



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: DETERMINACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES NO
LINEALES PARA EL ECUADOR CONTINENTAL, A PARTIR DE DATOS
GPS+GLONASS EN EL PERIODO 2015-2017**

AUTOR: HARNISTH MOSQUERA, KERBY RENATO

DIRECTOR: ING. LUNA LUDEÑA, MARCO PATRICIO, PhD.

SANGOLQUÍ - ECUADOR

2019

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN****CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE****CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, *“DETERMINACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES NO LINEALES PARA EL ECUADOR CONTINENTAL, A PARTIR DE DATOS GPS+GLONASS EN EL PERIODO 2015-2017”* fue realizado por el señor *Harnisth Mosquera, Kerby Renato*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 29 de enero de 2019

Firma:

ING. MARCO PATRICIO LUNA LUDEÑA, PHD.C.C.: 1103²96044

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Harnisth Mosquera, Kerby Renato*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación "*DETERMINACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES NO LINEALES PARA EL ECUADOR CONTINENTAL, A PARTIR DE DATOS GPS+GLONASS EN EL PERIODO 2015-2017*" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 29 de enero de 2019

Firma:



Kerby Renato Harnisth Mosquera

C.C.: 171364632-9



AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Yo, Harnisth Mosquera, Kerby Renato, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación "DETERMINACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES NO LINEALES PARA EL ECUADOR CONTINENTAL, A PARTIR DE DATOS GPS+GLONASS EN EL PERIODO 2015-2017" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 29 de enero de 2019

Firma:

Kerby Renato Harnisth Mosquera

C.C.: 171364632-9



DEDICATORIA

*A mis padres y mis hermanos por ser mi felicidad,
mi fuerza, mi apoyo y mi motivación para superarme.*

Para ti Negrita Mía.

Kerby Renato Harnisth Mosquera

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haber puesto a las personas correctas en mi vida personal y profesional, por sus bendiciones infinitas y por las enseñanzas que me han permitido llegar hasta este momento.

A mi Madre Dolorosa, que sin duda ha sido mi fiel compañera, por cuidarme, protegerme y ser mi refugio en mi vida universitaria.

A mis padres, Janneth y Byron, por transmitirme todo lo bueno que soy, por sus enseñanzas y valores, por sus consejos y por darme la mejor educación. Vivo orgulloso de ustedes.

A mis hermanos, Danilo, Andrés, Darwin y Bradly, por su valiosa compañía y cariño, por ser inspiración y motivación en mi vida.

A Chelito, por ser una segunda madre, por su cuidado, complicidad y cariño.

A mis abuelitos Talo, Eva, Modesto y Nelly, por ayudar en mi formación personal y darme las mejores sonrisas y los mejores recuerdos.

A Kristel y Alex, por ser mis compañeros de locuras y aventuras.

A Darío, por ser un apoyo fundamental en la realización de este proyecto, por su amistad incondicional, por su consejo y apertura para siempre escuchar, por ser otro hermano.

A Marco, por sus enseñanzas y amistad, por motivarme a seguir con el proyecto y estar siempre presto a colaborar con el mismo. Por confiar en mí.

A Panchito, Pedro, Luchito, Pato y Josué, por su amistad verdadera, diversión y apoyo dentro y fuera de las aulas de clase.

A Karlita, mis Danis, Johita y Gabyta, por brindarme ese cariño inmenso que me demostraron todos los días en la universidad.

A mis compañeros de clase, profesores y amigos por contribuir en mi vida académica y personal.

Al personal de los departamentos de Investigación y Geodesia del Instituto Geográfico Militar, que brindó su apoyo para la entrega de datos del proyecto.

RECONOCIMIENTO



El autor del presente proyecto, quiere agradecer el apoyo prestado por parte del Instituto Geográfico Militar en el desarrollo de este estudio, así como su predisposición a colaborar con la academia en el ámbito investigativo. Los datos de las estaciones de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador fueron un aporte invaluable al presente trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA	
CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RECONOCIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Justificación e importancia	2
1.4. Descripción del Área de Estudio	3
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo general.....	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
1.6. Metas.....	5
CAPÍTULO II	7
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Sistema de Referencia.....	7

2.1.1.	Sistema de Referencia Geocéntrico	7
2.1.1.1.	International Terrestrial Reference System - ITRS	7
2.1.1.2.	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS)	8
2.1.2.	Sistema de Referencia Local Topocéntrico	10
2.1.3.	Relación entre un sistema de coordenadas cartesianas globales y coordenadas locales topocéntricas	11
2.2.	Marco de Referencia.....	13
2.2.1.	Marco de Referencia Terrestre Internacional ITRF.....	13
2.3.	Sistema Global de navegación por Satélite GNSS	14
2.3.1.	Red del Servicio Internacional GNSS (IGS)	15
2.3.2.	Estaciones de Monitoreo Continuo del Ecuador	16
2.4.	Factores que influyen en el posicionamiento GNSS	18
2.5.	Procesamiento con Software Bernese 5.2.....	20
2.5.1.1.	Lineamientos SIRGAS para el procesamiento	22
2.5.1.2.	Bernese Processing Engine (BPE).....	24
2.5.1.3.	Process Control File (PCF).....	24
2.5.1.4.	Procesamiento Precise Point Positioning (PPP)	25
2.5.1.5.	Procesamiento RINEX TO SINEX	29
2.6.	Series temporales GNSS.....	34
2.6.1.	Detección y corrección de outliers	34
2.6.1.1.	Procesos Integrados de Grado 1	35
2.6.2.	Tendencia.....	35
2.6.2.1.	Regresión Lineal Simple.....	36
2.6.3.	Estacionalidad.....	37

2.6.3.1.	Análisis espectral de las series temporales	38
2.7.	Campo de Velocidades	39
2.7.1.	Velocidad.....	40
2.8.	Hipótesis	40
2.9.	Sistemas de variables	40
2.9.1.	Variables independientes	40
2.9.2.	Variables dependientes	41
CAPÍTULO III		42
3.	METODOLOGÍA.....	42
3.1.	Preprocesamiento.....	42
3.1.1.	Recopilación de observaciones diarias GNSS	42
3.1.1.1.	Estaciones REGME	42
3.1.1.2.	Estaciones fiduciales IGS	44
3.1.2.	Preparación de Archivos RINEX.....	45
3.1.2.1.	Transformación de observaciones de extensión .T02 a .TGD	45
3.1.2.2.	Transformación de observaciones de extensión .TGD a RINEX	45
3.1.2.2.1.	Conversión .TGD a RINEX.....	46
3.1.2.2.2.	Edición de encabezado de los archivos RINEX	46
3.1.2.2.3.	Control de Calidad de Archivos RINEX	48
3.1.3.	Preparación de insumos para el procesamiento.....	49
3.2.	Procesamiento.....	52
3.2.1.	Campaña PPP.....	53
3.2.2.	Campaña RNX2SNX.....	57
3.3.	Extracción y recopilación de las coordenadas semilibres obtenidas	59

3.4.	Transformación a un sistema de referencia local-topocéntrico	60
3.5.	Análisis de las Series Temporales GNSS	61
3.5.1.	Correcciones de outliers o valores atípicos	61
3.5.2.	Tendencia.....	62
3.5.3.	Estacionalidad.....	63
3.5.4.	Modelamiento de las series de tiempo.....	66
3.5.5.	Extrapolación de los modelos matemáticos ajustados a las series	67
3.6.	Obtención de las velocidades.....	68
CAPÍTULO IV		70
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
4.1.	Resultados.....	70
4.1.1.	Procesamiento.....	70
4.1.2.	Series Temporales.....	73
4.1.2.1.	Corrección de outliers.....	73
4.1.2.2.	Tendencia.....	74
4.1.2.3.	Estacionalidad.....	77
4.1.2.4.	Modelamiento de las series temporales	80
4.1.2.5.	Extrapolación del modelo	85
4.1.3.	Cálculo de velocidades no lineales	86
4.2.	Discusión	93
4.2.1.	Discusión sobre resultados	93
4.2.2.	Discusión sobre la hipótesis.....	94
CAPÍTULO V		95
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95

5.1.	Conclusiones.....	95
5.2.	Recomendaciones	96
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
	ANEXOS	104
	ANEXO A.....	104
	ANEXO B.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Parámetros del Sistema de Referencia Geodésico GRS80.</i>	10
Tabla 2	<i>Estado de las Estaciones de Monitoreo Continuo del Ecuador REGME.</i>	16
Tabla 3	<i>Variables de Menú de Bernese 5.2.</i>	22
Tabla 4	<i>Descripción del PCF PPP_BAS.PCF.</i>	26
Tabla 5	<i>Descripción del RNX2SNX.PCF.</i>	29
Tabla 6	<i>Resumen de las observaciones diarias para las estaciones de la REGME en el periodo 2015-2017.</i>	43
Tabla 7	<i>Estaciones fiduciales IGS utilizadas.</i>	44
Tabla 8	<i>Insumos para procesamiento en Bernese 5.2. (AIUB, 2018)</i>	50
Tabla 9	<i>Días Julianos iniciales para las estaciones de estudio.</i>	63
Tabla 10	<i>Procesamiento de las observaciones del Ecuador para el periodo de estudio 2015-2017</i>	70
Tabla 11	<i>Comparación de diferencias entre las soluciones semanales semilibres obtenidas y las soluciones semanales finales de SIRGAS.</i>	72
Tabla 12	<i>Corrección de outliers en las series temporales</i>	73
Tabla 13	<i>Coefficientes para la tendencia de las series temporales</i>	75
Tabla 14	<i>Periodicidad de las series temporales</i>	79
Tabla 15	<i>Coefficientes para estacionalidad de tres periodos fundamentales de las series temporales.</i>	81
Tabla 16	<i>Coefficientes para velocidad de tres periodos fundamentales de las series temporales.</i>	87
Tabla 17	<i>Velocidades para el día 20 de junio de 2016</i>	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Estaciones GNSS del Ecuador.....	4
Figura 2.	Red SIRGAS de operación continua	9
Figura 3.	Sistema de coordenadas cartesianas globales (X, Y, Z) y topocéntricas locales (e, n, u).	11
Figura 4.	Red ITRF2008 destacando las ubicaciones VLBI, SLR y DORIS localizadas mutuamente con GPS.....	14
Figura 5.	Red IGS.	15
Figura 6.	Directorio del Software Bernese 5.2.....	21
Figura 7.	Edición del encabezado de un archivo RINEX.	48
Figura 8.	Archivo de control de calidad del Teqc.....	49
Figura 9.	Seteo de sesión.....	54
Figura 10.	PPP-RUNBPE/Selección de sesión	55
Figura 11.	PPP-RUNBPE/Opciones de control de procesamiento	56
Figura 12.	PPP-RUNBPE/Nombres de archivos de salida	56
Figura 13.	PPP-RUNBPE/Edición de las variables del servidor.	57
Figura 14.	Preparación de archivos para el RNX2SNX.....	57
Figura 15.	R2S-RUNBPE/Opciones del control de procesamiento.....	58
Figura 16.	R2S-RUNBPE/Nombres de archivos de salida	59
Figura 17.	R2S-RUNBPE/Edición de las variables del servidor	59
Figura 18.	Transformación de coordenadas geodésicas a topocéntricas locales. Estación EPEC (fragmento).....	61
Figura 19.	Corrección de outliers. Estación EPEC (n)	62
Figura 20.	Potenciales para las componentes e, n y u . Estación EPEC (fragmento).	65
Figura 21.	Periodos fundamentales para las componentes e, n y u . Estación EPEC (fragmento).	65
Figura 22.	Variaciones Estacionales. Estación EPEC componente e (fragmento).	66
Figura 23.	Coeficientes de variaciones estacionales. Estación EPEC.	67
Figura 24.	Extrapolación del modelo al año 2018. Estación EPEC (u).	68

Figura 25. Coeficientes de la ecuación de velocidad para cada estación (fragmento).....	69
Figura 26 Estacionalidad. Estación EPEC.	78
Figura 27. Extrapolación de la estacionalidad. Estación EPEC.....	85

RESUMEN

Las series de tiempo obtenidas del rastreo GNSS no poseen velocidades constantes por efectos de fenómenos geodinámicos, climáticos o propios de la estación; limitando el modelamiento real de la corteza terrestre. El objetivo del presente estudio es determinar un campo de velocidades no lineales para el Ecuador continental a partir de datos GPS+GLONASS en el periodo 2015-2017, mediante el análisis de series temporales obtenidas del procesamiento en el software Bernese 5.2. Para el procesamiento se utilizaron las observaciones de 25 estaciones de la REGME y 20 estaciones fiduciales del IGS (2 de Ecuador) para referir las coordenadas calculadas al marco de referencia IGB08 bajo los lineamientos propuestos por SIRGAS. Las coordenadas fueron transformadas a un sistema topocéntrico local para el análisis exhaustivo de sus series de tiempo y el modelamiento matemático de su estacionalidad a través del método de Lomb. De las 81 series analizadas el 30% fueron estacionarias y presentaban una periodicidad estacional indefinida para este (e), de 3 años para norte (n) y anual para up (u). El modelamiento de la estacionalidad para tres periodos fundamentales permitió la extrapolación del modelo para el año 2018 (19 estaciones) y la determinación de la ecuación de velocidad no lineal para las componentes (e, n, u) de las 27 estaciones observadas. Los modelos obtenidos tuvieron un mejor ajuste para 15 estaciones, que no presentaron vacíos en los rastreos ni saltos producidos por el terremoto del 2016. La velocidad no lineal pudo ser evaluada para cualquier día específico dentro del periodo 2015-2017.

PALABRAS CLAVE:

GNSS

REGME

SERIES TEMPORALES

MODELAMIENTO MATEMÁTICO

VELOCIDAD NO LINEAL

ABSTRACT

The time series obtained from the GNSS tracking do not have constant speeds due to the effects of geodynamic, climatic or seasonal phenomena; limiting the actual modeling of the earth's crust. The objective of this study is to determine a nonlinear velocity field for continental Ecuador based on GPS + GLONASS data in the period 2015-2017, by analyzing processed time series obtained in the Bernese 5.2 software. For the processing, observations from 25 stations of the REGME and 20 fiducial stations of the IGS (2 of Ecuador) were used to refer the coordinates calculated to the frame of reference IGB08 under the guidelines proposed by SIRGAS. The coordinates were transformed to a local topocentric system for the detailed analysis of their time series and the mathematical modeling of their seasonality through the Lomb method. Of the 81 series analyzed, 30% were stationary and had an indefinite seasonal periodicity for east (e), 3 years for north (n) and annual for up (u). Modeling the seasonality for three fundamental periods allowed the extrapolation of the model for the year 2018 (19 stations) and the determination of the non-linear velocity equation for the components (e, n, u) of the 27 observed stations. The models obtained had a better adjustment for 15 stations, which did not present gaps in the traces or jumps produced by the 2016 earthquake. The non-linear speed could be evaluated for any specific day within the period 2015-2017.

KEYWORDS:

GNSS

REGME

TIME SERIES

MATHEMATICAL MODELING

NONLINEAR VELOCITY

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Según Drewes (2017), las series de tiempo obtenidas de cada estación permanente, demuestran que no poseen velocidades constantes en el movimiento de las placas tectónicas a largos periodos de tiempo como se creía en el comienzo de las series ITRF -1989, esto se debe a dislocaciones co-sísmicas abruptas (momento del terremoto), velocidades post-sísmicas anormales (después de un terremoto), efectos ambientales no lineales (cualquier momento) y cambios de antena de las estaciones.

Por lo mencionado anteriormente, al no poseer velocidades constantes en las observaciones obtenidas de cada estación permanente y que el marco de referencia se encuentra afectado en su consistencia ante fenómenos físicos en el transcurso del tiempo, es necesario el empleo de modelos no lineales que se ajusten al comportamiento más real del movimiento tectónico.

Cabe recalcar que en el Ecuador o en la Región, no se tienen estudios sobre velocidades no lineales, ni metodologías que permitan la obtención de un campo que aporte a estudios geodésicos y geotectónicos.

1.2. Antecedentes

La geodinámica y las deformaciones de la corteza terrestre, producto del movimiento o cinemática de las placas tectónicas, son estudiadas mediante las redes de estaciones permanentes y tecnologías GNSS, como herramientas de alta precisión y exactitud, permitiendo cuantificar las

variaciones en los movimientos horizontales y verticales en fallas y regiones activas tectónicamente (Rosado, Fernández, Jiménez, & Berrocoso, 2017).

Los sistemas de referencia geodésicos utilizan el análisis del comportamiento de las coordenadas en sus tres dimensiones para la creación y actualización de marcos de referencia a través de estaciones GNSS en un periodo de tiempo. Las series temporales, como resultado de las observaciones de dichas estaciones, permiten la actualización de coordenadas a partir de las velocidades para cada componente (Moya, Bastos, & Rivas, 2014).

Para ello, las velocidades se obtienen a partir de un estudio estadístico sobre las series temporales procesadas de los datos obtenidos de las estaciones permanentes GNSS, analizando la dirección y velocidad de desplazamiento de la corteza, dichas velocidades contribuyen para que el usuario pueda mantener su información, eliminar errores por el cambio de posición e identificar los puntos desplazados a través del tiempo de forma precisa (Ruiz, 2015).

La tecnología GNSS es una fuente continua de información con la implementación de redes de estaciones permanentes, denominadas activas. La red GNSS del Ecuador está conformada en la actualidad por 18 estaciones activas, 22 en mantenimiento, 2 inactivas y 8 removidas, gestionadas por el Instituto Geográfico Militar. Estas se encuentran enlazadas con la red continental del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), SIRGAS-CON (Instituto Geográfico Militar, 2016) (Instituto Geográfico Militar, 2018).

Esta red cuenta con el beneficio de ser un marco de referencia activo donde se puede calcular las coordenadas de cada estación permanente GNSS y se pueden obtener las velocidades para cada punto, pudiendo modelar el campo de velocidades para el área de interés donde se ubiquen dichas estaciones (Mateo, 2011).

1.3. Justificación e importancia

Ecuador se encuentra ubicado en el cinturón de fuego del océano pacífico y presenta un complejo sistema de fallas activas locales, provocando ser un país propenso a alto número de

acontecimientos sísmicos (Parra, 2016). El 16 de abril de 2016, un sismo de 7,8 Mw, produce una deformación importante en el Marco de Referencia Geodésico a lo largo de la nación impidiendo la migración de coordenadas de diferentes épocas con altas precisiones y exactitudes (Instituto Geográfico Militar, 2016).

Para fines de aplicaciones geodésicas, es necesario conocer la dinámica del movimiento lineal y no lineal de la corteza terrestre para poder interpolar o extrapolar de una época a otra las observaciones realizadas por una estación o una posición específica en el territorio y así garantizar una mayor precisión en el cálculo de las coordenadas para dicha época definida, contribuyendo a la observación y actualización los marcos de referencia adoptados.

El campo de velocidades propuesto en este proyecto de investigación, contribuirán al conocimiento de la geodinámica del Ecuador y también aportará con información al marco de referencia geodésico por utilizar datos fiables con el objetivo de mejorar la precisión de los cambios de marco de referencia y como predecesora de otros proyectos sobre velocidades no lineales para el Ecuador, el cual, en la Región no se han profundizado investigaciones en el tema.

1.4. Descripción del Área de Estudio

La República del Ecuador se encuentra ubicado al noroccidente del continente de América del Sur, sobre la línea ecuatorial. Situada entre las latitudes $01^{\circ}30'N$ y $03^{\circ}23.5'S$ y las longitudes $75^{\circ}12'W$ y $81^{\circ}00'W$. Limita con los países de Colombia, por el norte, y Perú, por el este y sur, mientras que por el occidente limita con el Océano Pacífico. Su extensión territorial total es de 270 670 km², conformado por una extensión continental de 262 826 km² y una insular de 7 844 km². Se encuentra dividida en regiones naturales, por la influencia de la Cordillera de los Andes que atraviesa el territorio, que son: Costa, Sierra y Amazonía; además, de la Región Insular o Islas Galápagos y de una extensión del continente Antártico (Instituto Oceanográfico Armada del Ecuador, 2005).

El proyecto desarrollado se enfocó en utilizar las observaciones disponibles para el periodo de estudio comprendido entre 2015 y 2017 de las estaciones pertenecientes a la Red GNSS de Monitoreo Continuo (REGME) distribuidas en el territorio ecuatoriano con el fin de cubrir las necesidades geodésicas del mismo. Esta red de estaciones REGME aportan a la actualización del marco de referencia local y pertenecen de igual manera a la Red SIRGAS Continental (Instituto Geográfico Militar, 2018). Las estaciones pertenecientes al Ecuador se evidencian en la Figura 1.

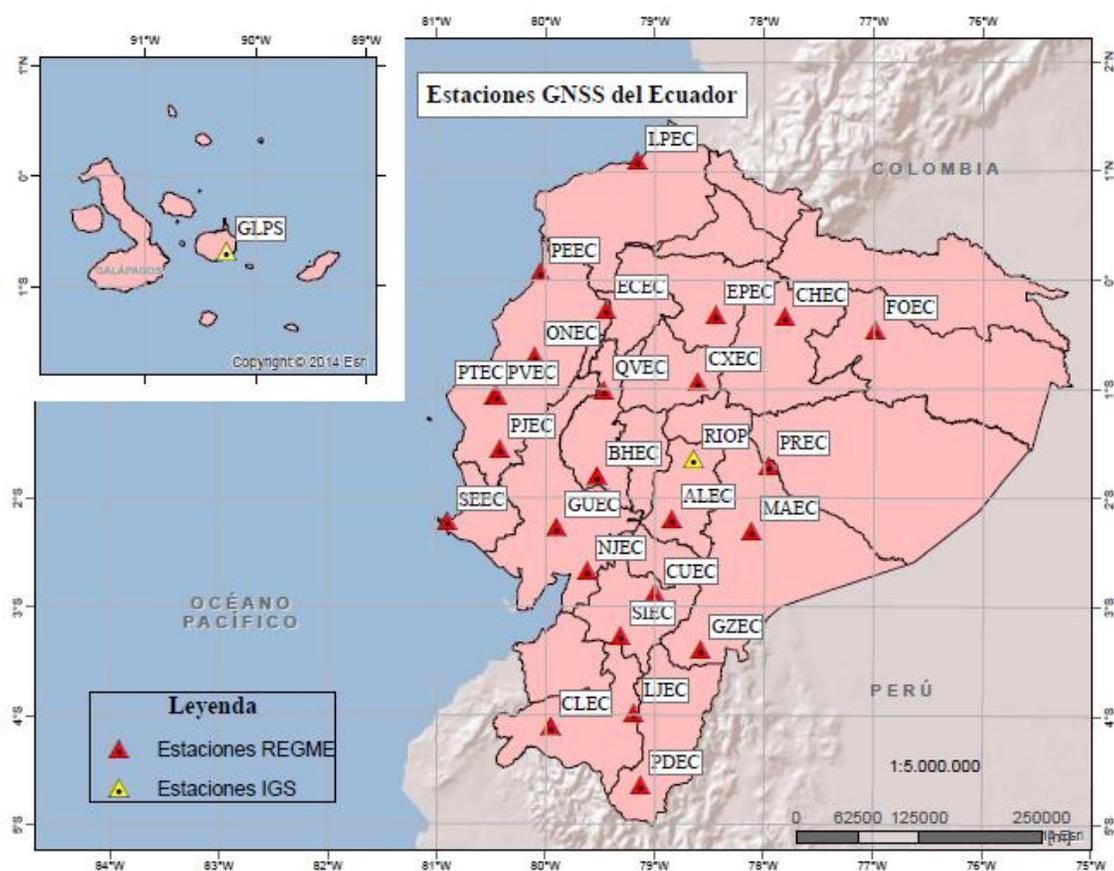


Figura 1. Estaciones GNSS del Ecuador.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Determinar el campo de velocidades no lineales para el Ecuador Continental, a partir de datos GPS+GLONASS en el periodo 2015-2017 mediante el análisis de series temporales obtenidas del procesamiento en el software científico Bernese 5.2.

1.5.2. Objetivos específicos

- Procesar las observaciones de las estaciones GNSS pertenecientes a la REGME en el software científico Bernese 5.2, mediante la recopilación de información existente, creación y preparación de datos para el procesamiento de una campaña para la obtención de series temporales.
- Analizar exhaustivamente las series temporales obtenidas mediante la detección y corrección de valores atípicos, y la descomposición de la misma en tendencia y estacionalidad para encontrar un modelo óptimo que describa el comportamiento de la serie y poder determinar un campo de velocidades no lineales para el Ecuador.
- Obtener velocidades no lineales a partir de la derivación de las ecuaciones obtenidas por el análisis de la estacionalidad, determinada por el procedimiento propuesto por Lomb (1976) para cada una de las estaciones en el periodo 2015-2017.

1.6. Metas

- Coordenadas finales diarias en coordenadas cartesianas (X, Y, Z), para 27 estaciones GNSS del Ecuador disponibles en el periodo de tiempo estudiado.

- Series temporales analizadas en un sistema de coordenadas Topocéntrico (e, n, u) para 27 estaciones GNSS del Ecuador en el sistema ITRF2008 (IGb08).
- Velocidades no lineales para cada estación procesada.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sistema de Referencia

Se conoce como sistema de referencia a la definición conceptual de teorías, hipótesis y constantes numéricas que posibilitan la formación de tres ejes coordenados en el espacio junto con su origen y orientación (Furones, 2011).

