

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
ESCUELA DE TOPOGRAFÍA, CATASTRO Y GEODESIA**

**ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE UN  
PROCESAMIENTO GNSS CON MODALIDAD PPP EN LÍNEA PARA  
LA ESTIMACIÓN DE UN MODELO CINEMÁTICO DE  
VELOCIDADES EN LA PLACA TECTÓNICA CARIBE**

**Modalidad: Proyecto de Graduación**

Trabajo sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Topográfica y Geodésica

**Ing. Pedro Pérez Cárdenas**

**CAMPUS OMAR DENGO  
HEREDIA, COSTA RICA  
SEPTIEMBRE, 2018**



Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados  
Centro de Documentación e Información  
UEN Investigación y Desarrollo

**BOLETA DE AUTORIZACIÓN DEL AUTOR PARA PUBLICAR  
INFORMACIÓN**

Yo, Pedro Pérez Cárdenas

No. Cédula 1-1276-0274

Dependencia UEN Programación y Control - Topografía

Autorizo al Centro de Documentación e Información para incluir y publicar en el sitio Web y la intranet del AyA la siguiente información:


\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Autor(es): Pedro Pérez Cárdenas

Título: Análisis y resultados obtenidos de un procesamiento GNSS con modalidad PPP en línea para la estimación de un modelo cinemático de velocidades en la placa tectónica Caribe.

E-mail: pedro.percar@hotmail.com  
peperez@aya.go.cr

No. Teléfono: 8773-1766

Firma: 



Este trabajo fue \_\_\_\_\_ por el Tribunal Examinador de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Topografía y Geodesia.

---

Lic. Gabriela Cordero Gamboa

---

Lic. Franklin Arroyo Solano  
Director ETCG

---

PhD. Jorge Moya Zamora  
Tutor

---

Lic. José Francisco Valverde Calderón  
Asesor

---

MSc. Efraín Menjívar Pérez  
Asesor

---

Ing. Pedro Pérez Cárdenas  
Graduando

## **Dedicatoria**

*Dedico este trabajo a Dios Todopoderoso.  
¿A quién iré si no es a Él?*

## **Reconocimientos**

Quiero reconocer el esfuerzo de mis padres Ana Cárdenas y Adolfo Pérez, los cuales han sido ejemplo para no desfallecer ni rendirme ante nada. Personalmente creo que “La preeminencia del amor” siempre será su insignia.

Reconozco de manera especial a mi tutor: Jorge Moya Zamora. Sin su persona, este trabajo no se hubiera desarrollado. Sus motivaciones y enseñanzas lo convierten en una persona, un profesor y un geodesta excepcional.

Hablando de geodestas... reconozco a uno de los mejores: Fran Valverde. Sin sus consejos, su experiencia y su arsenal bibliográfico, nada de este trabajo tendría sentido. He aquí un ejemplo de los mejores profesores que existen.

Agradezco la ayuda del lector Efrain Menjivar, quien accedió, automáticamente, a brindar ayuda durante la ejecución de este trabajo. Su persona es un ejemplo que seguir. Gracias.

Guardo un gran aprecio a la Universidad Nacional. Gracias a ésta entendí la verdadera educación. La misma incluye humildad, esperanza y paciencia.

*“Inteligencia y carácter, es la meta de la verdadera educación” - Martin Luther King.*

Agradezco a todas las personas que estuvieron durante esta etapa. Amigos y detractores. Gracias a todos esos momentos de felicidades y tristezas, de elogios y burlas, de valentías y miedos... Todo esto se convirtió en mi combustible de vida.

Raquel Villalobos: sus palabras de sabiduría la han convertido en mi ángel personal.

**Gracias ETCG...**

# Índice de contenidos

<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Antecedentes .....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos .....	6
1.4.1 Objetivo General .....	6
1.4.2 Objetivos Específicos .....	6
<b>Capítulo 2: Marco Teórico</b> .....	<b>7</b>
2.1 Sistemas de Referencia .....	7
2.1.1 Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) .....	7
2.1.2 Consorcio Universitario de NAVSTAR (UNAVCO) .....	9
2.2 Procesamiento de estaciones GNSS.....	10
2.2.1 Procesamiento científico .....	11
2.2.2 Procesamiento Puntual Preciso (PPP) .....	12
2.3 Series temporales .....	15
2.3.1 Evaluación de series temporales.....	16
2.3.2 Análisis preliminar de las series temporales .....	18
2.4 Criterios estadísticos .....	18
2.4.1 Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov .....	19
2.4.2 Pruebas para la detección de valores atípicos.....	20
2.5 Modelos cinemáticos para las estaciones GNSS.....	21
2.6 Modelos de movimiento de las placas tectónicas .....	22
2.6.1 Modelos geofísicos .....	24
2.6.2 Modelos geodésicos.....	28
2.7 Estimación de velocidades para una estación GNSS .....	30
2.8 Estimación del vector de rotación o polo de Euler .....	32
<b>Capítulo 3: Metodología</b> .....	<b>35</b>
3.1 Red de estaciones considerada .....	35
3.2 Período de procesamiento .....	40
3.2.1 Descarga de datos .....	40
3.3 Estrategia de procesamiento.....	42
3.3.1. Extracción de las coordenadas GAPS .....	44
3.4 Evaluación estadística de coordenadas GAPS .....	46
3.5 Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov .....	47
3.6 Programación de rutina para la detección de valores atípicos .....	48
3.7 Depuración de coordenadas .....	50
3.8 Programación de la rutina para la estimación de velocidades.....	50
3.9 Programación de la rutina para el cálculo del polo de Euler.....	53
<b>Capítulo 4: Resultados</b> .....	<b>56</b>
4.1 Coordenadas resultado de procesamiento GAPS .....	56
4.2 Evaluación estadística de las coordenadas GAPS.....	57

4.2.1 Resultados de la prueba Kolmogorov Smirnov .....	57
4.2.2 Valores atípicos detectados .....	59
4.2.3 Depuración del vector de coordenadas .....	63
4.3 Estimación de posición y velocidades para cada estación .....	63
4.3.1 Comparación de coordenadas frente a SIRGAS y UNAVCO .....	68
4.3.2 Comparación de velocidades frente a SIRGAS y UNAVCO .....	71
4.3.3 Series temporales de las estaciones .....	73
4.4 Cálculo del polo de Euler para la placa Caribe .....	74
4.4.1 Velocidades de las estaciones respecto a su polo de rotación .....	76
4.5 Modelo cinemático CaribePPC .....	78
4.5.1 Comparación y validación de CaribePPC .....	78
<b>Capítulo 5: Análisis de resultados .....</b>	<b>81</b>
<b>Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>86</b>
6.1 Conclusiones .....	86
6.2 Recomendaciones.....	87
<b>Fuentes de consulta.....</b>	<b>91</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>96</b>

## Índice de cuadros

Cuadro 2.1: Correcciones realizadas por los servicios PPP.....	12
Cuadro 2.2: Distribuciones estadísticas para la prueba Kolmogorov-Smirnov .....	20
Cuadro 2.3: Símbolos usados en el cálculo de polos de rotación .....	22
Cuadro 2.4: Vectores de rotación Euler según el modelo tectónico NUVEL-1A .....	25
Cuadro 2.5: Vectores de rotación del modelo VEMOS15.....	28
Cuadro 2.6: Vectores de rotación incluidos en el modelo APKIM2005 .....	30
Cuadro 3.1: Ubicación de estaciones GNSS consideradas .....	37
Cuadro 3.2: Número DOMES y coordenadas aproximadas de estaciones SIRGAS.....	38
Cuadro 3.3: Coordenadas aproximadas de las estaciones UNAVCO .....	38
Cuadro 3.4: Sintaxis de comandos GAPS para el procesamiento de datos .....	42
Cuadro 3.5: Ejemplo del producto final de procesamiento GAPS .....	46
Cuadro 3.6: Cálculo de $C\alpha$ y $K(n)$ según distribución estadística .....	48
Cuadro 3.7: Archivo utilizado para calcular el polo de rotación .....	54
Cuadro 4.1: Archivos crudos versus archivos procesados.....	57
Cuadro 4.2: Coordenadas GAPS y su grado de distribución normal.....	58
Cuadro 4.3: Días GPS detectados por la rutina Cha-Gru. Período 2013 .....	60
Cuadro 4.4: Días GPS detectados por la rutina Cha-Gru. Período 2014 .....	61
Cuadro 4.5: Días GPS detectados por la rutina Cha-Gru. Período 2015 .....	62
Cuadro 4.6: Coordenadas resultado de VelXYZ. Épocas 2013.0(S) y 2016.92(U) .....	64
Cuadro 4.7: Velocidades resultado de VelXYZ. Épocas 2013.0(S) y 2016.92(U) .....	64
Cuadro 4.8: Dirección de movimiento según velocidades VelXYZ .....	66
Cuadro 4.9: Coordenadas resultado de VelXYZ usando posiciones GAPS.....	67
Cuadro 4.10: Diferencias entre posiciones GAPS y coordenadas depuradas.....	67
Cuadro 4.11: Velocidades resultado de VelXYZ usando posiciones GAPS .....	67
Cuadro 4.12: Diferencias de velocidad - posiciones GAPS y coordenadas depuradas .....	67
Cuadro 4.13: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Posición X.....	69
Cuadro 4.14: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Posición Y.....	70
Cuadro 4.15: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Posición Z .....	70
Cuadro 4.16: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Velocidad $V_x$ .....	72
Cuadro 4.17: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Velocidad $V_y$ .....	72
Cuadro 4.18: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Velocidad $V_z$ .....	73
Cuadro 4.19: Resultados de EulerPPC y su validación frente a EPC.....	75
Cuadro 4.20: Contraste estadístico de resultados EPC y EulerPPC .....	75
Cuadro 4.21: Velocidades geocéntricas de rotación resultado de EulerPPC.....	77
Cuadro 4.22: Vector de rotación para las estaciones seleccionadas .....	77
Cuadro 4.23: PoloEuler de placa Caribe según modelos tectónicos.....	79
Cuadro 4.24: Diferencias en vector Euler CaribePPC frente a modelos tectónicos .....	79
Cuadro 4.25: Datos para utilización de CaribePPC.....	80
Cuadro 4.26: Velocidades rotacionales resultado de utilización CaribePPC .....	80

## Índice de figuras

Figura 2.1: Distribución de la red SIRGAS-CON al 25 de febrero de 2018 .....	8
Figura 2.2: Series de tiempo de la estación ETCG entre 2003-2018.....	16
Figura 2.3: Rotación relativa de dos placas litosféricas con respecto a un eje .....	24
Figura 2.4: Límites tectónicos definidos por el modelo NUVEL-1A.....	25
Figura 2.5: Velocidades y placas tectónicas de MORVEL y NNR-MORVEL56.....	27
Figura 2.6: Vectores de velocidad para placa Caribe según VEMOS15 .....	29
Figura 3.1: Sistema para la descarga/recuperación de archivos UNAVCO .....	36
Figura 3.2: Interfaz del software FTP FileZilla .....	36
Figura 3.3: Red de estaciones SIRGAS .....	39
Figura 3.4: Red de estaciones SIRGAS-UNAVCO.....	39
Figura 3.5: Red de estaciones SIRGAS-UNAVCO.....	40
Figura 3.6: Script para la descarga de archivos .....	41
Figura 3.7: Comando GAPS recomendado por la Universidad de New Brunswick .....	43
Figura 3.8: Interfaz gráfica de Extract Data & Text From Multiple Text Files .....	45
Figura 3.9: Entrada de información a Cha-Gru, para la detección de datos atípicos.....	49
Figura 3.10: Entrada de datos VelXYZ para la estimación de velocidades .....	52
Figura 3.11: Salida de datos de VelXYZ.....	52
Figura 3.12: Serie de tiempo de estación BGGY, producto de VelXYZ.....	53
Figura 4.1: Histograma coordenada X para la estación SCUB.....	59
Figura 4.2: Serie de tiempo para la estación CN20 (coordenada X, época 2013.0) .....	66
Figura 4.3: Serie de tiempo para la estación SCUB (coordenada X, época 2013.0) .....	66
Figura 4.4: Serie de tiempo para la estación ETCG resultado de VelXYZ.....	74
Figura 4.5: Serie de tiempo SIRGAS para la estación ETCG .....	74
Figura 4.6: Mapeo del polo de Euler y sus estaciones - producto de EulerPPC.....	75
Figura 4.7: Mapeo del polo de Euler para el modelo CaribePPC.....	76
Figura 4.8: Representación de los vectores de rotación según EPC .....	78

## Índice de anexos

Anexo 1: Series temporales resultado de la rutina VelXYZ.....	96
---	----

## Lista de acrónimos

APKIM:	Actual Plate Kinematic Model Modelo Cinemático de Placas Actual
CNPDG:	Centro Nacional de Procesamiento de Datos GPS
CODE:	Centro de Determinación de Órbitas de Europa
COCONet:	Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network Red Observacional GPS de Operación Continua Para el Caribe
CIRES:	Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences Instituto de Cooperación para la Investigación de Ciencias Ambientales
CSRS:	Canadian Spatial Reference System Sistema de Referencia Espacial Canadiense
ECEF:	Earth Centered, Earth Fixed Coordenadas Tridimensionales Centradas en la Tierra
EPC:	Euler Pole Calculator Calculador de polos de Euler
ETCG:	Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia
FTP:	File Transfer Protocol Protocolo de Transferencia de Archivos
GAGE:	Geodesy Advancing Geosciences and EarthScope Promotores de la Geodesia, las Geociencias y EarthScope
GAPS:	GPS Analysis and Positioning Software Software de Posicionamiento y Análisis GPS
GIPSY:	Inferred Positioning System and Orbit Analysis Sistema de Posicionamiento Inferido y Análisis de Órbitas
GNSS:	Global Navigation Satellite System Sistema Global de Navegación por Satélite
GPS:	Global Positioning System Sistema de Posicionamiento Global

GSD:	Geodetic Survey Division Canada Departamento de Mediciones geodésicas de Canadá
IGN:	Institut Géographique International de France Instituto Geográfico Internacional de Francia
IGS:	International GNSS Service Servicio Internacional GNSS
IAG:	International Association of Geodesy Asociación Internacional de Geodesia
ITRF:	International Terrestrial Reference Frame Marco de Referencia Terrestre Internacional
ITRS:	International Terrestrial Reference System Sistema Terrestre de Referencia Internacional }
JPL:	Jet Propulsion Laboratory Laboratorio de Propulsión a Chorro
MIT:	Massachusetts Institute of Technology Instituto de Tecnología de Massachusetts
MORVEL:	International Terrestrial Reference System Sistema de Referencia Terrestre Internacional
NAD:	North American Datum Datum Norteamericano
NASA:	National Aeronautics and Space Administration Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
NGS:	Unites States National Geodetic Survey Topografía Geodésica Nacional de los Estados Unidos
NNR:	No Net Rotation Red sin rotación
NRCan:	Natural Resources Canada Recursos Naturales de Canadá
NUVEL:	Northwestern University Velocity Model Modelo de velocidades de University Northwestern
ONU:	Organización de las Naciones Unidas

PBO:	Plate Boundary Observation Observación de límites de placas
PPP:	Precise Point Positioning Posicionamiento de Punto Preciso
RINEX:	Receiver Independent Exchange Format Formato de Intercambio Independiente de Receptor
SIRGAS:	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
SIRGAS-CON:	Red SIRGAS de Observación Continua
TEQC:	Translation, Editing, and Quality Check Traducción, Edición y Control de Calidad
UNB:	University of New Brunswick Universidad de New Brunswick
UPS:	Uninterruptible Power Supply Fuente de poder ininterrumpible
UNAVCO:	University NAVSTAR Consortium Consortio Universitario de NAVSTAR
VEMOS:	Velocity Model for SIRGAS Modelo de Velocidades para SIRGAS
VLBI:	Very Long Baseline Interferometry Interferometría de Bases muy Largas
SLR:	Satellite Laser Ranging Láser satelital de oscilación

## Lista de Variables

Variable	Definición	Unidad
$c$	Velocidad de luz en el vacío	m/s
$D$	Estadístico de contraste	
$d_{mult/\Pi}$	Efecto multitrayecto medido en el pseudorango	m
$d_{mult/\Phi_i}$	Efecto multitrayecto medido en la portadora fase	m
$d_{ion/L_i}$	Atraso ionosférico en la portadora L1 o L2	m
$d_{orb}$	Error por atraso en la órbita del satélite	m
$dt$	Error del reloj en el receptor	s
$dT$	Error del reloj en el satélite	s
$d_{trop}$	Error por atraso en la tropósfera	m
$\varepsilon$	Medición de ruido	m
$f$	Frecuencia	Hz
$F_n$	Estimador de probabilidad para valores menores a $X_i$	
$F_o$	Estimador de probabilidad cuando $H_o$ es cero	
$G_{max}$	Valor máximo estadístico de prueba Grubbs	
$G_{min}$	Valor mínimo estadístico de prueba Grubbs	
$G_{crit}$	Valor crítico de referencia para prueba Grubbs	
$t_{crit}$	Valore crítico de la distribución t-student	
L1	Frecuencia L1	Hz
L2	Frecuencia L2	Hz
L3	Combinación libre de ionósfera	Hz
$N$	Ambigüedad de la fase	ciclos
$\Phi$	Portadora de fase	ciclos
$\lambda$	Longitud de onda	m
$\lambda_p$	Latitud del polo de rotación	°
$\lambda_x$	Latitud del punto sobre la placa tectónica	°
$\Phi_p$	Longitud del polo de rotación	°
$\Phi_x$	Longitud del punto sobre la placa tectónica	°
$P_i$	Pseudo rango medido en $L_i$	m
$X, Y, Z$	Coordenadas geocéntricas cartesianas	m
$v$	Amplitud de la velocidad $V$	m/s
$V$	Velocidad del punto sobre la placa tectónica	m/s
$V_i^P$	Velocidad de rotación $i$ en la placa $p$	
$X_{t0}$	Posición de estación en el tiempo inicial	m
$t_0$	Tiempo inicial	s
$\beta$	Azimut de la velocidad con respecto al norte	°
$R$	Radio de la Tierra	m
$\Omega$	Vector Euler de rotación	
$\rho$	Rango geométrico verdadero	m
$\omega$	Velocidad angular referido al polo de rotación	rad/s

## Resumen

En la actualidad, se precisa conocer con mayor precisión, las causas de diferentes fenómenos naturales. Para tal fin se ha recurrido a disciplinas como la geografía, la geodesia, la geofísica, la geología, entre otras. Para esto, los sistemas de posicionamiento global (GNSS) toman un lugar indispensable y con ello, la administración de sus datos es vital.

Existen metodologías eficientes, pero dependiendo del objeto en estudio, el manejo de datos GNSS debe incluir características especiales (técnicas y económicas) en vías a satisfacer las demandas del proyecto. Para este propósito, los softwares de procesamiento científico GNSS tales como Bernese o GAMIT/GLOBK son utilizados comúnmente. No obstante, el obstáculo monetario y la falta de conocimiento técnico, en ocasiones, convierten estos programas en soluciones un tanto inaccesibles (Ebner y Featherstone, 2008).

Una alternativa a estos softwares son los servicios de Posicionamiento de Punto Preciso (PPP, por sus siglas en inglés), los cuales se caracterizan por ser prácticos, gratuitos y de fácil acceso. Estos servicios han tomado auge en la última década, convirtiéndose en gran alternativa para los sistemas de posicionamiento global. De esta manera, los PPP abren bastas posibilidades para las geociencias, dentro de las cuales se encuentra la cuantificación de los movimientos de la corteza terrestre o la cinemática de placas tectónicas.

El presente proyecto concibió los servicios PPP como una posible alternativa de software GNSS ante el procesamiento científico y/o comercial, comparando los resultados obtenidos frente a entidades tales como SIRGAS y UNAVCO. Específicamente, se recurrió al PPP canadiense denominado *GPS Analysis and Positioning Software*, de la Universidad de New Brunswick (la cual facilitó las licencias del programa respectivo).

Con tal de poner a prueba los servicios PPP en el área de geociencias, se propuso analizar la cinemática de la placa Caribe. Para esto, se seleccionaron estaciones GNSS en la zona con tal de ser sometidas a un procesamiento GNSS (usando el software GAPS). Posteriormente, se procedió a programar tres rutinas en ambiente Matlab, las cuales analizaron el comportamiento estadístico de los resultados GAPS, el cálculo de las velocidades geocéntricas de cada estación y, además, los parámetros Euler para la creación del modelo cinemático resultante, denominado CaribePPC. Los resultados de cada rutina se validaron frente a las entidades mencionadas, concluyendo compatibilización efectiva frente a software científico y modelos cinemáticos existentes. Además, se reconoce que CaribePPC permite utilizar su vector de rotación Euler para calcular la velocidad rotacional de cualquier punto o estación GNSS deseada.

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Introducción

En la actualidad, el manejo de datos GNSS ha tomado un auge significativo en las ciencias del estudio de la Tierra. Este fundamento ha sido aprovechado abiertamente por disciplinas como la geología, la geofísica, la geografía, la geodesia, entre otras. Sin embargo, en la práctica, la utilización y administración de información GNSS, puede convertirse en una tarea laboriosa. En lo que respecta a estudios geofísicos, el uso de observaciones satelitales crudas no es suficiente para obtener posicionamiento preciso debido a que la confiabilidad y precisión de éstos dependen directamente del número de satélites visibles, la geometría satelital, el tiempo de observación, entre otros aspectos (Cai y Gao, 2007).

Existen técnicas, accesorios y herramientas computacionales que brindan confianza a la hora de obtener una posición, pero dependiendo del objeto en estudio, el manejo de datos GNSS debe incluir características especiales con tal de fundar una metodología eficiente, que satisfaga los requerimientos del proyecto (técnicos y económicos). Algunas de estas características no se incluyen en las observaciones satelitales y, por lo tanto, se debe implementar un sistema que las incorpore.

Dentro de este contexto, una administración eficiente de datos GNSS se concreta con el uso de software científico, tales como Bernese o GAMIT/GLOBK, los cuales integran las características mencionadas en el párrafo anterior (MagicGNSS, 2013). No obstante, el impedimento monetario y la falta de conocimiento técnico convierten estos programas en soluciones un tanto inaccesibles (Ebner y Featherstone, 2008). Por otro lado, cuando de post proceso GNSS se trata, los servicios de Posicionamiento de Punto Preciso (PPP, por sus siglas en inglés) son prácticos y de fácil acceso, convirtiéndolos en una solución viable al problema planteado. El PPP es una metodología que obtiene y aplica las órbitas y correcciones de reloj del IGS, con el objetivo de posicionar un receptor satelital cualquiera (Rizos, Janssen, Roberts, y Grinter, 2012). Esta metodología ha sido mejorada al grado que actualmente es posible utilizar software o un protocolo de transferencia de archivos (FTP, por sus siglas en inglés) especializado para enviar cantidades masivas de archivos con diferentes formatos (.zip, .gzip, .gz, .Z, .rar, .14o, .bat, etc.); garantizando así, la productividad de sus usuarios (Natural Resources Canadá, 2015).

Estas características abren bastas posibilidades para las geociencias, dentro de las cuales se encuentra, eventualmente, la cuantificación de los movimientos de la corteza terrestre. Ante esta premisa, es recomendable poner a prueba los servicios PPP bajo el supuesto de que los mismos, pueden convertirse en una solución suficientemente precisa o al menos similar, al instante de modelar la cinemática de una placa tectónica. Basado en esto, se

introduce el presente proyecto haciendo uso de estos servicios, concibiéndolos como una posible alternativa de software GNSS de procesamiento científico y/o comercial. El objetivo primordial de esta iniciativa es determinar un modelo cinemático de velocidades para la placa tectónica Caribe basándose en la estimación obtenida de un servicio PPP y su comparación con los datos derivados de uno científico.

El modelo cinemático se determinó una vez que las estaciones seleccionadas fueron sometidas a un procesamiento PPP para posteriormente, analizar el comportamiento normal de las variables, con el objetivo de detectar valores atípicos. Enseguida se procedió a estimar las velocidades de cada estación mediante un ajuste por mínimos cuadrados (Moya, Bastos, y Rivas, 2014). Una vez en esta etapa, se automatizaron los parámetros de rotación Euler y sus velocidades respectivas con el fin de crear un modelo cinemático denominado CaribePPC. Esto creó un insumo para conocer el movimiento de la placa Caribe y la posibilidad de calcular velocidades rotacionales en cualquier punto, ya sea dentro de la zona de estudio, o fuera de ella.

## 1.2 Antecedentes

Al presente, existen servicios PPP que facilitan el procesamiento de grandes volúmenes de datos GNSS, tanto así que ahora es posible obtener archivos ejecutables, que permiten la modificación de uno o varios criterios de procesamiento (máscara de elevación, desviación estándar para el código de fase, máximo de iteraciones, tipos de correcciones para las órbitas y/o el reloj, etc.). Estos aspectos han sido poco investigados dentro de la actualidad nacional. Dentro de los estudios con mayor cercanía se destaca el realizado por Moya, Bastos, Rivas y Cordero en el 2014, donde se afirma que “La similitud en los valores de velocidad tridimensional entre las dos determinaciones abre la posibilidad de seguir investigando sobre la aplicación PPP en proyectos donde se requiera una exactitud medianamente alta de algunos milímetros. Las diferencias obtenidas en las dos determinaciones varían entre los -5,2 y 2,3 mm/a para la velocidad en el componente X, entre -6,5 y 12,9 mm/a en la coordenada Y entre -6,5 y 7,8 mm/a para la posición Z (Moya, Bastos, Rivas, y Cordero, 2014). Su objetivo primordial fue evaluar el comportamiento de estaciones GNSS procesando dos años continuos de datos y haciendo uso del servicio canadiense CSRS-PPP. El estudio compara la magnitud del desplazamiento y su dirección frente a los datos oficiales de SIRGAS, de donde se concluyen diferencias promedio de -0,8 mm/a en la posición X, 2,2 mm/a en el componente Y, y 1,9 mm/a en la coordenada Z.

Este mismo documento no incluye una serie de aspectos que podrían beneficiar la interpretación geofísica, tales como la programación para el cálculo de velocidades geocéntricas y los parámetros Euler, la experimentación con diferentes servicios PPP y, sobre todo, la valoración de los resultados con referencias más confiables, tales como UNAVCO, SIRGAS, VEMOS15, APKIM2005, entre otros. Además, la investigación de Moya et al. no tomó en cuenta la referencia al polo de Euler respectivo, ni tampoco utiliza algún algoritmo para determinar la distribución normal de los datos de entrada e identificación de datos atípicos. Estos criterios pueden justificar la estimación de velocidades y su grado de compatibilización con datos oficiales, y por ende convertir la presente propuesta en un complemento al estudio mencionado.

Por otra parte, en el ambiente internacional, existen algunos aportes que utilizan la metodología PPP para la obtención de velocidades en varios campos geofísicos. Entre ellos se puede mencionar el de Pérez, Mónico y Chaves en el 2003, el cual describe la obtención de parámetros de rotación y vectores de desplazamiento para la placa suramericana mediante el uso de servicios PPP, y su posterior validación frente a otras fuentes como ITRF2000, NNR-NUVEL-1A y APKIM2005, obteniendo diferencias favorables. Entre las conclusiones del estudio mencionado se rescata la posibilidad de aplicar técnicas PPP en campos donde se requiere un alto nivel de precisión, tales como la estimación de coordenadas de estación y vectores de velocidad, así como para el cálculo del vector de rotación de una placa tectónica (Pérez, Mónico y Chaves, 2003).

### 1.3 Justificación

La Tectónica de Placas integra todos los fenómenos geológicos que se conocen, ya sea la evolución de los continentes, el comportamiento de la flora y la fauna, y el desarrollo de actividad volcánica. Esta noción se basa en el hecho de que la litósfera terrestre está dividida en placas principales, y varias placas secundarias, las cuales se mueven en distintas direcciones con respecto a otras (Lowrie, 2007).

El estudio de estos movimientos es primordial para comprender la actividad sísmica y volcánica, como también para analizar el campo de gravedad terrestre, el relieve y sus modificaciones, la predicción de desastres naturales, el análisis climatológico, el movimiento de las masas oceánicas, entre otros. Cada una de las placas tectónicas aporta información esencial para la investigación científica ya que las mismas flotan sobre la astenosfera, movilizándose constantemente sobre la superficie finita de la Tierra, e influenciando la interacción entre sí a lo largo de sus fronteras o límites, provocando intensas deformaciones en la corteza y litósfera terrestre (Lowrie, 2007).

Basado en lo anterior, es indispensable conocer a ciencia cierta la cinemática de las placas tectónicas. Esto aporta conocimientos importantes para la comprensión de los principales fenómenos terrestres como los indicados anteriormente. Existen métodos típicos para establecer dichos desplazamientos, tal es el caso de los sismógrafos o sismómetros, péndulos, gravímetros, acelerómetros, entre otros. Sin embargo, a pesar de su tecnología actual, estos instrumentos han sido sustituidos y/o complementados por diferentes técnicas de posicionamiento global como VLBI, SLR y GNSS (Lichtenegger y Sunkel, 1987). Dentro del ámbito satelital GNSS, los receptores pueden ser colocados en lugares estratégicos para la obtención de coordenadas muy precisas. Con esta tecnología, es posible analizar la posición de cualquier objeto y su movimiento en un tiempo determinado. No obstante, para comprender el desplazamiento de placas tectónicas, es sustancial obtener posicionamiento espacial preciso, y conocer los factores que le perjudican (Mao, Harrison, y Dixon, 1999).

De esta forma, el uso de datos GNSS en el monitoreo de placas tectónicas es importante para la geodinámica (Lichtenegger y Sunkel, 1987). Sin embargo, la información que arrojan estos sistemas no es completamente adaptable a la cinemática de placas tectónicas, ya que existe gran cantidad de factores que influyen en el posicionamiento preciso de los sistemas GNSS. Algunos de éstos son los modelos de la tropósfera y la ionósfera (incluyendo sus correcciones), modelado de las mareas, correcciones con respecto al centro de masas de la Tierra, utilización de distintos modelos gravimétricos, entre otros. Todos estos y más, no se contemplan en las observaciones GNSS, de tal forma que se demandan programas computacionales científicos para el procesamiento de datos, tales como el

Bernese o GAMIT/GLOBK, que sean capaces de incluir dichos parámetros (Berné, Garrido y Belén, 2014).

En el ambiente computacional, el uso correcto de los programas GNSS de procesamiento científico requiere de inversión humano-económica que comúnmente reduce la investigación geo-científica. Por esta razón, se necesita de una metodología más eficiente, capaz de obtener resultados similares a los ofrecidos por estos programas. Basado en lo anterior, existen técnicas que podrían ser capaces de hacerlo y además incluir algunos factores naturales; por ejemplo, la denominada Posicionamiento de Punto Preciso (PPP) (Ghoddousi y Dare, 2006). La misma se puede concebir como una solución práctica al problema planteado, pues consiste en un servicio que permite a los usuarios enviar datos de observación GNSS a través de Internet, para corregir sus observaciones mediante parámetros y/o modelados similares a los usados por Bernese o GAMIT/GLOBK. En la actualidad, el uso de estos sistemas ha tomado gran importancia en la comunidad, puesto que descartan una inversión significativa (financiera y cognoscitiva) (Ghoddousi y Dare, 2006) (Ebner y Featherstone, 2008). Los requisitos primordiales para la utilización de estos servicios no son complejos, al contrario, los mismos pueden resumirse en dos pasos fundamentales: la obtención de observaciones con el uso de un receptor GNSS, y la incorporación de éstas al servicio PPP para su procesamiento, el cual utiliza órbitas precisas satelitales, parámetros de reloj según el IGS, entre otros (Moore y Neilan, 2005).

Por la ventaja económica y facilidad de uso, conviene poner a prueba los sistemas de procesamiento en línea frente a software científico, en distintas aplicaciones; señalando anticipadamente que estos servicios son menos precisos que los segundos. No obstante, pueden convertirse en una solución alternativa útil cuando los recursos económicos y humanos no están al alcance inmediato (Ebner y Featherstone, 2008). De esta forma, los resultados obtenidos con un método y otro se pueden comparar, reflejando deducciones positivas o negativas para los geo-científicos y, por consiguiente, determinar la exactitud de los servicios PPP al instante de procesar datos GNSS en cualquier aplicación; en el caso pertinente, el modelado cinemático de una placa tectónica.

Por otra parte, la validación del modelo debe compatibilizarse con datos más exactos. Para este fin se necesitan fuentes confiables con las cuales, el modelo propuesto pueda ser comparado. En el caso pertinente, las soluciones SIRGAS se consideraron resultados confiables debido a que sus cálculos se realizaron en software científico. Además, las estaciones de UNAVCO, aportaron información en lugares donde no existían datos de SIRGAS-CON. Estos aspectos permitieron conocer la eficiencia de los resultados PPP al momento de establecer un modelo cinemático cualquiera, mediante el procesamiento de datos crudos GNSS.

La validez del modelo cinemático resultante se basó en la exactitud de sus velocidades, las cuales fueron obtenidas a través de series de tiempo geodésicas. Sin embargo, se ha determinado la influencia de patrones y aspectos importantes que pudieron degradar la señal satelital en períodos continuos largos, debido principalmente a la variación de estaciones climáticas y su relación con la hidrología y la presión atmosférica (Blewitt y Lavallée, 2002). En el estudio realizado por Blewitt y Lavallée (2002), se aportan fundamentos y metodologías fiables con los que se pueden disminuir los aspectos mencionados, además se concluye un tiempo adecuado para la estimación de movimiento tectónico o la producción de marcos de referencia. El tiempo recomendado por este documento, adoptado en la presente, es de al menos 30 meses continuos de señal satelital.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Analizar los resultados obtenidos de un procesamiento PPP en línea con el software GAPS para el establecimiento de un modelo cinemático de velocidades en la placa tectónica Caribe basado en los componentes del polo de Euler y su compatibilización con los datos derivados de un procesamiento científico.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

1. Depurar los valores diarios del vector de coordenadas PPP aplicando el criterio de Chavaunet y/o el test de Grubbs, logrando mayor consistencia en la información y excluyendo los datos atípicos.
2. Determinar, por medio de un ajuste por mínimos cuadrados, los componentes de la velocidad geocéntrica en los puntos de la red como insumo fundamental para la estimación de un modelo de velocidades.
3. Generar un modelo cinemático de velocidades basado en los componentes del Polo de Euler obtenidos de los resultados del procesamiento PPP para una descripción de la cinemática en la zona de estudio.
4. Validar los resultados del modelo propuesto considerando las velocidades conocidas de estaciones GNSS ubicadas en el área de estudio y otros modelos similares, determinando así el grado de confiabilidad del modelo cinemático entre las diferentes fuentes de datos.

## Capítulo 2: Marco Teórico

### 2.1 Sistemas de Referencia

Con la llegada de los sistemas de posicionamiento global, aparece también la necesidad de un sistema de coordenadas con el cual, todos los trabajos sean referenciados. Ante esta necesidad, se recurre a los sistemas de referencia geodésicos y con ellos la posibilidad de tener un mismo sistema mundial. La naturaleza de éstos ha hecho que su importancia aumente, no solo en el ámbito topográfico y cartográfico, sino también en el ámbito científico en áreas como el movimiento de placas tectónicas, el análisis de deformaciones, el control de infraestructura, los modelos de velocidades, entre otros. Basado en lo anterior, es recomendable vincular los proyectos geoespaciales a un sistema de referencia global y por ende actualizar los datos y/o parámetros respectivos (Kavalevsky, Mueller, y Kolaczek, 1989).

El Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas fue el insumo principal durante la ejecución de este proyecto complementándose, además, con la red de estaciones GNSS de UNAVCO. Ambos facilitaron el proceso de validación y comparación del modelo cinemático resultante. A continuación, se incluye descripción de estos.

#### 2.1.1 Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS)

La elaboración del modelo cinemático establecido en este proyecto debió validarse y compararse frente a varios sistemas confiables tales como SIRGAS, estableciendo su nivel de cercanía frente a las coordenadas y velocidades en las soluciones semanales de SIRGAS según la época establecida en este el presente trabajo (ver apartado 4.3.1). Los datos de SIRGAS provienen de software especializado, los cuales permiten tener la exactitud necesaria para verificar el procesamiento propuesto en este proyecto. Por esta razón, se profundizó en los principales conceptos y metodologías de esta organización.

SIRGAS fue establecido en el año 1993, en Asunción de Paraguay con el fin de definir un sistema de referencia geocéntrico para las Américas. El inicio de sus labores se remonta a la primera conferencia convocada y patrocinada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG, por sus siglas en inglés), el Instituto Panamericano de Geografía e Historia y la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de Estados Unidos. A partir de aquí, y tras la recomendación de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (SIRGAS, 2015), se empezaría a adoptar el sistema de referencia americano en sus diferentes naciones.

La definición de SIRGAS es igual a la de Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS). La misma consiste en la densificación del ITRF en América Latina y Caribe, e incluye coordenadas y modelos cinemáticos para una época de referencia específica. La

red SIRGAS se densifica a nivel regional, lo cual beneficia el establecimiento de marcos de referencia local. Sus redes son asociadas a diferentes épocas y referidas a distintas soluciones del ITRF, materializando de esta forma, el sistema de referencia como tal (SIRGAS, 2012). En la figura 2.1, se incluye la ubicación de cada estación GNSS de la red SIRGAS-CON.

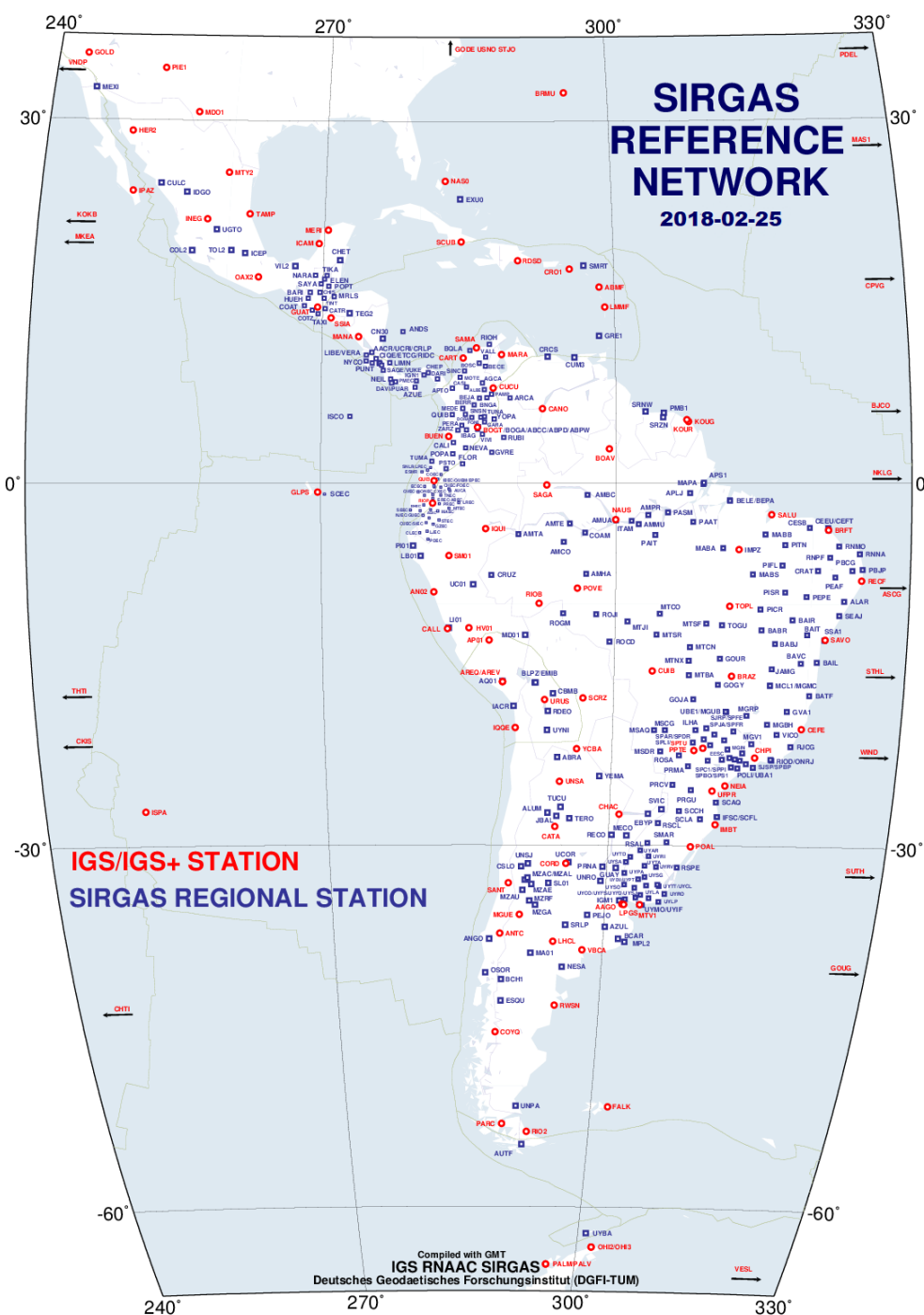


Figura 2.1: Distribución de la red SIRGAS-CON al 25 de febrero de 2018  
Fuente: <http://www.sirgas.org>

Su funcionamiento esencial consiste en el procesamiento semanal de sus estaciones GNSS. La red primaria del ITRF en Latinoamérica (SIRGAS-C) es la que primero se procesa, seguido de las redes continentales y regionales. Estas labores son realizadas por los centros locales de procesamiento, entre los cuales participa el Centro Nacional de Procesamiento de Datos GNSS (CNPDG), de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). Estos procesamientos incluyen también el cálculo de la posición referida al ITRF más actual, así como las estimaciones cinemáticas de la red (SIRGAS, 2012).

Entre los productos finales con que cuenta SIRGAS-CON están las coordenadas semanales libres y ajustadas, entre algunas otras que se describen a continuación (Rivas, 2015):

- **Coordenadas semanales semilibres:** Son empleadas para cálculos posteriores de la red. Son soluciones flotantes, es decir, las líneas base y la geometría de la red se conocen con alta precisión, pero la misma no está referida a ninguna estación de referencia sobre la superficie terrestre.
- **Coordenadas semanales ajustadas al ITRF:** Como marco de referencia, estas soluciones utilizan el establecido por el IGS para el cálculo de las efemérides satelitales GPS.
- **Soluciones multianuales (coordenadas más velocidades):** Estas soluciones se generan anualmente con el propósito de determinar la cinemática de la red y resultan de la combinación de todas las soluciones semanales semilibres disponibles.

### **2.1.2 Consorcio Universitario de NAVSTAR (UNAVCO)**

Al igual que SIRGAS, el Consorcio Universitario de NAVSTAR (UNAVCO) fue elemental para la elaboración del presente proyecto, puesto que se hizo uso de su información GNSS en estaciones ubicadas en el perímetro de la placa Caribe, lo cual permitió valorar los resultados obtenidos por el servicio PPP seleccionado. Además, UNAVCO fue utilizado como fuente de datos en la validación del modelo cinemático determinado en este proyecto.

El Consorcio Universitario de NAVSTAR es una institución sin fines de lucro administrada por un grupo de universidades para facilitar la investigación y educación en todos los campos geodésicos. Su sede principal se localiza en Colorado de Estados Unidos; con oficinas regionales en ciudades estadounidenses como San California, Portland, Oregon, Anchorage, entre otras. Su conformación se origina en 1984, cuando la entonces nueva tecnología GPS se incorporaba a las geociencias. Debido a la inversión económica que estas universidades debían realizar, crearon entonces un ambiente donde pudieran adquirir los recursos GPS. El origen de UNAVCO inició dentro del Instituto de Cooperación para

la Investigación de Ciencias Ambientales (CIRES), en la Universidad de Colorado (UNAVCO, 2016).

Este consorcio consiste en aproximadamente 100 miembros activos y cerca de 80 asociaciones locales e internacionales. De esta forma, UNAVCO puede mantener proyectos de investigación importantes, tales como redes geodésicas, mantenimiento y utilización de instrumentos meteorológicos y geofísicos, herramientas informáticas para el acceso y manipulación de la información, entrenamiento geodésico-físico, entre otras (UNAVCO, 2016).

La información cruda que recopilan las estaciones GNSS involucradas con UNAVCO es convertida en formato RINEX para luego ser monitoreadas con el software TEQC. Las soluciones finales de alta precisión se pueden obtener a través de dos métodos: Centros de Análisis denominados Promotores de la Geodesia, las Geociencias y EarthScope (GAGE, por sus siglas en inglés); o bien por medio de entidades relacionadas. Los GAGE postprocesan datos de redes permanentes y establecidas por UNAVCO, tales como PBO o COCONet, además de información GNSS proveniente de estaciones seleccionadas y/o campañas GNSS. Los resultados del procesamiento se pueden obtener en distintas formas: rápidas, finales, suplementarias, de campaña, reprocesadas, de velocidades, para análisis de movimientos sísmicos, entre otras. Específicamente, las soluciones combinadas finales son mayormente utilizadas debido a su nivel de precisión. En ellas se hace uso software científico de procesamiento de datos GNSS e incluyen los productos finales de órbitas del IGS (Herring, Melbourne, Murray y Floyd, 2016).

Entre los proyectos más comunes de UNAVCO se encuentra la cuantificación de interacciones producidas por placas tectónicas y su repercusión en la superficie terrestre. Además, el consorcio estudia riesgos de inundaciones, actividad volcánica y sísmica (UNAVCO, 2016).

## **2.2 Procesamiento de estaciones GNSS**

Hoy en día concurren paquetes de software para el postproceso de datos GNSS. Los mismos se han desarrollado basándose en las aplicaciones que se requieran. Existen particularidades en cada uno, no obstante, para la ejecución de este proyecto, se recurrió a los sistemas de procesamiento PPP como elemento alternativo del software científico. Por esta razón, se profundizó en las distintas modalidades de procesamiento de datos.

### 2.2.1 Procesamiento científico

Dentro de las geociencias, existen fenómenos o parámetros que deben incluirse al momento de establecer un posicionamiento válido y/o real. Dependiendo de la exactitud que se requiera, se necesitará incluir dichos parámetros en un procesamiento GNSS.

Para el procesamiento de datos GNSS a nivel científico, se incluyen una serie de parámetros específicos que permiten posicionamientos de alta exactitud. Existen distintos proyectos dentro de las geociencias que incluyen estos parámetros, por lo cual corresponde incluirlos en un procesamiento GNSS. Algunas aplicaciones geo científicas tales como el monitoreo de la tropósfera y la ionósfera, la definición de los parámetros orbitales de la Tierra, la validación de las órbitas GNSS, la creación de redes de control de primer orden, entre otras; son solo algunas de las tareas que para las que se requiere procesamiento científico.

Los siguientes son algunos de los programas de procesamiento científico GNSS más utilizados a nivel mundial:

1. GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software (GIPSY-OASIS), el cual se desarrolla por la NASA, en el Laboratorio de Propulsión de Jets (JPL, por sus siglas en inglés). Para más información se puede consultar en la siguiente dirección web: <http://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov> (Lichten, 1995).
2. Bernese GNSS Software. Este es un software de alta precisión, desarrollado por la Universidad de Berna, el cual permite incluir distintos parámetros con tal de calcular efectivamente el posicionamiento requerido. Algunos de estos parámetros son: reloj, atmósfera, antena, órbitas, ambigüedad de fase, distorsiones en el rango SLR, entre otros. Cabe destacar que este programa es utilizado por el Centro de Determinación de Órbitas de Europa (CODE), el cual ofrece productos manipulados por el IGS. Conjuntamente, el Bernese es la mayor herramienta computacional para los principales centros de procesamiento y combinación SIRGAS (Dach, Hugentobler, Fridez, & Meindl, 2007).
3. GAMIT/GLOBK: son una serie de programas cuyo principal objetivo es el procesamiento de datos GNSS para el estudio de la deformación terrestre (principalmente). Es desarrollado por 4 entidades principales: el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés), la Universidad de Harvard, el Instituto de Oceanografía Scripps y la contribución de la Fundación Nacional de Ciencia Estadounidense (Herring, King, & McClusky, 2010).

### 2.2.2 Procesamiento Puntual Preciso (PPP)

La realización del nuevo modelo cinemático se basó fundamentalmente en los resultados de un procesamiento GNSS con metodología PPP. Por esta razón, fue preciso comprender los principales conceptos de estos servicios. Durante la última década, una serie de instituciones han desarrollado servicios para el procesamiento GNSS. Las mismas ofrecen un método alternativo de procesamiento de datos satelitales. El principio de esta modalidad se basa en la corrección de los archivos de observación satelital provistos por el usuario. Este último, somete archivos de observación satelital por medio de distintas alternativas, tales como correo electrónico, página web, programa informático, FTP, entre otras. Enseguida, el servicio PPP aplica las correcciones pertinentes y en cuestión de minutos, reenvía los resultados al usuario.

Es válido mencionar que los servicios PPP pueden lograr exactitudes centimétricas utilizando receptores GNSS en modo estático y posiblemente, en modo cinemático o en “tiempo real” (Rizos, Janssen, Roberts, y Grinter, 2012). Estas características se logran tras la implementación de correcciones y/o disminución de errores propios de la dinámica GNSS. En el cuadro 2.1 se indican las correcciones incluidas en un servicio PPP típico.

**Cuadro 2.1: Correcciones realizadas por los servicios PPP**

Fuente: (Rizos, Janssen, Roberts y Grinter, 2012)

<b>Error</b>	<b>Corrección</b>
Errores del satélite	Correcciones precisas del reloj satelital
	Variaciones del centro fase de la antena
	Órbitas precisas del satélite
	Retardo diferencial
	Término de relatividad
	Error final de fase en la antena
Errores del receptor	Desplazamiento del centro de la antena
	Variaciones del centro de la antena
	Error final de fase en el receptor
Geofísicos	Desplazamientos por mareas
	Carga oceánica
	Mareas polares
	Movimiento tectónico
Atmosféricos	Retraso en la tropósfera
	Retraso en la ionósfera

Los servicios PPP brindan exactitudes similares al método GNSS diferencial, ya que los principales servicios permiten soluciones convergentes al nivel centimétrico. Sin embargo, los primeros, requieren de largas sesiones de observación (algunas horas) para obtener los resultados mencionados. Por esta razón, su uso es dado en aplicaciones cinemáticas y/o de “tiempo real” (Rizos, Janssen, Roberts, y Grinter, 2012).

Los servicios PPP brindan exactitudes similares al método GNSS diferencial, ya que los principales servicios permiten soluciones convergentes al nivel centimétrico. Sin embargo, los primeros, requieren de largas sesiones de observación (algunas horas) para obtener los resultados mencionados. Por esta razón, su uso es dado en aplicaciones cinemáticas y/o de “tiempo real” (Rizos, Janssen, Roberts, y Grinter, 2012).

El algoritmo matemático utilizado en los servicios PPP incluye una serie de métodos para eliminar o disminuir errores en las órbitas del satélite y la dispersión del reloj, cuyo proceso matemático se describe en las ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4. Enseguida, se debe aplicar una combinación de datos con tal de eliminar la influencia por ionósfera. Esto se denomina *libre de ionósfera* y utiliza las ecuaciones 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 (Cai y Gao, 2007).

$$P_i^g = \rho_g + cdt^g - cdT^g + d_{orb}^g + d_{trop}^g + d_{ion/P_i}^g + d_{mult/P_i}^g + \varepsilon_{P_i}^g \quad (2.1)$$

$$\Phi_i^g = \rho_g + cdt^g - cdT^g + d_{orb}^g + d_{trop}^g - d_{ion/\Phi_i}^g + \lambda_i^g N_i^g + d_{mult/\Phi_i}^g + \varepsilon_{\Phi_i}^g \quad (2.2)$$

$$P_i^r = \rho_r + cdt^r - cdT^r + d_{orb}^r + d_{trop}^r + d_{ion/P_i}^r + d_{mult/P_i}^r + \varepsilon_{P_i}^r \quad (2.3)$$

$$\Phi_i^r = \rho_r + cdt^r - cdT^r + d_{orb}^r + d_{trop}^r - d_{ion/\Phi_i}^r + \lambda_i^r N_i^r + d_{mult/\Phi_i}^r + \varepsilon_{\Phi_i}^r \quad (2.4)$$

Por otra parte, la combinación libre de ionósfera incluye las ecuaciones siguientes y es utilizada para corregir la refracción ionosférica:

$$P_{IF}^g = (f_{g1}^2 P_1^g - f_{g2}^2 P_2^g) / (f_{g1}^2 - f_{g2}^2) = \rho_g + cdt^g + d_{trop}^g + \varepsilon_{P_{IF}}^g \quad (2.5)$$

$$\Phi_{IF}^g = (f_{g1}^2 \Phi_1^g - f_{g2}^2 \Phi_2^g) / (f_{g1}^2 - f_{g2}^2) = \rho_g + cdt^g + d_{trop}^g + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^g \quad (2.6)$$

$$P_{IF}^r = (f_{r1}^2 P_1^r - f_{r2}^2 P_2^r) / (f_{r1}^2 - f_{r2}^2) = \rho_r + cdt^r + d_{trop}^r + \varepsilon_{P_{IF}}^r \quad (2.7)$$

$$\Phi_{IF}^r = (f_{r1}^2 \Phi_1^r - f_{r2}^2 \Phi_2^r) / (f_{r1}^2 - f_{r2}^2) = \rho_r + cdt^r + d_{trop}^r + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^r \quad (2.8)$$

De donde  $P_{IF}$  es la combinación de código para la solución libre de ionósfera (m), mientras que  $\Phi_{IF}$  es su variante en combinación de fase. Mientras que  $f_i$  es la frecuencia de  $L_i$  (Hz),

$N_{IF}$  el termino de ambigüedad combinado (m) y  $\varepsilon_{IF}$  contiene la medición de ruido y otros errores residuales.

Por otra parte, algunas organizaciones internacionales que brindan servicios PPP son las siguientes: Geohazards Division of Geoscience Australia, Geodetic Survey Division (GSD) en Canadá, the United States National Geodetic Survey (NGS), y la National Aeronautics and Space Administration (NASA), entre otras (Ghoddousi y Dare, 2006)

Existe un servicio PPP denominado GPS Analysis and Positioning Software (GAPS). Este es un servicio computacional desarrollado por la Universidad de New Brunswick (UNB) en Canadá; el cual se destaca por la ligereza con la que se incluyen o modifican aspectos típicos de un procesamiento GNSS. El sistema de procesamiento de datos GNSS-GAPS ofrece a los usuarios un posicionamiento preciso aplicando insumos como órbitas precisas y parámetros del reloj satelital dados por el IGS y el Natural Resources Canada (NRCan). Las exactitudes estimadas son del orden centimétrico en modo estático y decimétricas en modo cinemático, siempre y cuando se brinde suficiente tiempo de convergencia. El usuario puede subir sus archivos de observación L1 y/o L2 en formato RINEX 2.x ó 3.x, Hatanaka, datos crudos de receptor o archivos comprimidos.

El software GAPS toma en cuenta los siguientes aspectos con el fin de incluir modelos y/o correcciones (Leandro, Santos y Langley, 2007):

1. Desfase del reloj
2. Tropósfera
3. Ionósfera (solo primer orden)
4. Órbitas precisas y parámetros del reloj
5. Interpolación de órbitas y de reloj
6. Modelado de mareas
7. Corrección absoluta a los centros fase de la antena
8. Correcciones del satélite como desplazamiento del centro de masas y el centro de la antena,

Igualmente, GAPS permite utilizar una versión ejecutable denominada GAPSoffline. Las singularidades de este servicio son el procesamiento de datos GPS sin conexión a internet (con una descarga previa de los productos IGS) y la capacidad de manipular cada parámetro de procesamiento o variable requerida. De esta manera, el usuario puede cambiar aspectos tales como la máscara de elevación, la desviación estándar del código o la utilización de las observables L1 y/o L2, entre otros. Estas variaciones pueden ser operadas por medio de comandos dentro del programa, incluyendo las diferentes variables y modelos que se deseen, así como se muestra a continuación:

```
“gapsoffline.exe unbj0010.14d IGS_P 0 10 0.015 2.0 1 5 1 0 L1W L2W std vmf1 0.10 5 0 0  
0.001 0.3 none 1 1 none”
```

Este comando demanda que el ejecutable GAPSOffline inicie tomando el archivo “unbj0010.14d” para el procesamiento, incluyendo los productos precisos de IGS (“IGS\_P”) para observaciones en modo estático (“0”), una máscara de elevación de 10 grados (“10”), seguido de una desviación estándar para el código de fase de 0.015 m, etc. De esta forma, cada valor presente en los comandos del programa puede seguir las necesidades del usuario.

La versatilidad y eficiencia convierten al software GAPS en una solución singular cuando se compara con otras plataformas PPP. Dicho esto, el presente proyecto utilizó este servicio como insumo principal para el procesamiento de datos GNSS. El sistema de GPS Analysis and Positioning Software se puede acceder en la siguiente página web: <http://gaps.gge.unb.ca/submitadvanced.php>.

Una copia del ejecutable GAPSOffline se obtuvo gracias a la colaboración de la Universidad de New Brunswick, Canadá, mediante los académicos Marco Mendonça (candidato a doctorado) y Dr. Marcelo Santos (profesor del departamento de Ingeniería en Geomática y Geodesia), ambos encargados de la elaboración y el mantenimiento del servicio GAPS. Estos contactos se establecieron mediante correos electrónicos en idioma inglés, solicitando cooperación respectiva en la realización de este proyecto (ver anexo 2 en CD adjunto).

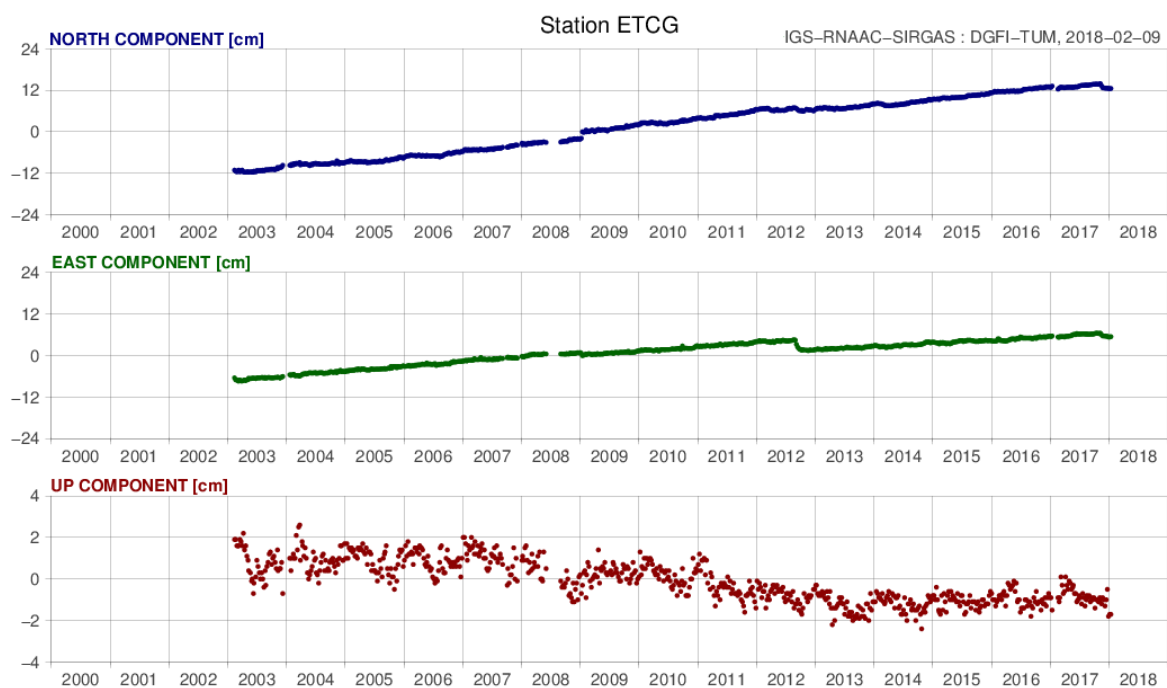
### **2.3 Series temporales**

Con el objetivo de validar el modelo cinemático resultante, se utilizaron series de tiempo de SIRGAS y UNAVCO para ser comparadas frente a las de cada estación seleccionada. Esto permitió obtener una mayor apreciación de la calidad del modelo, así como de la exactitud con la que trabaja un servicio PPP.

Cuando se desea representar la variabilidad de un fenómeno cualquiera con respecto al tiempo, se utilizan series de tiempo o series temporales. Las mismas muestran una secuencia de datos y/o valores acomodados cronológicamente. En el ámbito geo-científico, las series de tiempo incluyen los movimientos de cada componente dimensional con respecto a un tiempo definido. De esta forma, las fluctuaciones se simbolizan en un gráfico donde la escala horizontal incluye el tiempo y la escala vertical la movilidad de coordenadas. Esta gráfica es elemental para el estudio de geodinámica, pues permite conocer, cuantificar y estimar el comportamiento de la(s) estación(es) en estudio, además de obtener sus desplazamientos durante un período definido (Moya, Bastos, Rivas y Cordero, 2014).

Las series de tiempo buscan simbolizar el posicionamiento de una estación GNSS. De ellas se deducen los cambios que ha experimentado y brinda insumos trascendentales para la ejecución de diferentes proyectos, entre ellos el movimiento de corteza terrestre (Moya, Bastos y Rivas, 2014). De esta forma, si se tiene un fenómeno de interés cualquiera y una característica cuantificable de este mismo fenómeno tal como una variable aleatoria  $X$ , entonces el proceso  $X(t)$ , donde  $t$  es el tiempo, y las observaciones de  $X(t)$  pueden ser  $X_1 \dots X_N$ . Por ende, estas observaciones se convierten en los datos de ejecución del proceso (Borre y Tiberius, 2000).

La figura 2.2 incluye la serie temporal SIRGAS para la estación ETCG, incluyendo al menos 14 años de observaciones GNSS. Se puede afirmar que, durante este período, el vértice ETCG se ha desplazado cerca de 20 cm hacia el norte y 14 cm en dirección este.



**Figura 2.2: Series de tiempo de la estación ETCG entre 2003-2018**

Fuente: (SIRGAS, 2015)

### 2.3.1 Evaluación de series temporales

Durante la evaluación del modelo cinemático determinado en este proyecto, se realizaron comparaciones con series temporales SIRGAS y UNAVCO, arrojando resultados que permitieron validar la metodología presentada. Por esta razón, se profundizó en la evaluación y análisis de series temporales.

Dicho esto, se tomó en cuenta que las mediciones continuas del Sistema de Posicionamiento Global se han utilizado por más de 15 años en diferentes estudios de deformación. La gran mayoría de estas mediciones se han ejecutado con un sistema de referencia global y donde la geofísica ha considerado parámetros especiales con los que puede deducir el movimiento o deformación de la corteza terrestre. Dichos parámetros y sus respectivas precisiones son influenciados por el error medio cuadrático de sus componentes coordenados (este, norte y elevación), exceptuando algunos fenómenos naturales (Amiri-Simkooei, Tiberius, y Teunissen, 2007).

Por otra parte, y basado en Priestley (1981), la inferencia estadística de una serie de tiempo implica la apreciación de cantidades desconocidas desde un conjunto de datos observables. Por lo tanto, una serie de tiempo debe ser examinada con métodos o técnicas estadísticas que deduzcan resultados válidos y por medio de los cuales se compense el propósito primordial del análisis de series temporales: analizar el proceso mediante la Función de Densidad de Probabilidad. Esto último, consiste en describir estadísticamente la variable aleatoria con un valor definido y posteriormente, ubicarla en una región cualquiera del espacio de probabilidad mediante una integral (de valor unitario) con límites propios de la función. Consecuente a esto, se podrá pronosticar el comportamiento asociado a las observaciones originales.

Entre las cantidades más importantes en el análisis de series temporales se encuentran dos conceptos significativos que deben ser detectados y/o cuantificados. Los mismos se describen brevemente a continuación (Borre y Tiberius, 2000):

1. Estacionaridad y ergodicidad: Cuando las características del proceso son constantes, entonces el proceso aleatorio se designa estacionariedad. (Priestley, 1981). Cuando esto acontece, los datos de observación son distribuidos idénticamente o, en otras palabras, mantienen una distribución normal o Gaussiana. Un comportamiento estacionario también se clasifica como ergódico si cada observación del conjunto es representativa para toda la serie de coordenadas. En general, la ergodicidad no se puede verificar, solo puede ser asumida. También, se dice que las observaciones son ergódicas si sus promedios estadísticos son similares a estos últimos.
2. Autocorrelación: La autocovarianza de un proceso aleatorio es vital para el análisis de series de tiempo. En ocasiones, los valores de una serie de tiempo toman valores que no son independientes, sino que un valor depende de los valores anteriores a este. Las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial se utilizan para medir la dependencia de estos valores.

### **2.3.2 Análisis preliminar de las series temporales**

Dentro de los primeros análisis de una serie de tiempo, se asumen las variables de observación con tres componentes principales. Los más comunes se describen a continuación:

1. **Tendencia:** se presenta cuando el valor de la media se ve afectado a largo plazo, en otros términos, se presenta un cambio suave, en el comportamiento de las observaciones.
2. **Estacional:** Muchas series de tiempo presentan cambios típicos en su valor medio debido a un fenómeno conocido con anterioridad. Estos cambios son fáciles de identificar y se pueden medir explícitamente.
3. **Aleatorio:** Este componente afecta la serie temporal y no corresponde a ningún comportamiento específico, sino que es el resultado de fenómenos desconocidos, aleatorios e imprevistos.

Las series temporales pueden ser descritas estadísticamente, examinando sus peculiaridades y obteniendo su media, varianza y promedio. De esta forma, una serie de tiempo se puede catalogar como “estacionaria” o “no estacionaria” si sus valores estadísticos cambian con respecto al tiempo. La primera tiene valores estables a lo largo del tiempo definido y, al contrario, las segundas tienden a crecer o decrecer a largo o incluso, corto plazo. (Blewitt y Lavallée, 2002)

Debido a que los receptores GNSS poseen la capacidad de obtener señales durante largos períodos, entonces se puede derivar que el posicionamiento debido a las frecuencias L1, L2 están afectadas por ruidos propios de las observaciones al momento de recibir señal. Estos ruidos inicialmente se consideran como blancos, esto es que no tiene observaciones consecutivas correlacionadas. (Borre y Tiberius, 2000)

### **2.4 Criterios estadísticos**

El objetivo número 3 del este trabajo persiguió la depuración del vector de coordenadas finales, dedicando procesos estadísticos para garantizar la consistencia de información y excluyendo los datos atípicos. Puesto que se requerían metodologías estadísticas capaces de ejecutar lo señalado, se determinó el Criterio de Chauvenet y el Test de Grubbs como algoritmos adecuados para los fines planteados. Ambos rescatan la potestad de identificar posibles valores atípicos en una serie de datos (Moya, 2010).

De acuerdo con Kennedy y Neville (1982), la estadística discurre la serie como elementos de una población, pero no se conoce a ciencia cierta si este conjunto de datos alcanza una distribución normal o gaussiana. Para establecer este aspecto, se recurrió a la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

### 2.4.1 Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov

También conocida como la prueba KS, es una metodología estadística que analiza el grado en que una serie de datos corresponde con una determinada distribución estadística. Se caracteriza por ser una prueba de bondad de ajuste que compara la distribución acumulada observada de una variable  $F(X_i)$  frente a una distribución acumulada de una variable con una distribución teórica determinada  $F_0(X_i)$ . Con este método entonces, se puede definir el grado de distribución que posee un conjunto de datos, ya sea distribución normal, gaussiana, exponencial o weibull, según sea el caso.

La prueba KS plantea hipótesis  $H_0$  como la posibilidad de que los datos analizados sigan una distribución  $M$ . Inmediatamente, el estadístico de contraste ( $D$ ) se considera con la ecuación 2.9 como sigue:

$$D = \sup_{1 \leq i \leq n} |F_n(X_i) - F_0(X_i)| \quad (2.9)$$

De donde:

- $X_i$  es el  $i$ -ésimo valor de los datos (cuyos valores observados deben ser ordenados de menor a mayor).
- $F_n(X_i)$  es un estimador de la probabilidad para observar valores menores o iguales a  $X_i$ .
- $F_0(X)$  es la probabilidad de observar valores menores o iguales que  $X_i$ , cuando  $H_0$  es verdadero.

De esta forma, se tiene que  $D$  es la mayor diferencia absoluta observada entre la frecuencia acumulada observada  $F_n(X_i)$  y la frecuencia acumulada  $F_0(X)$ , obtenida a partir de la distribución de probabilidad que se especifica en  $H_0$ . Cabe destacar que entre mayor sea la diferencia, mayor también será  $D$ . Por ende, la prueba KS define que si  $D \leq D_\alpha$ , entonces la hipótesis nula  $H_0$  se acepta, de lo contrario se rechaza. La terminología se puede encontrar en el cuadro 2.2.

El valor de  $D_\alpha$  dependerá del tipo de distribución a tratar. En la forma general,  $D_\alpha$  se calcula con la ecuación 2.10.

$$D_\alpha = \frac{c_\alpha}{K(n)} \quad (2.10)$$

**Cuadro 2.2: Distribuciones estadísticas para la prueba Kolmogorov-Smirnov**

Fuente: (Meza, 2016)

C $\alpha$	$\alpha$			k(n)
	0,1	0,05	0,01	
Modelo	0,1	0,05	0,01	
General	1,224	1,358	1,628	$\sqrt{n} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{n}}$
Normal	0,819	0,895	1,035	$\sqrt{n} - 0,01 + \frac{0,85}{\sqrt{n}}$
Exponencial	0,990	1,094	1,308	$\sqrt{n} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{n}}$
Weibull n = $\infty$	0,803	0,874	1,007	$\sqrt{n}$

#### 2.4.2 Pruebas para la detección de valores atípicos

Para las pruebas estadísticas del presente proyecto, se utilizaron dos pruebas, las cuales tuvieron como objetivo principal, la detección de posibles datos atípicos. La primera prueba se denomina *Test de Grubbs*, desarrollada por el matemático Frank E. Grubbs; mientras que la segunda lleva el nombre de *Criterio de Chauvenet*, realizada por William Chauvenet.

El estadounidense Frank E. Grubbs desarrolló una metodología para detectar valores atípicos en una serie de observaciones. Su publicación “Procedures for Detecting Outlying Observations Samples”, demuestra como la aplicación considera solo los valores máximos y mínimos de la serie para posteriormente, determinar la existencia de valores atípicos (Grubbs, 1969). El test de Grubbs es utilizado para analizar solo observaciones que responden a una distribución estadísticamente normal. Para ejecutar su algoritmo, se procede a calcular el valor G para el máximo y el mínimo, utilizando la ecuación 2.11 (Kwinta, 2010):

$$G_{\max} = \frac{X_{\max} - \bar{X}}{S} \tag{2.11}$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{X} - X_{\min}}{S}$$

Donde  $X_{\max}$  es el valor máximo de la serie y  $X_{\min}$  el valor mínimo. Mientras que  $\bar{X}$  es el promedio y S la desviación estándar.

En seguida, el valor crítico de Grubbs ( $G_{\text{crit}}$ ) se calcula con la ecuación 2.12:

$$G_{\text{crit}} = \frac{(n-1) t_{\text{crit}}}{\sqrt{n(n-2) + t_{\text{crit}}^2}} \quad (2.12)$$

Donde  $t_{\text{crit}}$  es el valor crítico de la distribución t, con nivel de significancia de  $\alpha/n$ . De esta manera se puede determinar si  $X_{\text{max}}$  o  $X_{\text{min}}$  es significativa con respecto a  $G_{\text{crit}}$ , es decir si  $G > G_{\text{crit}}$ , entonces X es un valor atípico (Zaiontz, 2017).

Por otro lado, el estadounidense William Chauvenet se dedicó a diferentes carreras durante su vida. Se desempeñó en las áreas de matemáticas, astronomía, navegación y topografía. Entre sus logros más reconocidos se encuentra el Criterio de Chauvenet, el cual es una metodología que analiza los valores medios de un grupo de observaciones para identificar la existencia de valores anormales (Elliot, 1979).

El Criterio de Chauvenet se basa en la distribución normal e identifica los valores atípicos estableciendo primero una cantidad máxima de desviaciones estándar ( $T_{\text{crit}}$ ), apoyada en la media estadística del conjunto de observaciones y que se puede consultar en la tabla Chauvenet. Por otra parte, la normalización de cada valor observado da como resultado la cantidad de desviaciones estándar que dicho valor se aleja de la media. Esta última cantidad indicaría si se tiene un valor atípico en el tanto sea mayor a  $T_{\text{crit}}$ . El criterio establece que el número de valores atípicos a excluir debe ser menor que 5% de la totalidad de observaciones (Kwinta, 2010).

De esta forma se tiene la ecuación 2.13 con la que se puede calcular la cantidad máxima de desviaciones estándar establecidas por el criterio de Chauvenet. El valor X es específico a analizar,  $\mu$  es el promedio y  $\sigma$  la desviación estándar (Kwinta, 2010) (Ver anexo 3 en CD adjunto).

$$T_{\text{crit}} > \frac{\text{abs}(X - \mu)}{\sigma} \quad (2.13)$$

## 2.5 Modelos cinemáticos para las estaciones GNSS

Es común que el posicionamiento GNSS se realice para control de estructuras o futuras construcciones. El amojonamiento es típico en cuestión de materiales y su monitoreo no es tan profundo como el que se utiliza para la detección de movimiento, ya sea de volcanes activos, derrumbes y mantos de hielo. En estos últimos escenarios es donde se incorporan metodologías particulares y dependerán del tipo de movimiento y el fenómeno a controlar. En el caso de volcanes, se crean modelos cinemáticos con tal de representar las diferencias de movimiento. La toma de información es continua y se realiza en períodos cortos (generalmente cada segundo o menos) para obtener exactitudes milimétricas, ayudándose

de técnicas más complejas. Para la creación de modelos cinemáticos se aplican tres conceptos en el movimiento de una o más estaciones GNSS de medición continua. Los mismos son definidos por Bevis y Brown (2014) y se mencionan a continuación: tendencia, saltos y ciclos. La ecuación 2.14 posee estos conceptos y puede definir los modelos cinemáticos de carácter lineal. Una vez que el modelo involucra movimientos pequeños y constantes, se convierte en no lineal y el término tendencia en la ecuación 2.14 debe ser substituido por un polinomio de tendencia (Bevis y Brown, 2014).

$$X(t) = X_{\text{tendencia}} + X_{\text{saltos}} + X_{\text{ciclos}} \quad (2.14)$$

## 2.6 Modelos de movimiento de las placas tectónicas

Actualmente existen muchas formas de obtener el movimiento de las placas tectónicas. Hoy en día existe tecnología eficiente para conocer cuánto y con qué dirección se mueven. Es cierto que, para describir el movimiento de una placa, se deben calcular sus velocidades angulares y lineales referidas a un punto fijo o eje de rotación, los cuales son denominados polos de Euler, utilizando además una serie de nomenclatura particular, incluida en el cuadro 2.3.

