplicados a las coordenadas. Independientemente del tratamiento que se les den a los datos crudos de los levantamientos GNSS, al aplicar dos juegos de parámetros diferentes de manera separada y posteriormente comparar los resultados, se obtendrán diferencias de coordenadas directamente ligadas al sistematismo descrito. Prueba de lo anterior se demuestra al procesar la variante 1 en un *software* de forma convencional, mientras la 2 fue enviada a postprocesar en un servicio web. Con esto, se obtuvo que las diferencias entre las subvariantes A y B son idénticas a las diferencias entre las A y B de las variantes 2 y 3, y entre variantes 1 y 4.

Igualmente, los levantamientos GNSS con fines catastrales pueden adaptarse a las tolerancias requeridas según cartografía disponible en la zona de trabajo. Sin embargo, es importante mantener la consistencia del marco geodésico y la época de medición para lograr realizar trabajos de corrección y mantenimiento de los insumos catastrales basados en información geoespacial. En la actualidad, ya entró en vigencia el ITRF 2020, por lo que toda medición GNSS que se realice estará dos marcos internacionales terrestres de referencia por delante del ITRF 2008, utilizado en el CR-SIRGAS época 2014,59.

Por consiguiente, se desconoce la influencia que las actualizaciones del ITRF puedan tener en los futuros levantamientos y posteriores cálculos de parámetros de transformación entre épocas y marcos de referencia.

Por último, la metodología RTK no necesita de un postprocesamiento después de finalizado el levantamiento. Si bien esta práctica es de gran utilidad en la actualidad para levantamientos de gran magnitud de puntos, se deben considerar varios factores al seleccionar esta metodología para la medición de un proyecto. Por ejemplo, el hecho de que el levantamiento realizado con RTK siempre estará en la época de medición t_p , por lo que, de necesitar coordenadas en otra época, estas deben sufrir un proceso de transformación. Asimismo, la precisión de las coordenadas obtenidas es de carácter centimétrico; por lo tanto, para mediciones geodésicas que requieran mayores precisiones, se deben optar por otra metodología GNSS.

ROLES DE LOS AUTORES

Ana Gabriela Morales Quesada: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción –revisión y edición.

Jorge Moya Zamora: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción –revisión y edición.

REFERENCIAS

- [1] *Parámetros de transformación para pasar de las épocas 2014.59 a la 2019.24 en el ITRF14 correspondiente con CR-SIRGAS*, DIG-001-2020, Instituto Geográfico Nacional, San José, Costa Rica, ago. 2020.
- [2] C. Brunini, “SIRGAS: Sistema de Referencia Geodésico para las Américas”, presentado en el *Simposio IDE América: Conceptos, Prácticas y Proyectos*, Bogotá, Colombia, 7-8 nov. 2007.
- [3] Registro Nacional, “DRI-001-2020 Sobre el formato y enlace al Marco Geodésico para la georreferenciación de levantamientos con fines catastrales”, ago. 2020.
- [4] G. Morales, “Análisis de los residuales obtenidos por medio de la aplicación de diferentes estrategias para la georreferenciación de levantamientos GNSS dentro del marco geodésico CR-SIRGAS de conformidad con las directrices DIG-001-2020 y DRI-001-2020”, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional, Heredia, 2023.
- [5] Registro Nacional e Instituto Geográfico Nacional, *Guía de uso para el Servicio de Descarga de datos Rinex y Post procesamiento en línea de la Red de Estaciones GNSS Registro Nacional Instituto Geográfico Nacional*. Consultado: abr. 28, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://gnss.mp.go.cr/SBC>
- [6] *GPS/GNSS Data Operations*, UNAVCO, mar. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-operations/sets.html?filter=93>
- [7] *Trimble Business Center*. (2020). Trimble Geospatial. Consultado: may. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://geospatial.trimble.com/es/products/software/trimble-business-center>
- [8] *Plataforma de Postprocesamiento Spider web*. (2020). Instituto Geográfico Nacional, . Consultado: abr. 28, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://gnss.rnp.go.cr/SBC/spider-business-center>
- [9] *GNSS Orbit Products*, Crustal Dynamics Data Information Service, abr. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cddis.nasa.gov/index.html>
- [10] D. Bateman, J. W. Eaton, S. Hauberg y R. Wehbring, *GNU Octave version 9.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations*. (2020). Consultado: sep. 23, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://octave.org/doc/v9.2.0/>
- [11] J. Moya Zamora, “Procesamiento GNSS en el Marco Geodésico CR-SIRGAS: influencia de las épocas de observación y referencia”, *Rev. Ingeniería*, vol. 32, no. 2, pp. 48-85, jun. 2022, doi: 10.15517/ri.v32i2.50181.
- [12] *Manual. Trimble Business Center v5.40 – Processing and Adjusting GNSS Survey Control Networks*, D. of T. and M. R. The State of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, 2021.
- [13] J. Badekas, “Investigations Related to the Establishment of a word geodetic system”, Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, OH, Estados Unidos, Rep. 124, jun. 1969.
- [14] J. Moya Zamora, S. Bastos Gutiérrez y A. Álvarez Calderón, “Parámetros de transformación entre los marcos geodésicos CR05 y CR-SIRGAS contemplando diferentes soluciones ITRF”, *Rev. Ingeniería*, vol. 31, no. 1, pp. 21-50, ene. 2021, doi: 10.15517/ri.v31i1.43854.
- [15] M. J. Sevilla, “Colocación mínimos cuadrados”, en *IV Curso de Geodesia Superior*. Madrid, España: Instituto de Astronomía y Geodesia, 1987, pp. 97-141.
- [16] J. Moya Zamora y S. Bastos Gutiérrez, “Análisis de los residuales en el cálculo de velocidades geocéntricas a partir de series de tiempo diarias PPP”, *Rev. Ciencias Espaciales*, vol. 11, no. 1, pp. 35-75, 2018, doi: 10.5377/ce.v11i1.7175.
- [17] *ArcGIS Desktop: versión 10.8*. (2020). Esri.
- [18] Esri, “Novedades de ArcMap”. ArcGIS Desktop. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/get-started/introduction/whats-new-in-arcgis.htm> (consultado: sep. 23, 2024).