2.1.1. Sistema de Referencia Geocéntrico

Se denomina Sistema de referencia geocéntrico al sistema que mantiene su origen de coordenadas en el geocentro de la Tierra y están definidos por un sistema derecho de ejes ortogonales cartesianos (X, Y, Z). El eje X se encuentra en el plano ecuatorial o de latitud 0° , el eje Z mantiene la dirección de los polos y el eje Y es ortogonal a los dos ejes, es materializado mediante un marco de referencia y está definido por elipsoides globales. (Zambrano, Romero, & Tierra, 2015) (Pallejá, 1999)

2.1.1.1. International Terrestrial Reference System - ITRS

El ITRS es un sistema geocéntrico de referencia utilizado internacionalmente para aplicaciones científicas y de ingeniería con alta precisión, materializada a través de las coordenadas y velocidades de estaciones ubicadas por el globo terráqueo con diversas técnicas de observación

espacial como: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Lunar Laser Ranging (LLR), Global Positioning System (GPS), Satellite Laser Ranging (SLR) y Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) (Federal Agency for Cartography and Geodesy, 2013).

Se incorpora a la técnica de observación GLONASS a la realización del Sistema Internacional de Referencia Terrestre a través de la campaña denominada Experimento Internacional GLONASS 1998 (Boucher & Altamimi, 2001)

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

Se define como un sistema de referencia con las mismas características al ITRS y su materialización es a partir del ITRF para América Latina y el Caribe. SIRGAS está referida a una época específica cuyas coordenadas y velocidades de desplazamiento están asociadas a cada una de las estaciones que esta posee o a un modelo continuo de variación con el tiempo que cubre el continente. Cuenta con alrededor de 400 estaciones permanentes donde 59 de ellas pertenecen a la red global del IGS como se muestra en la Figura 2 (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, 2018)

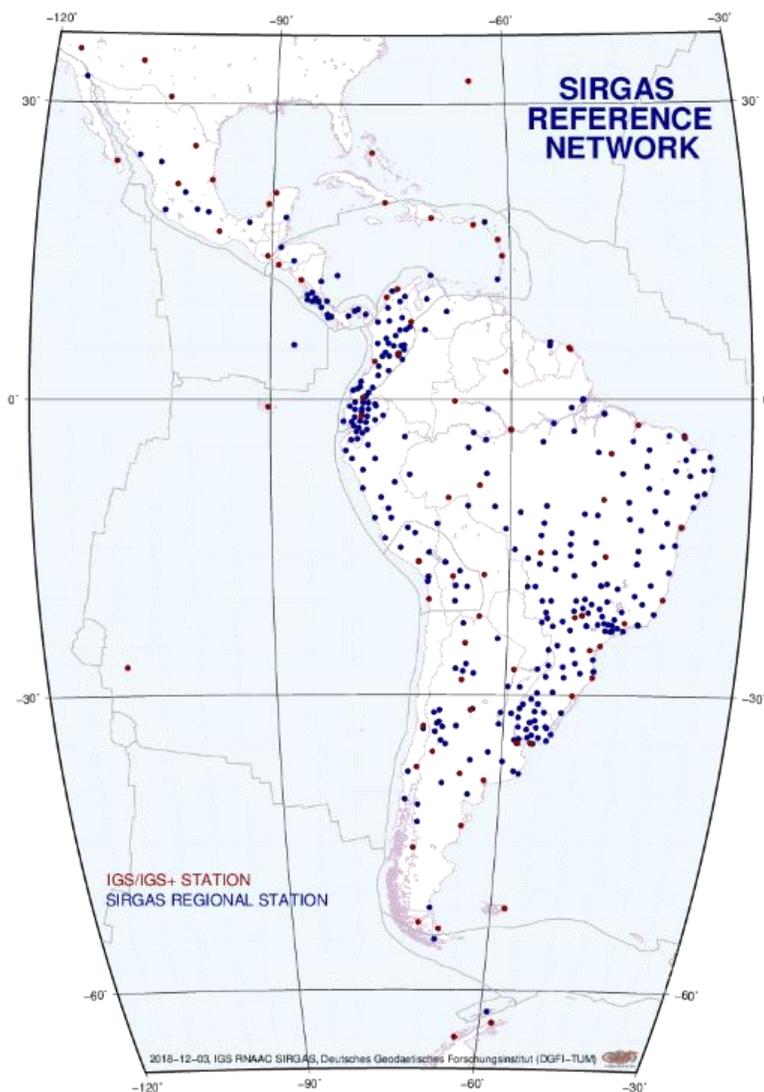


Figura 2. Red SIRGAS de operación continua.

Fuente: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (2018)

Los lineamientos de SIRGAS utilizan el sistema de referencia geodésico global GRS80 cuyos parámetros se observan en la Tabla 1 :

Tabla 1

Parámetros del Sistema de Referencia Geodésico GRS80.

Constante	Relación Matemática	Valor
Semieje mayor (a)	Constante definida	6 378 137 (m)
Primera excentricidad (e^2)	Constante calculada por iteración	$6.69438000229 * 10^{-3}$
Semieje menor (b)	$b = a * \sqrt{1 - e^2}$	6 356 752.314 (m)
Aplanamiento Recíproco (1/f)	$\frac{1}{f} = \frac{a}{a - b}$	298.257222101

Fuente: (Moritz, 2000).

2.1.2. Sistema de Referencia Local Topocéntrico

Un sistema de coordenadas topocéntrico es un sistema cartesiano de tres dimensiones con sus ejes perpendiculares mutuamente (e, n, u) con su respectivo origen en la superficie de la Tierra. El eje e se localiza al este, el eje n se localiza al norte, formando estos dos ejes un plano horizontal, y el eje u forma un sistema de coordenadas de mano derecha con respecto a los 2 ejes anteriores definiendo la componente vertical como se muestra en la Figura 3.

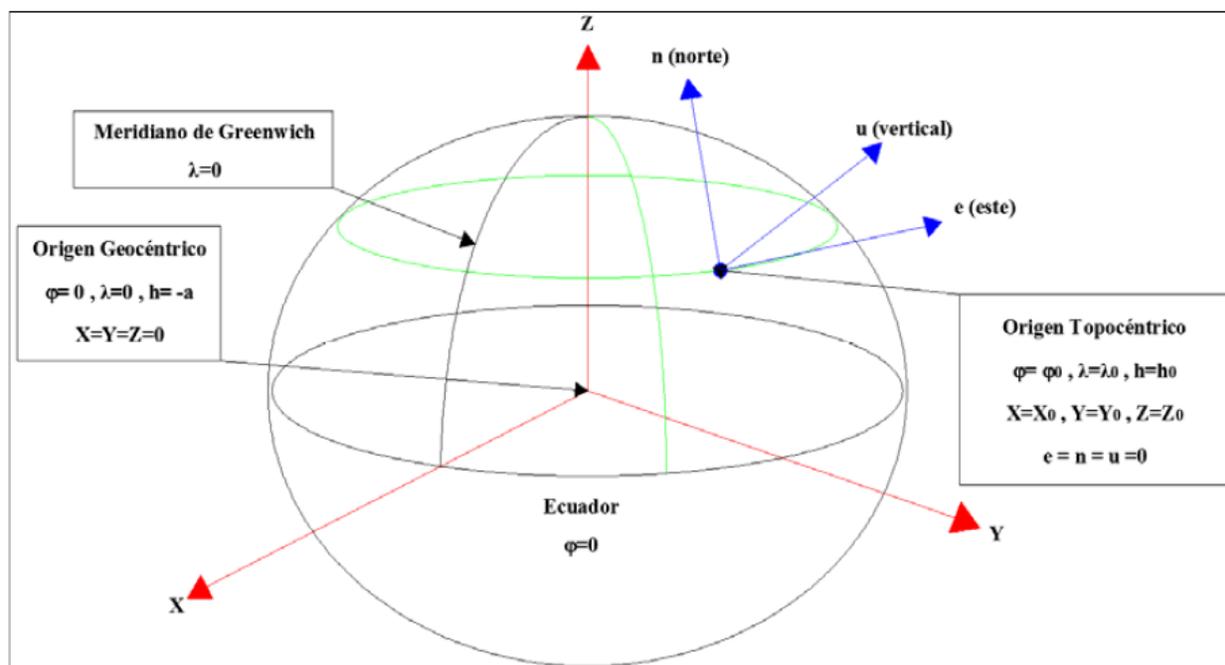


Figura 3. Sistema de coordenadas cartesianas globales (X, Y, Z) y topocéntricas locales (e, n, u).

Fuente: International Association of Oil & Gas Producers (2018)

Según Luna Ludeña (2017), utilizar este sistema de coordenadas facilita la lectura del comportamiento de cada componente en el análisis de las series temporales. Así mismo, permite trabajar con valores pequeños y centrados a cero.

2.1.3. Relación entre un sistema de coordenadas cartesianas globales y coordenadas locales topocéntricas

Para realizar la conversión desde un sistema de coordenadas cartesianas globales (X_i, Y_i, Z_i) a locales topocéntricas (e_i, n_i, u_i) con $i = 1, 2, \dots, Q$, siendo Q el número de coordenada de la serie, se debe realizar los siguientes pasos:

- Definición de las coordenadas cartesianas iniciales de cada serie:

$$X_0 = X_1$$

$$Y_0 = Y_1$$

$$Z_0 = Z_1$$

- Cálculo de coordenadas geodésicas ($\lambda_0, \varphi_0, h_0$) a partir de las coordenadas cartesianas iniciales (X_0, Y_0, Z_0) según Heiskanen & Moritz (1985) en las ecuaciones (1) y (2):

$$\begin{cases} \lambda_0 = \text{atan} \frac{Y_0}{X_0} \\ \varphi_0 = \text{atan} \frac{Z_0}{\rho} (1 - e^2) \\ h_0 = \frac{\rho}{\cos \varphi_0} - N \end{cases} \quad (1)$$

Siendo:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2} \\ N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_0}} \end{cases} \quad (2)$$

$a = \text{semieje mayor del elipsoide de referencia}$
 $e = \text{primera excentricidad del elipsoide de referencia}$

- Cálculo de la serie en coordenadas locales (ei, ni, ui) usando como origen del sistema de referencia local las coordenadas geodésicas ($\lambda_0, \varphi_0, h_0$) calculadas en el paso anterior, usando una transformación clásica de sistema de referencia local a global, evidenciada en la ecuación (3) (International Association of Oil & Gas Producers, 2018).

$$\begin{pmatrix} e_i \\ n_i \\ u_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 \cos \lambda_0 & -\sin \varphi_0 \sin \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ \cos \varphi_0 \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \sin \lambda_0 & \sin \varphi_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Obteniendo de esta manera las series de coordenadas (ei, ni, ui) , $i= 1, 2, \dots, Q$. para cada estación estudiada.

2.2. Marco de Referencia

Marco de referencia es la materialización en el espacio del sistema de referencia convencional a través de un conjunto de puntos coordinados en la superficie terrestre con velocidades conocidas (Furones, 2011). Éste permite la comprensión de los fenómenos de cambio que sufre el planeta, como el movimiento constante de las placas tectónicas y cargas regionales o hundimientos, y proporciona una referencia común que facilita la relación de observaciones y resultados en varios puntos del globo terráqueo (Muglisa & Pillajo, 2017)

2.2.1. Marco de Referencia Terrestre Internacional ITRF

El ITRF es la materialización del ITRS con mayor precisión y exactitud, está conformado por estaciones distribuidas geográficamente alrededor del mundo mediante las técnicas de observación: VLBI, LLR, GPS, SLR y DORIS, cuyas coordenadas y velocidades se encuentran referidas a una época específica (Moirano, 2000).

SIRGAS utiliza actualmente el ITRF2014, versión del ITRS, que se encuentra basado en soluciones reprocesadas de las técnicas geodésicas espaciales: VLBI, SLR, GPS y DORIS (Figura 4), cabe recalcar que cada país adjunto a este sistema, adopta o se alinea a un ITRFyy determinado. El Ecuador se encuentra alineado al ITRF 2008, referido a la época 2005.0 y es una versión mejorada del ITRF 2005 en términos de precisión acerca de las posiciones de las estaciones y de las velocidades. Esta materialización utiliza estándares actuales e idénticos, además de la utilización de un mismo software para el procesamiento de observaciones lo que permite que su definición se mantenga a lo largo del tiempo en cuanto a origen, escala y observación (Altamimi, Collilieux, & Métivier, 2011).

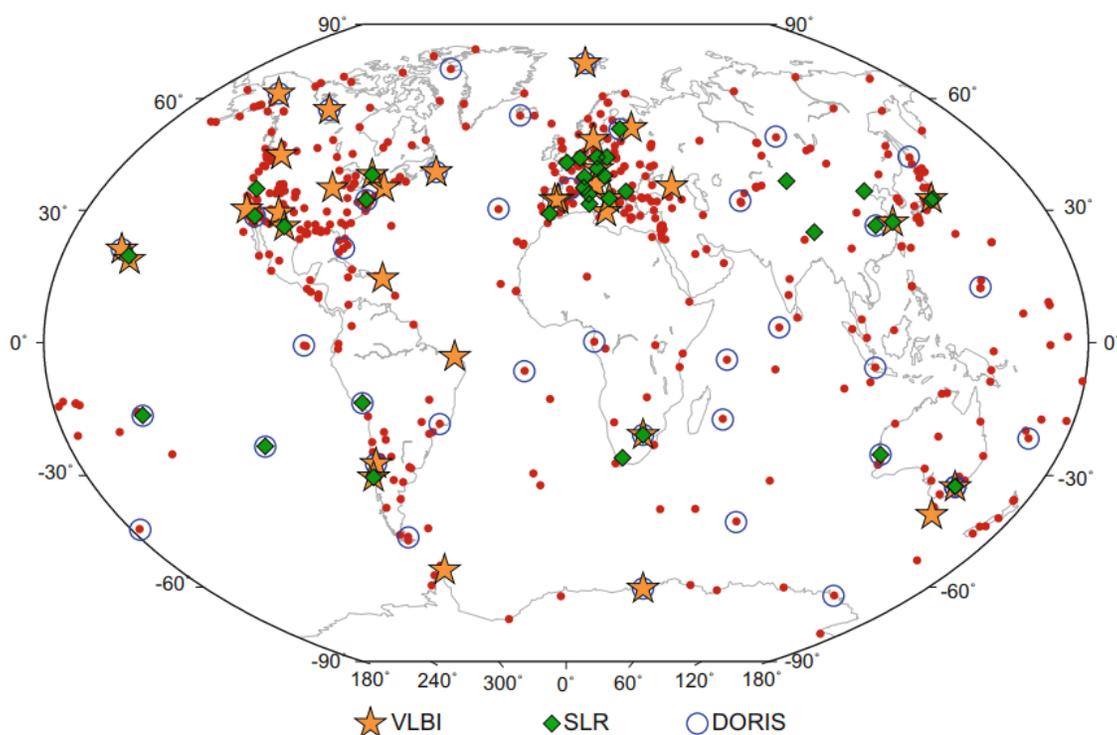


Figura 4. Red ITRF2008 destacando las ubicaciones VLBI, SLR y DORIS localizadas mutuamente con GPS.

Fuente: Altamimi, Collilieux, & Métivier (2011)

2.3. Sistema Global de navegación por Satélite GNSS

Un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), son los sistemas que tienen la capacidad de brindar información sobre posicionamiento espacial y temporal en un punto y momento específico. Está compuesto por las constelaciones globales: GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rusia), GALILEO (Europa) y BEIDOU (China); y por las constelaciones regionales QZSS (Japón) e IRNSS (India). Poseen una estructura definida, dividida en tres segmentos: espacial (satélites de navegación y comunicación), control (estaciones de monitorización) y usuarios (equipos GNSS) (García D. , 2008) (Manandhar, 2018).

2.3.1. Red del Servicio Internacional GNSS (IGS)

El Servicio Internacional GNSS recopila, archiva y distribuye los datos recopilados de las observaciones proporcionadas por una red global de estaciones de rastreo terrestre operada de forma cooperativa. Dicha red está conformada por más de 400 estaciones permanentes distribuidas globalmente (Figura 5), de funcionamiento y calidad geodésica que rastrean GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, IRNSS y SBAS (International GNSS Service, 2018).

El IGS utiliza la información mencionada para proporcionar datos y productos derivados del análisis de estos para la investigación en ciencias de la Tierra, como mejorar y ampliar el ITRF mantenido por el Servicio Internacional de Sistemas de Referencia y Rotación de la Tierra (IERS), monitorear la deformación y rotación de la Tierra, monitorear la tropósfera y la ionósfera y determinar las órbitas de satélites científicos (International GNSS Service, 2018).



Figura 5. Red IGS.

Fuente: International GNSS Service (2018)

2.3.2. Estaciones de Monitoreo Continuo del Ecuador

Ecuador cuenta con una red de estaciones de monitoreo continuo administrada y establecida por el Instituto Geográfico Militar (IGM) y pertenecientes a la Red SIRGAS-CON, distribuida dentro del territorio nacional continental e insular por 18 estaciones activas, 22 en mantenimiento, 2 inactivas y 8 removidas que capturan datos GPS y GLONASS de observación y navegación en formato RINEX 2.1, algunas estaciones pueden capturar también datos meteorológicos. Las estaciones de la REGME administradas por el IGM se observa en la Tabla 2 (Instituto Geográfico Militar, 2018)

Tabla 2

Estado de las Estaciones de Monitoreo Continuo del Ecuador REGME.

ID	Estación	Nombre	Estado
1	ABEC	Ambato	Mantenimiento
2	ALEC	Alausí	Mantenimiento
3	AUCA	Auca	Mantenimiento
4	BHEC	Babahoyo	Mantenimiento
5	CHEC	El Chaco	Mantenimiento
6	CKEC	Comunidad Kichwa	Inactiva
		Pastaza	
7	CLEC	Celica	Activa
8	COEC	Carchi	Activa
9	CUEC	Cuenca	Mantenimiento
10	CXEC	Cotopaxi	Activa
11	ECEC	El Carmen	Activa
12	EPEC	ESPE	Activa
13	EREC	ERSA	Activa
		Riobamba	
14	ESMR	Esmeraldas	Activa

ESTADO	#
ACTIVAS	18
MANTENIMIENTO	22
INACTIVAS	2
REMOVIDAS	8
Total	50

CONTINÚA →

15	FOEC	Francisco de Orellana	Mantenimiento
16	GLPS	Galápagos	Activa
17	GUEC	Guayas	Activa
18	GYEC	Guayaquil	Removida
19	GZEC	Gualaquiza	Mantenimiento
20	IBEC	Ibarra	Activa
21	LJEC	Loja	Mantenimiento
22	LPEC	Las Peñas	Mantenimiento
23	LREC	Lorocachi	Mantenimiento
24	MAEC	Macas	Activa
25	MHEC	Machala	Removida
26	MTEC	Montalvo	Mantenimiento
27	NJEC	Naranjal	Mantenimiento
28	NORE	Nuevo Rocafuerte	Mantenimiento
29	ONEC	Chone	Mantenimiento
30	OREC	El Oro	Mantenimiento
31	PDEC	Palanda	Removida
32	PEEC	Pedernales	Removida
33	PJEC	Paján	Removida
34	PLEC	Palanda	Activa
35	POEC	Portoviejo	Mantenimiento
36	PREC	Palora	Activa
37	PTEC	Portoviejo	Removida
38	PVEC	Portoviejo	Removida
39	QUEM	Puengasí	Activa
40	QUI3	Quito	Inactiva
41	QVEC	Quevedo	Mantenimiento
42	RIOP	Riobamba	Activa
43	SCEC	San Cristóbal	Removida

CONTINÚA →

44	SEEC	Santa Elena	Mantenimiento
45	SIEC	Santa Isabel	Activa
46	SNLR	San Lorenzo	Mantenimiento
47	STEC	Santiago	Mantenimiento
48	TNEC	Tena	Activa
49	TPEC	Tiputini	Activa
50	TSEC	Taisha	Mantenimiento

Fuente: (Instituto Geográfico Militar, 2018)

2.4. Factores que influyen en el posicionamiento GNSS

Existen múltiples factores que afectan el valor real de las coordenadas provenientes del posicionamiento por satélite, esta diferencia entre lo observado y lo real pueden ser modelados durante el procesamiento de los datos para reducir su incidencia en la determinación de coordenadas finales. Algunos de los factores que afectan el posicionamiento GNSS y los modelos utilizados en el software de procesamiento para reducir su efecto son:

- Refracción Ionosférica: La densidad de electrones libres presentes en la ionosfera influyen en la propagación de señales GNSS por refracción cuando atraviesa por esta capa (Hoffman-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2007). Para minimizar los efectos de la ionósfera en el procesamiento son necesarios los modelos finales ionosféricos (*.ION) del IGS (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).
- Refracción troposférica: Los cambios de temperatura, presión y vapor de agua sobre la tropósfera causan refracción y dispersión de las señales GNSS (Luna, 2017). El modelo final troposférico (*.TRP) reducirá los efectos de la tropósfera en el procesamiento (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).
- Errores en parámetros orbitales o efemérides: Son errores producidos por perturbaciones en las orbitas satelitales, causadas por incertidumbres en los modelos

de campo gravitatorio, estimación del estado inicial o radiación solar (Colombo, 1984). En el procesamiento se minimizan estos errores utilizando las correcciones finales semanales del IGS para parámetros de orientación terrestre (*.ERP) (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).

- Errores en el reloj: Existe la posibilidad de que en los datos de navegación exista una desviación de 1 ms entre el tiempo del satélite y del receptor al encontrarse estos dimensionados, por lo que una diferencia de 1 ms puede causar una pseudo distancia de 300 km (Luna, 2017). Para la reducción de dichas diferencias se deberá utilizar en el procesamiento las correcciones finales (*.CLK) (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).
- Efecto multitrayectoria (multipath): Este efecto sucede cuando el receptor recibe las señales GNSS por varios caminos por presencia de superficies reflectoras cercanas a la estación. Para minimizar dichos errores es necesario considerar el diseño de la antena, localización de la estación y sesiones de observaciones largas; además se puede tomar en cuenta que este efecto depende de los satélites GNSS recibidos y que se repiten de forma periódica, similar a la periodicidad que tienen las órbitas de los satélites (García L. , 2015)
- Variación del centro de fase de la antena. Se refiere a la diferencia entre el centro de fase eléctrico y el centro de fase mecánico de la antena, ésta se encuentra compuesta por la distancia entre la materialización y un punto tangible llamado Punto de Referencia de la Antena o ARP, y por la distancia entre este ARP y el centro real de fase que es intangible (Luna, 2017). Las correcciones que minimizan las afectaciones por las variaciones de centros de fase en el procesamiento son los archivos (*.PCV) (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).
- Mareas Terrestres: Las cargas oceánicas y continentales afectan la Tierra como resultado de los efectos gravitatorios del Sol, la Luna y otros planetas. Estas mareas

afectan las mediciones geodésicas que se realizan en la superficie, afectando en gran manera a la altura elipsoidal (Bos & Scherneck, 2018). El modelo de soluciones de elementos finitos (FES) calculado a partir de ecuaciones hidrodinámicas de marea y asimilación de datos permite la reducción de errores en el procesamiento, dichas correcciones se encuentran en el archivo (*.BLQ) (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).

2.5. Procesamiento con Software Bernese 5.2

El software Bernese es un software científico que permite el post-procesamiento de datos GNSS con alto rendimiento, flexibilidad y precisión; es decir que para aplicaciones geodésicas mantiene un alto estándar de calidad. Su desarrollo fue a cargo del Instituto Astronómico de la Universidad de Berna, el cual lo mantiene en constante desarrollo y mejora. Su última versión es Bernese GNSS Software 5.2 con fecha de lanzamiento del 28 de febrero de 2018 (Bernese UNIBE, 2018).

Se utiliza el software Bernese para el procesamiento de las observaciones de las estaciones permanentes GNSS, pertenecientes a la Red SIRGAS-CON en varios centros de procesamiento distribuidos en los diferentes países del continente sudamericano y del caribe, adhiriéndose a para su procesamiento a lineamientos establecidos por SIRGAS para la integración de las soluciones semi-libres que posteriormente serán procesadas por el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística y por el Instituto de Investigación Geodésica Alemana “DGFI” (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, 2017).

Dach, Lutz, Walser, & Fridez (2015) menciona que la estructura del software Bernese 5.2 está basado 4 directorios principales, como se muestra en la

Figura 6, descrita a continuación:

1. Área de Programa (BERN52): Encargada del sistema del software, contiene los códigos de fuente, ejecutables, scripts BPE, que no pueden ser modificados por los

usuarios salvo una necesidad a través de compiladores, haciéndolos independientes de los usuarios y de las campañas a ejecutarse. En esta área se encuentra ubicada la carpeta GEN, muy necesaria, que contiene archivos de información básica para el procesamiento de datos GNSS como será detallada posteriormente en la metodología.

2. Área de Usuario (GPSUSER52): Contiene la información de las configuraciones específicas del usuario como propios PCF y scripts de procesamiento.
3. Área de Datos (GSPDATA): Contiene las carpetas de Almacenamiento de Datos (DATAPOOL), Campañas de procesamiento (CAMPAIGN52) y Área de Guardado (SAVEDISK)
4. Área Temporal (GPSTEMP): Para uso temporal mientras se ejecuta los BPE.



Figura 6. Directorio del Software Bernese 5.2.

Fuente: Dach, Lutz, Walser, & Fridez (2015)

Bernese 5.2 dentro de su menú también cuenta con variables predefinidas de ambiente y de menú que son utilizados en los campos de ingreso de información como parte de los nombres. Existen dos tipos de variables: de usuarios y de tiempo. Las primeras tienen la libertad de definir variables y darles valor según necesite el usuario mientras que las variables de tiempo son predefinidas dentro del software para ser utilizados en los campos de entrada, cada variable de

tiempo es calculada dependiendo la sesión activada. Las variables de menú se observan en la Tabla 3.

Tabla 3

Variables de Menú de Bernese 5.2.