**Cuadro 2.3: Símbolos usados en el cálculo de polos de rotación**

Fuente: (Fowler, 2005)

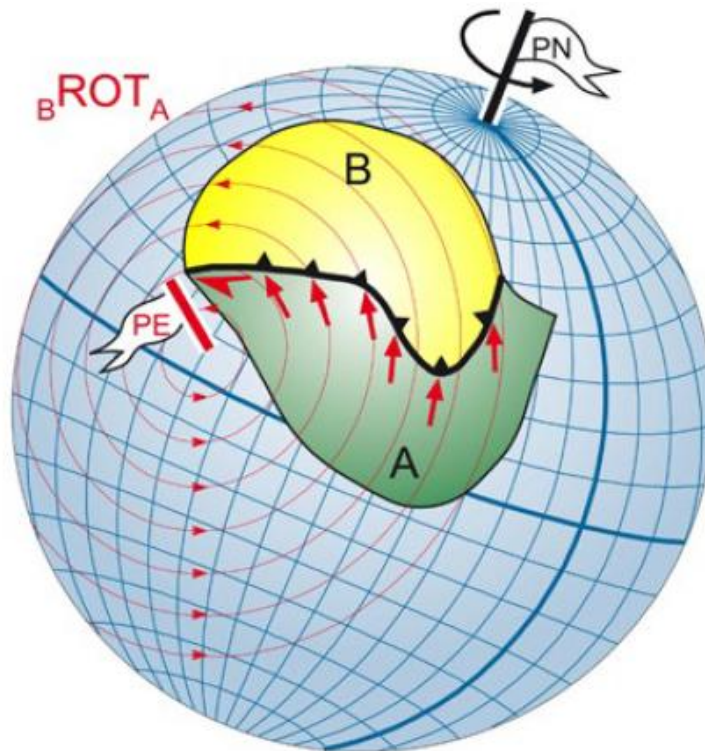
<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Convención</b>
$\lambda_p$	Latitud del polo de rotación	N positiva
$\lambda_x$	Latitud del punto sobre la placa	S negativa
$\phi_p$	Longitud del polo de rotación	O negativa
$\phi_x$	Longitud del punto sobre la placa	E positiva
<b>V</b>	Velocidad del punto X sobre la placa	
v	Amplitud de la velocidad	
$\beta$	Azimut de la velocidad con respecto al norte N	Positivo con la dirección de las manecillas de reloj
R	Radio de la Tierra	
$\omega$	Velocidad angular referido al polo de rotación	

Usando una gran cantidad de datos, se pueden elaborar modelos de movimientos de placas que pueden servir para deducir la cinemática sobre cualquier punto. Estos modelos se pueden clasificar según las técnicas con las que se obtienen y el tipo de información que utilizan. De esta forma, se pueden tener modelos geológico-geofísicos o modelos

geodésicos. Los primeros, se basan principalmente en el estudio de velocidades relativas o absolutas, cuyo ejemplar más aceptado es NNR NUVEL-1A (Northwestern University Velocity Models) Por otro lado, los modelos geodésicos utilizan técnicas de información satelital para su elaboración y su principal exponente es MORVEL 56 (Alfaro, Chaves, Fernandez y Gutierrez, 2013).

Cada modelo tectónico describe las velocidades angulares y lineales de un número “X” de placas (según modelo), relativas a un sistema de referencia no rotatorio. Existen dos consideraciones principales para la elaboración de un modelo cinemático de placas tectónicas. En la primera consideración, se toma en cuenta que los bloques en movimiento son completamente rígidos y sus límites se transforman en coincidencia con fallas tectónicas fácilmente identificables. NNR NUVEL-1A y MORVEL56 y son ejemplos de esta teoría, donde se simplifican el movimiento a sus límites solamente. Este criterio ha sido aceptado durante muchas décadas, incluso se puede definir dentro de la Tectónica de Placas original. En otra aproximación, trata a la litósfera como un manto viscoso que cambia con respecto a la discontinuidad mecánica de sus elementos naturales y, por ende, se modifica su forma a lo largo del tiempo. Esta última consideración indica que el criterio de rigidez para la Tectónica de Placas debe ser reconsiderado, ya que hoy en día las tecnologías de posicionamiento preciso evidencian cambios importantes en la geometría de todo un país o continente inclusive.

Para describir los movimientos en la superficie de una esfera, se utiliza el teorema de Euler, el cual utiliza un punto fijo para referenciar el movimiento de uno o más puntos en un tiempo determinado. Entonces, esto se convierte en una rotación alrededor de un eje seleccionado que pasa por el centro de la Tierra, cuya naturaleza es meramente matemática y no supone una definición física. Este teorema contempla una rotación según las manecillas del reloj (de mano derecha), siendo positivo cuando se afirma desde el centro de la Tierra y alrededor del eje; al contrario, es negativo cuando se ve desde el exterior de la Tierra y la rotación es contraria a las manecillas del reloj. La figura 2.3 muestra la posible rotación ( ${}_{B}ROT_{A}$ ) de placas litosféricas (A y B) alrededor de un eje (PE, por las siglas de Polo de Euler). Los círculos rojos esquematizan la trayectoria de la placa A con respecto a la placa B.



**Figura 2.3: Rotación relativa de dos placas litosféricas con respecto a un eje**  
 Fuente: (Alfaro, Chaves, Fernandez y Gutierrez, 2013).

A continuación, se describen los principales modelos aceptados por la comunidad científica y, por consiguiente, son los más utilizados en la deducción de movimientos tectónicos.

### 2.6.1 Modelos geofísicos

Los modelos geofísicos también son llamados modelos geológicos por determinar los movimientos cinemáticos según el tipo de falla tectónica y las velocidades relativas que administran. La desventaja de los modelos geofísico-geológicos es que sus velocidades corresponden a los últimos 3 millones de años (Drewes y Sanchez, 2014). Entre los modelos geofísicos más utilizados internacionalmente están NNR NUVEL-1A y MORVEL. Los mismos se describen brevemente a continuación.

El ITRF2008 adopta el modelo NNR NUVEL-1AA como un estándar para la estimación de sus velocidades, utilizando la condición NNR (no net rotation). Este modelo determina al menos unas 277 fallas interoceánicas y sus respectivos valores, así como sus azimuts respectivos. La determinación de este modelo se realizó con 1122 datos alrededor de los bordes de 22 placas y se puede describir con la posición relativa de 12 puntos con información tridimensional y velocidad angular. El origen del sistema es al azar, puesto que se escoge como referencia cualquiera de estos 12 puntos. De esta manera los 11 vectores de rotación Euler en el cuadro 2.4, describen la totalidad del modelo tectónico

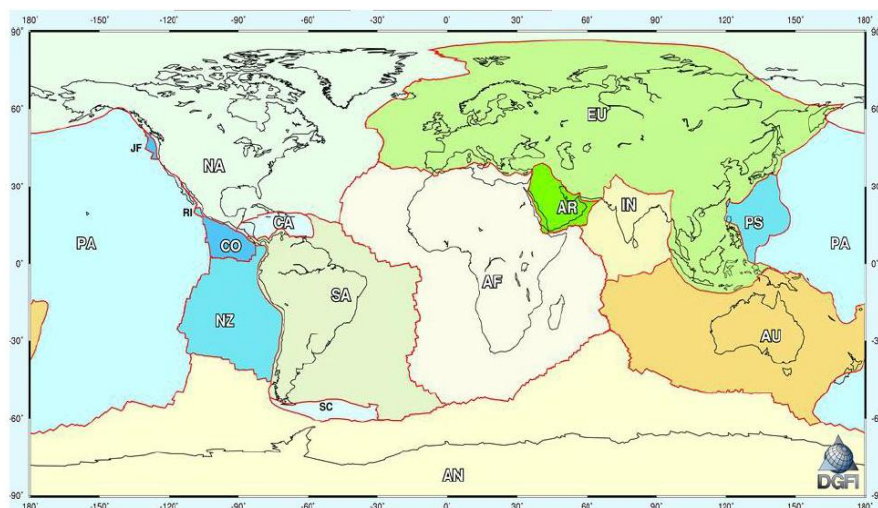
NUVEL-1A, siempre y cuando se tome como punto de partida, cualquier placa tectónica localizada en el Pacífico (DeMets, Gordon, Argus y Stein, 1990).

**Cuadro 2.4: Vectores de rotación Euler según el modelo tectónico NUVEL-1A**

Fuente: (DeMets, Gordon, Argus y Stein, 1990)

Placa	NNR NUVEL-1A		
	Latitud (°)	Longitud (°)	Velocidad (°/Ma)
África	59,160	-73,174	0,9695
Antártida	64,315	-83,984	0,9093
Arabia	59,658	-33,193	11,616
Australia	60,080	-1,742	11,236
Caribe	54,195	-80,802	0,8534
Cocos	36,823	-108,629	20,890
Eurasia	61,066	-85,819	0,8985
India	60,494	-30,403	11,539
Nazca	55,578	-90,096	14,222
Norteamericana	48,709	-78,167	0,7829
Suramericana	54,999	-85,752	0,6657

Según DeMets, Gordon, Argus y Stein (1990), un aspecto desfavorable de NNR NUVEL-1A es que no puede calcular el intervalo promedio de todos los diferentes tipos de datos utilizados, el cual podría ser de varios millones de años, mientras que los datos de terremotos pueden aportar unas décadas solamente (DeMets, Gordon, Argus y Stein, 1990). La figura 2.4 representa los límites descritos por NUVEL-1A, mientras que el cuadro 2.4 incluye sus vectores de rotación Euler.



**Figura 2.4: Límites tectónicos definidos por el modelo NUVEL-1A**

Fuente: <http://www.dgfi.badw.de/>

Por otra parte, el modelo cinemático de MORVEL fue finalizado en el 2008, después de una década de estudio y análisis. Se considera como el más importante de su clase, ya que estima el movimiento tectónico reciente y sus incertidumbres a partir de datos geológicos, geofísico-marinos, sismológicos y geodésicos de 10 países diferentes durante más de 3,16 millones de años. Su información geológica incluye datos de 20 a 25 placas tectónicas y cubre el 97% de la superficie terrestre. La información que administra MORVEL es mayormente geológica, sin embargo, incluye datos de posicionamiento GPS. No obstante, la deducción matemática para el cálculo de velocidades se determinó independientemente de los datos GPS y por esta razón el modelo se considera de tipo geofísico.

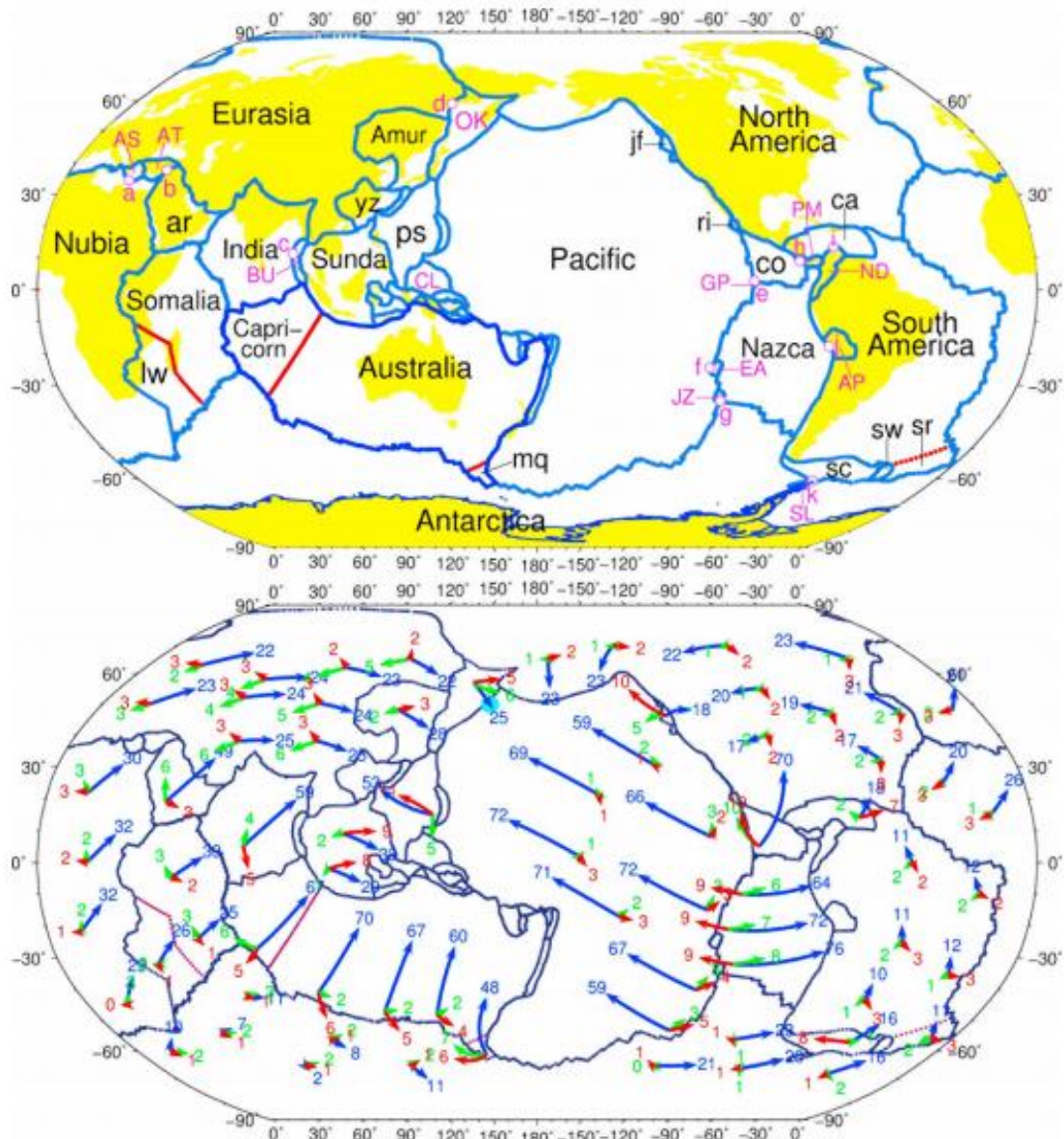
El modelo MORVEL consiste en 24 velocidades angulares que describen 24 placas referenciadas a otra que funciona como placa fija. De esta forma, la velocidad relativa entre placas se puede deducir de todas las combinaciones posibles de estas 25 placas en total (DeMets, Gordon y Argus, 2010). Para desarrollar MORVEL, se utilizaron 4 tipos de observaciones que proporcionan estimaciones locales muy confiables del movimiento de las placas tectónicas en general. Sus combinaciones permiten la deducción de velocidades para placas pequeñas o relativamente nuevas (DeMets, Gordon y Argus, 2010). Los tipos de observaciones utilizadas en MORVEL se detallan a continuación:

1. Propagación del fondo marino: Estas observaciones se obtienen con ayuda de las líneas magnéticas del fondo marino, creadas por las dorsales oceánicas. La utilización de estos datos es la más importante para el desarrollo del modelo MORVEL.
2. Direcciones de las fallas oceánicas y sus transformaciones: las mismas se presentan de forma paralela a la dirección relativa de la placa. Si se toman en cuenta las fallas locales individualmente se puede precisar el modelo con mayor exactitud, puesto que los movimientos de éstas siguen activos durante miles a millones de años.
3. Mediciones geodésicas: utilizan técnicas para el posicionamiento global, tales como VLBI, SLR y GNSS. Esta última es la más utilizada en la determinación de modelos cinemáticos debido a que estos instrumentos son relativamente accesibles (económicamente). Cabe resaltar que las mediciones son continuas, no obstante, existen datos en los que el período es menor al adecuado gracias a la dificultad de su colocación. Precisamente, MORVEL utiliza la cantidad mínima de datos geodésicos con miras a minimizar el efecto de estas mediciones.
4. Las direcciones de deslizamiento horizontales durante terremotos: típicamente, los terremotos tienen movimiento energético en dirección paralela a aquella definida por los límites de placas. Debido a esto, los terremotos pueden describir el movimiento de la placa durante períodos cortos con respecto a las mediciones geodésicas. El uso de estos datos es el menos utilizado en el estudio de movimiento tectónico.

En general, todos los modelos cinemáticos actuales se han ejecutado con los criterios y observaciones expuestas anteriormente. Si bien algunos se modifican en su totalidad, la

mayoría los utiliza como un estándar. La diferencia es la cantidad, calidad y tipo de datos que manipulan, y basado en esto, el modelo se clasifica en su respectiva categoría.

La figura 2.5 muestra los límites tectónicos y sus respectivas velocidades según el modelo MORVEL. La imagen superior incluye las primeras 25 placas definidas (en texto color negro) y también incluye las 31 adicionales definidas por Bird (2003) (texto color magenta). La definición de límites tectónicos de MORVEL concuerda con los de Bird, exceptuando aquellas en color rojo. Por otra parte, en la imagen inferior se incluyen las velocidades respectivas según MORVEL (con flechas azules) y su diferencia con el modelo cinemático NNR NUVEL-1A (flechas rojas) y GSRM-NNR (flechas verdes).



**Figura 2.5: Velocidades y placas tectónicas de MORVEL y NNR-MORVEL56**  
Fuente: (DeMets, Argus y Gordon, 2008)

Adyacente a esto, se recalca la modificación reciente de MORVEL, la cual crea un conjunto de datos cinemáticos para 56 placas tectónicas. Este nuevo modelo contempla 31 placas adicionales definidas por Bird (2003) y cubre el 100% de la Tierra. Su nuevo nombre es NNR-MORVEL56.

## 2.6.2 Modelos geodésicos

A continuación, se mencionan los modelos geodésicos utilizados durante la validación del modelo cinemático propuesto en este proyecto: Velocity Model For SIRGAS (VEMOS15) y Actual Plate Kinematic Model (APKIM).

SIRGAS recomienda el modelo VEMOS15 en casos donde la información de velocidades no sea la suficiente. VEMOS15 cubre un intervalo de tiempo entre marzo 14 del 2010 y hasta el 11 de abril del 2015. Cabe destacar que el cálculo inicia posteriormente a los terremotos ocurridos en Chile y México en el año 2010. Así mismo, este modelo rodea la zona desde los 55° S, 110° W y hasta los 32° N, 35° W con una grilla típica de los modelos NNR de 1° x 1°. Además, posee información de todos los terremotos ocurridos en Latinoamérica y el Caribe con magnitud mayores a 5 Mw.

SIRGAS recomienda la utilización de este modelo para fines analíticos de desplazamiento medio horizontal a lo largo del tiempo calculado. El cuadro 2.5 incluye los valores del vector de rotación (Euler) para algunas de las placas más relevantes del modelo VEMOS15 con solución del Instituto Geográfico Nacional de Francia (IGN). Por otro lado, la figura 2.6 muestra la representación gráfica de la placa Caribe y sus vectores de velocidad respectivos.

**Cuadro 2.5: Vectores de rotación del modelo VEMOS15**

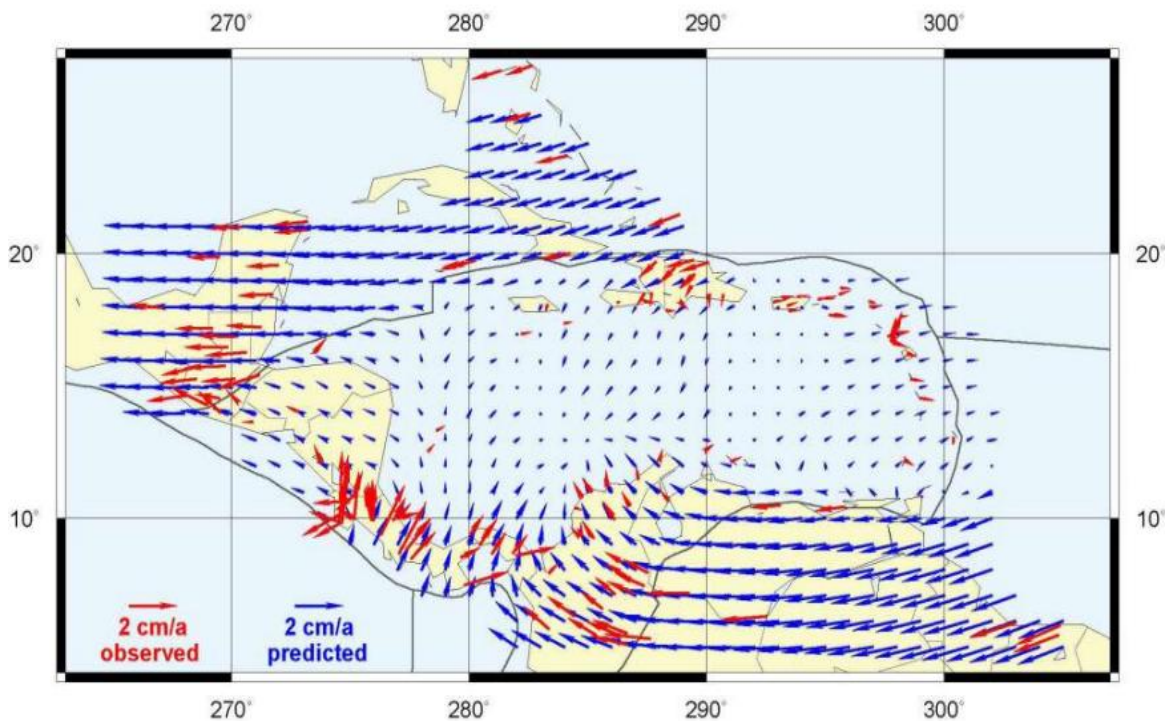
Fuente: (Drewes y Sánchez, 2016)

Placa	VEMOS15		
	Latitud (°)	Longitud (°)	Velocidad (°/Ma)
Caribe	26,4	270,4	1,21
Norteamericana	-0,2	270,1	0,82
Nazca	44,1	258,0	2,21
Sur Americana	-22,2	226,9	0,44

Por otra parte, hoy en día se pueden calcular las deformaciones tectónicas a partir de las velocidades de estaciones geodésicas. Bajo esta premisa se basa APKIM2005 (Actual Plate Kinematic Model). La información contenida en este modelo es basta y consta de varias décadas de información cinemática. Cabe rescatar que la realización de APKIM2005 se basa en el modelo NNR NUVEL-1A como referencia cinemática (Drewes, 2009).

El modelo oficial para el ITRF es el NNR NUVEL-1A, sin embargo, APKIM2005 viene a solventar algunas de sus desventajas geodésicas. Las mismas se pueden enunciar a continuación (Drewes, 2009):

1. En el modelo geológico-geofísico de NNR NUVEL-1A se incluyen solo una docena de placas rígidas sin considerar las zonas de deformación entre cada una.
2. Las velocidades de su modelo, como por ejemplo los rangos de expansión del fondo oceánico, son un promedio de datos en millones de años.



**Figura 2.6: Vectores de velocidad para placa Caribe según VEMOS15**  
Fuente: (Drewes y Sanchez, 2016)

Estas razones dificultan la materialización del ITRF, puesto que la rotación común de todos los puntos en la superficie terrestre debe ser cero y coherente con los parámetros de rotación de la Tierra. De esta forma, APKIM2005 propone una estimación a partir de observaciones geodésicas, caracterizadas por estaciones de medición en distintas zonas de la Tierra, lo que permitiría tener más información y por ende brindar un campo de velocidades más idóneo.

El principio fundamental para el desarrollo de APKIM2005 es el mismo de modelo cinemático NNR (sin rotación de malla, por sus siglas en inglés; no net rotation), en el cual la Tierra es subdividida en bloques o mallas de 1° x 1° (latitud y longitud), con el objetivo de atribuir cada bloque a una zona de deformación y/o placa rígida. Por ende, las velocidades para cada malla son calculadas con los datos de sus rotaciones y deformaciones

continuas. De esta forma, APKIM2005 se convierte en el sucesor del modelo NUVEL-1A, siendo actualmente uno de los principales referentes de cinemática tectónica.

En el cuadro 2.6 se enlista la ubicación de los vectores de rotación para cada una de las placas rígidas consideradas en el modelo APKIM2005. En éste se incluyen latitud (en grados), longitud (en grados) y velocidad (en grados por millones de años). Para la placa Caribe se incluyen los siguientes valores: latitud de 32,6°, longitud de 241,1° y 0.186 °/Ma de velocidad.

**Cuadro 2.6: Vectores de rotación incluidos en el modelo APKIM2005 (IGN)**

Fuente: (Drewes, 2009)

Placa	APKIM2005 (IGN)		
	Latitud (°)	Longitud (°)	Velocidad (°/Ma)
África	48,1	280,7	0,279
Amur	52,8	268,6	0,268
Antártica	61,1	239,5	0,243
Arabia	48,9	3,8	0,599
Anatolia	40,0	28,0	2,021
Australia	32,8	36,7	0,639
Caribe	32,6	241,1	0,186
Eurasia	53,4	264,3	0,259
India	48,2	19,1	0,588
Nazca	45,1	259,9	0,652
Norteamericana	-4,3	275,8	0,194
Okhotsk	-37,4	314,4	0,874
Pacífica	-63,2	110,5	0,671
Suramericana	-14,6	238,0	0,123
Somalia	51,3	274,7	0,308
Sunda	43,2	276,2	0,392
Yangtze	56,6	261,8	0,315

## 2.7 Estimación de velocidades para una estación GNSS

La posición de una estación con respecto a su tiempo permite la estimación de otros aspectos fundamentales para la geodesia moderna. Las series temporales (producto de este cálculo) brindan información sobre los fenómenos que afectan el posicionamiento de la estación. Por esta razón, el presente proyecto calculó mediante un ajuste de mínimos cuadrados la velocidad para cada una de las estaciones consideradas. Esta velocidad se definió al día GPS 1 del año 2013 (época 2013.0) para las estaciones SIRGAS, mientras

que las estaciones UNAVCO, se refirieron a la fecha 1 de diciembre del 2016 (época 2016.92). La diferencia en las épocas seleccionadas se justifica en la disponibilidad de productos UNAVCO, los mismos fueron adquiridos, solamente, con épocas desde el 30 de noviembre del 2016. Esto aplicó para cada estación UNAVCO elegida y encerraba tanto las soluciones de coordenadas, como los valores de velocidad.

El lineamiento para el desarrollo de este procedimiento se basó en lo expuesto por Moya, Bastos y Rivas (2014), en donde se describe el procedimiento necesario para determinar la velocidad de una o varias estaciones GNSS continuas, por medio de un ajuste de mínimos cuadrados. Para realizar este procedimiento se recomienda utilizar las coordenadas promedio semanales de la estación en un tiempo mayor a 24 meses continuos, de manera que se puedan identificar posibles efectos cíclicos (Gemael, Lima Machado y Wandresen, 1994). De esta manera, si se cuenta con los vectores de posición en función del tiempo, los componentes de velocidad se pueden determinar utilizando el algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados. Con el mismo, se pueden estimar las coordenadas y las velocidades de una estación en una época establecida ( $X_o, Y_o, Z_o, V_{x_o}, V_{y_o}, V_{z_o}$ ) así como las desviaciones estándar respectivas (Moya, Bastos, y Rivas, 2014).

Si se supone que una estación de medición continua tiene una posición en el instante  $t_0$  y una velocidad  $V_{t_0}$ , entonces se podría calcular la posición de la estación para cualquier instante diferente de  $t_i$ , utilizando  $i$  como contador inicial hasta el número de días requeridos  $n$ . Es así como se obtienen las ecuaciones de observación para el ajuste de mínimos cuadrados. La ecuación 2.15, describe el algoritmo utilizado para la estimación de velocidades geocéntricas de una o varias estaciones (Moya, Bastos y Rivas, 2014).

$$\begin{aligned}
 X_{t_1} &= X_{t_0} + V_{x_{t_0}} (t_0 - t_1) \\
 X_{t_2} &= X_{t_0} + V_{x_{t_0}} (t_0 - t_2) \\
 X_{t_3} &= X_{t_0} + V_{x_{t_0}} (t_0 - t_3) \\
 &\vdots \\
 X_{t_n} &= X_{t_0} + V_{x_{t_0}} (t_0 - t_n)
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

De esta forma, la matriz de configuración A se conformará con la ecuación 2.16:

$$\mathbf{A}_{n,6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & (t_1 - t_0) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & (t_1 - t_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & (t_1 - t_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & (t_n - t_0) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & (t_n - t_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & (t_n - t_0) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

A continuación, teniendo calculadas las matrices de pesos y de configuración, se puede obtener la matriz de ecuaciones normales, dada con la ecuación 2.17.

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (2.17)$$

La ecuación 2.18 muestra como calcular los coeficientes del miembro absoluto o vector n.

$$\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (2.18)$$

Una vez con la matriz N y el vector n de la ecuación 2.18, se resuelve el vector de incógnitas (con dimensiones 6x1, incluyendo los componentes de coordenadas), incluido en la ecuación 2.19.

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} X_{t0} \\ Y_{t0} \\ Z_{t0} \\ V_{X_{t0}} \\ V_{Y_{t0}} \\ V_{Z_{t0}} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

## 2.8 Estimación del vector de rotación o polo de Euler

Cuando se realiza un modelo cinemático de placas generalmente se utiliza un sistema en el cual se puedan referenciar todos sus movimientos. Esta referencia se ejecuta con el Teorema de Euler y su polo de rotación.

Drewes define el polo de Euler de la siguiente manera: “Cualquier movimiento instantáneo de una placa rígida sobre la superficie de una esfera puede ser descrito única y completamente por una rotación axial” (Drewes, 1982). Aceptando la tectónica de placas,

se debe entonces, determinar el movimiento por medio del establecimiento de un punto superficial, con el objetivo de referir los parámetros de velocidad rotacional ( $\omega$ ) y dirección (latitud y longitud) para la placa (Drewes, 1982).

El teorema de Leonhard Euler define el movimiento de un cuerpo sólido sobre la superficie de cualquier esfera. El mismo puede ser referenciado a un eje establecido, llamado “Polo de Euler”. Los geólogos han aplicado esta definición para comprender más abiertamente, el movimiento de las placas tectónicas. Lo que sucede en sus bordes, depende de la dirección del movimiento y la orientación de cada límite. El teorema resulta en un eje matemático que corta la Tierra en dos, pasando por su centro. A este eje también se le puede llamar eje de rotación, y sus extremos se denominan: polos de rotación (ver figura 2.3). Estos puntos no tienen valor físico, pero su posición determina la dirección de movimiento en todos los puntos dentro de la placa. La magnitud de la velocidad angular referida al eje de rotación define también la magnitud del movimiento relativo entre las dos placas. Cabe destacar que si la velocidad angular ( $\omega$ ) es grande, no significa que el movimiento de la placa sea grande también (Fowler, 2005).

El teorema Euler se basa en la ecuación 2.20 y se formula con la posición geocéntrica XYZ de una o varias estaciones dentro de la placa en estudio (Gouadarzi y Santerre, 2014).

$$v_i^p = \Omega^p x X_i = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}^p \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i \quad (2.20)$$

Donde,  $v_i^p$  es la velocidad de la estación  $i$  sobre la placa  $p$ , mientras que  $\Omega^p$  es el vector Euler con sus respectivos componentes  $(\omega_x^p, \omega_y^p, \omega_z^p)^T$  y  $X_i$  es la posición geocéntrica de la estación  $(X, Y, Z)$ . De esta forma, la magnitud del vector Euler  $|\Omega^p|$  es el rango de rotación de la placa  $p$  alrededor de su polo, y generalmente se expresa en grados por millones de años ( $^\circ/\text{Ma}$ ) (Gouadarzi y Santerre, 2014).

Si se tienen los parámetros del polo de Euler, se puede calcular la velocidad de cualquier punto sobre la Tierra (preferiblemente en la placa respectiva). Si se tiene la posición geocéntrica  $X_i (X_i, X_y, X_z)^T$  de la estación  $i$  sobre la placa  $p$  y su matriz de covarianza  $\Sigma_{\Omega^p}$ , entonces también se puede conocer la velocidad de ésta con respecto al polo de rotación Euler. El cálculo se realiza con la ecuación 2.21:

$$v_i^{(\text{ECEF})} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}_{i^{(\text{ECEF})}} = \begin{bmatrix} 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \end{bmatrix}_{i^{(\text{ECEF})}} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}^p = \begin{bmatrix} z_i \omega_y^p & - & y_i \omega_z^p \\ x_i \omega_z^p & - & z_i \omega_x^p \\ y_i \omega_x^p & - & x_i \omega_y^p \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Por otro lado, si se tiene la posición  $(X_i, X_y, X_z)^T$  de varias estaciones sobre la placa  $p$ , además de sus velocidades respectivas, se puede inferir la ubicación del polo de Euler mediante la ecuación 2.22, cuyo objetivo principal es obtener  $\Omega^p = (\omega_x^p, \omega_y^p, \omega_z^p)^T$ . Utilizando el algoritmo de mínimos cuadrados se tendría que el vector de observación  $L = (V_1 \dots V_n)^T$  y la matriz de rotación  $A = (X_1 \dots X_n)^T$ . Por otra parte, las unidades de pesos de las observaciones se representan en la matriz  $P$ , mientras que el vector de incógnitas viene dado por la ecuación 2.23.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}_{3n \times 1}^p = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}_{3n \times 3}^p \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{3 \times 1}^p \quad (2.22)$$

$$\Omega^p = (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (2.23)$$

## Capítulo 3: Metodología

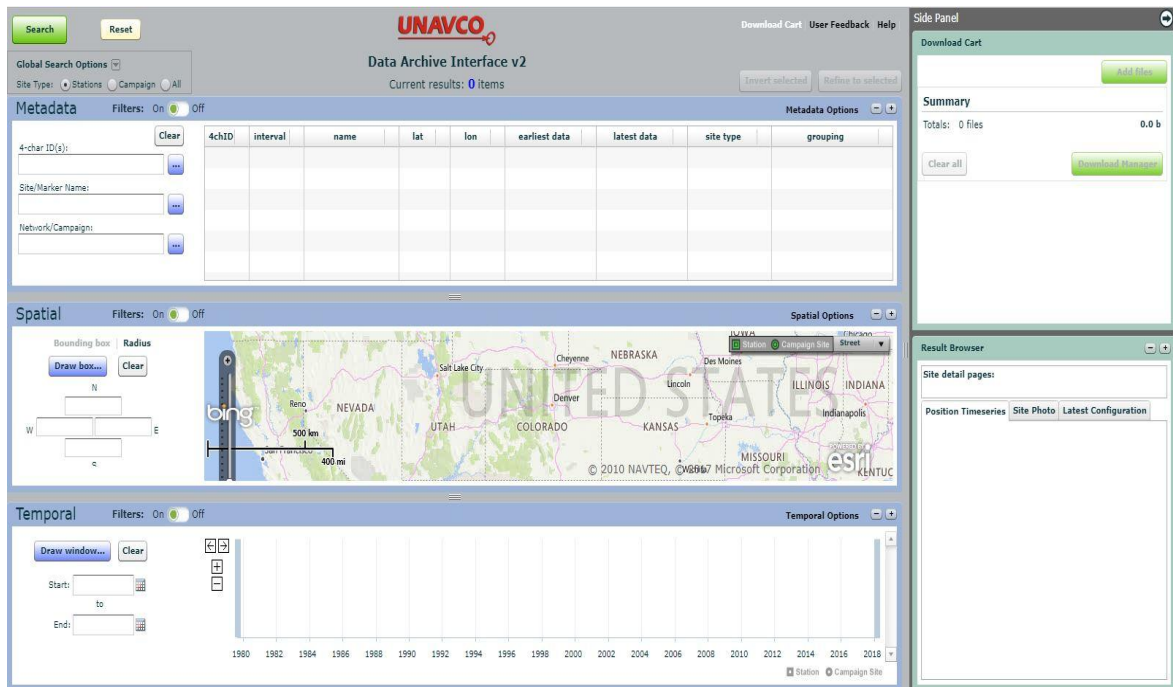
La metodología en este documento incluye los procesos necesarios para cumplir con los objetivos. Entre los procesos ejecutados se pueden mencionar la elección de estaciones GNSS de medición continua y su período de procesamiento, la determinación de la estrategia de procesamiento, la evaluación estadística de las coordenadas resultantes, la programación de rutinas para la detección de valores atípicos, la depuración del vector de coordenadas, la creación de rutinas para la estimación de velocidades y su polo de rotación respectivo.

### 3.1 Red de estaciones considerada

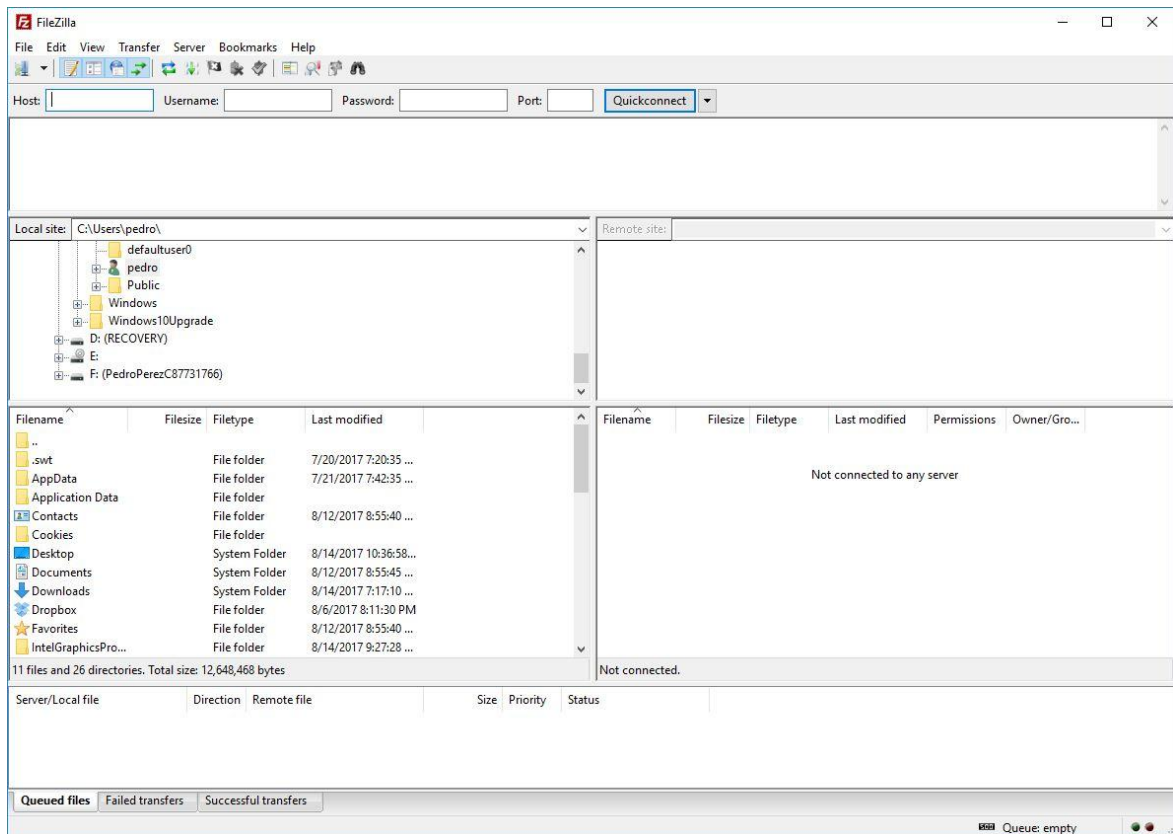
La selección de estaciones GNSS de la red SIRGAS y del sistema UNAVCO se llevó a cabo con el fin de obtener representatividad de la placa tectónica Caribe. La elección tomo en cuenta los siguientes aspectos (ordenados por prioridad):

1. Accesibilidad a los datos GNSS: Este aspecto fue el más importante a la hora de seleccionar las estaciones puesto que fue fundamental para la validación del modelo cinemático. Además de los datos de posicionamiento, se tomó en cuenta el acceso a las velocidades y series de tiempo definidas por cada entidad. Se encontró que tanto SIRGAS como UNAVCO brindaban los insumos mencionados.
2. La ubicación dentro de la placa Caribe: De esta forma se garantizó que solo estaciones dentro de la placa brindaran información cinemática para el modelado de la placa. Se señala además que el Bloque de Panamá se consideró como parte de ésta.
3. La consistencia de los datos: Cada estación debía cumplir con al menos 30 meses de observaciones GNSS continuas, pero tomando en cuenta la recomendación dada por Blewitt y Lavallée (2002).

Para la decisión definitiva, se realizó un inventario de 30 estaciones, todas dentro de los límites tectónicos establecidos por la capa \*.kml ofrecida por UNAVCO en su página web (UNAVCO, 2015). Enseguida, se descartaron aquellas estaciones que no tuvieran la suficiente consistencia de datos. Para lo anterior, cada estación se verificó utilizando el sistema *Data Archive Interface v2* (ver figura 3.1), el cual permite visualizar y descargar datos relacionados a cualquiera de sus estaciones GNSS. Asimismo, se utilizó el programa computacional gratuito llamado *FileZilla*, que permite obtener archivos alojados en FTP (ver figura 3.2).



**Figura 3.1: Sistema para la descarga/recuperación de archivos UNAVCO**  
 Fuente: <http://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-access-methods/dai2/app/dai2.html#>



**Figura 3.2: Interfaz del software FTP FileZilla**  
 Fuente: <https://filezilla-project.org>

Estos dos programas evidenciaron las estaciones que no cumplían a cabalidad con los 3 aspectos mencionados anteriormente. De esta manera, se redujo el inventario inicial de 30 estaciones a solo 17, las cuales contaban con los insumos necesarios. Por lo tanto, en las figuras 3.3 y 3.4 se describen geográficamente las estaciones SIRGAS y UNAVCO, respectivamente. Mientras que la figura 3.5 incluye ambas redes seleccionadas.

La ubicación de cada estación puede ser consultada en el cuadro 3.1, mientras que las coordenadas aproximadas según el archivo \*.log, se incluyen en los cuadros 3.2 y 3.3. Las fichas de información para estación se pueden consultar en el anexo 4, dentro del CD adjunto.

**Cuadro 3.1: Ubicación de estaciones GNSS consideradas**

Fuente: Elaboración propia con base en archivos \*.log

	<b>Estación</b>	<b>Ubicación</b>
<b>1</b>	BGGY	Antigua y Barbuda
<b>2</b>	CN09	Haití
<b>3</b>	CN12	Kingston, Jamaica
<b>4</b>	CN20	Isla Boca, Panamá
<b>5</b>	CN28	Contadora, Panamá
<b>6</b>	CN35	Ciudad Vieja, Colombia
<b>7</b>	CRO1	Saint Croix, Islas Vírgenes
<b>8</b>	ETCG	Heredia, Costa Rica
<b>9</b>	GUAT	Guatemala, Guatemala
<b>10</b>	LMMF	Le Lamentin, Martinica
<b>11</b>	MANA	Managua, Nicaragua
<b>12</b>	MAYZ	Mayaguez, USA
<b>13</b>	PNE2	Playa Negra, Costa Rica
<b>14</b>	ROA0	Roatan, Honduras
<b>15</b>	SCUB	Santiago, Cuba
<b>16</b>	SMRT	Sait Marten, Holanda
<b>17</b>	SSIA	San Salvador, El Salvador

**Cuadro 3.2: Número DOMES y coordenadas aproximadas de estaciones SIRGAS**

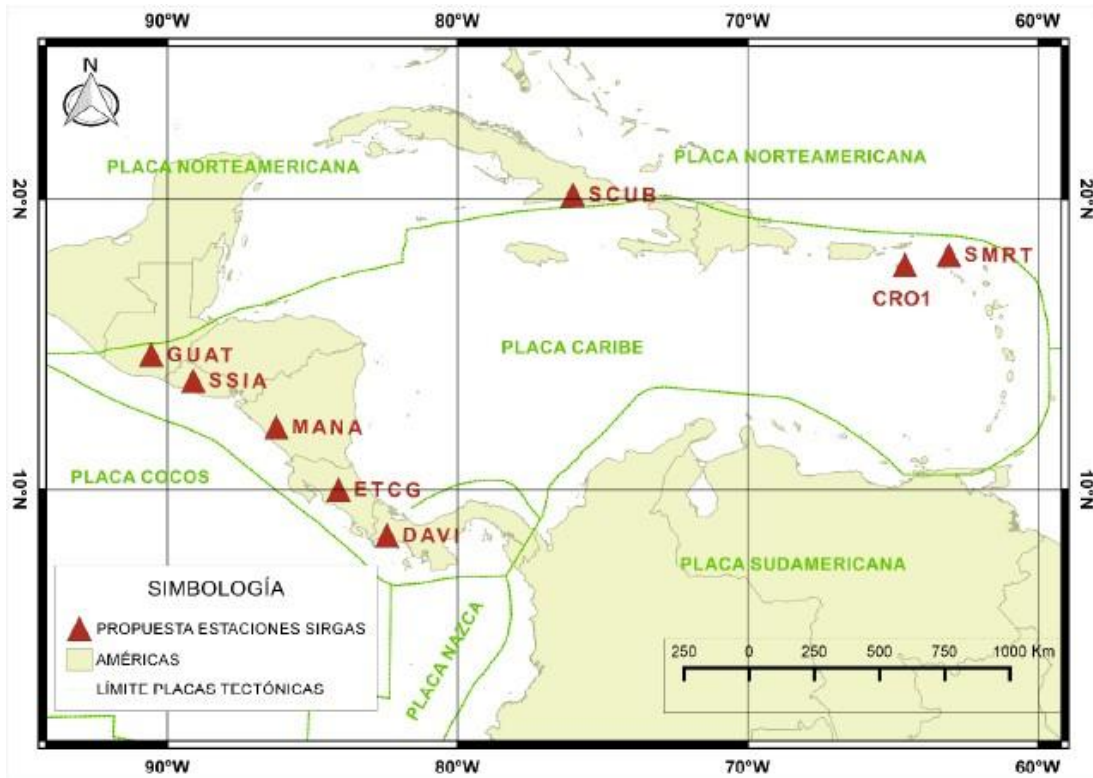
Fuente: Elaboración propia con base en archivos \*.log

Estación	IERS Número DOMES	Coordenadas Aproximadas SIRGAS		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
CRO1	43201M001	2607771,490	-5488077,000	1932768,060
ETCG	40602M001	645208,160	-6249842,250	1100399,350
GUAT	40901S001	-56063,580	-6174978,670	1596665,270
LMMF	97205M001	2993387,950	-5399363,730	1596748,040
MANA	41201S001	407981,840	-6222925,710	1333528,970
SCUB	40701M001	1474538,180	-5811243,380	2168958,810
SMRT	43102S001	2743826,070	-5410452,180	1962822,940
SSIA	41401S001	95610,060	6197817,150	1500617,940

**Cuadro 3.3: Coordenadas aproximadas de las estaciones UNAVCO**

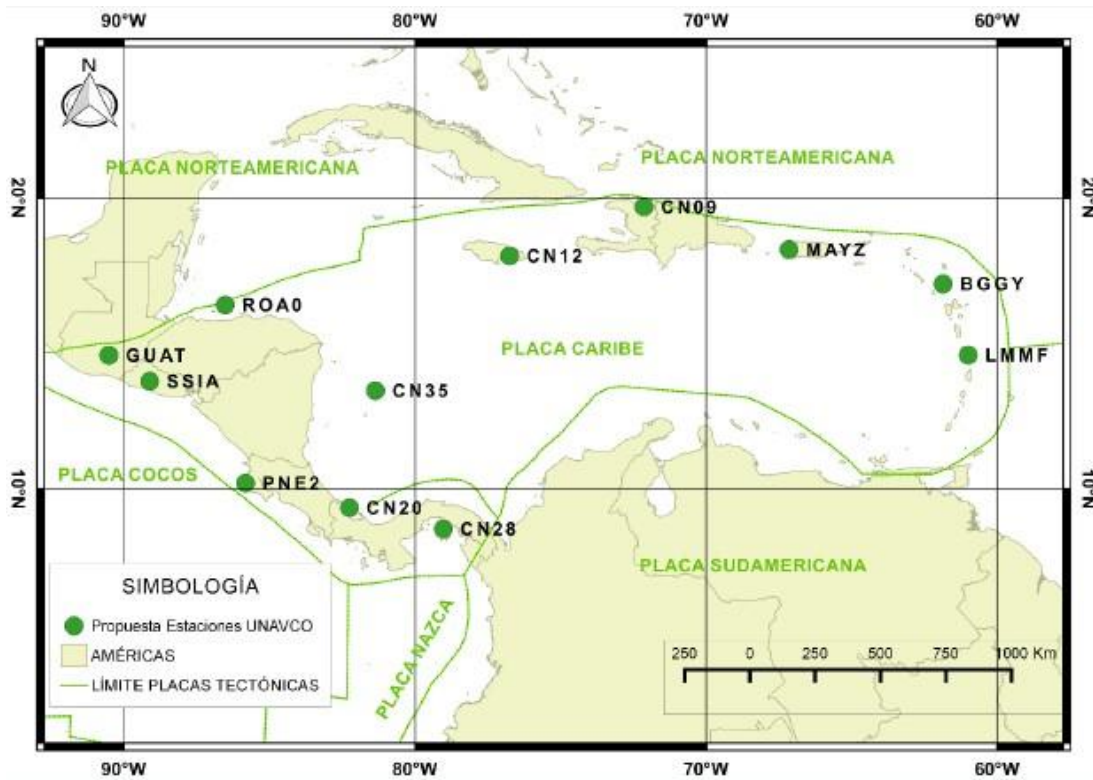
Fuente: Elaboración propia con base en archivos \*.log

	Estación	Coordenadas Aproximadas UNAVCO		
		X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>1</b>	BGGY	2876833,430	-5379037,460	1857683,290
<b>2</b>	CN09	1842524,150	-5718073,820	2135187,450
<b>3</b>	CN12	1390866,620	-5906361,360	1958908,750
<b>4</b>	CN20	848061,450	-6236542,800	1029565,330
<b>5</b>	CN28	1199695,860	-6191349,460	950191,520
<b>6</b>	CN35	932030,510	-6135904,640	1465863,000
<b>7</b>	CRO1	2607771,490	5488077,000	1932768,060
<b>9</b>	GUAT	-560603,580	-6174978,670	1596665,270
<b>10</b>	LMMF	29933807,950	-5399363,730	1596748,040
<b>11</b>	MANA	407981,840	-6222925,710	1333528,970
<b>12</b>	MAYZ	2352522,540	-5585192,410	1981275,420
<b>13</b>	PNE2	456674,490	-6261467,520	1121500,770
<b>14</b>	ROA0	370952,760	-6111586,550	1780541,850
<b>15</b>	SCUB	1474538,180	-5811243,380	2168958,810
<b>16</b>	SMRT	2743826,070	-5410452,180	1962822,940
<b>17</b>	SSIA	95610,060	6197817,150	1500617,940



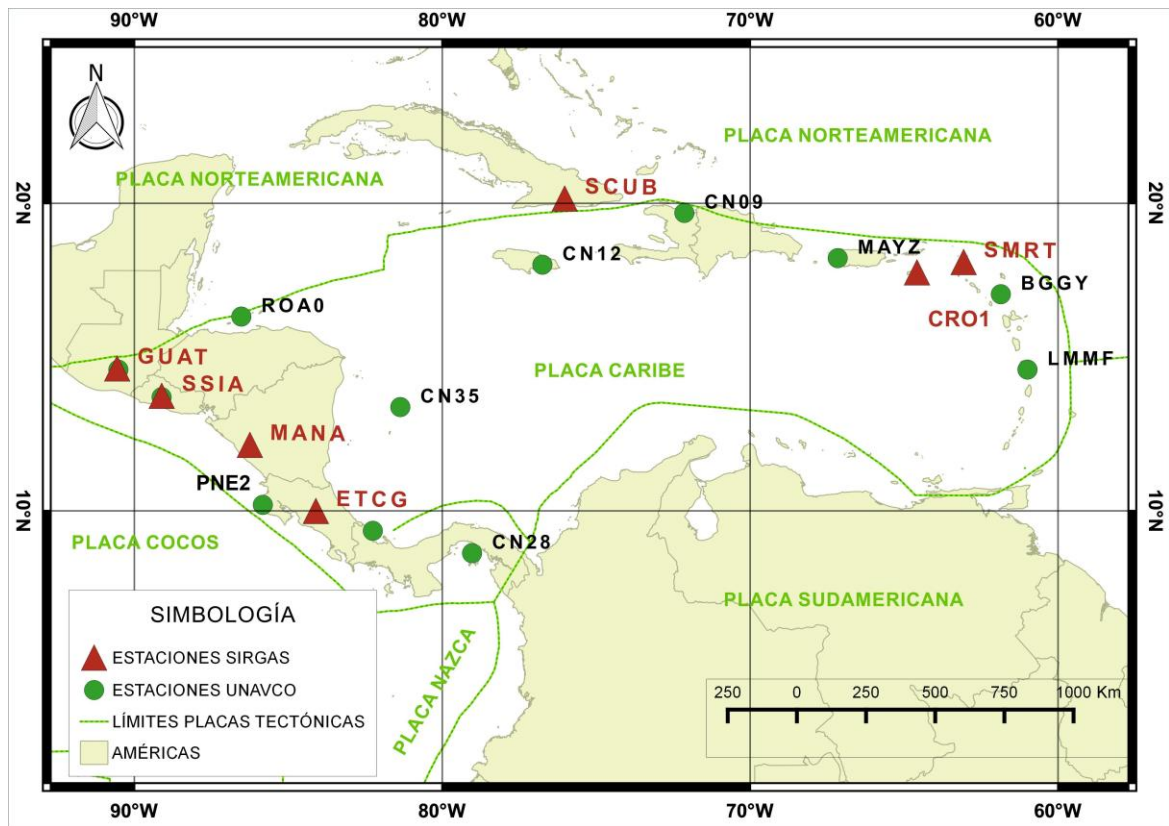
**Figura 3.3: Red de estaciones SIRGAS**

Fuente: Elaboración propia basada en los límites tectónicos definidos por UNAVCO



**Figura 3.4: Red de estaciones SIRGAS-UNAVCO**

Fuente: Elaboración propia basada en los límites tectónicos definidos por UNAVCO



**Figura 3.5: Red de estaciones SIRGAS-UNAVCO**

Fuente: Elaboración propia basada en los límites tectónicos definidos por UNAVCO

### 3.2 Período de procesamiento

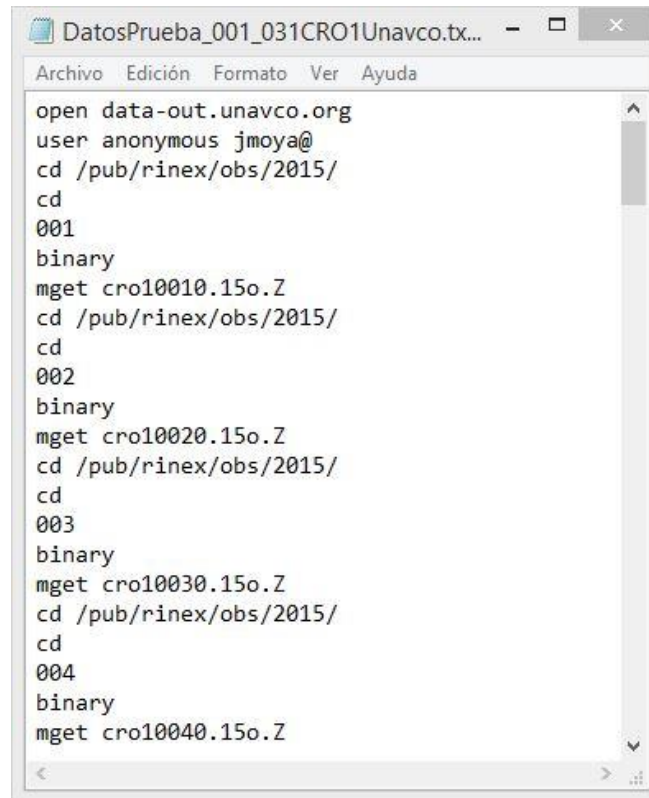
En el estudio realizado por Blewitt y Lavallée (2002), se aportan fundamentos y metodologías fiables con los que se pueden disminuir los aspectos mencionados, recomendando un tiempo adecuado para la estimación de movimiento tectónico o la producción de marcos de referencia. El tiempo mencionado es de al menos 30 meses continuos de señal satelital. Por consiguiente, el presente documento adopta el mismo período, haciendo la salvedad de la poca disponibilidad de datos en algunas estaciones.

Basado en lo anterior, se procedió a elegir el período que va desde la semana GPS 1721 hasta la semana 1856, el cual corresponde a los años 2013, 2014 y la primera mitad del 2015 (hasta 31 de julio). Se tomaron en cuenta las estaciones seleccionadas para la descarga de datos, sin embargo, algunas no llenaron la totalidad debido a diferentes factores propios de la estación GNSS.

#### 3.2.1 Descarga de datos

Una vez realizada la selección de estaciones GNSS, se procedió a la descarga de datos de observación (\*.??o), según el período de procesamiento definido. De esta forma se

descargaron dos años y medio de datos, siguiendo la disponibilidad de cada estación. Este proceso se efectuó haciendo uso de archivos DOS batch, o \*.bat (ver figura 3.6), diseñados para la descarga oportuna de datos. De igual manera, el proceso de descarga se complementó con el sistema UNAVCO y el programa FileZilla, mencionados anteriormente.



```
open data-out.unavco.org
user anonymous jmoya@
cd /pub/rinex/obs/2015/
cd
001
binary
mget cro10010.15o.Z
cd /pub/rinex/obs/2015/
cd
002
binary
mget cro10020.15o.Z
cd /pub/rinex/obs/2015/
cd
003
binary
mget cro10030.15o.Z
cd /pub/rinex/obs/2015/
cd
004
binary
mget cro10040.15o.Z
```

**Figura 3.6: Script para la descarga de archivos**  
Fuente: elaboración propia para la estación CRO1

Para la descarga en el *Data Archive Interface v2*, se brindó el nombre de la estación y, automáticamente, el sistema desplegaba la disponibilidad de datos y todos los insumos ofrecidos por la entidad. En este caso, se realizaba una búsqueda por tiempo, donde se indicaba el período de procesamiento y seguido, el sistema ofrecía el proceso de descarga. Por otra parte, el sistema FileZilla, requería la dirección de FTP, así como el usuario y contraseñas respectivas, seguido de la búsqueda temporal y la posibilidad de descarga inmediata.

Cabe mencionar que las metodologías de UNAVCO y FileZilla fueron utilizadas como complemento a la descarga con archivos \*.bat, buscando obtener de manera inmediata la disponibilidad de datos para cada una de las estaciones. No se utilizaron como proceso principal debido a que estos sistemas duraban más tiempo que los archivos DOS batch.

### 3.3 Estrategia de procesamiento

La estrategia de procesamiento debía poseer ciertas características con tal de agilizar las labores. Entre ellas, la posibilidad de procesar gran cantidad de datos con el menor tiempo y recursos posibles.

Después de experimentar con distintos servicios PPP, se concluyó que GAPSoffline, de la Universidad de New Brunswick (UNB) en Canadá, brindaba mayores beneficios durante la ejecución del proyecto. Este servicio destacó su nivel de eficiencia y versatilidad, el cual incluía la posibilidad de examinar y modificar los parámetros de procesamiento, según las necesidades del usuario. Por otra parte, el funcionamiento de GAPS es un poco distinta a otros servicios PPP. La sintaxis de sus comandos permite modificar e incluir los parámetros de procesamiento deseados (ver cuadro 3.4).

**Cuadro 3.4: Sintaxis de comandos GAPS para el procesamiento de datos**  
Fuente: Elaboración propia basado en la información suministrada por académicos UNB

<b>Comando</b>	<b>Significado</b>
filename	Nombre del archivo
GPSorb	Órbita GPS a utilizar
GPSclk	Producto de reloj GPS a utilizar
tp	Modo de posicionamiento (estático=0 y cinemático=1)
orbitType	Tipo de órbita satelital ('repro1' o 'std')
el	Máscara de elevación definida por el usuario
cpsd	Desviación estándar de la portadora de fase
prsd	Desviación estándar del seudo rango
cllim	Condición de convergencia
max_it	Máximo número de iteraciones
doplim	Máximo valor de GDOP permitido
clk_interp	Interpolación del reloj estático
nadtype	Se elige entre vmf1, unbvmf1,unbvmf1c,unbvmf1cmc, unbvmf1p, unb3m,gpt2
Gobs	Observaciones GPS por considerar
nad_est	Estimaciones del datum norteamericano
map	Función de mapeo a utilizar
nsd	Desviación estándar inicial del datum norteamericano
nrw	Ruido aleatorio del datum norteamericano
gradient	Estimación de los Gradientes horizontales en la tropósfera
nhzg	Desviación estándar de los gradientes horizontales
nrwhg	Gradientes del ruido aleatorio

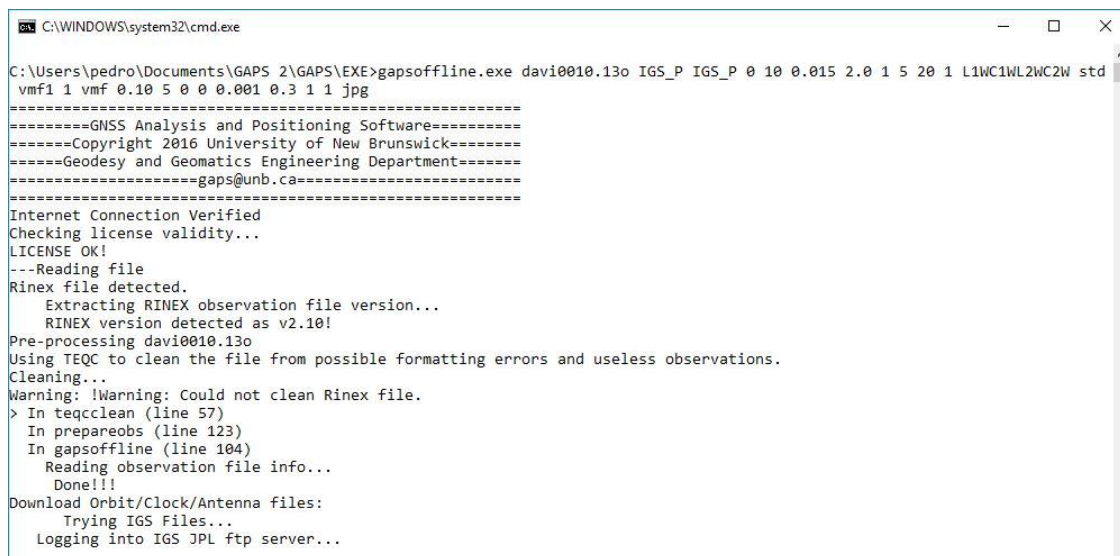
La sintaxis GAPS se conforma con una serie de comandos preestablecidos, los cuales también fueron brindados por los académicos de UNB. A continuación, se incluye la sintaxis establecida para posicionamiento estático:

*filename,GPSorb,GPSclk,tp,el,cpsd,prsd,cllim,max\_it,doplim,clk\_interp,Gobs,orbitType,na dtpe,nad\_est,map,nsd,nrw,gradient,apriori\_grad,nhzg,nrwhg,ot,bt,pic*

Los comandos definidos para el procesamiento GAPS durante la ejecución de este proyecto, se incluyen enseguida:

*gapsoffline.exe ETCG0900.14o IGS\_P 0 10 0.015 2.0 1 5 20 1 L1WC1WL2WC2W std vmf1 1 vmf 0.10 5 0 0 0.001 0.3 1 1 jpg*

Cabe mencionar que los comandos anteriores fueron recomendados por el personal universitario, haciendo la salvedad que proporcionan los mejores resultados en modo de posicionamiento estático (ver figura 3.7)) (ver anexo 5 en CD adjunto).



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Users\pedro\Documents\GAPS 2\GAPS\EXE>gapsoffline.exe davi0010.13o IGS_P IGS_P 0 10 0.015 2.0 1 5 20 1 L1WC1WL2WC2W std vmf1 1 vmf 0.10 5 0 0 0.001 0.3 1 1 jpg
=====GNSS Analysis and Positioning Software=====
=====Copyright 2016 University of New Brunswick=====
=====Geodesy and Geomatics Engineering Department=====
=====gaps@unb.ca=====
Internet Connection Verified
Checking license validity...
LICENSE OK!
---Reading file
Rinex file detected.
  Extracting RINEX observation file version...
  RINEX version detected as v2.10!
Pre-processing davi0010.13o
Using TEQC to clean the file from possible formatting errors and useless observations.
Cleaning...
Warning: !Warning: Could not clean Rinex file.
> In teqc clean (line 57)
  In prepareobs (line 123)
  In gapsoffline (line 104)
  Reading observation file info...
  Done!!!
Download Orbit/Clock/Antenna files:
  Trying IGS Files...
  Logging into IGS JPL ftp server...
```

**Figura 3.7: Comando GAPS recomendado por la Universidad de New Brunswick**

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, el procesamiento GAPS se realizó utilizando dos opciones: archivos comprimidos (\*.rar) y archivos ejecutables (\*.bat). Para la primera opción, se incluyó un año de datos dentro de cada archivo comprimido, es decir, tres archivos por estación. Para la segunda opción, se confeccionaron 3 archivos con los comandos respectivos para cada estación, los cuales abarcaron un año de datos cada uno. Para ambas opciones, el tiempo de procesamiento completo (en sus dos años y medio) fue cercano a las 24 horas por estación. La siguiente es una lista de productos GAPS tras el procesamiento respectivo:

- Resultados principales: Incluidos en un archivo \*.html donde se incluyen datos generales de procesamiento. Las opciones seleccionadas por usuario pueden ser consultadas en este apartado (mismas que se utilizaron en la sintaxis de comando). Igualmente, se pueden examinar aspectos como la información del equipo receptor, datos atmosféricos, coordenadas a-priori, coordenadas finales (en sistema cartesiano, con sus respectivas desviaciones estándar, así como en el sistema geodésico), entre otros. Conjuntamente, se hace referencia a los gráficos de cada elemento de procesamiento.
- Gráficos representativos con base al tiempo de observación (ver anexo 6 en CD adjunto):
  - Estimaciones de ambigüedad
  - Retraso del reloj en el receptor.
  - Comportamiento de la desviación estándar de los componentes tridimensionales.
  - Comportamiento del DOP (dilución de precisión, según las siglas en inglés).
  - Satélites GPS utilizados en la solución del Ruido Pseudo Aleatorio (PRN).
  - Retraso ionosférico vertical y su desviación estándar.
  - Retraso atmosférico neutral y su desviación estándar.
  - Residuos de la portadora de fase y pseudo rango.
- Archivo de ubicación en formato \*.kml.
- Archivo comprimido incluyendo la totalidad de los resultados.

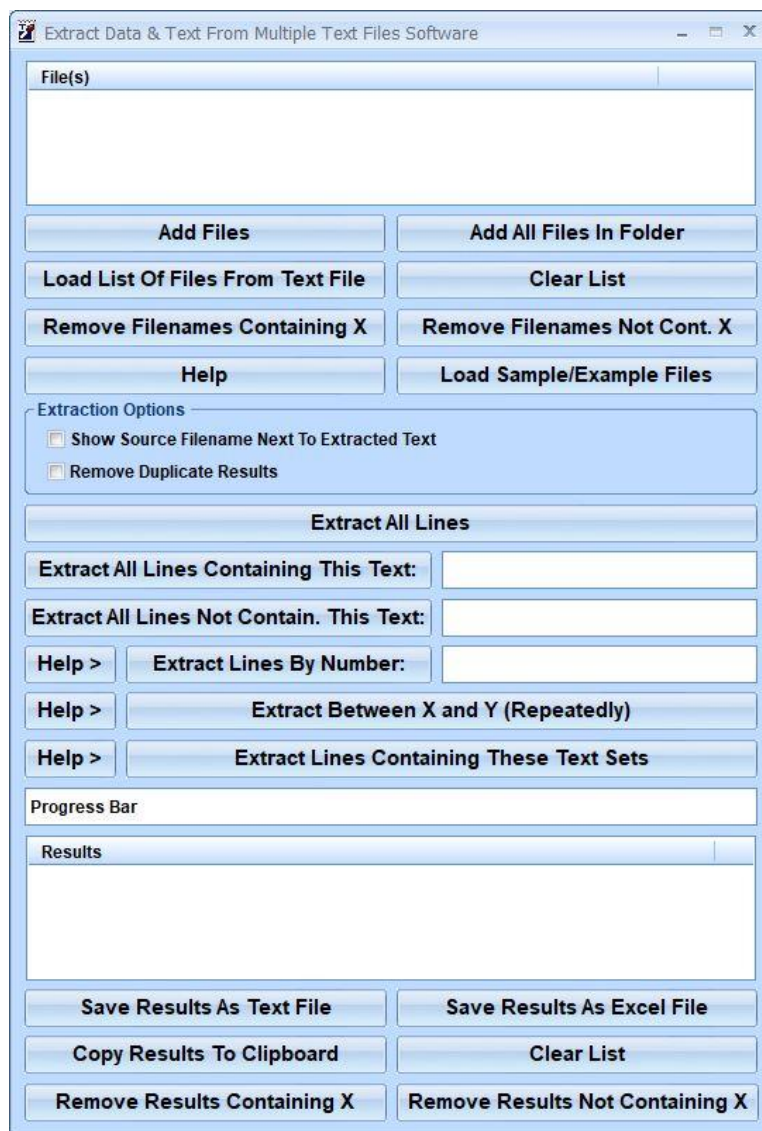
### 3.3.1. Extracción de las coordenadas GAPS

A pesar de que GAPS ofrece gran variedad de formatos y gráficos en sus resultados, sus coordenadas finales y desviaciones estándar se brindan, solamente, en formato de *lenguaje de marcas de hipertexto* (\*.html, por sus siglas en inglés). Este formato es correcto para un conjunto de datos esporádicos, pero no así para un posicionamiento diario con ciclos largos similares a los necesarios en la estimación de velocidades. De esta manera y con el objetivo de extraer las coordenadas diarias de cada estación, se procedió a convertir los archivos html a formato \*.txt utilizando la rutina gratuita denominada “*HTMLAsText*”, en su versión 1.11 (Sofer, 2004).

Consecutivamente, y con miras a la extracción de datos, se utilizó el software “*Extract Data & Text From Multiple Text Files*” de la compañía SWREG (DR MyCommerce, 2013), cuya licencia fue adquirida con recursos personales (ver figura 3.8). Este programa permitió la extracción de coordenadas procesadas (resultados GAPS) a partir de los archivos \*.txt ya mencionados. De esta misma manera, también se consiguieron las desviaciones estándar diarias y los días GPS respectivos. Todos estos factores fueron necesarios en la conformación de archivos de entrada para las rutinas programadas (ver anexo 8 en CD adjunto).

Por ende, el producto final de procesamiento se resume en una plantilla de cálculo digital para cada estación GNSS. Estos archivos contienen formato de 7 columnas, incluyendo el día GPS (columna 1, ordenados por años), coordenadas X, Y, Z (columnas de la 2 a la 4) y sus desviaciones estándar (columnas 5, 6 y 7). Un ejemplo del formato final de procesamiento para cada una de las estaciones se puede consultar en el cuadro 3.5.

La cantidad de archivos crudos utilizados contra la cantidad de archivos procesados, según la estación y el año se puede analizar en el capítulo 4.



**Figura 3.8: Interfaz gráfica de Extract Data & Text From Multiple Text Files**  
Fuente: (DR MyCommerce, 2013)

**Cuadro 3.5: Ejemplo del producto final de procesamiento GAPS**

Fuente: Elaboración propia

Día GPS	X(m)	Y(m)	Z(m)	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
1	2876851,0037	-5379084,6744	1857712,4495	0,0017	0,0021	0,0009
2	2876850,9898	-5379084,6737	1857712,4474	0,0017	0,0022	0,0009
3	2876850,9878	-5379084,6698	1857712,4490	0,0017	0,0022	0,0009
4	2876850,9874	-5379084,6726	1857712,4493	0,0017	0,0021	0,0008
5	2876850,9857	-5379084,6759	1857712,4480	0,0017	0,0021	0,0009
6	2876850,9869	-5379084,6795	1857712,4520	0,0018	0,0022	0,0009
7	2876850,9882	-5379084,6946	1857712,4509	0,0018	0,0022	0,0009
8	2876850,9811	-5379084,6689	1857712,4416	0,0017	0,0021	0,0008
9	2876850,9899	-5379084,6739	1857712,4477	0,0018	0,0023	0,0009
10	2876850,9898	-5379084,6890	1857712,4533	0,0018	0,0023	0,0009
11	2876851,0036	-5379084,6778	1857712,4472	0,0017	0,0021	0,0009
12	2876851,0000	-5379084,6791	1857712,4491	0,0017	0,0021	0,0008
13	2876850,9760	-5379084,6704	1857712,4473	0,0017	0,0021	0,0009
14	2876850,9735	-5379084,6631	1857712,4455	0,0017	0,0021	0,0008
15	2876850,9780	-5379084,6621	1857712,4423	0,0017	0,0021	0,0008
16	2876850,9918	-5379084,6700	1857712,4448	0,0017	0,0021	0,0008

### 3.4 Evaluación estadística de coordenadas GAPS

Después de ordenar los resultados GAPS en plantillas de cálculo, se inició la evaluación estadística con el fin de detectar posibles valores atípicos que degradarían o no, la calidad de cálculos posteriores.

La estadística denomina valor atípico a toda aquella observación que se considere diferente, al punto de sospechar que fue generada por un mecanismo diferente al original (Hawkins, 1980). Debido a que, eventualmente, los resultados se compararían con datos SIRGAS y UNAVCO, se decidió inspeccionar las coordenadas resultantes, con el fin de definir su distribución estadística y sus posibles valores atípicos.

Siguiendo las recomendaciones de Kennedy y Neville (1982) donde se enfatiza que una de las tareas más importante en la estadística de mediciones es establecer el tipo de distribución al que pertenece un grupo de datos, se procedió a ejecutar la prueba denominada Kolmogorov-Smirnov (KS por sus siglas). Esta prueba determina el grado de compatibilidad con respecto a una distribución estadística específica. Debido a que, tanto el test de Grubbs como el Criterio de Chauvenet asumen una distribución normal, la prueba de KS se realizó con el fin de determinar el grado de normalidad de las series de coordenadas GAPS.

Por otra parte, con miras a la evaluación efectiva de los resultados GAPS, se obtuvieron los histogramas de cada estación, permitiendo de esta manera, un complemento al análisis estadístico. La ejecución de estos gráficos se realizó tomando en cuenta la información completa de cada componente XYZ, por ende, se obtuvieron 3 histogramas por estación. Los resultados de este procedimiento se mencionan en el apartado 4.2.

### 3.5 Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov

Con tal de detectar valores atípicos en el vector de coordenadas PPP y buscar la consistencia de información, se aplicaron los criterios estadísticos de Grubbs y Chauvenet. Los mismos tienen como finalidad la detección de datos atípicos para, posteriormente, ser eliminados según se requiera (ver apartado 3.6). Ambos algoritmos asumen distribución normal de sus datos de entrada y, por lo tanto, se debió aplicar la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Para aplicar esta prueba, se utilizaron plantillas de cálculo que incorporaban la información básica del resultado PPP, tales como año y día GPS, además de sus coordenadas XYZ. Con estos datos, se trabajó individualmente para cada componente tridimensional, aplicando el mismo criterio para cada una. Es en este momento cuando se establecieron las hipótesis estadísticas, las cuales se afirman a continuación:

H<sub>0</sub>: La colección de datos sigue una distribución normal

H<sub>1</sub>: La colección de datos NO sigue una distribución normal.

Seguidamente, se ordenaron los valores de cada coordenada en orden ascendente, tomando en cuenta su signo con el fin de no afectar los cálculos posteriores, entre los cuales se pueden mencionar la frecuencia relativa acumulada (H<sub>i</sub>), la estandarización (Z<sub>i</sub>) y su respectiva probabilidad (P(Z<sub>i</sub>)), y los valores de D+ y D- (ver anexo 7 en CD adjunto para la prueba de Kolmogorov-Smirnov). Para H<sub>i</sub> se utilizó el cociente de i/n, donde i es número consecutivo y n es el número de observaciones. Enseguida, el valor de Z<sub>i</sub> se obtuvo con la ecuación 3.1 de estandarización, la cual normaliza los errores cuando los parámetros de población son conocidos. Para esto, se usó la connotación siguiente (donde X es el valor individual, μ es el promedio de la serie y σ es la desviación estándar) (Meza, 2016):

$$Z_i = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \quad (3.1)$$

De inmediato, se obtuvieron los valores normalizados de cada observación por medio de la tabla de distribución normal acumulativa. Estos valores eran imprescindibles para calcular D+ y D-, los cuales se obtuvieron obteniendo la diferencia entre H<sub>i</sub> - P(Z<sub>i</sub>) y H<sub>i-1</sub> - P(Z<sub>i</sub>), respectivamente.

En este punto, se prosiguió a definir D, para lo cual se tomó el valor mayor entre D+ y D-. De esta manera, con una confianza de 95% ( $\alpha = 0,05$ ), y por definición KS se tuvo que  $C_\alpha$  era 0,895, mientras que K(n) se calculó según el cuadro 3.6 (Meza, 2016)

**Cuadro 3.6: Cálculo de  $C_\alpha$  y K(n) según distribución estadística**

Fuente: (Meza, 2016)

$C_\alpha$	$\alpha$			K(n)
Modelo	0.1	0.05	0.01	
General	1,224	1,358	1,628	$\sqrt{n}+0,12+\frac{0,11}{\sqrt{n}}$
Normal	0,819	0,895	1,035	$\sqrt{n}-0,01+\frac{0,85}{\sqrt{n}}$
Exponencial	0,990	1,094	1,308	$\sqrt{n}+0,12+\frac{0,11}{\sqrt{n}}$
Weibull $n = \infty$	0,803	0,874	1,007	$\sqrt{n}$

Basado en el siguiente criterio, se procedió a rechazar o aceptar la  $H_0$  planteada para cada estación, en cada uno de sus componentes tridimensionales:

Si  $D \leq D_\alpha =$  se acepta  $H_0$

Si  $D > D_\alpha =$  se rechaza  $H_0$

### 3.6 Programación de rutina para la detección de valores atípicos

Se desarrolló una rutina MatLab® que permitió detectar automáticamente la cantidad de valores atípicos y sus días GPS respectivos. Para elaborar esta rutina, se manejaron ambos criterios, Chauvenet y Grubbs, siguiendo las formulaciones detalladas en el apartado teórico de este documento (capítulo 2.4.2).

La rutina lleva el nombre de Cha-Gru y su objetivo principal era detectar los valores atípicos de una serie de coordenadas mediante el Criterio de Chauvenet y el Test de Grubbs. Adherido a esto, se incluyó la posibilidad de agregar los valores promedio y desviación estándar de cada componente coordenado.

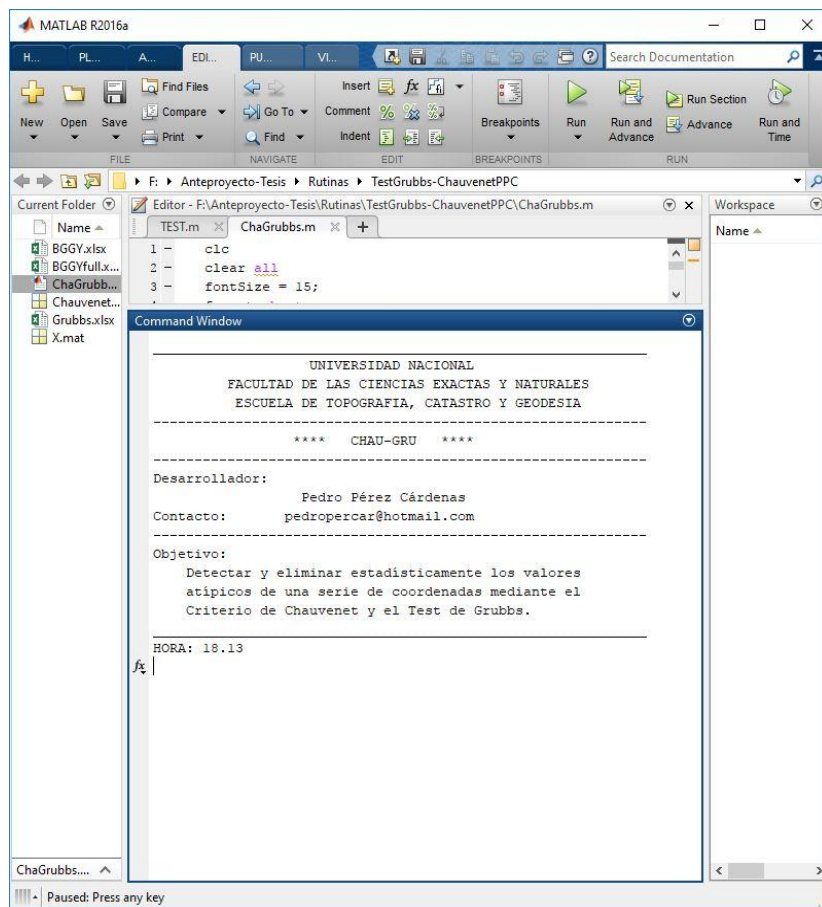
El funcionamiento de Cha-Gru consintió, después de cargar el archivo deseado, en elegir el cálculo a realizar (Chauvenet o Grubbs) y de inmediato presentar un resumen de resultados.

Este último, incluyó la cantidad de outliers encontrados, días GPS detectados, valor típico del criterio estadístico, promedio simple y desviación estándar (ver figura 3.9).

La utilización de esta rutina incluía los siguientes procedimientos:

1. La creación previa de las plantillas de cálculo en formato \*.xlsx para cada estación.
2. El ordenamiento de los datos de entrada con la siguiente forma: GPS (columna 1) y sus coordenadas XYZ (columnas de la 2 a la 4, respectivamente).
3. La utilización de software MatLab® con el archivo de programación \*.m. Este archivo iniciaría con un detalle de la rutina, seguido del ingreso del nombre del archivo.
4. La elección del algoritmo estadístico deseado. Con la escogencia de Grubbs, se elegía además la probabilidad estadística (95% o 90% de confiabilidad).
5. La presentación de resultados, utilizando la cantidad de outliers detectados, así como los días GPS respectivos.
6. El almacenamiento de los resultados en archivos \*.xlsx.

El código programado se puede consultar en el anexo 8 del CD adjunto, mientras que el anexo 9 (en CD adjunto) posee un ejemplo del formato de entrada para la rutina Cha-Gru.



**Figura 3.9: Entrada de información a Cha-Gru, para la detección de datos atípicos**

Fuente: Elaboración propia

### **3.7 Depuración de coordenadas**

Enseguida, se procedió a la depuración de coordenadas PPP-GAPS, mediante la exclusión de datos atípicos detectados por la rutina Cha-Gru. La supresión de estos datos daría mayor consistencia a la serie, y optimizaría la calidad en los cálculos posteriores (vectores de velocidad y de rotación Euler).

La depuración del vector de coordenadas utilizando dos criterios estadísticos, expuso la creación de dos series de coordenadas diferentes; una para Chauvenet y la otra para Grubbs. Sin embargo, la metodología de ambos algoritmos estadísticos fue bastante diferente. En Chauvenet se analizaron todas las cifras de la serie, mientras que en Grubbs solo aplicó para los valores máximo y mínimo. Por esta razón, se decidió proseguir con el juego de coordenadas Chauvenet, puesto que su formulación matemática cumplía a cabalidad con el objetivo específico 1 de este proyecto.

Por otra parte, debido a que el vector de coordenadas debía ser analizado individualmente, los resultados detectaron la existencia de valores atípicos diferentes entre componentes. Ante esta disyuntiva, se recurrió a depurar la coordenada individual con respecto al outlier detectado. De esta manera, la información final se agrupó en cuadros, incluyendo días atípicos encontrados y días GPS atípicos (ver apartado 4.2).

La lista de coordenadas definitivas para el presente proyecto son resultado de la depuración con algoritmo estadístico Chauvenet, mediante la ejecución de la rutina denominada Cha-Gru. Las mismas poseen el siguiente formato: día GPS, coordenadas XYZ y sus respectivas desviaciones estándar GAPS. El anexo 10, en el CD adjunto, incluye parte de las coordenadas finales depuradas de la estación BGGY como medio de consulta. En los archivos digitales adheridos a este trabajo, se incluyen las coordenadas GAPS del resto de estaciones.

Adicional a esto, se guardaron las coordenadas originales de las estaciones BGGY y ETCG con tal de ser usadas en el punto 3.8, donde se estimaron las coordenadas y velocidades de cada estación. Esto permitió analizar la efectividad de los algoritmos estadísticos incluidos en el apartado 3.6. Las diferencias con y sin depuración se incluyen en el punto 4.2.3

### **3.8 Programación de la rutina para la estimación de velocidades**

A continuación, se prosiguió a la estimación de velocidades para cada estación incluyendo además su respectiva serie de tiempo. Durante este procedimiento, se manejaron los lineamientos descritos en Moya, Bastos y Rivas (2014) utilizando un ajuste por mínimos cuadrados.

Con el fin de utilizar todos los datos posibles, se estableció un ajuste individual XYZ, a diferencia del planteamiento de Moya et al. (2014). Se alteraron entonces las dimensiones de vectores y matrices dentro del ajuste por mínimos cuadrados, como es el caso de la matriz de diseño (A), que pasó a tener una dimensión  $n,2$ ; donde  $n$  son los coeficientes de la linealización de cada una de las  $n$  ecuaciones de observación con respecto a 2 incógnitas.

De esta forma, se programó una rutina con ambiente MatLab® denominada VelXYZ y cuyo código se puede consultar en el anexo 8 del CD adjunto. El formato de los datos de entrada contuvo los siguientes elementos: Año, día GPS, coordenadas XYZ y sus respectivos errores (Sx, Sy, Sz). La rutina fue diseñada con la posibilidad de realizar ajuste de ambas maneras: un ajuste individual por componente coordenado, o bien un ajuste completo XYZ. Después de seleccionar el tipo de ajuste, se prosiguió a ingresar la época de referencia deseada.

VelXYZ brindó los resultados del ajuste, así como información general y estadística de los datos de entrada (ver figura 3.10). Igualmente, se ofrecía la opción para obtener las series de tiempo respectivas y guardar los resultados en un archivo \*.xlsx. Para la ejecución del presente trabajo, se realizaron ajustes individuales, referenciando a las épocas de 2013.00 para las estaciones SIRGAS y 2016.92 para las estaciones UNAVCO. En la figura 3.11, se muestra la interfaz gráfica para la salida de datos, mientras que en la figura 3.12 incluye un ejemplo de serie de tiempo obtenida. Los resultados de los ajustes se pueden consultar en el apartado 4.3.

Por otro lado, con el fin de contrastar resultados, se obtuvieron las velocidades de SIRGAS y UNAVCO para cada estación. Esto se realizó mediante la confección de archivos ejecutables para FTP, los cuales descargaron automáticamente la información requerida. Es así como se obtuvieron las posiciones tridimensionales en las épocas 2013.00 y 2016.92, además de sus velocidades respectivas. Durante esta comparación se podría identificar aquellas estaciones afectadas por efectos cíclicos y de esta forma excluirlas del cálculo posterior de Euler.