Tipo	Variable	Valor	Formato	Descripción
Variables de entorno	U	#{U}		Direcciona al GPSUSER52
	T	#{T}		Direcciona al GPSTEMP
	X	#{X}		Direcciona al BERN52/GPS
	P	#{P}		Direcciona al CAMPAIGN52
	USER	#{USER}		Imprime el nombre de usuario en el encabezado del programa
Variables de menú	\$+0	243	DDD	Día del año
	\$S+0	2430	DDDS	Día del año e identificador de sesión
	\$Y+0	2003	YYYY	Año, cuatro dígitos
	\$W+0	1234	WWWW	Semana GPS
	\$M+0	0308	YYMM	Año, Mes
	\$JD+0	52882	DDDD	Día Juliano
	\$WD+0	12340	WWWWD	Semana GPS y día de la semana
	\$YD+0	03243	YYDDDD	Año (2 dígitos) y día del año
	\$YSS+0	032430	YYDDDS	Año (2 dígitos), día del año e identificador de sesión

Fuente: (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015)

2.5.1.1. Lineamientos SIRGAS para el procesamiento

Ya que los Centros de Análisis SIRGAS están conformados por Centros de Procesamiento y Centros de Combinación, es necesario homologar la información entregada por estos como soluciones diaria y/o semanales semilibres para las coordenadas en formato SINEX, por lo que SIRGAS ha detallado las instrucciones mínimas que deben seguir dichos centros para el

procesamiento de las estaciones SIRGAS-CON asignadas (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, 2017).

SIRGAS (2017) dicta que las características generales de procesamiento están dadas por:

- a. Intervalo de muestreo de 30 segundos
- b. Máscara de elevación de 3°
- c. Asignación de peso a las observaciones en función de su elevación, de no poder realizarlo, utilizar como máscara de elevación 15°
- d. Cálculos y presentación de resultados deben adelantarse en tiempo GPS
- e. De ser necesario un modelo global de gravedad, utilizar EGM2008
- f. Introducir las órbitas satelitales, las correcciones de los relojes de los satélites y los parámetros de observación terrestre contenidos en las soluciones finales del IGS.
- g. Utilizar los valores absolutos para las variaciones de los centros de fase de las antenas GNSS publicados por el IGS, incluyendo valores de elevación y azimut de entrada de la señal de la antena. Además de coincidir estrictamente la identificación de receptores y antenas en el procesamiento con sus correspondientes log files.
- h. Utilizar los valores de calibración para la componente Z de los satélites GNSS contenida en el archivo de variaciones de centro de fase de las antenas
- i. Para la corrección del movimiento por efecto de cargas oceánicas es necesario utilizar la versión más reciente del modelo de mareas oceánicas FES
- j. Los efectos atmosféricos por mareas, se considerarán las componentes S1 y S2, del modelo de van Dam y Rey. Los que no sean de origen no mareal no deben reducirse.
- k. Los efectos causados por fenómenos diferentes a los de mareas no deben reducirse
- l. Para la corrección por refracción troposférica es necesario utilizar el modelo Vienna Mapping Function (VMF).
- m. Para la solución final, se recomienda que las ambigüedades de fase correspondan a un número entero
- n. Cualquier característica no mencionada se deja a discreción de cada centro de análisis
- o. Elaborar un reporte sobre que estaciones no fueron incluidas en el reporte por baja calidad, inactividad u otras razones, con la extensión REP.

2.5.1.2. Bernese Processing Engine (BPE)

En la actualidad, se han establecido redes GNSS permanentes alrededor del mundo con diferentes propósitos y ha permitido que se requiera un procesamiento de datos GNSS automatizado por la cantidad diaria de datos recopilados; esta necesidad permitió el desarrollo del Motor de Procesamiento de Bernese (BPE) y es utilizado para el procesamiento de la red global del IGS desde 1995 (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).

Aunque fue creado para el procesamiento de redes GNSS, la herramienta BPE puede automatizar ciertos niveles de estudio requerido por el usuario, de manera secuencial o en paralelo, se pueden crear scripts para descarga de datos, produce informes de calidad y lineamientos de procesamiento, guardan y envían resultados (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).

Las tareas de procesamiento del BPE son definidas por el usuario dentro de los Archivos de Control de Procesos (PCF).

2.5.1.3. Process Control File (PCF)

El Archivo de Control de Procesos (PCF) es un archivo ASCII, que le permite al usuario definir el orden y de qué manera ejecutarse, secuencial o en paralelo, los scripts para un determinado propósito, así como, definir parámetros que permiten pasar o detener scripts, el CPU a ser utilizado por el cliente y el panel de opciones al ejecutar los programas de Bernese (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).

Algunos de los PCF que se encuentran por listos por defecto en el Software Bernese 5.2 son:

- Posicionamiento Puntual Preciso (PPP_BAS.PCF)
- Procesamiento de Redes de Doble Diferencia (RN2SNX.PCF)

- Prueba de Líneas Base (BASTST.PCF)
- Procesamiento de Redes de Diferencia Cero (CLKDET.PCF)
- Determinación de órbitas precisas para LEOs (LEOPOD.PCF)
- Validación de órbitas SLR (SLRVAL.PCF)

2.5.1.4. Procesamiento Precise Point Positioning (PPP)

El PCF denominado PPP_BAS.PCF tiene como propósito usar las observaciones RINEX de las estaciones GNSS permanentes en la superficie para obtener sus coordenadas de ubicación al nivel del cm. Éstas podrían ser usadas posteriormente como información a priori para el procesamiento de Redes de Doble Diferencia (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).

Otros archivos resultantes y que pueden ser de utilidad son:

- Parámetros Troposféricos para cada estación
- Correcciones de reloj en intervalos
- Actualización del Archivo de Abreviaciones de cada estación
- Calculo de velocidades a priori desde un modelo NUVELIA
- Propagación de los resultados de las coordenadas por estación a una época predefinida
- Generación de un archivo conjunto de coordenadas y velocidades
- Detección de las estaciones faltantes en las correcciones de cargas oceánicas y atmosféricas

Los Scripts del PPP_BAS.PCF a ejecutarse mediante el BPE en el Software Bernese 5.2 se evidencian en la Tabla 4.

Tabla 4*Descripción del PCF PPP_BAS.PCF.*

ETAPA	PID	RUTINA	DESCRIPCIÓN
Copia los archivos requeridos y prepara el procesamiento por hora	002	ATX2PCV	Convierte las variaciones del centro de Fase (*.ATX) en un formato interno de Bernese
	022	OBSMRG	Concatena los archivos RINEX por hora en caso de un procesamiento por horas y corta las observaciones de acuerdo a las necesidades
Prepara información de polos, órbitas y relojes	101	POLUPDH	Extrae la información de las efemérides precisas
	111	ORBMGRH	Concatena los archivos de órbita precisos de varios días si fuera necesario para un procesamiento por hora
	112	PRETAB	Convierte la información de las órbitas precisas (*.SP3) en posiciones tabulares en el marco inercial (*.TAB) para su posterior integración numérica
	113	ORBGENH	Integra las ecuaciones de movimiento usando las posiciones dadas en el archivo de órbita tabular para producir un archivo de órbita estándar de Berna (*.STD), utilizado en todos los programas de procesamiento que necesitan información de órbita
	121	CCRNXCH	Si se configura un esquema de procesamiento por hora, este script concatena los archivos RINEX de reloj de varios días
	122	RNXCLK	Convierte los archivos RINEX de reloj (PID 121) en un archivo de reloj satelital de Bernese (*.CLK)
Preproceso, conversión y sincronización de datos de observación	201	RNXGRA	Produce un resumen de los datos de observación de RINEX suavizados, que ofrece una visión general completa de los satélites observados, estaciones involucradas y su desempeño. Este archivo aparece en el resumen de procesamiento y puede ayudar a identificar posibles problemas de seguimiento de datos de los sitios de observación.

CONTINÚA →

	212	RNXSMT_H	Se llama para limpiar los datos de RINEX e identificar los resbalones del ciclo. El procesamiento se realiza en paralelo, es decir, el programa recibe una lista de archivos RINEX que deben limpiarse de una sola vez. La salida consta de archivos RINEX suavizados (extensión SMT) que contienen observaciones suavizadas en lugar de código original
	222	RXOBV3_H	Crea archivos de observación de Bernese para el código y la fase de los archivos RINEX de acuerdo con el número de sesiones indicado por V_HOURLY en caso de un esquema de procesamiento por hora
	223	CRDMRDAT	Se ejecuta para establecer la referencia geodésica y coordinar la época en un valor común para todas las estaciones involucradas, según el requerimiento del usuario
	232	CODSPP_P	La sincronización del reloj del receptor es la tarea principal de CODSPP. El programa también determina las coordenadas aproximadas de la estación mediante un enfoque de posicionamiento de punto directo, utilizando solo observaciones de código suavizado. Esto es útil en caso de que las coordenadas a priori (por ejemplo, del encabezado RINEX) sean de dudosa calidad. Los valores atípicos en las observaciones también se pueden detectar en este paso.
	233	CODXTR	Produce un archivo de resumen que informa sobre los valores atípicos detectados, las órbitas faltantes, los satélites excluidos debido a problemas con los satélites y los relojes faltantes. El extracto es parte del archivo de protocolo.
Calcula soluciones PPP estación por estación	302	PPPEDT_P	Sirve para realizar un proceso de limpieza de datos estación por estación y para calcular la solución PPP.
	303	GPSXTR	Da una visión general de la solución PPP y de la limpieza de datos
	311	RES_SUM	Produce estadísticas residuales basados en los archivos generados en el cálculo de la solución PPP.
	321	CRDMERGE	Los archivos de coordenadas específicos para cada estación las combina en uno solo

CONTINÚA →

	322	ADDNEQ2	Las ecuaciones normales se recopilan y los parámetros de la troposfera de todas las estaciones se proporcionan en un archivo con formato Bernese y en un archivo SINEX de la troposfera.
	323	PPP_HLM	Compara los resultados del PPP con el archivo de coordenadas ingresado mediante una transformada de Helmert
	331	CCRNXC	Los archivos RINEX de reloj específicos de la estación se combinan para obtener un archivo de reloj RINEX.
	341	ADDNEQ2	Se utiliza para escribir un solo archivo SINEX y un archivo de ecuaciones normales combinadas que contiene todas las estaciones basadas en los archivos de ecuaciones normales generados en PID 302. Los parámetros de la troposfera se eliminan previamente en este paso. Las secciones SINEX relacionadas con la información de la estación y las coordenadas estimadas son listado en el resumen de procesamiento
Este bloque permite tener en cuenta las velocidades de la estación según el modelo NNR – NUVEL – 1A, si se desea.	402	NUVELO	El campo de velocidad para las estaciones se calcula de acuerdo con el modelo NNR – NUVEL – 1A y se almacena en un archivo de velocidad de Berna (*.VEL)
	403	COOVEL	Las coordenadas de la estación se propagan desde la época de la sesión a la época de coordenadas del archivo de marco de referencia definido en la variable BPE V_REFEPO utilizando las velocidades del paso anterior.
	411	CRDMERGE	El campo de velocidad generado en PID 402 se combina en el archivo de referencia de velocidad definido en V_REFINF. El campo de velocidad fusionada se almacena en el archivo definido en V_CRDINF. Contiene todas las velocidades de estación de referencia, completadas por los sitios adicionales en esta solución PPP.

Fuente: (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015)

2.5.1.5. Procesamiento RINEX TO SINEX

El PCF denominado RNX2SNX.PCF está diseñado para realizar un análisis doble diferencia en observaciones RINEX de estaciones GNSS para una red regional. Las coordenadas de las estaciones en un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z), referidas a un marco de referencia deseado y los parámetros troposféricos, como resultado del procesamiento, serán archivados en formatos Bernese y SINEX para posteriores procesamientos y combinaciones (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015).

Algunas de las principales características que tiene este PCF son:

- Elimina los archivos de observaciones que poseen amplios residuales y fallas en las observaciones para mejorar la precisión y la confiabilidad de la red.
- Incluye una resolución de ambigüedades avanzada, ya sea por el método Wide-Lane de código, el método Wide-Lane de fase, método Quasi-Ionosphere-Free (QIF) o el método directo por doble frecuencia.
- Compara las coordenadas resultantes con las coordenadas del marco de referencia a través de una Transformada de Helmert

Los Scripts del RNX2SNX.PCF a ejecutarse mediante el BPE en el Software Bernese 5.2 se evidencian en la Tabla 5

Tabla 5

Descripción del RNX2SNX.PCF.

ETAPA	PID	RUTINA	DESCRIPCIÓN
Copia los archivos requeridos, crea un archivo de coordenadas a priori y	002	ATX2PCV	El archivo (*.ATX) es usado para actualizar el archivo (*.PCV)
	003	COOVEL	Las coordenadas (*.CRD) se propagan a la época de la sesión actual aplicando las velocidades del campo de velocidad correspondiente

CONTINÚA →

prepara el procesamiento por hora	004	COOVEL	Las coordenadas de las estaciones IGS (*.CRD) se propagan a la época de la sesión actual aplicando las velocidades del campo de velocidad IGB08.VEL
	005	CRDMERGE	Une las coordenadas obtenidas en los PID 003 y 004 en un solo archivo
	022	OBSMRG_P	Las observaciones que pertenecen a la sesión actual, o al rango de sesiones por hora (de ser el caso), se copian de los archivos de entrada RINEX en el directorio ORX de la campaña en los archivos de salida ubicados en el directorio RAW de la campaña.
Prepara la información de polos y órbitas	101	POLUPDH	Extrae la información de las efemérides precisas
	111	ORBMRGH	Concatena los archivos de órbita precisos de varios días si fuera necesario para un procesamiento por hora
	112	PRETAB	Convierte la información de las órbitas precisas (*.PRE) en posiciones tabulares en el marco inercial (*.TAB) para su posterior integración numérica
	113	ORBGENH	A partir del archivo de órbita tabular, se crea un archivo de órbita estándar mediante la integración numérica de las ecuaciones de movimiento. Un archivo de resumen informa sobre la calidad del ajuste de órbita. Está contenido en el resumen de procesamiento (R2Syssss.PRC)
Conversión y sincronización de los datos de observación	201	RNXGRA	Produce un resumen de los datos de observación de RINEX suavizados, que ofrece una visión general completa de los satélites observados, estaciones involucradas y su desempeño. Este archivo aparece en el resumen de procesamiento y puede ayudar a identificar posibles problemas de seguimiento de datos de los sitios de observación.
	212	RNXSMT_H	El script ejecuta el programa RNXSMT en un grupo de archivos RINEX. Las observaciones del código se limpian y el código suavizado se proporciona, mientras que las mediciones de fase solo se copian del archivo original al nuevo archivo RINEX (*.SMT).

CONTINÚA →

	222	RXOBV3_H	<p>Convierte los archivos RINEX suavizados a archivos de observación de Bernese. El programa compara los registros de datos en el encabezado de RINEX con las entradas en el archivo de información de la estación. Cualquier inconsistencia detectada en el encabezado se informa en el resumen del procesamiento. Usando la configuración predeterminada, el BPE se detiene con un error si el nombre de la estación no está en el archivo de abreviatura o si el tipo de antena no aparece en el archivo de compensaciones del centro de fase</p>
	232	CODSPP_P	<p>CODSPP realiza un posicionamiento de punto de diferencia cero basado en código, principalmente para sincronizar los relojes del receptor con la hora del GPS en un nivel inferior al microsegundo. También se incluye una detección básica atípica. Las correcciones de reloj de época se estiman porque los relojes del receptor pueden no ser lo suficientemente estables para ser modelados como polinomios (al menos no con el nivel de precisión requerido)</p>
	233	CODXTR	<p>El programa CODXTR crea un resumen de los archivos de salida escritos en el paso CODSPP. Aquí un valor alto de RMS y/o muchos valores atípicos indican un rastreo incorrecto de las estaciones</p>
<p>orma líneas base, preprocesamiento y cálculo de soluciones sin ambigüedades resueltas.</p>	302	SNGDIF	<p>Selecciona un conjunto completo de líneas base independientes y crea archivos de observación de diferencia única de fase. La estrategia adoptada para el proceso de selección es OBS – MAX, que puede considerarse estándar para casi todas las aplicaciones.</p>
	303	SNGDIF	<p>Toma la lista de líneas base que se formaron anteriormente y también se crean los archivos de simple diferencia de fase correspondientes para las observaciones del código. Esto es esencial para la resolución de ambigüedades basadas en la combinación lineal Melbourne-Wübbena.</p>
	312	MAUPRP_P	<p>Preprocesa los archivos de simple diferencia de fase. Los cortes de ciclo son detectados y corregidos. Si el tamaño de un deslizamiento de ciclo no se puede determinar de manera confiable, se configura una nueva ambigüedad. Además, las</p>

		observaciones no pareadas y las observaciones reunidas en ángulos de elevación muy bajos se marcan como inutilizables	
313	MPRXTR	Crea un resumen del paso anterior	
322	GPSEDT_P	Realiza una proyección residual de doble diferencia de fase.	
323	GPSXTR	Extrae la información principal de las salidas del programa GPSEST de la solución final después de limpiar los residuos para el control de calidad.	
331	RES_SUM	Comprueba los resultados proyectados del paso anterior y rechaza los datos de las estaciones que tienen un mal comportamiento si es necesario.	
341	ADDNEQ2	Una solución de red con ambigüedades de valor real se calcula en función de las ecuaciones normales almacenadas en la ejecución de GPSEST después de la proyección residual (PID 322). Las coordenadas y las estimaciones de la troposfera se guardan para su uso posterior en el paso de resolución de ambigüedad	
342	GPSXTR	Crea una breve descripción de la solución	
Resuelve las Ambigüedades	401	SATMRK	Al comienzo de esta sección, se restablecen todas las ambigüedades indicadas como resueltas en los archivos de observación de fase de Bernese.
	411	GNSAMBAP	Realiza una selección automática de las líneas base mediante el programa BASLST
	412	GNSAMB_P	Realiza una proyección de las mediciones de código para reducir amplios residuales, revisa el archivo de residuales para marcar los valores atípicos de gran tamaño en los archivos de observación
	421	GNSL53AP	Selecciona todas las líneas base donde se aplicará la estrategia de resolución de ambigüedades wide-lane
	422	GNSL53_P	Lleva a cabo la resolución de ambigüedades wide-lane para las líneas base escogidas en el paso anterior
	431	GNSQIFAP	Prepara la ejecución de la resolución de ambigüedades basado en la estrategia QIF
	432	GNSQIF_P	Resuelve ambigüedades para estaciones separadas por largas líneas base
	441	GNSL12AP	Selecciona las líneas base de corta distancia

	442	GNSL12_P	Resuelve las ambigüedades de las líneas base escogidas anteriormente para resolverlas directamente por doble frecuencia.
	443	AMBXTR	Crea resúmenes de cada uno de los pasos de resolución de ambigüedades anteriores y enumerando el porcentaje de ambigüedades resueltas con éxito.
Cálculo de la solución de Red de Ambigüedades Fijas, Creación de los Archivos de ecuaciones normales y SINEX finales	502	GPSCLU_P	Todas las observaciones se procesan teniendo en cuenta las correlaciones correctas dentro de cada grupo y la información de la ecuación normal resultante se almacena. Se introducen las ambigüedades resueltas. No se calcula ninguna solución.
	511	ADDNEQ2	Se calcula la solución a partir de las ecuaciones normales del paso anterior y se las refiere al marco de referencia adoptado por el usuario
	512	GPSXTR	Crea una breve descripción de las soluciones de la red de ambigüedades fijas
	513	COMPARF	Compara el conjunto de coordenadas estimado con los resultados de las sesiones anteriores
	514	HELMCHK	Las coordenadas estimadas de todos los sitios de referencia involucrados se verifican mediante una transformación de Helmert
	521	ADDNEQ2	Se produce un archivo de ecuaciones normales de tamaño reducido al eliminar previamente los parámetros de la troposfera y los gradientes horizontales del sistema. Por lo tanto, solo los parámetros de coordenadas permanecen en el archivo de ecuación normal resultante
	522	GPSXTR	Se extrae un resumen del archivo de salida del paso anterior

Fuente: (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015)

2.6. Series temporales GNSS

Una serie temporal es el conjunto de observaciones de una magnitud y observada, definiendo $y_i = y_1, y_2, \dots, y_Q$, en el tiempo t_i , $i = 1, 2, \dots, Q$, tal que Q es el tamaño de la muestra de la serie a ser observada (García L. , 2015).

La observación continua de los valores de una variable través del tiempo en intervalos regulares (días, semanas, años, etc.) se la denomina serie temporal, cuyo análisis tiene como objetivo encontrar un modelo que se acople a los procesos estocásticos generados en las series. (Luna, 2017)

Las estaciones GPS permanentes, a través de sus observaciones, han permitido en los últimos años estudiar el comportamiento de los movimientos de la corteza terrestre, así como, obtener velocidades y deformaciones mediante una tendencia lineal u otro modelo que se haya ajustado total o parcialmente a dicho fenómeno. Por ello, la descomposición de las series temporales, en la existencia o no de tendencia, variables estacionales y tipo de ruido, permiten ajustar dichos datos a un modelo teórico que se requiere conocer (García L. , 2015).

De este modo, el modelo general de las series temporales se puede definir según Amiri-Simkooei, Tiberius, & Teunissen (2007), como se observa en la ecuación (4) :

$$y_i = x_0 + rt_i + st_i + \epsilon_x(t_i) \quad (4)$$

Definiendo a y_i como la observación en el instante de tiempo t_i , x_0 es la ordenada desde el origen, r la pendiente, s la variabilidad estacional y $\epsilon_x(t_i)$ el ruido en la serie.

2.6.1. Detección y corrección de outliers

Aquellas observaciones que poseen errores y son inconsistentes con el comportamiento de la serie se denominan anómalas, estas observaciones anómalas tienden a superar o a reducir la serie,

de modo que si no se realizar un tratamiento de las mismas es probable que puedan causar afectación a los parámetros estimados y reducir el ajuste total del modelo (Chen & Liu, 1993). Uno de los métodos para el tratamiento de dichos datos anómalos es el de procesos integrados de grado 1.

2.6.1.1. Procesos Integrados de Grado 1

El proceso integrado de orden 1 para una serie temporal de observaciones $y_i = y_1, y_2, \dots, y_N$ en los instantes de tiempo $t_i, i = 1, 2, \dots, N$, tal que N es el tamaño de la muestra de la serie a ser observada, está definido por la ecuación (5):

$$\Delta y_i = y_1 - y_2, y_2 - y_3, y_{N-1} - y_N \quad (5)$$

Definidos los procesos integrados de orden 1 se procede a eliminar los valores atípicos o anómalos de la serie por el método de la media e intercuartiles (IQR), considerando que se encuentren fuera del intervalo definido en la expresión (6):

$$\overline{\Delta y_i} \pm 3 * \sigma_{\Delta y} \quad (6)$$

Siendo $\overline{\Delta y_i}$ y $\sigma_{\Delta y}$ el promedio y la desviación estándar de los procesos integrados respectivamente (Nickolaidis, 2002).

2.6.2. Tendencia

La variación creciente o decreciente de un conjunto de datos con respecto a su nivel medio se denomina tendencia y se caracteriza por poseer un movimiento suave a largo plazo. Si partimos del hecho que la serie temporal GNSS es no estacionaria, y se observa que crece o decrece con

respecto al tiempo, entonces es posible determinar su tendencia con una regresión lineal simple (Marín, 2010 citado en Muglisa Medina & Pillajo Vega, 2017)

2.6.2.1. Regresión Lineal Simple

El modelo de regresión lineal simple consiste en un solo valor dependiente y en función de un único valor independiente x , donde la relación es una línea recta y está definido por la ecuación (7):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (7)$$

Siendo β_0 la ordenada en el origen y β_1 el valor de la pendiente, estos coeficientes de regresión son constantes conocidas y ε es un componente aleatorio de error.

Los parámetros β_0 y β_1 son desconocidos y se deben estimar con los datos de la muestra de valor N . De esta manera los pares de datos serían: $(X_1, Y_1; X_2, Y_2; \dots; X_N, Y_N)$.

Al estimar β_0 y β_1 es necesario que la suma de los cuadrados de las diferencias (residuales) entre las observaciones y_i y la recta sean mínimas, a este método se lo conoce como el de mínimos cuadrados que fue propuesto por Legendre en 1805 y Gauss en 1809 (López, 2011) .

De esta manera, el criterio de mínimos cuadrados en la ecuación (7) aplicado a un modelo muestral de regresión sería:

$$S(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (8)$$

y los parámetros β_0 y β_1 deben satisfacer la expresión (8) como se observa en la definición (9):

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial \beta_0} = \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial \beta_1} = \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Obteniendo después de simplificar la definición (9), las ecuaciones (10) y (11):

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (10)$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \beta_1 \bar{X} \quad (11)$$

Donde \bar{X} y \bar{Y} son los promedios de X_i y Y_i respectivamente. Así remplazando (10) y (11) en la ecuación (7), tenemos la ecuación (12):

$$\hat{y} = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 x \quad (12)$$

La diferencia entre el valor observado y_i y el valor ajustado \hat{y}_i se llama residual v_i denotada en la ecuación (13).

$$v_i = y_i - \hat{y}_i \quad (13)$$

2.6.3. Estacionalidad

Estacionalidad se refiere a los ciclos o movimientos repetitivos que se producen ordenada y organizadamente en el desarrollo de la serie, éstas pueden representar las fluctuaciones periódicas para un tiempo definido (Luna, 2017).

Para poder modelar el componente estacional dentro de las series temporales, se puede aplicar el análisis del espectro de potencias.

2.6.3.1. Análisis espectral de las series temporales

El espectro es la media estadística de una señal específica, examinada en términos de contenido de frecuencia; dicho espectro representa la distribución de potencias en función de las frecuencias de las que son calculadas. El espectro de potencia permite la caracterización de las series temporales en relación a la frecuencia, potencias, armónicos y ruidos (Luna, 2017).

El espectro de potencia puede ser determinado a través de la Transformada de Fourier para un periodograma de series igualmente espaciadas según Scargle (1982), tal como se evidencia en la ecuación (14):

$$P(f_n) = \left(\frac{1}{N}\right) \left[\left(\sum_{i=1}^N v_i \cdot \cos(2\pi i f_n) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N v_i \cdot \text{sen}(2\pi i f_n) \right)^2 \right] \quad (14)$$

Siendo $f_n = \frac{n}{T}$, T es el periodo fundamental y $n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$.