```

Command Window

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE LAS CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
ESCUELA DE TOPOGRAFIA, CATASTRO Y GEODESIA
-----
**** Vel-XYZ ****
-----
Desarrollador:
                Pedro Pérez Cárdenas
Contacto:       pedropercar@gmail.com
-----
Objetivo:
                Estimar los componentes de velocidad para una estación
                de medición continua mediante la aplicación de ajuste
                por mínimos cuadrados.
-----

HORA : 19.33

Notas:
1) Datos de entrada con formato *.xlsx
2) Para ajuste individual [Año, DíaGPS, X, Sx(m)]
3) Para ajuste completo [Año, DíaGPS, X, Y, Z, Sx(m), Sy(m), Sz(m)]
4) Nombre de archivo debe coincidir con nombre de estación

Indique el tipo de ajuste que desea realizar: Invidual[1] Completo[2]

```

**Figura 3.10: Entrada de datos VelXYZ para la estimación de velocidades**  
Fuente: Elaboración propia

```

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE VELOCIDAD PARA
ESTACIONES GNSS DE MEDICION CONTINUAS
-----
RESULTADOS
////////////////////////////////////
1. INFORMACIÓN GENERAL
////////////////////////////////////
ESTACIÓN AJUSTADA:           BGGY_X
ÉPOCA DE REFERENCIA (años): 2013.0000
TOTAL DE DATOS PROCESADOS (DÍAS): 930

////////////////////////////////////
2. ESTADÍSTICA
////////////////////////////////////
PROMEDIO COORDENADA X(m): 2876851.00998

DESVIACION ESTÁNDAR X:      0.00974

VALOR MÁXIMO X(m): 2876851.04850

VALOR MÍNIMO X(m): 2876850.97250

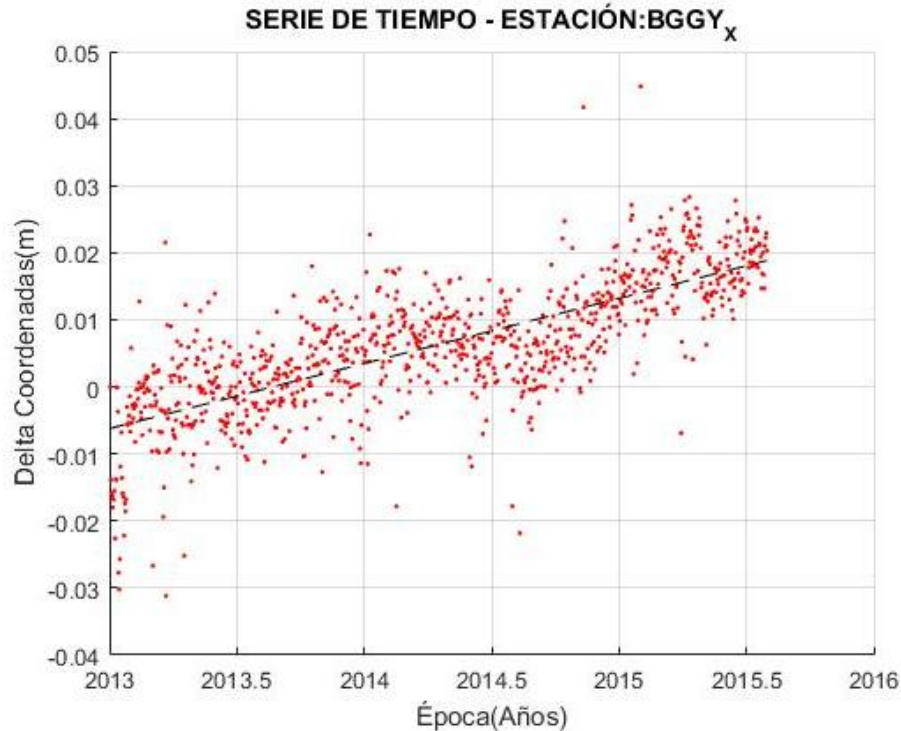
GRADOS DE LIBERTAD:         928

////////////////////////////////////
3. RESULTADOS DEL AJUSTE
////////////////////////////////////
COORDENADAS*****
-----
COORDENADA Xo(m): 2876851.00996 ± 0.11 mm