Cuando la serie temporal presenta *gaps* o vacíos por falta de información es considerada como , para el análisis del espectro de potencia de dicha serie es necesario utilizar el método propuesto por Lomb (1976), la cual se calcula con la adición del retardo τ , del que se obtiene despejando en la ecuación (15).

$$\tan(4\pi f \tau) = \frac{\sum_{i=1}^N \sin(4\pi t_i f)}{\sum_{i=1}^N \cos(4\pi t_i f)} \quad (15)$$

Una vez despejado el retardo, se pueden obtener los valores del espectro de potencia despejando la ecuación (16), y obtener así el periodograma de la serie estudiada, representando

las frecuencias y periodos por los valores más altos de los espectros de potencia (Press, Teukolsky, Vetterling , & Flannery, 2007) .

$$P(f) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[\sum_{i=1}^N v_i \cos(2\pi f(t_i - \tau))]^2}{\sum_{i=1}^N \cos^2(2\pi f(t_i - \tau))} + \frac{[\sum_{i=1}^N v_i \sin(2\pi f(t_i - \tau))]^2}{\sum_{i=1}^N \sin^2(2\pi f(t_i - \tau))} \right\} \quad (16)$$

De esta manera, las variaciones estacionales están definidas por la ecuación (17), cuyos coeficientes son despejados de la expresión (18):

$$S(t) = \sum_{k=1}^p (A_k \cdot \sin(2\pi f_k t) + B_k \cdot \cos(2\pi f_k t)) + \varepsilon \quad (17)$$

$$\begin{cases} A = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N v_i * \sin(2\pi f t_i) \\ B = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N v_i * \cos(2\pi f t_i) \end{cases} \quad (18)$$

2.7. Campo de Velocidades

El campo de velocidades es calculado por las agencias que administran y analizan los marcos de referencia y redes geodésicas regionales o internacionales con el fin de conocer y aplicar un alto grado de exactitud el fenómeno de variación posicional para cada estación GNSS permanente con respecto a un marco de referencia de interés, con los que se puede deducir las coordenadas de las estaciones en épocas anteriores o futuras a través de predicciones (Instituto Nacional de Estadística y Geografía , 2012).

2.7.1. Velocidad

El desplazamiento que realiza un cuerpo en un intervalo de tiempo específico es denominado velocidad o velocidad instantánea. Dicha velocidad también es definida como el límite de la velocidad media cuando el intervalo de tiempo tiende a cero, o a su vez, es definida como la derivada del vector posición con respecto al tiempo (Halliday, Resnick, & Walker, 2013). Se define mediante la expresión

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (19)$$

Donde v está definido como la velocidad instantánea, Δx es el desplazamiento realizado en un tiempo específico Δt .

2.8. Hipótesis

La velocidad no lineal en un tiempo determinado es posible calcularla a través de las series temporales obtenidas por observación GNSS.

2.9. Sistemas de variables

Las variables identificadas en el presente proyecto son:

2.9.1. Variables independientes

- Observaciones diarias GNSS
- Insumos de procesamiento

2.9.2. Variables dependientes

- Series Temporales estimadas
- Ecuaciones de variación estacional
- Ecuaciones de velocidad

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Preprocesamiento

Para obtener las soluciones semi libres, como resultado del procesamiento de las observaciones de las estaciones GNSS en el software científico Bernese 5.2, fue necesario realizar la recopilación de dichas observaciones, tratamiento de las mismas, selección y descarga de observaciones de las estaciones fiduciales del IGS, descarga de insumos adicionales y preparación de archivos de entrada en las campañas de procesamiento del software.

3.1.1. Recopilación de observaciones diarias GNSS

3.1.1.1. Estaciones REGME

Se recopilaron las observaciones GNSS de las estaciones con observaciones disponibles de la REGME, a través del Instituto Geográfico Militar para el desarrollo del proyecto, desde el 01 de enero de 2015, semana GPS 1825, hasta el 31 de diciembre de 2017, semana GPS 1982, dando como resultado 1096 días y 157 semanas de observaciones.

Se eliminaron estaciones considerando que las observaciones se encontraban en mal estado y que no existían los archivos de identificación (Log files); todas ellas necesarias para realizar un procesamiento de calidad.

El resumen de las estaciones escogidas para el procesamiento se evidencia en la Tabla 6.

Tabla 6.

Resumen de las observaciones diarias para las estaciones de la REGME en el periodo 2015-2017.

N°	Estación	2015	2016	2017	Total de observaciones
		Total	Total	Total	
1	ALEC	365	366	331	1062
2	BHEC	287	346	247	880
3	CHEC	266	168	279	713
4	CLEC	362	177	365	904
5	CUEC	365	366	80	811
6	CXEC	365	366	365	1096
7	ECEC	365	365	344	1074
8	EPEC	360	361	364	1085
9	FOEC	365	366	171	902
10	GUEC	365	366	365	1096
11	GZEC	365	201	365	931
12	LJEC	295	366	365	1026
13	LPEC	365	298	161	824
14	MAEC	365	316	356	1037
15	NJEC	317	341	294	952
16	ONEC	354	260	184	798
17	PDEC	307	91	14	412
18	PEEC	262	107	0	369
19	PJEC	365	253	0	618
20	PREC	263	366	365	994
21	PTEC	365	18	0	383
22	PVEC	0	79	0	79
23	QVEC	365	220	0	585
24	SEEC	365	366	157	888
25	SIEC	365	366	365	1096
		8183	6895	5537	20615

3.1.1.2. Estaciones fiduciales IGS

Para el procesamiento de las estaciones REGME fueron utilizadas un total de 20 estaciones fiduciales con el propósito de enlazar la solución semi libre al marco de referencia global IGB08, evidenciadas en la Tabla 7.

Tabla 7

Estaciones fiduciales IGS utilizadas.

N°	Estación	Ciudad	País
1	BOGT	Bogotá	Colombia
2	BRAZ	Brasilia	Brasil
3	BRFT	Eusebio	Brasil
4	BRMU	Bermuda	Reino Unido
5	CRO1	Christiansted	Islas Vírgenes (E.E.U.U)
6	GLPS	Pto. Ayora	Ecuador
7	GODE	Greenbelt	E.E.U.U.
8	GOLD	Goldstone	E.E.U.U.
9	GUAT	Ciudad de Guatemala	Guatemala
10	INEG	Aguascalientes	México
11	ISPA	Isla de Pascua	Chile
12	KOUR	Kouru	Guyana Francesa
13	LPGS	La Plata	Argentina
14	MANA	Managua	Nicaragua
15	PARC	Punta Arenas	Chile
16	PIE1	Pie Town	E.E.U.U.
17	RIOP	Riobamba	Ecuador
18	SCUB	Santiago de Cuba	Cuba
19	SSIA	San Salvador	EL Salvador
20	UNSA_	Salta	Argentina

3.1.2. Preparación de Archivos RINEX

3.1.2.1. Transformación de observaciones de extensión .T02 a .TGD

Para la transformación de archivos de observaciones bajo la privacidad de la empresa Trimble (.T02), fue necesaria la ejecución del programa runpkr00 v5.40, desarrollado y soportado bajo la misma empresa, para extraer los archivos a formato (.DAT o .TGD) compatibles e interpretables con el programa Teqc (UNAVCO, 2018) .

Los archivos fueron transformados en la ventana de comandos de Windows, en la carpeta donde se encuentran los mismos, con la siguiente línea de código:

```
runpkr00 -g -d NombreArchivo.T02
```

Donde:

-g -d: comando que permite la transformación en el programa runpkr del archivo deseado

Ej: runpkr00 -g -d ALEC001a.T02 → ALEC001a.TGD

3.1.2.2. Transformación de observaciones de extensión .TGD a RINEX

Para la conversión de archivos binarios nativos de Trimble (.DAT o .TGD) a archivos RINEX de observación y/o navegación es necesario utilizar el programa Teqc (UNAVCO, 2014) .

El mencionado programa es una herramienta de compresión que permite solucionar problemas de preprocesamiento de datos GNSS, como:

- Conversión de archivos binarios nativos en otros formatos.
- Edición y corrección de los metadatos de encabezados de los archivos.
- Control de Calidad de datos GPS y/o GLONASS

3.1.2.2.1. Conversión .TGD a RINEX

Los archivos fueron transformados utilizando el programa Teqc, en la ventana de comandos de Windows, en la carpeta donde se encuentran los mismos, con la siguiente línea de código:

```
teqc -O.dec ss -tr d -week wwww +nav NombreArchivo.YYN NombreArchivo >  
NombreArchivo.YYO
```

Donde:

-O.dec: comando para definir el intervalo deseado en segundos

ss: segundos en números enteros

-tr d: comando para transformar archivos de origen de Trimble

-week: comando especifica el ingreso de la semana GPS de la observación

wwww: semana GPS

+nav: comando que imprime la información de navegación del archivo binario en un archivo de navegación

YY: Año de la observación

.YYN: Formato del nuevo archivo de navegación

.YYO: Formato del nuevo archivo de observación

```
Ej: teqc -O.dec 30 -tr d -week 1825 +nav ALEC001a.tgd.15N ALEC001a.tgd >  
ALEC001a.tgd.15O
```

3.1.2.2.2. Edición de encabezado de los archivos RINEX

La edición de los encabezados se lo pudo realizar a través del programa Teqc cuando estos se encontraron con información errónea o faltante.

Dichos encabezados deben estar en concordancia con los archivos de identificación para cada estación (Log files) pertenecientes a la red SIRGAS-CON, disponibles en el servidor: <ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/DGF/station/log>.

Los archivos RINEX fueron editados en la ventana de comandos de Windows, en la carpeta donde se encuentran los mismos, con la siguiente línea de código:

```
teqc -O.r "Persona u organización que extrajo los RINEX" -O.o "Nombre del operador" -O.ag
"Agencia Operadora" -O.mo "Nombre del Monumento" -O.mn "Número del Monumento" -O.rn
"Número del Recibidor" -O.rt "Tipo de Recibidor" -O.rv "Versión de Firmware del Recibidor" -
O.an "Número de Antena" -O.at "Tipo de Antena" NombreArchivo.YYO> NombreArchivo.YYO
```

Donde:

- O.r: comando para edición de la Persona u organización que extrajo los RINEX
- O.o: comando para edición del Nombre del operador
- O.ag: comando para edición de la Agencia Operadora
- O.mo: comando para edición del Nombre del Monumento
- O.mn: comando para edición del Número del Monumento
- O.rn: comando para edición del Número del Recibidor
- O.rt: comando para edición del Tipo de Recibidor
- O.rv: comando para edición de la Versión de Firmware del Recibidor
- O.at: comando para edición del Número de Antena
- O.at: comando para edición del Tipo de Antena

```
Ej: teqc -O.r "Echeverria & Harnisth" -O.o "David Cisneros" -O.ag "IGM" -O.mo "ALEC" -
O.mn "42029M001" -O.rn "5225K50230" -O.rt "TRIMBLE NETR9" -O.rv "4.81" -O.an "54539"
-O.at "TRM59800.00 SCIS" ALEC001a.tgd.15O > ALEC001a.tgd.15°.s
```

Las correcciones del encabezado se muestran en la Figura 7

```

2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / ^
1 $eqc 2017Sep15 20181130 18:21:39UTC PGM / RUN BY / I
Linux2.6.32-573.12.1.el6.x86_64|x86_64|gcc|Win64-MinGW64|+ COMMENT
0.000 (antenna height) COMMENT
-2.20211952 (latitude) COMMENT
-78.84741361 (longitude) COMMENT
2386.773 (elevation) COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
ALEC (COGO code) COMMENT
ALEC MARKER NAME
-Unknown- -Unknown- MARKER NUMBER
S225K50230 TRIMBLE NETRS 4.8 OBSERVER / AGENC
S4539 TRM59800.00 SCIS REC # / TYPE / V
1233232.0815 -6255436.6373 -243533.9859 ANT # / TYPE
0.0000 0.0000 0.0000 APPROX POSITION
1 1 ANTENNA: DELTA E
7 L1 L2 C1 P1 P2 S1 S2 WAVELENGTH FACT
30.0000 # / TYPES OF OBS
16 INTERVAL
Forced Modulo Decimation to 30 seconds LEAF SECONDS
SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT
2015 1 1 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OB
15 1 1 0 0 0.0000000 0 15R19R09G27G22G18G31R16G32R05G16R06G04 END OF HEADER
26

2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / ^
1 $eqc 2017Sep15 Echeverria & Harnist20181130 20:04:52UTC PGM / RUN BY / I
Linux2.6.32-573.12.1.el6.x86_64|x86_64|gcc|Win64-MinGW64|+ COMMENT
0.000 (antenna height) COMMENT
-2.20211952 (latitude) COMMENT
-78.84741361 (longitude) COMMENT
2386.773 (elevation) COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
ALEC (COGO code) COMMENT
ALEC MARKER NAME
42029M001 MARKER NUMBER
David Cisneros IGM OBSERVER / AGENC
S225K50230 TRIMBLE NETRS 4.8 REC # / TYPE / V
S4539 TRM59800.00 SCIS ANT # / TYPE
1233232.0815 -6255436.6373 -243533.9859 APPROX POSITION
0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA E
1 1 WAVELENGTH FACT
7 L1 L2 C1 P1 P2 S1 S2 # / TYPES OF OBS
30.0000 INTERVAL
Forced Modulo Decimation to 30 seconds LEAF SECONDS
SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT
2015 1 1 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OB
25 1 1 0 0 0.0000000 0 15R19R09G27G22G18G31R16G32R05G16R06G04 END OF HEADER
26

```

Figura 7. Edición del encabezado de un archivo RINEX.

3.1.2.2.3. Control de Calidad de Archivos RINEX

El programa de Teqc, Control de Calidad, permite al usuario realizar un chequeo rápido de la calidad de las observaciones RINEX y de los problemas específicos que se pudieron haber dado durante la recepción de las señales GNSS a los receptores (UNAVCO, 2014).

La extracción de la calidad de los archivos RINEX fueron realizados en la ventana de comandos de Windows, en la carpeta donde se encuentran los mismos, con la siguiente línea de código:

Ej: teqc +qc NombreArchivo.YYO

Donde:

+qc: comando para correr el programa control de calidad

Ej: teqc +qc ALEC001a.tgd.15°

En la

Figura 8 se muestra un detalle del control de calidad de un archivo RINEX.

```

Observation interval : 30.0000 seconds
Total satellites w/ obs : 55
NAVSTAR GPS SVs w/o OBS : 8
NAVSTAR GPS SVs w/o NAV : 8
GLONASS SVs w/o OBS :
GLONASS SVs w/o NAV : 19 9 16 5 6 10 4 20 7 21 8 22
                             11 23 1 12 24 13 2 14 3 17 15 18
Rx tracking capability : 44 SVs
Poss. # of obs epochs : 2880
Epochs w/ observations : 2880
Epochs repeated : 0 (0.00%)
Possible obs > 0.0 deg: 35548
Possible obs > 10.0 deg: 28219
Complete obs > 10.0 deg: 25878
Deleted obs > 10.0 deg: 116
Masked obs < 10.0 deg: 1952
Obs w/ SV duplication : 0 (within non-repeated epochs)
Moving average MP12 : 0.531685 m
Moving average MP21 : 0.474641 m
Points in MP moving avg : 50
Mean S1 : 45.15 (sg=4.87 n=44201)
Mean S2 : 36.37 (sg=7.97 n=44040)
No. of Rx clock offsets : 0
Total Rx clock drift : 0.000000 ms
Rate of Rx clock drift : 0.000 ms/hr
Avg time between resets : Inf minute(s)
Freq no. and timecode : 2 12779 ffffff
Report gap > than : 10.00 minute(s)
epochs w/ msec clk slip : 0
other msec mp events : 0 (: 137) (expect ~ = 1:50)
IOD signifying a slip : >400.0 cm/minute
IOD slips < 10.0 deg* : 3
IOD slips > 10.0 deg : 104
IOD or MP slips < 10.0* : 5
IOD or MP slips > 10.0 : 105
* or unknown elevation

```

	first epoch	last epoch	hrs	ss	#expt	#have	%	mp1	mp2	o/slps	
SUM	15 1	1 00:00 15	1 1	23:59	24.00	30	28219	25878	92	0.53 0.47	246

Figura 8. Archivo de control de calidad del Teqc.

La línea SUM muestra un resumen de lo que se encuentra en el archivo de calidad, aquí se encuentra el inicio y el final de la observación (año, mes, día, hora de inicio, hora de finalización y tiempo total de observación), intervalos de medición en segundos, observaciones esperadas, observaciones guardadas, porcentaje de las mismas, el RMS del promedio de movimiento entre Multipaths en metros (MP1 y MP2) y observaciones por deslíz.

3.1.3. Preparación de insumos para el procesamiento

El Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (AIUB) (AIUB, 2018) indica qué archivos son los necesarios para el procesamiento en el software científico Bernese 5.2, los cuáles

deben ir ubicados en las carpetas dentro de la campaña de procesamiento como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Insumos para procesamiento en Bernese 5.2. (AIUB, 2018)

Carpeta	Descripción	Archivos	Descripción	Obtención
ATM	Contiene archivos ionosféricos y troposféricos en formato Bernese	CODyyddd.TRP.Z	Soluciones finales de modelos troposféricos	Descarga
		CODyyddd.ION.Z	Soluciones finales de modelos ionosféricos	Descarga
GEN	Contiene archivos generales	DATUM.	Definiciones de los diferentes DATUM	Descarga
		RECEIVER.	Información de los recibidores	Descarga
		SAT_yyyy.CRX	Problemas de satélites	Descarga
		SATELLIT.Iyy	Información específica de los satélites	Descarga
		Iyy.ATX	Correcciones de los centros de fase de las antenas	Descarga
		PCV.Iyy	Variaciones de los centros de fase de las antenas	Descarga
		FREQINFO.FRQ	Información de las frecuencias de las observaciones	Descarga
		IAU2000R06.NUT	Modelo de nutaciones	Descarga
FES2004.BLQ	Modelo de cargas oceánicas	Descarga		
ORB	Contiene archivos diarios actualizados	CODwww7.ERP.Z	Parámetros de rotación terrestre semanal	Descarga
		CODyyddd.CLK.Z	Correcciones finales de errores de reloj	Descarga
		P1C1yymm.DCB	Solución mensual de P1-C1 DCB. Contiene solo satélites GPS	Descarga

CONTINÚA →

		Solución mensual de P1-P2 DCB.	Descarga	
	P1P2yymm.DCB	Contiene satélites GPS y GLONASS		
	FES2004.BLQ	Modelo de cargas oceánicas	CONTINÚA →	
	NombreArchivo.STA	Archivo de información de estaciones utilizadas	AMSUR52.STA*	
	NombreArchivo.CRD	Archivo de coordenadas diarias de las estaciones	Propio Autor	
	NombreArchivo.VEL	Archivo de velocidades de las estaciones	ECU11.VEL*	
STA	Contiene archivos relacionados a las estaciones	NombreArchivo.ABB	Archivo de abreviaciones de las estaciones	Propio Autor
		NombreArchivo.CLU	Archivo de formación de clusters de las estaciones	Propio Autor
		NombreArchivo.ATL	Archivo de cargas atmosféricas calculadas	Procesamiento
		IGb08_R.CRD	Archivo de coordenadas de estaciones del IGb08	Descarga
		IGb08_R.vel	Archivo de velocidades de estaciones del IGb08	Descarga
yyddd: Año y día GPS; www: Semana GPS; yy: Año; yymm: Año y mes (*) Archivos proporcionados por el Instituto Geográfico Militar - CEPGE				

La descarga de los archivos se los realizó desde el Servidor FTP Anónimo del AIUB, desarrolladora del Software Bernese 5.2, de la dirección <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>, desde la semana 1824 hasta la semana 1977 que comprenden las fechas del periodo de estudio 2015-2017. Se ocuparon los archivos de entrada para un Marco de Referencia IGb08, tanto las efemérides orbitales precisas que dan el marco de referencia a las coordenadas semilibres calculadas, así como los archivos generales de Bernese 5.2 utilizados para el procesamiento (I08.ATX, IGB08.FIX, IGB08_R.CRD, IGB08_R.VEL, PCV.I08, SATELLIT.I08) y el modelo FES2004 escogido en el estudio como corrección de cargas oceánicas.

Los archivos creados por el autor para el procesamiento de las campañas en Bernese 5.2 fueron realizados de la siguiente manera.

- Archivo CRD: El archivo de coordenadas a priori utilizado en el estudio fue modificado del archivo ECU11.CRD provisto por Instituto Geográfico Militar, responsable del Centro de Procesamiento de Datos GNSS del Ecuador adjunto a SIRGAS. Dichas coordenadas se encuentran en el Marco de Referencia IGB08 referidas a la época 2012.0. Se seleccionaron únicamente las estaciones que iban a ser estudiadas.
- Archivo ABB: Se creó el archivo de abreviaturas a partir del programa EDITABB de Bernese 5.2 según las estaciones utilizadas en el estudio. El programa EDITABB se encuentra en: "Menu>Campaign>Edit station files>Abbreviation table"
- Archivo CLU: Se creó el archivo de cluster a partir del programa EDITCLU de Bernese 5.2 según las estaciones utilizadas en el estudio. El programa EDITCLU se encuentra en: "Menu>Campaign>Edit station files>Cluster definition file"
- Archivo ATL: Se creó el archivo de cargas atmosféricas calculadas a partir del ingreso del archivo *.CRD y de un enmallado global sobre coeficientes de cargas atmosféricas .DAT ubicado en la carpeta GEN, al programa GRDS1S2 de Bernese 5.2 para las estaciones de estudio. El programa GRDS1S2 se encuentra en: "Menu>Service>Coordinate tools>Extract atmospheric tidal loading coefficients"

Se recomienda que los archivos *.ABB, *.CLU, *.STA, *.CRD y *.VEL tengan el mismo nombre para que no existan errores de lectura de insumos en el procesamiento, para el caso de estudio todos fueron denominados TESIS.

3.2. Procesamiento

Previo al procesamiento de las campañas se realizó una ubicación manual de la información dentro del carpeta DATAPOOL para que el software pueda ubicar dichos archivos en las carpetas de las campañas de manera automática. Se ubicaron los archivos en las siguientes carpetas:

- BSW52
 - Modelos Ionosféricos *.ION
 - Información DCB *.DCB
- COD
 - Parámetros de Rotación Terrestre *.ERP
 - Correcciones de reloj *.CLK
- REF 52
 - Archivo de Abreviaciones *.ABB
 - Archivo de Clusters *.CLU
 - Archivo de Coordenadas a priori *.CRD
 - Archivo de información de estaciones *.STA
 - Archivo de velocidades *.VEL
 - Archivo de cargas atmosféricas *.ATL
 - Modelo de cargas oceánicas FES2004.BLQ
 - Estaciones de referencia IGS08. FIX e IGS08.SIG
- RINEX
 - Observaciones Diarias de la REGME formato RINEX
 - Observaciones diarias de las estaciones fiduciales IGS en formato RINEX

Una vez que se ubicaron los mencionados archivos de información GNSS conformado por 25 estaciones de la REGME y 2 estaciones del IGS en el Ecuador, en la carpeta DATAPOOL se procedió a la creación de las campañas, edición de los PCF y ejecución del BPE para cada una de ellas.

3.2.1. Campaña PPP

Para la creación de la campaña se realizaron los siguientes pasos desde la interfaz del software Bernese 5.2, salvando los cambios después de ejecutar cada uno de ellos:

1. Creación de la campaña: Menu>Campaing>Edit List Of Campaigns, y se añade la campaña denominada PPP
2. Selección de la campaña: Menu>Campaing>Select Active Campaign, y se selecciona la campaña creada
3. Creación de subdirectorios: Menu>Campaing>Create New Campaign y se ejecuta la opción RUN para crear todos los subdirectorios que el programa necesita para el procesamiento
4. Seteo de sesión: Menu>Configure>Set session/Compute Date y se inicializa en el día donde o desde donde va a realizarse el procesamiento. Para este caso se inicializó en el día GPS 001 del año 2015 correspondiente al 01 de enero del 2015 como se observa en la Figura 9.

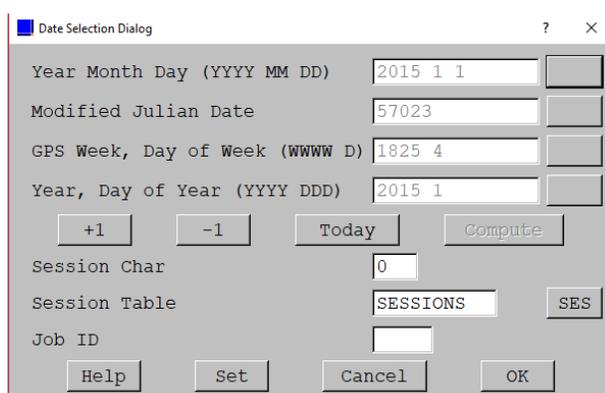


Figura 9. Seteo de sesión.

Una vez creada la campaña e inicializada la sesión al día donde se requiere realizar el procesamiento fue necesario realizar el cambio del máximo número de parámetros en la combinación de ecuaciones normales en el PPP_BAS.PCF, con el fin de que no reconozca el software errores y se finalice la automatización del mismo. Se siguieron los siguientes pasos para la edición:

1. Edición del PCF: Menu>BPE>Edit PCF program input files y se selecciona el PPP_BAS.PCF para su edición,

2. Edición de la Rutina: Se seleccionaron todas las rutinas relacionadas al programa ADDNEQ2, responsable de combinar las ecuaciones normales y se elevó el número máximo de parámetros de 1000 (predefinido) a 1500.
3. Se guardaron los cambios realizados.

Por último, se realiza la ejecución y la personalización del BPE:

1. Definir los días de procesamiento como números de sesiones a procesarse. Se seleccionaron 1096 días para el procesamiento correspondiente al periodo 2015-2017 evidenciado en la Figura 10.

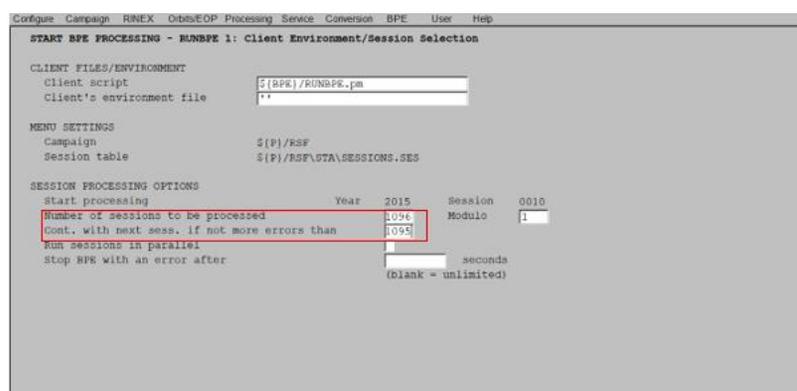


Figura 10. PPP-RUNBPE/Selección de sesión

2. Selección del Archivo de control del CPU, ubicado dentro de GPSUSER52/PAN, ver Figura 11.
3. Selección del PPP_BAS.PCF a ejecutarse, ubicado dentro de GPSUSER52/PCF, ver Figura 11.

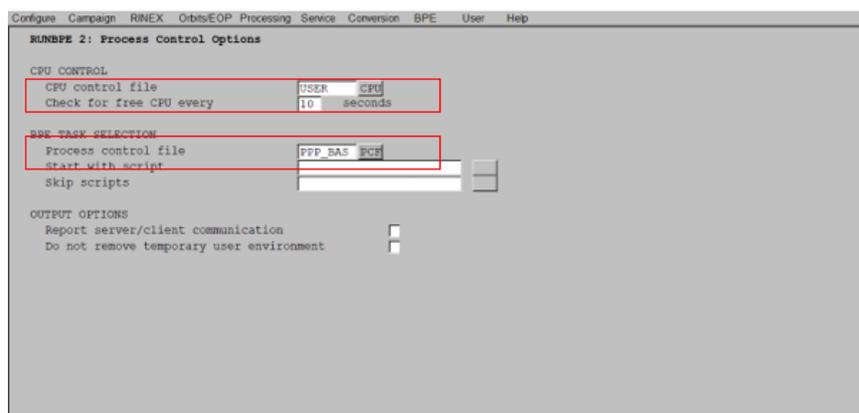


Figura 11. PPP-RUNBPE/Opciones de control de procesamiento

- Edición de los nombres de los archivos de salida. Para todos los cambios se definieron los nombres como PPP, excepto para los mensajes de error, ver Figura 12.

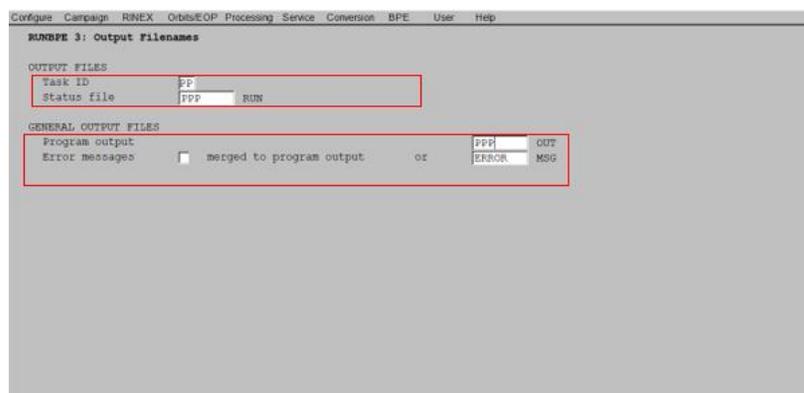
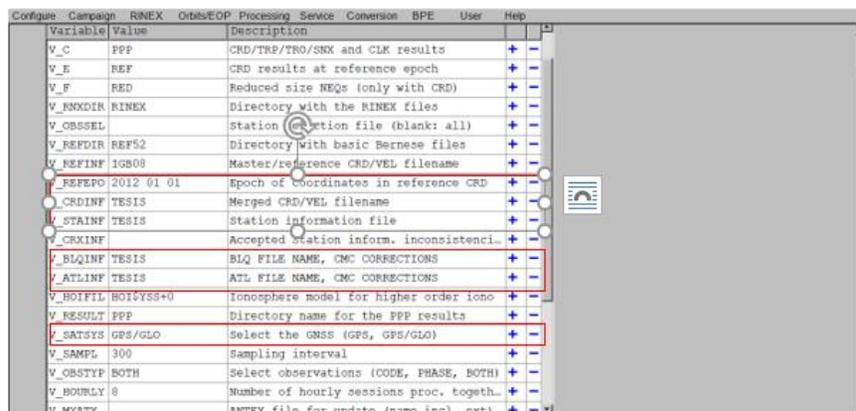


Figura 12. PPP-RUNBPE/Nombres de archivos de salida

- Edición de las variables del servidor. Se editaron los campos para los archivos preparados anteriormente denominados TESIS, además se debe poner la época de referencia en la que se encuentra el TESIS.CRD y se selecciona el sistema de satélites GPS/GLO para observaciones GNSS, como se muestra en la Figura 13.

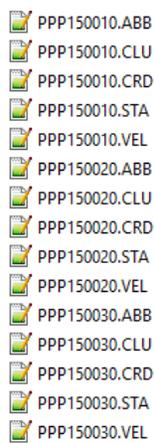


Variable	Value	Description		
V_C	PPP	CRD/TRB/TRO/SNX and CLK results	+	-
V_E	REF	CRD results at reference epoch	+	-
V_F	RED	Reduced size NEQs (only with CRD)	+	-
V_RNXDIR	RINEX	Directory with the RINEX files	+	-
V_OBSSEL		Station selection file (blank: all)	+	-
V_REFDIR	REF52	Directory with basic Bernese files	+	-
V_REFINF	IGS08	Master/reference CRD/VEL filename	+	-
V_REFEPO	2012 01 01	Epoch of coordinates in reference CRD	+	-
V_CRDINF	TESIS	Merged CRD/VEL filename	+	-
V_STAINF	TESIS	Station information file	+	-
V_CRXINF		Accepted station inform. inconsistencies	+	-
V_BIQINF	TESIS	BIQ FILE NAME, CMC CORRECTIONS	+	-
V_ATLINF	TESIS	ATL FILE NAME, CMC CORRECTIONS	+	-
V_BOIFIL	BOIYSS+0	Ionosphere model for higher order iono	+	-
V_RESULT	PPP	Directory name for the PPP results	+	-
V_SATSYS	GPS/GLO	Select the GNSS (GPS, GPS/GLO)	+	-
V_SAMP	300	Sampling interval	+	-
V_OBSTYP	BOTH	Select observations (CODE, PHASE, BOTH)	+	-
V_HOURLY	8	Number of hourly sessions proc. togeth...	+	-
V_MYATX		ANTEX file for update (name incl. ext)	+	-

Figura 13. PPP-RUNBPE/Edición de las variables del servidor.

3.2.2. Campaña RNX2SNX

Previo a la creación de la campaña de procesamiento RNX2SNX fue necesario copiar a la carpeta DATAPOOL/REF52 los archivos de coordenadas a priori, para cada día en el periodo 2015-2017 como resultado del procesamiento con PPP para tener mejores precisiones en el procesamiento de dobles diferencias. Se procuró también realizar copias de los archivos *.ABB, *.CLU, *.STA, y *.VEL y renombrarlos con los nombres de los nuevos archivos de coordenadas a priori *.CRD (PPP\$YSS+0) para que no existan errores en el procesamiento automatizado (Ver Figura 14).



- PPP150010.ABB
- PPP150010.CLU
- PPP150010.CRD
- PPP150010.STA
- PPP150010.VEL
- PPP150020.ABB
- PPP150020.CLU
- PPP150020.CRD
- PPP150020.STA
- PPP150020.VEL
- PPP150030.ABB
- PPP150030.CLU
- PPP150030.CRD
- PPP150030.STA
- PPP150030.VEL

Figura 14. Preparación de archivos para el RNX2SNX

Para la campaña de procesamiento RNX2SNX se repitieron los pasos de creación de campaña del PPP ahora denominado R2S como abreviatura del proceso y se inició la sesión para el día GPS 001 del año 2015 ya que se realizó el estudio para el mismo periodo 2015-2017 que la campaña PPP. Se editaron de la misma forma que en la campaña anterior, los programas ADDNEQ2 en el RNX2SNX.PCF para cambiar el máximo número de ecuaciones normales combinadas de igual manera de 1000 a 1500.

Para la ejecución del BPE se volvieron a escoger los 1096 días correspondientes a los 3 años de observación, se escogió el RNX2SNX.PCF como proceso de control como se ve en la Figura 15, se definieron los nombres de los archivos de salida como R2S, evidenciado en la Figura 16, y se editaron las variables del servidor con los nuevos nombres de archivos y seleccionando los sistemas satelitales GPS/GLO (Ver Figura 17).

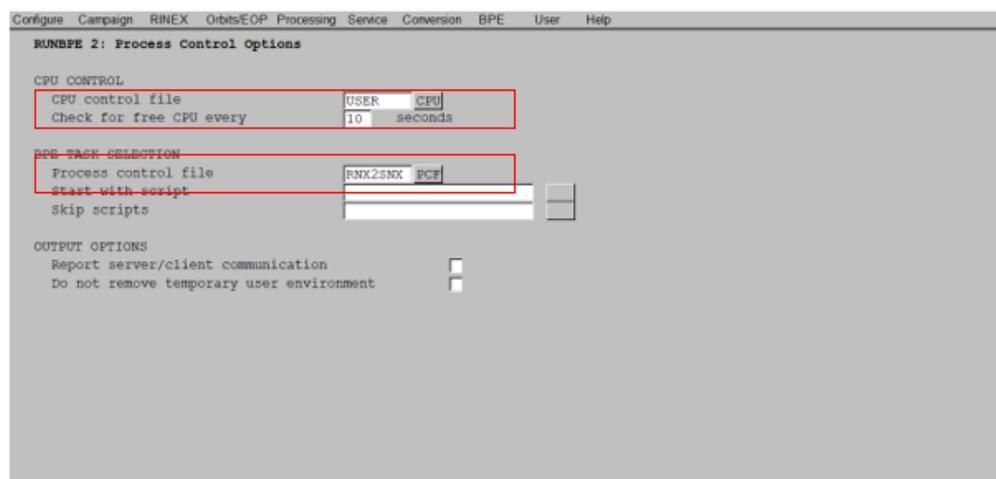


Figura 15. R2S-RUNBPE/Opciones del control de procesamiento

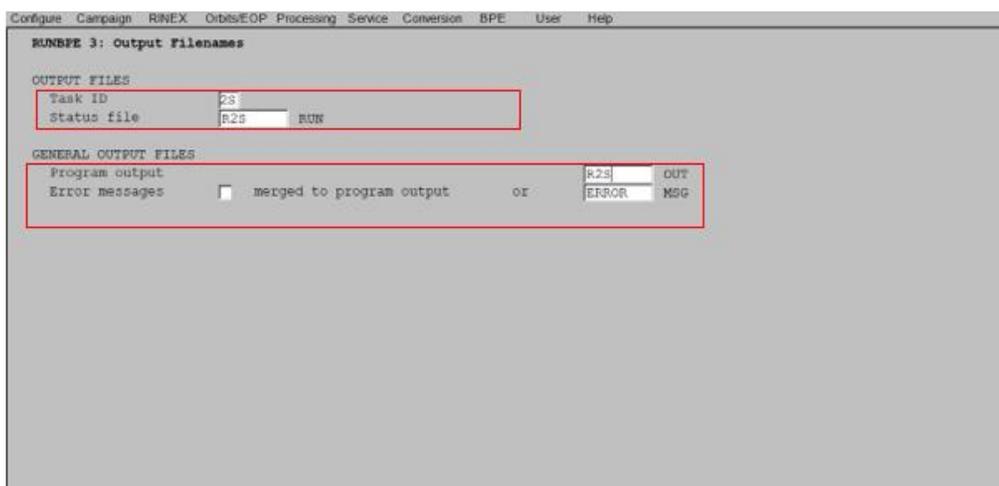


Figura 16. R2S-RUNBPE/Nombres de archivos de salida

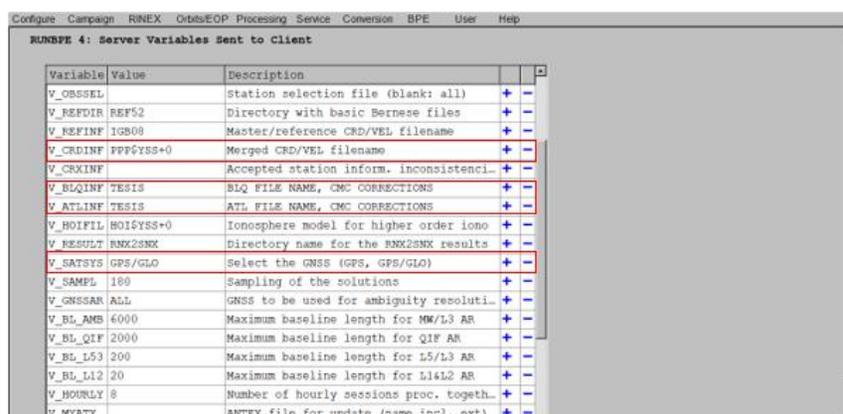


Figura 17. R2S-RUNBPE/Edición de las variables del servidor

3.3. Extracción y recopilación de las coordenadas semilibres obtenidas

Para la extracción de las coordenadas semilibres calculadas en el software Bernese 5.2, se realizó un script dentro de la ventana de comandos de Windows, que se encarga de copiar la línea donde se encuentra las coordenadas de la estación dentro del archivo .CRD hacia un nuevo archivo .txt. La línea de código que se utilizó fue:

```
for /r %e in (F1_*.CRD) do find "EEEE" %e >> EEEE_or.txt
```

Donde:

EEEE: Nombre de la estación identificada con cuatro caracteres.

EEEE_or.txt: Nuevo archivo de texto para copiar las coordenadas de cada estación

3.4. Transformación a un sistema de referencia local-topocéntrico

Para poder transformar las coordenadas cartesianas geodésicas obtenidas del procesamiento de doble diferencias en el software Bernese 5.2, a coordenadas topocéntricas locales, se utilizó el software Matlab de la desarrolladora Mathworks, en el cual se programó un script para la transformación de las coordenadas utilizando las ecuaciones (1), (2) y (3) del capítulo 2. Como coordenadas iniciales (X_0, Y_0, Z_0) se utilizaron las propuestas por Luna (2017) para las estaciones coincidentes mientras para las otras disponibles en este estudio se utilizaron las coordenadas correspondientes al primer día de observación disponible.

Las coordenadas transformadas fueron almacenadas en un archivo de Excel, desde el script realizado en Matlab, para cada estación de estudio y dentro de ésta se añadió la columna del día Juliano como se observa en la Figura 18

	Juliano	X [m]	Y [m]	Z [m]	E	N	U
	2456619	1277936.99532	-6251278.07313	-34832.46588	0.00000	0.00000	0.00000
1	2457024	1277937.00058	-6251278.05755	-34832.45545	8.27387	10.35174	-14.26791
2	2457025	1277937.00143	-6251278.06673	-34832.45448	7.26803	11.37209	-5.10915
3	2457026	1277937.00446	-6251278.06881	-34832.45553	9.82004	10.33664	-2.45870
4	2457027	1277937.00699	-6251278.07464	-34832.45458	11.13110	11.32081	3.75458
5	2457028	1277937.00622	-6251278.07278	-34832.45481	10.74924	11.07995	1.77934
6	2457029	1277937.00272	-6251278.07240	-34832.45958	7.39627	6.30412	0.73227
7	2457030	1277937.00564	-6251278.07911	-34832.44762	8.91318	18.30328	7.82531
8	2457031	1277937.00388	-6251278.06854	-34832.45902	9.30587	6.84460	-2.82021
9	2457032	1277937.00373	-6251278.07165	-34832.45253	8.53602	13.35109	0.16102
10	2457033	1277937.00454	-6251278.06650	-34832.45573	10.36108	10.12430	-4.70474
11	2457034	1277937.00180	-6251278.07352	-34832.45326	6.27059	12.62904	1.61057
12	2457035	1277937.00167	-6251278.06866	-34832.45434	7.11661	11.52275	-3.17099
13	2457036	1277937.00406	-6251278.05918	-34832.45373	11.35689	12.08432	-11.98343
14	2457037	1277937.00364	-6251278.06560	-34832.45096	9.65957	14.88839	-5.79296
15	2457038	1277937.00417	-6251278.07282	-34832.45374	8.73277	12.14789	1.40207
16	2457039	1277937.00282	-6251278.07129	-34832.45848	7.71656	7.39824	-0.34124
17	2457040	1277936.99704	-6251278.06121	-34832.45322	4.07256	12.59752	-11.40339
18	2457041	1277937.00152	-6251278.06163	-34832.45684	8.37766	8.98477	-10.07474
19	2457042	1277937.00184	-6251278.06590	-34832.45350	7.83596	12.34806	-5.84559
20	2457043	1277937.00693	-6251278.06775	-34832.45558	12.45229	10.28366	-3.00223
21	2457044	1277937.00431	-6251278.06609	-34832.45704	10.21785	8.81186	-5.14529

Figura 18. Transformación de coordenadas geodésicas a topocéntricas locales. Estación EPEC (fragmento)

3.5. Análisis de las Series Temporales GNSS

Para el análisis de las series temporales para las coordenadas semilibres obtenidas para el periodo 2015-2017 de las observaciones monitoreadas por la REGME (25) y el IGS (2) se tuvo que realizar correcciones de valores atípicos, análisis de tendencia y obtención de la estacionalidad.

3.5.1. Correcciones de outliers o valores atípicos

La corrección de outliers o valores atípicos se lo realizó mediante la ejecución de procesos integrados de grado uno descrito en las ecuaciones (5) y (6) del capítulo 2, para cada estación y para los componentes horizontales e y n , eliminando aquellas observaciones diarias que superen el rango de tres desviaciones estándar de las coordenadas calculadas para cada componente. Se omitió el análisis de la componente vertical u porque según Mao, Harrison, & Dixon (1999), esta componente presenta mayor variabilidad.

Fueron eliminados directamente previo a la ejecución de procesos integrados de grado uno, aquellos valores que no guardaban correspondencia, es decir absurdos, para que no sesguen el cálculo de la desviación estándar para cada componente analizado.

Se tomó como límite de eliminación de datos el criterio utilizado por Nikolaidis (2002), de no superar el 4% de eliminación de observaciones en la depuración de datos anómalos para cada estación.

La corrección de outliers para la componente n de la estación EPEC se evidencia en la Figura 19.

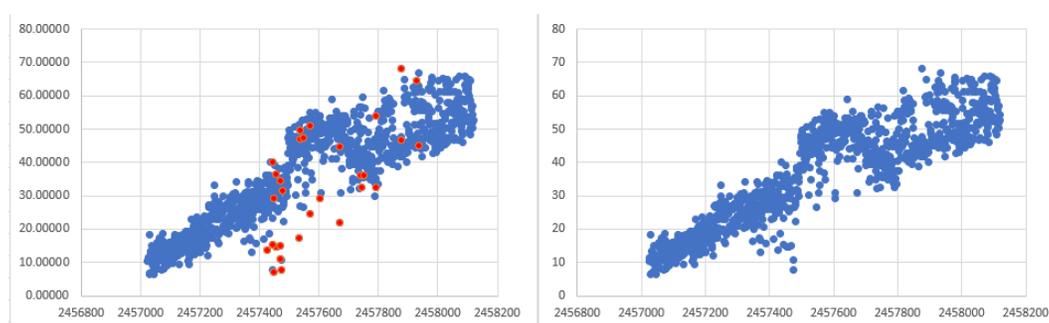


Figura 19. Corrección de outliers. Estación EPEC (n)

3.5.2. Tendencia

El cálculo de la tendencia se realizó mediante la estimación por mínimos cuadrados, para ello se utilizó la herramienta “Regresión Lineal” dentro del paquete “Análisis de Datos” de Microsoft Excel 2016. Tomando como valores dependientes al componente Y correspondiente a las coordenadas semilibres y como valores independientes a los días julianos que presentan datos de observaciones.

Posteriormente, se realizó el cálculo de los valores residuales entre las coordenadas observadas y las ajustadas, utilizando la ecuación (13) del segundo capítulo, para cada componente de las estaciones estudiadas en el proyecto.

3.5.3. Estacionalidad

De manera que las variaciones estacionales, capítulo 2 - ecuación (17), están definidas en función de los espectros de potencia, se requirió desarrollar un código en Matlab para automatizar el cálculo de los espectros de potencia para cada componente de cada estación estudiada, por lo que es necesario realizar dicho insumo desde Microsoft Excel.

Previo a la estructuración del archivo de entrada a Matlab, se calculó un valor de Ni , que reemplaza el valor del día juliano de manera secuencial pero iniciado en 1, para obtener la frecuencia f .

Los valores de Ni se obtuvieron a partir de la siguiente ecuación.

$$Ni = \text{DíaJuliano}_{\text{observado}} - \text{DíaJuliano}_{\text{inicial}} + 1 \quad (20)$$

Donde el $\text{DíaJuliano}_{\text{observado}}$ es el día en el que se hizo la observación y el $\text{DíaJuliano}_{\text{inicial}}$ es el día de la primera observación en el periodo 2015 – 2017. Para la realización del estudio se utilizó como día juliano inicial en las estaciones los valores indicados en la Tabla 9.

Tabla 9

Días Julianos iniciales para las estaciones de estudio.

Estación	Día Juliano Inicial
ALEC	2457024
BHEC	2457103
CHEC	2457024
CLEC	2457024

CONTINÚA →

CUEC	2457024
CXEC	2457024
ECEC	2457024
EPEC	2457024
FOEC	2457025
GLPS	2457025
GUEC	2457025
GZEC	2457024
LJEC	2457024
LPEC	2457025
MAEC	2457024
NJEC	2457024
ONEC	2457025
PDEC	2457026
PEEC	2457025
PJEC	2457024
PREC	2457024
PTEC	2457024
PVEC	2457415
QVEC	2457024
RIOP	2457046
SEEC	2457024
SIEC	2457025

Dicho programa recibe como insumo principal un archivo en formato .txt que contiene en sus columnas los valores de N_i , f , v_i de la componente e , v_i de la componente n y v_i de la componente u , del que resulta un archivo .xls compatible con Microsoft Excel con los potenciales para las componentes de cada una de las estaciones de estudio, como se observa en la Figura 20 .

Ni	f	T	POTE	POT N	POT U
1	0.00091241	1095.99971	36312.975	4566.59186	501.805303
2	0.00182482	547.999855	75426.2224	1410.43719	619.404999
3	0.00273723	365.33337	6734.50234	1607.90821	10526.7265
4	0.00364964	274.000003	11251.6181	886.560586	537.558749
5	0.00456204	219.19999	5404.62888	18.7586291	161.63903
6	0.00547445	182.666652	1315.47353	23.560929	38.6196082
7	0.00638686	156.571436	3131.15812	112.73072	949.738626
8	0.00729927	137.000001	250.496375	369.876533	147.692914
9	0.00821168	121.777775	2036.05655	10.1318914	4.41393901
10	0.00912409	109.599995	547.153192	254.037866	306.702885
11	0.0100365	99.6363671	859.761909	212.483554	75.6472352
12	0.01094891	91.3333342	679.251194	14.8328945	326.063609
13	0.01186131	84.3076914	269.294422	202.016563	77.8352109
14	0.01277372	78.285712	767.38051	139.666796	338.842507
15	0.01368613	73.0666687	252.131166	106.533901	122.639914
16	0.01459854	68.5000007	1146.33962	27.5147137	24.8149176
17	0.01551095	64.4705878	228.104582	239.714537	46.0078257
18	0.01642336	60.8888876	423.213614	70.613917	199.682636
19	0.01733577	57.6842119	263.064785	63.2129493	148.055698
20	0.01824818	54.8000005	29.3450677	3.7064013	23.116374

Figura 20. Potenciales para las componentes e , n y u . Estación EPEC (fragmento).

Posteriormente se ordenaron en forma descendente las potencias obtenidas para encontrar los periodos fundamentales, cuyo primer valor representa la periodicidad de la serie temporal en días. (ver Figura 21)

Ni	f	T Este	POTE	T Norte	POT N	T Up	POT U
1	0.00091241	548	75426.2224	1096	4566.59186	365.333333	10526.7265
2	0.00182482	1096	36312.975	365.333333	1607.90821	156.571429	949.738626
3	0.00273723	274	11251.6181	548	1410.43719	548	619.404999
4	0.00364964	365.333333	6734.50234	274	886.560586	274	537.558749
5	0.00456204	219.2	5404.62888	137	369.876533	1096	501.805303
6	0.00547445	156.571429	3131.15812	109.6	254.037866	78.2857143	338.842507
7	0.00638686	121.777778	2036.05655	64.4705882	239.714537	7.77304965	328.336913
8	0.00729927	182.666667	1315.47353	99.6363636	212.483554	91.3333333	326.063609
9	0.00821168	68.5	1146.33962	84.3076923	202.016563	109.6	306.702885
10	0.00912409	99.6363636	859.761909	6.72392638	170.69221	4	223.685907
11	0.0100365	78.2857143	767.38051	14.0512821	147.665789	60.8888889	199.682636
12	0.01094891	91.3333333	679.251194	2.93048128	143.503011	20.6792453	193.792558
13	0.01186131	29.6216216	598.383682	78.2857143	139.666796	7.21052632	187.340156
14	0.01277372	109.6	547.153192	5.42574257	138.805053	3.10481586	184.254941
15	0.01368613	42.1538462	485.874585	10.1481481	132.943344	34.25	183.169099
16	0.01459854	26.0952381	477.158053	6.64242424	130.858213	9.87387387	182.873688
17	0.01551095	39.1428571	463.412322	2.81025641	125.11058	42.1538462	182.659058
18	0.01642336	52.1904762	442.573481	156.571429	112.73072	3.74061433	181.004651
19	0.01733577	60.8888889	423.213614	34.25	110.481847	21.0769231	180.467798
20	0.01824818	19.5714286	387.496954	13.8734177	110.432785	5.70833333	178.891028

Figura 21. Periodos fundamentales para las componentes e , n y u . Estación EPEC (fragmento).