VELOCIDADES*****
-----
VELOCIDAD Xo(mm/a): 7.87 ± 0.06 mm/a

```

**Figura 3.11: Salida de datos de VelXYZ**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.12: Serie de tiempo de estación BGGY, producto de VelXYZ**  
Fuente: Elaboración propia

### 3.9 Programación de la rutina para el cálculo del polo de Euler

Una vez obtenidas las posiciones y velocidades de cada estación para las épocas 2013.0 y 2016.92, se procedió a programar la rutina denominada EulerPPC (su código se incluye en el anexo 8 del CD adjunto), la cual buscó calcular los parámetros del polo de Euler utilizando el algoritmo matemático descrito en el apartado 2.6. Esta rutina contempló el cálculo de velocidades rotacionales para cada estación, utilizando como defecto el polo de rotación calculado con anterioridad.

De esta manera, el funcionamiento de la rutina EulerPPC contuvo la siguiente programación:

1. Apartado para la transformación de coordenadas geocéntricas a valores geodésicos. Con tal de obtener las siguientes disposiciones: la representación geográfica del polo de Euler y las estaciones involucradas, así como el cálculo de las velocidades de rotación con respecto a su eje Euler.
2. Posibilidad de mapear, dentro de una figura Matlab, la ubicación del polo de Euler resultante, así como las estaciones suministradas por el usuario. Esto fue de gran ayuda a la hora de visualizar los resultados.

La siguiente etapa consistió en la ejecución de EulerPPC utilizando los datos de entrada brindados por el cálculo de velocidades del capítulo 3.8. Enseguida, se procedió a calcular el polo de Euler y las velocidades de rotación para la placa Caribe utilizando solamente 15

estaciones, pues se excluyeron SCUB y CN20 debido a inconsistencias en sus coordenadas y la cantidad de datos presentada (tema se amplía en el apartado 4.3). Los valores operados en esta etapa se pueden examinar en el cuadro 3.7, donde se incluyen las coordenadas XYZ de cada estación, sus velocidades y respectivos errores. Los resultados de esta metodología se incluyen en los capítulos 4.4 y 4.4.1.

**Cuadro 3.7: Archivo utilizado para calcular el polo de rotación**

Fuente: Elaboración propia

Estación	X(m)	Y(m)	Z(m)	Vx/dVx (m/a)	Vy/dVy (m/a)	Vz/dVz (m/a)
BGGY	2876851,0366	-5379084,6354	1857712,5062	0,0100	0,0080	0,0164
				0,0003	0,0004	0,0002
CN09	1842488,8147	-5718038,9158	2135177,1332	-0,0010	-0,0374	0,0052
				0,0003	0,0016	0,0003
CN12	1390866,6568	-5906361,3588	1958908,7809	0,0065	0,0059	0,0052
				0,0003	0,0005	0,0002
CN28	1199694,6851	-6191344,9644	950187,7328	0,0184	0,0092	0,0119
				0,0004	0,0006	0,0003
CN35	932030,5031	-6135904,7236	1465862,5138	0,0126	0,0009	0,0073
				0,0002	0,0004	0,0002
CRO1	2607771,2747	-5488076,6174	1932767,8989	0,0073	0,0091	0,0121
				0,0003	0,0004	0,0002
ETCG	645208,2892	-6249842,1351	1100399,5754	0,0110	0,0046	0,0146
				0,0004	0,0007	0,0005
GUAT	-56063,5449	-6174978,6343	1596665,2922	0,0028	0,0025	0,0001
				0,0003	0,0004	0,0002
LMMF	2993387,3661	-5399363,8365	1596748,1163	0,0104	0,0123	0,0130
				0,0008	0,0008	0,0004
MANA	407981,8844	-6222925,6592	1333529,0160	0,0096	0,0041	0,0093
				0,0002	0,0004	0,0002
MAYZ	2352504,4240	-5585159,4275	1981262,3459	0,0082	0,0081	0,0132
				0,0004	0,0006	0,0004
PNE2	456659,9142	-6261477,0731	1121504,4050	0,0002	0,0017	-0,0047
				0,0004	0,0007	0,0003
ROA0	370926,8545	-6111583,9895	1780546,8211	0,0091	0,0044	0,0073
				0,0003	0,0005	0,0002
SMRT	2743826,2243	-5410452,4002	1962823,0615	0,0064	0,0091	0,0136
				0,0002	0,0004	0,0002
SSIA	95567,0553	-6197785,5689	1500590,5876	0,0093	0,0008	0,0007
				0,0002	0,0004	0,0001

Cabe resaltar que, para la validación del cálculo de Euler, se utilizó un programa independiente, denominado Euler Pole Calculator (EPC, por sus siglas en inglés) (Goudarzi y Santerre, 2014). Para la utilización de este programa se creó un archivo de texto con extensión \*.ecf (para coordenadas geocéntricas) con todos los parámetros necesarios (los mismos utilizados en EulerPPC). El programa EPC se puede obtener gratuitamente en línea y permite entre otras cosas, calcular el polo de Euler basado en las velocidades de estaciones brindadas, o viceversa, obtener las velocidades geocéntricas de cualquier estación, utilizando los valores Euler suministrados. Los resultados del cálculo en EPC, y por ende la validación de EulerPPC, se pueden incluir en el capítulo 4.4.

## Capítulo 4: Resultados

El modelo cinemático propuesto en este proyecto fue denominado *CaribePPC*. Su validación se realizó comparando sus valores Euler frente a los de modelos geodésicos confiables, tales como VEMOS15 y APKIM2005.

Por consiguiente, en este apartado se incluyen los resultados de la metodología planteada en el capítulo 3, buscando la validación de *CaribePPC*.

### 4.1 Coordenadas resultado de procesamiento GAPS

Los resultados finales del procesamiento GAPS (correspondientes al capítulo 3.3.1) se incluyen en este apartado. Las mismas son consecuencia de utilizar datos continuos GNSS de 17 estaciones y tomando su ubicación dentro de la placa Caribe, así como la disponibilidad de la información respectiva.

Las coordenadas extraídas se ordenaron en plantillas de cálculo con los siguientes datos: Día GPS, coordenadas XYZ y sus desviaciones estándar. El anexo 11, en el CD adjunto, contiene un resumen estadístico de todos los resultados de procesamiento GAPS, incluyendo los histogramas respectivos.

Durante la realización, se determinó que la disponibilidad de datos no fue suficiente para algunas estaciones. Basado en el cuadro 4.1, se enfatizó lo siguiente:

- La mayor cantidad de datos procesados para una misma estación fue SSIA con un total de 940 y, al contrario, la estación con menos valores diarios fue SCUB.
- La estación SCUB no tuvo actividad durante la segunda mitad del año 2013, ni tampoco en el período 2014. Después de buscar su reemplazo, se percibió que las estaciones SIRGAS disponibles no cumplían con las exigencias planteadas. No obstante, SCUB se incluyó dentro del cálculo de velocidades con el fin de analizar su conducta cinemática y la influencia de comportamientos cíclicos. Sin embargo, se descartó del cálculo del polo de Euler.
- Concorre una diferencia entre los archivos crudos y los archivos procesados. De esta forma, se disiparon a lo sumo 6 días GPS sin oportunidad de reemplazarlos o reprocesarlos.
- El procesamiento se realizó para cada estación y sus resultados están contemplados en formato digital, sin embargo, debido a circunstancias ajenas a este trabajo, el software GAPS no brindó soluciones para las estaciones PNE2 y ETCG durante sus períodos 2013 y 2015, respectivamente. Los archivos se procesaron, sin embargo, sus resultados en formato \*.html no contenían ninguna información. Este aspecto pudo corresponder a las siguientes razones: manipulación de archivos RINEX o TEQC en el momento de

almacenarlos en el FTP respectivo, y/o los requisitos técnicos con los que el software GAPS procesa sus datos.

**Cuadro 4.1: Archivos crudos versus archivos procesados**

Fuente: Elaboración propia

Estación	Total de archivos crudos			Total	Total de archivos procesados			Total
	2013	2014	2015		2013	2014	2015	
BGGY	365	364	210	939	365	361	209	935
CN09	103	365	212	680	103	365	209	677
CN12	364	358	212	934	364	358	211	933
CN20	297	365	128	790	296	363	128	787
CN28	180	365	212	757	180	365	210	755
CN35	365	365	212	942	365	363	209	937
CRO1	292	365	210	867	290	365	210	865
ETCG	341	353	150	844	341	325	209	875
GUAT	351	338	211	900	350	337	209	896
LMMF	365	363	212	940	363	362	211	936
MANA	291	362	205	858	291	361	205	857
MAYZ	365	365	62	792	365	365	61	791
PNE2	358	365	212	935	356	362	211	929
ROA0	217	365	212	794	217	365	211	793
SCUB	160	14	182	356	149	--	182	345
SMRT	365	330	210	905	365	329	210	904
SSIA	365	365	212	942	365	365	210	940

## 4.2 Evaluación estadística de las coordenadas GAPS

### 4.2.1 Resultados de la prueba Kolmogorov Smirnov

Para la ejecución efectiva de la rutina Cha-Gru (apartado 3.4.2), se debió utilizar la prueba Kolmogorov Smirnov (ver capítulo 3.4.1). Los resultados se pueden consultar en el cuadro 4.2, donde se incluye el grado de normalidad de cada estación, así como los valores utilizados en la validación ( $D$  y  $D^+$ ) de las hipótesis estadísticas ( $H_1$  y  $H_0$ ).

Los valores  $D_\alpha$  fueron independientes del componente coordenado, es decir, eran equivalentes para cada estación pues su cálculo se basó en  $C\alpha/K$ .

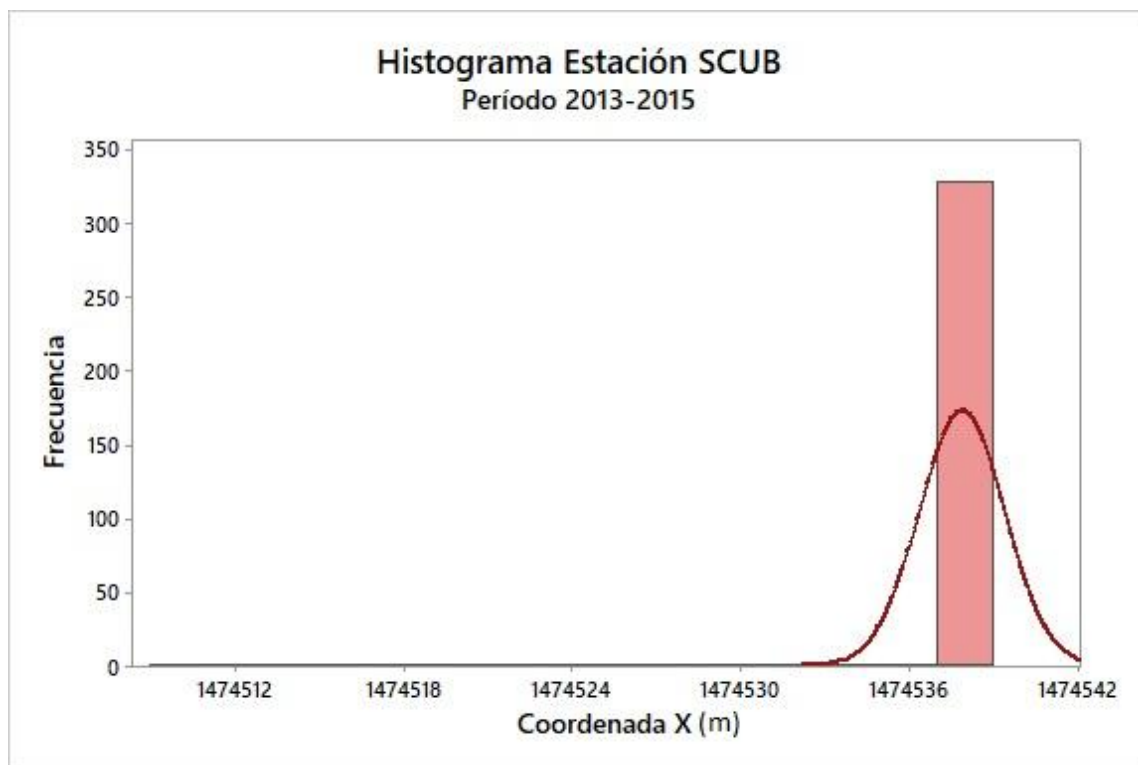
**Cuadro 4.2: Coordenadas GAPS y su grado de distribución normal**

Fuente: Elaboración propia

Estación	D $\alpha$	Valor D			Distribución Normal		
		X	Y	Z	X	Y	Z
BGGY	0,030	0,004	0,005	0,061	Sí	Sí	No
CN09	0,034	0,012	0,014	0,001	Sí	Sí	Sí
CN12	0,030	0,011	0,018	0,277	Sí	Sí	No
CN20	0,032	0,038	0,022	0,002	No	Sí	Sí
CN28	0,032	0,011	0,019	0,028	Sí	Sí	Sí
CN35	0,030	0,016	0,008	0,029	Sí	Sí	Sí
CRO1	0,030	0,017	0,027	0,058	Sí	Sí	No
ETCG	0,035	0,009	0,034	0,086	Sí	Sí	No
GUAT	0,030	0,011	0,006	0,005	Sí	Sí	Sí
LMMF	0,030	0,009	0,001	0,058	Sí	Sí	No
MANA	0,031	0,017	0,009	0,031	Sí	Sí	Sí
MAYZ	0,032	0,007	0,044	0,025	Sí	No	Sí
PNE2	0,038	0,012	0,023	0,132	Sí	Sí	No
ROA0	0,032	0,007	0,007	0,018	Sí	Sí	Sí
SCUB	0,049	0,442	0,452	0,447	No	No	No
SMRT	0,030	0,005	0,006	0,062	Sí	Sí	No
SSIA	0,029	0,016	0,010	0,062	Sí	Sí	No

Por otra parte, tras la ejecución de la prueba KS, la mayoría de los resultados fueron favorables. Los mismos mostraron una distribución normal para al menos dos de los componentes de coordenadas. El caso más abrupto se presentó con la estación SCUB, ya obteniendo valores D con al menos 0.4 unidades mayores a su valor D $\alpha$ . Lo anterior indicó que su distribución no alcanzó una distribución normal, sin embargo, su histograma (ver figura 4.1) describió perfectamente la campana de Gauss y la mayoría de sus datos tuvieron una frecuencia similar. Adyacente a esto, se toma en cuenta la cantidad de datos procesados para (n=356), la cual fue diferente al resto. Esto último indicó la posibilidad de que SCUB fuera afectada por efectos cíclicos (ver apartado 1.3).

Mientras tanto, las demás estaciones mostraron un comportamiento favorable según la prueba KS, siguiendo una distribución normal en la mayoría de sus componentes. Para los casos en que alguna coordenada no siguió el comportamiento normal, se recurrió a los histogramas obtenidos en el capítulo 3.4. Estos últimos, graficaron la frecuencia frente a la coordenada respectiva, incluyendo la línea de distribución Normal.



**Figura 4.1: Histograma coordenada X para la estación SCUB**  
Fuente: Elaboración propia basada en plantillas de cálculo

Se concluye que todos los vectores de coordenadas GAPS siguieron una distribución normal y lograron ser utilizados en la siguiente etapa (apartado 3.4.2). A pesar de que la estación SCUB obtuvo resultados negativos durante la prueba KS, se puede verificar que su comportamiento es normal, según lo que describe su histograma.

El anexo 7 del CD adjunto incluye la plantilla de cálculo donde se realizaron las pruebas de Kolmogorov-Smirnov. Con el afán de determinar la normalidad estadística, la prueba KS se aplicó a cada estación seleccionada y sus resultados se contrastaron con los histogramas elaborados, los cuales se pueden consultar en el anexo 11 del CD adjunto.

#### **4.2.2 Valores atípicos detectados**

Tras la ejecución de la rutina Cha-Gru del apartado 3.4.2, se lograron los resultados de los cuadros 4.3, 4.4 y 4.5, correspondientes a cada año procesado. Estos cuadros incluyen la cantidad de valores atípicos encontrados por el criterio Chauvenet en cada coordenada XYZ, así como los días GPS respectivos.

Los valores derivados en esta etapa fueron vitales para el apartado 3.7, ya que brindaron los insumos en la depuración del vector de coordenadas. El anexo 12 del CD adjunto incluye

un resultado resumen de la rutina Cha-Gru para la estación BGGY, (utilizando las coordenadas GAPS).

**Cuadro 4.3: Días GPS detectados por la rutina Cha-Gru. Período 2013**

Fuente: Elaboración propia

<b>Criterio de Chauvenet Período 2013</b>						
<b>Estación</b>	<b>Datos Atípicos Encontrados</b>			<b>Días GPS Atípicos</b>		
	X	Y	Z	X	Y	Z
BGGY	3	3	1	257, 352, 363	80, 352, 363	363
CN09	1	0	1	165	--	165
CN12	2	0	2	13, 14	--	93, 211
CN20	20	12	4	71, 72, 73, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 93, 94, 106, 108, 110, 111, 112, 114, 116, 301, 329	71, 77, 80, 113, 185, 297, 298, 318	69, 72, 76, 77,
CN28	2	3	1	83, 111	114, 229, 324	229
CN35	3	0	0	71, 72, 76	--	--
CRO1	5	1	0	3, 10, 13, 14, 15	7	--
ETCG	3	22	0	72,74,114	335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364	--
GUAT	3	5	3	5, 232, 328,	8, 81, 103, 214, 232	81, 214, 232
LMMF	2	1	1	223, 314	223	183
MANA	5	2	0	59, 68, 71, 72, 74	30, 46	--
MAYZ	4	3	2	58, 81, 194, 231	23,58,102	81, 231
PNE2	2	2	8	226, 293	169, 227	73, 98, 101, 103, 104, 106, 110, 134
ROA0	3	1	1	149, 249, 300	235	299
SCUB	1	1	1	39	39	39
SMRT	4	1	2	14, 80, 102, 298	298	102, 298
SSIA	11	1	4	54, 55, 56, 57, 58, 59, 71, 72, 74, 75, 235	178	64, 113, 158, 229

**Cuadro 4.4: Días GPS detectados por la rutina Cha-Gru. Período 2014**

Fuente: Elaboración propia

<b>Criterio de Chauvenet Período 2014</b>						
<b>Estación</b>	<b>Cantidad Datos Atípicos Encontrados</b>			<b>Días GPS Atípicos</b>		
	X	Y	Z	X	Y	Z
BGGY	0	3	0	--	3, 212, 223	--
CN09	2	0	0	27, 291	--	--
CN12	1	0	0	308	--	--
CN20	0	4	1	--	53, 113, 167, 184	167
CN28	0	2	0	--	2, 67,	--
CN35	0	1	0	--	371	--
CRO1	1	2	1	45	32, 45	32
ETCG	1	1		326	326	312, 326
GUAT	7	5	5	52, 54, 169, 251, 273, 278, 323	52, 54, 169, 252	52, 54, 169, 251, 273
LMMF	1	0	0	199	--	--
MANA	0	1	0	--	13	--
MAYZ	5	0	3	51, 52, 179, 226, 357	--	51, 179, 357
PNE2	4	1	0	46, 50, 179, 252	179	--
ROA0	2	3	0	3, 361	48, 308, 365	--
SCUB	--	--	--	--	--	--
SMRT	2	4	1	95, 329	32, 72, 95, 329	32
SSIA	0	1	1	--	287	178

**Cuadro 4.5: Días GPS detectados por la rutina Cha-Gru. Período 2015**

Fuente: Elaboración propia

<b>Criterio de Chauvenet Período 2015</b>						
<b>Estación</b>	<b>Cantidad Datos Atípicos Encontrados</b>			<b>Días GPS Atípicos</b>		
	X	Y	Z	X	Y	Z
BGGY	2	1	1	13,85	13,	13
CN09	1	0	0	90	--	--
CN12	0	1	0	--	167	--
CN20	0	0	0	--	--	--
CN28	2	1	0	86,131	48	--
CN35	0	0	0	--	--	--
CRO1	0	0	0	--	--	--
ETCG	0	0	0	--	--	--
GUAT	5	4	5	11, 64, 173, 184, 201	64, 101, 173, 184	11, 64, 173, 184, 198
LMMF	11	1	3	4, 53, 58, 64, 83, 85, 109, 157, 173, 174, 198	70	10, 58, 64
MANA	3	2	2	24, 62, 90	24, 60	24, 60
MAYZ	0	0	0	--	--	--
PNE2	2	1	0	85, 202	119	--
ROA0	0	2	0	--	76, 179	--
SCUB	1	1	1	99	99	99
SMRT	2	0	0	125, 209	--	--
SSIA	0	0	0	--	--	--

Durante la ejecución de la rutina Cha-Gru se detectó un promedio (en cualquiera de sus componentes coordenados) de 3.2 datos atípicos para el año 2013, 1.3 para el año posterior y 1.0 para el año 2015. Se presentaron estaciones con hasta 22 outliers en un solo componente (por ejemplo, ETCG en el año 2013), ya que el comportamiento fue muy diferente de una estación a otra. En el año 2013, CN20 fue la estación con mayores datos atípicos encontrados (con 36), mientras que la menor cantidad fue CN09 con 2. Para el año posterior (2014), la estación GUAT asumió 17 y SCUB no tuvo ninguno. En el último año, se encontró un máximo de 15 outliers para una misma estación, la cual fue LMMF.

### **4.2.3 Depuración del vector de coordenadas**

Basado en los cuadros del apartado 4.2.2, se conformó una serie de coordenadas nuevas, excluyendo los valores indicados en la misma. Este procedimiento significó la creación de un archivo nuevo por cada coordenada (3 por estación), lo cual benefició los cálculos posteriores (específicamente, la estimación de velocidades en el capítulo 3.8).

De esta forma, se concluye con el objetivo número uno del presente trabajo, el cual depuró los valores diarios del vector de coordenadas PPP por medio de la aplicación de criterios estadísticos Chauvenet y Grubbs con tal de lograr mayor consistencia de datos (ver apartado 1.4). En el anexo 10 del CD adjunto, se incluyen las coordenadas depuradas de la estación BGGY, ordenados por día GPS, coordenadas X, Y, Z y su error respectivo.

Adicionalmente, se mantuvo un archivo de coordenadas GAPS (sin depuración) para las estaciones BGGY y ETCG (período 2013-2014) con el objetivo de obtener las discrepancias entre coordenadas GAPS y coordenadas depuradas a la hora de calcular sus velocidades XYZ. Las diferencias de esto se incluyen en el siguiente apartado.

### **4.3 Estimación de posición y velocidades para cada estación**

El objetivo número dos del presente proyecto alude la obtención de velocidades geocéntricas para los puntos de la red como insumo fundamental en la estimación de un nuevo modelo de velocidades. La estimación de estos parámetros fue la base para la siguiente etapa (cómputo del polo de Euler en el apartado 3.4), dado que el cálculo Euler demandó del posicionamiento y velocidades de cada estación (así como las desviaciones estándar de las últimas).

Para la estimación de velocidades se tomaron las coordenadas depuradas (junto con sus desviaciones estándar) para llevarlas a las épocas de referencia definidas, y de esta manera, facilitar la comparación frente a SIRGAS y UNAVCO. La rutina VelXYZ ofreció resultados en formato \*.xlsx y la posibilidad de almacenar memorias de cada ejecución. Los cuadros 4.6 y 4.7 contienen los resultados del ajuste por mínimos cuadrados. En estos cuadros se indican las coordenadas y velocidades geocéntricas XYZ con épocas de referencia a 2013.00 para las estaciones SIRGAS (identificadas con la letra S) y 2016.92 para las estaciones UNAVCO (denotadas con la letra U).

**Cuadro 4.6: Coordenadas resultado de VelXYZ. Épocas 2013.0(S) y 2016.92(U)**

Fuente: Elaboración propia

Estación		X(m)	Y(m)	Z(m)	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
BGGY	U	2876851,0366	-5379084,6354	1857712,5062	0,0007	0,0010	0,0006
CN09	U	1842488,8147	-5718038,9158	2135177,1332	0,0008	0,0039	0,0007
CN12	U	1390866,6568	-5906361,3588	1958908,7809	0,0008	0,0014	0,0007
CN20	U	848061,2092	-6236541,4538	1029562,8788	0,0329	0,0217	0,0063
CN28	U	1199694,6851	-6191344,9644	950187,7328	0,0009	0,0014	0,0006
CN35	U	932030,5031	-6135904,7236	1465862,5138	0,0006	0,0010	0,0004
CRO1	S	2607771,2747	-5488076,6174	1932767,8989	0,0004	0,0005	0,0003
ETCG	S	645208,2892	-6249842,1351	1100399,5754	0,0005	0,0008	0,0005
GUAT	S	-56063,5449	-6174978,6343	1596665,2922	0,0004	0,0006	0,0003
LMMF	U	2993387,3661	-5399363,8365	1596748,1163	0,0022	0,0023	0,0010
MANA	S	407981,8844	-6222925,6592	1333529,0160	0,0004	0,0006	0,0003
MAYZ	U	2352504,4240	-5585159,4275	1981262,3459	0,0011	0,0018	0,0011
PNE2	U	456659,9142	-6261477,0731	1121504,4050	0,0010	0,0016	0,0007
ROA0	U	370926,8545	-6111583,9895	1780546,8211	0,0007	0,0012	0,0006
SCUB	S	1474537,9345	-5811242,8859	2168958,7179	0,0107	0,0400	0,0156
SMRT	S	2743826,2243	-5410452,4002	1962823,0615	0,0004	0,0006	0,0003
SSIA	S	95567,0553	-6197785,5689	1500590,5876	0,0003	0,0006	0,0002

**Cuadro 4.7: Velocidades resultado de VelXYZ. Épocas 2013.0(S) y 2016.92(U)**

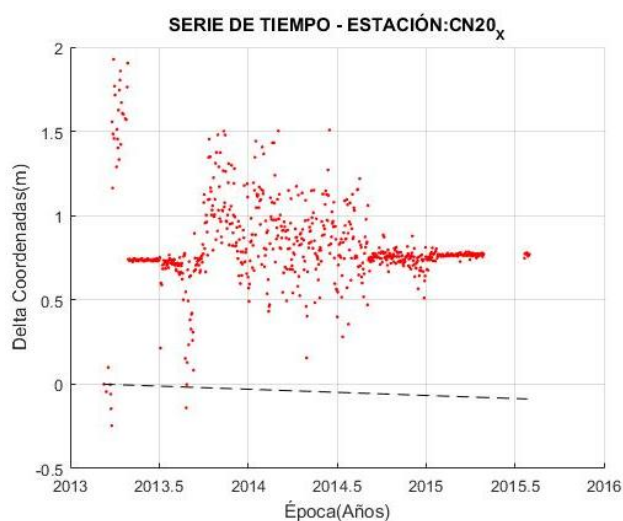
Fuente: Elaboración propia

Estación		Vx(m/a)	Vy(m/a)	Vz(m/a)	dVx(m/a)	dVy(m/a)	dVz(m/a)
BGGY	U	0,0100	0,0080	0,0164	0,0003	0,0004	0,0002
CN09	U	-0,0010	-0,0374	0,0052	0,0003	0,0016	0,0003
CN12	U	0,0065	0,0059	0,0052	0,0003	0,0005	0,0002
CN20	U	-0,0368	-0,0436	0,0180	0,0124	0,0080	0,0023
CN28	U	0,0184	0,0092	0,0119	0,0004	0,0006	0,0003
CN35	U	0,0126	0,0009	0,0073	0,0002	0,0004	0,0002
CRO1	S	0,0073	0,0091	0,0121	0,0003	0,0004	0,0002
ETCG	S	0,0110	0,0046	0,0146	0,0004	0,0007	0,0005
GUAT	S	0,0028	0,0025	0,0001	0,0003	0,0004	0,0002
LMMF	U	0,0104	0,0123	0,0130	0,0008	0,0008	0,0004
MANA	S	0,0096	0,0041	0,0093	0,0002	0,0004	0,0002
MAYZ	U	0,0082	0,0081	0,0132	0,0004	0,0006	0,0004
PNE2	U	0,0002	0,0017	-0,0047	0,0004	0,0007	0,0003
ROA0	U	0,0091	0,0044	0,0073	0,0003	0,0005	0,0002
SCUB	S	0,0433	-0,1745	0,0738	0,0071	0,0277	0,0109
SMRT	S	0,0064	0,0091	0,0136	0,0002	0,0004	0,0002
SSIA	S	0,0093	0,0008	0,0007	0,0002	0,0004	0,0001

La estación CN20 describió diferencias de posicionamiento promediados a 0.8 m con respecto a su coordenada X inicial en la época 2013.0 y obtuvo, además, un delta coordenado máximo cercano a los 2 m, tal y como se describe en su serie temporal UNAVCO y en la serie obtenida por VelXYZ (ver figura 4.2). Estos aspectos influyeron sustancialmente en la estimación de su velocidad, atribuyéndole valores desiguales a las entidades (como se verá en el apartado 4.3.2) y, por ende, se descartó del cálculo de Euler (ver apartado 4.4).

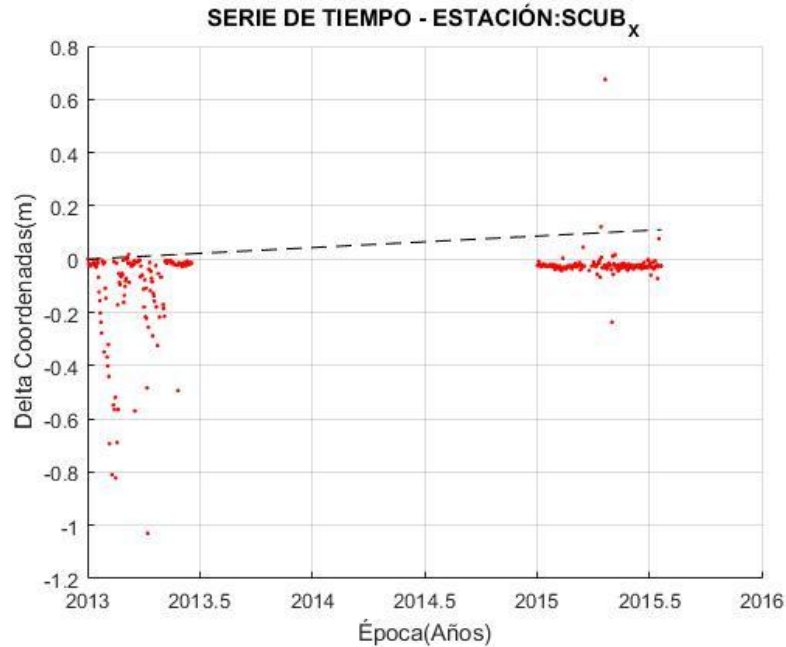
En otro caso, la estimación de velocidad para la estación SCUB fue influenciada por la cantidad de datos incluidos, ya que no contempló la segunda mitad del año 2013, ni tampoco el año 2014 (completo). Además, su comportamiento cinemático afectó su cálculo de coordenadas y velocidades debido a la inconsistencia de su posicionamiento. Consecuencia a esto, sus resultados presentaron un movimiento impreciso con respecto a las demás estaciones y, por consiguiente, se excluyó en el cálculo del polo de Euler (capítulo 4.4). La serie de tiempo VelXYZ de la estación SCUB se incluye en la figura 4.3. Ambas estaciones, CN20 y SCUB, fueron excluidas del cálculo de Euler con el fin de evitar su influencia en los resultados posteriores.

Por otra parte, el cuadro 4.8 describe la ubicación de cuadrante para cada estación, producto de la estimación de velocidades con la rutina VelXYZ. Considerando la ubicación de la placa Caribe en un sistema cartesiano proyectado, la velocidad geocéntrica  $V_x$  se traduce a su velocidad en el *este*, mientras que  $V_z$  corresponde al *norte* (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger y Wasle, 2008). Por ende, los movimientos de la placa Caribe son, en general, de trayectoria Norte-Este para la mayoría de las estaciones. Este movimiento coincide con lo descrito en los modelos APKIM2005 y MORVEL, los cuales mencionan un desplazamiento de la placa Caribe con dirección Norte-Este (Drewes, 2009) (DeMets, Gordon y Argus, 2010).



**Figura 4.2: Serie de tiempo para la estación CN20 (coordenada X, época 2013.0)**

Fuente: Elaboración propia basado en la ejecución de la rutina VelXYZ



**Figura 4.3: Serie de tiempo para la estación SCUB (coordenada X, época 2013.0)**

Fuente: Elaboración propia basado en la ejecución de la rutina VelXYZ

**Cuadro 4.8: Dirección de movimiento según velocidades VelXYZ**

Fuente: Elaboración propia

Estación	Vx (m/a)	Vz (m/a)	Movimiento
BGGY	0,0100	0,0164	Norte-Este
CN09	-0,0010	0,0052	Norte-Oeste
CN12	0,0065	0,0052	Norte-Este
CN20	-0,0368	0,0180	Norte-Oeste
CN28	0,0184	0,0119	Norte-Este
CN35	0,0126	0,0073	Norte-Este
CRO1	0,0073	0,0121	Norte-Este
ETCG	0,0110	0,0146	Norte-Este
GUAT	0,0028	0,0001	Norte-Este
LMMF	0,0104	0,0130	Norte-Este
MANA	0,0096	0,0093	Norte-Este
MAYZ	0,0082	0,0132	Norte-Este
PNE2	0,0002	-0,0047	Sur-Este
ROA0	0,0091	0,0073	Norte-Este
SCUB	0,0433	0,0738	Norte-Este
SMRT	0,0064	0,0136	Norte-Este
SSIA	0,0093	0,0007	Norte-Este

Por otra parte, durante la estimación de coordenadas y velocidades con la rutina VelXYZ, se utilizó un juego de coordenadas GAPS (sin depurar) para las estaciones BGGY y ETCG. Esto se realizó en miras a examinar las discrepancias entre un juego de coordenadas depuradas y otro sin depurar. Los resultados de posiciones y sus diferencias se incluyen en los cuadros 4.9 y 4.10, mientras que las velocidades se encuentran en los cuadros 4.11 y 4.12. La similitud entre un juego de coordenadas y otro se estableció en el orden sub milimétrico, presentando máxima de 2,8 mm en coordenadas y 0,5 mm/a en velocidades.

**Cuadro 4.9: Coordenadas resultado de VelXYZ usando posiciones GAPS**

Fuente: Elaboración propia

<b>Resultado de VelXYZ con coordenadas sin depurar</b>						
<b>Estación</b>	<b>X(m)</b>	<b>Y(m)</b>	<b>Z(m)</b>	<b>dX(m)</b>	<b>dY(m)</b>	<b>dZ(m)</b>
BGGY	2876851,0372	-5379084,6353	1857712,5064	0,0009	0,0012	0,0006
ETCG	645208,2892	-6249842,1379	1100399,5754	0,0005	0,0013	0,0005

**Cuadro 4.10: Diferencias entre posiciones GAPS y coordenadas depuradas**

Fuente: Elaboración propia

<b>Diferencias de ajuste VelXYZ contra coordenadas sin depurar</b>						
<b>Estación</b>	<b>X(m)</b>	<b>Y(m)</b>	<b>Z(m)</b>	<b>dX(m)</b>	<b>dY(m)</b>	<b>dZ(m)</b>
BGGY	0,0006	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0000
ETCG	0,0000	-0,0028	0,0000	0,0000	0,0005	0,0000

**Cuadro 4.11: Velocidades resultado de VelXYZ usando posiciones GAPS**

Fuente: Elaboración propia

<b>Resultado de VelXYZ con coordenadas sin depuración (Velocidades)</b>						
<b>Estación</b>	<b>Vx (m/a)</b>	<b>Vy (m/a)</b>	<b>Vz (m/a)</b>	<b>dVx (m/a)</b>	<b>dVy (m/a)</b>	<b>dVz (m/a)</b>
BGGY	0,0102	0,0080	0,0164	0,0004	0,0005	0,0002
ETCG	0,0109	0,0047	0,0147	0,0005	0,0012	0,0005

**Cuadro 4.12: Diferencias de velocidad - posiciones GAPS y coordenadas depuradas**

Fuente: Elaboración propia

<b>Diferencias de ajuste VelXYZ contra coordenadas sin depurar (Velocidades)</b>						
<b>Estación</b>	<b>Vx (m/a)</b>	<b>Vy (m/a)</b>	<b>Vz (m/a)</b>	<b>dVx (m/a)</b>	<b>dVy (m/a)</b>	<b>dVz (m/a)</b>
BGGY	0,0002	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000
ETCG	-0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0005	0,0000

### 4.3.1 Comparación de coordenadas frente a SIRGAS y UNAVCO

El modelo cinemático propuesto en este proyecto se validó basado en su cercanía a las coordenadas y/o velocidades de las entidades seleccionadas, SIRGAS y UNAVCO. En este apartado se incluyen los cuadros 4.13, 4.14 y 4.15 con las diferencias de coordenadas entre los resultados VelXYZ y las entidades. Como se mencionó anteriormente, las coordenadas geocéntricas de las estaciones se calcularon para dos épocas de referencia: la época 2013.0 para la comparación con la entidad SIRGAS; y la época 2016.92 para la comparación con UNAVCO. Los aspectos más relevantes en la comparación de coordenadas se enuncian a continuación:

1. Las diferencias promedio entre los resultados VelXYZ y las coordenadas SIRGAS fueron las siguientes: en la coordenada X de 23,26 mm, en el componente Y de 66,28 mm, y en Z se obtuvo 24,53 mm.
2. Las diferencias promedio entre los resultados VelXYZ y las coordenadas UNAVCO se dan a continuación: posición X de 77,71 mm, en la coordenada Y de 53,74 mm y en el componente Z de 46,54 mm.
3. Los valores máximos de diferencia entre los resultados VelXYZ y las coordenadas SIRGAS fueron los siguientes: en la coordenada X de 108,79 mm, en la posición Y de 385,71 mm y en el componente Z de 142,77 mm; todos los valores relacionados a la estación SCUB. Por su parte, la estación ETCG siguió los valores más alejados (después de SCUB) a SIRGAS en sus coordenadas XYZ, con 36,74 mm, 17,09 mm y 14,52 mm, respectivamente.
4. Las diferencias máximas entre los resultados VelXYZ y las coordenadas UNAVCO se presentaron en la estación SCUB con 159,65 mm en X, 379,22 mm en Y y 137,60 mm en Z. Como segundo lugar, se encontraron las estaciones CN20 en las coordenadas XY, y BGGY en la posición Z; con 114,66 mm, 74,67 mm y 90,46 mm, respectivamente.
5. La estación CRO1 se destaca por obtener resultados VelXYZ con las menores diferencias frente a las coordenadas SIRGAS, pues obtuvo 0,21 mm en la coordenada X y 5,10 mm en la posición Y.
6. Las diferencias mínimas entre los resultados VelXYZ y las coordenadas UNAVCO se presentaron en distintas estaciones. CN28 obtuvo la mayor cercanía con 30,63 mm en la coordenada X. La estación CN12 presentó tan solo 2,68 mm en la posición Y, y SSIA obtuvo la mínima diferencia con 10,59 mm en el componente Z.
7. La estación PNE2 no presenta solución UNAVCO para la época 2016,92, por lo que no se pudo comparar sus datos frente a los resultados VelXYZ.

Dentro del escenario SIRGAS, los resultados VelXYZ más cercanos, fueron CRO1 y MANA, mientras que SCUB obtuvo la menor exactitud. Debido a razones previamente establecidas, esta última estación influyó en el resultado promedio final, por lo que también se calculó el valor promedio sin tomarla en cuenta, arrojando los siguientes resultados: 9,0 mm para la coordenada X, 13,04 mm para Y y 4,82 mm para el componente Z.

Dentro del campo UNAVCO, los resultados VelXYZ más cercanos fueron las estaciones CN28 y CN35, a diferencia de SCUB, que obtuvo la menor exactitud. Sin contemplar esta última estación, las diferencias con respecto a las coordenadas UNAVCO se citan a continuación: 71,86 mm en la coordenada X, 30,50 mm en la posición Y, y 40,04 mm en el componente Z.

**Cuadro 4.13: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Posición X**  
Fuente: Elaboración propia basada en las épocas 2013,00 SIRGAS y 2016,92 UNAVCO

<b>Diferencias de posición VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Coordenada X</b>							
Estación	SIRGAS(m)	UNAVCO(m)	VelXYZ(m)	SIR (mm)	UNAV (mm)	Sdx SIR (mm)	Sdx UNAV (mm)
BGGY		2876851,097	2876851,037		59,96		3,02
CN09		1842488,888	1842488,815		73,01		2,93
CN12		1390866,722	1390866,657		65,02		2,46
CN20		848061,324	848061,209		114,66		32,99
CN28		1199694,716	1199694,685		30,63		4,04
CN35		932030,550	932030,503		46,51		2,28
CRO1	2607771,275	2607771,367	2607771,275	0,21	92,41	0,83	3,82
ETCG	645208,326		645208,289	36,74		1,38	
GUAT	-56063,541	-56063,474	-56063,545	-3,83	-71,42	1,46	1,82
LMMF		2993387,418	2993387,366		51,45		
MANA	407981,889	407981,955	407981,884	4,80	70,13	0,80	2,02
MAYZ		2352504,495	2352504,424		70,86		3,62
PNE2			456659,914				
ROA0		370926,779	370926,854		-75,03		1,81
SCUB	1474538,043	1474538,094	1474537,935	108,79	159,65	10,82	11,25
SMRT	2743826,230	2743826,320	2743826,224	6,11	95,41	2,04	4,04
SSIA	95567,058	95567,145	95567,055	2,34	89,55	1,14	1,71

**Cuadro 4.14: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Posición Y**  
Fuente: Elaboración propia basada en las épocas 2013,00 SIRGAS y 2016,92 UNAVCO

<b>Diferencias de posición VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Coordenada Y</b>							
Estación	SIRGAS(m)	UNAVCO(m)	VelXYZ(m)	Dif. SIR (mm)	Dif. UNAV (mm)	Sdy SIR (mm)	Sdy UNAV (mm)
BGGY		-5379084,660	-5379084,635		24,54		5,33
CN09		-5718038,861	-5718038,916		-55,14		8,04
CN12		-5906361,361	-5906361,359		2,68		6,86
CN20		-6236541,379	-6236541,454		-74,67		23,30
CN28		-6191345,014	-6191344,964		49,44		11,07
CN35		-6135904,745	-6135904,724		21,83		6,95
CRO1	-5488076,623	-5488076,614	-5488076,617	5,10	-3,77	0,97	6,96
ETCG	-6249842,152		-6249842,135	17,09		5,16	
GUAT	-6174978,650	-6174978,684	-6174978,634	15,56	49,54	5,43	6,74
LMMF		-5399363,861	-5399363,836		24,10		7,24
MANA	-6222925,671	-6222925,667	-6222925,659	12,12	7,70	1,00	7,33
MAYZ		-5585159,456	-5585159,428		28,67		7,80
PNE2			-6261477,073				
ROA0		-6111584,035	-6111583,989		45,29		6,06
SCUB	-5811243,272	-5811243,265	-5811242,886	385,71	379,22	40,16	40,97
SMRT	-5410452,412	-5410452,388	-5410452,400	12,17	-12,06	3,66	7,31
SSIA	-6197785,585	-6197785,596	-6197785,569	16,21	27,52	3,94	6,10

**Cuadro 4.15: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Posición Z**  
Fuente: Elaboración propia basada en las épocas 2013,00 SIRGAS y 2016,92 UNAVCO

<b>Diferencias de posición VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Coordenada Z</b>							
Estación	SIRGAS(m)	UNAVCO(m)	VelXYZ(m)	Dif. SIR (mm)	Dif. UNAV (mm)	Sdz SIR (mm)	Sdz UNAV (mm)
BGGY		1857712,416	1857712,506		-90,46		2,40
CN09		2135177,081	2135177,133		-52,56		3,23
CN12		1958908,754	1958908,781		-26,97		2,80
CN20		1029562,852	1029562,879		-26,92		6,73
CN28		950187,717	950187,733		-16,02		4,53
CN35		1465862,497	1465862,514		-16,38		2,39
CRO1	1932767,890	1932767,874	1932767,899	-9,36	-24,84	0,78	3,11
ETCG	1100399,590		1100399,575	14,52	--	1,48	
GUAT	1596665,292	1596665,328	1596665,292	0,16	35,28	1,82	2,36
LMMF		1596748,028	1596748,116		-88,46		2,89
MANA	1333529,018	1333529,064	1333529,016	1,54	48,38	0,76	2,39
MAYZ		1981262,279	1981262,346		-67,23		3,34
PNE2			1121504,405				
ROA0		1780546,793	1780546,821		-28,11		2,30
SCUB	2168958,861	2168958,856	2168958,718	142,77	137,60	15,70	16,11
SMRT	1962823,060	1962823,033	1962823,061	-1,70	-28,32	1,54	3,23

SSIA	1500590,589	1500590,598	1500590,588	1,67	10,59	1,32	2,13
------	-------------	-------------	-------------	------	-------	------	------

### 4.3.2 Comparación de velocidades frente a SIRGAS y UNAVCO

Con el objetivo de validar el modelo cinemático CaribePPC, se compararon los resultados de VelXYZ frente a las soluciones de SIRGAS y UNAVCO. Como primer paso, se contrastaron los valores de posicionamiento (en el capítulo 4.3.1) y en seguida los de velocidades. Este apartado incluye los cuadros 4.16, 4.17 y 4.18 con el fin de resumir las diferencias de velocidades obtenidas durante la ejecución de VelXYZ y su contraste con las velocidades de las entidades. Los cálculos de velocidades, utilizando la rutina VelXYZ, se referenciaron a las épocas 2013.00 y 2016.92, para las estaciones SIRGAS y UNAVCO, respectivamente. Los siguientes puntos incluyen las principales diferencias encontradas durante dicho proceso:

1. Las diferencias promedio entre los resultados VelXYZ y las velocidades SIRGAS se mencionan a continuación: 6,58 mm/a en  $V_x$ , 26,24 mm/a en  $V_y$ , y 10,96 mm/a en  $V_z$ .
2. La cercanía entre las velocidades VelXYZ y las de UNAVCO fueron las siguientes: 9,16 mm/a en la velocidad  $V_x$ , 17,79 mm/a en  $V_y$ , y 9,46 mm/a en  $V_z$ .
3. Los valores máximos de diferencias entre los resultados VelXYZ y las velocidades SIRGAS, se presentaron en la estación SCUB con 35,50 mm/a en  $V_x$ , 174,50 mm/a en  $V_y$ , y 68,28 mm/a en la velocidad  $V_z$ . En segundo lugar, las estaciones SSIA (velocidades  $V_x$  y  $V_y$ ) y ETCG (velocidad  $V_z$ ) tuvieron los valores más alejados según las coordenadas SIRGAS, presentando discrepancias de 3,19 mm/a en  $V_x$ , 3,35 mm/a en  $V_y$ , y 3,06 mm/a en  $V_z$  (en ETCG solamente).
4. Las diferencias máximas entre las velocidades VelXYZ y las de UNAVCO, se presentaron en la estación SCUB con valores de 40,01 mm/a en la velocidad  $V_x$ , 173,83 mm/a en  $V_y$ , y 72,15 mm/a en  $V_z$ . Seguido a la estación SCUB, CN20 presentó las mayores diferencias a UNAVCO, con valores de 15,50 m/a en  $V_x$ , 39,63 m/a en  $V_y$ , y 10,74 m/a en  $V_z$ .
5. La estación CRO1 se destaca por obtener los valores de velocidades VelXYZ más cercanos a las soluciones SIRGAS en dos de sus componentes: 0,16 mm/a en la velocidad  $V_x$  y tan solo 0,05 mm/a en el movimiento  $V_y$ . Mientras que la estación SSIA obtuvo la mayor cercanía a SIRGAS con tan solo 0,11 mm/a en  $V_z$ .
6. La estación que obtuvo velocidades VelXYZ con menores diferencias a las soluciones UNAVCO fue MANA con solo 2,45 mm/a en  $V_x$  y 0,31 mm/a en  $V_y$ . Mientras que la estación ROA0 obtuvo el mínimo valor de diferencia en la velocidad  $V_z$  con sólo 0,03 mm/a.

**Cuadro 4.16: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Velocidad Vx**  
Fuente: Elaboración propia basada en las épocas 2013,00 SIRGAS y 2016,92 UNAVCO

<b>Diferencias de velocidad VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Vx</b>							
Estación	SIRGAS (mm/a)	UNAVCO (mm/a)	VelXYZ (mm/a)	Diferencia SIRGAS (mm/a)	Diferencia UNAVCO (mm/a)	Sdvx SIRGAS (mm/a)	Sdvx UNAVCO (mm/a)
BGGY		14,53	10,05		4,48		0,32
CN09		7,32	-1,03		6,29		0,60
CN12		13,91	6,50		7,41		0,46
CN20		21,31	-36,81		-15,50		12,41
CN28		22,41	18,40		4,01		0,52
CN35		17,99	12,57		5,42		0,51
CRO1	7,10	15,18	7,26	-0,16	7,92	0,30	0,49
ETCG	10,60		10,98	-0,38		0,58	
GUAT	-0,40	11,80	2,83	-2,43	8,97	0,49	0,88
LMMF		14,64	10,38		4,26		0,93
MANA	6,60	12,08	9,63	-3,03	2,45	0,27	0,44
MAYZ		15,15	8,25		6,90		0,49
PNE2			0,22				
ROA0		19,05	9,08		9,97		1,50
SCUB	-7,80	3,29	43,30	-35,50	-40,01	7,14	7,13
SMRT	5,00	13,93	6,39	-1,39	7,54	0,65	0,33
SSIA	6,10	15,61	9,2909	-3,19	6,32	0,36	0,50

**Cuadro 4.17: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Velocidad Vy**  
Fuente: Elaboración propia basada en las épocas 2013,00 SIRGAS y 2016,92 UNAVCO

<b>Diferencias de velocidad VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Vy</b>							
Estación	SIRGAS (mm/a)	UNAVCO (mm/a)	VelXYZ (mm/a)	Diferencia SIRGAS (mm/a)	Diferencia UNAVCO (mm/a)	Sdvy SIRGAS (mm/a)	Sdvy UNAVCO (mm/a)
BGGY		10,43	8,03		2,40		0,46
CN09		1,68	-37,36		-35,68		1,88
CN12		5,01	5,92		-0,91		1,05
CN20		3,94	-43,57		-39,63		8,12
CN28		5,63	9,25		-3,62		1,04
CN35		4,58	0,90		3,68		1,28
CRO1	9,10	9,49	9,05	0,05	0,44	0,37	0,65
ETCG	4,30		4,59	-0,29		1,47	
GUAT	5,50	0,25	2,50	3,00	-2,25	1,56	0,69
LMMF		13,26	12,29		0,97		1,13
MANA	5,70	3,75	4,06	1,64	-0,31	0,41	1,16
MAYZ		8,43	8,12		0,31		0,84
PNE2			1,66				
ROA0		5,06	4,43		0,63		1,42
SCUB	0,00	0,67	-174,50	-174,50	-173,83	27,68	27,66
SMRT	10,00	10,63	9,14	0,86	1,49	1,17	0,53

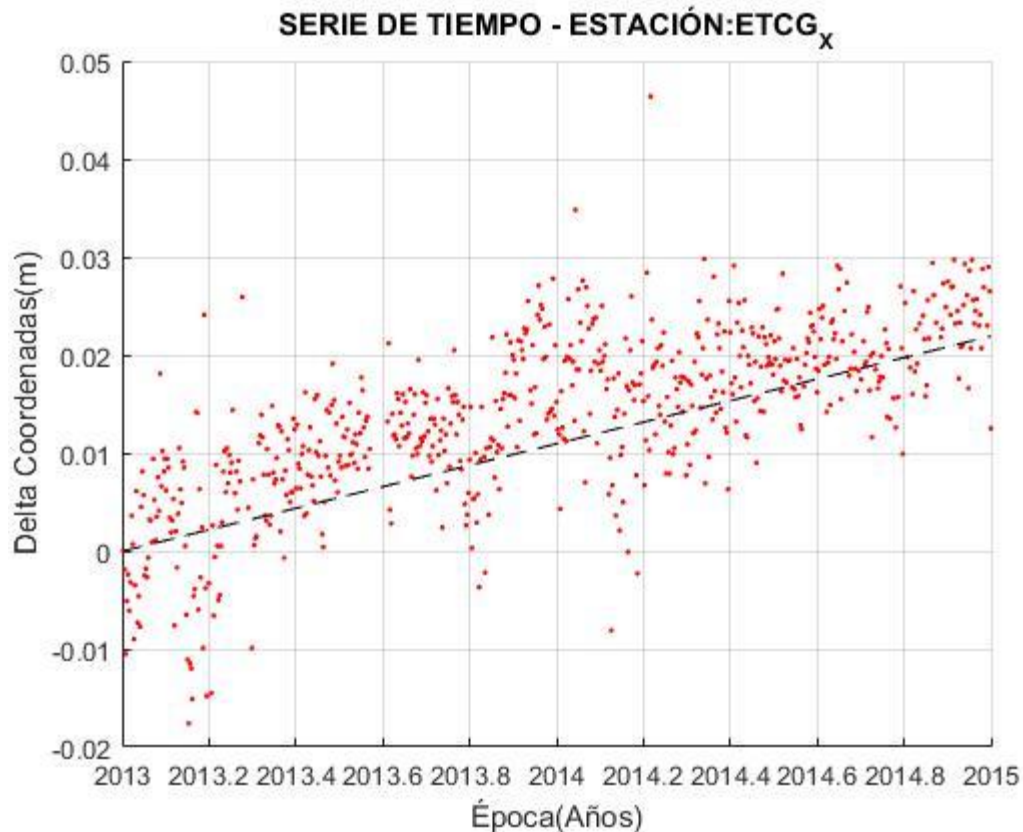
SSIA	4,20	-0,11	0,85	3,35	-0,74	1,16	0,79
------	------	-------	------	------	-------	------	------

**Cuadro 4.18: Resultados VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Velocidad Vz**  
Fuente: Elaboración propia basada en las épocas 2013,00 SIRGAS y 2016,92 UNAVCO

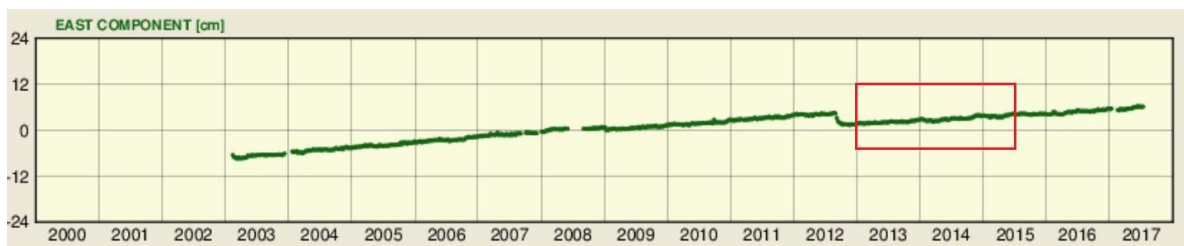
<b>Diferencias de velocidad VelXYZ frente a SIRGAS y UNAVCO – Vz</b>							
Estación	SIRGAS (mm/a)	UNAVCO (mm/a)	VelXYZ (mm/a)	Diferencia SIRGAS (mm/a)	Diferencia UNAVCO (mm/a)	Sdvz SIRGAS (mm/a)	Sdvz UNAVCO (mm/a)
BGGY		6,57	16,38		-9,81		0,28
CN09		0,24	5,15		-4,91		0,55
CN12		2,90	5,25		-2,35		0,48
CN20		7,21	17,95		-10,74		2,39
CN28		10,65	11,91		-1,26		0,45
CN35		3,88	7,27		-3,39		0,51
CRO1	12,50	5,89	12,06	0,44	-6,17	0,25	0,40
ETCG	17,70		14,64	3,06		0,60	
GUAT	-1,80	4,25	0,13	1,67	4,12	0,54	0,49
LMMF		5,27	13,02		-7,75		0,51
MANA	6,30	7,50	9,30	-3,00	-1,80	0,21	0,84
MAYZ		5,94	13,17		-7,23		0,47
PNE2			-4,72				
ROA0		7,30	7,27		0,03		0,53
SCUB	5,50	1,63	73,78	-68,28	-72,15	10,89	10,88
SMRT	13,80	6,41	13,62	0,18	-7,21	0,45	0,30
SSIA	-0,80	3,81	0,69	0,11	3,12	0,33	1,09

### 4.3.3 Series temporales de las estaciones

Las series temporales de cada estación fueron graficadas con la rutina VelXYZ y se incluyen en el anexo 1, mientras que las series de tiempo SIRGAS fueron obtenidas desde su página oficial y las de UNAVCO utilizando la página web Data Archive Interface. La comparación entre ambas se ejemplifica con las figuras 4.4 y 4.5 donde se rescata la similitud del resultado VelXYZ frente a SIRGAS para la estación ETCG en sus coordenadas X y Este, respectivamente. Ambas series pueden definirse como estacionarias y ergódicas puesto que tienen un comportamiento constante positivo y sus elementos de observación son representativos (ver apartado 2.3).



**Figura 4.4: Serie de tiempo para la estación ETCG resultado de VelXYZ**  
 Fuente: Elaboración propia basado en la ejecución de la rutina VelXYZ (época 2013,00)



**Figura 4.5: Serie de tiempo SIRGAS para la estación ETCG**  
 Fuente: (SIRGAS, 2015)

#### 4.4 Cálculo del polo de Euler para la placa Caribe

Los parámetros Euler para la placa Caribe se obtuvieron a través de la rutina EulerPPC, haciendo uso de un ajuste por mínimos cuadrados y utilizando los datos de 15 estaciones (ver apartado 3.9). Estos resultados fueron validados frente al programa gratuito denominado Euler Pole Calculator (EPC) (Goudarzi y Santerre, 2014). El contraste entre los mismos se incluye en el cuadro 4.19, incluyendo además sus respectivas desviaciones estándar. Igualmente, las comparaciones de resultados estadísticos entre ambos programas se incluyen en el cuadro 4.20. Por otra parte, la rutina EulerPPC brindó un mapeo de los parámetros Euler (ver figura 4.6), así como de las estaciones involucradas.

**Cuadro 4.19: Resultados de EulerPPC y su validación frente a EPC**

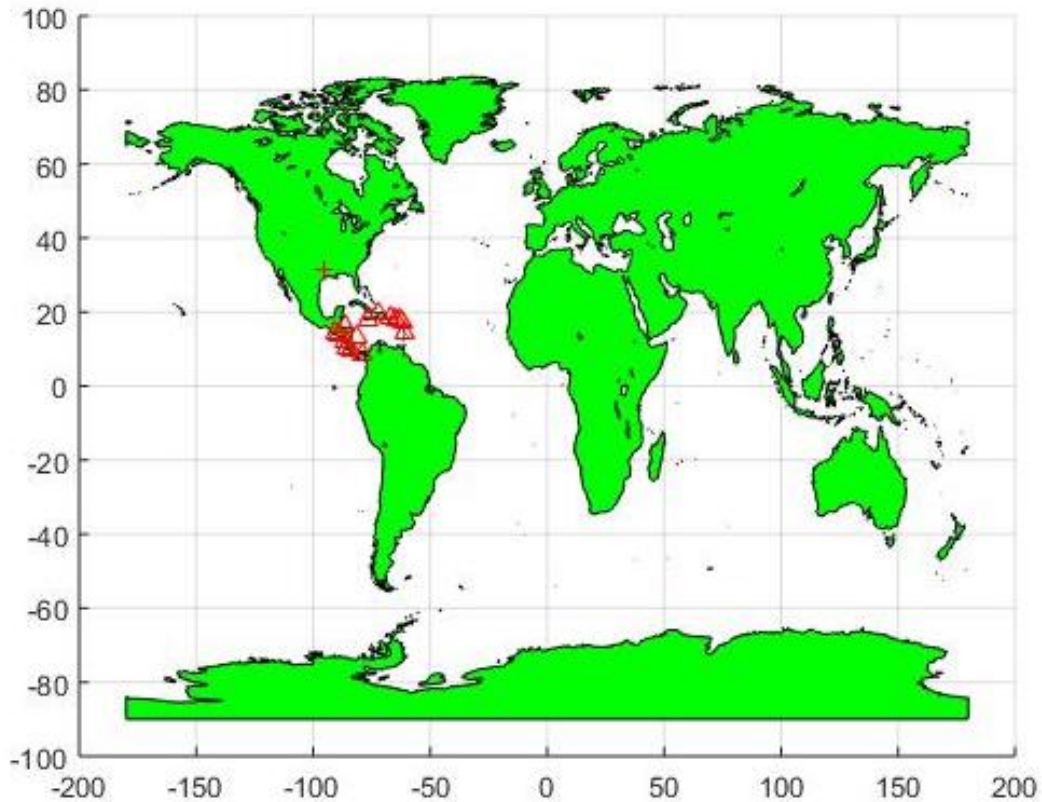
Fuente: Elaboración propia

EPC			EulerPPC		
$\Omega$ (°/Ma)	Latitud (°)	Longitud (°)	$\Omega$ (°/Ma)	Latitud (°)	Longitud (°)
0.28500	31,29299	-95,80839	0.28500	31,29299	-95,80839
$\pm 0.044$	$\pm 6,948$	$\pm 3,664$	$\pm 0.044$	$\pm 6,948$	$\pm 3,664$

**Cuadro 4.20: Contraste estadístico de resultados EPC y EulerPPC**

Fuente: Elaboración propia

EPC			EulerPPC		
Número de Estaciones	Grados de libertad	Sigma A-posteriori	Número de Estaciones	Grados de libertad	Sigma A-posteriori
15	27	15,7706	15	27	15,7706

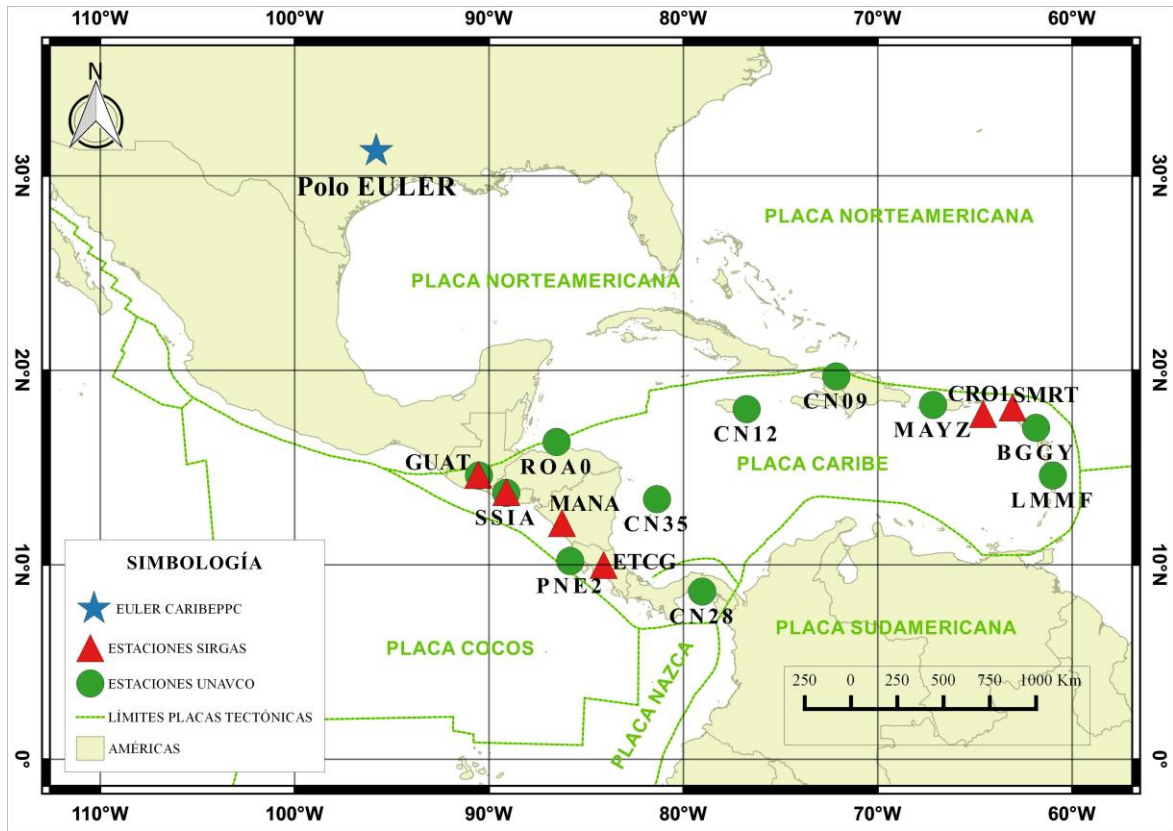


**Figura 4.6: Mapeo del polo de Euler y sus estaciones - producto de EulerPPC**

Fuente: Elaboración propia basado en la rutina EulerPPC

Los resultados exhibidos en los cuadros 4.19 y 4.20, además de la figura 4.6, reflejan una alta consistencia, teniendo valores equivalentes al programa EPC, tanto en sus parámetros, como en sus expresiones estadísticas y geográficas. Basado en esto, se puede concluir que

la validación de EulerPPC se ejecutó eficientemente, confirmando la determinación del modelo cinemático para la placa Caribe (ver apartado 4.5). La ubicación final del polo Euler para el modelo CaribePPC, se representa en la figura 4.7.



**Figura 4.7: Mapeo del polo de Euler para el modelo CaribePPC**  
Fuente: Elaboración propia basada en los límites tectónicos definidos por UNAVCO

#### 4.4.1 Velocidades de las estaciones respecto a su polo de rotación

Con el objetivo de crear un nuevo modelo cinemático, se calcularon las velocidades de cada estación con respecto a los parámetros Euler obtenidos en el apartado 4.4. De esta forma, se consiguió definir el movimiento de la placa Caribe utilizando las 15 estaciones seleccionadas y su respectivo tiempo de procesamiento PPP.

En el cuadro 4.21 se incluyen las velocidades rotacionales ( $V_x, V_y, V_z$ ) para cada estación. Estas velocidades se calcularon con base en los componentes del vector de rotación  $\Omega(\omega_x^p, \omega_y^p, \omega_z^p)^T$ , los cuales se incluyen en el cuadro 4.22. Es necesario utilizar estos parámetros para calcular la velocidad rotacional de cualquier punto con respecto al modelo cinemático determinado en este proyecto

**Cuadro 4.21: Velocidades geocéntricas de rotación resultado de EulerPPC**

Fuente: Elaboración propia

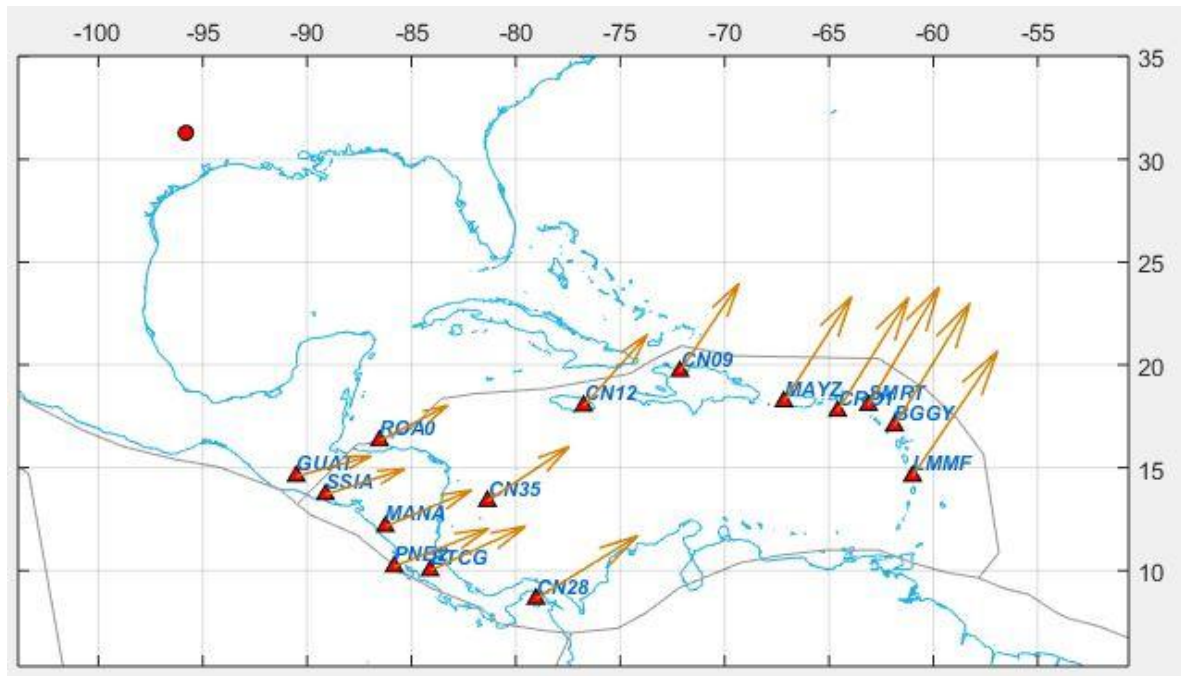
Estación	Vx (mm/a)	Vy (mm/a)	Vz (mm/a)
BGGY	6,00	8,20	14,50
CN09	5,70	5,70	10,30
CN12	7,00	4,40	8,40
CN28	12,00	3,50	7,70
CN35	9,60	3,00	6,60
CRO1	6,00	7,60	13,40
ETCG	11,50	2,10	5,40
GUAT	9,20	0,50	2,40
LMMF	7,20	8,40	15,00
MANA	10,40	1,60	4,40
MAYZ	6,00	6,90	12,40
PNE2	11,40	1,70	4,60
ROA0	8,30	1,70	4,20
SMRT	5,70	7,90	13,90
SSIA	9,70	0,90	3,10

**Cuadro 4.22: Vector de rotación para las estaciones seleccionadas**

Fuente: Elaboración propia basado en la rutina EulerPPC

Vector de Rotación determinado ( $\Omega$ )	
$\Omega_x$	$-4,30 \times 10^{10}$
$\Omega_y$	$-4,23 \times 10^9$
$\Omega_z$	$2,58 \times 10^9$

Los valores presentados en el cuadro 4.21 constan de un movimiento positivo en todos sus componentes, de lo cual se deduce que el movimiento de la placa Caribe según el polo de Euler determinado en este proyecto, describe una trayectoria en dirección contraria a las manecillas del reloj. Para representar lo anterior, se incluye la figura 4.8, la cual representa los vectores de rotación para cada estación según el polo de Euler, producto del programa EPC.



**Figura 4.8: Representación de los vectores de rotación según EPC**  
 Fuente: Elaboración propia basado en el programa EPC

#### 4.5 Modelo cinemático CaribePPC

Tras la ejecución de EulerPPC, se obtuvieron los parámetros del eje de rotación para la placa Caribe basándose en 15 estaciones, las cuales aportaron, al menos, 2 años de datos continuos. Cabe rescatar que los vectores de velocidad utilizados en este cálculo fueron previamente depurados, utilizando metodología estadística que permitió la eliminación de datos atípicos. Bajo este esquema, se generó el modelo cinemático CaribePPC, que describe el movimiento de la zona en estudio con respecto a su eje de rotación e incluyendo sus parámetros respectivos. Este insumo permitió cumplir cabalmente con lo determinado en el objetivo específico número tres del presente proyecto.

Por otra parte, se indica que las velocidades utilizadas en el cálculo Euler, ostentaron exactitudes subcentimétricas, según lo comparado con fuentes SIRGAS y/o UNAVCO (ver apartado 4.3). Estas características también se asignan a los resultados Euler de este proyecto, así como de todos los cálculos que derivan del mismo.

##### 4.5.1 Comparación y validación de CaribePPC

Tras la comparación de CaribePPC y los distintos modelos tectónicos actuales, se encontró que existen diferencias significativas en los parámetros Euler. La mayor discrepancia se presentó frente al modelo NUVEL-1A, diferenciándose  $22.912^\circ$  en latitud,  $15.006^\circ$  en longitud y  $0.568^\circ\text{M/a}$  en su velocidad. Por otra parte, CaribePPC estuvo muy cerca del

modelo VEMOS15 con diferencias de tan solo 4.883° en latitud, 5.408° en longitud y 0.925°M/a en velocidad. El cuadro 4.23 muestra los valores de rotación Euler para cada uno de los modelos tectónicos actuales, mientras que el cuadro 4.24 contiene sus diferencias con respecto a CaribePPC. La proximidad de valores Euler frente al sistema VEMOS15, aprueba la validación del modelo cinemático CaribePPC, convirtiéndolo en un insumo adicional para el cálculo de velocidades rotacionales en cualquier sitio de la placa Caribe (siempre que se utilicen los parámetros Euler presentados en el capítulo 4.4). Esta validación se analizará más a fondo en el capítulo 5.

**Cuadro 4.23: Polo Euler de placa Caribe según modelos tectónicos**

Fuente: Elaboración propia basado en apartado 2.6

<b>Vectores de rotación Euler según Modelo Tectónico</b>			
<b>Modelo</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Longitud (°)</b>	<b>Velocidad (°/Ma)</b>
NUVEL-1A	54,195	-80,802	0,853
VEMOS15	26,400	-90,400	1,210
APKIM2005	32,600	-61,100	0,186
<b>CaribePPC</b>	31,283	-95,808	0,285

**Cuadro 4.24: Diferencias en vector Euler CaribePPC frente a modelos tectónicos**

Fuente: Elaboración propia

<b>Diferencias CaribePPC Vs Modelos Tectónicos</b>			
<b>Modelo</b>	<b>Diferencias Latitud (°)</b>	<b>Diferencias Longitud (°)</b>	<b>Diferencias Velocidad (°/Ma)</b>
NUVEL-1A	22,912	15,006	0,568
VEMOS15	4,883	5,408	0,925
APKIM2005 IGN	1,317	34,708	0,099

Por otra parte, con el fin utilizar el modelo CaribePPC, se seleccionaron 3 estaciones SIRGAS-CON cerca de la región en estudio: AACR, RIDC y ISCO. Se procedió a obtener sus velocidades rotacionales con respecto al polo de EulerPPC. Para este fin, se hizo uso de los datos incluidos en el cuadro 4.25 (coordenadas X, Y, Z y las velocidades Vx, Vy, Vz; con sus respectivos errores). Los resultados de este proceso se encuentran en el cuadro 4.26.

**Cuadro 4.25: Datos para utilización de CaribePPC**

Fuente: Elaboración propia

Estación	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx (m/a)	Vy (m/a)	Vz (m/a)
AACR	644008,9933	-6251064,2836	1093780,8651	0,0072	0,0070	0,0139
				0,0006	0,0021	0,0006
RIDC	651566,5693	-6250735,9628	1091707,7260	0,0075	0,0032	0,0160
				0,0006	0,0017	0,0005
ISCO	326077,3805	-6340127,3155	612125,6542	0,0489	0,0189	0,0734
				0,0005	0,0030	0,0005

**Cuadro 4.26: Velocidades rotacionales resultado de utilización CaribePPC**

Fuente: Elaboración propia basado en EulerPPC

Estación	Vx (m/a)	Vy (m/a)	Vz (m/a)
AACR	0,0012	0,0002	-0,0005
RIDC	0,0012	0,0002	-0,0005
ISCO	0,0014	0,0001	-0,0004

Cabe mencionar que las velocidades presentadas en el cuadro anterior son positivas y describen movimiento en sentido noreste o en contra de las manecillas del reloj. Su cálculo se obtuvo utilizando el vector de rotación ( $\Omega$ ) del cuadro 4.22, con el uso de plantillas de cálculo y siguiendo lo propuesto por Goudarzi y Santerre, 2014.

## Capítulo 5: Análisis de resultados

La metodología desarrollada derivó en una serie de resultados esenciales. Por esta razón, vale formalizar su análisis, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

1. Después del proceso de selección, la red final tomó en cuenta 17 estaciones, las cuales describieron la placa Caribe. La selección permitió excluir todas aquellas que no cumplieran cabalmente con los requisitos planteados, tales como ubicación, disponibilidad de datos e información oficial por parte de SIRGAS y/o UNAVCO. Gracias a este proceso, se pudo garantizar que la cantidad de datos procesados fuera la más grande posible (durante el período seleccionado) y que no existiera otra(s) estación(es) con mayor grado de representatividad. Esto afirmó la creación de un nuevo modelo cinemático para la placa Caribe, incluyendo las estaciones más importantes de la zona.
2. La inclusión de las estaciones SCUB y CN20 durante el cálculo de velocidades se realizó con el objetivo de analizar su cinemática y eventualmente evidenciar la necesidad de un período mínimo de procesamiento (dos años y medio). El período elegido en este proyecto respondió a las recomendaciones mencionadas en el apartado 3.2, sin embargo, casi ninguna estación cumplió con lo citado debido a la disponibilidad de sus datos y, por ende, se tuvieron estaciones que no alcanzaron la cantidad mínima de 30 meses continuos. A pesar de que este trabajo intentó evitar los efectos cíclicos en las series de coordenadas mediante la depuración estadística de sus vectores con el fin de dar mayor consistencia y exactitud, es muy probable que, gracias a la cantidad de datos desarrollada (por razones ya mencionadas), los cálculos presentes hayan sido afectados. Basado en esto, se abre la posibilidad de ampliar la investigación para que, efectivamente, se estudie la influencia de efectos cíclicos durante la ejecución de este proyecto.
3. El procesamiento de archivos RINEX se basó en la ejecución del programa GAPS, mismo que respondió a disminuir tiempos y recursos, convirtiéndose así en uno de los más versátiles. Su versión offline brindó facilidad en la administración de cantidades masivas de datos y la cantidad de productos finales (comentados en el apartado 3.3). No obstante, durante la ejecución se encontraron disyuntivas relacionadas a la salida de datos (resultados), debido a la incompatibilidad de formatos computacionales típicos a la hora de manejar gran volumen de información. Además, se impidió la extracción de información desde los archivos suministrados por GAPS, demandando licenciamiento de software especializado para dicha tarea. Estas dificultades hicieron que, en definitiva, la metodología de procesamiento aquí exhibida se desacredite parcialmente, sin embargo, se debe subrayar lo siguiente: Los objetivos planteados en este proyecto

requerían de la personalización de procesamiento y, por ende, no existió un software PPP especializado que brindara los productos indagados. De esta forma, cabe resaltar la metodología presentada como privativa y alega a los objetivos específicos del proyecto.

4. Durante el cálculo estadístico de este trabajo, se encontró que la gran mayoría de los datos respondían a una distribución normal (ver cuadro 4.2). Sin embargo, existieron algunos componentes coordinados que no incluían este comportamiento. En el presente proyecto, al menos dos de los componentes coordinados para cada estación, poseían distribución normal (según la prueba KS), lo cual permitió aceptar todas las series de coordenadas. Sin embargo, la posibilidad que los datos desarrollados no fueran normales (estadísticamente), era latente. Ante esta premisa, quedaría responder con dos alternativas: excluir la serie de los cálculos posteriores (significa no incluir la estación), o incluir la serie ignorando la base matemática de las pruebas estadísticas para detectar valores atípicos. Utilizando la primera opción, resultaría en la carencia significativa de datos representativos de la zona de estudio y por ende se dificultarían los cálculos. Por otro lado, la segunda alternativa significaría la creación de una metodología diferente, la cual pueda detectar la posible influencia (favorable o no) que presente la serie a los cálculos de velocidades y vectores de rotación. Por otra parte, la incorporación de histogramas al desarrollo estadístico complementó la prueba KS. Estos gráficos brindaron otra perspectiva al comportamiento normal de las series, basándose en la curva Gaussiana y la frecuencia de datos.
5. Los resultados encontrados por la rutina Cha-Gru proyectaron diferencias importantes entre estaciones. La cantidad de datos atípicos manifestados difiere substancialmente, ya que se consiguió detectar discrepancias de hasta 20 veces el promedio. Entre los casos extremos se menciona CN20 (componente X durante el año 2013), ETCG (coordenada Y, también durante 2013) y SSIA (valores X, en el año 2013). Por ende, ante tales resultados, se revela la posible influencia de factores externos que lograron perjudicar o no, el posicionamiento continuo. Ante estas diferencias, se evidencia la inconstancia del posicionamiento en estas estaciones. Tomando en cuenta lo anterior, se indica que la detección de valores atípicos era el insumo fundamental para la depuración del vector de coordenada con el afán de garantizar mayor credibilidad al cálculo de velocidades y vectores de rotación. Sin embargo, la eliminación de los valores atípicos no brindó diferencia sustancial en la exactitud de velocidades frente a fuentes confiables. Los resultados usando un juego de coordenadas depurado y otro sin depurar, mostraron diferencias al nivel submilimétrico que, eventualmente, no aportarían un cambio sustancial en el cómputo de coordenadas y velocidades para el análisis cinemático de una zona específica.

6. Tras la detección de valores atípicos, se procedió a la depuración del vector de coordenadas. Este proceso implicó la creación de coordenadas nuevas que excluyeron los datos en los cuadros 4.3, 4.4 y 4.5. Esto significó la modificación del vector diario de coordenadas para cada una de las estaciones, puesto que algunas ahora no poseían uno o varios de sus componentes diarios. Sin embargo, los cálculos posteriores se realizaron individualmente, lo cual benefició la estimación de velocidades y, por ende, el cálculo del vector de rotación. Se enfatiza que, debido a esto, fue imperativo realizar el ajuste por mínimos cuadrados para cada coordenada, a diferencia de la ejecución común (con sus 3 componentes incluidos). Gracias a este último aspecto, la metodología presentada fue modificada sustancialmente, y los tiempos de ejecución se alargaron.
7. Respecto a la estimación de velocidades, se presentó que tanto las estaciones de SIRGAS, como las de UNAVCO, presentaron discrepancias muy similares frente a aquellas brindadas por VelXYZ. Este aspecto permitió garantizar que el grado de confiabilidad a la hora de estimar velocidades tras a un procesamiento PPP, es del orden centimétrico. Esta exactitud se vio afectada por dos factores principales: el período de datos seleccionado y la estabilidad de la estación. Por otra parte, la correspondencia de SIRGAS-UNAVCO-VelXYZ, formuló el insumo fundamental para el nuevo modelo cinemático, permitiendo de esta forma, la obtención de velocidades rotacionales en cualquier punto de la zona Caribe, con niveles de exactitud centimétricas.
8. Las diferencias de los resultados VelXYZ en la estimación de velocidades tuvieron resultados favorables frente a información SIRGAS y UNAVCO. La discrepancia promedio para cada uno de los componentes coordinados no superó los 620 mm y 260 mm/a para los de velocidad. En el caso frente a las estaciones UNAVCO, se presentó una diferencia menor a 770 mm en sus posiciones, mientras que en las velocidades no se incrementaron a 180 mm/a. Con estos valores, se puede indicar que el grado de compatibilización de un procesamiento PPP (GAPS en este caso) con respecto a un procesamiento científico (entidades SIRGAS y UNAVCO), es del orden centimétrico. Esta exactitud aplica para la metodología presente en este trabajo, sin embargo, no puede ser garantizada para otros técnicas diferentes o similares. No obstante, se promueve la investigación de esta compatibilidad debido, principalmente, a la mejora constante que se brinda a los sistemas PPP.
9. Durante la ejecución de la rutina VelXYZ, se encontraron factores que influyeron en el cálculo de velocidades y por ende al cómputo rotacional. Las correlaciones con procesos físicos, tales como la dilatación y/o contracción térmica, las precipitaciones, entre otros; fueron temas que no se investigaron, pero que, mantuvieron una afectación significativa a los cálculos. Estas correlaciones se presentaron en la estación CN20,

influyendo notablemente en el cálculo de su velocidad y posicionamiento para la época en estudio. Además, la estación SCUB se mencionó con frecuencia, debido al número inconstante de datos aportados, generando la posibilidad de un posible efecto cíclico en la estimación de su posicionamiento y velocidad. Por estas razones, ambas estaciones fueron excluidas del cálculo de Euler, intentando brindar mayor precisión a los parámetros de éste.

10. Referente a los resultados Euler, se puede afirmar lo siguiente: los parámetros de su polo se pueden describir físicamente a unos 17 Km noreste de la ciudad de CenterVille, Houston, Texas, Estados Unidos. El modelo VEMOS15 (el más cercano a CaribePPC) se ubica a unos 750 Km al sureste de esta localidad (en el Golfo de México), mientras que NNR NUVEL-1A se encuentra a 2800 Km y APKIM2005 a 3300 Km. No obstante, CaribePPC y VEMOS15 pertenecen a la categoría geodésica debido a la información que les da origen. Las estaciones SIRGAS en el sistema VEMOS15, aportan la mayoría de los datos durante el cálculo de velocidades rotacionales en la zona Caribe y conjuntamente, incluye información para las placas tectónicas vecinas, incrementando de esta forma, la confiabilidad del sistema. Por esta razón, la cercanía que CaribePPC obtuvo frente al modelo VEMOS15, permite validarlo positivamente, transformándolo en un insumo adicional para la estimación de velocidades rotacionales en cualquier punto de la zona Caribe.
11. Los resultados EulerPPC permitieron establecer la proximidad con respecto al modelo NUVEL-1A. La discrepancia se determinó en 22.9° de latitud, 15.0° de longitud y 0.6°/Ma de velocidad. Comparando estos valores con los obtenidos frente a los demás sistemas, éste obtuvo las diferencias más significativas. Considerando que la información de NNR NUVEL-1A es mayormente geológico-geofísico, mientras que EulerPPC es de carácter geodésico; el grado de comparación es cuestionable. Basado en estos resultados, se determina que las discrepancias de estos modelos no son del todo relevantes para la validación del sistema propuesto. Esto último aplica de igual forma con el modelo tectónico APKIM2005, puesto que es sucesor del modelo NUVEL-1A.
12. La obtención de series temporales permitió obtener de grado estadístico normal para cada una de las observaciones satelitales, durante el período seleccionado. Las series de tiempo calculadas por la rutina VelXYZ fueron comparadas con aquellas de SIRGAS y UNAVCO, obteniendo pocas o ninguna diferencia. Los casos desiguales se presentaron en las estaciones SCUB y CN20, cuyos valores incluían diferencias significativas en sus posiciones. Con respecto a CN20, sus valores presentaron discrepancias de hasta 2 m con respecto a su coordenada inicial o época 2013.00, influenciando de esta forma el cálculo de su velocidad geocéntrica y rotacional Euler. Sin embargo, la serie temporal UNAVCO para esta estación también representa el

mismo comportamiento. En el tanto la estación SCUB, presentó diferencias sustanciales en los resultados VelXYZ debido a la cantidad de datos utilizados.

13. Por otra parte, la rutina EulerPPC brindó parámetros de rotación idénticos a los del programa EPC, lo cual permitió la validación del modelo cinemático CaribePPC. Esta metodología representó el movimiento tectónico de la placa Caribe, generando un sistema rotacional alrededor de un eje Euler (incluyendo las velocidades de rotación para cada estación). De esta manera, se comprobó que los resultados PPP son eficientes y se constituyen en una alternativa ante los softwares científicos
  
14. La generación del modelo cinemático CaribePPC permitió el cálculo de velocidades rotacionales para cualquier punto (preferiblemente dentro de la placa Caribe). El uso del cuadro 4.22 brinda la posibilidad de utilizar las coordenadas geocéntricas de una estación en conjunto con sus velocidades y errores respectivos para computarizar su velocidad rotacional referida al polo de Euler establecido. La exactitud de este cálculo dependerá primeramente de las velocidades geocéntricas calculadas en este proyecto (incluidas en el cuadro 4.6) y seguido de las observaciones y/o datos de entrada.

## Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Este proyecto se ejecutó bajo la siguiente premisa: los servicios de procesamiento en línea no ofrecían exactitudes cercanas a los softwares científicos, tales como Bernese o GAMIT/GLOBK. Se planteó y ejecutó un plan para incrementar el conocimiento geofísico, abordando argumentos que hasta ahora habían sido analizados en escasas ocasiones (a nivel nacional). Tal fue el caso de Moya (2014), donde se hace referencia a la definición de los límites tectónicos del Bloque de Panamá, haciendo uso del teorema Euler y su automatización en ambiente computacional. Por otra parte, se toma en cuenta el aporte de Moya et al (2014) el cual hace referencia al movimiento cinemático de un grupo de estaciones SIRGAS procesadas con PPP en línea. La metodología de este último fue similar a la del presente proyecto, discrepando en la generación de modelo cinemático tras el cálculo de parámetros y velocidades de rotación; además de la depuración estadística del vector de coordenadas. Estos últimos aspectos permiten señalar el aporte realizado en el presente proyecto, convirtiéndolo en plataforma de investigación para futuras investigaciones geofísicas y/o geológicas.

Es cierto que concurren muchas opciones de sistemas PPP en línea, sin embargo, durante la realización del proyecto, se rescató la versatilidad del software GAPS. La aptitud de éste permitió agilizar los tiempos y favorecer la manipulación de los archivos de salida. Estos factores garantizaron los procesos PPP como alternativas a los softwares científicos de procesamiento GNSS. Esto último se condicionó al tipo de productos requeridos, entre los cuales se pueden mencionar: la estimación de velocidades geocéntricas de una estación GNSS, o la generación de un modelo cinemático local, entre otros. La exactitud al instaurar estos productos, pudieron o no representar la realidad de la zona en cuestión, no obstante, existen factores que lograron alterar la descripción cinemática, entiéndase correlaciones con procesos físicos, tales como la dilatación o contracción térmica, las precipitaciones, entre otros. Estas correlaciones se presentaron en la estación CN20, influyendo notablemente en el cálculo de su velocidad y posicionamiento.

En el área de depuramiento estadístico, se identificó la necesidad de expandir la investigación. El objetivo específico número uno se llevó a cabalidad y los resultados manifestados por la rutina Cha-Gru aportaron datos atípicos que fueron excluidos, esperando mayor consistencia en la información. No obstante, este fin no se llevó con eficiencia, es decir, las exactitudes frente a SIRGAS y UNAVCO fueron las mismas aun cuando los datos atípicos se excluyeron (ver capítulo 4.2). Dentro de la metodología

exhibida, la depuración del vector de coordenadas se convirtió en un proceso descartable, debido a que el cálculo de velocidades VelXYZ ofreció resultados similares utilizando coordenadas depuradas y sin depurar.

Por otro lado, la estimación de velocidades con la rutina VelXYZ, permitió establecer la compatibilización de los sistemas PPP frente a procesamiento científico. Esto último, consiguió ser afectado por dos aspectos principales: la inestabilidad de la estación y los efectos cíclicos. Los resultados presentes incluyeron ambos aspectos, comprobando lo propuesto por Blewitt y Lavallée (2002), donde se recomienda un tiempo mínimo para la estimación de velocidades geocéntricas. Además, procesos físicos (mencionados anteriormente); afectaron la estimación de posicionamiento y velocidades para cada estación. No obstante, los valores arrojados por VelXYZ, consiguieron cercanías óptimas para los fines que se requerían. De esta forma se compatibilizaron los resultados PPP frente a un procesamiento científico.

Las estaciones CN20 y SCUB mostraron resultados desfavorables cuando se compararon con las entidades SIRGAS y UNAVCO. No obstante, se mantuvieron durante el cálculo de velocidades (rutina VelXYZ) con el objetivo de evaluar y analizar su cinemática. Es en este momento cuando se identifican los resultados, concluyendo que efectivamente, estas estaciones fueron afectadas por efectos cíclicos. Con el fin de evitar este efecto, las estaciones CN20 y SCUB fueron excluidas en los cálculos posteriores, de lo contrario, el modelo CaribePPC habría sido influenciado por estas estaciones, disminuyendo la precisión de sus resultados y por consiguiente de los resultados durante su utilización. De esta forma, el presente proyecto se convierte en una plataforma para futuras investigaciones, con la cual se puede ahondar en efectos cíclicos y su influencia en la estimación de velocidades. Como hipótesis, los resultados más cercanos a las fuentes confiables deberían ser los que poseen más de 30 meses de procesamiento continuo.

Por otra parte, la rutina EulerPPC brindó parámetros de rotación idénticos a los del programa EPC, lo cual permitió validar el modelo cinemático CaribePPC, representando el movimiento de la placa Caribe en un sistema rotacional alrededor de un polo de Euler. De esta manera, se creó la posibilidad de utilizar su vector de rotación para calcular la velocidad rotacional de cualquier punto o estación GNSS deseada. Además, esta validación, comprobó que los resultados PPP son eficientes y brindan exactitudes centimétricas, convirtiéndolos en una alternativa ante los softwares científicos.

## **6.2 Recomendaciones**

- Durante el procesamiento con software GAPS, se recomienda la generación de archivos comprimidos (\*.rar) incluyendo los archivos de observación (\*.o). La utilización de archivos ejecutables (\*.bat) puede aumentar los tiempos de ejecución,

puesto que estos requieren la creación de comandos GAPS individuales para cada día GPS.

- El procesamiento de datos GPS con el programa GAPS se llevó a cabo con sistema operativo Windows 8.1, haciendo uso de procesador Intel®Core™ I5-5200U (4 núcleos, 2.2GHz de frecuencia básica, 4MB de caché) y una memoria RAM de 6 MB. Si bien los procesos se realizaron con éxito y con períodos relativamente cortos, se recomienda usar mayores capacidades. Esto con el objetivo de disminuir tiempos y agilizar la ejecución de metodología. Asimismo, es preciso la utilización de un Suplemento de Poder Ininterrumpida (UPS, por sus siglas en inglés), con el fin de resguardar el equipo y obtener un tiempo extra sin ser afectado por interrupciones eléctricas
- Debido a factores ajenos al software GAPS, tales como electricidad o falta de internet; en ocasiones no se procesaron algunos días GPS. Para evitar revisar las soluciones una a una, se recomienda la inclusión de un programa capaz de detectar patrones en los nombres de archivos, para de esta forma, encontrar los días GPS que efectivamente no se procesaron.
- La siguiente es recomendación al software GAPS: con el objetivo de agilizar los cálculos y procedimientos de cualquier disciplina, es recomendable, incluir los resultados en formato \*.xlxs. Esto permitiría agilizar los cálculos y procedimientos de cualquier proyecto.
- Con tal de respaldar la información, es recomendable utilizar una nube informática, de manera que se puedan alojar los resultados de forma automática. Actualmente, existen diversas alternativas que resguardan hasta 50 GB de forma gratuita, y hasta 1 TB de forma paga.
- Se recomienda además la automatización computacional para la detección del grado de normalidad estadística en una serie de coordenadas, haciendo uso de la prueba Kolomogorov-Smirnov. La misma podría establecer también otros comportamientos estadísticos, tales como la distribución General, la Exponencial o la Weibull.
- Con el objetivo de disminuir los tiempos de la metodología planteada en este trabajo, se recomienda extender la rutina Cha-Gru, haciéndola capaz de excluir automáticamente los datos atípicos encontrados. Esto daría como resultado un vector de coordenadas depurado (en archivo Excel) según las pruebas Grubbs y/o Chauvenet.
- Los procedimientos PPP son una gran alternativa para cualquier disciplina que utilice los sistemas de posicionamiento global. Su utilización crece día a día gracias a los

avances de la tecnología. La Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia (ETCG, por sus siglas) de la Universidad Nacional, en conjunto con el Centro de Procesamiento Nacional de Datos GPS (CNPDG, por sus siglas) tienen la capacidad técnica para ser pioneros nacionales en la fundación de una plataforma PPP, aumentando de esta manera, el prestigio y reconocimiento de la ETCG. Un proyecto como éste también extendería el conocimiento y la presencia de egresados en instituciones y labores diferentes a las que comúnmente se ven envueltos.

- Es recomendable la inmersión de ETCG en disciplinas diferentes a los que hasta ahora se ha involucrado. El presente proyecto ha rescatado la posibilidad de investigación en la disciplina geofísica. Si bien, dentro de la malla curricular de la carrera, existe un curso que contempla esta área, el tiempo y dedicación del estudiantado es mínimo y a veces inexistente. Como bien es conocido, el uso de sistemas de posicionamiento global no es para la cartografía, catastro y topografía solamente. Por esta razón, se recomienda promover actividades e investigaciones diversas, tales como las ingenierías forestal, agronómica e industrial, la geología, geofísica, meteorología, navegación marítima y aérea, astronomía, sensores remotos, seguridad pública y socorro, transporte autónomo, entre otros. Los sistemas de posicionamiento global apelan un papel significativo en estas áreas y la ETCG es experta en los mismos. Consecuentemente, los convenios y asociaciones con facultades universitarias y/o instituciones gubernamentales podrían simbolizar una plataforma trascendental en el ejercicio y renovación de la carrera.
- Se invita a profundizar en la depuración estadística con diferentes pruebas. La metodología presente comprobó que la eliminación de datos atípicos con técnicas Chauvenet y Grubbs, no produjo mayor consistencia en la información (ver cuadro 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12). Las diferencias entre un juego de coordenadas sin depurar y otras depuradas fue establecida en el nivel subcentimétrico y, por lo tanto, no son suficientes para la depuración de valores diarios en un vector de coordenadas. Por esta razón, la expansión del conocimiento permitirá descubrir la metodología eficiente para los fines planteados.
- La generación del modelo cinemático denominado CaribePPC, permite calcular la velocidad rotacional de cualquier punto, siempre y cuando se utilicen los parámetros Euler presentados en este documento. Se debe tomar en cuenta que, para mantener exactitudes acordes a este estudio, los puntos a calcular deberán estar dentro de la misma placa tectónica. Por otra parte, se invita a analizar las velocidades rotacionales de puntos en otras placas tectónicas, haciendo uso de los parámetros Euler que aparecen en este proyecto.

- La metodología presentada puede ser aplicada a distintas labores, tales como terremotos (varios días GPS antes y después del fenómeno), deslizamientos de terrenos, análisis de deformaciones, entre otras. Si a estas labores se les agrega además un sistema PPP-RTK, podríamos entonces incluir nuevas alternativas, tales como: corrección de desplazamiento en tiempo real de flotillas de vehículos, deportes de velocidad, navegación aérea o marítima, seguridad y monitoreo de bienes muebles, entre otras.

## Fuentes de consulta

- Aktug, B., & Yildirim, O. (23 de Agosto de 2013). Regularized Estimation Of Euler Pole Parameters. *Earth Planet Space*, 65, pp.699-705.
- Alfaro, P., Chaves, F. A., Fernandez, C., & Gutierrez, G. (2013). Tectónica de Placas, teoría integradora sobre el funcionamiento del planeta. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 168-180.
- Amiri-Simkooei, A. R., Tiberius, C. J., & Teunissen, P. G. (31 de Julio de 2007). Assesment of Noise in GPS coordinate time series: Methodology and Results. *112*. doi:10.1029/2006JB004913
- Berné, J., Garrido, N., & Belén, A. (28 de Noviembre de 2014). <https://www.slideshare.net>. Obtenido de Software científico bernese gnss: <https://www.slideshare.net/nataliagarrido2012/software-cientifico-bernese-gnss>
- Bernese GNSS Software*. (24 de 04 de 2017). Obtenido de Bernese.unibe.ch: <http://www.bernese.unibe.ch/>
- Bevis, M., & Brown, A. (2014). Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. *Journal Of Geodesy*, 283-311. doi:10.1007/s00190-013-0685-5
- Bird, P. (14 de Marzo de 2003). An Updated Digital Model of Plate Boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3). doi:10.1029/2001GC000252
- Blewitt, G., & Lavallée, D. (2002). Effect of Annual Signals on Geodetic Velocity. *Journal Of Geophysical Research*, 107. doi:10.1029/2001JB000570
- Borre, K., & Tiberius, C. (19 de Setiembre de 2000). Time Series Analysis of GPS Observables. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, 1885 - 1894.
- Cai, C., & Gao, Y. (2007). Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations. *Journal of Global Positioning Systems*, Vol.6, pp.13-22.

- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., & Meindl, M. (2007). *Bernese GPS Software Version 5.0*. Berna, Suiza: Astronomical Institute, University of Bern.
- DeMets, C., Argus, D., & Gordon, R. (2008). <http://geoscience.wisc.edu>. Obtenido de MORVEL and NNR-MORVEL56 plate velocity estimates and information: [http://geoscience.wisc.edu/~chuck/MORVEL/morvel\\_info.html](http://geoscience.wisc.edu/~chuck/MORVEL/morvel_info.html)
- DeMets, C., Gordon, R. G., & Argus, D. F. (30 de Marzo de 2010). Geologically Current Plate Motions. *Geophysics Journal*. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1990). Current Plate Motions. *Geophysics*, 101, 425-478.
- DR MyCommerce. (2013). *SWREG*. (D. MyCommerce, Editor) Recuperado el 03 de Julio de 2017, de SWREG: [www.swreg.org](http://www.swreg.org)
- Drewes, H. (Marzo de 1982). A Geodetic Approach For The Recovery Of Global Kinematic Plate Parameters. *Bulletin Géodésique*, 56(1), 70-79.
- Drewes, H. (02 de Junio de 2009). The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model APKIM2005 as Basis for a Non-Rotating ITRF. *International Association of Geodesy Symposia*, 134, pp 95-99.
- Drewes, H. (2009). The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model APKIM2005 as Basis for a Non-Rotating ITRF. En *Geodetic Reference Frames* (págs. 95-99). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Drewes, H., & Sanchez, L. (2014). Actualizacion del modelo de velocidades de SIRGAS. *Simposio SIRGAS 2014*. La Paz: Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut.
- Drewes, H., & Sanchez, L. (2016). The Velocity Model for SIRGAS 2010-2015. *Symposium SIRGAS*. Quito, Ecuador.
- Ebner, R., & Featherstone, E. (2008). How Well Can Online GPS-PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks? *Journal of Applied Geodesy* 2, pp.149-157. doi:10.1515/JAG.2008.017
- Elliot, C. A. (1979). Chauvenet, William.” In *Biographical Dictionary of American Science: The Seventeenth through the Nineteenth Centuries.*, (págs. 51-52). WestPort, Connecticut.

- Fowler, C. M. (2005). *The Solid Earth An Introduction to Global Geophysics*. En C. M. Fowler, *The Solid Earth An Introduction to Global Geophysics* (págs. 14-24). Cambridge University Press.
- Gemael, C., Lima Machado, A. M., & Wandresen, R. (1994). *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Paraná: Editorial UFPR.
- Ghoddousi, R., & Dare, P. (2006). Online GPS Processing Services: An Initial Study. *GPS Salut*, 10, 12-20.
- Goudarzi, M. A., & Santerre, R. M. (2014). EPC: Matlab software to estimate Euler Pole Parameters. *GPS Solut*, 18, 153-162. doi:10.1007/s10291-013-0354-4
- Grubbs, F. E. (Febrero de 1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, 11(1).
- Grubbs, F. E. (1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, Vol. 11(No. 1), 1-21.
- Hawkins, D. M. (1980). *Monographs on Applied Probability and Statistics: Identification of Outliers*. Chapman and Hall.
- Herring, T. (12 de Setiembre de 2017). *UNAVCO GAGE GPS Data Analysis Plan and Products*. Obtenido de UNAVCO: [https://www.unavco.org/data/gps-gnss/derived-products/docs/GAGE\\_GPS\\_Analysis\\_Plan\\_20170912.pdf](https://www.unavco.org/data/gps-gnss/derived-products/docs/GAGE_GPS_Analysis_Plan_20170912.pdf)
- Herring, T., King, R., & McClusky, S. (2010). Introduction to Gamit/Globk. *Massachusetts Institute of Technology*,.
- Herring, T., Melbourne, T., Murray, M., & Floyd, M. (2016). Plate Boundary Observatory And Related Networks: GPS Data Analysis Methods And Geodetic Products. *AGU publications*.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & More*. Austria: Springer.
- Kavalevsky, J., Mueller, I., & Kolaczek, B. (1989). *Reference Frames in Astronomy and Geophysics*. Kluwer Academic Publishers.
- Keneddy, J. B., & Neville, A. B. (1982). *Estadística para ciencias y la ingeniería*. México DF: HARLA SA.

- Kwinta, A. (2010). Assessment of Outliers in Deformation Calculated. *Journal Of Mining Science, Vol. 46*(No. 4).
- Leandro, R. F., Santos, M. C., & Langley, R. B. (2007). GAPS: The GPS Analysis and Positioning Software - A Brief Overview. *ION GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division*, (págs. 25-28). Fort Worth, TX.
- Lichten, S. (1995). *GIPSY-OASIS II: A High Precision GPS Data Processing System And General Satellite Orbit Analysis Tool*. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory.
- Lichtenegger, H., & Sunkel, H. (Setiembre de 1987). A Contribution to the Kinematics of Plate Tectonics. *Bulletin Geodesique, 61*(3), pp.281-289. doi:10.1007/BF02521233
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals Of Geophysics* (2 ed.). New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Mao, A., Harrison, C. G., & Dixon, T. H. (10 de Febrero de 1999). Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research, 104*, pp.2797-2816. doi:0148-0227/99/1998JB900033\$09.00
- Meza, A. (19 de Febrero de 2016). *Alexander Meza*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=GeLQxuQl1mA>
- Moore, A. W., & Neilan, R. E. (Noviembre de 2005). The International GPS Service tracking network: Enabling diverse studies and projects through international cooperation. *Journal of Geodynamics, 40*(4-5), 461-469. doi:10.1016/j.jog.2005.10.009
- Moya, J. (2010). Determinación de la exactitud vertical del modelo geométrico del geoide MGH44 mediante la aplicación del estándar de la NSSDA. *UNICIENCIA*, pp. 41-40.
- Moya, J. (2014). *Desarrollo, implementación y análisis de un modelo cinemático local de velocidades para Costa Rica basado en la integración y homogenización de datos estaciones GNSS continuas*. Madrid, Madrid, España: Escuela Tecnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía.
- Moya, J., Bastos, S., & Rivas, M. (2014). Cálculo mediante la aplicación del algoritmos de ajuste por mínimos cuadrados de los componentes de velocidad para estaciones GNSS continuas. *Uniciencia, 28*(2), 1-14.

- Moya, J., Bastos, S., Rivas, M. J., & Cordero, G. (Enero de 2014). Evaluación del comportamiento cinemático de una serie de estaciones del Sistema Geocéntrico para las Ámericas procesadas con Precise Point Positioning en línea. *UNICIENCIA*, 28(1), 2-19.
- Natural Resources Canadá. (2015). *Natural Resources Canada*. Recuperado el 07 de Julio de 2015, de <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>
- Pérez, J., Mónico, J., & Chaves, J. (2003). Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case. *Journal of Global Positioning Systems*, 2(2), 90-99.
- Prestly, M. B. (1981). *Spectral Analysis and Time Series*. Londres: Academic Press.
- Priestley, M. B. (1981). *Spectral Analysis and Time Series. Probability and Mathematical Statistics, a Series of Monographs and Textbooks*. Londres: Academic Press Ltd.
- Rivas Guzman, M. J. (2015). *PROPUESTA DE UNA RED GEODÉSICA NACIONAL DE ESTACIONES DE OBSERVACIÓN*. Heredia, Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional.
- Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C., & Grinter, T. (Enero de 2012). Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS positioning Drawing to an End? *FIG Working Week 2012*. Roma, Italia.
- SIRGAS. (2012). *SIRGAS*. Recuperado el 16 de 02 de 2016, de SIRGAS: <http://www.sirgas.org/index.php?id=61>
- SIRGAS. (27 de 02 de 2015). *SIRGAS*. (SIRGAS) Recuperado el 07 de Julio de 2015, de <http://www.sirgas.org/>
- Sofer, N. (2004). *NirSoft*. Obtenido de NirSoft: <http://www.nirsoft.net/>
- UNAVCO. (17 de Julio de 2015). *UNAVCO*. Recuperado el 2 de Agosto de 2015, de <http://www.unavco.org/software/visualization/GPS-Velocity-Viewer/GPS-Velocity-Viewer-frames.html>
- UNAVCO. (16 de Junio de 2015). *UNAVCO.org*. Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de UNAVCO.org/education: [https://www.unavco.org/education/.../google-earth.../learn\\_about\\_plate\\_tectonics.kmz](https://www.unavco.org/education/.../google-earth.../learn_about_plate_tectonics.kmz)

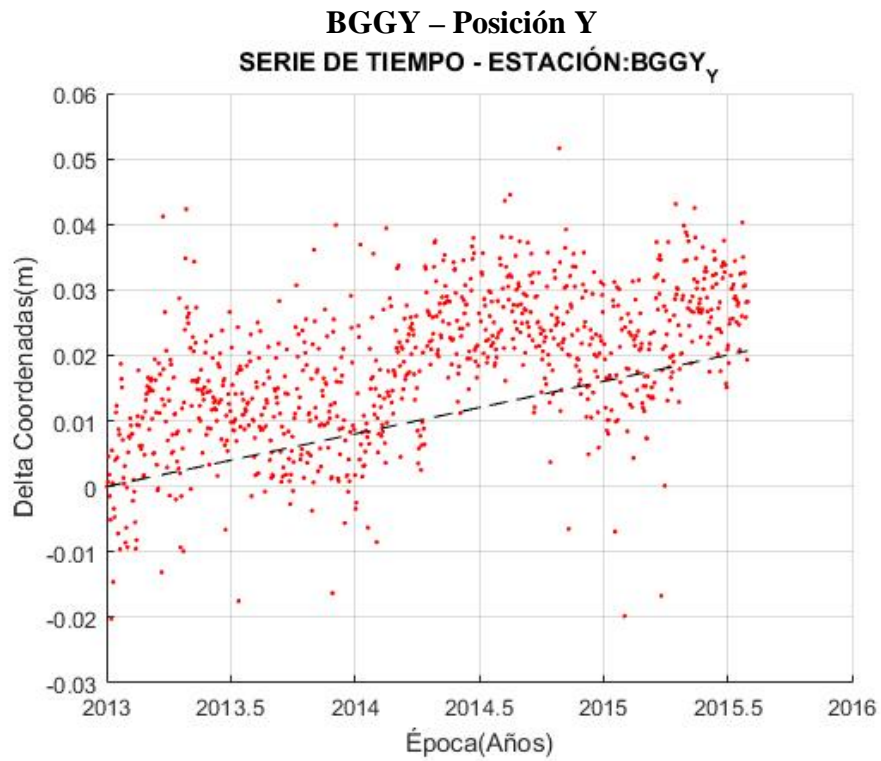
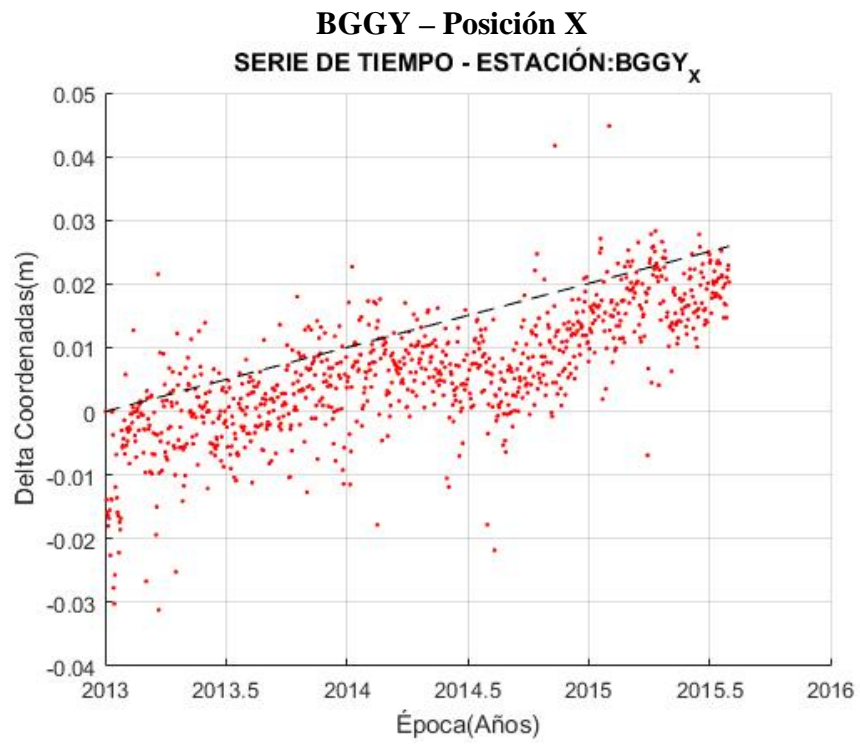
UNAVCO. (2016). *UNAVCO*. (I. UNAVCO, Editor) Recuperado el 16 de 02 de 2016, de UNAVCO: <http://www.unavco.org/about/history/history.html>

Zaiontz, C. (2017). *Real Statistics Using Excel*. Recuperado el Febrero de 2017, de <http://www.real-statistics.com/students-t-distribution/identifying-outliers-using-t-distribution/grubbs-test/>

## **Anexos**

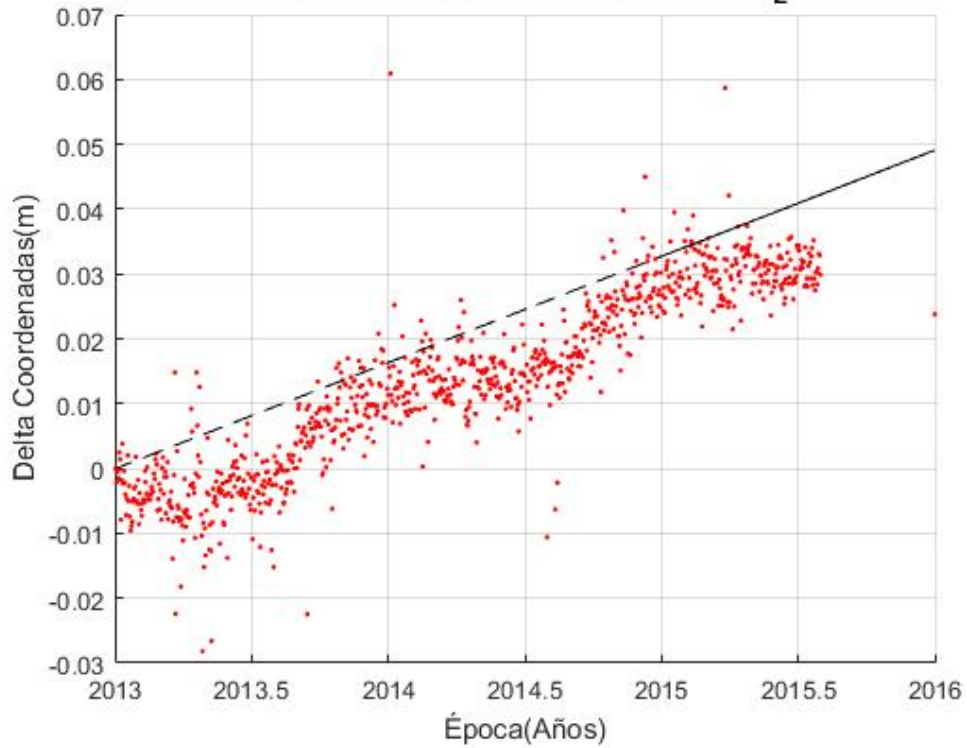
### **Anexo 1: Series temporales resultado de la rutina VelXYZ**

# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

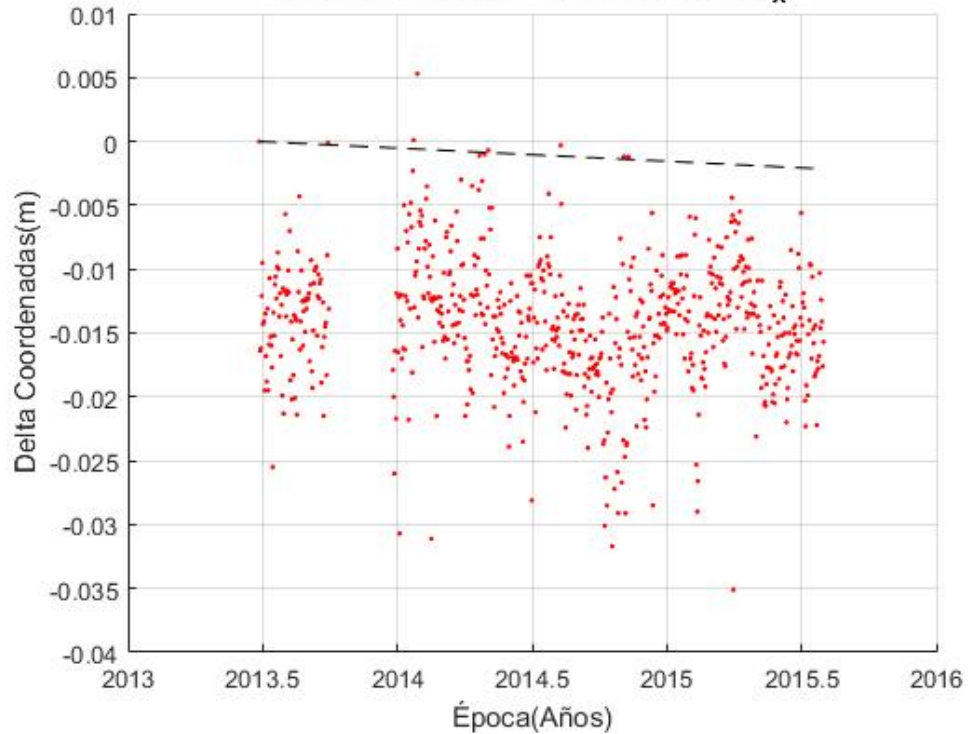


# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

**BGGY – Posición Z**  
**SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN: BGGY<sub>Z</sub>**

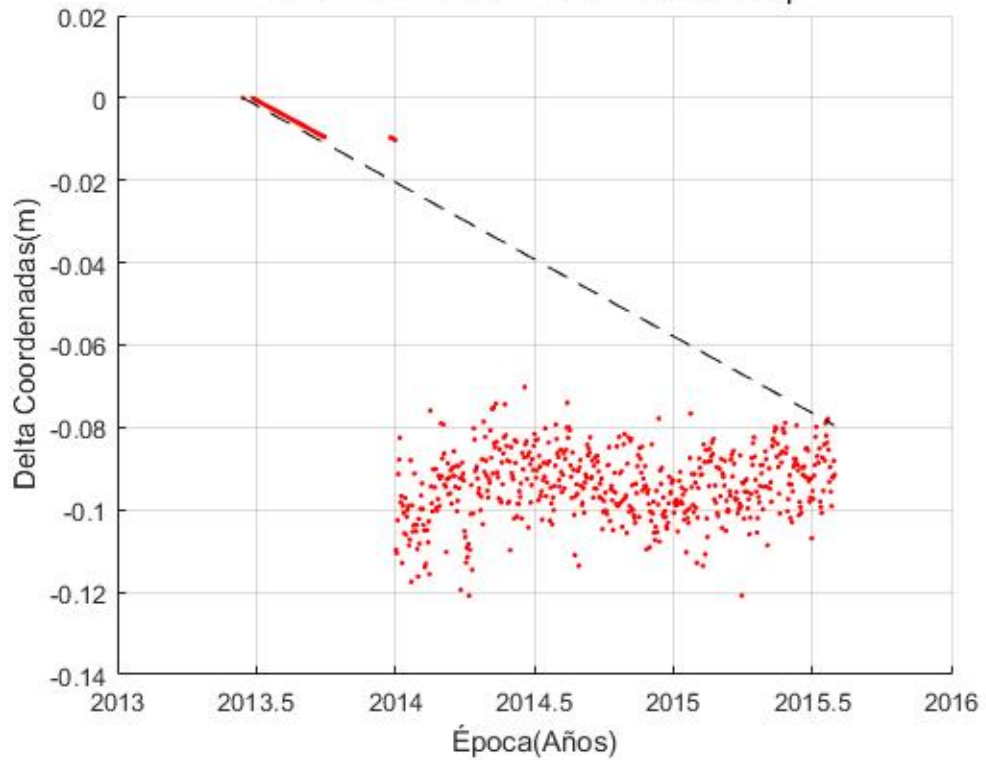


**CN09 - Posición X**  
**SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN: CN09<sub>X</sub>**

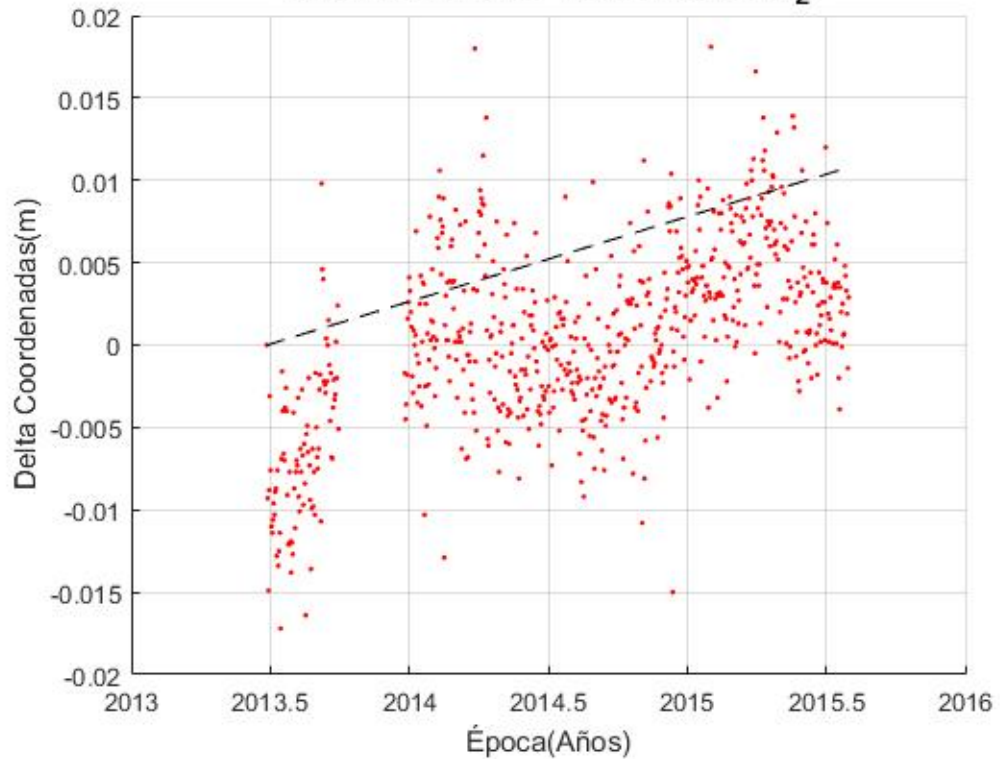


# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

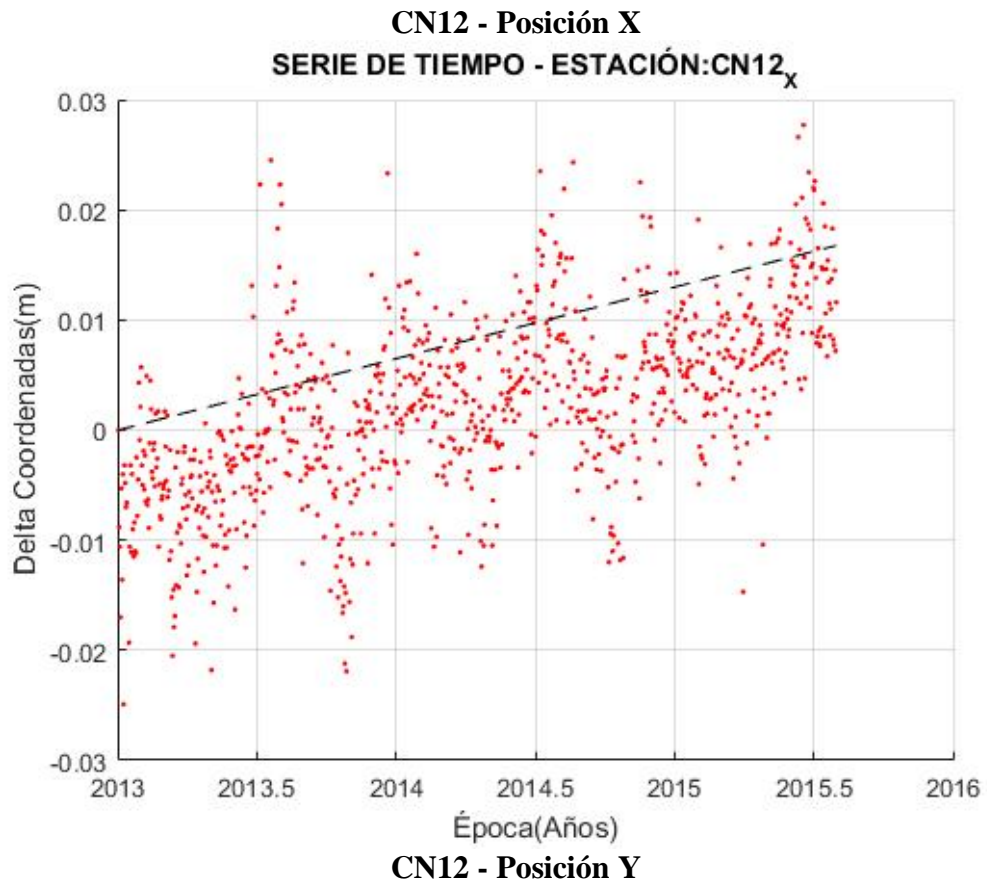
**CN09 - Posición Y**  
**SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN:CN09<sub>Y</sub>**



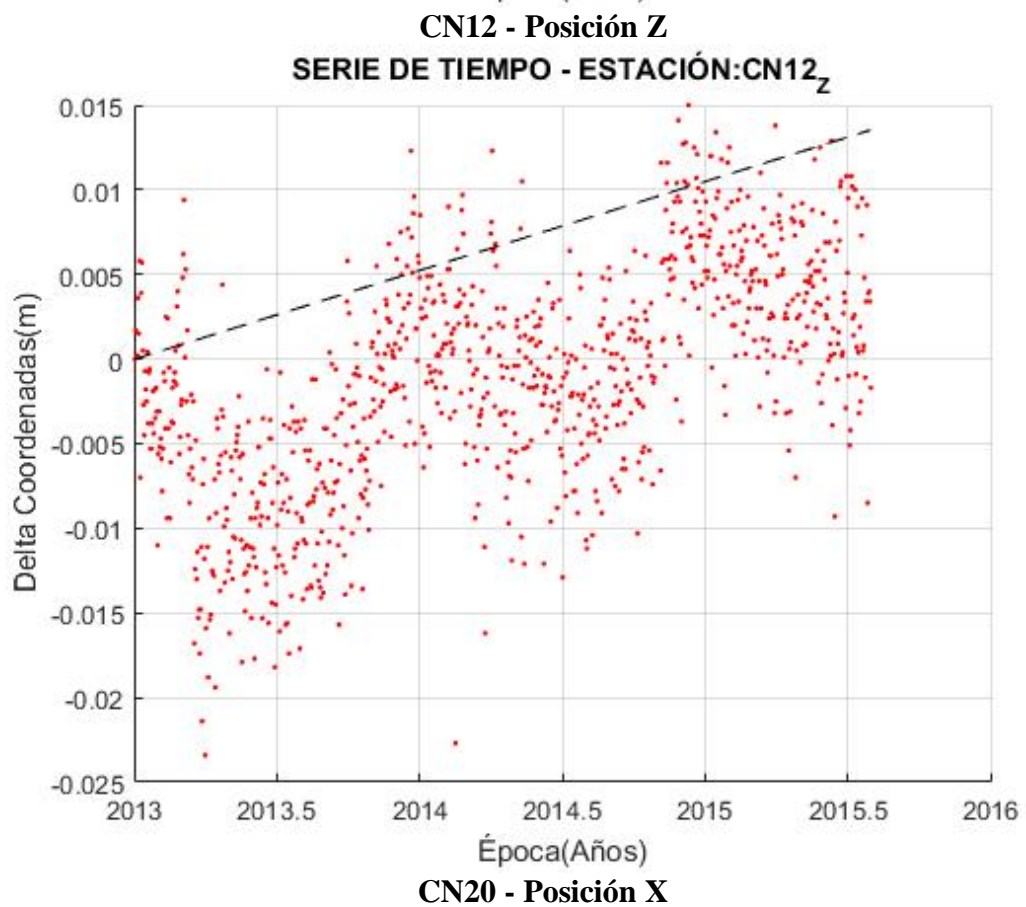
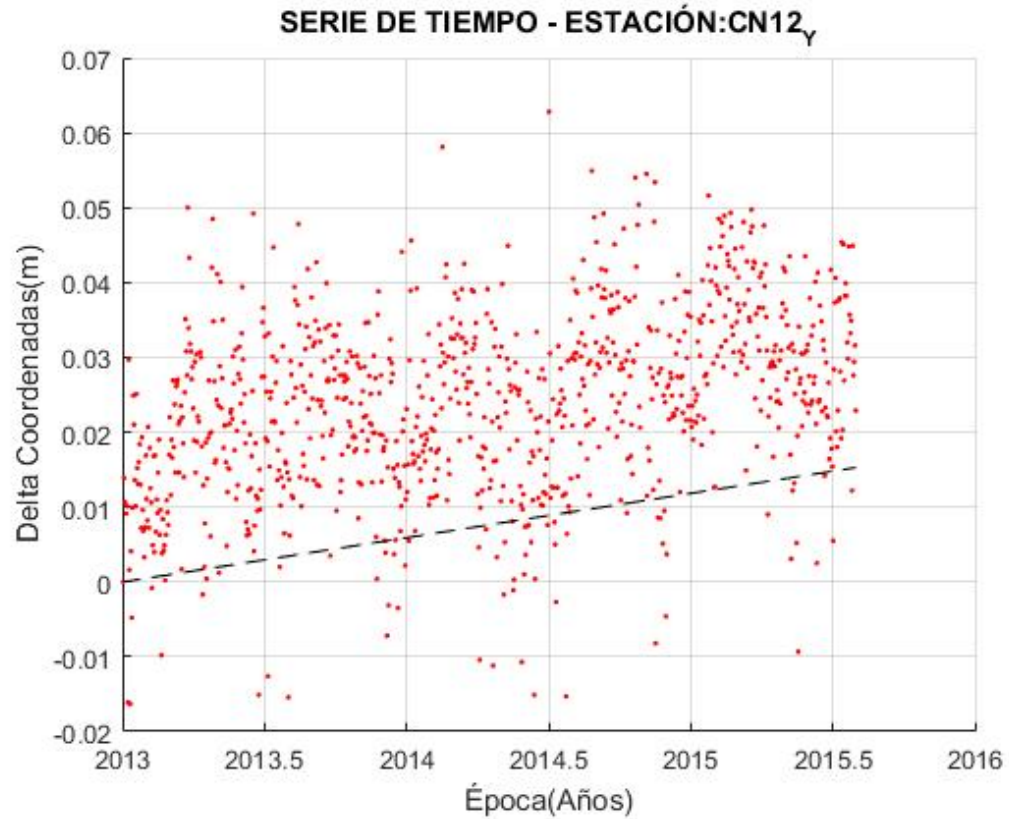
**CN09 - Posición Z**  
**SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN:CN09<sub>Z</sub>**



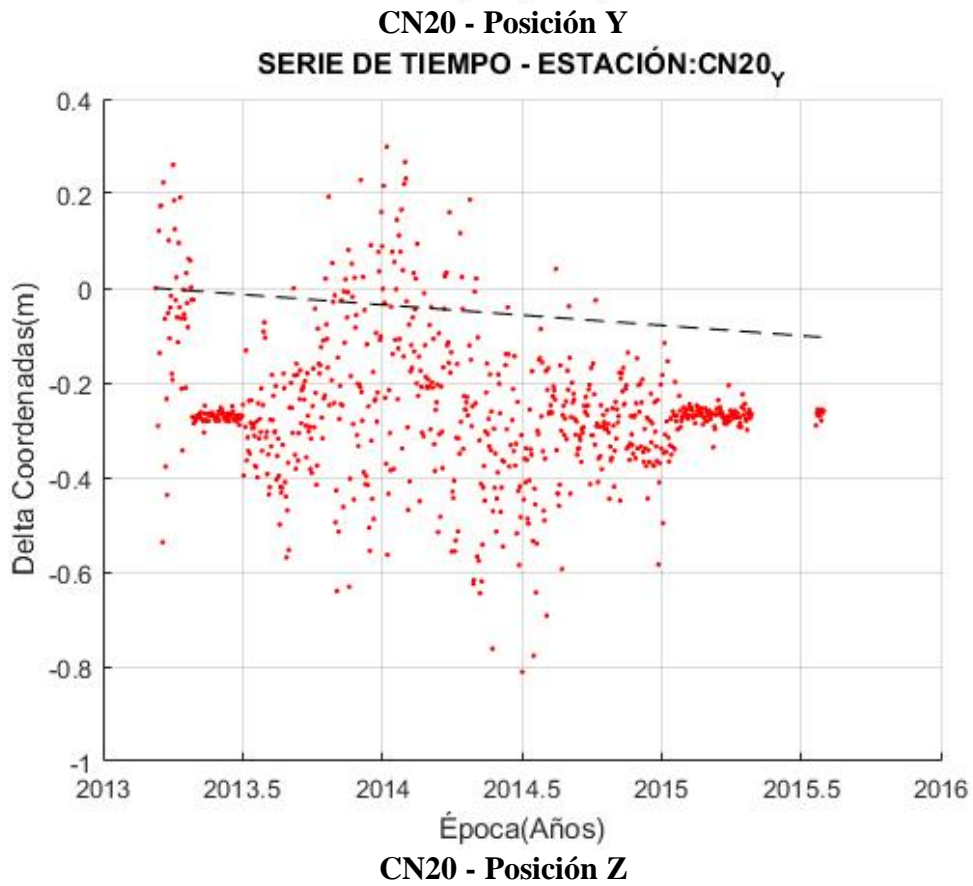
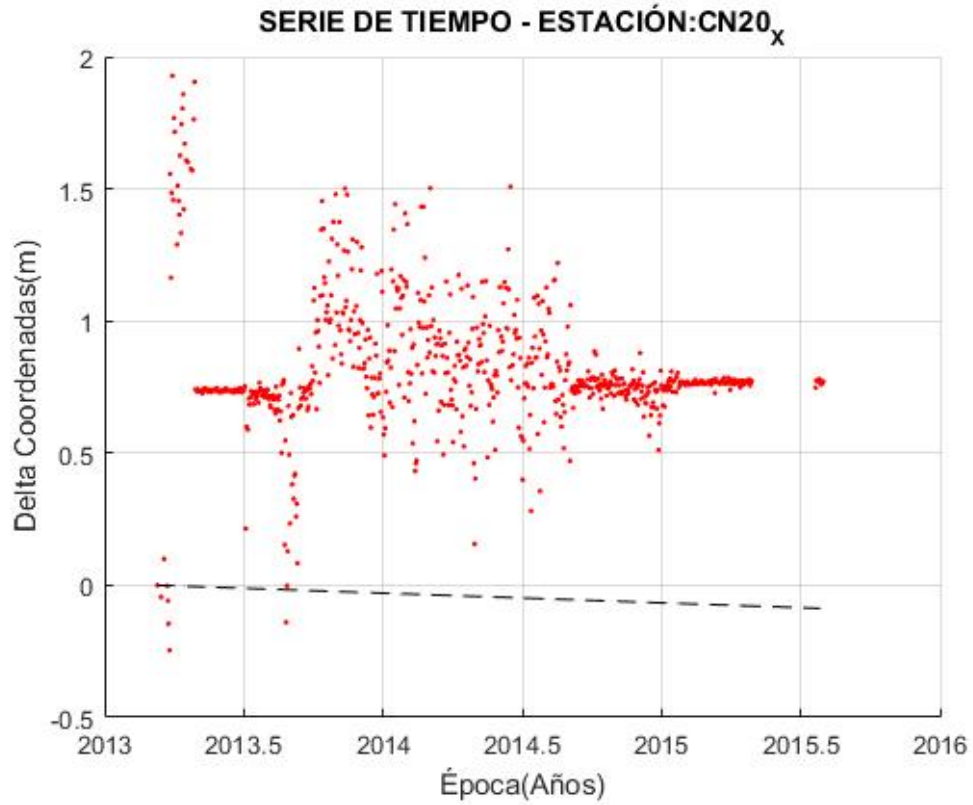
# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



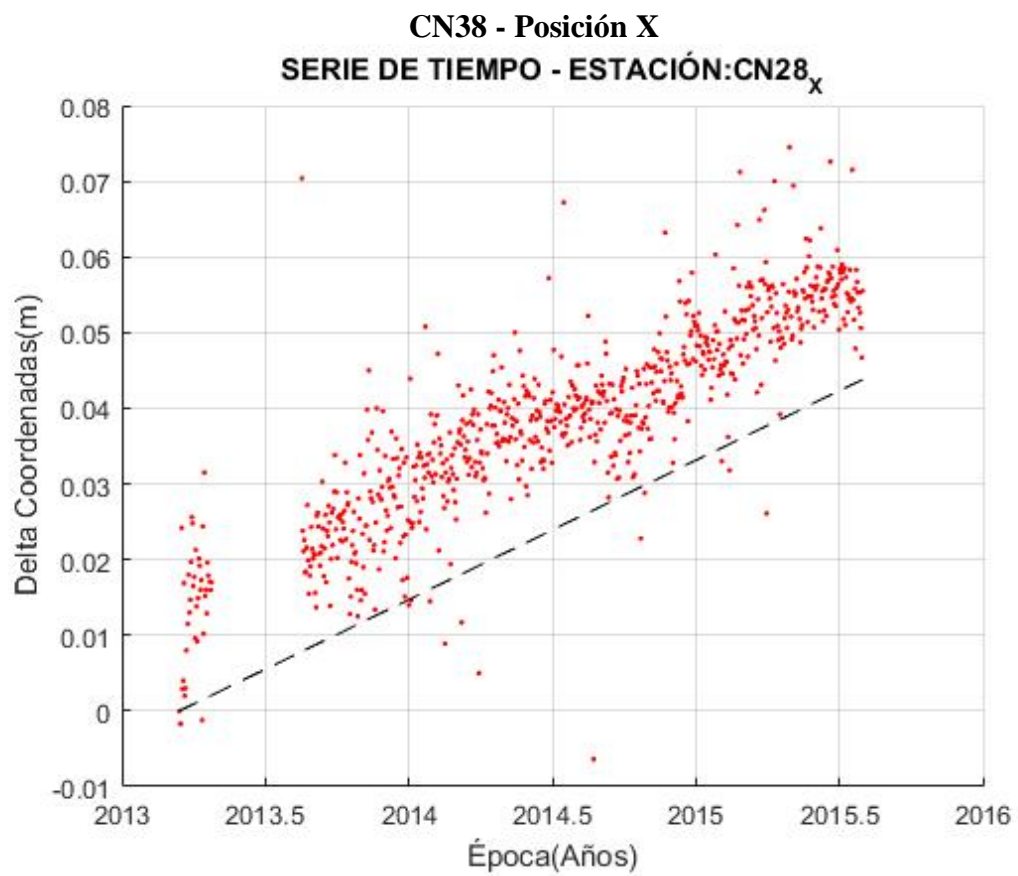
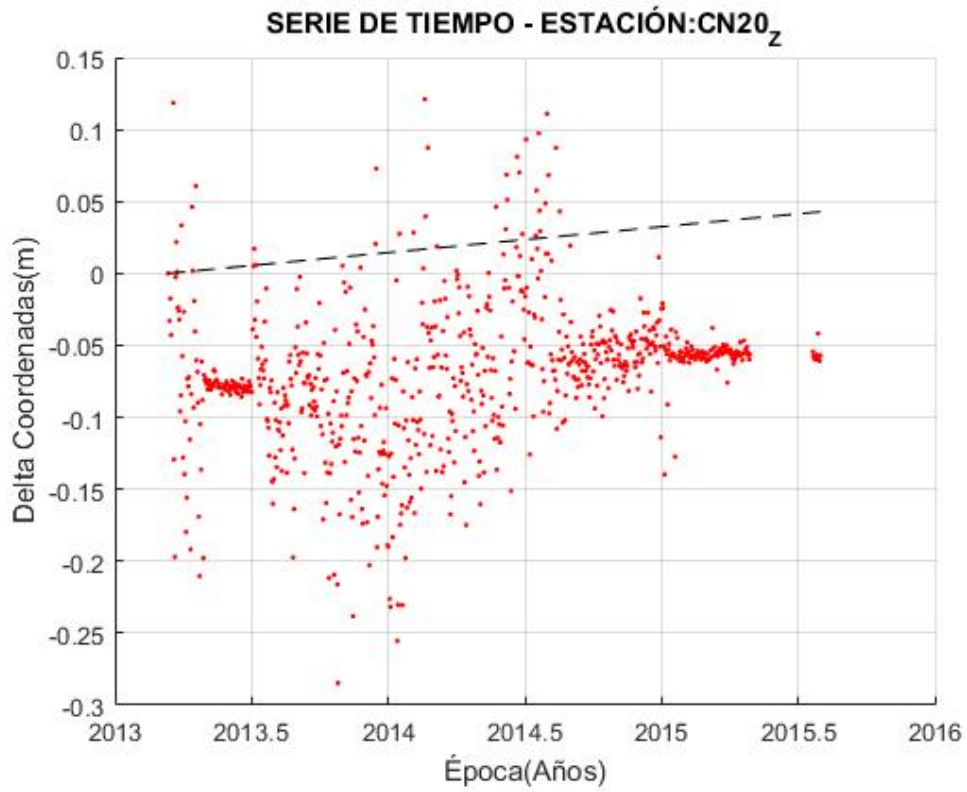
## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



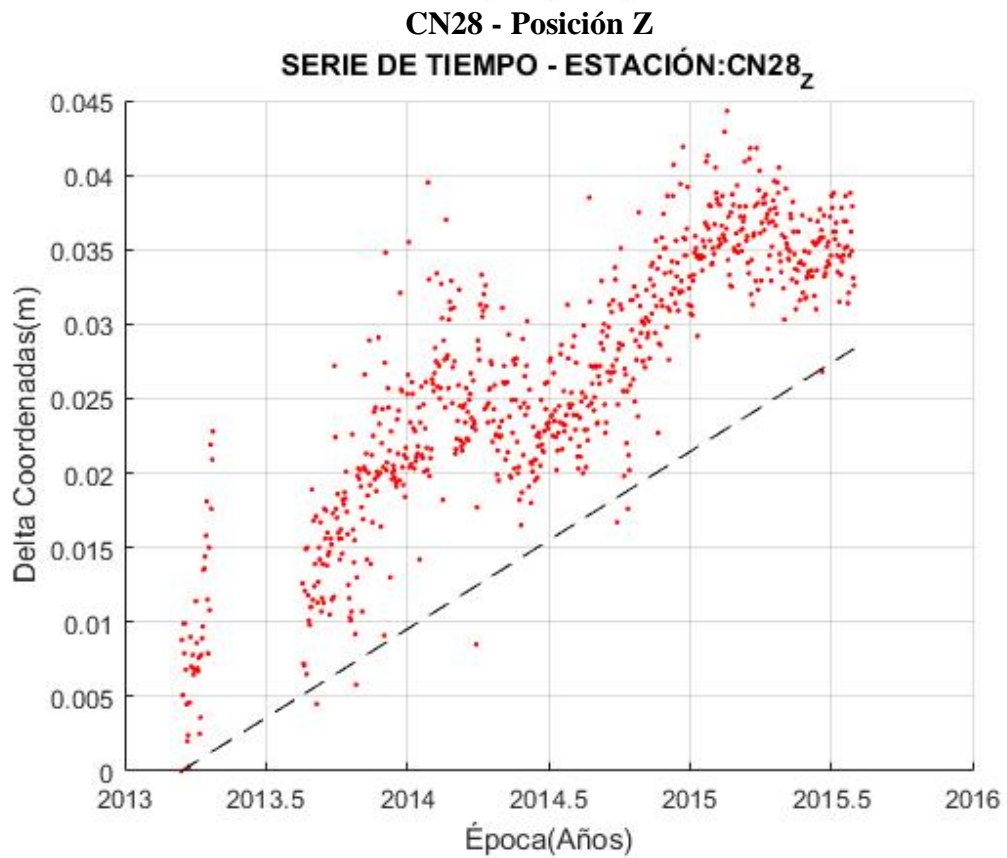
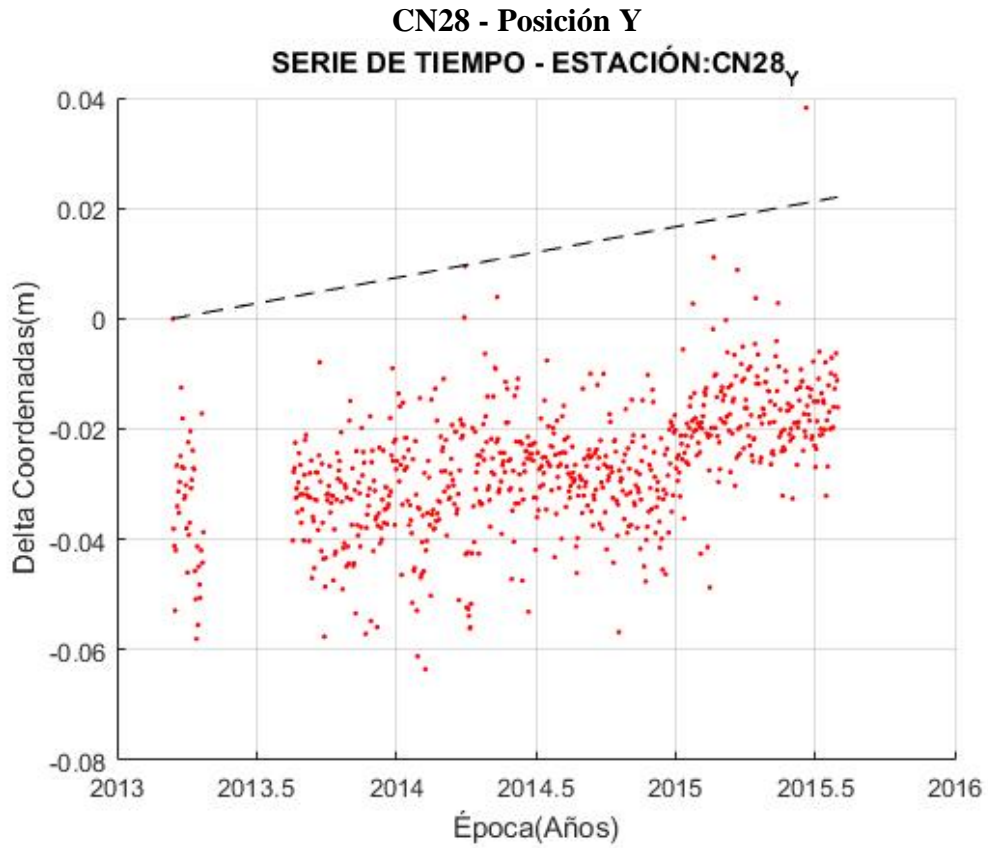
## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



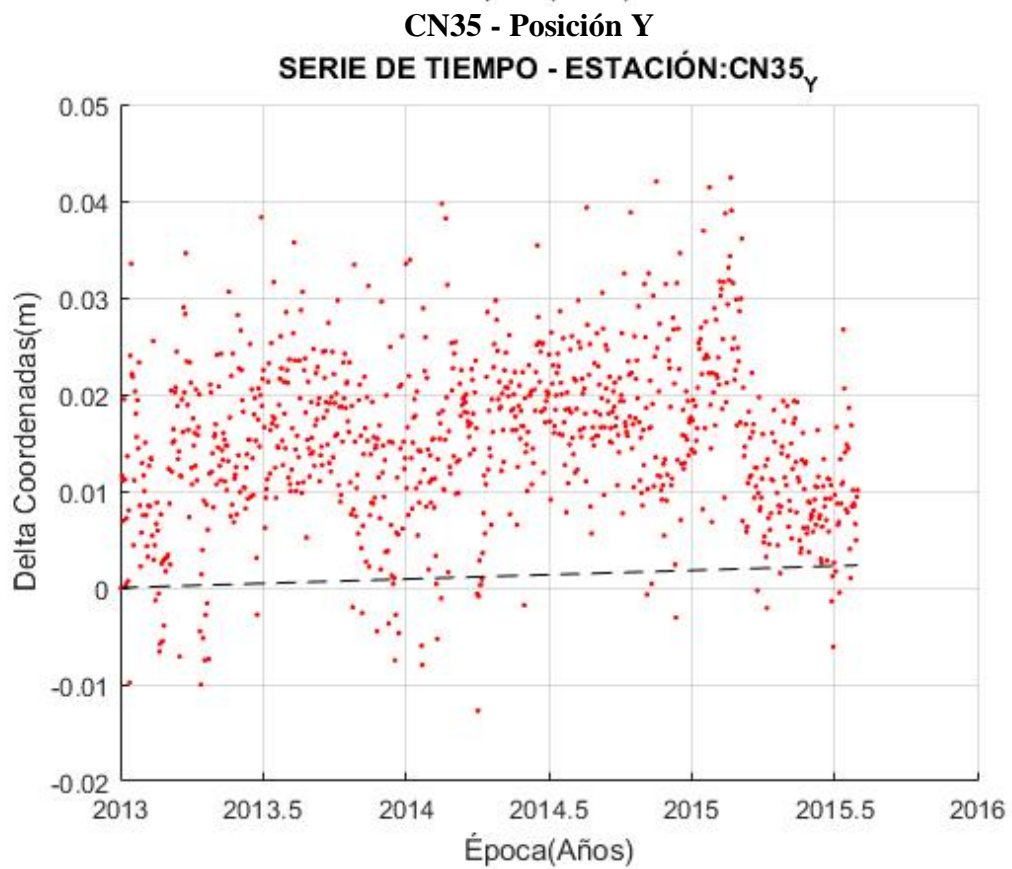
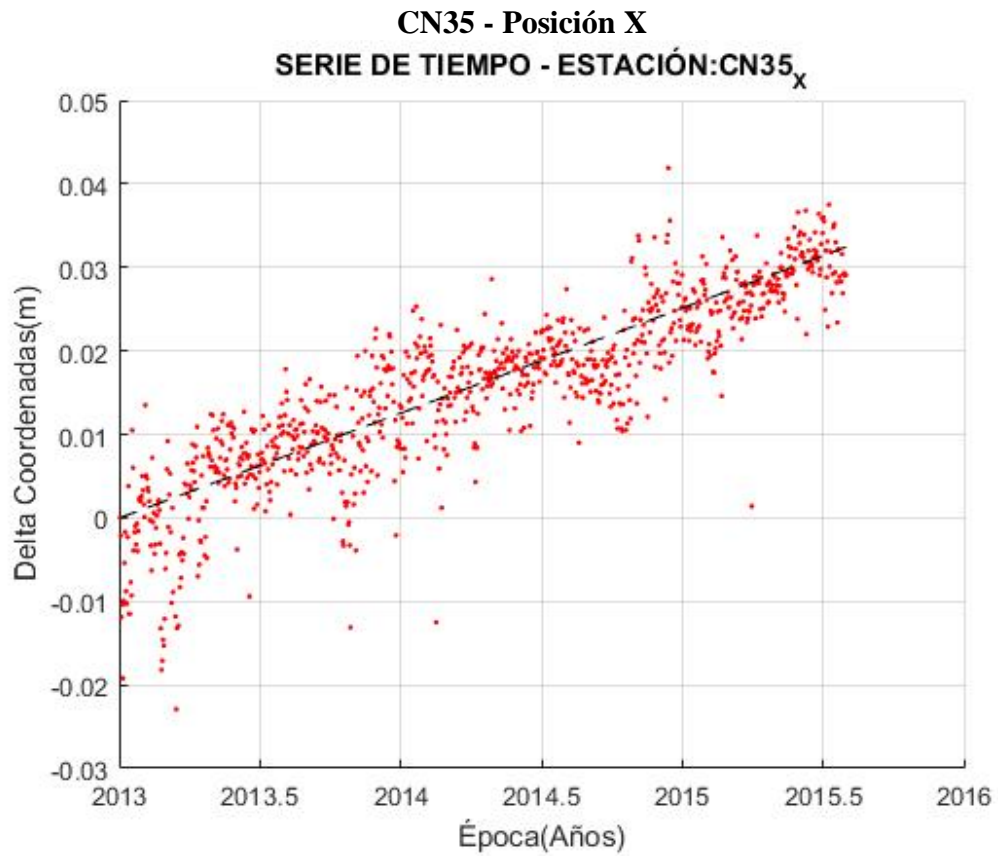
## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



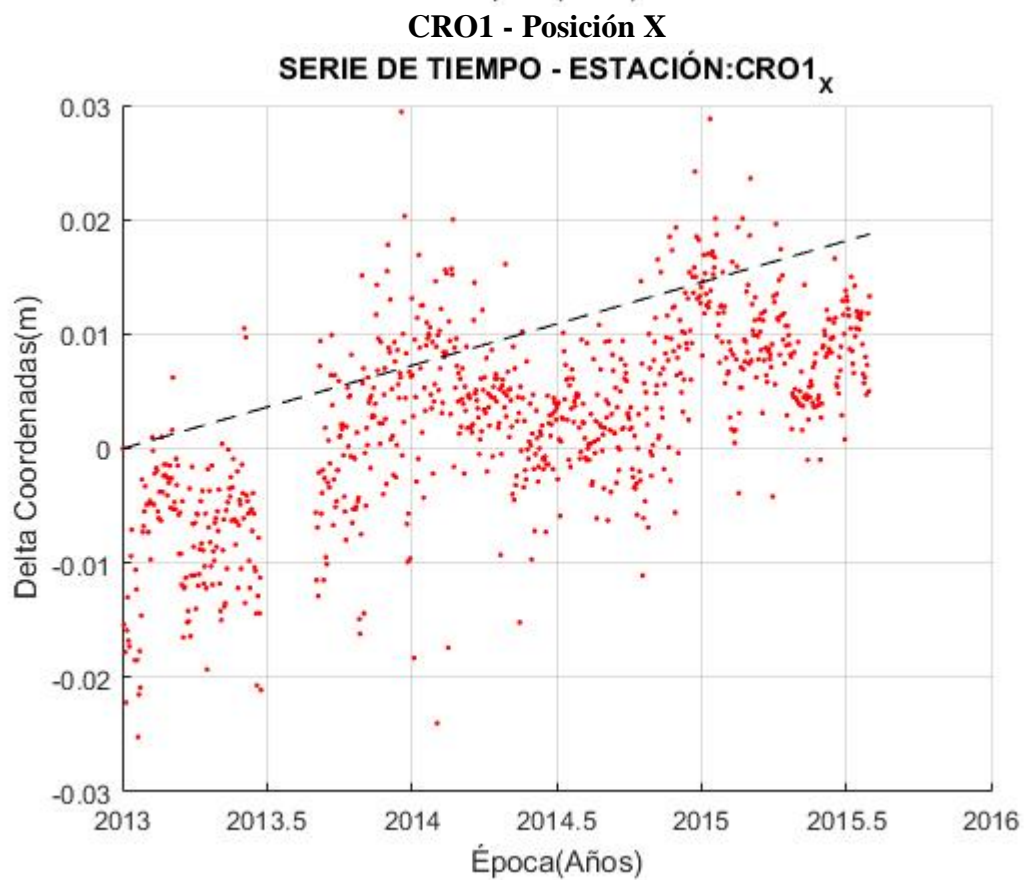
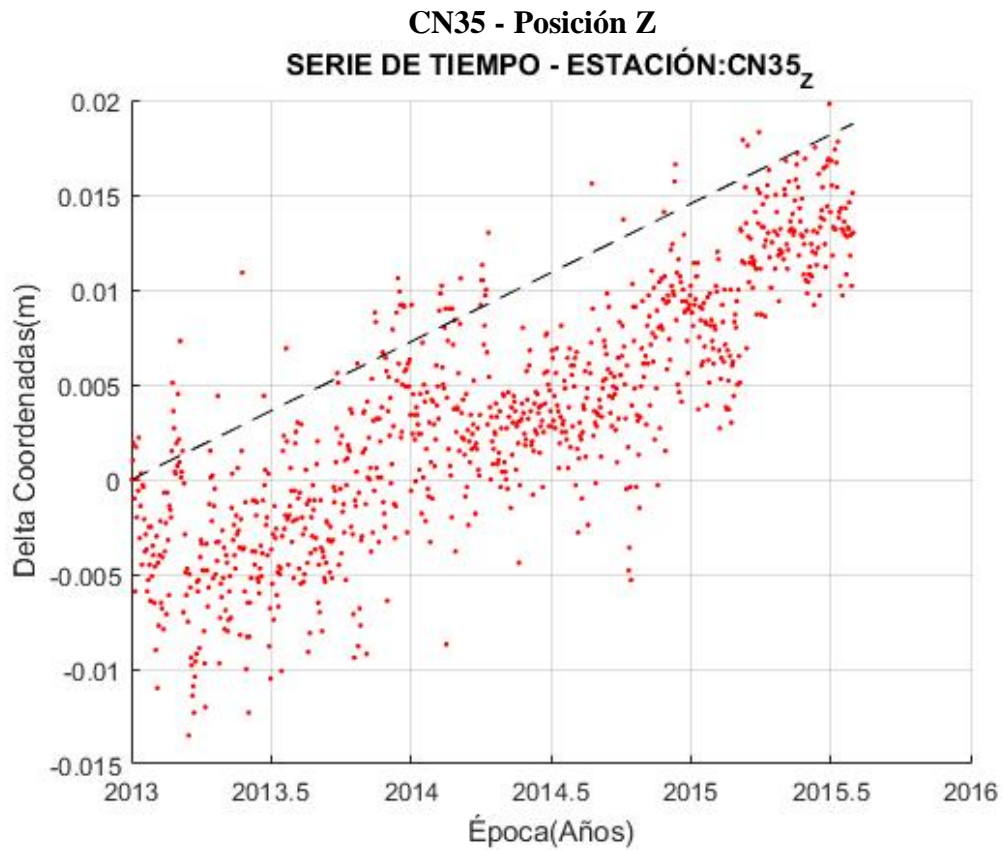
# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



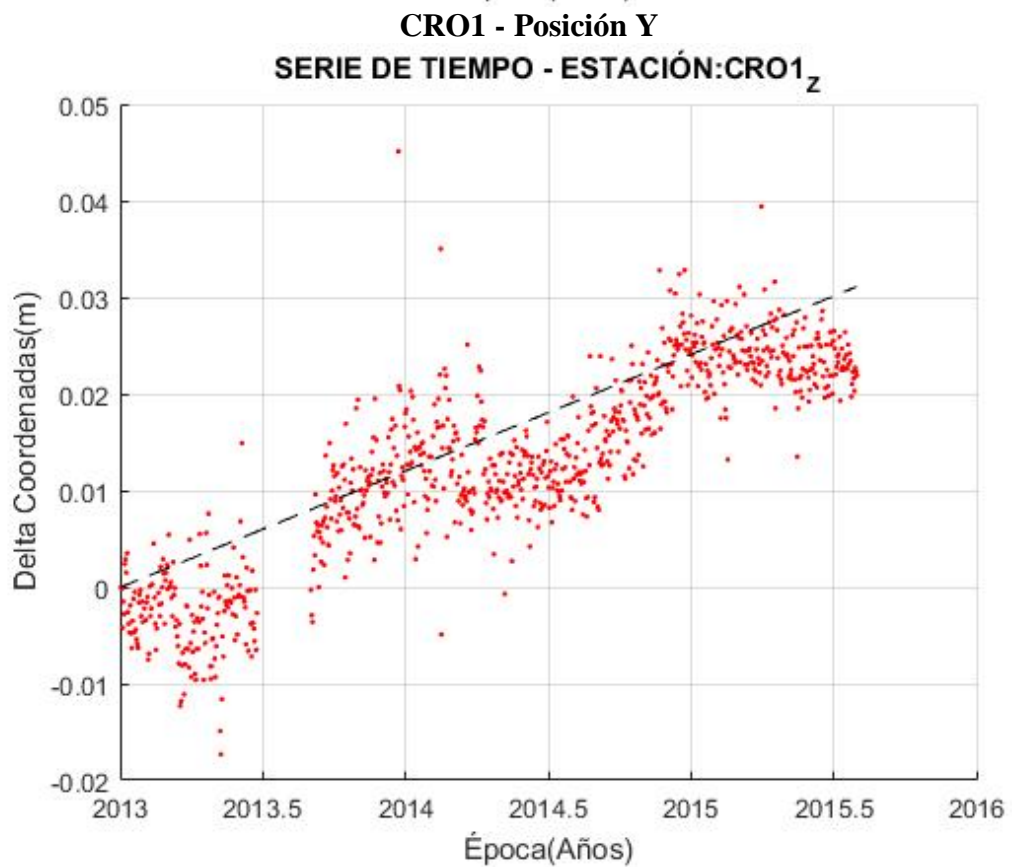
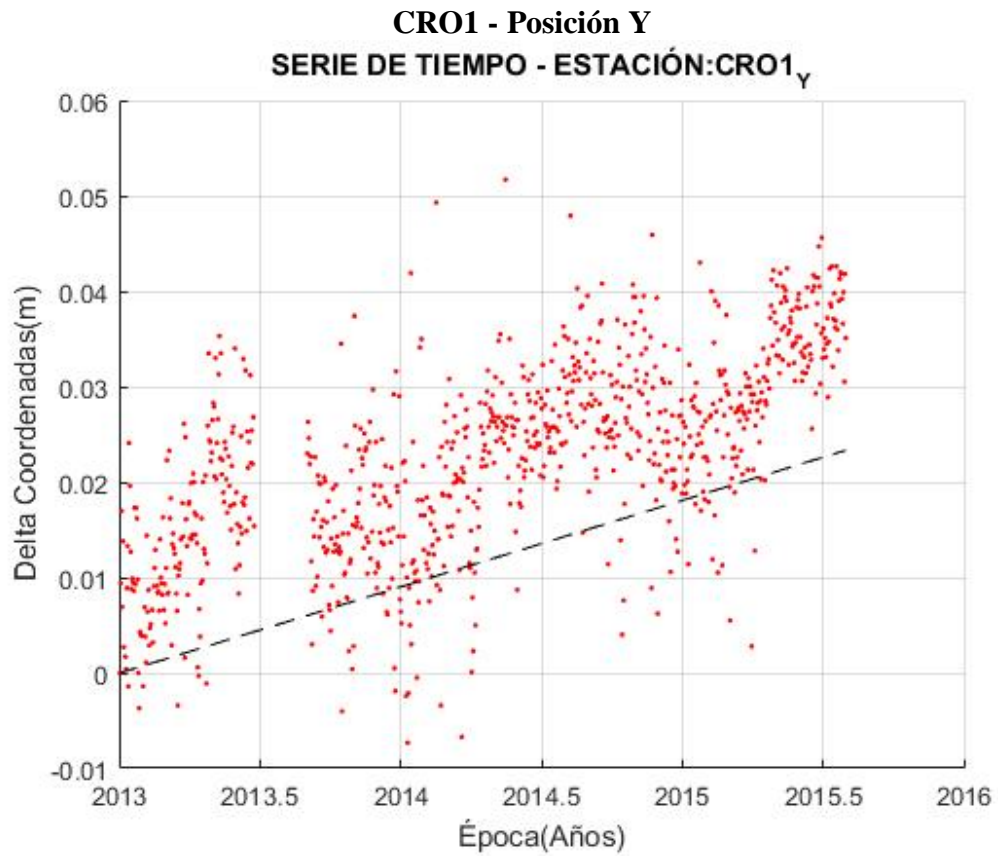
# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

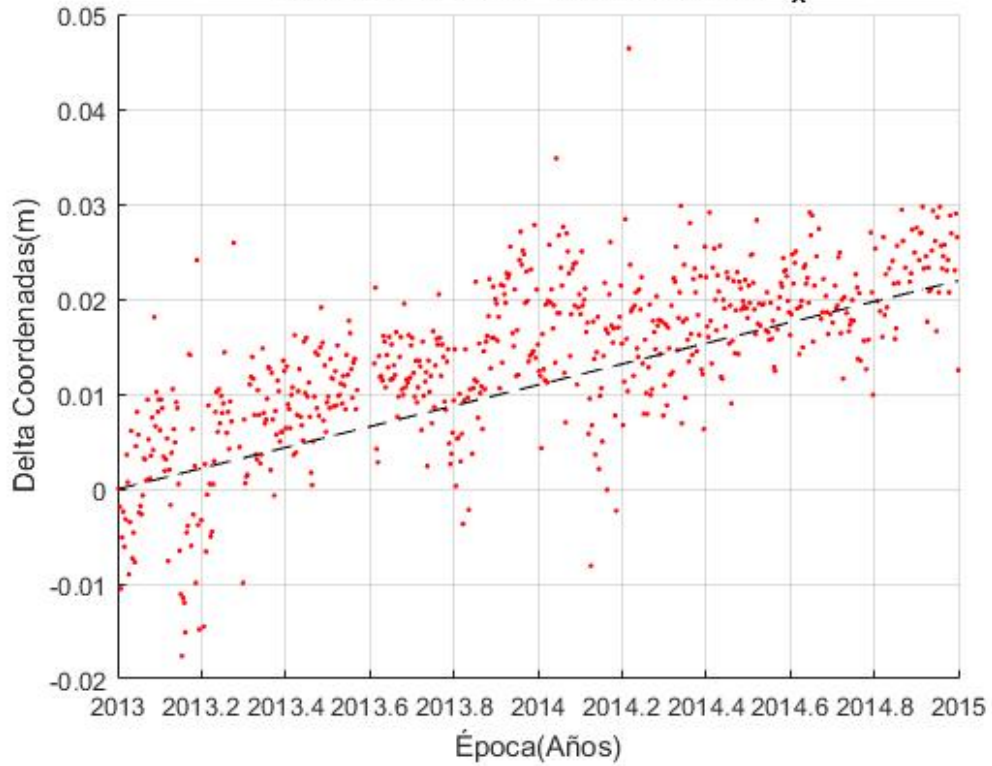


# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

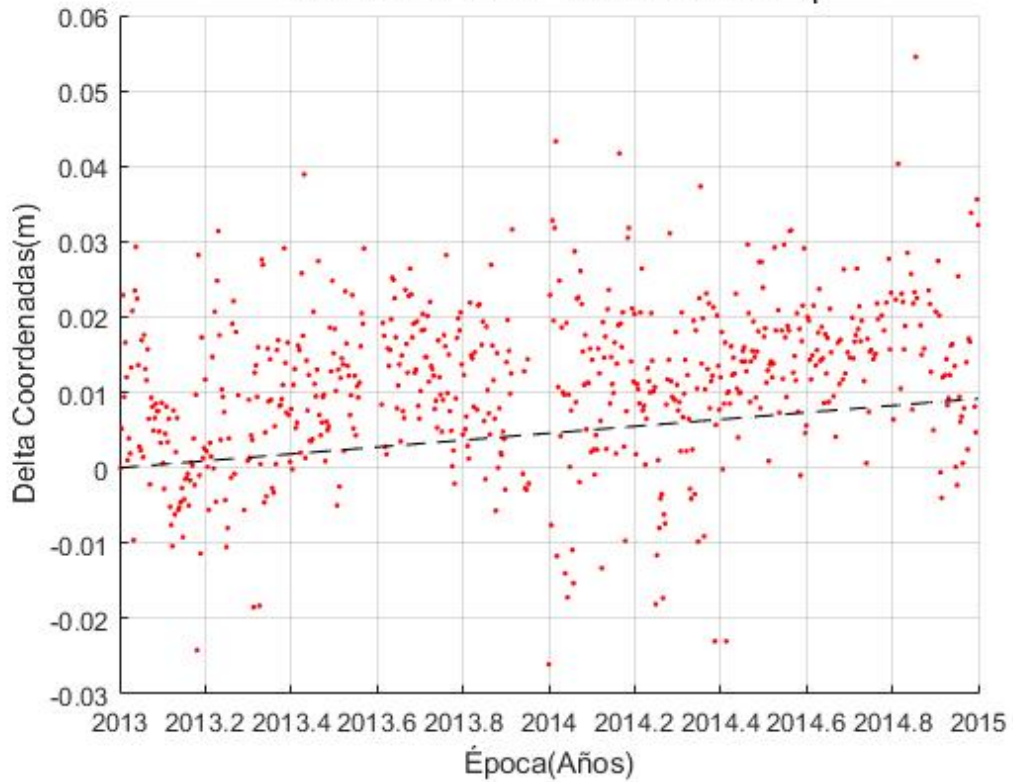


# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

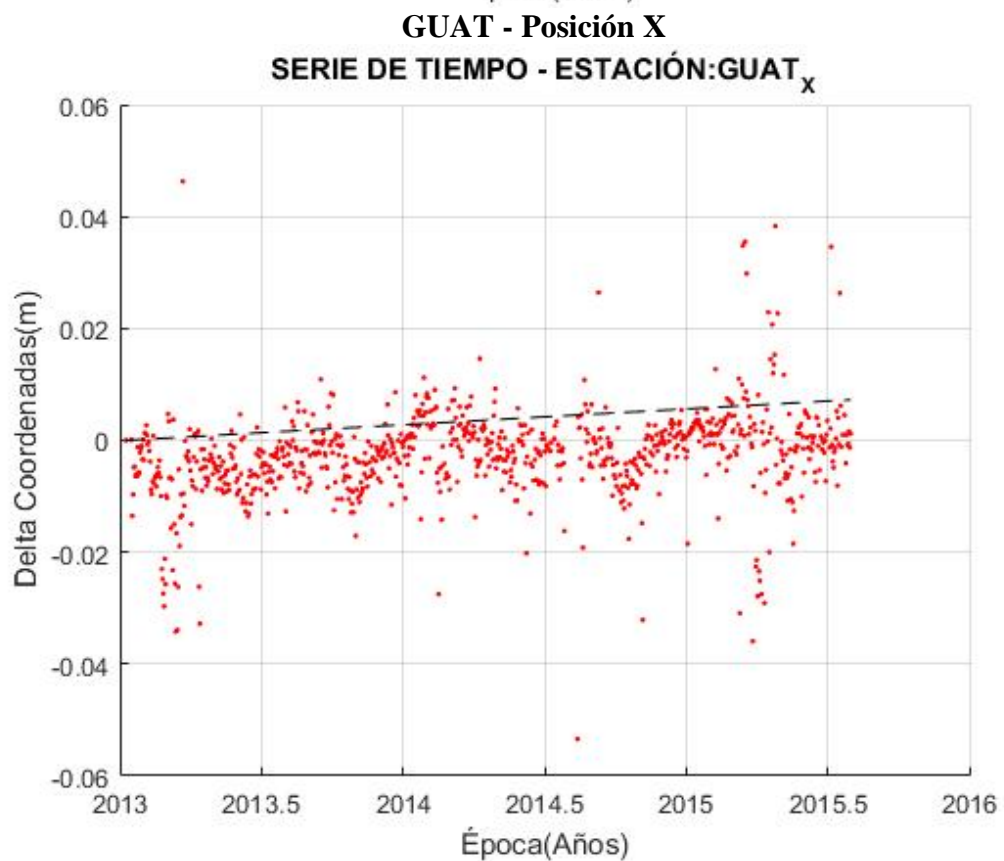
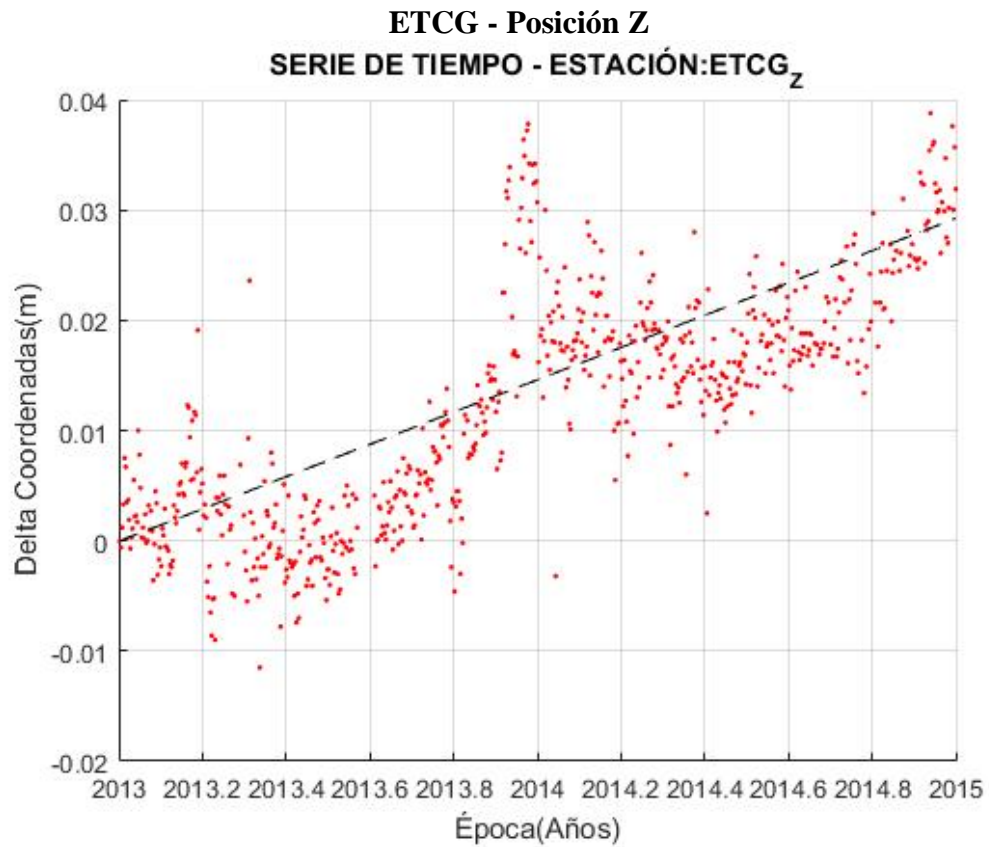
**ETCG - Posición X**  
**SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN:ETCG<sub>x</sub>**



**ETCG - Posición Y**  
**SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN:ETCG<sub>y</sub>**

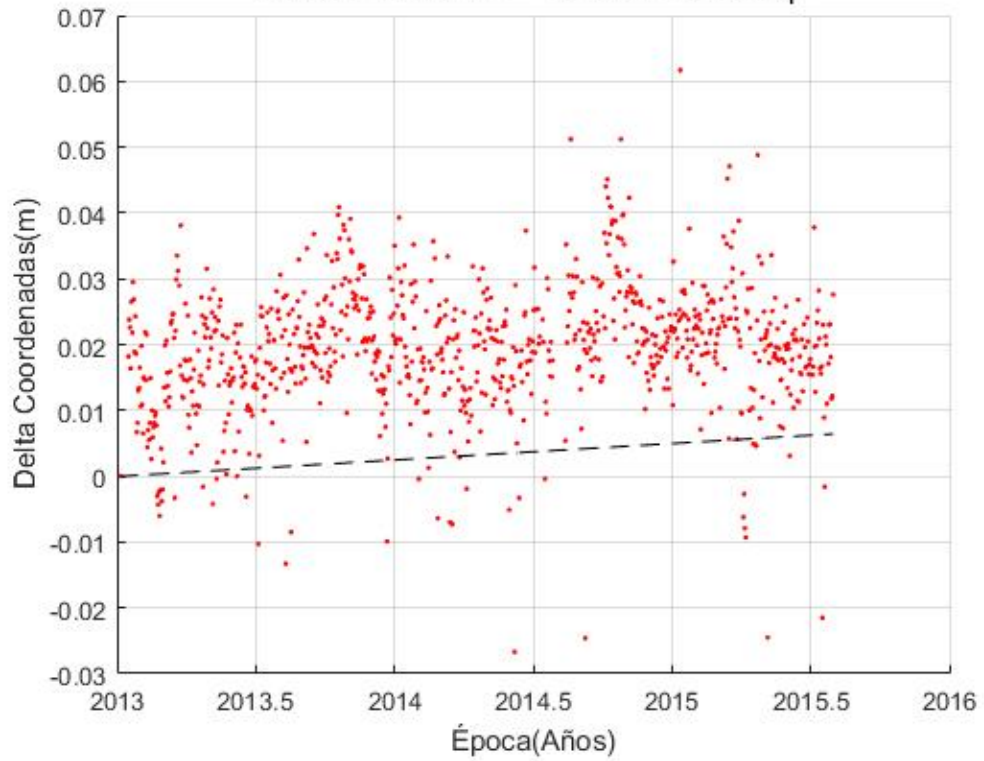


## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

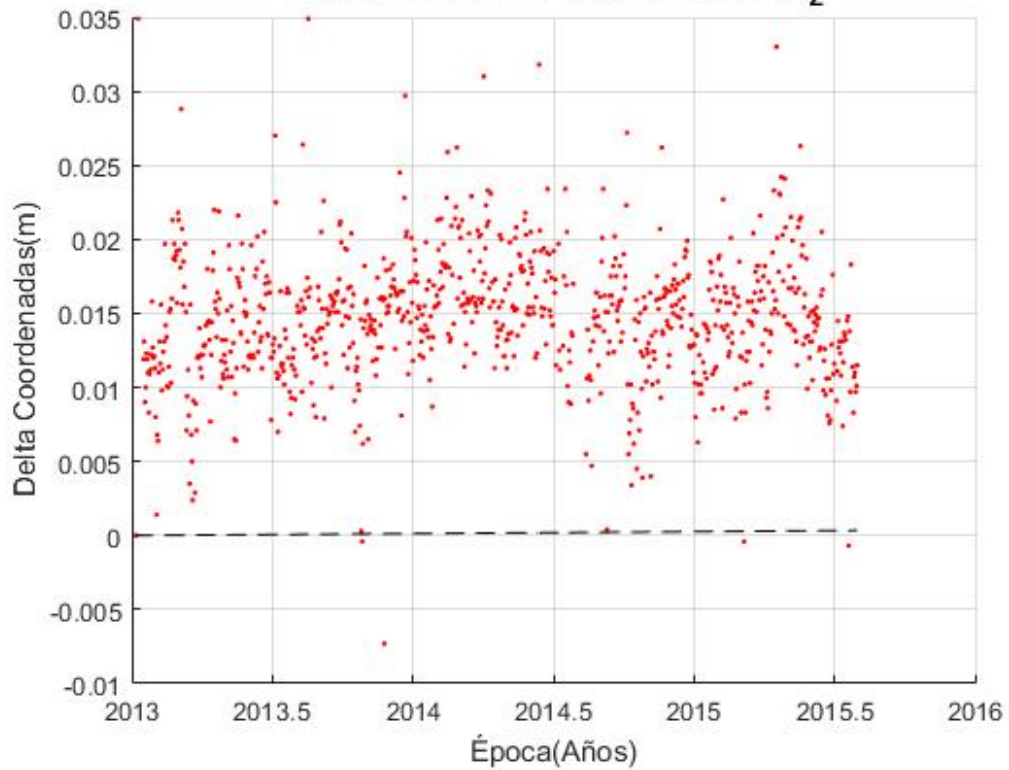


# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

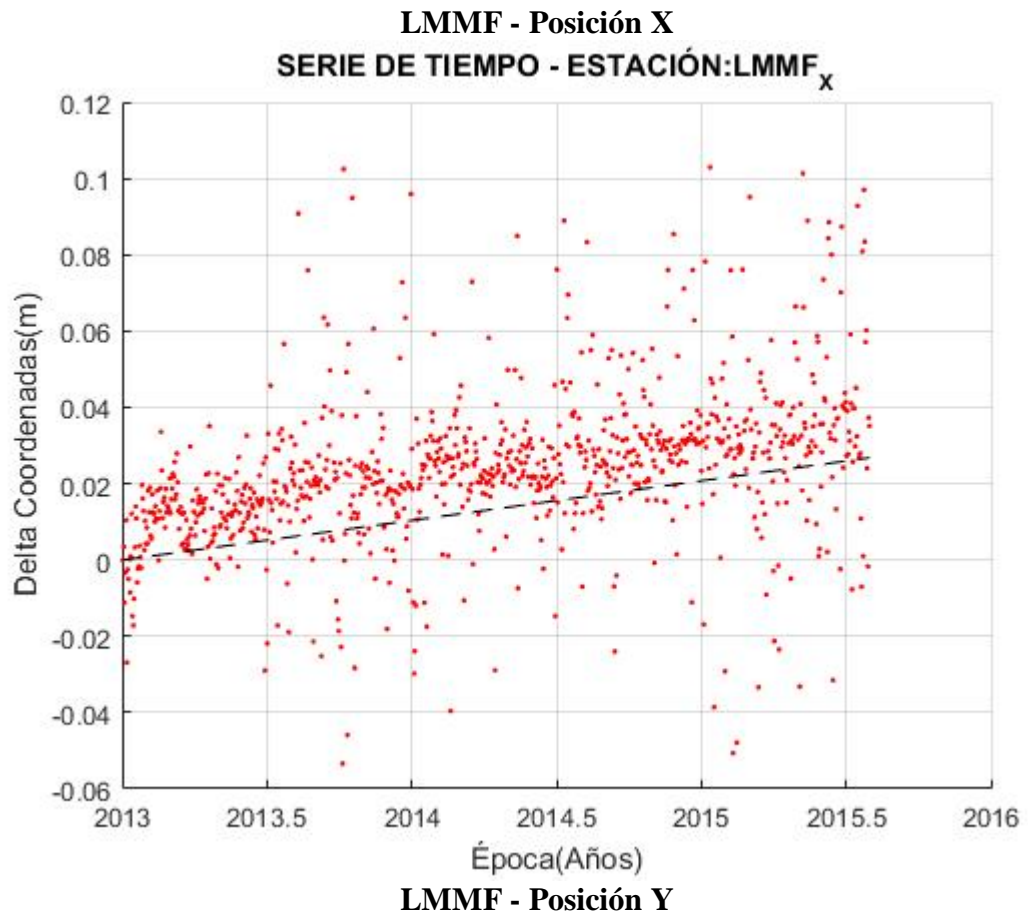
**GUAT - Posición Y**  
**SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN:GUAT<sub>Y</sub>**



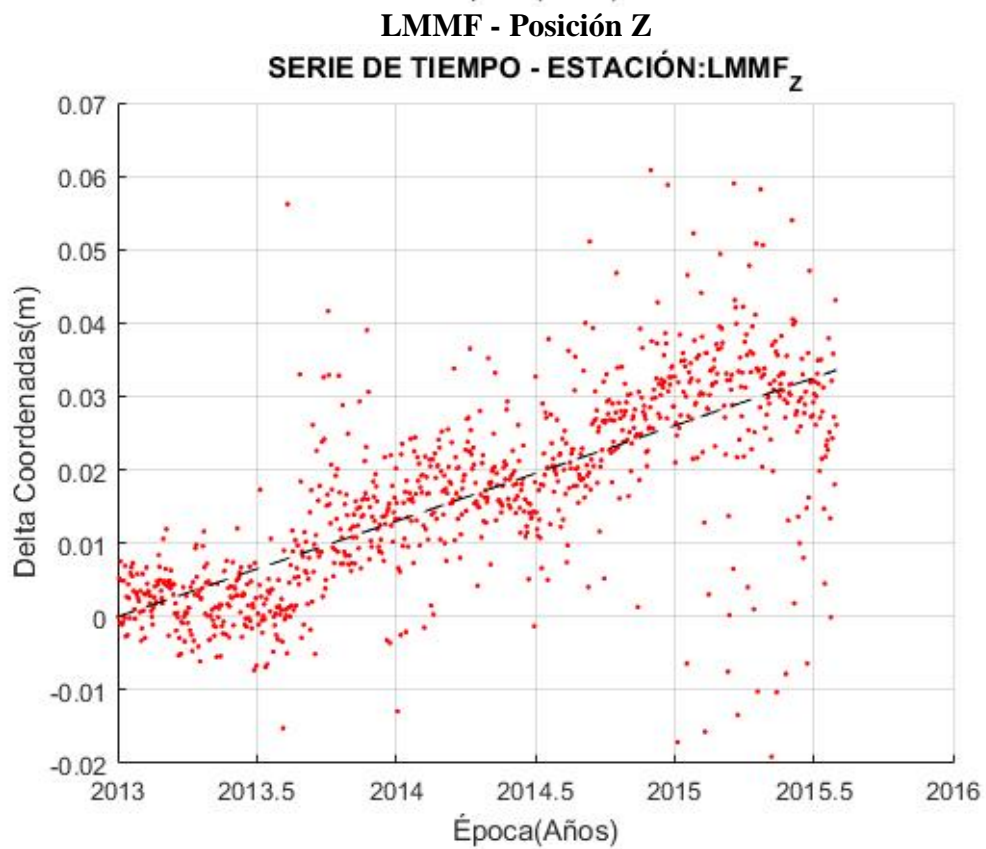
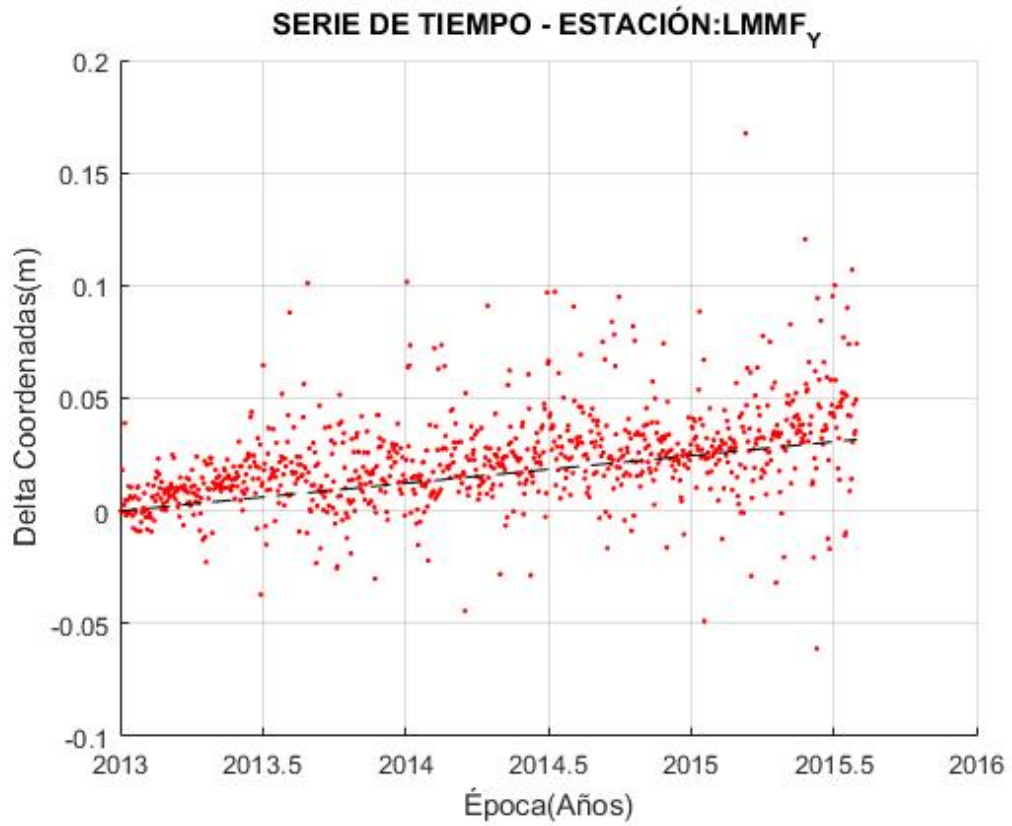
**GUAT - Posición Z**  
**SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN:GUAT<sub>Z</sub>**



# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

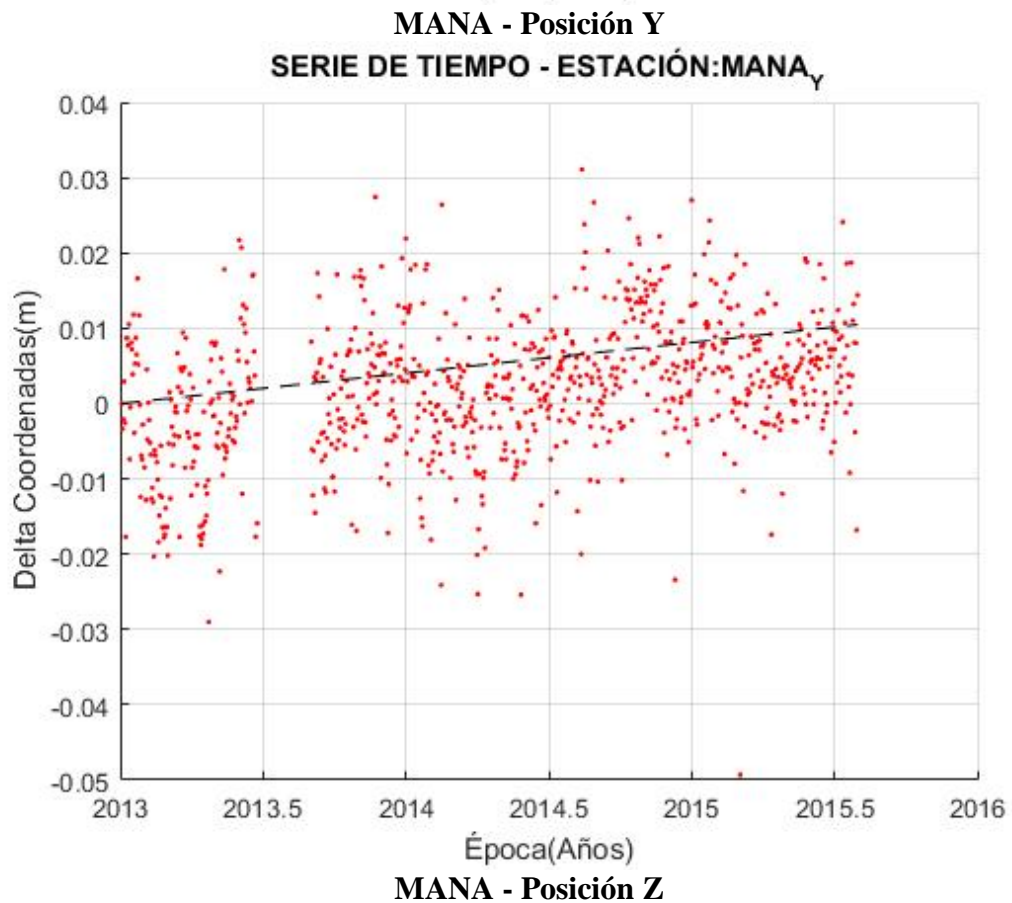
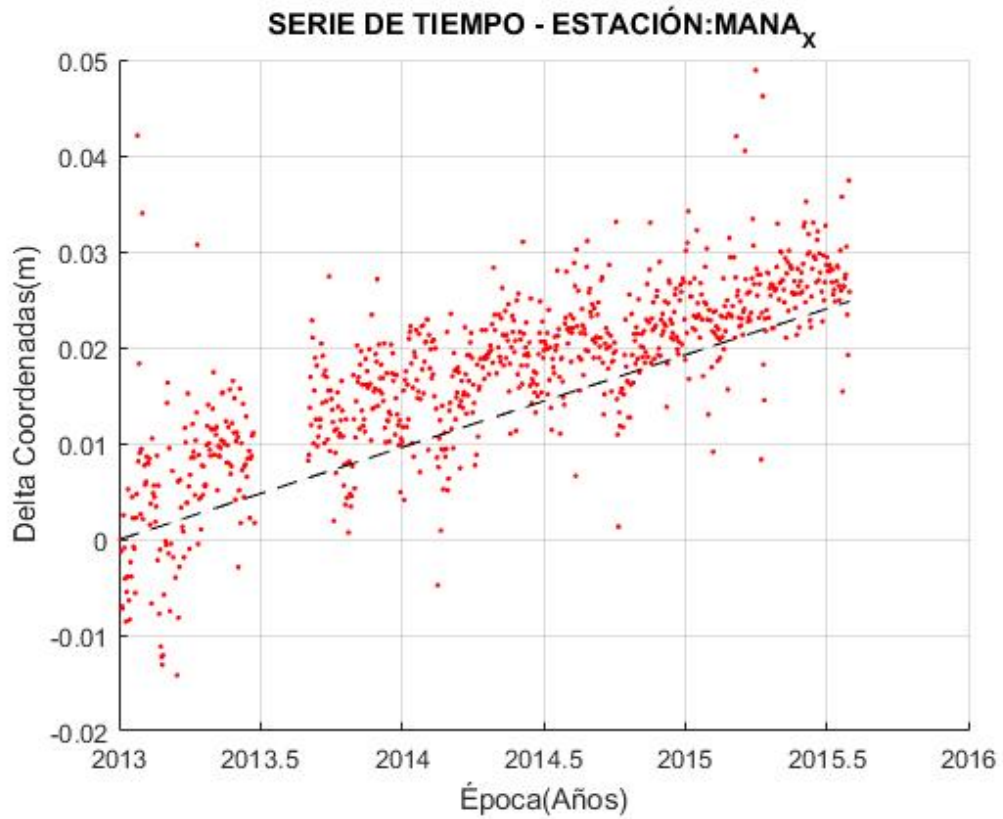


# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

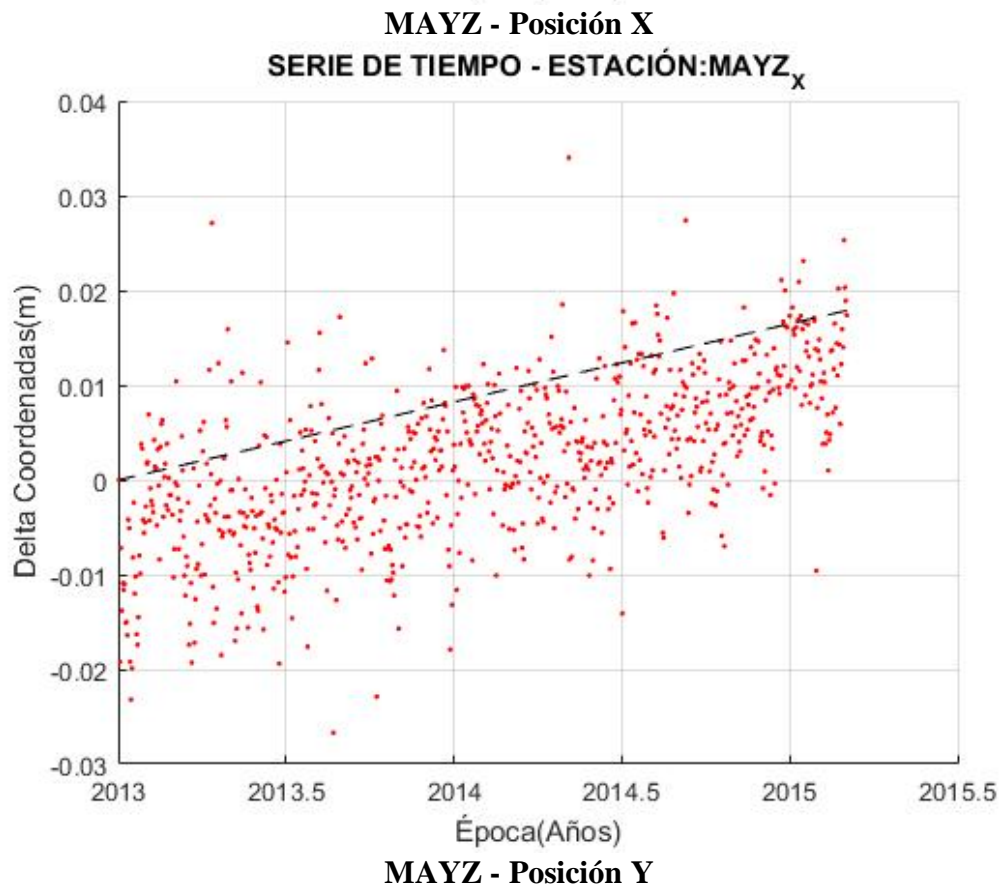
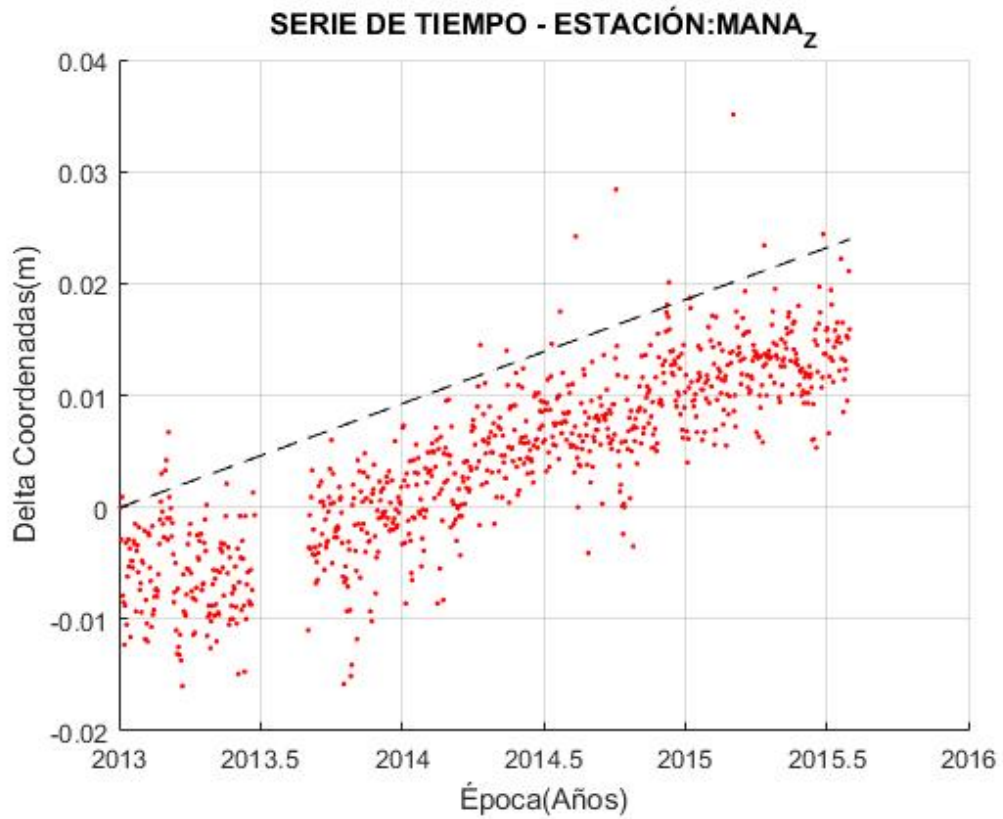


**MANA - Posición X**

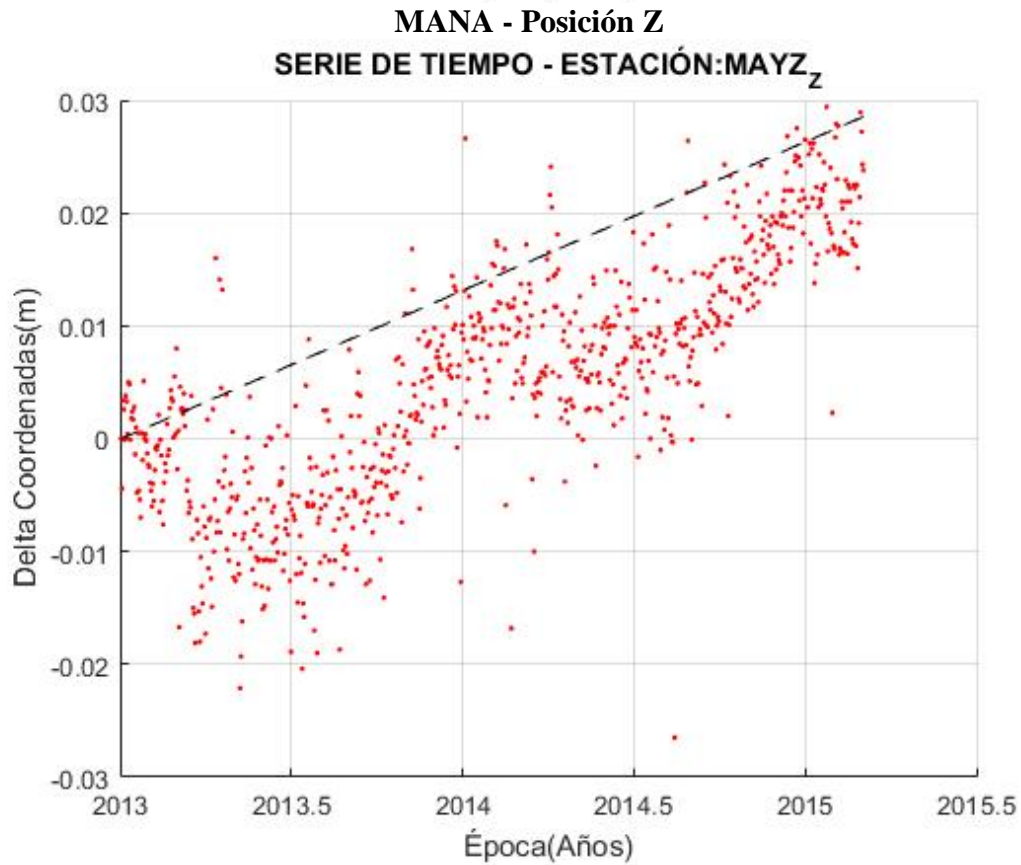
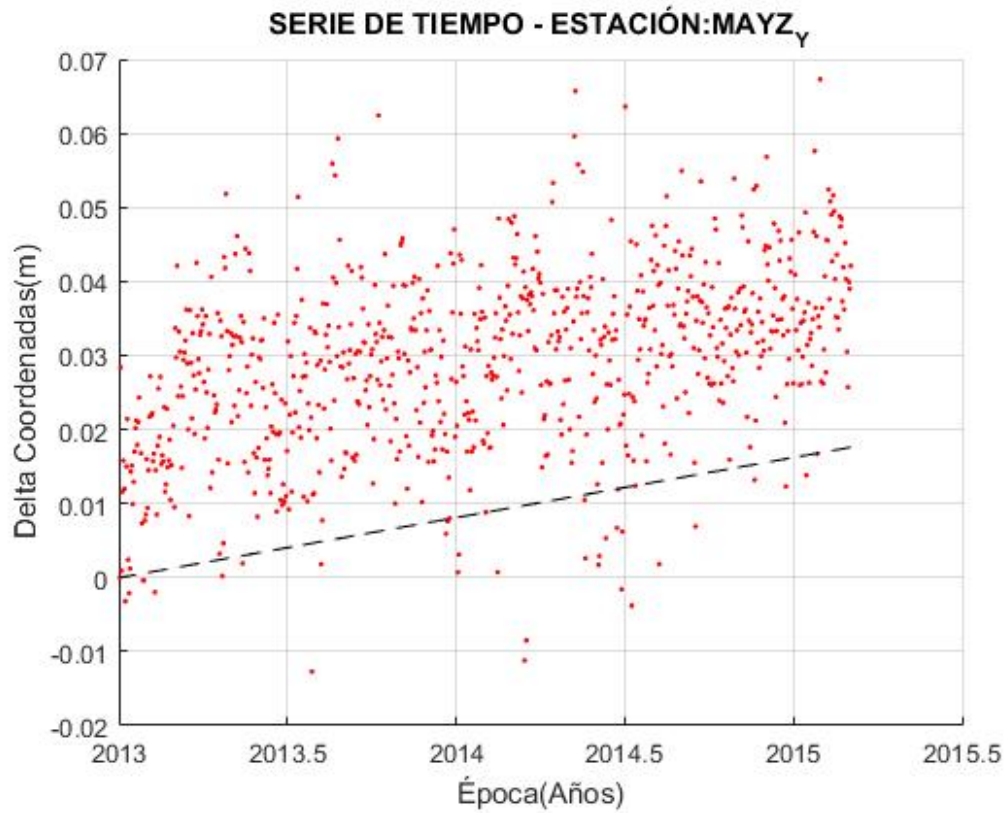
## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

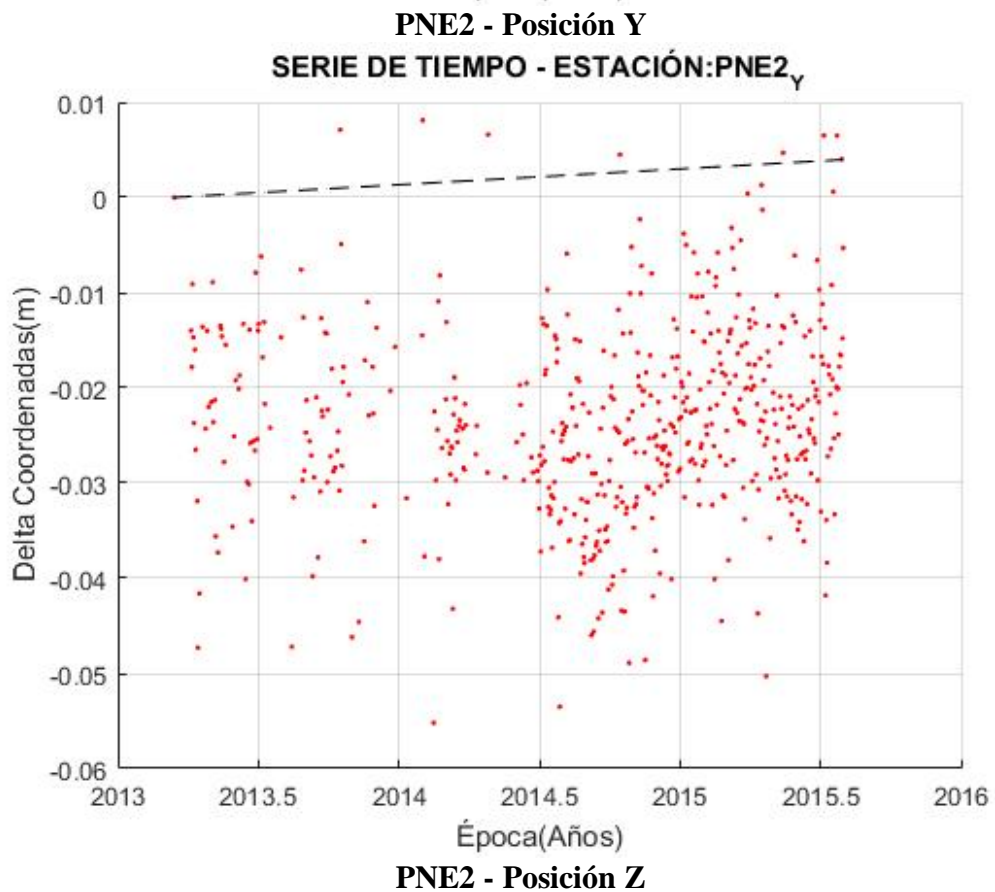
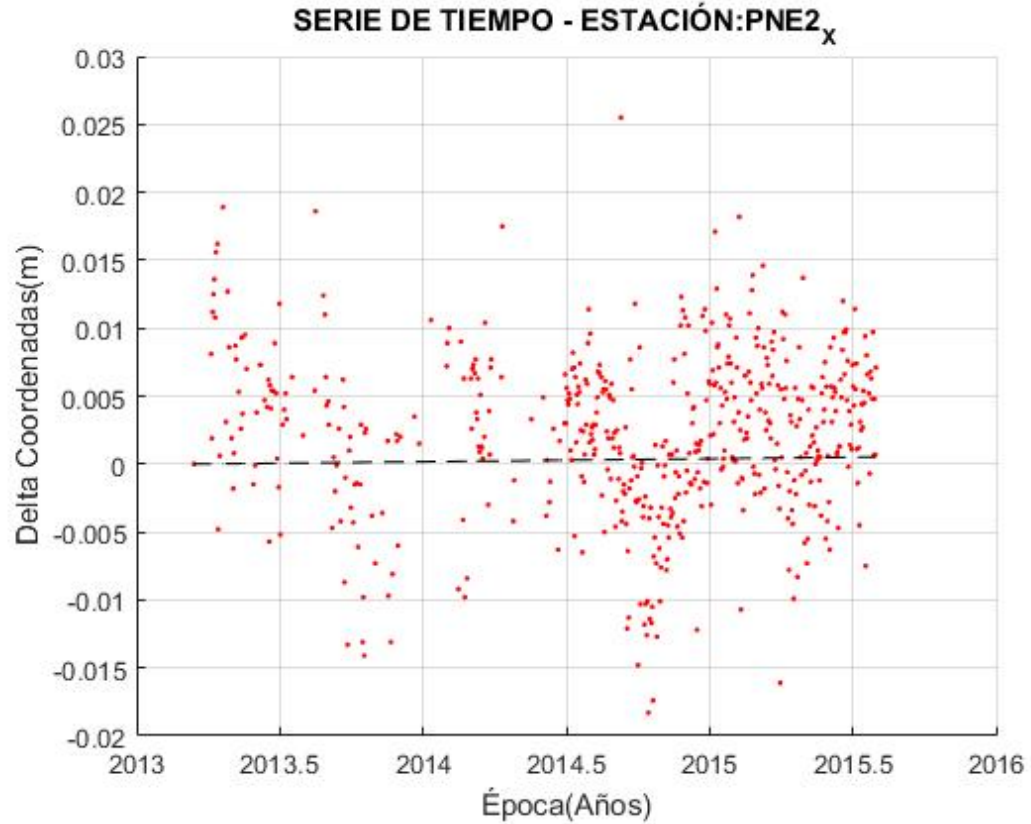


## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

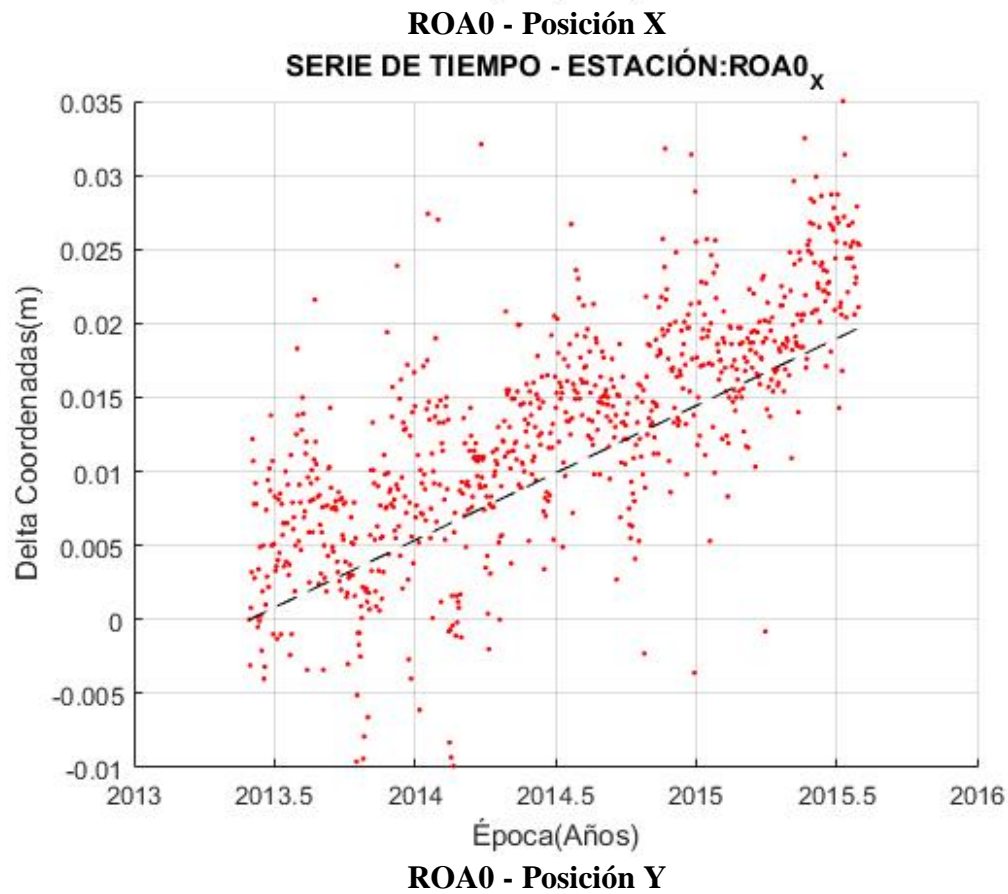
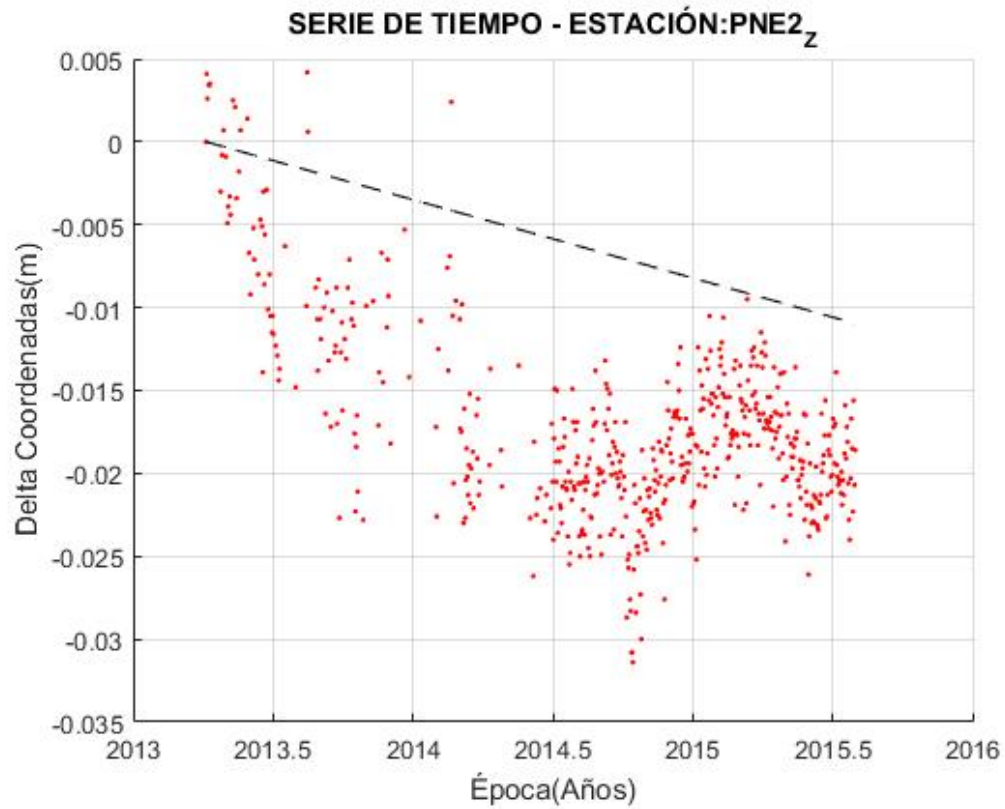


**PNE2 - Posición X**

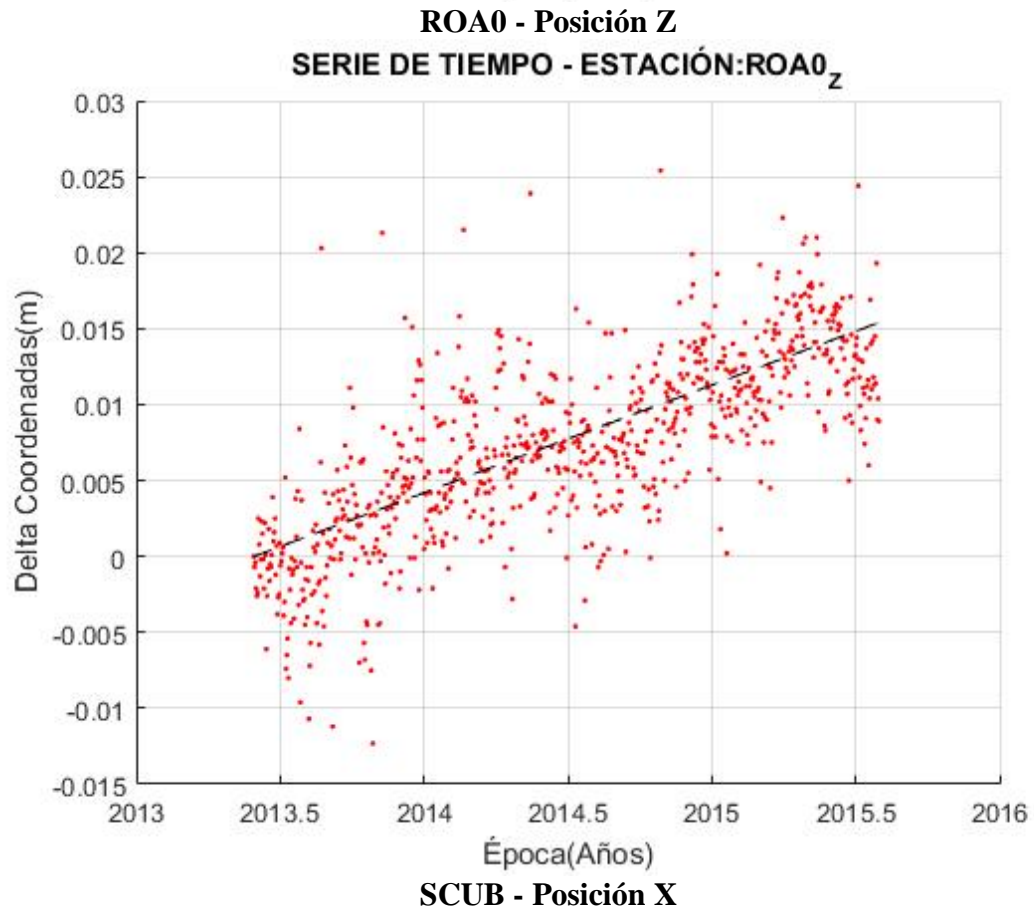
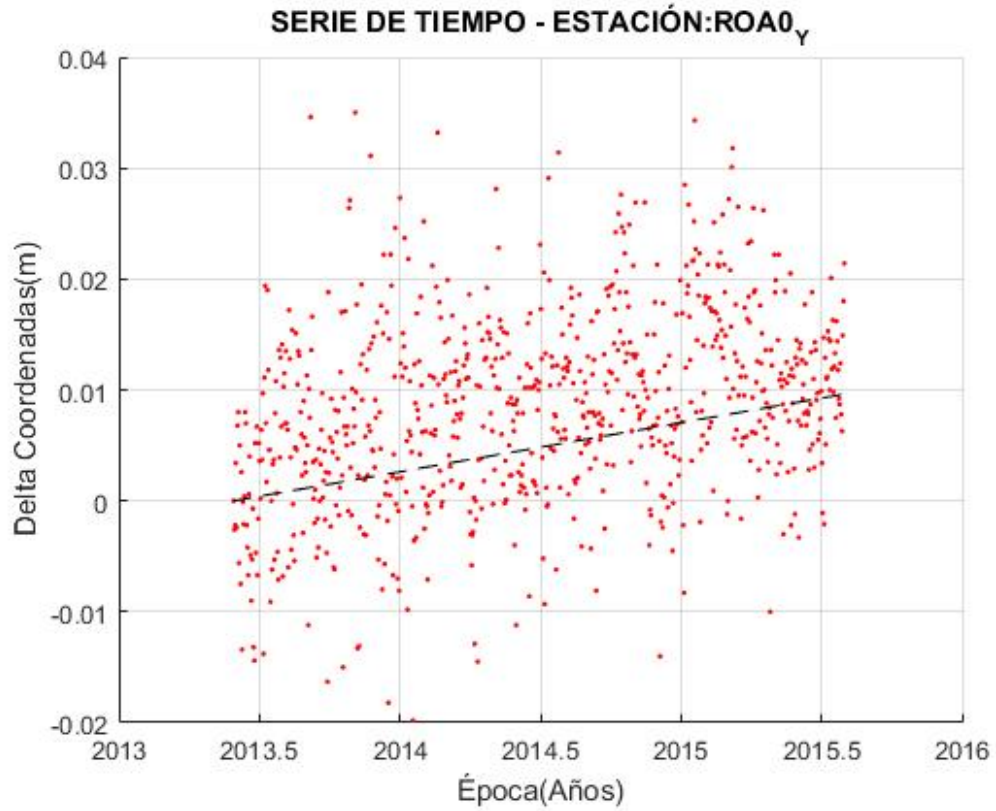
## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



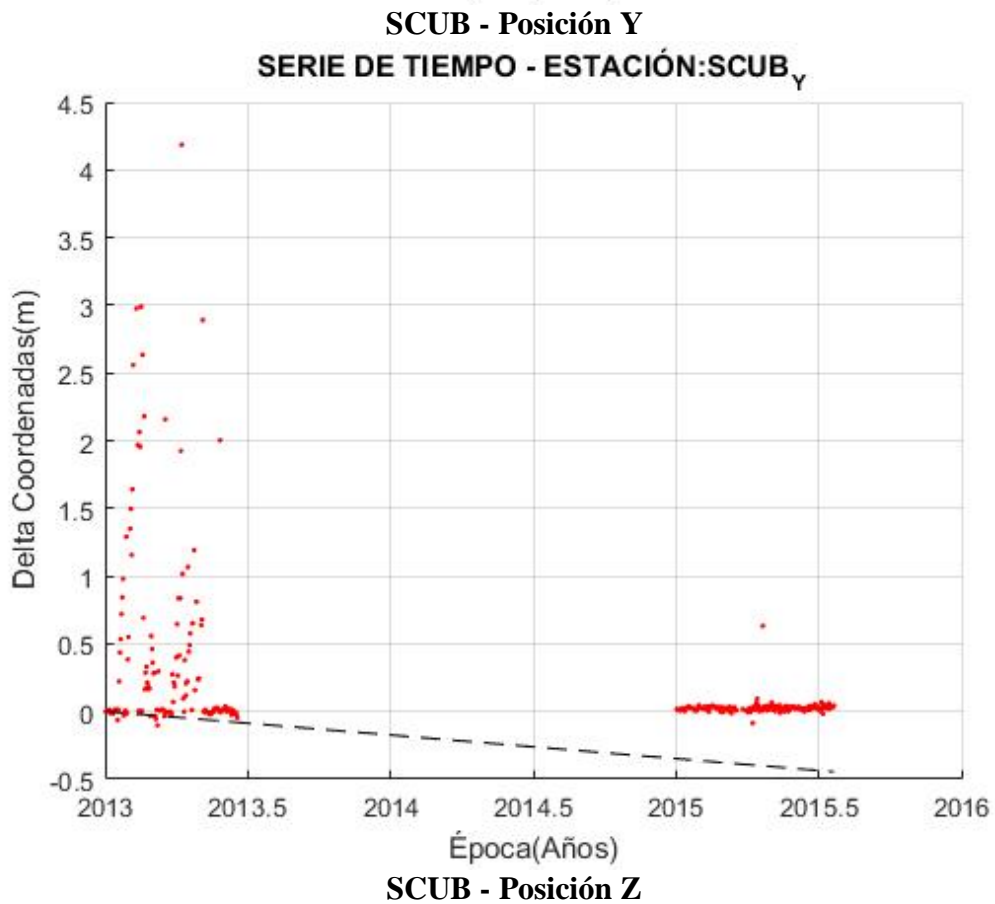
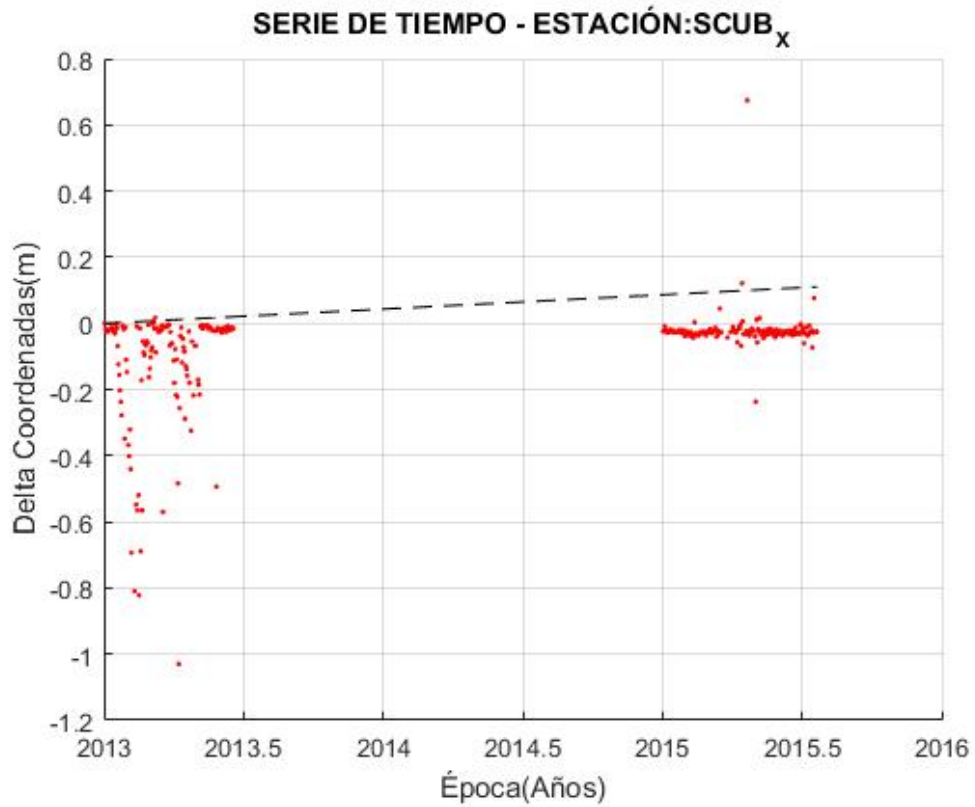
## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



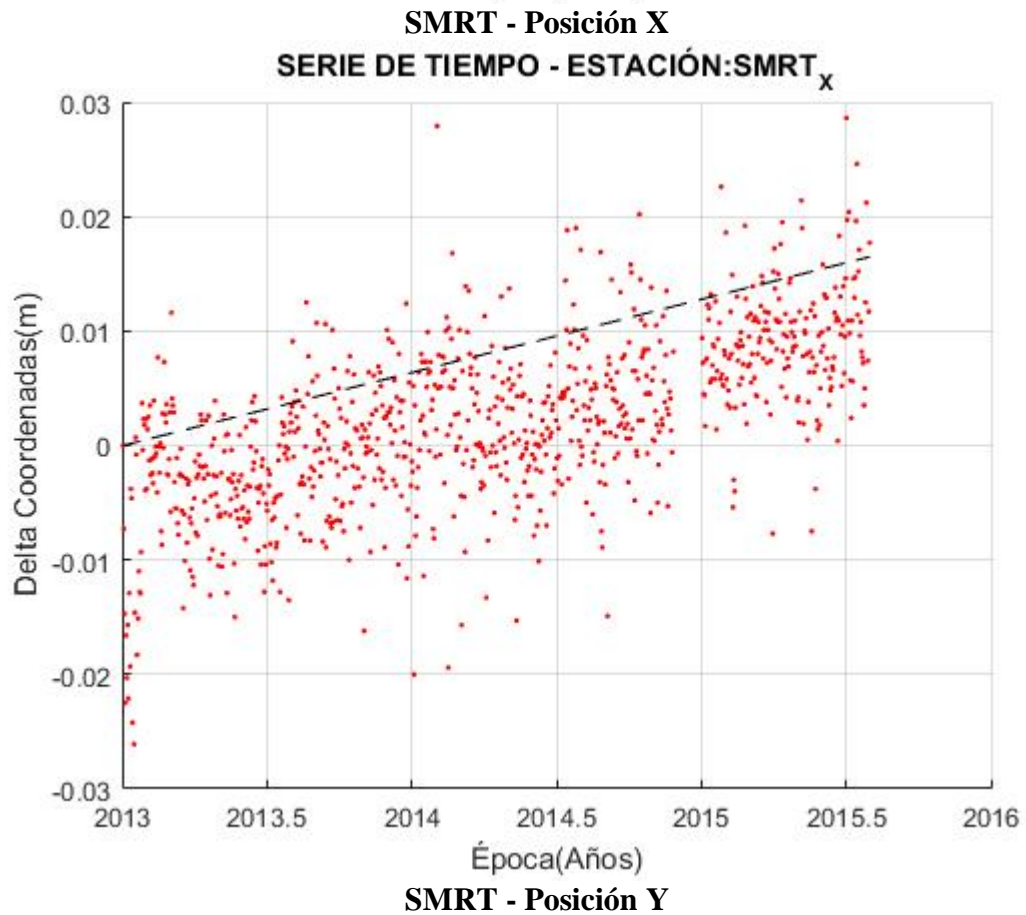
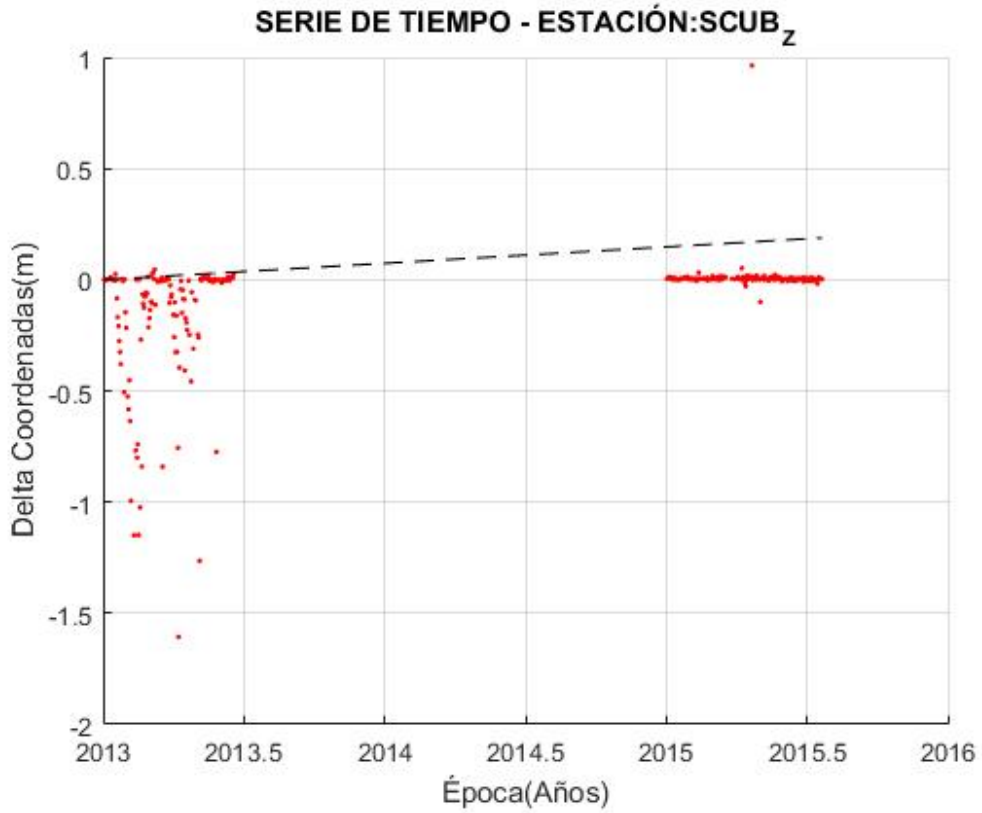
# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



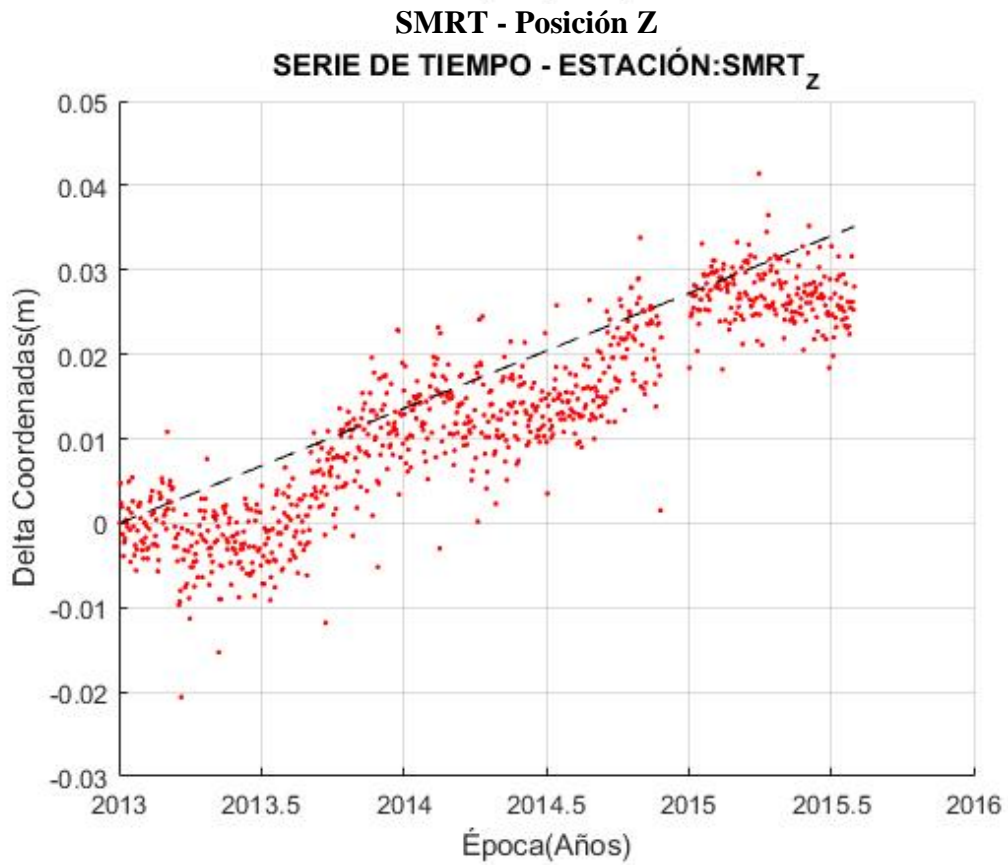
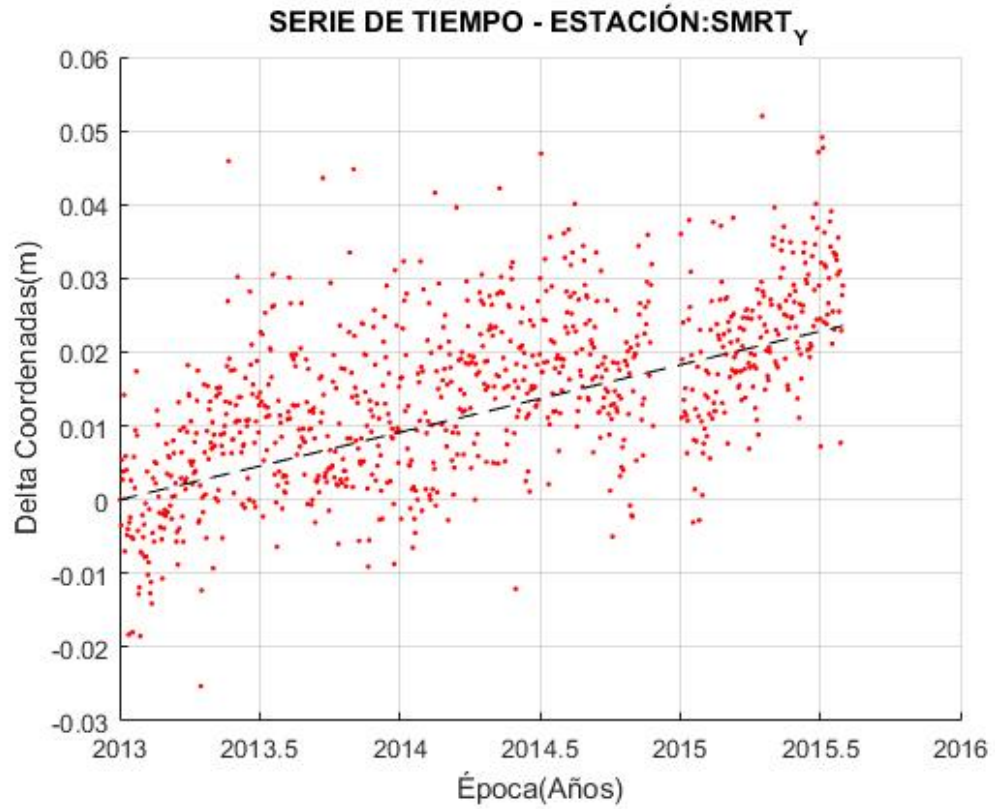
# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



# Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ

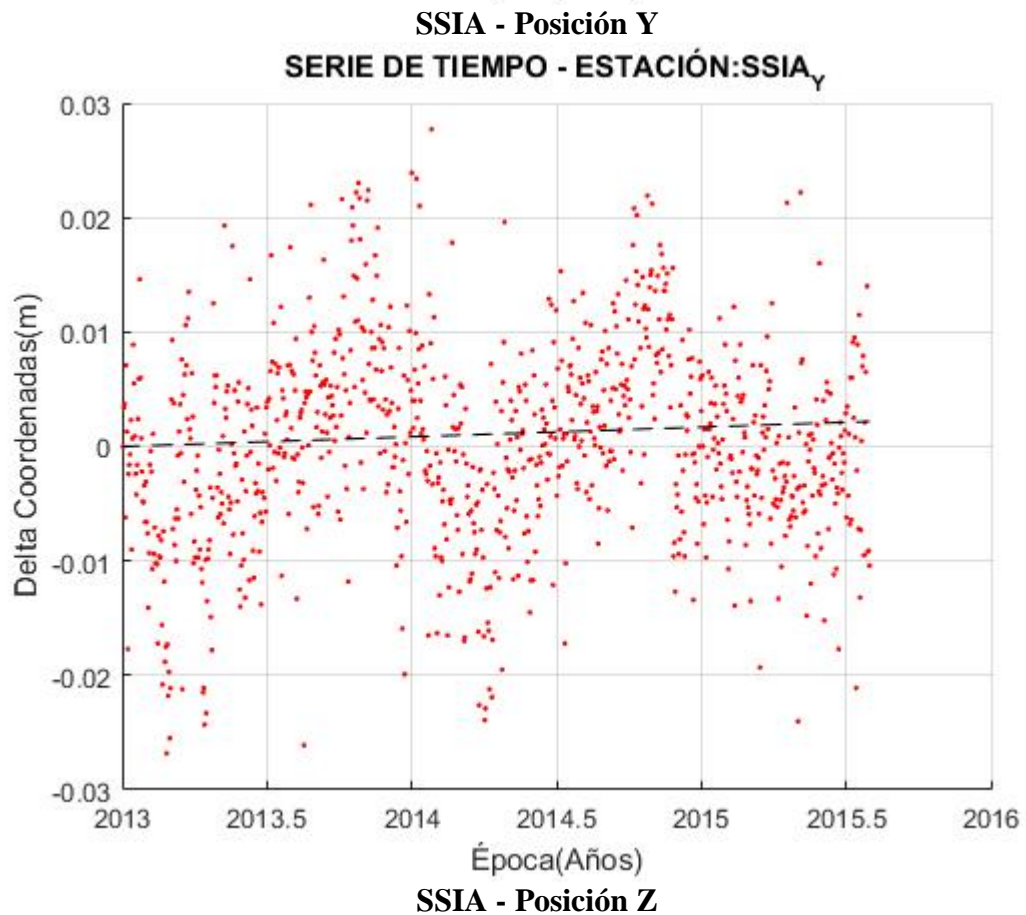
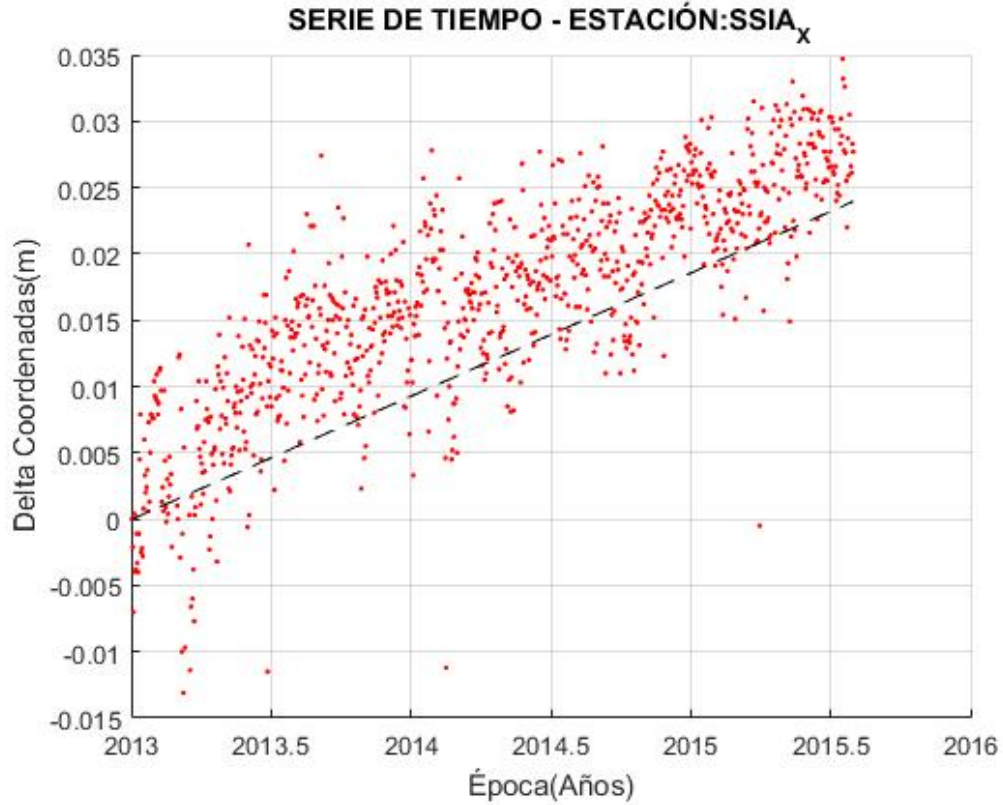


## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



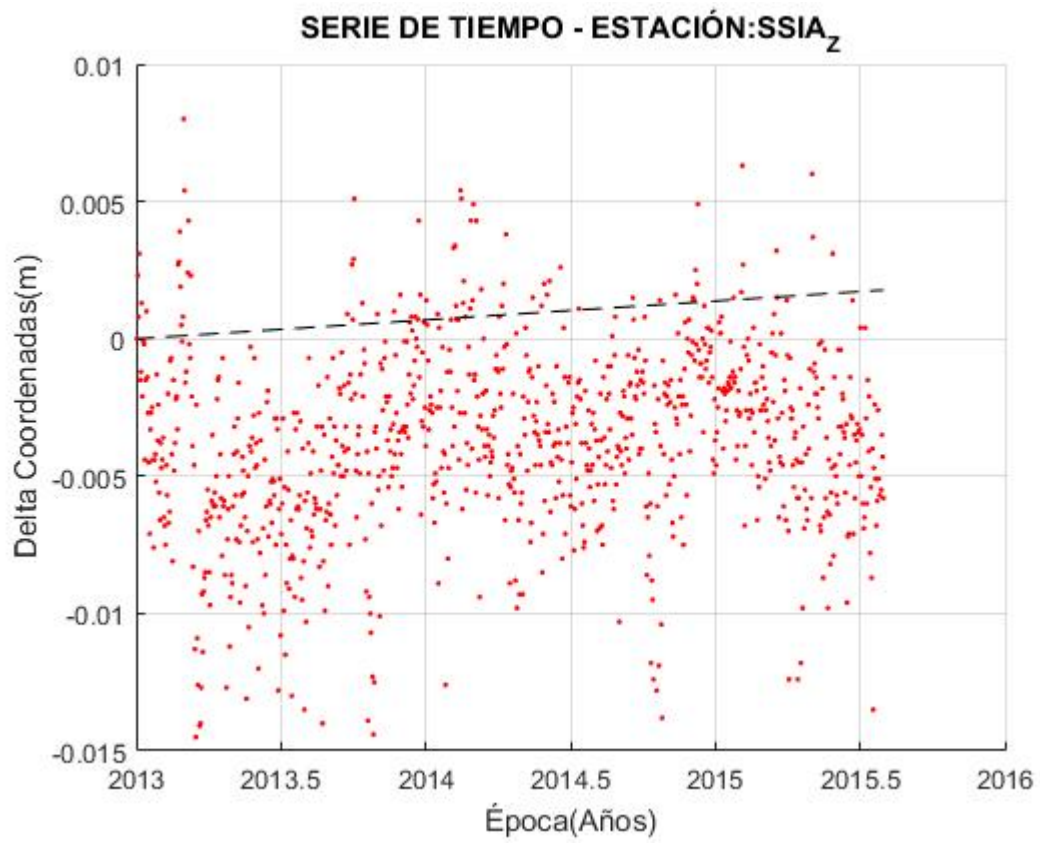
**SSIA - Posición X**

## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



**SSIA - Posición Z**

## Anexo 1\_Series temporales resultado de la rutina VelXYZ



## Anexo 2\_Correos para petición de software GAPSooffline

Concerning GAPS and access to FTP (or something similar)



Pedro Pérez Cárdenas  
sáb 11/07/2015, 07:10 p.m.  
msantos@unb.ca ✉



Responder | v

Sent Items

My best regards to you all.

I want to congratulate you for all the wonderful job you guys are making at GAPS.

My name is Pedro Perez. I'm a student at UNA: Universidad Nacional de Costa Rica. Im getting my postgraduate degree on Geodesy, and at this moment I'm working on my final project. It is related with the displacement of tectonic plates based on observations GNSS and PPP processing services. Due to the amount of data I have (~2 and 1/2 years - 20 stations), I was wondering: Is there a way for me ease the process by not doing it one by one? access to an FTP o a software maybe?

I find your services one of the best out there, but I haven't been able to get to this concern.

Thanks in advanced for all the attention provided.

See you later :D

Pedro Pérez Cárdenas.  
Cel: (506)8773-1766

RE: Concerning GAPS and access to FTP (or something similar)



Marcelo Santos <msantos@unb.ca>  
dom 12/07/2015, 08:28 a.m.  
Usted; Marco Mendonça (mammendonca@gmail.com) ✉



Responder | v

Dear Pedro.

Yes, we can provide an executable version of GAPS to help you with multiple processing. Marco will look into that for you.

Marcelo

## Anexo 2\_Correos para petición de software GAPSooffline

Re: Concerning GAPS and access to FTP (or something similar)



Marco Mendonça  
lun 13/07/2015, 05:54 p.m.  
Usted ↕



Responder | ▾

Hi Pedro!

I can definitely provide you an executable for our software.

May I ask you some questions? We would like to know where the software is being applied so we can plan new features for the future.

- What's the application for the software? (Thesis topic, research abstract or something similar)
- For how long are you going to be using GAPS?
- Are you using windows or linux?

The questions are not mandatory (except for the last one), but we would really like to know better our users :)

Have a nice week!


- *Marco Mendonça*

### Anexo 3\_Tabla de Chauvenet


Criterio de Chauvenet									
n	Tcrit	n	Tcrit	n	Tcrit	n	Tcrit	n	Tcrit
3	1.383	12	2.037	21	2.26	30	2.394	39	2.489
4	1.534	13	2.07	22	2.278	31	2.406	40	2.498
5	1.645	14	2.1	23	2.295	32	2.418	50	2.576
6	1.732	15	2.128	24	2.311	33	2.429	100	2.807
7	1.803	16	2.154	25	2.326	34	2.44	500	3.291
8	1.863	17	2.178	26	2.341	35	2.45	1000	3.481
9	1.915	18	2.2	27	2.355	36	2.46		
10	1.96	19	2.222	28	2.369	37	2.47		
11	2	20	2.241	29	2.382	38	2.479		

Fuente: <http://www.statisticshowto.com/chauvenets-criterion>

## Anexo 4\_ Información de las estaciones consideradas


<b>BGGY</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: BGGY__AntiguaBGG Ciudad: Antigua País: Antigua Red: UNAVCO</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 2876833.4272 Coordenada Y (m): -5379037.457 Coordenada Z (m): 1857683.2925</p> <p>Latitud (N +): +170242.00 Longitud (E+): -0615139.96 Elevación (m,elip) 300</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>


<b>CN09</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: CapHaitn_HTI2013 Ciudad: Haití País: Haití Red: UNAVCO</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 1842524.1534 Coordenada Y (m): -5718073.8161 Coordenada Z (m): 2135187.4544</p> <p>Latitud (N +): +194115.72 Longitud (E+): -0720822.56 Elevación (m,elip) 30</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>

## Anexo 4\_ Información de las estaciones consideradas


CN12	
<p><b>Información general</b></p> <p>Nombre: UWI_Mona_JAM2011 Ciudad: Kingston País: Jamaica Red: UNAVCO</p> <p><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 1390866.622 Coordenada Y (m): -5906361.3646 Coordenada Z (m): 1958908.745</p> <p>Latitud (N +): +180016.13 Longitud (E +): -0764456.59 Elevación (m,elip) 169.902</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>


CN20	
<p><b>Información general</b></p> <p>Nombre: Bocas_island_PAN Ciudad: Bocas Island País: Panamá Red: UNAVCO</p> <p><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 848061.4484 Coordenada Y (m): -6236542.797 Coordenada Z (m): 1029565.3325</p> <p>Latitud (N +): +092106.11 Longitud (E+): -0821522.56 Elevación (m,elip) 15.00</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>

## Anexo 4\_ Información de las estaciones consideradas


CN28	
<p><b>Información general</b></p> <p>Nombre: Conta_Is_PAN2012 Ciudad: Contadora País: Panamá Red: UNAVCO</p> <p><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 1199695.8635 Coordenada Y (m): -6191349.4593 Coordenada Z (m): 1029565.3325</p> <p>Latitud (N +): +092106.11 Longitud (E +): -0821522.56 Elevación (m,elip) 15.00</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>


CN35	
<p><b>Información general</b></p> <p>Nombre: Prvdncia_COL2012 Ciudad: Old Town País: Colombia Red: UNAVCO</p> <p><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 932030.5144 Coordenada Y (m): -6135904.6383 Coordenada Z (m): 1465862.9973</p> <p>Latitud (N +): +132231.80 Longitud (E +): -0812146.51 Elevación (m,elip) 47.879</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>

## Anexo 4\_ Información de las estaciones consideradas


<b>CRO1</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: Christiansted Ciudad: Virgin Islands País: USA Red: SIRGAS/UNAVCO</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 2607771.4940 Coordenada Y (m): -5488076.9970 Coordenada Z (m): 1932768.0602</p> <p>Latitud (N +): +174524.83 Longitud (E +): -0643503.54 Elevación (m,elip) -31.497</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>


<b>ETCG</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: HEREDIA Ciudad: Heredia País: Costa Rica Red: SIRGAS</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 645208,2328 Coordenada Y (m): -6249842.25 Coordenada Z (m): 1100399,35</p> <p>Latitud (N +): +095958.14 Longitud (E +): -0840621.23 Elevación (m,elip) 1193.70</p>	

<http://www.sirgas.org/es/sirgas-con-network/stations/station-list/#>

## Anexo 4\_ Información de las estaciones consideradas


<b>GUAT</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: Guatemala Ciudad: Ciudad de Guatemala País: Guatemala Red: SIRGAS/UNAVCO</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): -56063.582 Coordenada Y (m): -6174978.670 Coordenada Z (m): 1596665.260</p> <p>Latitud (N +): +143525.45 Longitud (E +): -0903112.66 Elevación (m,elip) 1519.90</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>


<b>LMMF</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: Aeroport Aime CESAIRE-LE Ciudad: Le Lamentin País: Martinica Red: SIRGAS/UNAVCO</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 2993387.952 Coordenada Y (m): -5399363.731 Coordenada Z (m): 1596748.042</p> <p>Latitud (N +): +143541.339 Longitud (E +): -0605946.214 Elevación (m,elip) -27.00</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>

## Anexo 4\_ Información de las estaciones consideradas


<b>MANA</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: MANAGUA NICARAGUA Ciudad: Managua País: Nicaragua Red: SIRGAS/UNAVCO</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 407981.838 Coordenada Y (m): -6222925.713 Coordenada Z (m): 1333528.967</p> <p>Latitud (N +): +120856.18 Longitud (E +): -0861456.38 Elevación (m,elip) 71.00</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>


<b>MAYZ</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: MayaguezTGPR2010 Ciudad: Mayaguez País: USA Red: UNAVCO</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 2352522.5373 Coordenada Y (m): -5585192.4064 Coordenada Z (m): 1981275.4158</p> <p>Latitud (N +): +181303.33 Longitud (E +): -0670931.79 Elevación (m,elip) 1.00</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>

## Anexo 4\_ Información de las estaciones consideradas


<b>PNE2</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: Playa Negra Ciudad: Playa Negra País: Costa Rica Red: UNAVCO</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 456674.4872 Coordenada Y (m): -6261467.5157 Coordenada Z (m): 1121500.7719</p> <p>Latitud (N +): +101142.52 Longitud (E +): -0854942.85 Elevación (m,elip) 10.67</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>


<b>ROA0</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Información general</b></p> <p>Nombre: RoatanAP_HND2007 Ciudad: Roatan País: Honduras Red: UNAVCO</p> <p style="text-align: center;"><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 370952.7626 Coordenada Y (m): -6111586.547 Coordenada Z (m): 1780541.8459</p> <p>Latitud (N +): +161905.16 Longitud (E +): -0863135.76 Elevación (m,elip) 12.553</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>

## Anexo 4\_ Información de las estaciones consideradas


SCUB	
<p><b>Información general</b></p> <p>Nombre: CENAIS Ciudad: Santiago País: Cuba Red: SIRGAS/UNAVCO</p> <p><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 1474538.1759 Coordenada Y (m): - 5811243.3797 Coordenada Z (m): 2168958.8133</p> <p>Latitud (N +): +200043.44 Longitud (E +): -0754544.33 Elevación (m,elip) 21.90</p>	

<http://www.sirgas.org/es/sirgas-con-network/stations/station-list/#>

SMRT	
<p><b>Información general</b></p> <p>Nombre: Saint Marten Ciudad: Santiago País: Cuba Red: SIRGAS/UNAVCO</p> <p><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 2743826.0652 Coordenada Y (m): - 5410452.1804 Coordenada Z (m): 1962822.9351</p> <p>Latitud (N +): +180232.16 Longitud (E +): -0630631.93 Elevación (m,elip) 32.786</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>

## Anexo 4\_ Información de las estaciones consideradas

SSIA	
<p><b>Información general</b></p> <p>Nombre: Ilopango Airport Ciudad: San Salvador País: El Salvador Red: SIRGAS/UNAVCO</p> <p><b>Posición aproximada (ITFR)</b></p> <p>Coordenada X (m): 95610.0615 Coordenada Y (m): -6197817.1521 Coordenada Z (m): 1500617.9412</p> <p>Latitud (N +): +134150.28 Longitud (E +): -0890658.32 Elevación (m,elip) 664.4</p>	

Fuente: <ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/>

## Anexo 5\_Correos para recomendacion de sintaxis en software GAPS