Con los periodos fundamentales ordenados de mayor a menor y su correspondiente espectro de potencia, se calculó las variaciones estacionales para cada componente de cada estación en el software Matlab a través del desarrollo de un código para la obtención de dichos valores desde la ecuación (17) y (18) del capítulo 2, hasta el tercer periodo fundamental; arrojando como resultado

un archivo .xls de Microsoft Excel cuyas columnas contienen las variaciones estacionales para los tres periodos fundamentales, Ni , las coordenadas cartesianas topocéntricas locales, tendencia y estacionalidad, como modelación de la serie temporal estudiada (ver Figura 22).

1P	2P	3P	Ni	Coordenada	Tendencia	Estacionalidad
-8.5076204	5.24931165	-4.8474838	1	8.273873475	26.40537714	18.29958461
-8.6759587	5.30987994	-4.9490011	2	7.268025821	26.28936091	17.97428106
-8.8431564	5.37027372	-5.0479161	3	9.820035804	26.17334469	17.65254586
-9.0091916	5.430491	-5.1441769	4	11.13110484	26.05732846	17.33445098
-9.1740425	5.49052981	-5.2377327	5	10.74923895	25.94131223	17.0200669
-9.3376873	5.55038817	-5.3285343	6	7.396266264	25.82529601	16.70946253
-9.5001046	5.61006411	-5.4165341	7	8.913181478	25.70927978	16.40270513
-9.661273	5.66955568	-5.5016858	8	9.305865199	25.59326355	16.09986038
-9.8211714	5.72886091	-5.5839446	9	8.536015492	25.47724733	15.80099229
-9.9797786	5.78797787	-5.6632672	10	10.36107542	25.3612311	15.50616316
-10.137074	5.8469046	-5.7396119	11	6.270587521	25.24521487	15.21543363
-10.293037	5.90563917	-5.8129386	12	7.116610965	25.12919864	14.92886259
-10.447646	5.96417965	-5.8832087	13	11.35689395	25.01318242	14.64650716
-10.600882	6.02252412	-5.9503853	14	9.659568758	24.89716619	14.36842268
-10.752725	6.08067065	-6.0144331	15	8.732765576	24.78114996	14.09466271
-10.903154	6.13861735	-6.0753183	16	7.716557334	24.66513374	13.82527899
-11.052149	6.19636229	-6.133009	17	4.072556446	24.54911751	13.56032139
-11.199692	6.25390359	-6.1874748	18	8.377660165	24.43310128	13.29983793
-11.345763	6.31123935	-6.238687	19	7.835955629	24.31708506	13.04387478
-11.490341	6.36836769	-6.2866189	20	12.45229035	24.20106883	12.79247615
-11.63341	6.42528674	-6.3312451	21	10.21785287	24.0850526	12.5456844
-11.774949	6.48199461	-6.3725422	22	11.06953785	23.96903638	12.30353993
-11.91494	6.53848945	-6.4104884	23	9.548876531	23.85302015	12.06608118
-12.053365	6.59476941	-6.4450639	24	8.310709553	23.73700392	11.83334467

Figura 22. Variaciones Estacionales.

Estación EPEC componente e (fragmento).

3.5.4. Modelamiento de las series de tiempo

Habiendo hecho el análisis exhaustivo de las series temporales fue posible realizar una representación matemática de cada serie temporal para cada componente y cada estación, utilizando la ecuación (17) del capítulo 2, correspondiente al componente estacional, sumado a la tendencia definida en la ecuación (7). De manera que el modelo matemático para las series temporales para tres periodos fundamentales queda definido por la ecuación (21).

$$S(t) = mt + b + A1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T1}\right) + B1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T1}\right) + A2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T2}\right) + B2 \cos\left(\frac{2\pi t}{T2}\right) \quad (21)$$

$$+ A3 \sin\left(\frac{2\pi t}{T3}\right) + B3 \cos\left(\frac{2\pi t}{T3}\right)$$

Donde $S(t)$ es la estacionalidad con tendencia en función del tiempo, t es el tiempo en días y equivalente a (Ni) , m es la pendiente de la tendencia, b es la intersección con el eje ordenado, A y B coeficientes de las variaciones estacionales y T es el periodo fundamental.

Los coeficientes de las variaciones estacionales A y B fueron calculados mediante el desarrollo de un código en Matlab utilizando la ecuación (18) del capítulo 2 para tres periodos fundamentales como se evidencia en la Figura 23, m y b de la regresión lineal de las observaciones en función de Ni en la herramienta análisis de datos de Microsoft Excel, y los valores de T se utilizaron los tres primeros obtenidos en el análisis del orden de mayor a menor de los espectros de potencia. Dicho procedimiento se realizó para cada componente de cada estación estudiada.

	A (E)	B (E)	A (N)	B (N)	A (U)	B (U)
1	-14.8276134	-8.33816375	-0.33297087	-4.18910196	-1.85806838	6.11707162
2	10.6101817	5.18857085	-1.05672948	-2.24845971	1.85858194	0.43159729
3	-4.59295507	-4.7434175	0.73192071	2.21182488	-1.1365019	1.04094304

Figura 23. Coeficientes de variaciones estacionales. Estación EPEC.

3.5.5. Extrapolación de los modelos matemáticos ajustados a las series

Una vez encontrados los modelos matemáticos de las series temporales para cada componente de las estaciones de monitoreo de la REGME, se realizó la extrapolación de dichas variaciones estacionales para el año 2018. Se utilizaron coordenadas semanales finales de SIRGAS para 19 estaciones de las 27 de estudio disponibles en el servidor, de las semanas 1993, 2000, 2007, 2014, 2020 y 2027, considerando aproximadamente 2 meses de diferencia entre observaciones, para validar la serie obtenida.

Como no se contaba con soluciones diarias finales de SIRGAS, se asumió que dicha coordenada final pertenecía al cuarto día de la semana GPS (miércoles) ya que la solución semanal final es el promedio de las siete soluciones finales diarias.

Las coordenadas semanales finales de SIRGAS fueron transformadas del marco de referencia ITRF2014 a ITRF2008 utilizando la Transformación de Helmert con los 7 parámetros (tres de rotación, un factor de escalar y tres de rotación) definidos por el IERS en la página del ITRF, posteriormente se transformó dichas coordenadas al sistema topocéntrico local establecido en este estudio y con el día juliano correspondiente se calculó el valor Ni (Ecuación(20)) para la comparación de la extrapolación como se muestra en la Figura 24.

Ni	Coordenada SIRGAS (mm.)	Modelo (mm.)
1175	-15.89319192	-17.28091305
1224	-23.31440168	-23.91622845
1273	-22.52531978	-22.61849459
1315	-16.7506087	-21.3679897
1364	-15.4844039	-18.8003514
1413	-15.25082425	-11.41840625

Figura 24. Extrapolación del modelo al año 2018.

Estación EPEC (u)

3.6. Obtención de las velocidades

De acuerdo a la ecuación (19) definida en el capítulo 2, el cálculo de la velocidad de desplazamiento de las observaciones realizadas por cada estación y para cada componente se las obtuvo mediante la derivada de la estacionalidad como se expresa en la ecuación (22).

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial S(t)}{\partial t} \right|_t = & M + N1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T1}\right) - O1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T1}\right) + N2 \cos\left(\frac{2\pi t}{T2}\right) \\ & - O2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T2}\right) + N3 \cos\left(\frac{2\pi t}{T3}\right) - O3 \sin\left(\frac{2\pi t}{T3}\right) \end{aligned} \quad (22)$$

Donde, t es el tiempo en días y equivalente a Ni

Los coeficientes M , N y O fueron calculados mediante fórmula creada en Microsoft Excel a partir de la aplicación de las derivadas, de los que se obtuvieron los valores denotados en la Figura 25.

ESTACIÓN	COMPONENTE	M	N1	O1	T1	N2	O2	T2	N3	O3	T3
ALEC	E	-0.01405	0.04367	-0.02704	354.00000	-0.02949	-0.01167	531.00000	0.00277	0.01283	1062.00000
	N	0.04060	-0.00492	-0.03152	1062.00000	0.01653	0.01843	531.00000	-0.02089	-0.02745	354.00000
	U	-0.00324	-0.00658	0.15406	354.00000	-0.05175	0.03694	177.00000	-0.09382	0.00802	88.50000
BHEC	E	-0.00870	-0.06231	0.00611	450.00000	0.01104	0.02566	900.00000	0.06444	-0.01323	300.00000
	N	0.01071	0.01496	-0.05650	900.00000	-0.03239	0.03004	450.00000	-0.04267	-0.04345	300.00000
	U	-0.04135	-0.04576	0.01087	450.00000	0.03934	0.04779	300.00000	0.07280	-0.00442	180.00000
CHEC	E	-0.06552	-0.02821	-0.08365	263.00000	0.04111	-0.11383	175.33333	0.09726	-0.12456	131.50000
	N	0.02818	0.00407	-0.01444	1052.00000	-0.12707	-0.02965	105.20000	0.05453	-0.02839	210.40000
	U	-0.00473	0.03634	0.10275	350.66667	-0.03774	0.02108	526.00000	0.00808	-0.01901	1052.00000
CLEC	E	-0.03403	0.06264	0.05679	365.33333	0.04295	-0.01973	548.00000	-0.01910	-0.01558	1096.00000
	N	-0.00872	0.00031	-0.03489	1096.00000	-0.04905	0.03512	365.33333	0.02624	-0.00902	548.00000
	U	-0.01475	-0.02606	0.20125	365.33333	0.03950	-0.07846	219.20000	0.11034	0.02838	156.57143
CUEC	E	-0.01054	-0.06490	0.01616	270.66667	0.02491	0.02908	406.00000	0.00586	0.00731	812.00000
	N	0.03901	-0.01137	-0.02565	812.00000	0.03257	-0.02552	406.00000	0.02890	0.03282	270.66667
	U	0.00020	-0.06155	0.07683	406.00000	0.04783	-0.05307	270.66667	0.08466	0.04917	162.40000
CXEC	E	-0.08866	-0.12779	-0.07093	548.00000	0.04330	0.03746	1096.00000	-0.08588	-0.08549	274.00000
	N	0.07225	-0.01570	-0.03180	1096.00000	0.04306	0.04260	548.00000	-0.01162	-0.05626	365.33333
	U	-0.00876	-0.02197	0.12265	365.33333	-0.01935	0.00497	548.00000	0.00801	-0.00370	1096.00000
ECEC	E	-0.35586	-0.53693	-0.32421	548.00000	0.21047	0.14924	1096.00000	-0.04870	0.38815	365.33333
	N	0.11639	-0.04275	-0.05849	1096.00000	0.10602	0.08494	548.00000	0.00858	-0.10677	365.33333

Figura 25. Coeficientes de la ecuación de velocidad para cada estación (fragmento).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Procesamiento

Se realizó el procesamiento en el Software Científico Bernese 5.2 de las observaciones de las 25 estaciones de la REGME y 2 estaciones del IGS distribuidas sobre el Ecuador para el periodo de estudio 2015-2017 correspondiente a 1096 días. Hubo 18 estaciones que superaban el 75% del porcentaje de observación para el periodo de estudio y 4 estaciones que registraron menos del 50% de las observaciones del mismo periodo, de las que apenas la estación PVEC registró el 7.21% de observaciones. En 21 estaciones se pudieron procesar más del 98% de las observaciones mientras que solo en la estación PVEC se pudo procesar menos del 90% de las observaciones obtenidas. Ninguna estación alcanzó el 100% del procesamiento ya que se presentaron errores en las semanas 1944, 1959 y en el día 243 del año 2016 que impedían el cálculo de resultados a través del software. En la Tabla 10 se presentan las observaciones procesadas para el periodo de estudio.

Tabla 10

Procesamiento de las observaciones del Ecuador para el periodo de estudio 2015-2017

Estación	Observaciones obtenidas	Porcentaje de Observación	Observaciones Procesadas	Porcentaje de Procesamiento
ALEC	1062	96.90	1046	98.49
BHEC	880	80.29	862	97.95
CHEC	713	65.05	672	94.25
CLEC	904	82.48	888	98.23

CONTINÚA →

CUEC	811	74.00	810	99.88
CXEC	1096	100.00	1081	98.63
ECEC	1074	97.99	1065	99.16
EPEC	1085	99.00	1069	98.53
FOEC	902	82.30	893	99.00
GLPS	1096	100.00	1080	98.54
GUEC	1096	100.00	1080	98.54
GZEC	931	84.95	867	93.13
LJEC	1026	93.61	1010	98.44
LPEC	824	75.18	808	98.06
MAEC	1037	94.62	1021	98.46
NJEC	952	86.86	919	96.53
ONEC	798	72.81	789	98.87
PDEC	412	37.59	410	99.51
PEEC	369	33.67	357	96.75
PJEC	618	56.39	617	99.84
PREC	994	90.69	979	98.49
PTEC	383	34.95	382	99.74
PVEC	79	7.21	68	86.08
QVEC	585	53.38	584	99.83
RIOP	1054	96.17	1039	98.58
SEEC	888	81.02	880	99.10
SIEC	1096	100.00	1080	98.54

Para realizar la comparación de precisiones con las soluciones semanales finales provistas por SIRGAS, fue necesario calcular una solución semilibre semanal y poder realizar la comparación, obteniendo un promedio y su desviación estándar para cada componente de cada estación estudiada como se evidencia en la Tabla 11.

Tabla 11

Comparación de diferencias entre las soluciones semanales semilibres obtenidas y las soluciones semanales finales de SIRGAS.

Estación	Numero de semanas procesadas	ΔX [mm]	$\sigma_{\Delta X}$ [mm]	ΔY [mm]	$\sigma_{\Delta Y}$ [mm]	ΔZ [mm]	$\sigma_{\Delta Z}$ [mm]
ALEC	151	-1.627	3.260	1.681	5.307	-2.847	4.127
BHEC	96	-1.798	3.592	3.178	5.747	-3.533	4.089
CHEC	50	-1.265	2.811	3.854	4.959	-3.217	2.715
CLEC	119	-1.044	3.343	0.777	5.451	-2.565	3.938
CUEC	117	-1.314	3.464	3.792	4.743	-3.210	4.386
CXEC	155	-1.386	3.176	2.931	4.445	-2.910	3.990
ECEC	154	-0.817	3.896	-0.202	12.009	-2.768	4.096
EPEC	155	-1.374	3.251	3.559	4.349	-2.902	4.112
FOEC	102	-0.773	3.734	2.898	4.393	-3.635	3.941
GLPS	132	-3.265	3.499	1.146	5.145	-2.128	4.223
GUEC	128	-1.494	3.558	3.656	4.473	-3.904	3.812
GZEC	110	-1.629	4.269	3.826	8.350	-2.103	3.924
LJEC	132	-1.052	3.521	-0.263	6.119	-3.781	4.137
LPEC	71	0.253	3.329	3.450	4.995	-4.405	3.051
MAEC	145	-1.322	3.339	2.431	4.889	-3.362	3.815
NJEC	124	-1.828	3.500	4.044	7.669	-3.253	4.161
ONEC	70	-1.670	3.075	4.233	5.432	-3.883	2.740
PDEC	52	-0.894	3.146	5.184	4.556	-1.778	3.215
PEEC	34	-0.632	2.337	6.129	5.056	-3.161	2.311
PJEC	89	-1.697	3.035	6.499	5.245	-2.408	4.289
PREC	142	-1.120	3.380	2.967	5.170	-3.238	4.027
PTEC	31	-0.434	3.360	5.083	4.116	-2.920	2.439
PVEC	3	-3.080	1.058	6.385	4.596	-5.286	3.474
QVEC	86	-1.708	3.327	6.380	7.328	-2.919	4.337
RIOP	146	-1.022	3.516	-0.354	6.590	-3.031	3.912
SEEC	117	-1.490	3.218	5.333	4.752	-2.631	4.285
SIEC	128	-0.374	3.447	1.763	4.899	-4.012	3.759

Se observa que para la componente X la diferencia entre soluciones es menor a 2 mm para 25 estaciones y que las 2 estaciones restantes se encuentran entre 2 a 5 mm de diferencia. Para la componente Y la diferencia es menor a 2 mm para 7 estaciones, 13 se encuentran entre 2 a 5 mm de diferencia y 7 estaciones tienen diferencias entre 5 a 6.5 mm de precisión. Para la componente Z, 1 estación posee diferencias menores a 2 mm, 25 estaciones difieren entre 2 a 5 mm y 1 estación tiene una diferencia de 5.2 mm. La mayor diferencia registrada entre soluciones fue de 6.49 mm.

4.1.2. Series Temporales

4.1.2.1. Corrección de outliers

Se realizaron correcciones de valores atípicos para las componentes horizontales e y n de las 27 estaciones de estudio mediante procesos integrados de grado uno, donde se sobrepasó en la estación PEEC, con 4.2%, la consideración hecha por Nikolaidis (2002) de no eliminar más del 4% de las observaciones calculadas. Cabe recalcar que no se realizaron iteraciones en el procedimiento de eliminación. En la Tabla 12 se observa el porcentaje de eliminación de las observaciones eliminadas versus las procesadas.

Tabla 12

Corrección de outliers en las series temporales

Estación	Observaciones Totales	Observaciones eliminadas	Porcentaje eliminado
ALEC	1046	28	2.68
BHEC	862	23	2.67
CHEC	672	16	2.38
CLEC	888	15	1.69
CUEC	810	27	3.33
CXEC	1081	25	2.31
ECEC	1065	27	2.54

CONTINÚA →

EPEC	1069	27	2.53
FOEC	893	29	3.25
GLPS	1080	32	2.96
GUEC	1080	30	2.78
GZEC	867	26	3.00
LJEC	1010	23	2.28
LPEC	808	26	3.22
MAEC	1021	24	2.35
NJEC	919	24	2.61
ONEC	789	21	2.66
PDEC	410	13	3.17
PEEC	357	15	4.20
PJEC	617	21	3.40
PREC	979	23	2.35
PTEC	382	9	2.36
PVEC	68	1	1.47
QVEC	584	20	3.42
RIOP	1039	28	2.69
SEEC	880	30	3.41
SIEC	1080	26	2.41

4.1.2.2. Tendencia

Los valores de tendencia se los obtuvo al ejecutar la herramienta de Microsoft Excel, Análisis de Datos – Regresión Lineal, de los que se obtuvieron los coeficientes m y b correspondientes a los valores de la pendiente de la recta y a la intersección con el eje ordenado calculados a partir de mínimos cuadrados para las observaciones en función de Ni como se muestra en la Tabla 13

Tabla 13*Coefficientes para la tendencia de las series temporales*

ESTACIÓN	COMPONENTE	b (mm)	m
ALEC	<i>e</i>	15.99145	-0.01405
	<i>n</i>	19.36436	0.04060
	<i>u</i>	-13.79406	-0.00324
BHEC	<i>e</i>	2.37723	-0.00870
	<i>n</i>	7.72066	0.01071
	<i>u</i>	-3.04172	-0.04135
CHEC	<i>e</i>	18.34511	-0.06552
	<i>n</i>	24.26931	0.02818
	<i>u</i>	17.68193	-0.00473
CLEC	<i>e</i>	-1.39016	-0.03403
	<i>n</i>	15.74393	-0.00872
	<i>u</i>	-13.31945	-0.01475
CUEC	<i>e</i>	4.50339	-0.01054
	<i>n</i>	50.10482	0.03901
	<i>u</i>	0.50533	0.00020
CXEC	<i>e</i>	19.76881	-0.08866
	<i>n</i>	9.53727	0.07225
	<i>u</i>	-1.16948	-0.00876
ECEC	<i>e</i>	81.41677	-0.35586
	<i>n</i>	20.67597	0.11639
	<i>u</i>	-16.99807	-0.07043
EPEC	<i>e</i>	26.52139	-0.11602
	<i>n</i>	13.06566	0.04382
	<i>u</i>	-9.93346	-0.00518
FOEC	<i>e</i>	6.03890	-0.03813
	<i>n</i>	3.57387	0.03320
	<i>u</i>	-1.44436	-0.01547
GLPS	<i>e</i>	1.02235	-0.14067
	<i>n</i>	3.36363	0.03092
	<i>u</i>	-4.55594	0.00327

CONTINÚA →

GUEC	<i>e</i>	2.39279	0.00719
	<i>n</i>	6.07776	0.02821
	<i>u</i>	2.46495	-0.00895
GZEC	<i>e</i>	2.70853	-0.00948
	<i>n</i>	15.36468	0.02925
	<i>u</i>	-6.68769	-0.00448
LJEC	<i>e</i>	0.04210	-0.00683
	<i>n</i>	54.02158	0.01994
	<i>u</i>	-3.39028	0.00429
LPEC	<i>e</i>	12.14230	-0.03783
	<i>n</i>	8.09866	0.01236
	<i>u</i>	2.85367	-0.02007
MAEC	<i>e</i>	5.15531	-0.01717
	<i>n</i>	41.25750	0.03346
	<i>u</i>	12.90201	-0.00263
NJEC	<i>e</i>	9.24527	0.00801
	<i>n</i>	16.93463	0.02607
	<i>u</i>	8.53254	-0.01135
ONEC	<i>e</i>	27.87348	-0.16171
	<i>n</i>	6.31857	0.03963
	<i>u</i>	21.17552	-0.14521
PDEC	<i>e</i>	7.37223	-0.01110
	<i>n</i>	20.57610	0.02397
	<i>u</i>	-13.91305	0.01045
PEEC	<i>e</i>	3.39292	0.04086
	<i>n</i>	4.92940	0.07170
	<i>u</i>	-2.76824	0.01083
PJEC	<i>e</i>	29.85680	-0.01997
	<i>n</i>	31.09053	0.01978
	<i>u</i>	-11.70670	-0.00207
PREC	<i>e</i>	2.60163	-0.03569
	<i>n</i>	15.15447	0.03978
	<i>u</i>	3.39940	-0.00378
PTEC	<i>e</i>	68.19000	-0.00349

CONTINÚA →

	<i>n</i>	82.66164	0.07459
	<i>u</i>	17.98052	-0.00868
PVEC	<i>e</i>	0.79701	0.07282
	<i>n</i>	10.78774	0.05913
	<i>u</i>	-3.08016	-0.13325
QVEC	<i>e</i>	64.54660	-0.13242
	<i>n</i>	30.20645	0.11903
	<i>u</i>	-6.98097	-0.03224
RIOP	<i>e</i>	10.91246	-0.03315
	<i>n</i>	41.38257	0.05605
	<i>u</i>	4.33417	-0.00983
SEEC	<i>e</i>	29.55453	0.00210
	<i>n</i>	34.52151	0.02437
	<i>u</i>	-13.29172	-0.00843
SIEC	<i>e</i>	0.58934	-0.00376
	<i>n</i>	4.19840	0.02349
	<i>u</i>	0.13432	-0.00494

Se puede apreciar que, debido a la tendencia presente en las series temporales estudiadas, como muestra el coeficiente m correspondiente a la pendiente, se consideran estacionarias el 30% de las series analizadas ya que son cercanas a cero mientras que las series restantes son no estacionarias ya que supera el valor de 0.01 en su pendiente.

4.1.2.3. Estacionalidad

Se utilizó el método propuesto por Lomb (1976) para series temporales que no son igualmente espaciadas para obtener las variaciones estacionales a través del cálculo de los periodos fundamentales y sus potencias. Para el estudio se consideró hasta la tercera potencia fundamental evidenciada en la Figura 26 para la estación EPEC.

En el Anexo A se representan los análisis de estacionalidad para tres periodos fundamentales para cada componente de las 27 estaciones de estudio.

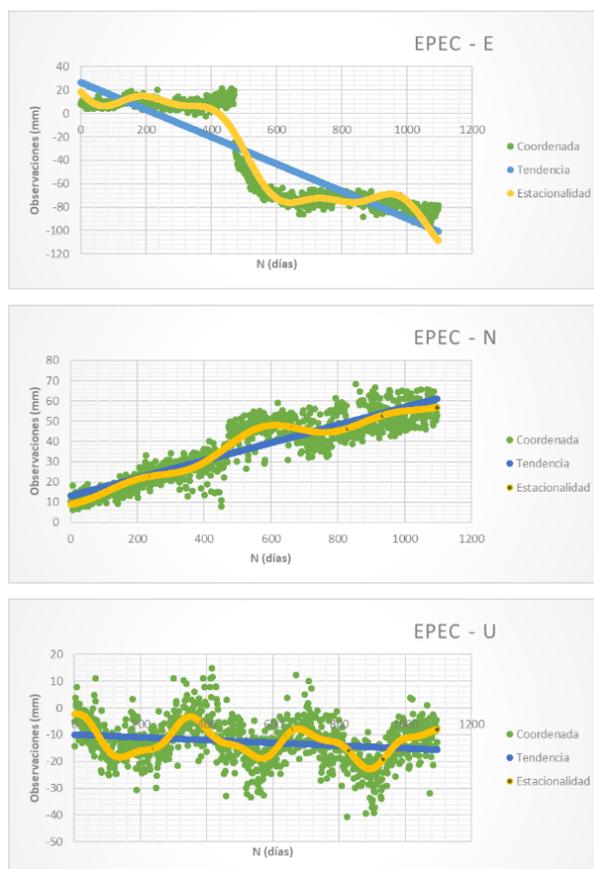


Figura 26 Estacionalidad. Estación EPEC.