```
% GPSclk:   GPS clock product to be used
% tp:      Positioning mode (static=0 & kinematic=1)
% orbitType: 'repro1' or 'std'
% el:      User-defined elevation cutoff angle
% cpsd:    Carrier-phase standard deviation
% prsd:    Pseudorange standard deviation
% cllim:   Positional solution convergence condition
% max_it:  Maximum number of iterations
% doplim:  Maximum allowable GDOP value
% clk_interp: Interpolate static clock
% nadtype: Choose between: vmf1,unbvmf1,unbvmf1c,unbvmf1cmc,unbvmf1p,
%          unb3m,gpt2, and esa model
% Gobs     GPS observables to be considered
% nad_est: Estimate NAD
% map:     Mapping function to be used
% nsd:     Initial NAD standard deviation
% nrw:     NAD random walk
% gradient: Estimate tropo horizontal gradients
% nhzg:    Horizontal gradients standard deviation
% nrwhg:   Random walk gradients
```

Just change the gapsoffline.exe in the EXE folder for this new one and you should be good to go. In case you need a new version after this period or have any questions, please, let me know :)

Regards,

- Marco Mendonça

Re: Concerning GAPS and access to FTP (or something similar)



Marco Mendonça

lun 18/01/2016, 11:27 a.m.

Usted ↕



Responder | ▾

Marcado para seguimiento. Se inicia el martes, 25 de julio de 2017. Finaliza el martes, 25 de julio de 2017.

Hi Pedro,

Sorry about the delay. Here's the new version, valid until mid June 2016.

<http://gaps.gge.unb.ca/files/download/gapsoffline.zip>

We changed the syntax a bit to accomodate new capabilities. This is an updated example for an optimized static processing:

```
gapsoffline.exe unb30900.15o IGS_P IGS_P 0 10 0.015 2.0 1 5 20 1 L1WC1WL2WC2W std vmf1 1 vmf 0.10 5 0 0 0.001
0.3 1 1 jpg
```

Where the parameters names are respectively:

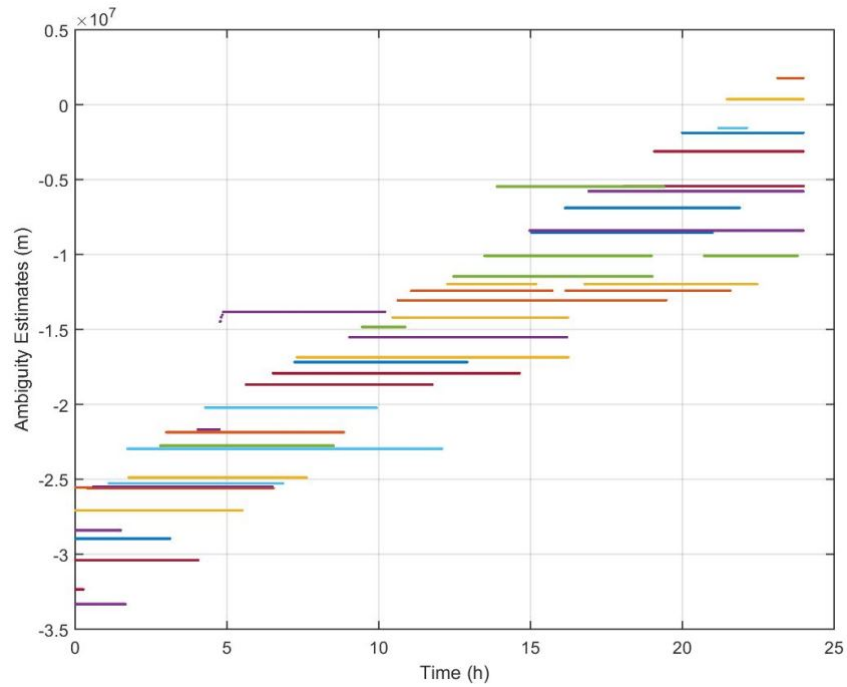
```
filename,GPSorb,GPSclk,tp,el,cpsd,prsd,cllim,max_it,doplim,clk_interp,Gobs,orbitType,nadtype,nad_est,map,nsd,nrw,gradient,apriori_grad,nhzg,nrwhg,ot,bt,pic
```

Meaning:

```
% filename:  User-submitted observation file
% GPSorb:    GPS orbit product to be used
```

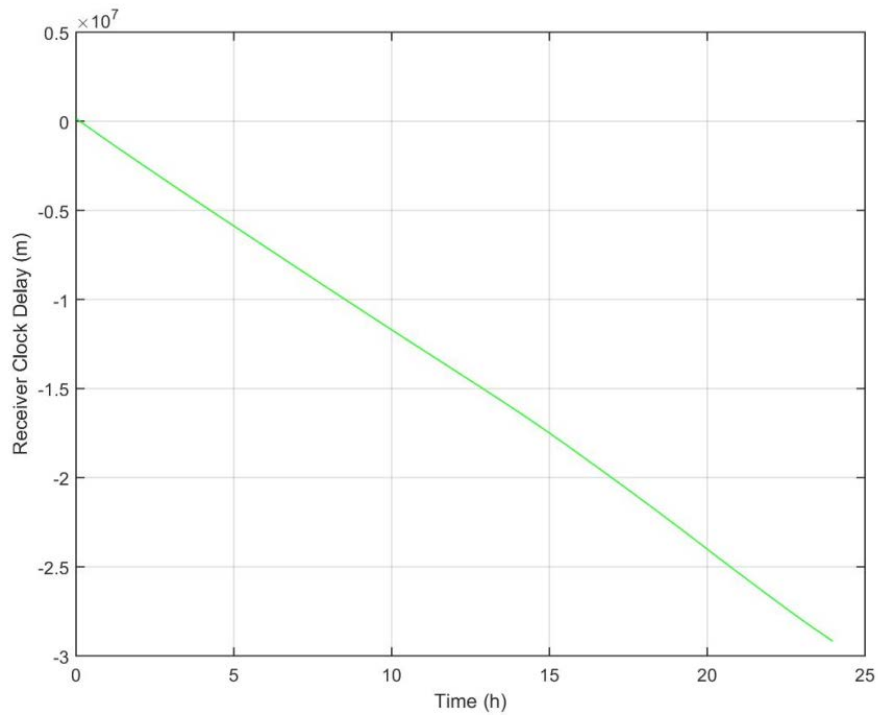
## Anexo 6 Productos de Procesamiento GAPS

### Estimaciones de ambigüedad



Fuente: Procesamiento de GAPSoffline para la estación ETCG día GPS 001, 2013.

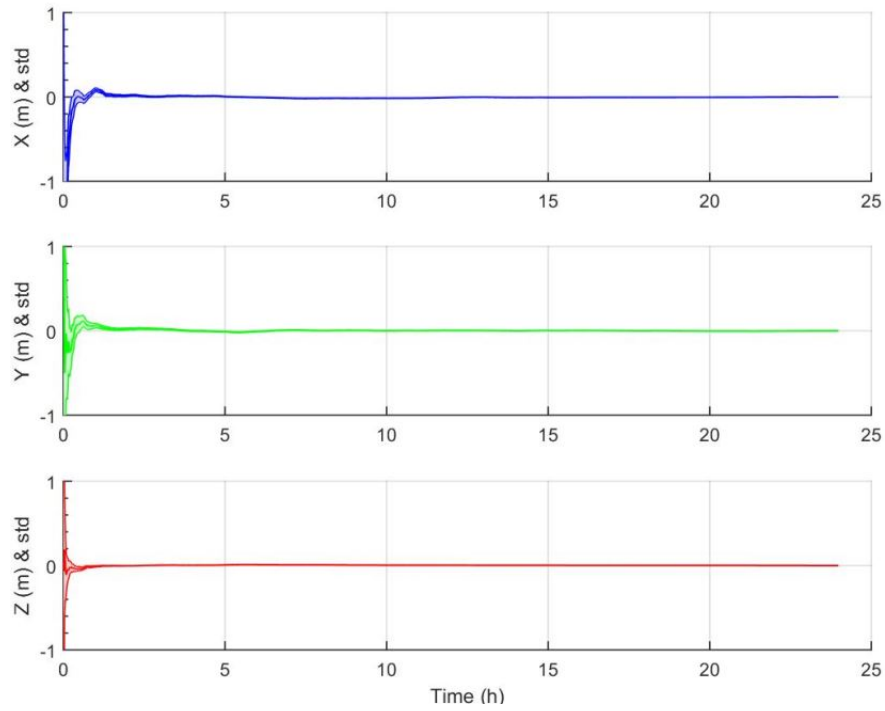
### Retraso del reloj en el receptor



Fuente: Procesamiento de GAPSoffline para la estación ETCG día GPS 001, 2013

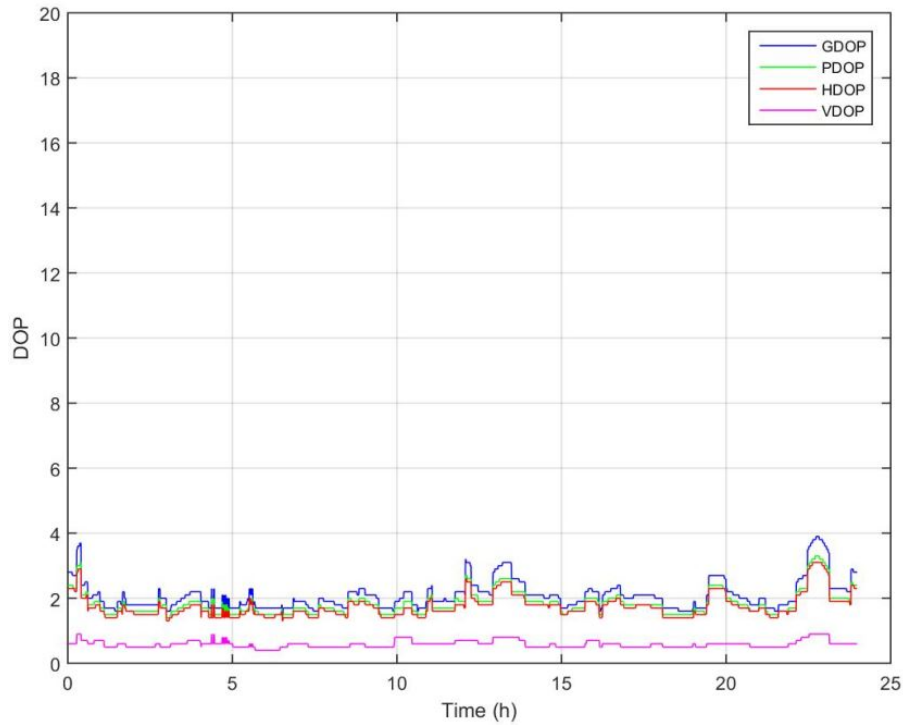
## Anexo 6 Productos de Procesamiento GAPS

### Desviación estándar de XYZ



Fuente: Procesamiento de GAPSoffline para la estación ETCG día GPS 001, 2013

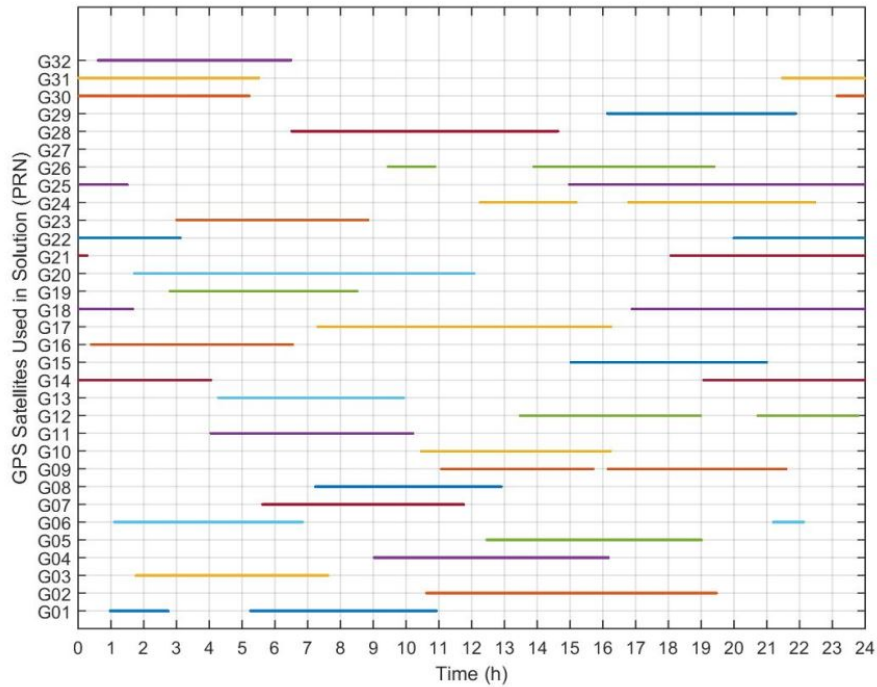
### Comportamiento del DOP



Fuente: Procesamiento de GAPSoffline para la estación ETCG día GPS 001, 2013

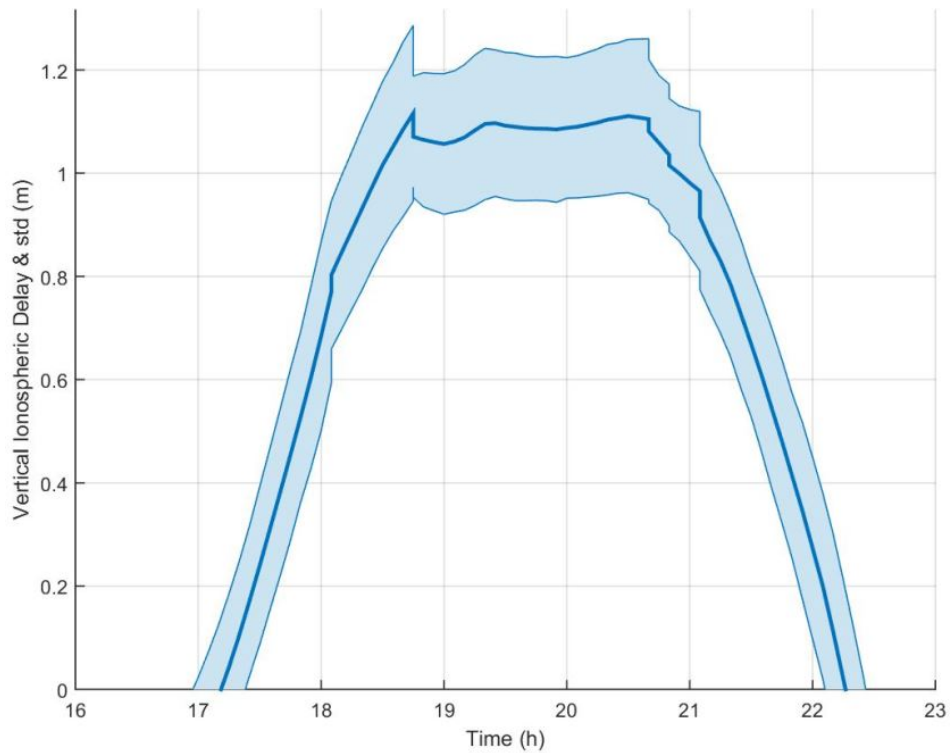
## Anexo 6 Productos de Procesamiento GAPS

### Satélites GPS en PRN



Fuente: Procesamiento de GAPSoffline para la estación ETCG día GPS 001, 2013

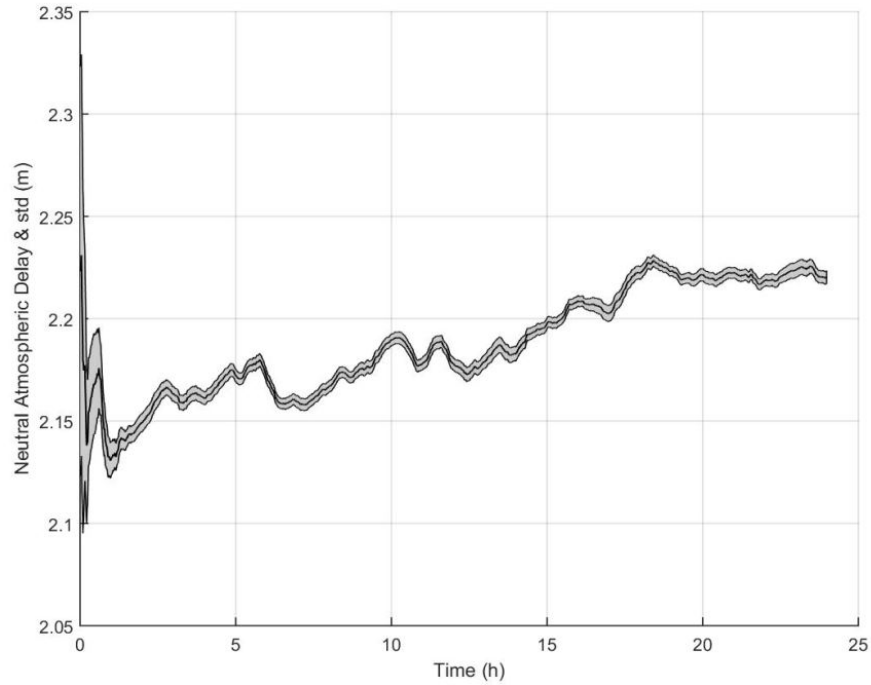
### Retraso ionosférico vertical



Fuente: Procesamiento de GAPSoffline para la estación ETCG día GPS 001, 2013

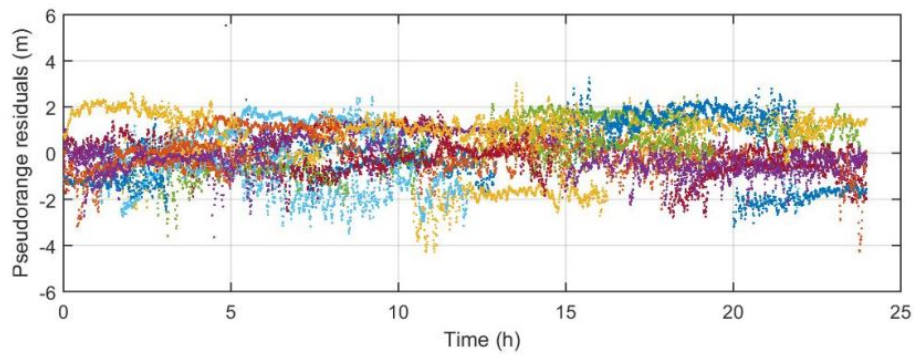
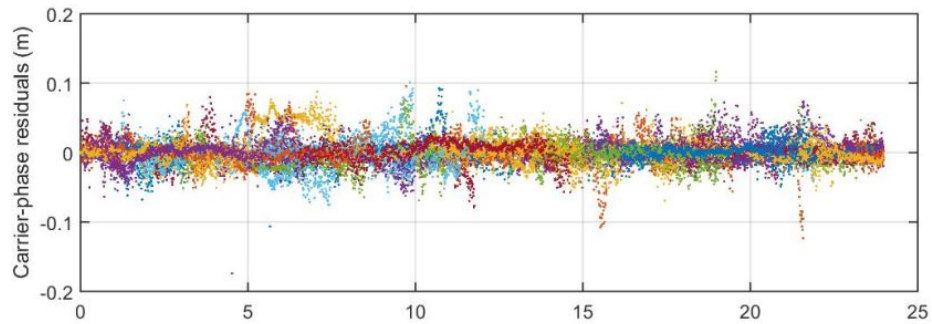
## Anexo 6 Productos de Procesamiento GAPS

### Retraso atmosférico neutral



Fuente: Procesamiento de GAPSoffline para la estación ETCG día GPS 001, 2013

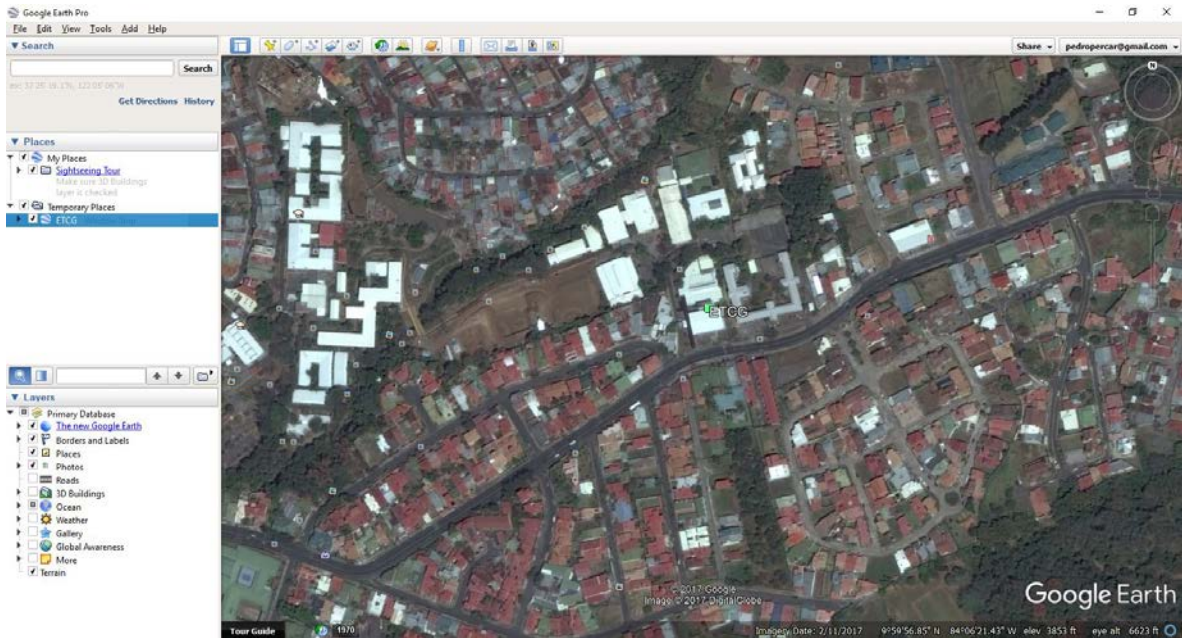
### Residuos de portadora fase



Fuente: Procesamiento de GAPSoffline para la estación ETCG día GPS 001, 2013

## Anexo 6 Productos de Procesamiento GAPS

### Localización en formato \*.kml



Fuente: Procesamiento de GAPSoffline para la estación ETCG día GPS 001, 2013

**Anexo 7 Plantilla de calculo para la prueba Kolmogorov-Smirnov**

	Xi	Hi	Zi	Prob(Zi)	D+	D-
<b>En Orden:</b> De menor a Mayor	2607771.2474	0.001156069	-4.3042	0.0000	0.0011	0.0000
	2607771.2498	0.002312139	-4.02561	0.0000	0.0023	0.0011
	2607771.2506	0.003468208	-3.93275	0.0000	0.0034	0.0023
	2607771.2546	0.004624277	-3.46843	0.0003	0.0044	0.0032
	2607771.2549	0.005780347	-3.43361	0.0003	0.0055	0.0043
	2607771.2567	0.006936416	-3.22466	0.0006	0.0063	0.0051
	2607771.2579	0.008092486	-3.08537	0.0010	0.0071	0.0059
	2607771.2597	0.009248555	-2.87642	0.0020	0.0072	0.0061
	2607771.2604	0.010404624	-2.79517	0.0026	0.0078	0.0067
	2607771.2608	0.011560694	-2.74874	0.0030	0.0086	0.0074
	2607771.2610	0.012716763	-2.72552	0.0032	0.0095	0.0084
	2607771.2612	0.013872832	-2.7023	0.0034	0.0104	0.0093
	2607771.2626	0.015028902	-2.53979	0.0055	0.0095	0.0083

	Max D+	Max D-	D	$\alpha$	$C_\alpha$	K(n)	$D_\alpha$
<b>Distr. Normal (coord X)</b>	0.017	0.016	0.017	0.05	0.895	29.43	0.03041
			<b>¿Es una distribución normal?:</b>			<b>SI</b>	



## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
msgbox('Error al cargar archivo DEBE INICIAR EL PROGRAMA NUEVAMENTE')
    pause
    return
else
    disp(' ')
    disp(' _____')
    disp(' * ARCHIVO CARGADO EXITOSAMENTE *')
    disp(' * Cha-Gru Outliers *')
    disp(' ___')
    disp(' ')
end

end

X=xlsread(NE);
save X

[m,n]=size(X);
NumObser=m;
%Años y Días GPS
Anos=X(:,1);
Dias=X(:,2);

%Vectores de coordenadas
CoordX=X(:,3);
CoordY=X(:,4);
CoordZ=X(:,5);

%Promedios
PromX=mean(CoordX);
PromY=mean(CoordY);
PromZ=mean(CoordZ);

%Desviaciones Estándar
DesvEstX=std(CoordX);
DesvEstY=std(CoordY);
DesvEstZ=std(CoordZ);

%Maximos y Minimos
MaxX=max(CoordX);
MaxY=max(CoordY);
MaxZ=max(CoordZ);

MinX=min(CoordX);
MinY=min(CoordY);
MinZ=min(CoordZ);

%Estandarización
StaX=zscore(CoordX);
StaY=zscore(CoordY);
```

## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
StaZ=zscore(CoordZ);

StaXabs=abs(StaX);
StaYabs=abs(StaY);
StaZabs=abs(StaZ);

%Estandarización para MAX y MIN
StaMAXx=zscore(MaxX);
StaMAXy=zscore(MaxY);
StaMAXz=zscore(MaxZ);

StaMINx=zscore(MinX);
StaMINy=zscore(MinY);
StaMINz=zscore(MinZ);

%Epocas
EpocaInicial=Anos(1,1)+(Dias(1,1)/365);
EpocaFinal=Anos(m,1)+(Dias(m,1)/365);

%*****
%*****
PREG=input('¿Cuál método estadístico desea utilizar? Chauvenet[1]
Grubbs[2]: ');
Disp.