Se obtuvo que para 15 estaciones el modelo de la estacionalidad se ajustó de mejor manera al poseer mayor número de observaciones y no presentarse saltos producidos por el terremoto 2016. Se observa para las estaciones CXEC, ECEC, EPEC, ONEC y QVEC un desplazamiento abrupto producido por el terremoto principalmente para la componente e . En la estación PVEC no se aprecia una estacionalidad definida por intermitencia de rastreos.

La periodicidad de las estaciones se obtuvo a partir del primer valor de los periodos fundamentales obtenidos para cada componente de las 27 estaciones de la REGME como se muestra en la Tabla 14

Tabla 14*Periodicidad de las series temporales*

Estación	Periodos fundamentales					
	<i>e</i>		<i>n</i>		<i>u</i>	
	T (días)	T (años)	T (días)	T (años)	T (días)	T (años)
ALEC	354	0.97	1062	2.91	354	0.97
BHEC	450	1.23	900	2.47	450	1.23
CHEC	263	0.72	1052	2.88	350.67	0.96
CLEC	365.33	1.00	1096	3.00	365.33	1.00
CUEC	270.67	0.74	812	2.22	406	1.11
CXEC	548	1.50	1096	3.00	365.33	1.00
ECEC	548	1.50	1096	3.00	365.33	1.00
EPEC	548	1.50	1096	3.00	365.33	1.00
FOEC	451	1.24	902	2.47	451	1.24
GLPS	365.33	1.00	365.33	1.00	365.33	1.00
GUEC	365.33	1.00	1096	3.00	365.33	1.00
GZEC	365.33	1.00	1096	3.00	365.33	1.00
LJEC	365.33	1.00	1096	3.00	365.33	1.00
LPEC	475	1.30	950	2.60	475	1.30
MAEC	365.33	1.00	1096	3.00	365.33	1.00
NJEC	343.33	0.94	1030	2.82	343.33	0.94
ONEC	527	1.44	1054	2.89	527	1.44
PDEC	750	2.05	750	2.05	375	1.03
PEEC	472	1.29	157.33	0.43	472	1.29
PJEC	618	1.69	618	1.69	618	1.69
PREC	548	1.50	1096	3.00	365.33	1.00
PTEC	384	1.05	192	0.53	384	1.05
PVEC	41	0.11	2.93	0.01	3.04	0.01
QVEC	608	1.67	608	1.67	304	0.83
RIOP	537	1.47	1074	2.94	358	0.98
SEEC	444	1.22	888	2.43	444	1.22
SIEC	365.33	1.00	1096	3.00	365.33	1.00

Se observa que no existe una periodicidad estacional predominante para la componente horizontal e , mientras que se evidencia una periodicidad estacional de tres años para la componente n y una periodicidad estacional anual para la componente u .

Se corrobora que el ajuste del modelo estacional para la estación PVEC es paupérrimo ya que se observan periodicidades muy cortas.

4.1.2.4. Modelamiento de las series temporales

El modelamiento de las series temporales se realizó mediante el cálculo de los coeficientes necesarios para reemplazar en la ecuación de series temporales no igualmente espaciadas propuesta por Lomb (1976) para tres periodos fundamentales:

$$S(t) = mt + b + A1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T1}\right) + B1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T1}\right) + A2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T2}\right) + B2 \cos\left(\frac{2\pi t}{T2}\right) + A3 \sin\left(\frac{2\pi t}{T3}\right) + B3 \cos\left(\frac{2\pi t}{T3}\right)$$

Donde, t es el tiempo en días y equivalente a Ni

Los coeficientes para cada componente de las 27 estaciones de estudio se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15

Coefficientes para estacionalidad de tres periodos fundamentales de las series temporales.

EST.	COMP.	b	m	A1	B1	T1	A2	B2	T2	A3	B3	T3
ALEC	e	15.99145	-0.01405	2.46041	-1.52362	354.00	-2.49266	-0.98614	531.00	0.46835	2.16890	1062.00
	n	19.36436	0.04060	-0.83164	-5.32841	1062.00	1.39733	1.55791	531.00	-1.17670	-1.54648	354.00
	u	-13.79406	-0.00324	-0.37089	8.67964	354.00	-1.45778	1.04057	177.00	-1.32142	0.11293	88.50
BHEC	e	2.37723	-0.00870	-4.46276	0.43788	450.00	1.58149	3.67593	900.00	3.07659	-0.63182	300.00
	n	7.72066	0.01071	2.14247	-8.09276	900.00	-2.31984	2.15152	450.00	-2.03718	-2.07474	300.00
	u	-3.04172	-0.04135	-3.27712	0.77870	450.00	1.87823	2.28202	300.00	2.08548	-0.12669	180.00
CHEC	e	18.34511	-0.06552	-1.18065	-3.50131	263.00	1.14722	-3.17631	175.33	2.03551	-2.60695	131.50
	n	24.26931	0.02818	0.68174	-2.41694	1052.00	-2.12762	-0.49647	105.20	1.82615	-0.95069	210.40
	u	17.68193	-0.00473	2.02840	5.73457	350.67	-3.15913	1.76445	526.00	1.35279	-3.18279	1052.00
CLEC	e	-1.39016	-0.03403	3.64199	3.30220	365.33	3.74622	-1.72048	548.00	-3.33100	-2.71812	1096.00
	n	15.74393	-0.00872	0.05361	-6.08514	1096.00	-2.85195	2.04200	365.33	2.28898	-0.78652	548.00
	u	-13.31945	-0.01475	-1.51545	11.70148	365.33	1.37802	-2.73712	219.20	2.74945	0.70713	156.57
CUEC	e	4.50339	-0.01054	-2.79562	0.69631	270.67	1.60932	1.87886	406.00	0.75667	0.94526	812.00
	n	50.10482	0.03901	-1.46896	-3.31423	812.00	2.10426	-1.64906	406.00	1.24491	1.41392	270.67
	u	0.50533	0.00020	-3.97708	4.96436	406.00	2.06041	-2.28619	270.67	2.18824	1.27097	162.40
CXEC	e	19.76881	-0.08866	-11.14543	-6.18638	548.00	7.55339	6.53396	1096.00	-3.74501	-3.72824	274.00
	n	9.53727	0.07225	-2.73804	-5.54695	1096.00	3.75521	3.71502	548.00	-0.67550	-3.27105	365.33
	u	-1.16948	-0.00876	-1.27723	7.13123	365.33	-1.68781	0.43311	548.00	1.39673	-0.64528	1096.00
ECEC	e	81.41677	-0.35586	-46.82904	-28.27661	548.00	36.71307	26.03247	1096.00	-2.83161	22.56868	365.33
	n	20.67597	0.11639	-7.45710	-10.20330	1096.00	9.24646	7.40820	548.00	0.49916	-6.20783	365.33

CONTINÚA →

	<i>u</i>	-16.99807	-0.07043	-4.77210	10.69329	365.33	8.40424	4.40082	1096.00	-7.91861	-2.96578	274.00
	<i>e</i>	26.52139	-0.11602	-14.82761	-8.33816	548.00	10.61018	5.18857	1096.00	-4.59296	-4.74342	274.00
EPEC	<i>n</i>	13.06566	0.04382	-0.33297	-4.18910	1096.00	-1.05673	-2.24846	365.33	0.73192	2.21182	548.00
	<i>u</i>	-9.93346	-0.00518	-1.85807	6.11707	365.33	1.85858	0.43160	156.57	-1.13650	1.04094	548.00
	<i>e</i>	6.03890	-0.03813	-2.95732	2.80274	451.00	-1.68761	-3.10461	300.67	2.72602	-0.26942	902.00
FOEC	<i>n</i>	3.57387	0.03320	-0.60791	-4.45442	902.00	-0.99713	1.40435	300.67	1.67843	-0.30321	451.00
	<i>u</i>	-1.44436	-0.01547	-4.71025	1.46394	451.00	4.75381	-0.24251	300.67	1.85431	-0.28710	150.33
	<i>e</i>	1.02235	-0.14067	-2.81754	-0.11898	365.33	1.08266	0.02941	274.00	1.01273	-0.34960	1096.00
GLPS	<i>n</i>	3.36363	0.03092	-2.97191	-1.20171	365.33	1.73787	2.03346	274.00	1.93176	-1.02532	548.00
	<i>u</i>	-4.55594	0.00327	-2.73024	-3.83441	365.33	2.49706	1.18072	182.67	1.91691	0.99886	219.20
	<i>e</i>	2.39279	0.00719	3.50299	-1.13667	365.33	-1.52080	-0.13187	274.00	-0.72806	-1.20817	548.00
GUEC	<i>n</i>	6.07776	0.02821	1.39421	-3.85569	1096.00	-2.16657	1.26488	548.00	-0.11044	-1.58923	219.20
	<i>u</i>	2.46495	-0.00895	-1.17051	7.48126	365.33	-1.45600	-0.90204	219.20	1.67792	0.32704	1096.00
	<i>e</i>	2.70853	-0.00948	3.22370	-1.43063	365.33	-0.98842	2.11258	1096.00	0.91864	1.11530	137.00
GZEC	<i>n</i>	15.36468	0.02925	0.37893	-2.36223	1096.00	-1.54105	0.06031	137.00	-1.52767	0.16387	365.33
	<i>u</i>	-6.68769	-0.00448	-2.50774	6.43308	365.33	0.92581	4.39212	548.00	-2.12905	0.75275	274.00
	<i>e</i>	0.04210	-0.00683	2.46285	-3.61362	365.33	-0.95830	1.62172	1096.00	-1.81651	0.08191	274.00
LJEC	<i>n</i>	54.02158	0.01994	0.92780	-4.24212	1096.00	-1.13607	1.82075	548.00	-1.29908	-0.86197	137.00
	<i>u</i>	-3.39028	0.00429	-2.16090	12.35849	365.33	-2.61955	-1.46235	182.67	-0.85288	-1.58981	274.00
	<i>e</i>	12.14230	-0.03783	-9.61814	0.75919	475.00	5.73610	-2.08693	950.00	3.46224	-4.09209	316.67
LPEC	<i>n</i>	8.09866	0.01236	1.99699	-6.55180	950.00	-2.64839	-0.90591	475.00	-1.42795	0.12698	158.33
	<i>u</i>	2.85367	-0.02007	-7.11219	0.57856	475.00	1.26267	-5.29658	950.00	4.67067	0.41036	316.67
	<i>e</i>	5.15531	-0.01717	2.93538	-0.16431	365.33	-1.60717	-1.93191	548.00	-1.77357	-0.80760	274.00
MAEC	<i>n</i>	41.25750	0.03346	0.05347	-5.09627	1096.00	-1.19101	-2.11973	365.33	0.39160	1.68704	548.00

CONTINÚA →

	<i>u</i>	12.90201	-0.00263	-0.81733	7.02594	365.33	-2.30721	0.66962	548.00	1.84646	1.04354	156.57
NJEC	<i>e</i>	9.24527	0.00801	1.85384	-1.90752	343.33	-1.34087	1.94875	1030.00	0.78885	-0.03559	114.44
	<i>n</i>	16.93463	0.02607	0.45642	-3.60678	1030.00	-1.98500	-0.66752	343.33	0.80311	1.18587	515.00
	<i>u</i>	8.53254	-0.01135	4.68325	7.81474	343.33	-2.69504	-2.52635	515.00	-3.30603	-1.10408	128.75
ONEC	<i>e</i>	27.87348	-0.16171	-21.8002	-19.4134	527.00	15.83335	5.48321	1054.00	-14.5470	-10.1045	263.50
	<i>n</i>	6.31857	0.03963	0.31814	-9.02295	1054.00	1.27520	2.62961	263.50	-1.53401	-1.60531	351.33
	<i>u</i>	21.17552	-0.14521	-20.9781	-15.1113	527.00	4.31523	19.78090	351.33	15.00201	0.42914	1054.00
PDEC	<i>e</i>	7.37223	-0.01110	0.22954	3.27234	750.00	2.27251	-1.42141	375.00	-1.07897	1.39563	150.00
	<i>n</i>	20.57610	0.02397	0.26519	-4.48146	750.00	-1.81497	-0.00811	375.00	0.34088	-1.75468	150.00
	<i>u</i>	-13.91305	0.01045	0.80774	7.02048	375.00	-3.52543	-1.83600	750.00	3.37372	0.81215	150.00
PEEC	<i>e</i>	3.39292	0.04086	1.50970	0.85385	472.00	-1.40924	-0.34364	236.00	-0.60462	1.24299	157.33
	<i>n</i>	4.92940	0.07170	0.36023	-1.48459	157.33	0.47498	1.17359	2.91	-0.17340	-1.17047	472.00
	<i>u</i>	-2.76824	0.01083	-1.67109	3.43924	472.00	0.71548	-2.16527	236.00	2.00246	-0.70781	67.43
PJEC	<i>e</i>	29.85680	-0.01997	-2.80302	-4.88810	618.00	2.99862	-4.55507	309.00	2.37274	0.65442	206.00
	<i>n</i>	31.09053	0.01978	-0.71943	-5.91141	618.00	1.90636	-2.64395	309.00	1.32966	-0.81187	88.29
	<i>u</i>	-11.70670	-0.00207	-1.48464	-6.54601	618.00	3.43827	1.40309	309.00	-0.00229	2.06121	154.50
PREC	<i>e</i>	2.60163	-0.03569	-3.72999	-2.79349	548.00	1.58215	2.72781	1096.00	3.09171	0.49777	365.33
	<i>n</i>	15.15447	0.03978	-0.37348	-4.99198	1096.00	-0.73325	-2.66686	365.33	1.04228	1.94885	548.00
	<i>u</i>	3.39940	-0.00378	-1.06201	7.43358	365.33	-2.14469	-0.63049	182.67	-1.17036	-1.36634	274.00
PTEC	<i>e</i>	68.19000	-0.00349	1.11295	-2.28401	384.00	-1.74393	1.62113	192.00	-0.37869	-0.50427	2.78
	<i>n</i>	82.66164	0.07459	1.26196	0.24797	192.00	0.54497	-0.69968	34.91	-0.73976	-0.41529	21.33
	<i>u</i>	17.98052	-0.00868	-0.11119	9.66290	384.00	-1.34662	-1.96477	192.00	0.48982	-1.40874	8.93
PVEC	<i>e</i>	0.79701	0.07282	-1.45471	1.94342	41.00	2.05052	1.06075	20.50	-1.95742	0.44813	11.71
	<i>n</i>	10.78774	0.05913	3.27895	2.25158	2.93	-2.49171	-1.96313	3.57	0.28867	3.04466	82.00

CONTINÚA →

	<i>u</i>	-3.08016	-0.13325	-0.33318	2.90989	3.04	-2.87926	-0.11030	41.00	2.57745	-0.40637	20.50
QVEC	<i>e</i>	64.54660	-0.13242	-4.64770	-22.1156	608.00	7.66685	-7.52320	304.00	0.32197	5.01446	152.00
	<i>n</i>	30.20645	0.11903	1.45864	11.49297	608.00	-4.33643	1.65497	304.00	-1.05927	2.72217	101.33
	<i>u</i>	-6.98097	-0.03224	6.86420	-1.32593	304.00	-4.40955	-3.14954	608.00	3.81767	1.75106	152.00
RIOP	<i>e</i>	10.91246	-0.03315	-4.22129	-3.19655	537.00	2.01624	4.07931	1074.00	3.01004	2.01128	358.00
	<i>n</i>	41.38257	0.05605	-1.36478	-5.63413	1074.00	1.71071	2.96553	537.00	-0.29121	-3.01559	358.00
	<i>u</i>	4.33417	-0.00983	-2.82057	7.53599	358.00	2.18798	0.31168	1074.00	1.24891	1.56473	153.43
SEEC	<i>e</i>	29.55453	0.00210	-1.62973	4.01323	444.00	-2.23284	-3.11627	296.00	2.34603	2.53225	888.00
	<i>n</i>	34.52151	0.02437	-0.09448	-6.20538	888.00	-0.89491	0.52162	80.73	0.49346	-0.79458	148.00
	<i>u</i>	-13.29172	-0.00843	-4.76301	2.36171	444.00	4.27241	-1.72760	296.00	1.69116	-0.19946	148.00
SIEC	<i>e</i>	0.58934	-0.00376	2.90395	-0.52325	365.33	-0.93621	1.22957	1096.00	-1.32937	-0.00276	274.00
	<i>n</i>	4.19840	0.02349	1.13355	-4.69609	1096.00	-1.05620	-1.51047	365.33	-1.02849	1.18686	548.00
	<i>u</i>	0.13432	-0.00494	-2.31321	5.64615	365.33	1.74473	0.23457	156.57	1.66233	-0.38600	1096.00

4.1.2.5. Extrapolación del modelo

Se utilizó el modelo matemático de tres periodos fundamentales generado para la estacionalidad de las series temporales estudiadas para verificar si existe relación entre las coordenadas semanales finales proporcionadas por SIRGAS con las obtenidas a partir del modelo. Se utilizaron las observaciones disponibles de las semanas 1993, 2000, 2014, 2020 y 2027 para la comparación gráfica como se muestra en la Figura 27 de la estación EPEC.

En el Anexo B se representan las extrapolaciones de la estacionalidad para el año 2018 con tres periodos fundamentales para cada componente de las 19 estaciones que presentaban soluciones finales de SIRGAS para las semanas propuestas en la comparación.

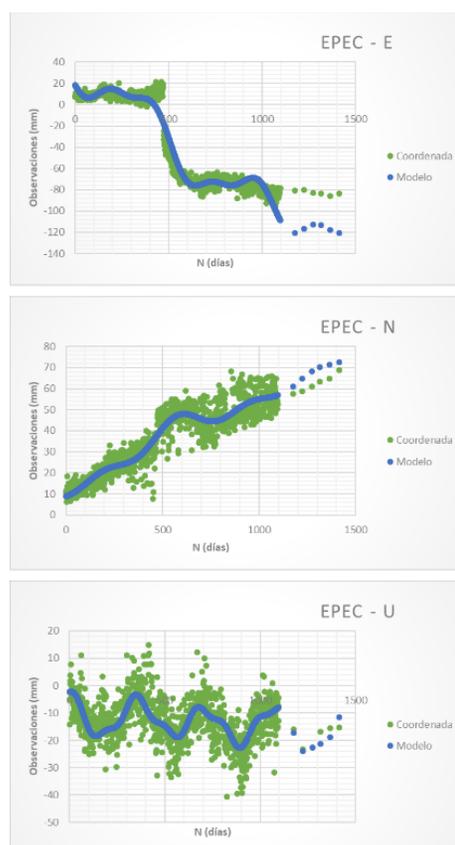


Figura 27. Extrapolación de la estacionalidad. Estación EPEC

Gráficamente se observa un mejor ajuste para las estaciones CHEC, CXEC, GLPS, GUEC, GZEC, LJEC, NJEC, PREC, RIOP y SIEC en la extrapolación del modelo obtenido para el año 2018, al no observarse mayor amplitud con respecto al modelo ajustado y seguir un comportamiento similar.

4.1.3. Cálculo de velocidades no lineales

Partiendo de la definición:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

Se procedió a extraer la derivada del modelo matemático obtenido de la estacionalidad con respecto al tiempo para obtener la ecuación de velocidades no lineales de las series temporales para un punto t definido.

De esta manera se obtuvo la expresión

$$\left. \frac{\partial S(t)}{\partial t} \right|_t = M + N1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T1}\right) - O1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T1}\right) + N2 \cos\left(\frac{2\pi t}{T2}\right) - O2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T2}\right) + N3 \cos\left(\frac{2\pi t}{T3}\right) - O3 \sin\left(\frac{2\pi t}{T3}\right)$$

Donde, t es el tiempo en días y equivalente a (Ni)

Los coeficientes calculados para emplear dicha ecuación se encuentran definidos en la Tabla 16.

Tabla 16

Coefficientes para velocidad de tres periodos fundamentales de las series temporales.

ESTACIÓN	COMP.	M	N1	O1	T1	N2	O2	T2	N3	O3	T3
ALEC	<i>e</i>	-0.01405	0.04367	-0.02704	354.00	-0.02949	-0.01167	531.00	0.00277	0.01283	1062.00
	<i>n</i>	0.04060	-0.00492	-0.03152	1062.00	0.01653	0.01843	531.00	-0.02089	-0.02745	354.00
	<i>u</i>	-0.00324	-0.00658	0.15406	354.00	-0.05175	0.03694	177.00	-0.09382	0.00802	88.50
BHEC	<i>e</i>	-0.00870	-0.06231	0.00611	450.00	0.01104	0.02566	900.00	0.06444	-0.01323	300.00
	<i>n</i>	0.01071	0.01496	-0.05650	900.00	-0.03239	0.03004	450.00	-0.04267	-0.04345	300.00
	<i>u</i>	-0.04135	-0.04576	0.01087	450.00	0.03934	0.04779	300.00	0.07280	-0.00442	180.00
CHEC	<i>e</i>	-0.06552	-0.02821	-0.08365	263.00	0.04111	-0.11383	175.33	0.09726	-0.12456	131.50
	<i>n</i>	0.02818	0.00407	-0.01444	1052.00	-0.12707	-0.02965	105.20	0.05453	-0.02839	210.40
	<i>u</i>	-0.00473	0.03634	0.10275	350.67	-0.03774	0.02108	526.00	0.00808	-0.01901	1052.00
CLEC	<i>e</i>	-0.03403	0.06264	0.05679	365.33	0.04295	-0.01973	548.00	-0.01910	-0.01558	1096.00
	<i>n</i>	-0.00872	0.00031	-0.03489	1096.00	-0.04905	0.03512	365.33	0.02624	-0.00902	548.00
	<i>u</i>	-0.01475	-0.02606	0.20125	365.33	0.03950	-0.07846	219.20	0.11034	0.02838	156.57
CUEC	<i>e</i>	-0.01054	-0.06490	0.01616	270.67	0.02491	0.02908	406.00	0.00586	0.00731	812.00
	<i>n</i>	0.03901	-0.01137	-0.02565	812.00	0.03257	-0.02552	406.00	0.02890	0.03282	270.67
	<i>u</i>	0.00020	-0.06155	0.07683	406.00	0.04783	-0.05307	270.67	0.08466	0.04917	162.40
CXEC	<i>e</i>	-0.08866	-0.12779	-0.07093	548.00	0.04330	0.03746	1096.00	-0.08588	-0.08549	274.00
	<i>n</i>	0.07225	-0.01570	-0.03180	1096.00	0.04306	0.04260	548.00	-0.01162	-0.05626	365.33
	<i>u</i>	-0.00876	-0.02197	0.12265	365.33	-0.01935	0.00497	548.00	0.00801	-0.00370	1096.00
ECEC	<i>e</i>	-0.35586	-0.53693	-0.32421	548.00	0.21047	0.14924	1096.00	-0.04870	0.38815	365.33
	<i>n</i>	0.11639	-0.04275	-0.05849	1096.00	0.10602	0.08494	548.00	0.00858	-0.10677	365.33

CONTINÚA →

	<i>u</i>	-0.07043	-0.08207	0.18391	365.33	0.04818	0.02523	1096.00	-0.18158	-0.06801	274.00
EPEC	<i>e</i>	-0.11602	-0.17001	-0.09560	548.00	0.06083	0.02975	1096.00	-0.10532	-0.10877	274.00
	<i>n</i>	0.04382	-0.00191	-0.02402	1096.00	-0.01817	-0.03867	365.33	0.00839	0.02536	548.00
	<i>u</i>	-0.00518	-0.03196	0.10520	365.33	0.07458	0.01732	156.57	-0.01303	0.01194	548.00
FOEC	<i>e</i>	-0.03813	-0.04120	0.03905	451.00	-0.03527	-0.06488	300.67	0.01899	-0.00188	902.00
	<i>n</i>	0.03320	-0.00423	-0.03103	902.00	-0.02084	0.02935	300.67	0.02338	-0.00422	451.00
	<i>u</i>	-0.01547	-0.06562	0.02040	451.00	0.09934	-0.00507	300.67	0.07750	-0.01200	150.33
GLPS	<i>e</i>	-0.14067	-0.04846	-0.00205	365.33	0.02483	0.00067	274.00	0.00581	-0.00200	1096.00
	<i>n</i>	0.03092	-0.05111	-0.02067	365.33	0.03985	0.04663	274.00	0.02215	-0.01176	548.00
	<i>u</i>	0.00327	-0.04696	-0.06595	365.33	0.08589	0.04061	182.67	0.05495	0.02863	219.20
GUEC	<i>e</i>	0.00719	0.06025	-0.01955	365.33	-0.03487	-0.00302	274.00	-0.00835	-0.01385	548.00
	<i>n</i>	0.02821	0.00799	-0.02210	1096.00	-0.02484	0.01450	548.00	-0.00317	-0.04555	219.20
	<i>u</i>	-0.00895	-0.02013	0.12867	365.33	-0.04173	-0.02586	219.20	0.00962	0.00187	1096.00
GZEC	<i>e</i>	-0.00948	0.05544	-0.02460	365.33	-0.00567	0.01211	1096.00	0.04213	0.05115	137.00
	<i>n</i>	0.02925	0.00217	-0.01354	1096.00	-0.07068	0.00277	137.00	-0.02627	0.00282	365.33
	<i>u</i>	-0.00448	-0.04313	0.11064	365.33	0.01062	0.05036	548.00	-0.04882	0.01726	274.00
LJEC	<i>e</i>	-0.00683	0.04236	-0.06215	365.33	-0.00549	0.00930	1096.00	-0.04166	0.00188	274.00
	<i>n</i>	0.01994	0.00532	-0.02432	1096.00	-0.01303	0.02088	548.00	-0.05958	-0.03953	137.00
	<i>u</i>	0.00429	-0.03716	0.21255	365.33	-0.09010	-0.05030	182.67	-0.01956	-0.03646	274.00
LPEC	<i>e</i>	-0.03783	-0.12723	0.01004	475.00	0.03794	-0.01380	950.00	0.06870	-0.08119	316.67
	<i>n</i>	0.01236	0.01321	-0.04333	950.00	-0.03503	-0.01198	475.00	-0.05667	0.00504	158.33
	<i>u</i>	-0.02007	-0.09408	0.00765	475.00	0.00835	-0.03503	950.00	0.09267	0.00814	316.67
MAEC	<i>e</i>	-0.01717	0.05048	-0.00283	365.33	-0.01843	-0.02215	548.00	-0.04067	-0.01852	274.00
	<i>n</i>	0.03346	0.00031	-0.02922	1096.00	-0.02048	-0.03646	365.33	0.00449	0.01934	548.00