(')
%*****
%1. PARA CHAUVENET
%*****
if PREG == 1

%
%-----
%Tabla Chauvenet (n minimo = 10)
if (10<=m)&& (m<12)
    ChauCritico=1.96;
elseif (12<=m)&& (m<15)
    ChauCritico=2.04;
elseif (15<=m)&& (m<20)
    ChauCritico=2.13;
elseif (20<=m)&& (m<25)
    ChauCritico=2.24;
elseif (25<=m)&& (m<30)
    ChauCritico=2.33;
elseif (30<=m)&& (m<40)
    ChauCritico=2.40;
elseif (40<=m)&& (m<100)
    ChauCritico=2.50;
elseif (100<=m)&& (m<500)
    ChauCritico=2.81;
```

## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
elseif (500<=m)&& (m<1000)
    ChauCritico=3.29;
else
    ChauCritico=3.48;
end

%1/2n * valor de distr normal*****
%Sumatoria de Contador
ChauSUMx=sum(CountChauX);
ChauSUMy=sum(CountChauY);
ChauSUMz=sum(CountChauZ);
%%PARA OBTENER DIAS GPS DE OUTLIERS*****
%PARA COORD X-----
for v=1:m
    if CountChauX(v,1)==1
        AnoDax(v,1)=Anos(v,1);
        DiaDax(v,1)=Dias(v,1);
    else
        AnoDax(v,1)=0;
        DiaDax(v,1)=0;
    end
end

%FILAS EXCEL
ChauANOXFILA=find(AnoDax>0);
ChauDIAXFILA=find(DiaDax>0);

for e=1:m
    if AnoDax(e,1)>0
        ChauANOX(e,1)=Anos(e,1);
        ChauDIAX(e,1)=Dias(e,1);
    else
        ChauANOX(e,1)=0;
        ChauDIAX(e,1)=0;
    end
end

g=size(ChauANOXFILA);
for L=1:g
    ChauANOX(ChauANOX==0) = [];
    rChauANOX=reshape(ChauANOX,size(ChauANOX));

    ChauDIAX(ChauDIAX==0) = [];
    rChauDIAX=reshape(ChauDIAX,size(ChauDIAX));

end
TableX=[ChauANOX,ChauDIAX];

%-----
```

## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
%PARA COORD Y-----
```

```
for v=1:m
    if CountChauY(v,1)==1
        AnoDAY(v,1)=Anos(v,1);
        DiaDAY(v,1)=Dias(v,1);
    else
        AnoDAY(v,1)=0;
        DiaDAY(v,1)=0;
    end
end
```

```
%FILAS EXCEL
```

```
ChauANOyFILA=find(AnoDAY>0);
ChauDIAyFILA=find(DiaDAY>0);
```

```
for e=1:m
    if AnoDAY(e,1)>0
        ChauANOy(e,1)=Anos(e,1);
        ChauDIAy(e,1)=Dias(e,1);
    else
        ChauANOy(e,1)=0;
        ChauDIAy(e,1)=0;
    end
end
```

```
%-----
```

```
%PARA COORD Z-----
```

```
for v=1:m
    if CountChauZ(v,1)==1
        AnoDAz(v,1)=Anos(v,1);
        DiaDAz(v,1)=Dias(v,1);
    else
        AnoDAz(v,1)=0;
        DiaDAz(v,1)=0;
    end
end
```

```
%FILAS EXCEL
```

```
ChauANOzFILA=find(AnoDAz>0);
ChauDIAzFILA=find(DiaDAz>0);
```

```
for e=1:m
    if AnoDAz(e,1)>0
        ChauANOz(e,1)=Anos(e,1);
        ChauDIAz(e,1)=Dias(e,1);
    else
        ChauANOz(e,1)=0;
    end
end
```

## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
        ChauDIAz(e,1)=0;
    end
end

g=size(ChauANOzFILA);
for L=1:g
    ChauANOz(ChauANOz==0) = [];
    rChauANOz=reshape(ChauANOz,size(ChauANOz));

    ChauDIAz(ChauDIAz==0) = [];
    rChauDIAz=reshape(ChauDIAz,size(ChauDIAz));
end
TableZ=[ChauANOz,ChauDIAz];
%-----

ResChau=input('Desea mostrar resultados: Si[1] No[2]: ');
    if ResChau == 1

disp(' ')
disp(' ----- ');
disp(' *** 1.RESUMEN CHAUVENET: ');
disp(' ----- ');
disp(' ARCHIVO: ');
fprintf(1, ' %s',NE );
disp(' DATOS PROCESADOS: ');
fprintf(1, ' %10.0f\n',m);
disp(' EPOCA INICIAL / EPOCA FINAL: ');
fprintf(1, ' %4.2f %4.2f \n',EpocaInicial,EpocaFinal);
disp(' CANTIDAD DE OUTLIERS ENCONTRADOS "X" ');
fprintf(1, ' %10.0f\n',ChauSUMx);
disp(' CANTIDAD DE OUTLIERS ENCONTRADOS "Y" ');
fprintf(1, ' %10.0f\n',ChauSUMy);
disp(' CANTIDAD DE OUTLIERS ENCONTRADOS "Z" ');
fprintf(1, ' %10.0f\n',ChauSUMz);
disp(' VALOR TÍPICO CHAUVENET ');
fprintf(1, ' %10.2f\n',ChauCritico);
disp(' ***** ');
disp(' AÑO/DIA DE OUTLIER "X" ENCONTRADO ');
disp( TableX)
disp(' AÑO/DIA DE OUTLIER "Y" ENCONTRADO ');
disp( TableY)
disp(' ')
disp(' AÑO/DIA DE OUTLIER "Z" ENCONTRADO ');
disp( TableZ)
disp(' ')
disp(' ----- ');
disp(' *** 2.VALORES PROMEDIO(m) *** ');
disp(' ----- ');
disp(' VALOR PROMEDIO X ');
```

## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
fprintf(1, '                %10.4f\n', PromX);
disp('  ')
disp('VALOR PROMEDIO Y                ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', PromY);
disp('  ')
disp('VALOR PROMEDIO Z                ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', PromZ);
disp('  ')
disp(' ----- ');
disp('                *** 3.DESVIACIÓN ESTANDAR(m) *** ');
disp(' ----- ');
disp('DESV.ESTANDARD X                ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', DesvEstX);
disp('  ')
disp('DESV.ESTANDARD Y                ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', DesvEstY);
disp('  ')
disp('DESV.ESTANDARD Z                ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', DesvEstZ);
    end

    GuardarCHAU=input('¿Desea guardar los resultados? Si[1] No[2]: ');
    if GuardarCHAU==1

        Encabezado={'Archivo', 'Outliers en X', 'Outliers en Y', ...
        'Outliers en Z', 'Valor
Crítico'; NE, ChauSUMx, ChauSUMy, ChauSUMz, ChauCritico};
        xlswrite('CHA-GRU Resultados Cha.xls', Encabezado);

        filename = 'testdata.xlsx';
        A = {'Time', 'Temperature'; 12,98; 13,99; 14,97};
        sheet = 1;
        xlRange = 'A1';
        xlswrite(filename, A, sheet, xlRange)

        ff=length(ChauDIASx);
%
%     EncabezadoX=('Fila Outlier X'ChauDIASx);
%     filename='CHA-GRU Resultados Cha.xls';
%     sheet=1;
%     xlRange='F1:F6';
%     xlswrite(filename, EncabezadoX, sheet, xlRange);

        Regreso=input('¿Desea utilizar Cha-Gru de nuevo? Si[1] No[2]: ');
        if (Regreso == 1);
            ChaGrubbs;

        else

            disp(' ----- ')

```

## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
disp('                *Muchas Gracias          *')
disp('          *****      Cha-Gru      *')
disp('                ')
end

%
else
disp('                ')
disp('          *****      Muchas Gracias      *')
disp('          *****      Cha-Gru      *')
disp('                ')
end

%*****
%2. PARA GRUBBS
%*****
%GRUBBS ONLY EVALUATES MINs AND MAXs
else
if PREG == 2
    Prob=input('Seleccione la probabilidad para Grubbs: 95%[1] 90%[2]: ');
    disp('')
    if Prob == 1
        alpha=0.05;
    else
        alpha=0.1;
    end
%Para MAX
GmaxX=(MaxX-PromX)/DesvEstX;
GmaxY=(MaxY-PromY)/DesvEstY;
GmaxZ=(MaxZ-PromZ)/DesvEstZ;

%Para MIN
GminX=(PromX-MinX)/DesvEstX;
GminY=(PromY-MinY)/DesvEstY;
GminZ=(PromZ-MinZ)/DesvEstZ;

%Valor Significancia
sigValue=alpha/m;
sigValue2=1-sigValue;

%Grados de libertad
df=m-2;

%Punto crítico de la distribución t-student
tcritic=tinvs(sigValue2,df);

%Punto crítico de Grubbs
Gcritic=((m-1)*tcritic)/sqrt(m*((m-2)+(tcritic^2)));

%=====
```

## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
%Validando G>Gcritc
%=====

ResGrubbs=input('Desea mostrar resultados: Si[1] No[2]: ');
    if ResGrubbs == 1

disp(' ')
disp(' ----- ');
disp('          *** 1.RESUMEN GRUBBS *** ');
disp(' ');
disp(' ----- ');
disp(' ')
disp('ARCHIVO: ');
fprintf(1, '          %s',NE );
disp(' ')
disp('          VALORES MÁXIMOS ')
disp('          ***** ')
disp('VALOR MÁXIMO COORDENADA X ');
fprintf(1, '          %10.4f\n',MaxX);
disp('VALOR "X" MÁXIMO ES OUTLIER? ');
fprintf(1, '          %10.0f\n',GrubbsResMAXx);
disp(' ----- ');
disp('VALOR MÁXIMO COORDENADA Y ');
fprintf(1, '          %10.4f\n',MaxY);
disp('VALOR "Y" MÁXIMO ES OUTLIER? ');
fprintf(1, '          %10.0f\n',GrubbsResMAXy);
disp(' ----- ');
disp('VALOR MÁXIMO COORDENADA Z ');
fprintf(1, '          %10.4f\n',MaxZ);
disp('VALOR "Z" MÁXIMO ES OUTLIER? ');
fprintf(1, '          %10.0f\n',GrubbsResMAXz);
disp(' ')
disp('          VALORES MÍNIMOS ')
disp('          ***** ')
disp('VALOR MÍNIMO COORDENADA X ');
fprintf(1, '          %10.4f\n',MinX);
disp('VALOR "X" MÍNIMO ES OUTLIER? ');
fprintf(1, '          %10.0f\n',GrubbsResMINx);
disp(' ----- ');
disp('VALOR MÍNIMO COORDENADA Y ');
fprintf(1, '          %10.4f\n',MinY);
disp('VALOR "Y" MÍNIMOS ES OUTLIER? ');
fprintf(1, '          %10.0f\n',GrubbsResMINy);
disp(' ----- ');
disp('VALOR MÍNIMO COORDENADA Z ');
fprintf(1, '          %10.4f\n',MinZ);
disp('VALOR "Z" MÍNIMOS ES OUTLIER? ');
fprintf(1, '          %10.0f\n',GrubbsResMINz);
```

## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
disp('-----')
disp('')
disp('VALOR TIPICO GRUBBS          ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', Gcritic);
disp('-----');
disp('          *** 2.VALORES PROMEDIO(m) ***          ');
disp('-----');
disp('VALOR PROMEDIO X          ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', PromX);
disp(' ')
disp('VALOR PROMEDIO Y          ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', PromY);
disp(' ')
disp('VALOR PROMEDIO Z          ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', PromZ);
disp('-----');
disp('          *** 3.DESVIACIÓN ESTANDAR(m) ***          ');
disp('-----');
disp('DESV.ESTANDARD X          ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', DesvEstX);
disp(' ')
disp('DESV.ESTANDARD Y          ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', DesvEstY);
disp(' ')
disp('DESV.ESTANDARD Z          ');
fprintf(1, '                %10.4f\n', DesvEstZ);
    Regreso=input('¿Desea utilizar Cha-Gru de nuevo? Si[1] No[2]: ');
    if (Regreso == 1);
        ChaGrubbs;

    else
        disp('-----')
        disp('          ***** Muchas Gracias          *****')
        disp('          ***** Cha-Gru          *****')
        disp('-----')

    end

end

end

GuardarGRU=input('¿Desea guardar los resultados? Si[1] No[2]: ');
    if GuardarGRU==1

        Encabezado={'Archivo', 'Máximo X', 'Mámimo Y', ...
'Máximo Z', 'Mínimo X', 'Mínimo Y', 'Mínimo Z', ...
'Outlier Máximo X?', 'Outlier Máximo Y?', 'Outlier Máximo Z?', ...
'Outlier Mínimo X?', 'Outlier Mínimo Y?', 'Outlier Mínimo Z?';
        NE, MaxX, MaxY, MaxZ, MinX, MinY, MinZ, GrubbsResMAXx, GrubbsResMAXy...
```

## Anexo 8 Código de programación Cha-Gru

```
GrubbsResMAXz, GrubbsResMINx, GrubbsResMINy, GrubbsResMINz};
xlswrite('CHA-GRU Resultados Gru.xls', Encabezado);

    Regreso=input('?Desea utilizar Cha-Gru de nuevo? Si[1] No[2]: ');
if (Regreso == 1);
ChaGrubbs;

else

    disp(' _____ ')
    disp(' *****      Muchas Gracias      ***** ')
    disp(' *****              Cha-Gru              ***** ')
    disp(' _____ ')

end

%
else

    disp(' _____ ')
    disp(' *****      Muchas Gracias      ***** ')
    disp(' *****              Cha-Gru              ***** ')
    disp(' _____ ')

end

end
end%PREGUNTA GENERAL
```

## Anexo 8 Código de programación EulerPPC

### Programación para el cálculo del polo de Euler

```
%-----
clear all
clc
clcfntSize = 15;
format long
inicio=1;
%-----
disp('_____')
disp('          UNIVERSIDAD NACIONAL          ')
disp('    FACULTAD DE LAS CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES    ')
disp('      ESCUELA DE TOPOGRAFIA, CATASTRO Y GEODESIA      ')
disp('-----')
disp('          **** EulerPPC ****          ')
disp('-----')
disp('Desarrollador:          ')
disp('          Pedro Pérez Cárdenas          ')
disp('Contacto:          pedropercar@gmail.com          ')
disp('-----')
disp('Objetivos:          ')
disp('    1)Calcular los parámetros del polo de Euler aplicando          ')
disp('    ajuste por mínimos cuadrados y basado en las coordenadas')
disp('    y velocidades de una serie de estaciones GNSS dentro de ')
disp('    una misma placa tectónica.          ')
disp('    2)Obtener la velocidad de cada estación GNSS según su          ')
disp('    Polo de Euler.          ')
disp('    3)Alogoritmo basado en el modelo:          ')
disp('          |VX|   | 0  Z  -Y| |wx|          ')
disp('          |VY| =  |-Z  0  X| |wy|          ')
disp('          |VZ|   | Y  -X  0| |wz|          ')
disp('_____')
disp(' ')
Hor(1,:)=clock;
H=Hor(1,4);
M=Hor(1,5)/100;
Hora=H+M;
fprintf('HORA : %2.2f\n',Hora)
disp(' ')
disp('Notas: ')
disp('    1)Datos de entrada con formato *.xlsx          ')
disp('    2)Para Cálculo Euler[Estaciones,X,Y,Z,Vx,Vy,Vz,Evx,Evy,Evz] ')
disp('    3)Ingresar Velocidades y DesvEst en metros          ')
pause
disp(' ')
%////////////////////////////////////
NA=input('Ingrese el nombre del archivo:', 's');

if isempty(NA)
msgbox('Error al cargar archivo intente de nuevo')
NA=input('Ingrese el nombre del archivo nuevamente:', 's');
disp(' ')
disp(' ')

        if isempty(NA)
                disp(' ')
        end
end
```

## Anexo 8 Código de programación EulerPPC

```
        msgbox('Error al cargar archivo DEBE INICIAR EL
PROGRAMA NUEVAMENTE')
        pause
        return

    else
        disp(' ')
        disp('_____')
        disp('*   ARCHIVO CARGADO EXITOSAMENTE   *')
        disp('*           Vel-XYZ           *')
        disp('_____')
        disp(' ')
    end

end

[numbers, TEXT]=xlsread(NA);
%X=xlsread(NA);
X=numbers;
save X
m=length(X);

Esta=TEXT(:,1);
CoordX=X(:,1);
CoordY=X(:,2);
CoordZ=X(:,3);
VelX=X(:,4);
VelY=X(:,5);
VelZ=X(:,6);
evx=X(:,7);
evy=X(:,8);
evz=X(:,9);

Xcoords=horzcat(CoordX,CoordY,CoordZ);

XcoordsTR=Xcoords';
dd=3*length(XcoordsTR);
k=length(XcoordsTR);
TT=reshape(XcoordsTR,[dd,1]);
% Coords=vertcat(CoordsTR1,CoordsTR2,CoordsTR3);

%Para Vn=L
Lvel=horzcat(VelX,VelY,VelZ);
LvelT=Lvel';
k=3*length(LvelT);
L=reshape(LvelT,[k,1]);

%

%Para EV
%Vector de EVm(m)

ErrorV=horzcat(evx,evy,evz);
ErrorVtr=ErrorV';
k=3*length(ErrorVtr);
EV=reshape(ErrorVtr,[k,1]);
```

## Anexo 8 Código de programación EulerPPC

```
%Vector de EV(mm)
EVmm=EV*1000;
%


---


%Matriz de Ecuaciones Normales
N=A'*P*A;

Qxx=inv(N);

%OMEGA
OM=Qxx*(A'*P*L); %#ok<MINV>
ro=180/pi;

%Estimación de la Exactitud de los parámetros Euler

v=A*OM-L;
Rows = size(X,1);
df=(2*Rows)-3;
Sposter=sqrt(v'*P*v/df);
Q=Sposter^2*Qxx; %#ok<MINV>

%Propagando errores


---


%velocidad angular
va1=OM(1,1)/(abs(OMv)/ro)*10^6;
va2=OM(2,1)/(abs(OMv)/ro)*10^6;
va3=OM(3,1)/(abs(OMv)/ro)*10^6;
%Latitud
lat1=-((1/((abs(OMv)/ro)/10^6)^2)*((OM(1,1)*OM(3,1))/...
(sqrt(OM(1,1)^2+OM(2,1)^2))));
lat2=-((1/((abs(OMv)/ro)/10^6)^2)*((OM(2,1)*OM(3,1))/...
(sqrt(OM(1,1)^2+OM(2,1)^2))));
lat3=-((1/((abs(OMv)/ro)/10^6)^2)*sqrt(OM(1,1)^2+OM(2,1)^2));

G=vertcat(G1,G2,G3);

%formula general propagacion de errores
SigmaOM=G*Q*G';
raizSigmaOM=sqrt(diag(SigmaOM));
EOMv=raizSigmaOM(1,1)*ro*10^6;
EOMlat=raizSigmaOM(2,1)*ro;
EOMlong=raizSigmaOM(3,1)*ro;

%Para Velocidades EULER X
for g=1:Rows
    Vx(g,1)=CoordZ(g,1)*OM(2,1)-CoordY(g,1)*OM(3,1);
end

%Para Velocidades EULER Y
for g=1:Rows
    Vy(g,1)=CoordX(g,1)*OM(3,1)-CoordZ(g,1)*OM(1,1);
end

%Para Velocidades EULER Z
```

## Anexo 8 Código de programación EulerPPC

```
for g=1:Rows
    Vz(g,1)=CoordY(g,1)*OM(1,1)-CoordX(g,1)*OM(2,1);

end

Estaciones=cell2mat(Esta);

Vesta=vertcat(Vx,Vy,Vz);
TAB=[cellstr(Estaciones),num2cell(Vx),num2cell(Vy),num2cell(Vz)];

%Transformando ECEF-->LatLong-----
%WGS84-----
a = 6378137;
e = 8.1819190842622e-2;
ro=180/pi;
b = sqrt(a^2*(1-e^2));
ep = sqrt((a^2-b^2)/b^2);
ll=length(X(:,1));

for s=1:ll
    p(s,1)=sqrt(X(s,1)^2+X(s,2)^2);
    th(s,1)=atan2(a.*X(s,3),(b.*p(s,1)))*ro;
    lon(s,1)=atan2(X(s,2),X(s,1))*ro;
    LATITUD(s,1)=atan2((X(s,3)+ep^2.*b.*(sin(th(s,1)/ro)).^3),(p(s,1)...
        -e^2.*a.*(cos(th(s,1)/ro)).^3))*ro;
end

%Velocidades de estacionesPP-----

m=length(LATITUD);
R=zeros(2,3);
vneu=zeros(m*2,1);
covneu=zeros(m*2,1);
k=1;
for i=1:m
    re=6378137*cos(LATITUD(i,1)/ro);
    R(1,1)=sin(lon(i,1)/ro);
    R(1,2)=-cos(lon(i,1)/ro);
    R(1,3)=0;

    R(2,1)=-sin(LATITUD(i,1)/ro)*cos(lon(i,1)/ro);
    R(2,2)=-sin(LATITUD(i,1)*ro)*sin(lon(i,1)/ro);
    R(2,3)=cos(LATITUD(i,1)/ro);

    vneu(k:k+1,1)=re*R*OM;
    covneu(k:k+1)=sqrt(diag(re*R*Q*R'*re));
    k=k+2;
end

end

%[vneu covneu];
j=1;
for i=1:2:m*2
    vn(j,1)=vneu(i,1);
    ve(j,1)=vneu(i+1,1);
    svn(j,1)=covneu(i,1);
```

## Anexo 8 Código de programación EulerPPC

```
sve(j,1)=covneu(i+1,1);
j=j+1;
end

%Velocidades de estacionesPP-----

S=[cellstr(Estaciones) num2cell(LATITUD) num2cell(lon) num2cell(vn)...
   num2cell(ve) num2cell(svn) num2cell(sve)];

%PPCVelocidades estaciones

%
%-----
%DATOS DE SALIDA
%-----
Resultados=input('¿Desea visualizar los resultados? Si[1] No[2]: ');
if Resultados==1

disp(' ')
disp('-----')
disp('                UNIVERSIDAD NACIONAL                ')
disp('                ESCUELA DE TOPOGRAFIA, CATASTRO Y GEODESIA ')
disp('*****EulerPPC*****')
disp('-----')
disp('                CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DEL POLO DE EULER ')
disp('                UTILIZANDO VELOCIDADES DE ESTACIONES GNSS ')
disp('-----')
disp('                RESUMEN DE RESULTADOS ')
disp('-----')
disp('1. INFORMACIÓN GENERAL ')
disp('-----')
fprintf('ARCHIVO PROCESADO:                %4s\n',NA)
fprintf('TOTAL DE ESTACIONES:                %10.0f\n',ll)
fprintf('GRADOS DE LIBERTAD:                %10.0f\n',df)
fprintf('SIGMA A POSTERIORI:                %10.5f\n',Sposter)
disp(' ')
disp('-----')
disp('2. POLO DE EULER ')
disp('-----')
fprintf('LATITUD(°):                %10.5f ± %5.5f \n',OMlat,EOMlat)
disp(' ')
fprintf('LONGITUD(°):                %10.5f ± %5.5f \n',OMlong,EOMlong)
disp(' ')
fprintf('OMEGA (°/Ma):                %10.5f ± %5.5f \n',OMv,EOMv)
disp(' ')
disp('-----')
disp('3. VELOCIDADES EULER (Vx,Vy,VZ) ')
disp('-----')
disp('Estaciones    Vx        Vy        Vz ')
disp('              (m/a)    (m/a)    (m/a) ')

```

## Anexo 8 Código de programación EulerPPC

```
disp(' ')
for rr=1:11
    fprintf('%s      %8.4f  %8.4f  %8.4f\n',...
           cell2mat(TAB(rr,1)),cell2mat(TAB(rr,2)),...
           cell2mat(TAB(rr,3)),cell2mat(TAB(rr,4)))
end
disp('_____')
disp('3. VELOCIDADES EULER (Lat,Long,Vn,Ve,dVn,dVe)')
disp('_____')
disp('Estaciones  Latitud  Longitud      Vn      Ve      dVn      dVe')
disp('          (°)      (°)      (m/a)      (m/a)      (m/a)      (m/a)')
disp(' ')
for i=1:m
    fprintf('%s      %8.4f  %8.4f  %8.4f %8.4f %8.4f %8.4f\n',...
           cell2mat(S(i,1)),cell2mat(S(i,2)),cell2mat(S(i,3)),...
           cell2mat(S(i,4)),cell2mat(S(i,5)),cell2mat(S(i,6)),...
           cell2mat(S(i,7)))
end
else
    Graph=input(';Desea mapear el polo de Euler y las estaciones? Si[1]
No[2]: ');
    if Graph==1

        figure
        load coast;
        set(gcf,'Name','ESTACIONES PROCESADAS Y SU POLO DE EULER')
        hold on
        grid on
        zoom on
        nb_point=25;

        landareas = shaperead('landareas.shp','UseGeoCoords', true);
        geoshow(landareas, 'FaceColor', 'green');
        geoshow(OMlat, OMLong, 'DisplayType', 'Point', 'Marker', '+',
'Color', 'red');%EULER
%      text(OMlat,OMLong,'starting point');

for rr=1:11
    geoshow(LATITUD(rr,1), lon(rr,1), 'DisplayType', 'Point', 'Marker',
'^','Color', 'red');%ESTACIONES
end
    Regreso=input(';Desea utilizar EulerPPC de nuevo? Si[1] No[2]: ');
    if (Regreso == 1);
        EulerPPC;

    else
        disp('_____')
        disp('*****      Muchas Gracias      *****')
        disp('*****      EulerPPC      *****')
        disp('_____')

    end

else
```

## Anexo 8 Código de programación EulerPPC

```
Regreso=input('¿Desea utilizar EulerPPC de nuevo? Si[1] No[2]: ');
if (Regreso == 1);
EulerPPC;

else
disp('_____')
disp('*****      Muchas Gracias      *****')
disp('*****      EulerPPC      *****')
disp('_____')

end

end

end

Graph=input('¿Desea mapear el polo de Euler y las estaciones? Si[1] No[2]: ');
if Graph==1

figure
load coast;
set(gcf, 'Name', 'ESTACIONES PROCESADAS Y SU POLO DE EULER')
hold on
grid on
zoom on
nb_point=25;

landareas = shaperead('landareas.shp', 'UseGeoCoords', true);
geoshow(landareas, 'FaceColor', 'green');
geoshow(OMlat, Omlong, 'DisplayType', 'Point', 'Marker', '+',
'Color', 'red');%EULER
% text(OMlat,Omlong,'starting point');

for rr=1:11
geoshow(LATITUD(rr,1), lon(rr,1), 'DisplayType', 'Point', 'Marker',
'^', 'Color', 'red');%ESTACIONES

end

Regreso=input('¿Desea utilizar EulerPPC de nuevo? Si[1] No[2]: ');
if (Regreso == 1);
EulerPPC;

else
disp('_____')
disp('*****      Muchas Gracias      *****')
disp('*****      EulerPPC      *****')
disp('_____')

end

else
```

## Anexo 8 Código de programación EulerPPC

```
Regreso=input('¿Desea utilizar EulerPPC de nuevo? Si[1] No[2]:');
');
if (Regreso == 1);
EulerPPC;

else
disp('_____')
disp('*****      Muchas Gracias      *****')
disp('*****              EulerPPC              *****')
disp('_____')

end

end
```

## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

### Programación para estimación de velocidades VelXYZ

```
%-----
clear all
clc
clcfontSize = 15;
format long
inicio=1;
%-----
disp('_____')
disp('          UNIVERSIDAD NACIONAL          ')
disp('    FACULTAD DE LAS CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES    ')
disp('      ESCUELA DE TOPOGRAFIA, CATASTRO Y GEODESIA      ')
disp('-----')
disp('          ****   Vel-XYZ   ****          ')
disp('-----')
disp('Desarrollador:          ')
disp('          Pedro Pérez Cárdenas          ')
disp('Contacto:          pedropercar@gmail.com          ')
disp('-----')
disp('Objetivo:          ')
disp('    Estimar los componentes de velocidad para una estación  ')
disp('    de medición continua mediante la aplicación de ajuste  ')
disp('    por mínimos cuadrados.          ')
disp('_____')
%////////////////////////////////////
disp(' ')
Hor(1,:)=clock;
H=Hor(1,4);
M=Hor(1,5)/100;
Hora=H+M;
fprintf('HORA : %2.2f\n',Hora)
disp(' ')
disp('Notas: ')
disp('    1)Datos de entrada con formato *.xlsx          ')
disp('    2)Para ajuste individual [Año,DíaGPS,X,Sx(m)]          ')
disp('    3)Para ajuste completo [Año,DíaGPS,X,Y,Z,Sx(m),Sy(m),Sz(m)] ')
disp('    4)Nombre de archivo debe coincidir con nombre de estación ')
pause
disp(' ')
%////////////////////////////////////
Eleccion=input('Indique el tipo de ajuste que desea realizar:  Invidual[1]
Completo[2] ');
    if Eleccion==1

NE=input('Ingrese el nombre de la estación: ','s');

if isempty(NE)
msgbox('Error al cargar archivo intente de nuevo')
NE=input('Ingrese el nombre de la estación nuevamente: ','s');
disp(' ')
disp(' ')

        if isempty(NE)
            disp(' ')
        end
    end
end
```

## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
        msgbox('Error al cargar archivo DEBE INICIAR EL PROGRAMA
NUEVAMENTE')
        pause
        return

    else
        disp(' ')
        disp('_____')
        disp('*   ARCHIVO CARGADO EXITOSAMENTE   *')
        disp('*           Vel-XYZ           *')
        disp('_____')
        disp(' ')
    end

end

X=xlsread(NE);
save X

[m,n]=size(X);
NumObser=m;

%CoordenadasXYZ////////////////////////////////////
Ano=X(:,1);
GPSd=X(:,2);%Vector de Dias GPS
VectX=X(:,3);
%EpocasINI-FINAL
EpocaInicial=Ano(1,1)+(GPSd(1,1)/365);
EpocaFinal=Ano(m,1)+(GPSd(m,1)/365);

%ESTADÍSTICA
AverageX=mean(VectX);

MAXx=max(VectX);
MINx=min(VectX);

stdX=std(VectX);

%Deltas posición_____
%X
for jj=1:m
    DeltaX(jj,1)=VectX(jj,1)-VectX(1,1);
end

%ErroresSxSySz////////////////////////////////////
Sx=X(:,4);
%Época de Referencia////////////////////////////////////
ER=input('Ingrese la época de referencia(t0) deseada(en años):');
if isempty(ER)
    msgbox('Error al ingresar época de referencia(t0) deseada(en años) intente de
nuevo')
    ER=input('Ingrese la época de referencia(t0) deseada(en años):');
    disp(' ')
    disp(' ')

    if isempty(ER)
```

## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
                msgbox('Error al ingresar la época de referencia DEBE
INICIAR EL PROGRAMA NUEVAMENTE')
                clc
                return
            else
                save ER
            end

end

save ER

%Vectores de Observacion
LxLyLz////////////////////////////////////
Lx=VectX;
[m,n]=size(X);
%Épocas para cada dia////////////////////////////////////
for i=1:m;
    Epoca(i,1)=Ano(i,1)+(GPSd(i,1)/365);
    save Epoca;
end
%Vector Deltas tiempo////////////////////////////////////
for w=1:m
    Dt(w,1)=Epoca(w,1)-ER;
end
%Vectores de Incógnitas////////////////////////////////////
Xo=[AverageX;Vxap];
[EE,JJ]=size(Xo);
%Vector de Observaciones reducidas////////////////////////////////////
elex=(VectX-Xte);
%Matriz de ecuaciones Normales////////////////////////////////////
Nx=transpose(Ax)*Px*Ax;
%Miembro Absoluto////////////////////////////////////
nx=transpose(Ax)*Px*elex;
%Matriz de cofactores////////////////////////////////////
Qxxx=inv(Nx);
%Vector de Incognitas////////////////////////////////////
x=inv(Nx)*nx;
%Vector de Residuos////////////////////////////////////
vx=Ax*x-elex;
%Controles de Ajuste////////////////////////////////////
    %Coordenada X
    Xca1=transpose(Ax)*Px*vx;
    Xca2=transpose(vx)*Px*vx;
    Xca3=-transpose(elex)*Px*vx;
%Desviacion estandar de la unidad de pesos////////////////////////////////////
gralib=m-EE;
Sox=sqrt(transpose(vx)*Px*vx/gralib);
Sxi=Sox*sqrt(diag(Qxxx));
%Vector de Observaciones Ajustadas////////////////////////////////////
LxAju=VectX+vx;
for mm=1:m
    LxAjuD(mm,1)=LxAju(mm,1)-LxAju(1,1);
end
```



## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
hold on
grid on
zoom on

plot(Epoca,DeltaX,'r. ');
title(TimeS);
xlabel('Época(Años)');
ylabel('Delta Coordenadas(m)');
px = polyfit(Epoca,LxAjuD,1);
fx = polyval(px,Epoca);
plot(Epoca,fx,'--k')
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');

else

end

Guardar=input('¿Desea guardar los datos? Si[1] No[2]: ');
if Guardar==1

Encabezado={'ESTACION', 'EPOCA', 'COORDENADA FINAL(m)',...
'VELOCIDAD FINAL(mm/a)', 'DESV EST COORDENADA(m)',...
'DESV EST VELOCIDAD(m)';...
NE,ER,Xaju,Vxaju,Sxi(1,1),Sxi(2,1)};
xlswrite('Resumen de Resultados VelXYZ.xls',Encabezado);

Regreso=input('¿Desea utilizar VelXYZ de nuevo? Si[1] No[2]: ');
if (Regreso == 1);
VelXYZ30;

else

disp('_____')
disp('*****      Muchas Gracias      *****')
disp('*****              Vel-XYZ              *****')
disp('_____')

end

else

Regreso=input('¿Desea utilizar VelXYZ de nuevo? Si[1] No[2]: ');
if (Regreso == 1);
VelXYZ30;

else

disp('_____')
disp('*****      Muchas Gracias      *****')
disp('*****              Vel-XYZ              *****')
disp('_____')

end
end
case 'No'
%NO#####
```

## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
Graph=input('¿Desea graficar las series de tiempo? Si[1] No[2]: ');
    if Graph==1
TimeS=strcat('SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN:', '',NE);
%////////////////////////////////////
%Coordenada X
figure;

hold on
grid on
zoom on
plot(Epoca,DeltaX,'r. ');
title(TimeS);
xlabel('Época(Años)');
ylabel('Delta Coordenadas(m)');
px = polyfit(Epoca,DeltaX,1);
fx = polyval(px,Epoca);

plot(Epoca,fx,'--k')
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');

    else

    end
Guardar=input('¿Desea guardar los datos? Si[1] No[2]: ');
    if Guardar==1

Encabezado={'ESTACION', 'EPOCA', 'COORDENADA FINAL(m)',...
'VELOCIDAD FINAL(mm/a)', 'DESV EST COORDENADA(m)',...
'DESV EST VELOCIDAD(m)';...
NE,ER,Xaju,Vxaju,Sxi(1,1),Sxi(2,1)};
xlswrite('Resumen de Resultados VelXYZ.xls',Encabezado);

Regreso=input('¿Desea utilizar VelXYZ de nuevo? Si[1] No[2]: ');
if (Regreso == 1);
VelXYZ30;

    else

        disp('_____')
        disp('*****      Muchas Gracias      *****')
        disp('*****              Vel-XYZ              *****')
        disp('_____')

    end
else
Regreso=input('¿Desea utilizar VelXYZ de nuevo? Si[1] No[2]: ');
if (Regreso == 1);
VelXYZ30;

    else

        disp('_____')
        disp('*****      Muchas Gracias      *****')
        disp('*****              Vel-XYZ              *****')
        disp('_____')

    end
end
```

## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
end

end

%AJUSTE
COMPLETO////////////////////////////////////

else
    NE=input('Ingrese el nombre de la estación: ','s');

if isempty(NE)
    msgbox('Error al cargar archivo intente de nuevo')
    NE=input('Ingrese el nombre de la estación nuevamente: ','s');
    disp(' ')
    disp(' ')

        if isempty(NE)
            disp(' ')
            msgbox('Error al cargar archivo DEBE INICIAR EL
PROGRAMA NUEVAMENTE')
            pause
            return

        else
            disp(' ')
            disp('_____')
            disp('* ARCHIVO CARGADO EXITOSAMENTE *')
            disp('* Vel-XYZ *')
            disp('_____')
            disp(' ')
        end

end

end

X=xlsread(NE);
save X

[m,n]=size(X);
NumObser=m;

%CoordenadasXYZ////////////////////////////////////
Ano=X(:,1);
GPSd=X(:,2);%Vector de Dias GPS
VectX=X(:,3);
VectY=X(:,4);
VectZ=X(:,5);

%ESTADÍSTICA
AverageX=mean(VectX);
AverageY=mean(VectY);
AverageZ=mean(VectZ);

MAXx=max(VectX);
MAXy=max(VectY);
MAXz=max(VectZ);

MINx=min(VectX);
```



## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
[m,n]=size(X);
%Épocas para cada dia////////////////////////////////////
for i=1:m;
    Epoca(i,1)=Ano(i,1)+(GPSd(i,1)/365);
    save Epoca;
end

%Vector Deltas tiempo////////////////////////////////////
for w=1:m
    Dt(w,1)=Epoca(w,1)-ER(1,1);
end

%Vectores de Incógnitas////////////////////////////////////
Xo=[AverageX;Vxap];
Yo=[AverageY;Vyap];
Zo=[AverageZ;Vzap];
[EE,JJ]=size(Xo);

%Vector de Observaciones reducidas////////////////////////////////////
elex=(VectX-Xte);
eley=(VectY-Yte);
elez=(VectZ-Zte);

%Matriz de ecuaciones Normales////////////////////////////////////
Nx=transpose(Ax)*Px*Ax;
Ny=transpose(Ay)*Py*Ay;
Nz=transpose(Az)*Pz*Az;

%Membro Absoluto////////////////////////////////////
nx=transpose(Ax)*Px*elex;
ny=transpose(Ay)*Py*eley;
nz=transpose(Az)*Pz*elez;

%Matriz de cofactores////////////////////////////////////
Qxxx=inv(Nx);
Qxxy=inv(Ny);
Qxxz=inv(Nz);

%Vector de Incognitas////////////////////////////////////
x=inv(Nx)*nx;
y=inv(Ny)*ny;
z=inv(Nz)*nz; %#ok<*MINV>

%Vector de Residuos////////////////////////////////////
vx=Ax*x-elex;
vy=Ay*y-eley;
vz=Az*z-elez;

%Controles de Ajuste////////////////////////////////////
%Coordenada X
Xca1=transpose(Ax)*Px*vx;
Xca2=transpose(vx)*Px*vx;
Xca3=-transpose(elex)*Px*vx;
%Coordenada Y
Yca1=transpose(Ay)*Py*vy;
```

## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
Yca2=transpose(vy)*Py*vy;
Yca3=-transpose(eley)*Py*vy;
%Coordenada Z
Zca1=transpose(Az)*Pz*vz;
Zca2=transpose(vz)*Pz*vz;
Zca3=-transpose(elez)*Pz*vz;

%Desviacion estandar de la unidad de pesos////////////////////////////////
gralib=m-EE;
Sox=sqrt(transpose(vx)*Px*vx/gralib);
Soy=sqrt(Yca2/gralib);
Soz=sqrt(Zca2/gralib);

%Vector de Observaciones Ajustadas////////////////////////////////
LxAju=VectX+vx;
LyAju=VectY+vy;
LzAju=VectZ+vz;

%Varianzas de las incognitas////////////////////////////////
VarX=diag(Qxxx);
Ecoordx=sqrt(VarX(1,1));%en m
Evelx=sqrt(VarX(2,1));%en m

VarY=diag(Qxxy);
Ecoordy=sqrt(VarY(1,1));%en m
Evely=sqrt(VarY(2,1));%en m

VarZ=diag(Qxxz);
Ecoordz=sqrt(VarZ(1,1));%en m
Evelz=sqrt(VarZ(2,1));%en m

choice=questdlg('¿Desea Visualizar los Resultados?','Mostrar
Resultados','Si','No','Cancel');

switch choice
    case 'Si'

%////////////////////////////////////////
%DATOS DE SALIDA
%////////////////////////////////////////
disp(' ')
disp('_____')
disp('*****VEL-XYZ*****')
disp('_____')
disp('          ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE VELOCIDAD PARA          ')
disp('          ESTACIONES GNSS DE MEDICION CONTINUAS                      ')
disp('-----')
disp('          RESULTADOS                                                  ')
disp('_____')
disp('1. INFORMACIÓN GENERAL                                               ')
disp('_____')
fprintf('ESTACIÓN AJUSTADA:           %4s\n',NE)
fprintf('ÉPOCA DE REFERENCIA (años):     %10.2f\n',ER)
fprintf('TOTAL DE DATOS PROCESADOS (DÍAS): %10.0f\n',m)
fprintf('EPOCAS INICIAL/FINAL:          %4.2f / %4.2f\n',EpocaInicial,EpocaFinal)
disp(' ')
```



## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
grid on
zoom on

plot(Epoca,DeltaY,'g. ');
title(TimeS);
xlabel('Época(Años)');
ylabel('Delta Coordenadas Y(m)');
py = polyfit(Epoca,DeltaY,1);
fy = polyval(py,Epoca);

plot(Epoca,fy,'--k')
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Coordenada Z
figure;

hold on
grid on
zoom on
plot(Epoca,DeltaZ,'y. ');
title(TimeS);
xlabel('Época(Años)');
ylabel('Delta Coordenadas Z(m)');
pz = polyfit(Epoca,DeltaZ,1);
fz = polyval(pz,Epoca);

grid on
zoom on
plot(Epoca,fz,'--k')
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');

    else

    end

Guardar=input('¿Desea guardar los datos? Si[1] No[2]: ');
    if Guardar==1

Encabezado={'ESTACION', 'EPOCA', 'COORDENADA Xo(m)', 'COORDENADA Yo(m)', ...
    'COORDENADA Zo(m)', 'VELOCIDAD Xo(mm/a)', 'VELOCIDAD Yo(mm/a)', ...
    'VELOCIDAD Zo(mm/a)', 'DESV EST X(m)', 'DESV EST Y(m)', 'DESV EST Z(m)', ...
    'DESV EST VELOCIDAD X(m)', 'DESV EST VELOCIDAD Y(m)', ...
    'DESV EST VELOCIDAD Z(m)',; ...
    NE,ER,Xsolu(1,1),Ysolu(1,1),Zsolu(1,1),Xsolu(2,1),Ysolu(2,1), ...
    Zsolu(2,1),sqrt(VarX(1,1)),sqrt(VarY(1,1)),sqrt(VarZ(1,1)), ...
    sqrt(VarX(2,1)),sqrt(VarY(2,1)),sqrt(VarZ(2,1))};
    xlswrite('Resumen de Resultados VelXYZ.xls',Encabezado);

    Regreso=input('¿Desea utilizar VelXYZ de nuevo? Si[1] No[2]: ');
    if (Regreso == 1);
    VelXYZ30;

    else

        disp('_____')
```

## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
disp('*****      Muchas Gracias      *****')
disp('*****              Vel-XYZ              *****')
disp('_____')

end

else
    Regreso=input('¿Desea utilizar VelXYZ de nuevo? Si[1] No[2]: ');
    if (Regreso == 1);
        VelXYZ30;

        else
            disp('_____')
            disp('*****      Muchas Gracias      *****')
            disp('*****              Vel-XYZ              *****')
            disp('_____')

        end
    end

    case 'No'

        %NO#####
        Graph=input('¿Desea graficar las series de tiempo? Si[1] No[2]: ');
        if Graph==1

            TimeS=strcat('SERIE DE TIEMPO - ESTACIÓN:', '',NE);
            %////////////////////////////////////
            %Coordenada X
            figure;

            hold on
            grid on
            zoom on

            plot(Epoca,DeltaX,'r.');
            title(TimeS);
            xlabel('Época(Años)');
            ylabel('Delta Coordenadas X(m)');
            px = polyfit(Epoca,DeltaX,1);
            fx = polyval(px,Epoca);

            plot(Epoca,fx,'--k')
            set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');

            %////////////////////////////////////
            %Coordenada Y
            figure;

            hold on
```

## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
grid on
zoom on

plot(Epoca,DeltaY,'g. ');
title(TimeS);
xlabel('Época(Años)');
ylabel('Delta Coordenadas Y(m)');
py = polyfit(Epoca,DeltaY,1);
fy = polyval(py,Epoca);

plot(Epoca,fy,'--k')
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Coordenada Z
figure;

hold on
grid on
zoom on
plot(Epoca,DeltaZ,'y. ');
title(TimeS);
xlabel('Época(Años)');
ylabel('Delta Coordenadas Z(m)');
pz = polyfit(Epoca,DeltaZ,1);
fz = polyval(pz,Epoca);

grid on
zoom on
plot(Epoca,fz,'--k')
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');

    else

    end

Guardar=input('¿Desea guardar los datos? Si[1] No[2]: ');
    if Guardar==1

Encabezado={'ESTACION', 'COORDENADA Xo(m)', 'COORDENADA Yo(m)',...
    'COORDENADA Zo(m)', 'VELOCIDAD Xo(mm/a)', 'VELOCIDAD Yo(mm/a)',...
    'VELOCIDAD Zo(mm/a)', 'DESV EST X', 'DESV EST Y', 'DESV EST Z',...
    'DESV EST VELOCIDAD X', 'DESV EST VELOCIDAD Y',...
    'DESV EST VELOCIDAD Z',;...
    NE,Xsolu(1,1),Ysolu(1,1),Zsolu(1,1),Xsolu(2,1),Ysolu(2,1),...
    Zsolu(2,1),sqrt(VarX(1,1)),sqrt(VarY(1,1)),sqrt(VarZ(1,1)),...
    sqrt(VarX(2,1)),sqrt(VarY(2,1)),sqrt(VarZ(2,1))};
    xlswrite('Resumen de Resultados VelXYZ.xls',Encabezado);

    Regreso=input('¿Desea utilizar VelXYZ de nuevo? Si[1] No[2]: ');
    if (Regreso == 1);
    VelXYZ30;

    else

        disp('_____')
```

## Anexo 8 Código de programación VelXYZ

```
disp('*****      Muchas Gracias      *****')
disp('*****              Vel-XYZ              *****')
disp('_____')

end
else
Regreso=input('¿Desea utilizar VelXYZ de nuevo? Si[1] No[2]: ');
if (Regreso == 1);
VelXYZ30;
else
disp('_____')
disp('*****      Muchas Gracias      *****')
disp('*****              Vel-XYZ              *****')
disp('_____')

end
end
end
end
```

## Anexo 9 Ejemplo de formato de entrada para la rutina Cha-Gru

	Dia GPS	X	Y	Z	dX	dY	dZ
2013	1	2876851.0037	-5379084.6744	1857712.4495	0.0017	0.0021	0.0009
2013	2	2876850.9898	-5379084.6737	1857712.4474	0.0017	0.0022	0.0009
2013	3	2876850.9878	-5379084.6698	1857712.4490	0.0017	0.0022	0.0009
2013	4	2876850.9874	-5379084.6726	1857712.4493	0.0017	0.0021	0.0008
2013	5	2876850.9857	-5379084.6759	1857712.4480	0.0017	0.0021	0.0009
2013	6	2876850.9869	-5379084.6795	1857712.4520	0.0018	0.0022	0.0009
2013	7	2876850.9882	-5379084.6946	1857712.4509	0.0018	0.0022	0.0009
2013	8	2876850.9811	-5379084.6689	1857712.4416	0.0017	0.0021	0.0008
2013	9	2876850.9899	-5379084.6739	1857712.4477	0.0018	0.0023	0.0009
2013	10	2876850.9898	-5379084.6890	1857712.4533	0.0018	0.0023	0.0009
2013	11	2876851.0036	-5379084.6778	1857712.4472	0.0017	0.0021	0.0009
2013	12	2876851.0000	-5379084.6791	1857712.4491	0.0017	0.0021	0.0008
2013	13	2876850.9760	-5379084.6704	1857712.4473	0.0017	0.0021	0.0009
2013	14	2876850.9735	-5379084.6631	1857712.4455	0.0017	0.0021	0.0008
2013	15	2876850.9780	-5379084.6621	1857712.4423	0.0017	0.0021	0.0008
2013	16	2876850.9918	-5379084.6700	1857712.4448	0.0017	0.0021	0.0008
2013	17	2876850.9969	-5379084.6816	1857712.4515	0.0018	0.0022	0.0009
2013	18	2876850.9901	-5379084.6657	1857712.4445	0.0017	0.0021	0.0008
2013	19	2876850.9878	-5379084.6665	1857712.4468	0.0017	0.0021	0.0008
2013	20	2876850.9873	-5379084.6840	1857712.4421	0.0017	0.0021	0.0008
2013	21	2876850.9815	-5379084.6557	1857712.4399	0.0017	0.0021	0.0008
2013	22	2876850.9863	-5379084.6580	1857712.4406	0.0017	0.0022	0.0009
2013	23	2876850.9851	-5379084.6593	1857712.4413	0.0017	0.0022	0.0009
2013	24	2876850.9869	-5379084.6673	1857712.4444	0.0017	0.0021	0.0008
2013	25	2876851.0007	-5379084.6731	1857712.4448	0.0017	0.0021	0.0008
2013	26	2876850.9980	-5379084.6740	1857712.4464	0.0017	0.0022	0.0009
2013	27	2876850.9983	-5379084.6713	1857712.4467	0.0017	0.0021	0.0008
2013	28	2876850.9994	-5379084.6830	1857712.4513	0.0017	0.0021	0.0008
2013	29	2876851.0023	-5379084.6807	1857712.4445	0.0017	0.0021	0.0009
2013	30	2876850.9970	-5379084.6746	1857712.4441	0.0017	0.0021	0.0008
2013	31	2876851.0095	-5379084.6837	1857712.4477	0.0017	0.0021	0.0008
2013	32	2876850.9983	-5379084.6692	1857712.4409	0.0017	0.0021	0.0008
2013	33	2876851.0010	-5379084.6668	1857712.4457	0.0016	0.0021	0.0008
2013	34	2876850.9990	-5379084.6670	1857712.4441	0.0016	0.0021	0.0008
2013	35	2876851.0005	-5379084.6640	1857712.4431	0.0017	0.0021	0.0008
2013	36	2876851.0012	-5379084.6651	1857712.4422	0.0017	0.0022	0.0008
2013	37	2876850.9955	-5379084.6664	1857712.4441	0.0017	0.0021	0.0008
2013	38	2876851.0009	-5379084.6664	1857712.4447	0.0017	0.0021	0.0008

## Anexo 10 Parte de coordenadas depuradas - Estacion BGGY

### BGGY

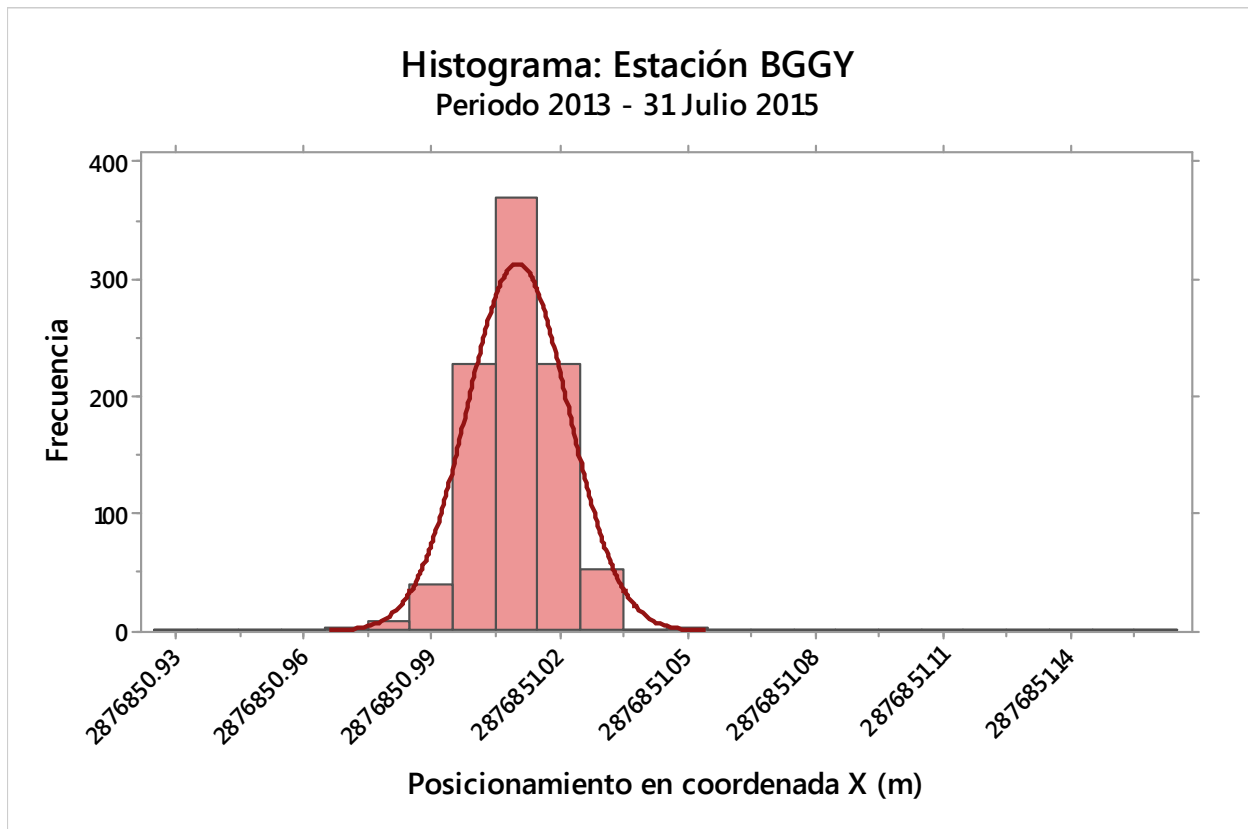
Día GPS	X	Y	Z	dX	dY	dZ
1	2876851.0037	-5379084.6744	1857712.4495	0.0017	0.0021	0.0009
2	2876850.9898	-5379084.6737	1857712.4474	0.0017	0.0022	0.0009
3	2876850.9878	-5379084.6698	1857712.4490	0.0017	0.0022	0.0009
4	2876850.9874	-5379084.6726	1857712.4493	0.0017	0.0021	0.0008
5	2876850.9857	-5379084.6759	1857712.4480	0.0017	0.0021	0.0009
6	2876850.9869	-5379084.6795	1857712.4520	0.0018	0.0022	0.0009
7	2876850.9882	-5379084.6946	1857712.4509	0.0018	0.0022	0.0009
8	2876850.9811	-5379084.6689	1857712.4416	0.0017	0.0021	0.0008
9	2876850.9899	-5379084.6739	1857712.4477	0.0018	0.0023	0.0009
10	2876850.9898	-5379084.6890	1857712.4533	0.0018	0.0023	0.0009
11	2876851.0036	-5379084.6778	1857712.4472	0.0017	0.0021	0.0009
12	2876851.0000	-5379084.6791	1857712.4491	0.0017	0.0021	0.0008
13	2876850.9760	-5379084.6704	1857712.4473	0.0017	0.0021	0.0009
14	2876850.9735	-5379084.6631	1857712.4455	0.0017	0.0021	0.0008
15	2876850.9780	-5379084.6621	1857712.4423	0.0017	0.0021	0.0008
16	2876850.9918	-5379084.6700	1857712.4448	0.0017	0.0021	0.0008
17	2876850.9969	-5379084.6816	1857712.4515	0.0018	0.0022	0.0009
18	2876850.9901	-5379084.6657	1857712.4445	0.0017	0.0021	0.0008
19	2876850.9878	-5379084.6665	1857712.4468	0.0017	0.0021	0.0008
20	2876850.9873	-5379084.6840	1857712.4421	0.0017	0.0021	0.0008
21	2876850.9815	-5379084.6557	1857712.4399	0.0017	0.0021	0.0008
22	2876850.9863	-5379084.6580	1857712.4406	0.0017	0.0022	0.0009
23	2876850.9851	-5379084.6593	1857712.4413	0.0017	0.0022	0.0009
24	2876850.9869	-5379084.6673	1857712.4444	0.0017	0.0021	0.0008
25	2876851.0007	-5379084.6731	1857712.4448	0.0017	0.0021	0.0008
26	2876850.9980	-5379084.6740	1857712.4464	0.0017	0.0022	0.0009
27	2876850.9983	-5379084.6713	1857712.4467	0.0017	0.0021	0.0008
28	2876850.9994	-5379084.6830	1857712.4513	0.0017	0.0021	0.0008
29	2876851.0023	-5379084.6807	1857712.4445	0.0017	0.0021	0.0009
30	2876850.9970	-5379084.6746	1857712.4441	0.0017	0.0021	0.0008
31	2876851.0095	-5379084.6837	1857712.4477	0.0017	0.0021	0.0008
32	2876850.9983	-5379084.6692	1857712.4409	0.0017	0.0021	0.0008
33	2876851.0010	-5379084.6668	1857712.4457	0.0016	0.0021	0.0008

## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### BGGY

\*\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*\*

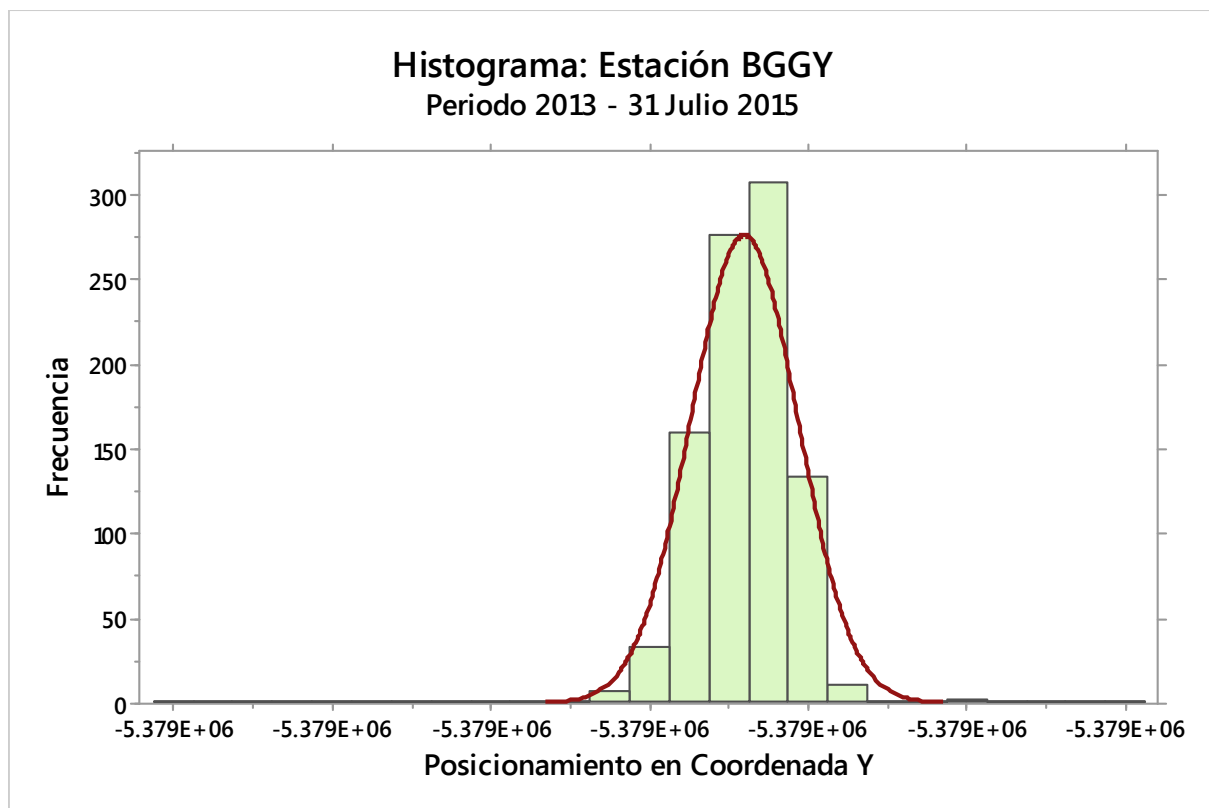
TOTAL DE DATOS : 935  
PROMEDIO : 2876851.01033  
VARIANZA : 0.00014  
DESV. ESTANDAR : 0.01192  
VALOR MÁXIMO : 2876851.16100  
VALOR MÍNIMO : 2876850.93300  
COVARIANZA : 0.00014  
RANGO : 0.22800  
CURTOSIS : 36.55845  
OBLICUIDAD : 2.49902



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

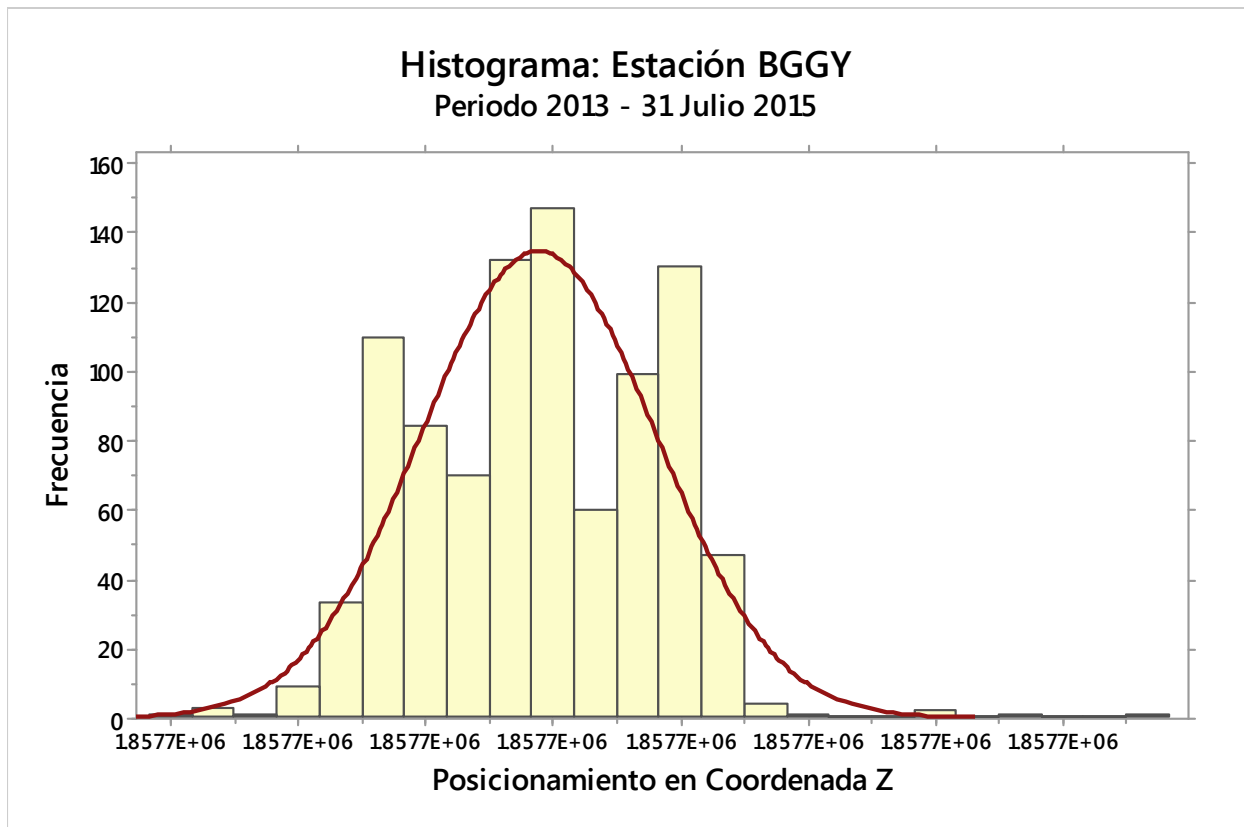
TOTAL DE DATOS : 935  
PROMEDIO : -5379084.65614  
VARIANZA : 0.00018  
DESV. ESTANDAR : 0.01350  
VALOR MÁXIMO : -5379084.55800  
VALOR MÍNIMO : -5379084.80400  
COVARIANZA : 0.00018  
RANGO : 0.24600  
CURTOSIS : 25.12783  
OBLICUIDAD : -0.87363



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 935  
PROMEDIO : 1857712.46338  
VARIANZA : 0.00019  
DESV. ESTANDAR : 0.01385  
VALOR MÁXIMO : 1857712.53700  
VALOR MÍNIMO : 1857712.42100  
COVARIANZA : 0.00019  
RANGO : 0.11600  
CURTOSIS : 3.25278  
OBLICUIDAD : 0.12894

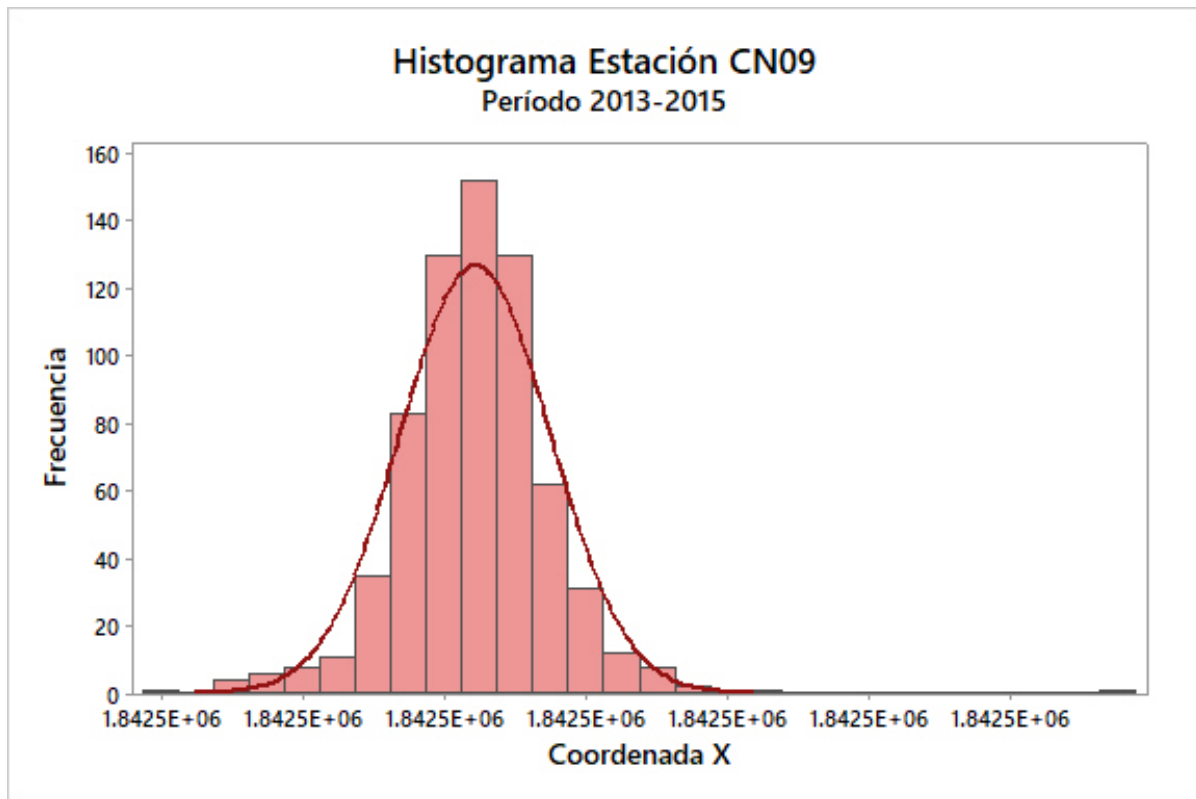


# Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

## CN09

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

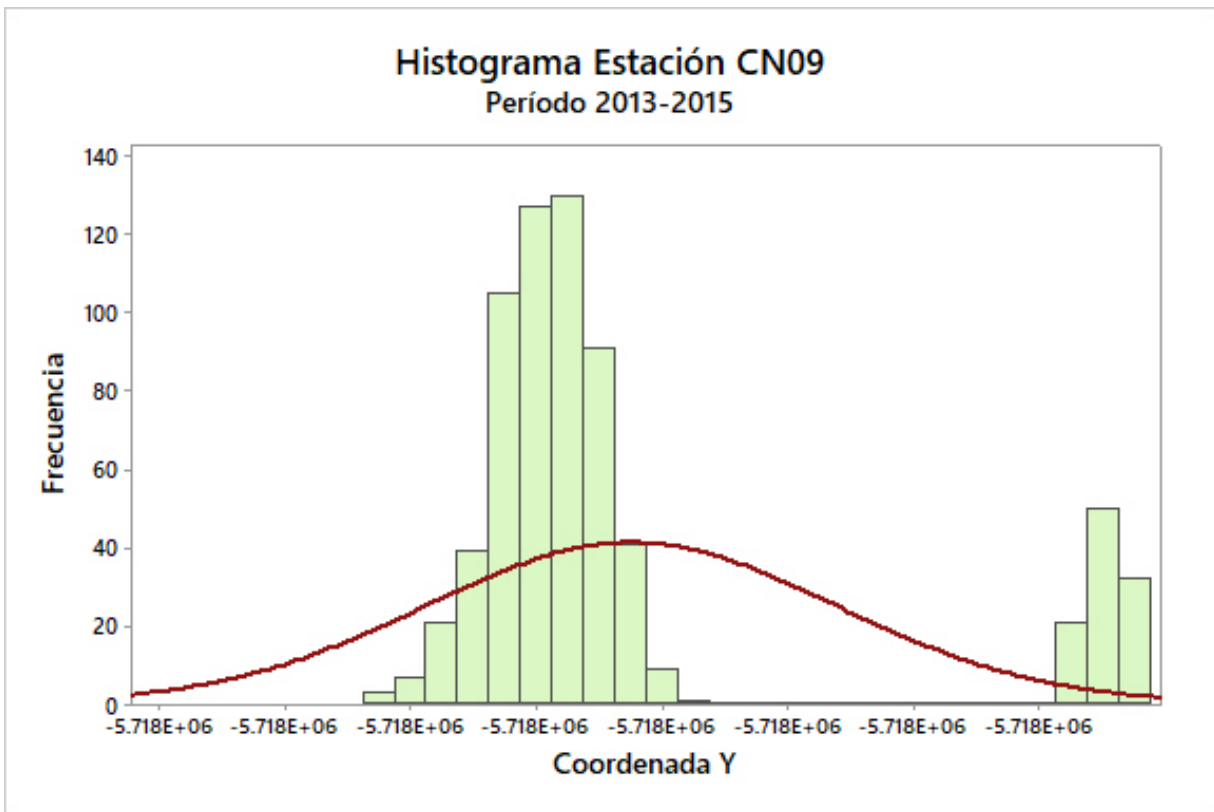
TOTAL DE DATOS : 677  
PROMEDIO : 1842488.81723  
VARIANZA : 0.00003  
DESV. ESTANDAR : 0.00532  
VALOR MÁXIMO : 1842488.86200  
VALOR MÍNIMO : 1842488.79600  
COVARIANZA : 0.00003  
RANGO : 0.06600  
CURTOSIS : 11.04200  
OBLICUIDAD : 0.65480



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

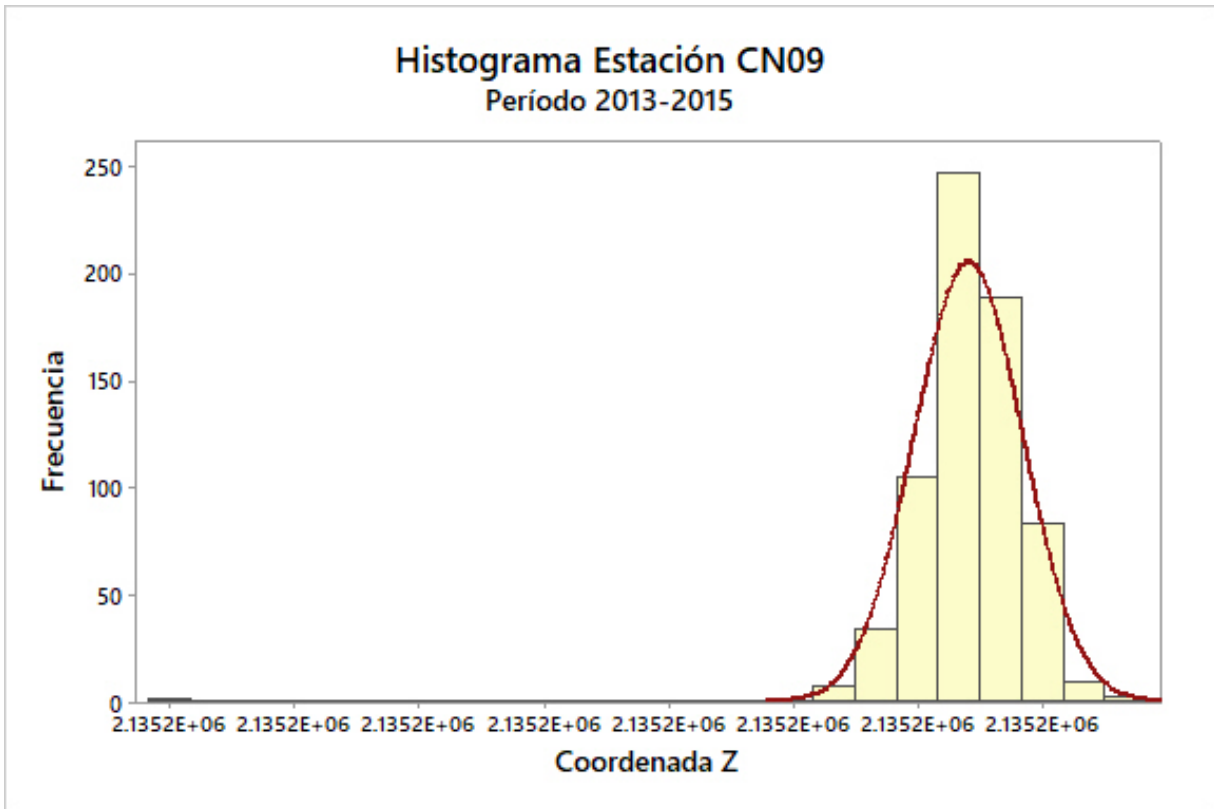
TOTAL DE DATOS : 677  
PROMEDIO : -5718038.82992  
VARIANZA : 0.00108  
DESV. ESTANDAR : 0.03285  
VALOR MÁXIMO : -5718038.74900  
VALOR MÍNIMO : -5718038.87000  
COVARIANZA : 0.00108  
RANGO : 0.12100  
CURTOSIS : 4.36156  
OBLICUIDAD : 1.72184



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 677  
PROMEDIO : 2135177.12126  
VARIANZA : 0.00004  
DESV. ESTANDAR : 0.00660  
VALOR MÁXIMO : 2135177.13900  
VALOR MÍNIMO : 2135177.02700  
COVARIANZA : 0.00004  
RANGO : 0.11200  
CURTOSIS : 63.10955  
OBLICUIDAD : -4.35635

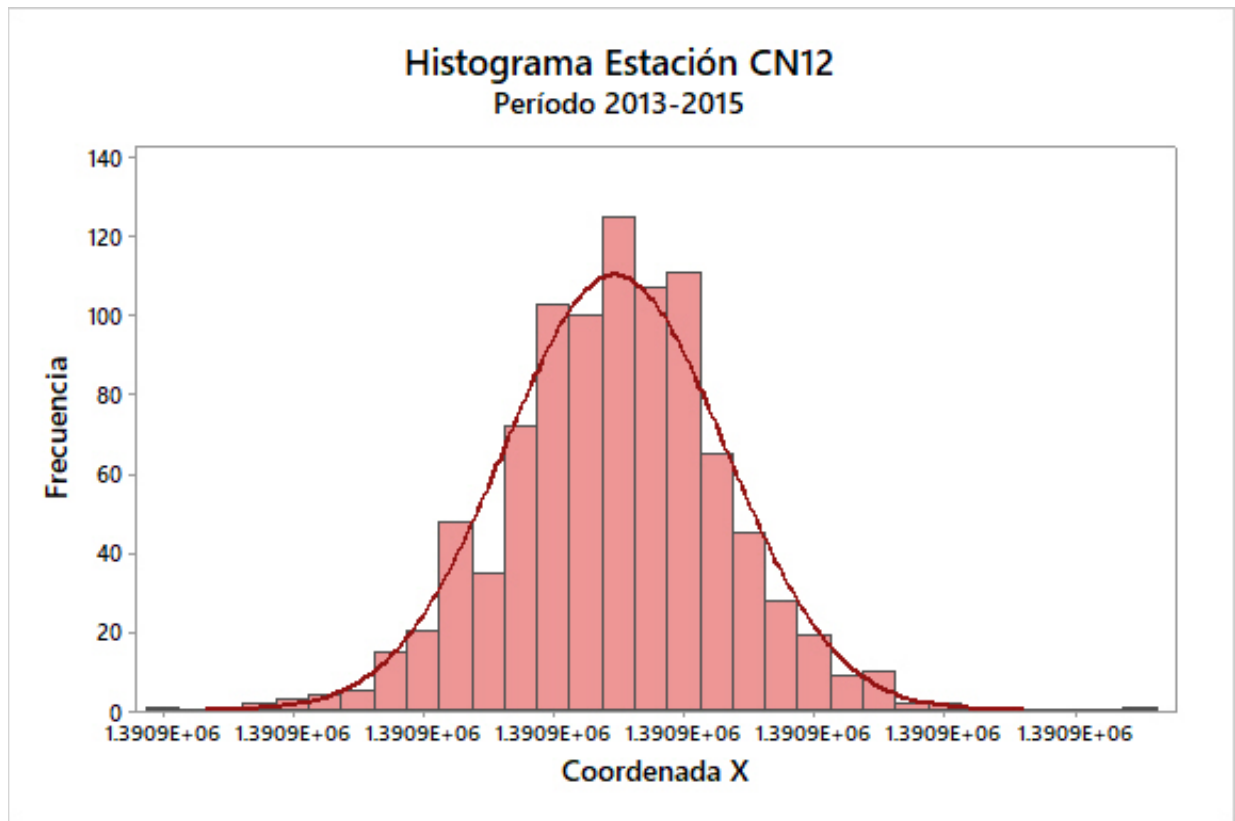


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### CN12

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

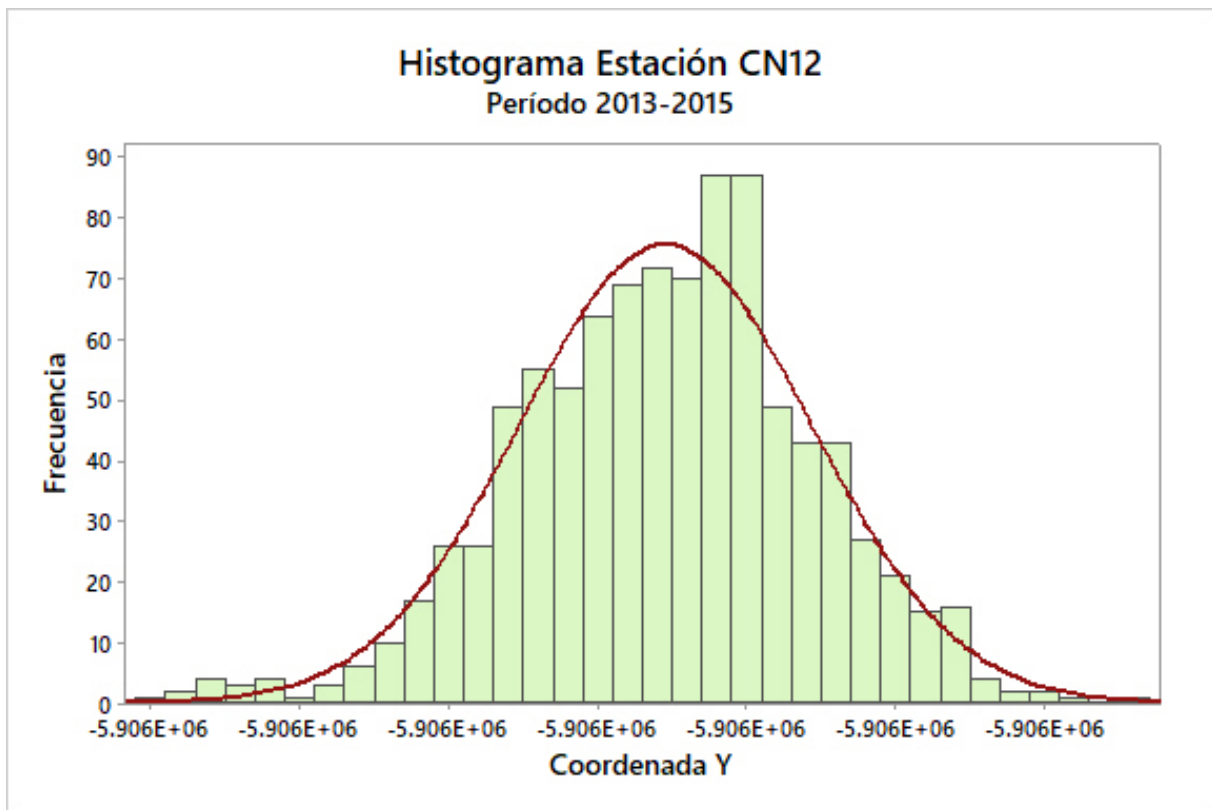
TOTAL DE DATOS : 932  
PROMEDIO : 1390866.63980  
VARIANZA : 0.00007  
DESV. ESTANDAR : 0.00845  
VALOR MÁXIMO : 1390866.68100  
VALOR MÍNIMO : 1390866.60600  
COVARIANZA : 0.00007  
RANGO : 0.07500  
CURTOSIS : 3.83574  
OBLICUIDAD : -0.02262