CONTINÚA →

	<i>u</i>	-0.00263	-0.01406	0.12084	365.33	-0.02645	0.00768	548.00	0.07410	0.04188	156.57
NJEC	<i>e</i>	0.00801	0.03393	-0.03491	343.33	-0.00818	0.01189	1030.00	0.04331	-0.00195	114.44
	<i>n</i>	0.02607	0.00278	-0.02200	1030.00	-0.03633	-0.01222	343.33	0.00980	0.01447	515.00
	<i>u</i>	-0.01135	0.08571	0.14301	343.33	-0.03288	-0.03082	515.00	-0.16134	-0.05388	128.75
ONEC	<i>e</i>	-0.16171	-0.25991	-0.23146	527.00	0.09439	0.03269	1054.00	-0.34688	-0.24094	263.50
	<i>n</i>	0.03963	0.00190	-0.05379	1054.00	0.03041	0.06270	263.50	-0.02743	-0.02871	351.33
	<i>u</i>	-0.14521	-0.25011	-0.18017	527.00	0.07717	0.35376	351.33	0.08943	0.00256	1054.00
PDEC	<i>e</i>	-0.01110	0.00192	0.02741	750.00	0.03808	-0.02382	375.00	-0.04520	0.05846	150.00
	<i>n</i>	0.02397	0.00222	-0.03754	750.00	-0.03041	-0.00014	375.00	0.01428	-0.07350	150.00
	<i>u</i>	0.01045	0.01353	0.11763	375.00	-0.02953	-0.01538	750.00	0.14132	0.03402	150.00
PEEC	<i>e</i>	0.04086	0.02010	0.01137	472.00	-0.03752	-0.00915	236.00	-0.02415	0.04964	157.33
	<i>n</i>	0.07170	0.01439	-0.05929	157.33	1.02430	2.53087	2.91	-0.00231	-0.01558	472.00
	<i>u</i>	0.01083	-0.02225	0.04578	472.00	0.01905	-0.05765	236.00	0.18659	-0.06596	67.43
PJEC	<i>e</i>	-0.01997	-0.02850	-0.04970	618.00	0.06097	-0.09262	309.00	0.07237	0.01996	206.00
	<i>n</i>	0.01978	-0.00731	-0.06010	618.00	0.03876	-0.05376	309.00	0.09463	-0.05778	88.29
	<i>u</i>	-0.00207	-0.01509	-0.06655	618.00	0.06991	0.02853	309.00	-0.00009	0.08383	154.50
PREC	<i>e</i>	-0.03569	-0.04277	-0.03203	548.00	0.00907	0.01564	1096.00	0.05317	0.00856	365.33
	<i>n</i>	0.03978	-0.00214	-0.02862	1096.00	-0.01261	-0.04587	365.33	0.01195	0.02234	548.00
	<i>u</i>	-0.00378	-0.01826	0.12785	365.33	-0.07377	-0.02169	182.67	-0.02684	-0.03133	274.00
PTEC	<i>e</i>	-0.00349	0.01821	-0.03737	384.00	-0.05707	0.05305	192.00	-0.85510	-1.13866	2.78
	<i>n</i>	0.07459	0.04130	0.00811	192.00	0.09809	-0.12593	34.91	-0.21788	-0.12231	21.33
	<i>u</i>	-0.00868	-0.00182	0.15811	384.00	-0.04407	-0.06430	192.00	0.34463	-0.99117	8.93
PVEC	<i>e</i>	0.07282	-0.22293	0.29783	41.00	0.62848	0.32512	20.50	-1.04990	0.24036	11.71
	<i>n</i>	0.05913	7.03493	4.83071	2.93	-4.39129	-3.45973	3.57	0.02212	0.23329	82.00

CONTINÚA →

	<i>u</i>	-0.13325	-0.68931	6.02014	3.04	-0.44124	-0.01690	41.00	0.78998	-0.12455	20.50
QVEC	<i>e</i>	-0.13242	-0.04803	-0.22855	608.00	0.15846	-0.15549	304.00	0.01331	0.20728	152.00
	<i>n</i>	0.11903	0.01507	0.11877	608.00	-0.08963	0.03421	304.00	-0.06568	0.16879	101.33
	<i>u</i>	-0.03224	0.14187	-0.02740	304.00	-0.04557	-0.03255	608.00	0.15781	0.07238	152.00
RIOP	<i>e</i>	-0.03315	-0.04939	-0.03740	537.00	0.01180	0.02387	1074.00	0.05283	0.03530	358.00
	<i>n</i>	0.05605	-0.00798	-0.03296	1074.00	0.02002	0.03470	537.00	-0.00511	-0.05293	358.00
	<i>u</i>	-0.00983	-0.04950	0.13226	358.00	0.01280	0.00182	1074.00	0.05115	0.06408	153.43
SEEC	<i>e</i>	0.00210	-0.02306	0.05679	444.00	-0.04740	-0.06615	296.00	0.01660	0.01792	888.00
	<i>n</i>	0.02437	-0.00067	-0.04391	888.00	-0.06965	0.04060	80.73	0.02095	-0.03373	148.00
	<i>u</i>	-0.00843	-0.06740	0.03342	444.00	0.09069	-0.03667	296.00	0.07180	-0.00847	148.00
SIEC	<i>e</i>	-0.00376	0.04994	-0.00900	365.33	-0.00537	0.00705	1096.00	-0.03048	-0.00006	274.00
	<i>n</i>	0.02349	0.00650	-0.02692	1096.00	-0.01817	-0.02598	365.33	-0.01179	0.01361	548.00
	<i>u</i>	-0.00494	-0.03978	0.09711	365.33	0.07002	0.00941	156.57	0.00953	-0.00221	1096.00

Tras la evaluación de la velocidad no lineal en la ecuación obtenida, se determinó que para el día de ejemplo: 20 de junio de 2016 con día juliano 2457561, las velocidades son las evidenciadas en la Tabla 17.

Tabla 17

Velocidades para el día 20 de junio de 2016

		Día 20 de junio de 2016	Día Juliano observado:	2457560
ESTACIÓN	COMPONENTE	Día Juliano inicial	Ni	Velocidad [mm/día]
ALEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.091
	<i>n</i>	2457024	537	0.077
	<i>u</i>	2457024	537	-0.127
BHEC	<i>e</i>	2457103	458	-0.147
	<i>n</i>	2457103	458	-0.008
	<i>u</i>	2457103	458	-0.190
CHEC	<i>e</i>	2457024	537	0.157
	<i>n</i>	2457024	537	-0.120
	<i>u</i>	2457024	537	-0.070
CLEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.046
	<i>n</i>	2457024	537	0.060
	<i>u</i>	2457024	537	-0.152
CUEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.107
	<i>n</i>	2457024	537	0.064
	<i>u</i>	2457024	537	-0.075
CXEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.374
	<i>n</i>	2457024	537	0.160
	<i>u</i>	2457024	537	-0.037
ECEC	<i>e</i>	2457024	537	-1.174
	<i>n</i>	2457024	537	0.290
	<i>u</i>	2457024	537	-0.267
EPEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.488
	<i>n</i>	2457024	537	0.084
	<i>u</i>	2457024	537	-0.080

CONTINÚA →

FOEC	<i>e</i>	2457025	536	-0.177
	<i>n</i>	2457025	536	0.057
	<i>u</i>	2457025	536	-0.120
GLPS	<i>e</i>	2457025	536	-0.074
	<i>n</i>	2457025	536	0.157
	<i>u</i>	2457025	536	0.096
GUEC	<i>e</i>	2457025	536	-0.092
	<i>n</i>	2457025	536	0.017
	<i>u</i>	2457025	536	0.023
GZEC	<i>e</i>	2457024	537	0.007
	<i>n</i>	2457024	537	-0.007
	<i>u</i>	2457024	537	-0.009
LJEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.072
	<i>n</i>	2457024	537	-0.065
	<i>u</i>	2457024	537	-0.130
LPEC	<i>e</i>	2457025	536	-0.274
	<i>n</i>	2457025	536	0.007
	<i>u</i>	2457025	536	-0.137
MAEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.131
	<i>n</i>	2457024	537	0.069
	<i>u</i>	2457024	537	-0.122
NJEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.044
	<i>n</i>	2457024	537	0.055
	<i>u</i>	2457024	537	-0.087
ONEC	<i>e</i>	2457025	536	-0.775
	<i>n</i>	2457025	536	0.074
	<i>u</i>	2457025	536	-0.483
PDEC	<i>e</i>	2457026	535	0.057
	<i>n</i>	2457026	535	-0.029
	<i>u</i>	2457026	535	-0.177
PEEC	<i>e</i>	2457025	536	0.052
	<i>n</i>	2457025	536	1.639
	<i>u</i>	2457025	536	0.173
PJEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.217

CONTINÚA →

	<i>n</i>	2457024	537	0.025
	<i>u</i>	2457024	537	-0.051
PREC	<i>e</i>	2457024	537	-0.146
	<i>n</i>	2457024	537	0.079
	<i>u</i>	2457024	537	-0.120
PTEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.924
	<i>n</i>	2457024	537	0.111
	<i>u</i>	2457024	537	0.790
PVEC	<i>e</i>	2457415	146	1.586
	<i>n</i>	2457415	146	3.168
	<i>u</i>	2457415	146	-2.364
QVEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.430
	<i>n</i>	2457024	537	0.094
	<i>u</i>	2457024	537	-0.240
RIOP	<i>e</i>	2457046	515	-0.167
	<i>n</i>	2457046	515	0.121
	<i>u</i>	2457046	515	-0.109
SEEC	<i>e</i>	2457024	537	-0.140
	<i>n</i>	2457024	537	0.033
	<i>u</i>	2457024	537	-0.112
SIEC	<i>e</i>	2457025	536	-0.075
	<i>n</i>	2457025	536	0.032
	<i>u</i>	2457025	536	-0.062

4.2. Discusión

4.2.1. Discusión sobre resultados

El análisis de las series temporales permitió identificar que para las 27 estaciones de estudio conformadas por 25 de la REGME y 2 del IGS, se obtienen diferentes periodicidades. Para la componente *e* se observa que no predomina una periodicidad estacional específica, en el caso de

la componente n se aprecia que predomina una periodicidad estacional de 3 años y que en la componente vertical u se identifica un comportamiento periódico estacional de 1 año.

Dichos resultados fueron comparados con el estudio realizado por Luna (2017) en su tesis doctoral “Contribución a la definición de un modelo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador a partir de datos GNSS” donde identifica que no existe una periodicidad estacional predominante para las componentes horizontales (e y n) y si una periodicidad estacional anual para la componente vertical (u).

Bajo esta afirmación se puede decir que los resultados coinciden con los comportamientos de las series temporales obtenidas en este estudio para las componentes e y u en el periodo de estudio realizado por Luna (2008-2014), mientras que difiere para la componente n .

Uno de los motivos por los cuales los resultados difieren con Luna (2017) es debido al periodo de estudio de las series temporales, en el caso de Luna fueron de 6 años y en este estudio de 3, y al número de observaciones disponibles para dichos periodos que influyen en las frecuencias y periodos fundamentales calculados.

4.2.2. Discusión sobre la hipótesis

Se obtuvieron ecuaciones para las velocidades no lineales a partir del modelamiento de la estacionalidad para cada componente de las 27 estaciones de estudio conformadas por 25 de la REGME y 2 del IGS, de las que se puede evaluar para un día específico y obtener la velocidad en ese punto. Cabe recalcar que las velocidades obtenidas dependen del ajuste que tengan las curvas al comportamiento real de las estaciones.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se procesaron observaciones diarias para 27 estaciones de estudio, conformadas por 25 de la REGME y 2 del IGS, para un periodo de estudio de 3 años (2015-2017) mediante el software Bernese 5.2 mediante 2 campañas de procesamiento: PPP y Doble Diferencia de Fase. Para 21 estaciones se procesó al menos el 98% de las observaciones disponibles para dicho periodo, seis estaciones del 90% al 98% y solo una estación con el 86.08% influidas por el número total de rastreos realizados en dichos periodos, con precisiones comparadas con las soluciones semanales finales de SIRGAS, cuya mayor diferencia registrada fue de 6.49 mm dentro de las tres componentes (X, Y, Z).

Se analizaron las series temporales obtenidas para un sistema topocéntrico local (e, n, u), eliminando un porcentaje máximo de 4% de las observaciones procesadas identificadas como datos anómalos para 26 estaciones y una estación con un porcentaje de eliminación de 4.2%. En su tendencia se identificó que el 30% de la totalidad de series analizadas presentan estacionariedad y el 70% restante son no estacionarias.

El cálculo de la estacionalidad se lo realizó para tres periodos fundamentales ya que se ajusta de mejor manera al comportamiento de las series, cuya periodicidad estacional varían para cada componente, en la componente e no se observa una periodicidad estacional predominante, para la componente n se observa una periodicidad de tres años y para la componente u se observa una periodicidad de un año.

La extrapolación del modelo para el año 2018 se ajustó para las estaciones CHEC, CXEC, GLPS, GUEC, GZEC, LJEC, NJEC, PREC, RIOP y SIEC cuya amplitud entre las observaciones obtenidas de las soluciones finales semanales de SIRGAS y el modelo generado son menores a 1 cm y concuerdan con la periodicidad obtenida.

Se obtuvo velocidades no lineales para cada serie temporal mediante la derivada del modelo matemático de la estacionalidad obtenida, evaluada para un día específico en el periodo de estudio, con un mejor ajuste para las estaciones ALEC, BHEC, CUEC, CXEC, FOEC, GLPS, GUEC, LJEC, MAEC, NJEC, PJEC, PREC, PTEC, RIOP, SEEC Y SIEC, que no presentaban vacíos considerables ni saltos por el terremoto de abril del 2016

5.2. Recomendaciones

Se propone la creación de una campaña de procesamiento en el software Bernese 5.2 que no sea la predeterminada por el programa, que se parezca o sea provista por cualquiera de los centros de procesamiento de SIRGAS, para poder tener un mejor control de los insumos y resultados generados, que permitan calcular las coordenadas procesadas con mayor similitud a las provistas por estos centros.

Para la corrección de datos anómalos se podría utilizar otros métodos de eliminación para comparar con los obtenidos en este estudio y determinar cuál es el método que provee de un mejor ajuste al modelo de estacionalidad a ser calculado.

Se recomienda realizar un estudio que comprenda un mayor periodo de tiempo para el análisis de series temporales, que genere un modelo estacional más real sobre el comportamiento de la geodinámica terrestre, mejore la estimación del cálculo de las velocidades no lineales obtenidas y a su vez provea de mayor precisión en las extrapolaciones generadas hacia años futuros.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIUB. (2018). *CODE*. Recuperado el 20 de Julio de 2018, de Servidor FTP Anónimo del AIUB: <http://ftp.aiub.unibe.ch/>
- Altamimi, Z., Collilieux, X., & Métivier, L. (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 457-473. Recuperado el 15 de Julio de 2018, de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00190-011-0444-4.pdf>
- Amiri-Simkooei, A. R., Tiberius, C. J., & Teunissen, P. G. (2007). Assessment of noise in GPS coordinate time series: Methodology and results. *Journal of Geophysical Research*, 1-19. Recuperado el 23 de Septiembre de 2018, de <https://pdfs.semanticscholar.org/e27f/fc91d6f06f92c1d9fe2e78567ff252ee22f8.pdf>
- Bernese UNIBE. (Junio de 2018). *Welcome to the website of the Bernese GNSS Software*. Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de Bernese GNSS Software: <http://www.bernese.unibe.ch/>
- Bos, M. S., & Scherneck, H. G. (2018). *Free ocean tide loading provider*. Recuperado el 19 de octubre de 2018, de <http://holt.oso.chalmers.se/loading/index.html>
- Boucher, C., & Altamimi, Z. (2001). ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters. *Journal of Geodesy*, 613-619. Recuperado el 14 de Junio de 2018, de http://users.auth.gr/kvek/750-613_BOUCHER-itsr-pz-wgs84.pdf
- Chen, C., & Liu, L. M. (1993). Joint estimation of model parameter and outlier effects in time series. *Journal of the American Statistical Association*, 284-297. Recuperado el 25 de Septiembre de 2018, de https://www.uv.es/fferri/Nueva_carpeta/Econometria/Practica_11.PDF

- Colombo, O. L. (1984). *The global mapping of gravity with two satellites*. Comisión Geodésica Holandesa. Recuperado el 23 de Agosto de 2018, de <https://www.ncgeo.nl/downloads/28Colombo.pdf>
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Berna: Instituto Astronómico de la Universidad de Berna. Recuperado el 23 de Agosto de 2018, de <http://ftp.aiub.unibe.ch/BERN52/DOCU/DOCU52.pdf>
- Drewes, H. (3 de Agosto de 2017). *Differential coordinate changes (velocities) vs. coordinate differences (epoch coordinates) for realising the time dependency of the ITRF*. Recuperado el 2 de Abril de 2018, de SIRGAS: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/2017_Drewes_Differential_coordinate_changes_vs_coordinate_differences_for_ITRF_IAG_Kobe.pdf
- Federal Agency for Cartography and Geodesy. (2013). *The International Terrestrial Reference System (ITRS)*. Recuperado el 13 de Junio de 2018, de International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS): <https://www.iers.org/IERS/EN/Science/ITRS/ITRS.html>
- Furones, Á. M. (2011). *Sistema y Marco de Referencia Terrestre. Sistemas de coordenadas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado el 03 de Junio de 2018, de <http://www.upv.es/unigeo/index/docencia/etsigct/astrologia/teoria/astrologiaT2.pdf>
- García, D. (2008). *Sistema GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid. Recuperado el 03 de Junio de 2018, de <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080125DavidGarcia.pdf>
- García, L. (2015). *Análisis de Series Temporales en Estaciones Permanentes GPS. Tesis Doctoral*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Recuperado el 23 de Agosto de 2018, de <https://eprints.ucm.es/37138/1/T37001.pdf>
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2013). *Fundamentals of physics*. Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons. Recuperado el 29 de Julio de 2018, de

<http://people.unica.it/vincenzofiorentini/files/2012/04/Halliday-Fundamentals-of-Physics-Extended-9th-HQ.pdf>

Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1985). *Geodesia Física*. Madrid: Instituto Geográfico Nacional.

Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systemns: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.

Instituto Geográfico Militar. (Noviembre de 2016). *Actualización preliminar Marco Referencia Geocéntrico Ecuador Posterior al Terremoto de Pedernales 16 de Abril 2016 - Mw 7.8*. Recuperado el 03 de Abril de 2018, de SIRGAS: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol21/29_Cisneros_2016_Rep_Ecuador.pdf

Instituto Geográfico Militar. (2018). *Visor de la Red GNSS del Ecuador*. Recuperado el 23 de Marzo de 2018, de Geoportal: http://www.geoportaligm.gob.ec/visor_regme/

Instituto Nacional de Estadística y Geografía . (2012). *Procesamiento de Datos GPS Considerando Deformaciones del Marco Geodésico en el Tiempo*. Mexico: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 26 de Septiembre de 2018, de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825295561.pdf

Instituto Oceanográfico Armada del Ecuador. (2005). *Derrotero de la costa continental e insular del Ecuador*. Guayaquil: INOCAR. Recuperado el 18 de Mayo de 2018, de https://www.inocar.mil.ec/boletin/ALN/Derrotero_2005.pdf

International Association of Oil & Gas Producers. (2018). *Geomatics Guidance Note 7, part 2 Coordinate Conversions & Transformations including Formulas*. IOGP Publications. Recuperado el 01 de Noviembre de 2018, de <http://www.epsg.org/Portals/0/373-07-2.pdf?ver=2018-10-12-153840-577>

International GNSS Service. (2018). *Acerca de*. Recuperado el 27 de Agosto de 2018, de Red IGS: <http://www.igs.org/network>

- Lomb, N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and space science*, 447-462. Recuperado el 12 de Junio de 2018, de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00648343>
- López, E. (2011). *Análisis de regresión lineal para correlacionar datos del valor b en catálogos de sismicidad, obtenidos con dos técnicas. Tesis Pregrado*. Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León. Recuperado el 26 de Septiembre de 2018, de <http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/ernesto.pdf>
- Luna, M. (2017). *Contribución a la definición de un modelo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador a partir de datos GNSS (Tesis Doctoral)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de http://oa.upm.es/48790/1/MARCO_LUNA_LUDENA_01.pdf
- Manandhar, D. (2018). *Introduction to Global Navigation Satellite System (GNSS)*. Tokyo: Universitu of Tokyo. Recuperado el 15 de Septiembre de 2018, de http://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/ait-gnss/09_M1.pdf
- Mao, A., Harrison, C., & Dixon, T. (1999). Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research*, 2797-2816. Recuperado el 26 de Noviembre de 2018, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/1998JB900033>
- Mateo, M. L. (2011). *Determinación precisa de velocidades en las estaciones GNSS de medición continua de América Latina (Red Sirgas) (Tesis Doctoral)*. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo. Recuperado el 03 de Abril de 2018, de http://www.fundaciongarciasineriz.es/images/pdf/XVIIIconvocatoria/xviii_mateo_mariala_ura.pdf
- Moirano, J. F. (2000). *Materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional en Argentina mediante observaciones GPS (Tesis Doctoral)*. La Plata: Universidad Nacional de la Plata. Recuperado el 14 de Junio de 2018, de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1998/Documento_completo.pdf?sequence=13

- Moritz, H. (2000). Geodetic Reference System 1980. *Journal of Geodesy*, 128-162. Recuperado el 24 de Julio de 2018, de <ftp://athena.fsv.cvut.cz/ZFG/grs80-Moritz.pdf>
- Moya, J., Bastos, S., & Rivas, M. (2014). Cálculo, mediante la aplicación del algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados, de los componentes de velocidad para estaciones GNSS continuas. *Uniciencia*, 1-14. Recuperado el 03 de Abril de 2018
- Muglisa, J., & Pillajo, M. (2017). *Estudio de la variabilidad ionosférica mediante el análisis de series temporales obtenidas a partir de datos GNSS*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado el 20 de Junio de 2018, de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13146/1/T-ESPE-057261.pdf>
- Nickolaidis, R. (2002). *Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System*. San Diego: Universidad de California. Recuperado el 25 de Septiembre de 2018, de <http://sopac.ucsd.edu/input/processing/pubs/nikoThesis.pdf>
- Pallejá, E. (1999). *Sistemas Geodésicos*. Comité Nacional de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional. Recuperado el 12 de Junio de 2018, de <http://www.ign.gov.ar/images/cnuggi/SistemasGeodesicos.pdf>
- Parra, H. (2016). *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito (Tesis Doctoral)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 10 de Abril de 2018, de http://oa.upm.es/39353/1/HUMBERTO_PARRA_CARDENAS_V-2.pdf
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. New York: Cambridge University Press. Recuperado el 23 de Octubre de 2018, de https://e-maxx.ru/bookz/files/numerical_recipes.pdf
- Rosado, B., Fernández, A., Jiménez, A., & Berrocoso, M. (2017). Modelo de deformación horizontal GPS de la región sur de la Península Ibérica y norte de África (SPINA). *Boletín Geológico y Minero*, 141-156. Recuperado el 2 de Abril de 2018, de http://www.igme.es/boletin/2017/128_1/BGM_128-1_Art-8.pdf

Ruiz, L. (2015). *Determinación de dirección y velocidades de desplazamiento de la REGME con procesamiento de datos GPS del año 2013 (Tesis de pregrado)*. Loja: Universidad Técnica Particular de Loja. Recuperado el 03 de Abril de 2018, de <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/13359/1/RUIZ%20INAGUAZO%20LUIS%20AGUSTIN.pdf>

Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. *The Astrophysical Journal*, 835-853. Recuperado el 15 de Octubre de 2018, de <http://adsabs.harvard.edu/full/1982ApJ...263..835S>

Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. (2017). *Guía para los Centros de Análisis SIRGAS*. SIRGAS. Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Guias/2017_03_Guia_para_los_Centros_de_Analisis_SIRGAS_V2_2.pdf

Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. (2018). *Red SIRGAS-CON*. Recuperado el 14 de Junio de 2018, de SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas: <http://www.sirgas.org/es/>

UNAVCO. (2014). *Teqc Tutorial, Basics of Teqc use and Teqc products*. Colorado: UNAVCO Inc. Recuperado el 28 de Junio de 2018, de https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf

UNAVCO. (2018). *Trimble runpkr00 v5.40 Latest Version (Mac OSX 10.7, Windows XP -> 7, linux, Solaris)*. Recuperado el 28 de Junio de 2018, de Multiple Categories: <https://kb.unavco.org/kb/article/trimble-runpkr00-v5-40-latest-version-mac-osx-10-7-windows-xp-7-linux-solaris-744.html>

Zambrano, M. J., Romero, R., & Tierra, A. (2015). Transformación Bidimensional entre PSAD56 e ITRF08 usando métodos de Helmert y Molodensky. *ResearchGate*. Recuperado el 04 de Junio de 2018, de https://www.researchgate.net/publication/280319026_Transformacion_Bidimensional_entre_PSAD56_e_ITRF08_usando_metodos_de_Helmert_y_Molodensky