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

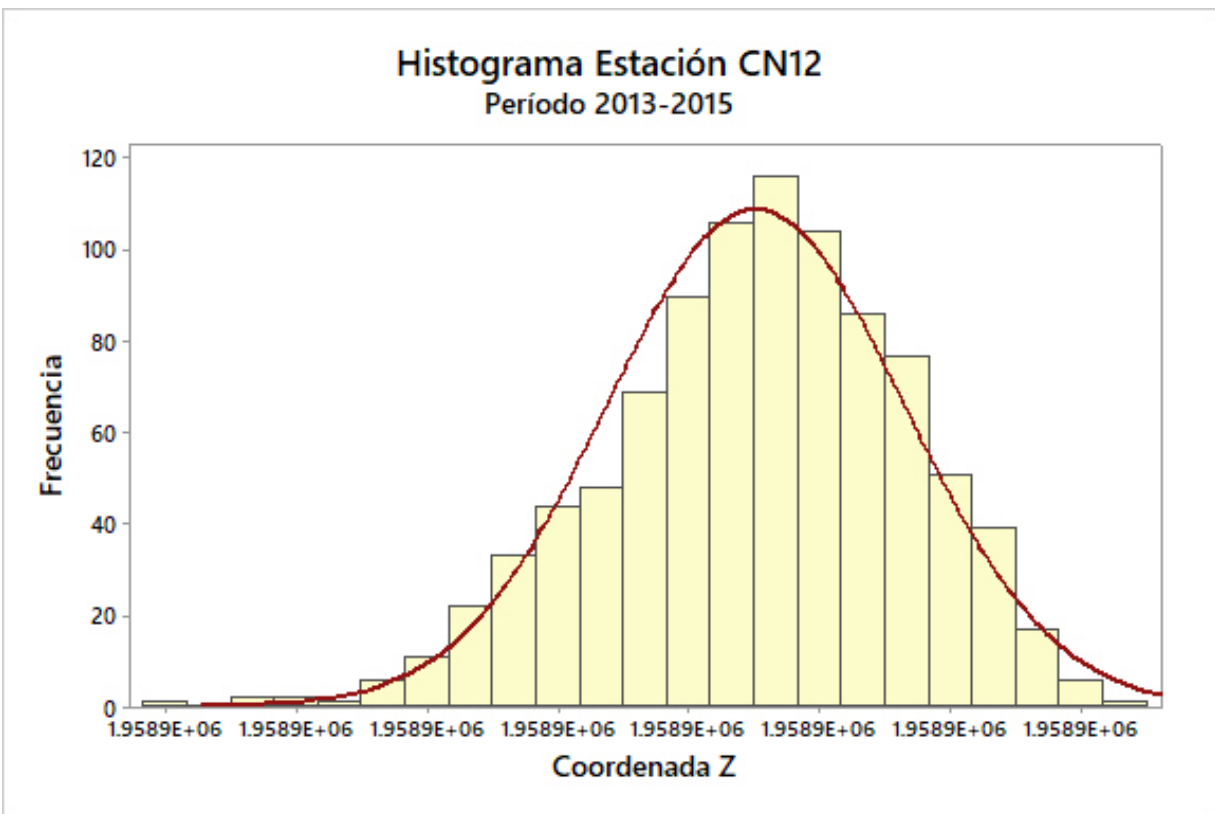
TOTAL DE DATOS : 932  
PROMEDIO : -5906361.37437  
VARIANZA : 0.00015  
DESV. ESTANDAR : 0.01228  
VALOR MÁXIMO : -5906361.33500  
VALOR MÍNIMO : -5906361.41600  
COVARIANZA : 0.00015  
RANGO : 0.08100  
CURTOSIS : 3.36490  
OBLICUIDAD : -0.25298



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 932  
PROMEDIO : 1958908.76715  
VARIANZA : 0.00005  
DESV. ESTANDAR : 0.00683  
VALOR MÁXIMO : 1958908.78300  
VALOR MÍNIMO : 1958908.74000  
COVARIANZA : 0.00005  
RANGO : 0.04300  
CURTOSIS : 2.99206  
OBLICUIDAD : -0.36246

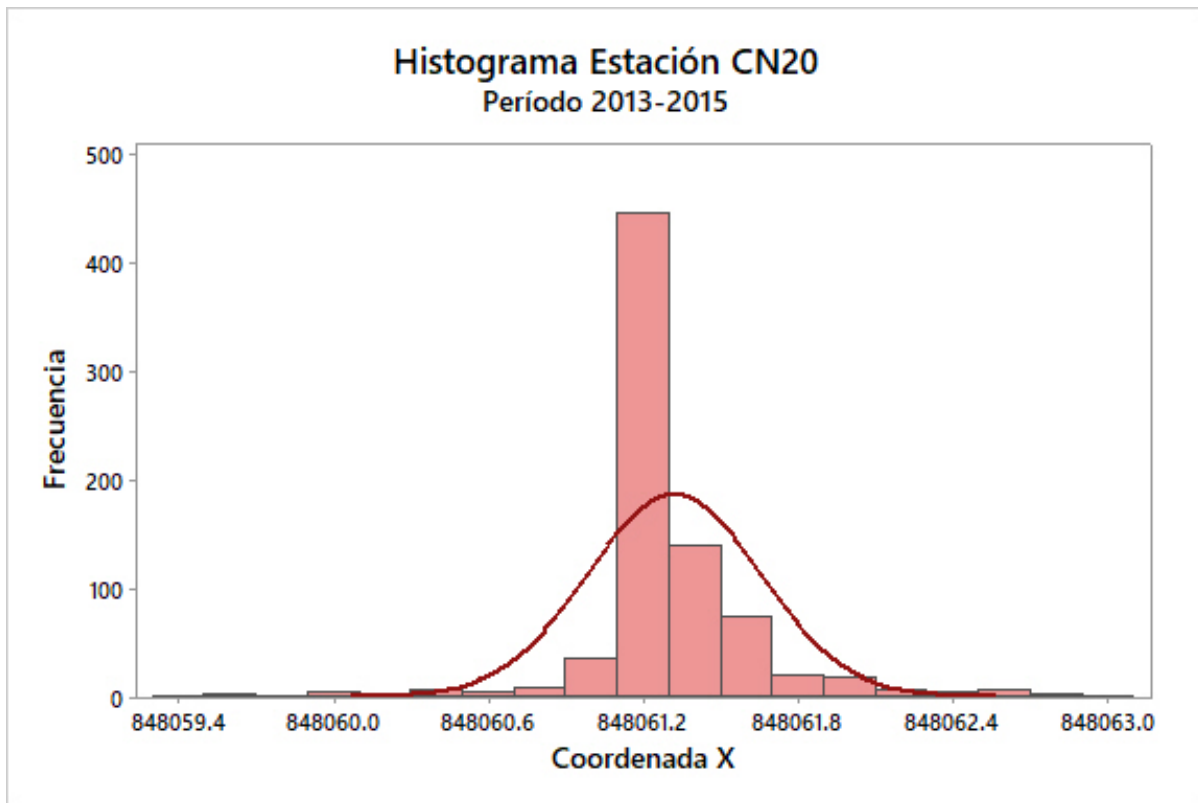


# Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

## CN20

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 787  
PROMEDIO : 848061.32114  
VARIANZA : 0.11347  
DESV. ESTANDAR : 0.33685  
VALOR MÁXIMO : 848063.02330  
VALOR MÍNIMO : 848059.33010  
COVARIANZA : 0.11347  
RANGO : 3.69320  
CURTOSIS : 11.27642  
OBLICUIDAD : 0.18986

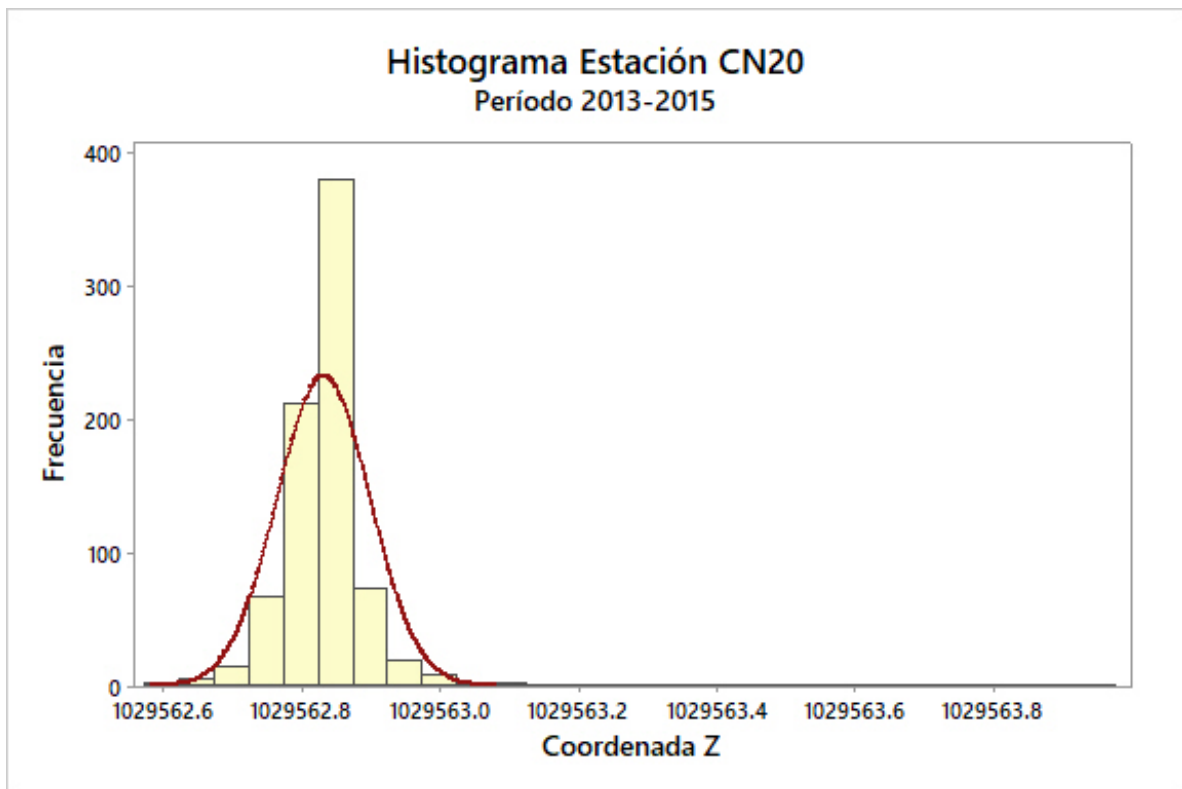




## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 787  
PROMEDIO : 1029562.83349  
VARIANZA : 0.00455  
DESV. ESTANDAR : 0.06742  
VALOR MÁXIMO : 1029563.97000  
VALOR MÍNIMO : 1029562.58600  
COVARIANZA : 0.00455  
RANGO : 1.38400  
CURTOSIS : 105.90748  
OBLICUIDAD : 6.19500

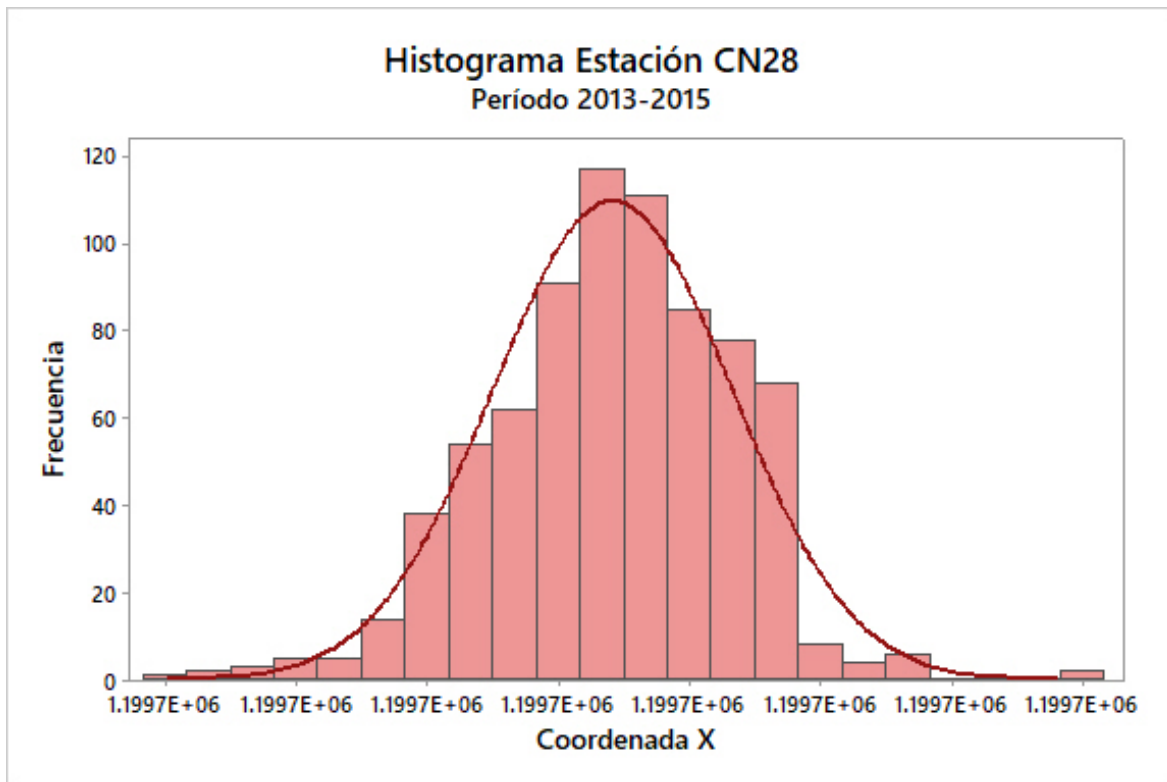


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### CN28

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

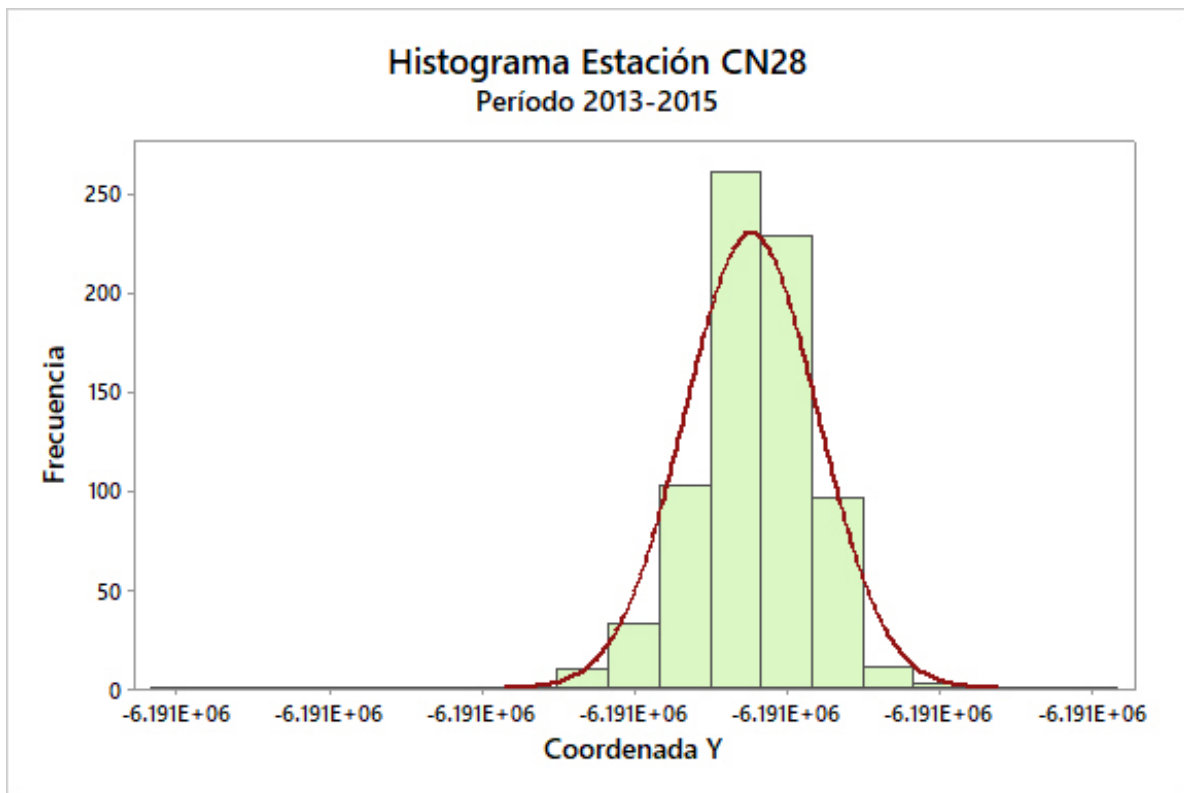
TOTAL DE DATOS : 754  
PROMEDIO : 1199694.64131  
VARIANZA : 0.00019  
DESV. ESTANDAR : 0.01369  
VALOR MÁXIMO : 1199694.69800  
VALOR MÍNIMO : 1199694.59100  
COVARIANZA : 0.00019  
RANGO : 0.10700  
CURTOSIS : 3.72149  
OBLICUIDAD : -0.20173



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

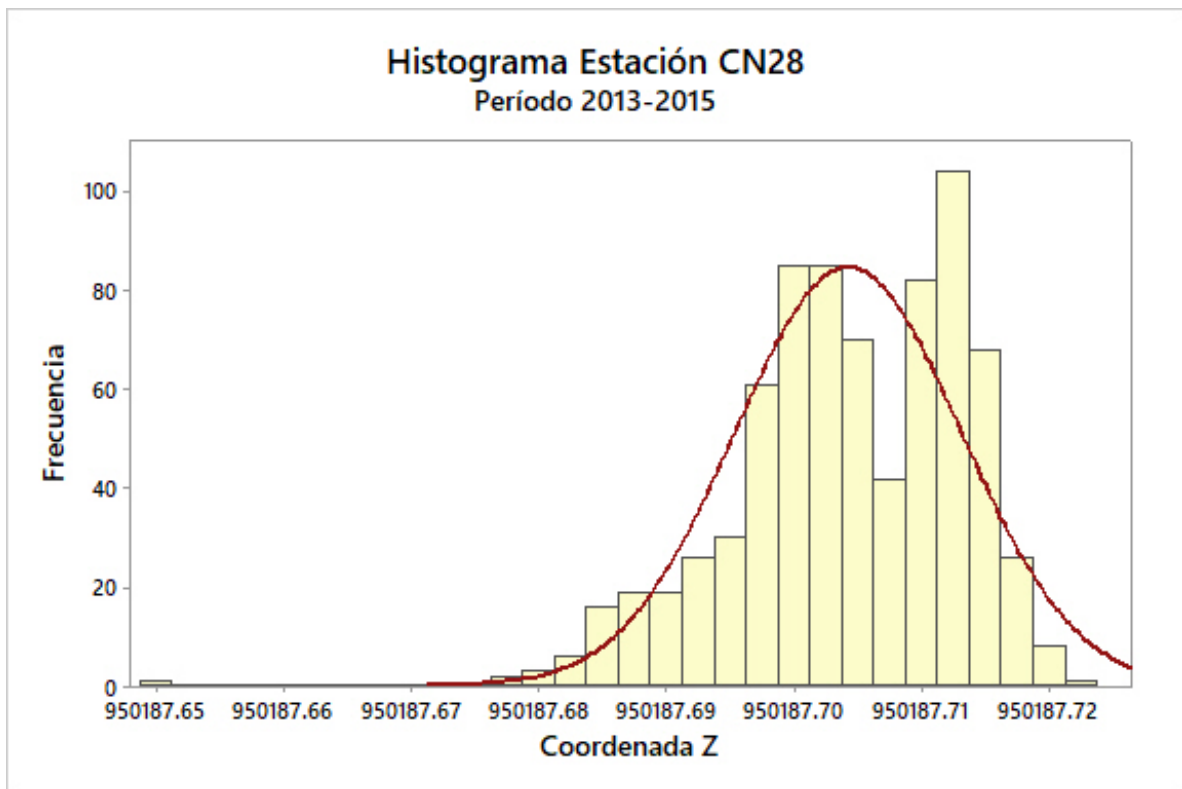
TOTAL DE DATOS : 754  
PROMEDIO : -6191344.98697  
VARIANZA : 0.00017  
DESV. ESTANDAR : 0.01304  
VALOR MÁXIMO : -6191344.92200  
VALOR MÍNIMO : -6191345.10100  
COVARIANZA : 0.00017  
RANGO : 0.17900  
CURTOSIS : 13.64131  
OBLICUIDAD : -1.22496



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 754  
PROMEDIO : 950187.70427  
VARIANZA : 0.00008  
DESV. ESTANDAR : 0.00887  
VALOR MÁXIMO : 950187.72220  
VALOR MÍNIMO : 950187.65110  
COVARIANZA : 0.00008  
RANGO : 0.07110  
CURTOSIS : 4.16744  
OBLICUIDAD : -0.74105

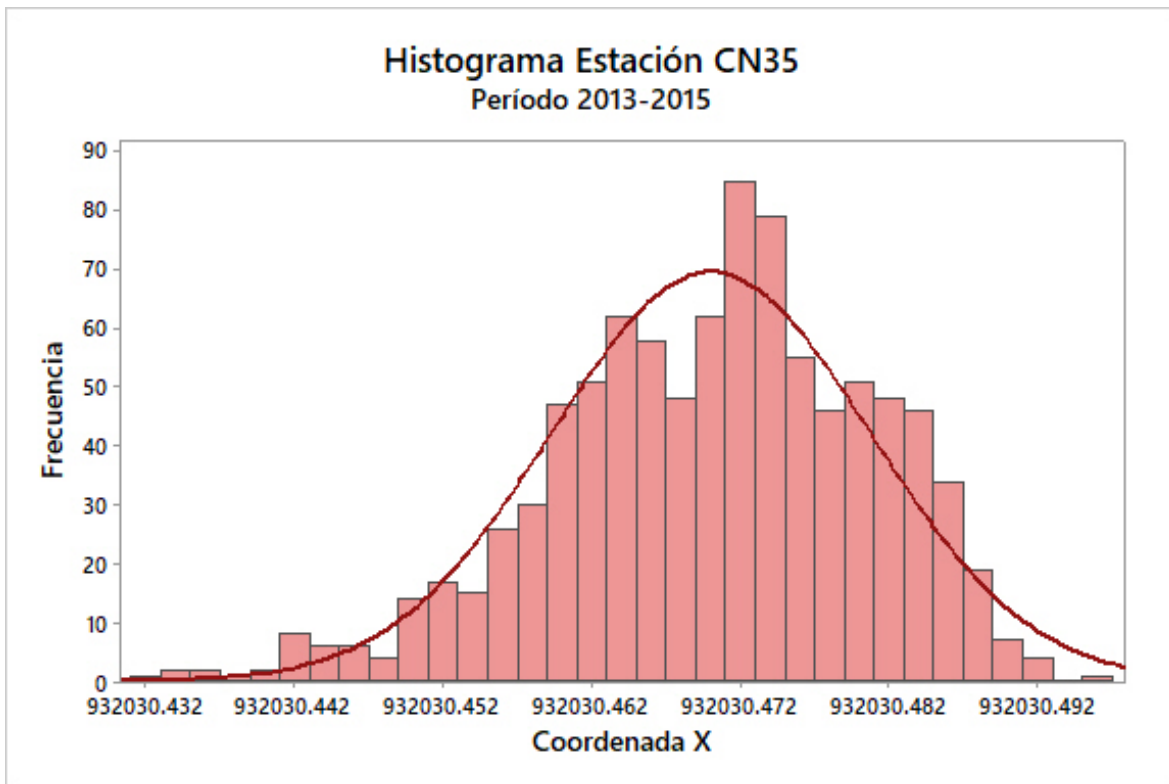


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### CN35

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 937  
PROMEDIO : 932030.47002  
VARIANZA : 0.00012  
DESV. ESTANDAR : 0.01075  
VALOR MÁXIMO : 932030.49650  
VALOR MÍNIMO : 932030.43170  
COVARIANZA : 0.00012  
RANGO : 0.06480  
CURTOSIS : 3.14513  
OBLICUIDAD : -0.47534

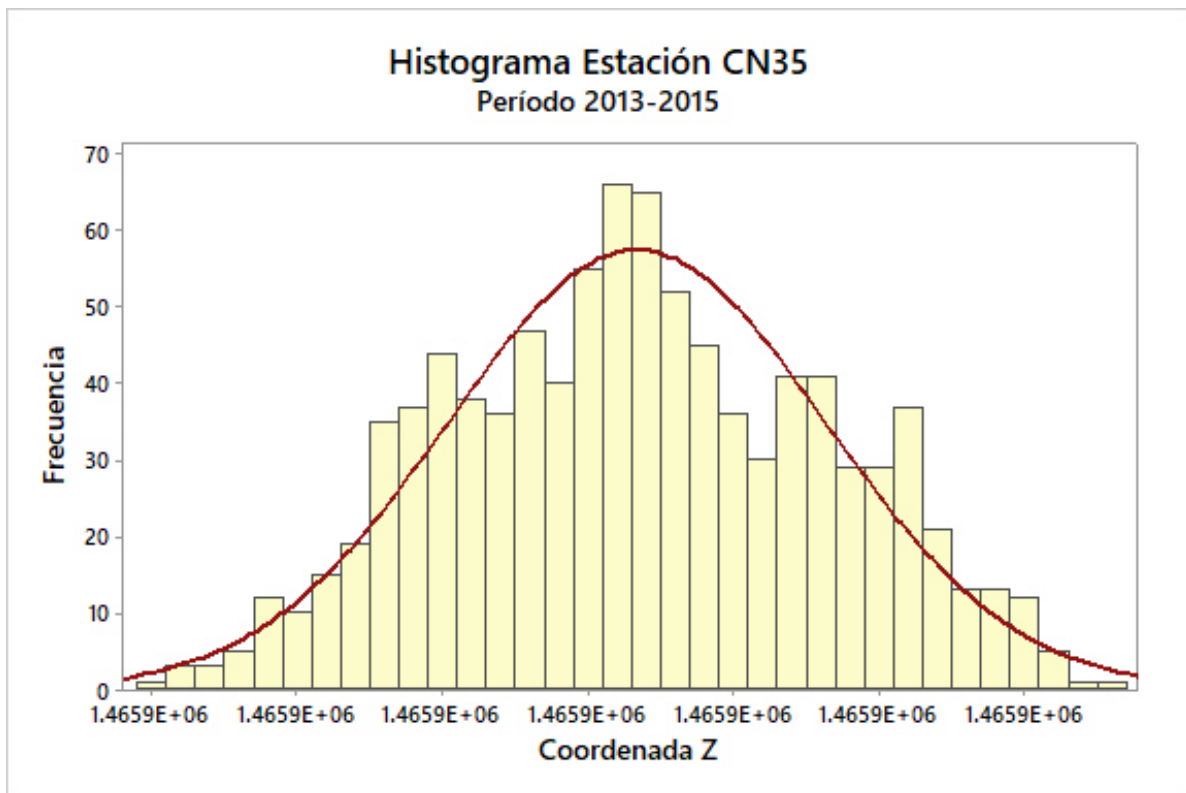




## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 937  
PROMEDIO : 1465862.49472  
VARIANZA : 0.00004  
DESV. ESTANDAR : 0.00651  
VALOR MÁXIMO : 1465862.51100  
VALOR MÍNIMO : 1465862.47800  
COVARIANZA : 0.00004  
RANGO : 0.03300  
CURTOSIS : 2.37565  
OBLICUIDAD : 0.04188

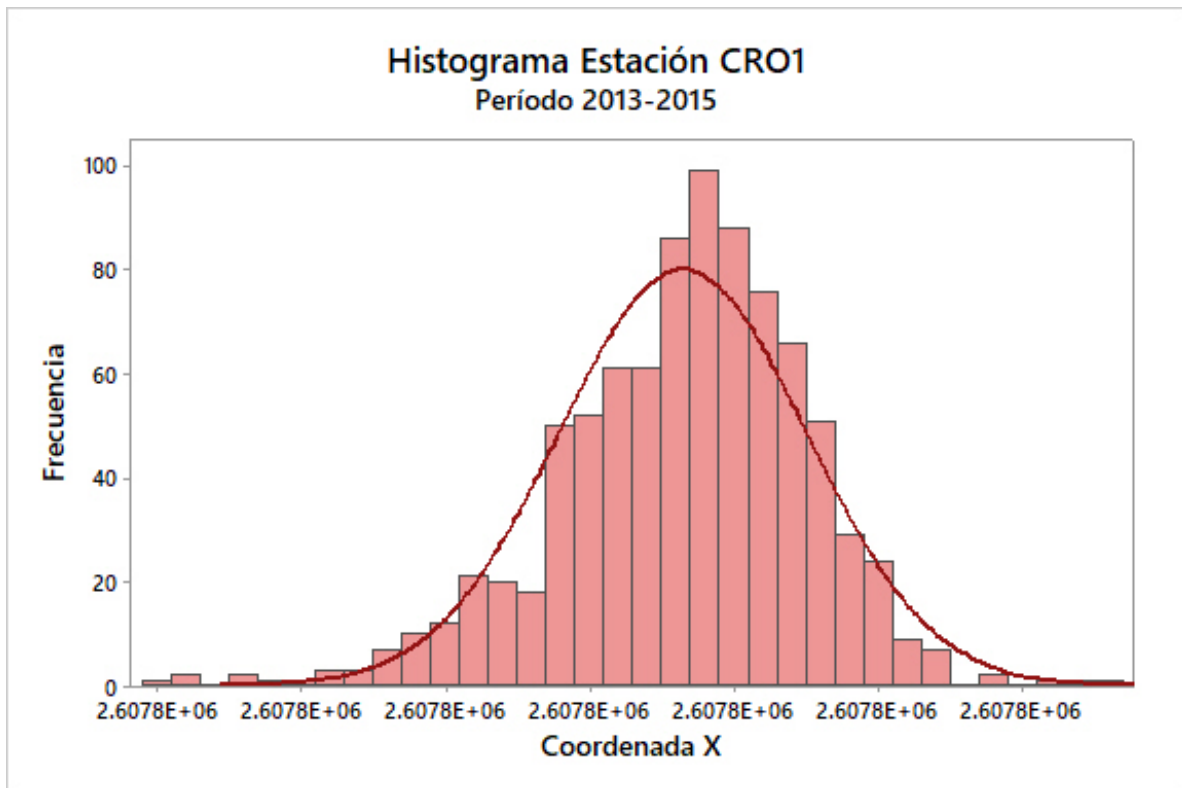


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### CRO1

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

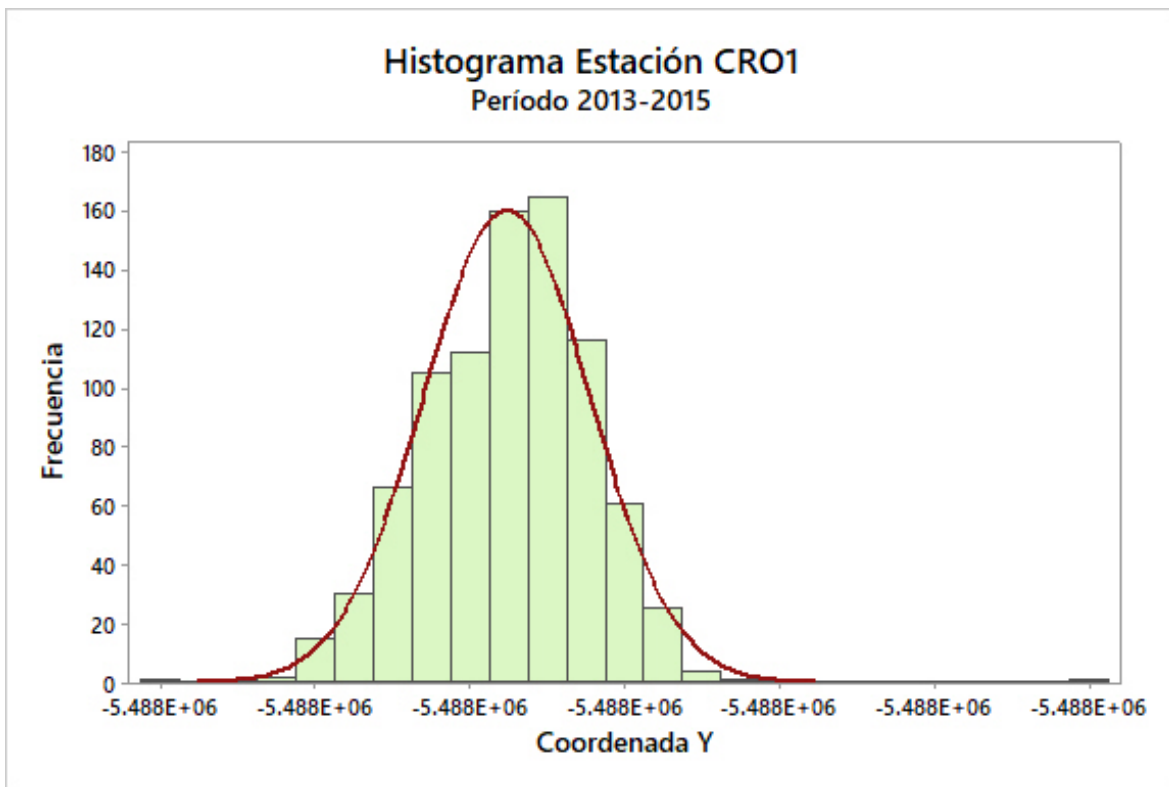
TOTAL DE DATOS : 865  
PROMEDIO : 2607771.28453  
VARIANZA : 0.00007  
DESV. ESTANDAR : 0.00862  
VALOR MÁXIMO : 2607771.31400  
VALOR MÍNIMO : 2607771.24700  
COVARIANZA : 0.00007  
RANGO : 0.06700  
CURTOSIS : 4.13372  
OBLICUIDAD : -0.57610



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

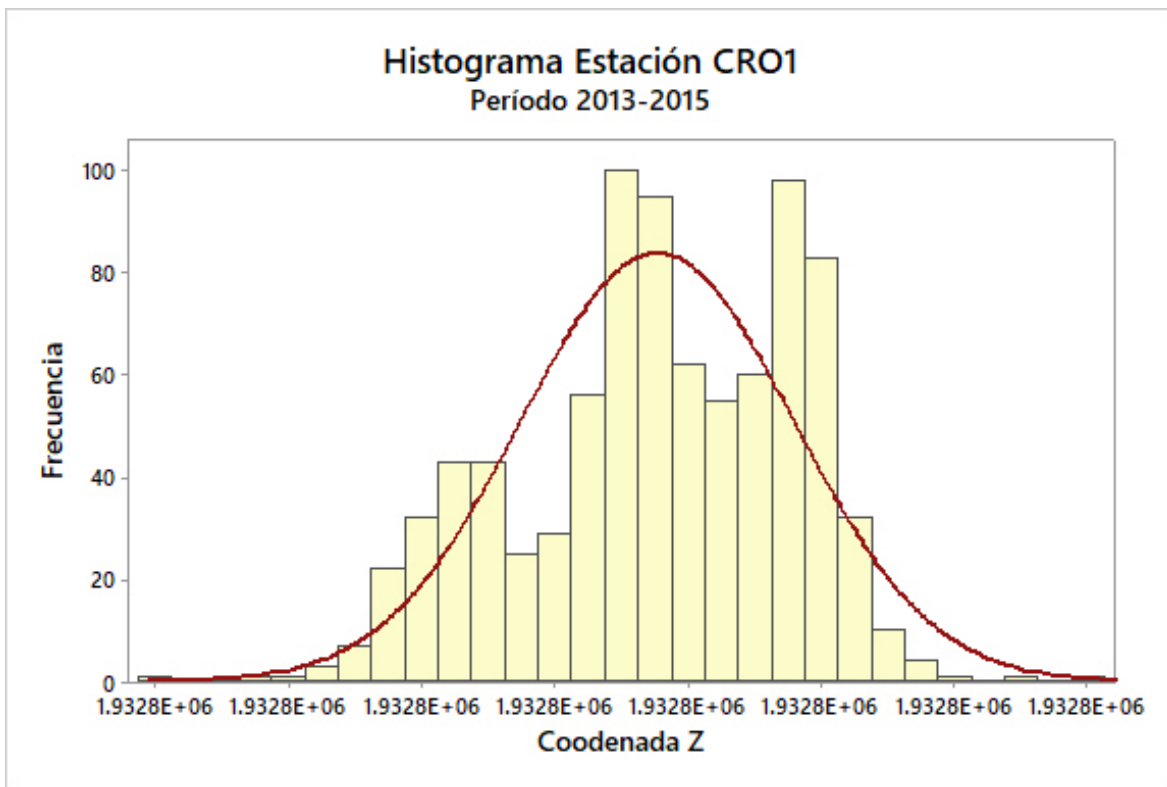
TOTAL DE DATOS : 865  
PROMEDIO : -5488076.60525  
VARIANZA : 0.00012  
DESV. ESTANDAR : 0.01077  
VALOR MÁXIMO : -5488076.53200  
VALOR MÍNIMO : -5488076.65200  
COVARIANZA : 0.00012  
RANGO : 0.12000  
CURTOSIS : 5.26309  
OBLICUIDAD : 0.05457



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 865  
PROMEDIO : 1932767.91523  
VARIANZA : 0.00011  
DESV. ESTANDAR : 0.01028  
VALOR MÁXIMO : 1932767.94800  
VALOR MÍNIMO : 1932767.87800  
COVARIANZA : 0.00011  
RANGO : 0.07000  
CURTOSIS : 2.56194  
OBLICUIDAD : -0.37416

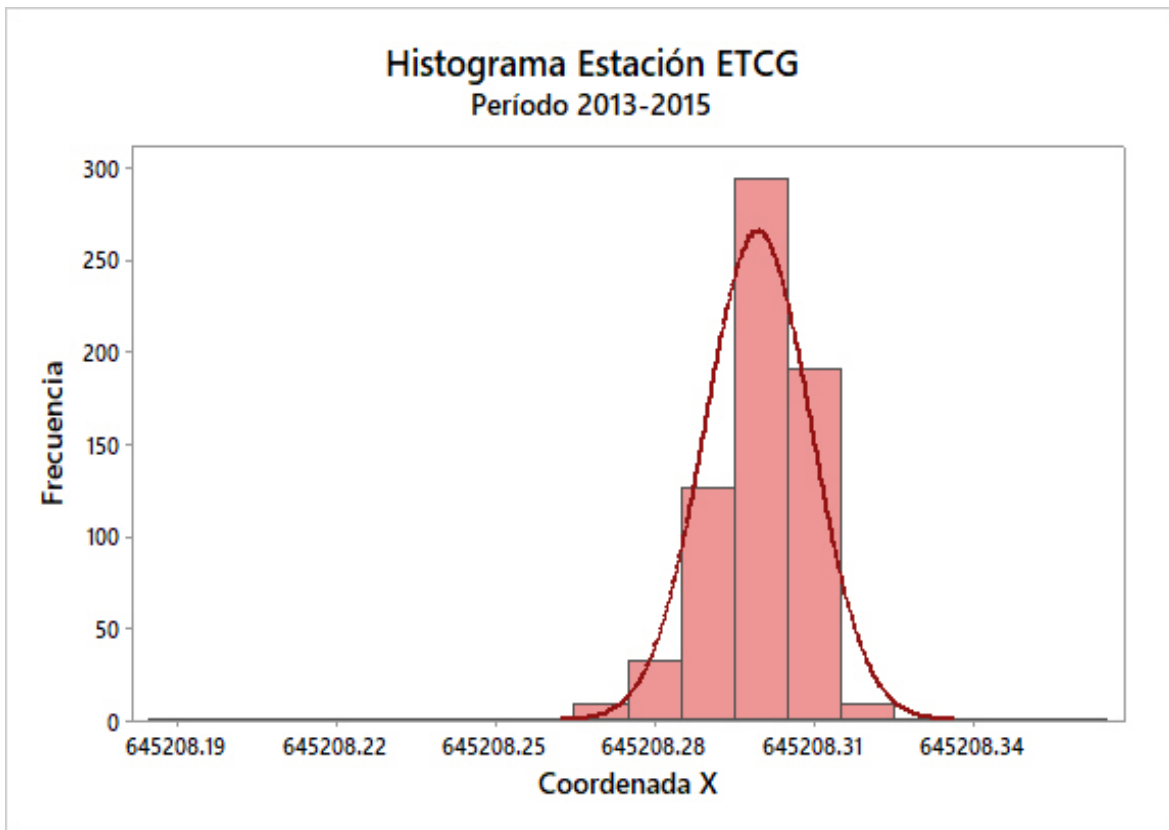


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### ETCG

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 665  
PROMEDIO : 645208.29961  
VARIANZA : 0.00010  
DESV. ESTANDAR : 0.00998  
VALOR MÁXIMO : 645208.36020  
VALOR MÍNIMO : 645208.19400  
COVARIANZA : 0.00010  
RANGO : 0.16620  
CURTOSIS : 23.36700  
OBLICUIDAD : -1.88933

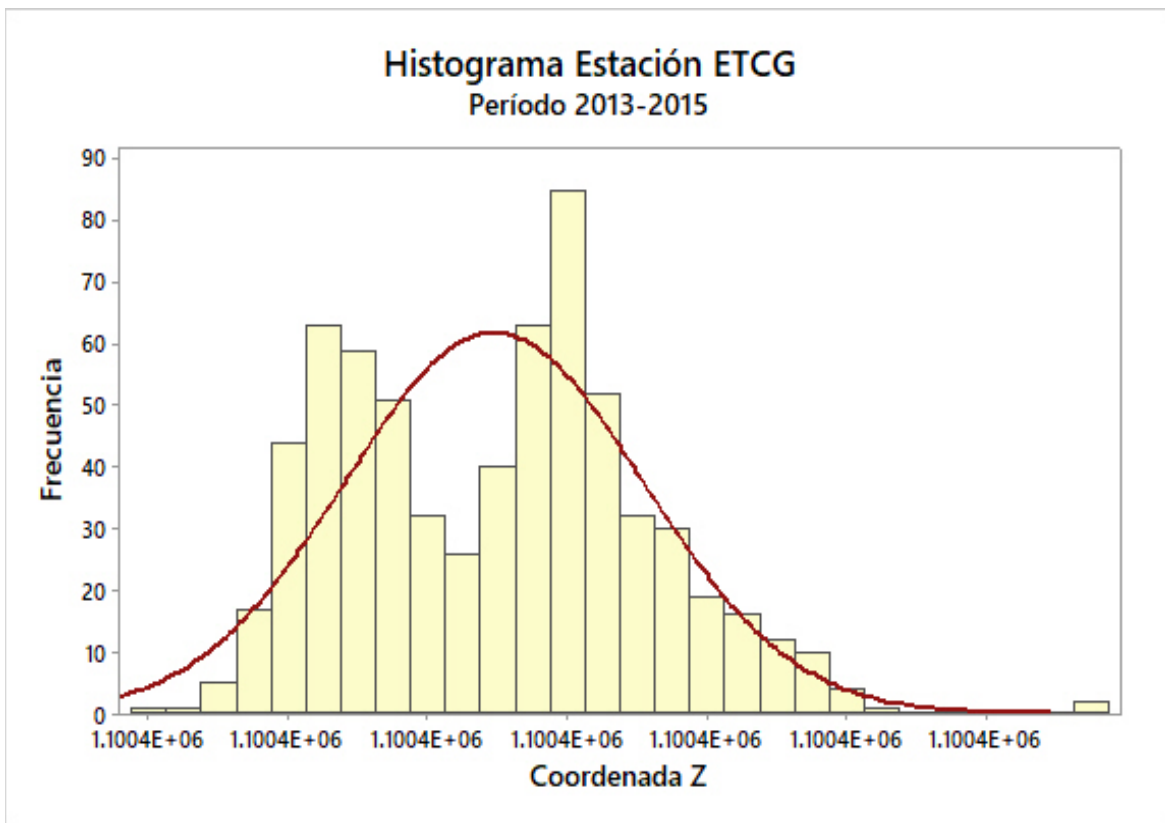




## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 665  
PROMEDIO : 1100399.58979  
VARIANZA : 0.00011  
DESV. ESTANDAR : 0.01071  
VALOR MÁXIMO : 1100399.63200  
VALOR MÍNIMO : 1100399.56600  
COVARIANZA : 0.00011  
RANGO : 0.06600  
CURTOSIS : 2.73516  
OBLICUIDAD : 0.31880

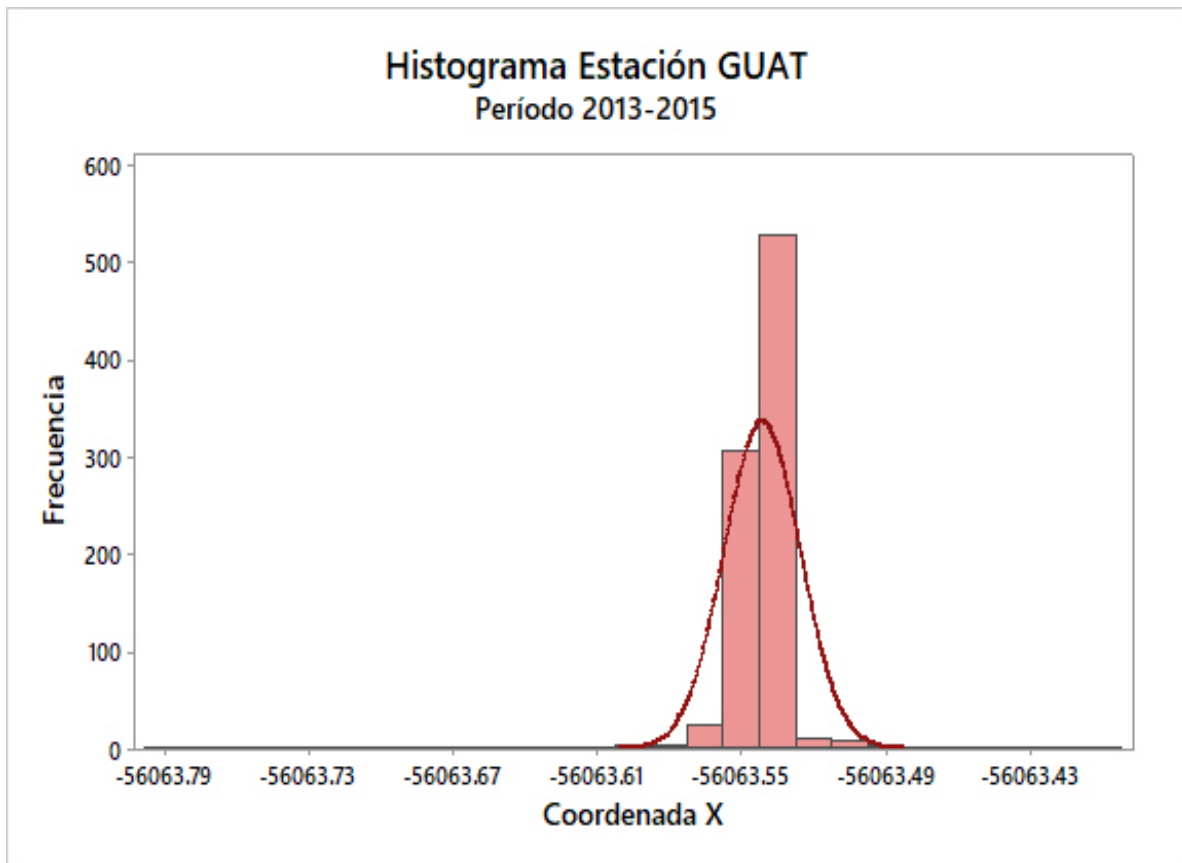


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### GUAT

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

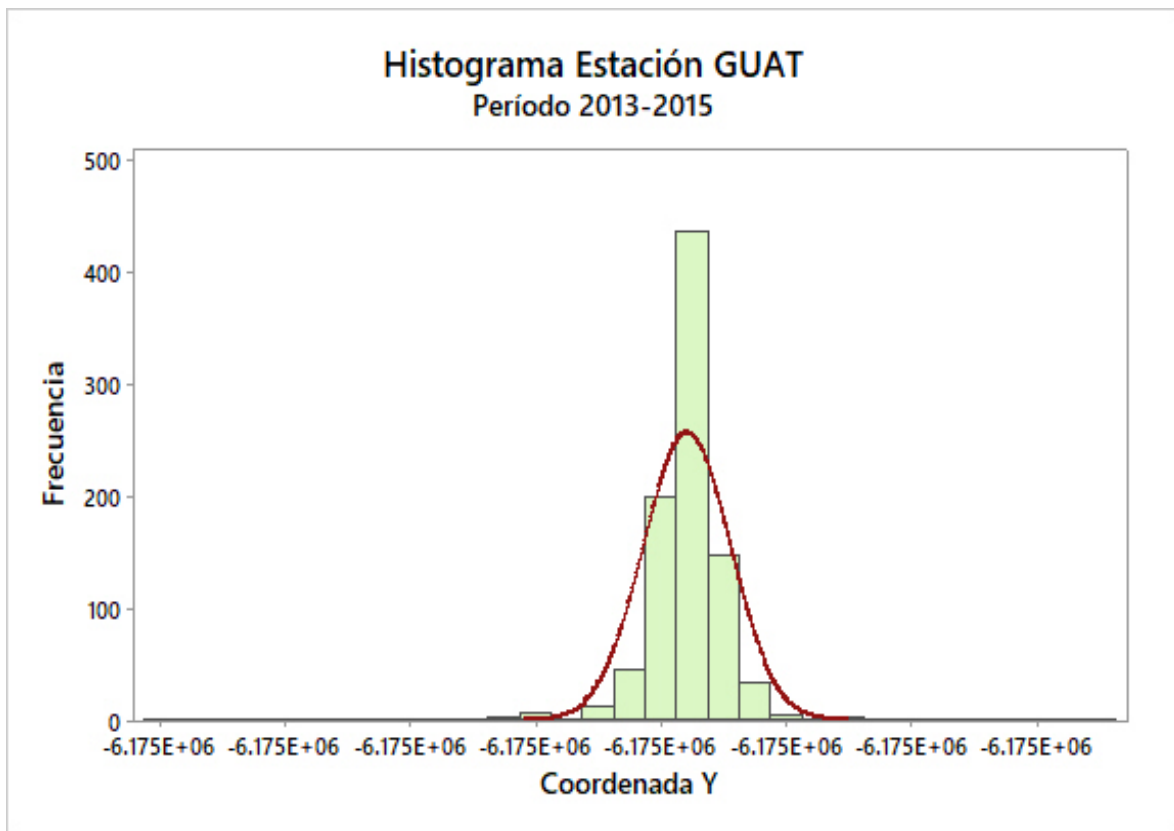
TOTAL DE DATOS : 896  
PROMEDIO : -56063.54104  
VARIANZA : 0.00025  
DESV. ESTANDAR : 0.01594  
VALOR MÁXIMO : -56063.40270  
VALOR MÍNIMO : -56063.79400  
COVARIANZA : 0.00025  
RANGO : 0.39130  
CURTOSIS : 93.59547  
OBLICUIDAD : -2.76561



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

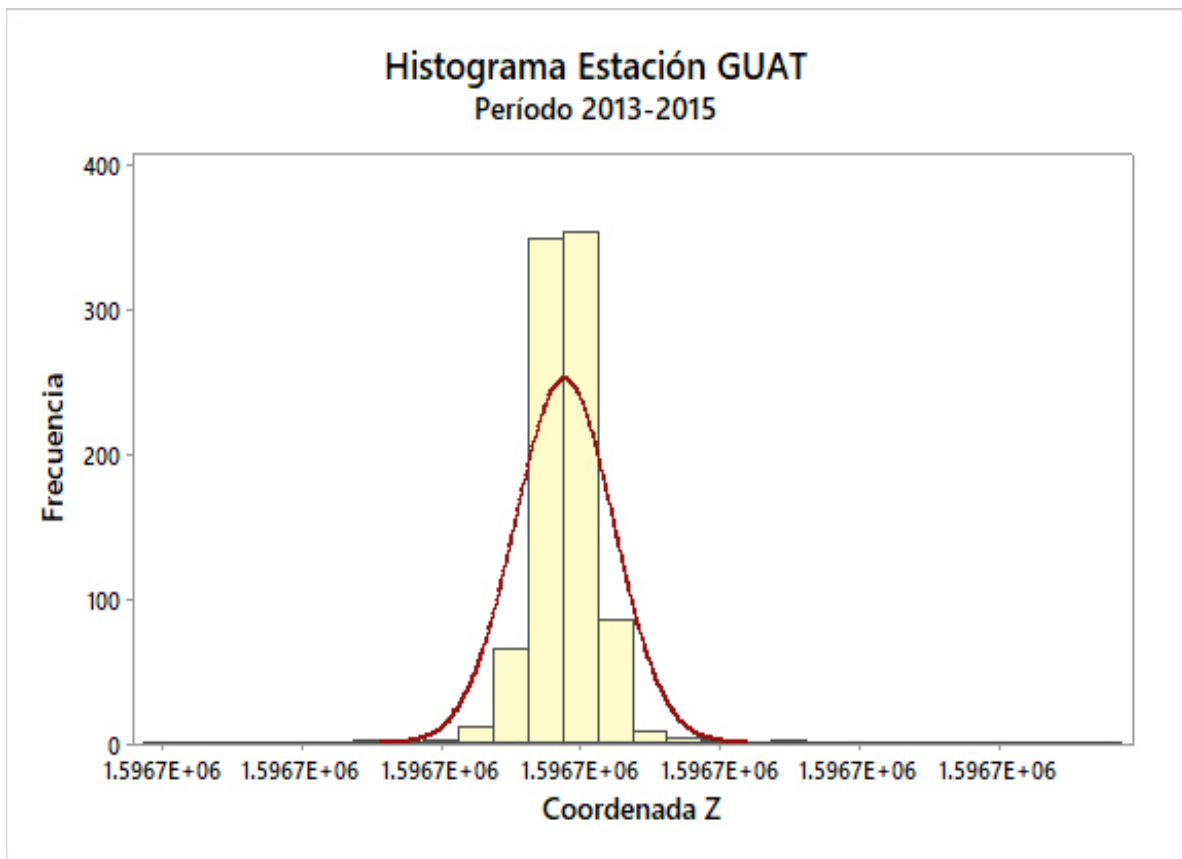
TOTAL DE DATOS : 896  
PROMEDIO : -6174978.63150  
VARIANZA : 0.00019  
DESV. ESTANDAR : 0.01396  
VALOR MÁXIMO : -6174978.49700  
VALOR MÍNIMO : -6174978.80000  
COVARIANZA : 0.00019  
RANGO : 0.30300  
CURTOSIS : 43.38984  
OBLICUIDAD : -0.97538



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 896  
PROMEDIO : 1596665.29284  
VARIANZA : 0.00005  
DESV. ESTANDAR : 0.00711  
VALOR MÁXIMO : 1596665.37100  
VALOR MÍNIMO : 1596665.23500  
COVARIANZA : 0.00005  
RANGO : 0.13600  
CURTOSIS : 40.04648  
OBLICUIDAD : 2.37090

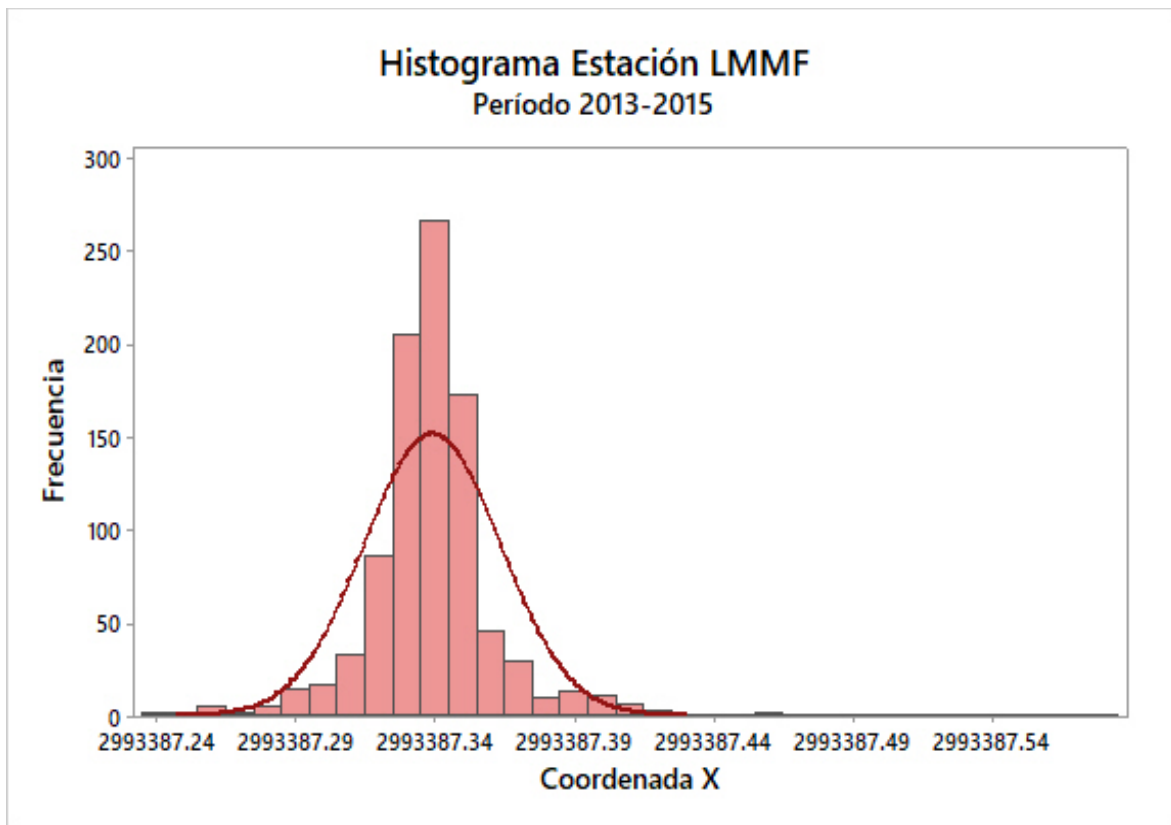


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### LMMF

\*\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*\*

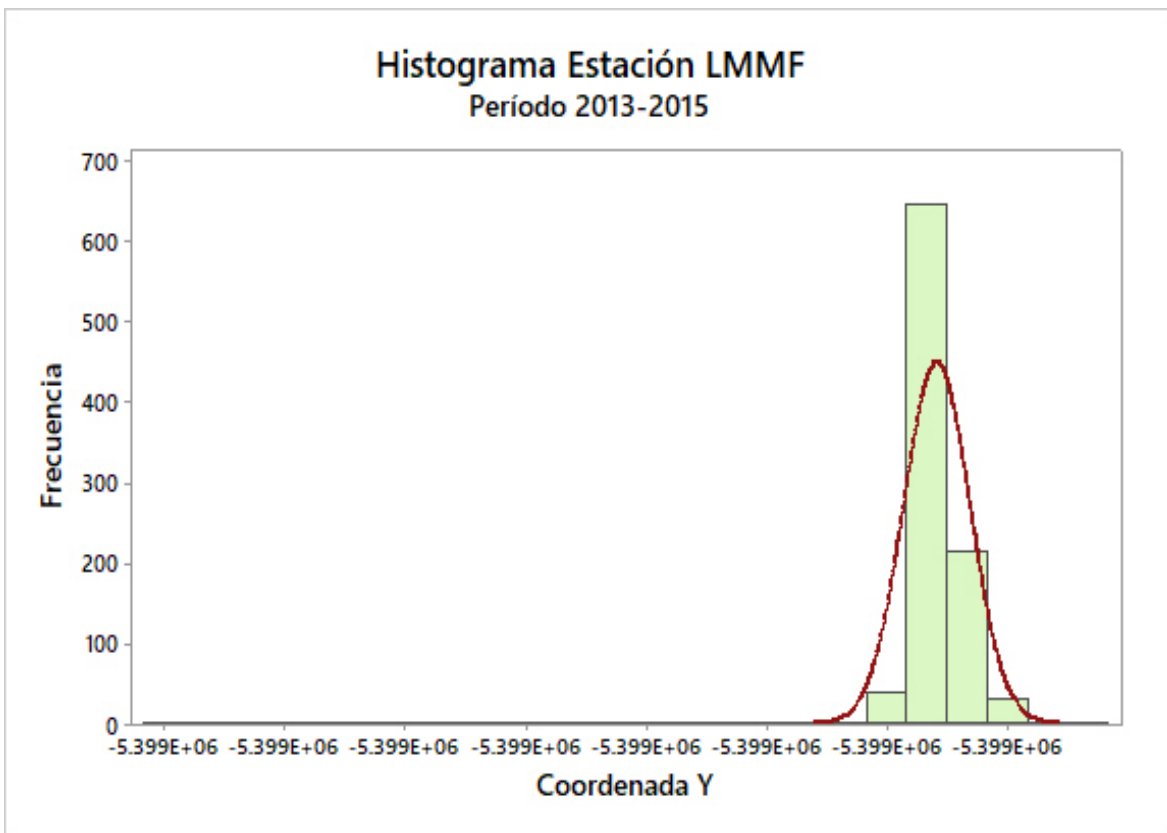
TOTAL DE DATOS : 936  
PROMEDIO : 2993387.33930  
VARIANZA : 0.00061  
DESV. ESTANDAR : 0.02464  
VALOR MÁXIMO : 2993387.57600  
VALOR MÍNIMO : 2993387.24300  
COVARIANZA : 0.00061  
RANGO : 0.33300  
CURTOSIS : 16.09000  
OBLICUIDAD : 1.47732



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

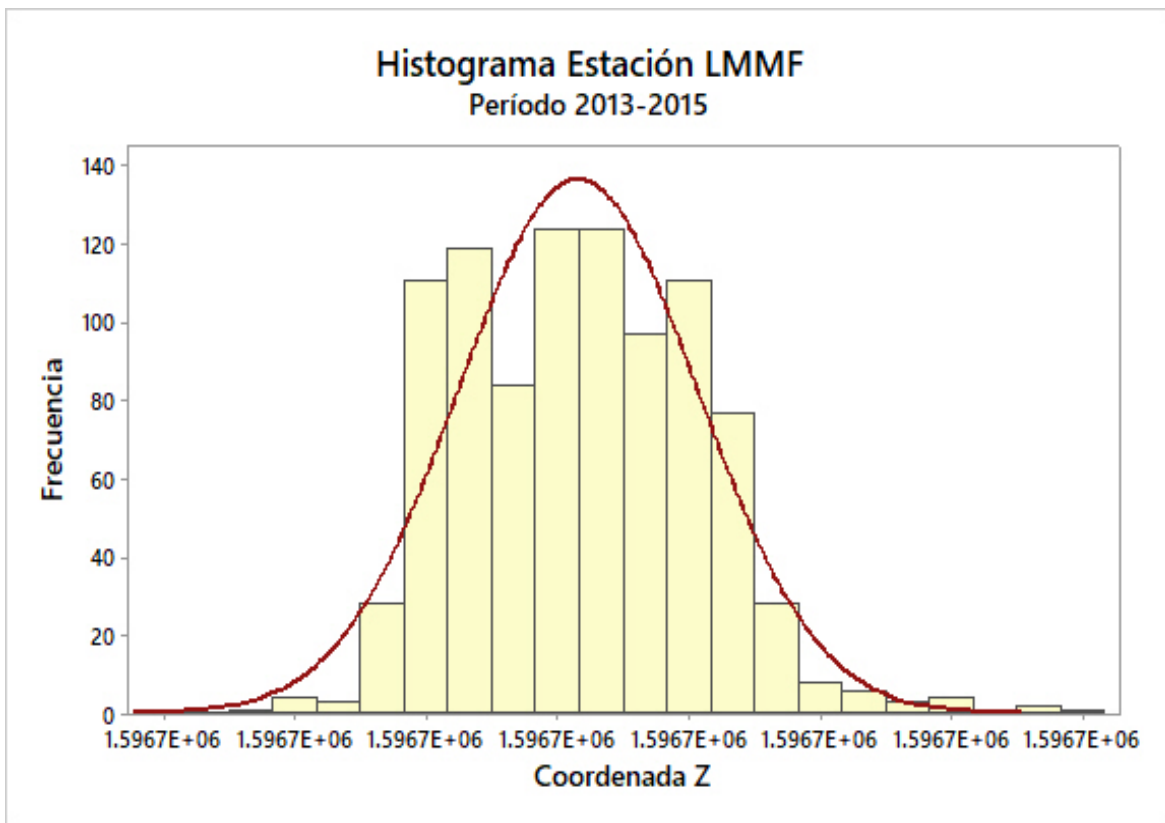
TOTAL DE DATOS : 936  
PROMEDIO : -5399363.86950  
VARIANZA : 0.00110  
DESV. ESTANDAR : 0.03321  
VALOR MÁXIMO : -5399363.72400  
VALOR MÍNIMO : -5399364.64500  
COVARIANZA : 0.00110  
RANGO : 0.92100  
CURTOSIS : 319.52051  
OBLICUIDAD : -13.31102



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 936  
PROMEDIO : 1596748.08241  
VARIANZA : 0.00019  
DESV. ESTANDAR : 0.01365  
VALOR MÁXIMO : 1596748.14100  
VALOR MÍNIMO : 1596748.03600  
COVARIANZA : 0.00019  
RANGO : 0.10500  
CURTOSIS : 3.27079  
OBLICUIDAD : 0.31949

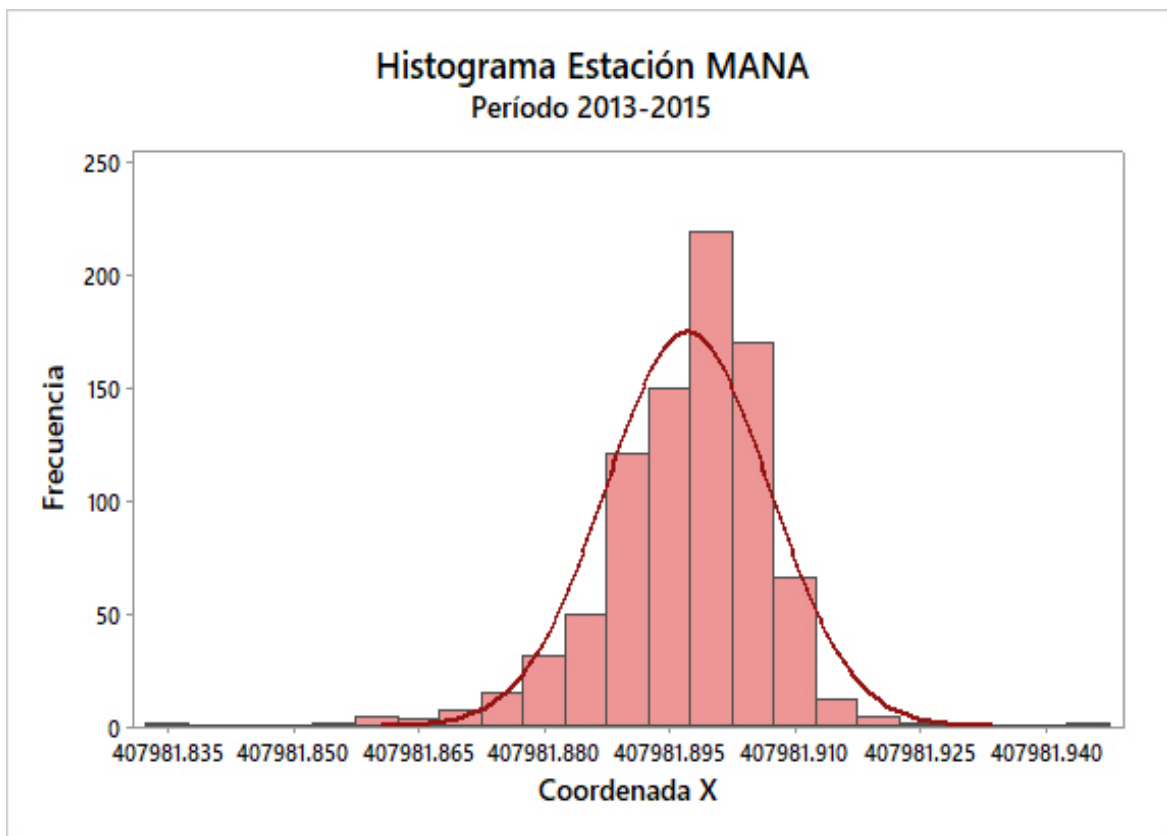


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### MANA

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

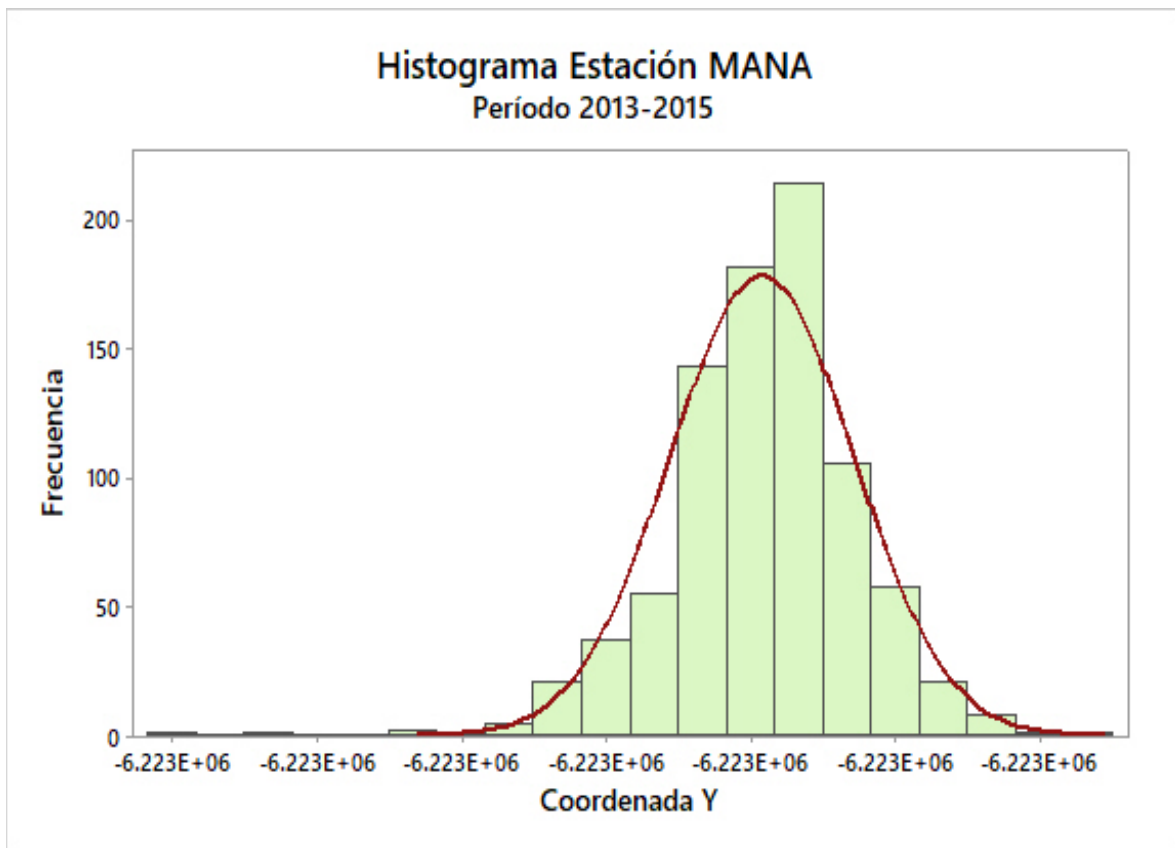
TOTAL DE DATOS : 857  
PROMEDIO : 407981.89719  
VARIANZA : 0.00010  
DESV. ESTANDAR : 0.00980  
VALOR MÁXIMO : 407981.94260  
VALOR MÍNIMO : 407981.83450  
COVARIANZA : 0.00010  
RANGO : 0.10810  
CURTOSIS : 6.50865  
OBLICUIDAD : -0.91890



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

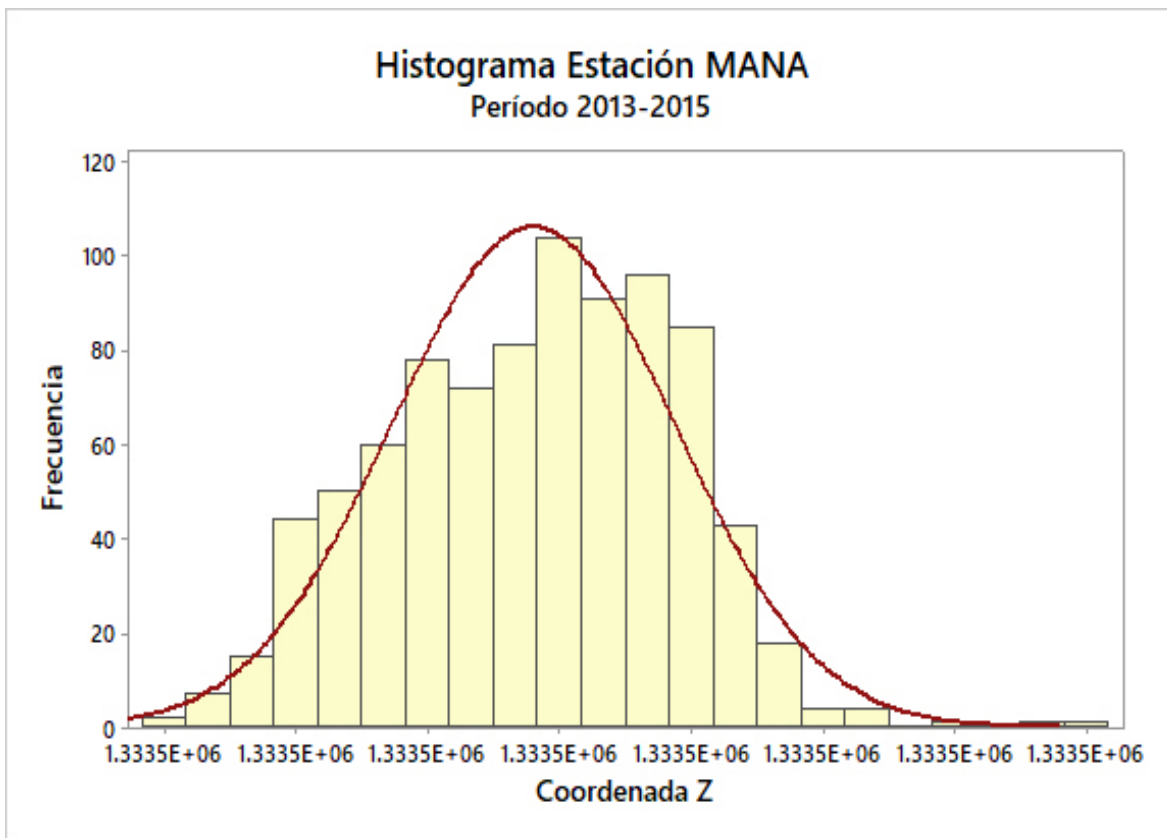
TOTAL DE DATOS : 857  
PROMEDIO : -6222925.65380  
VARIANZA : 0.00009  
DESV. ESTANDAR : 0.00957  
VALOR MÁXIMO : -6222925.62100  
VALOR MÍNIMO : -6222925.71300  
COVARIANZA : 0.00009  
RANGO : 0.09200  
CURTOSIS : 5.90477  
OBLICUIDAD : -0.64848



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 857  
PROMEDIO : 1333529.02858  
VARIANZA : 0.00006  
DESV. ESTANDAR : 0.00805  
VALOR MÁXIMO : 1333529.05900  
VALOR MÍNIMO : 1333529.00800  
COVARIANZA : 0.00006  
RANGO : 0.05100  
CURTOSIS : 2.67806  
OBLICUIDAD : -0.07977

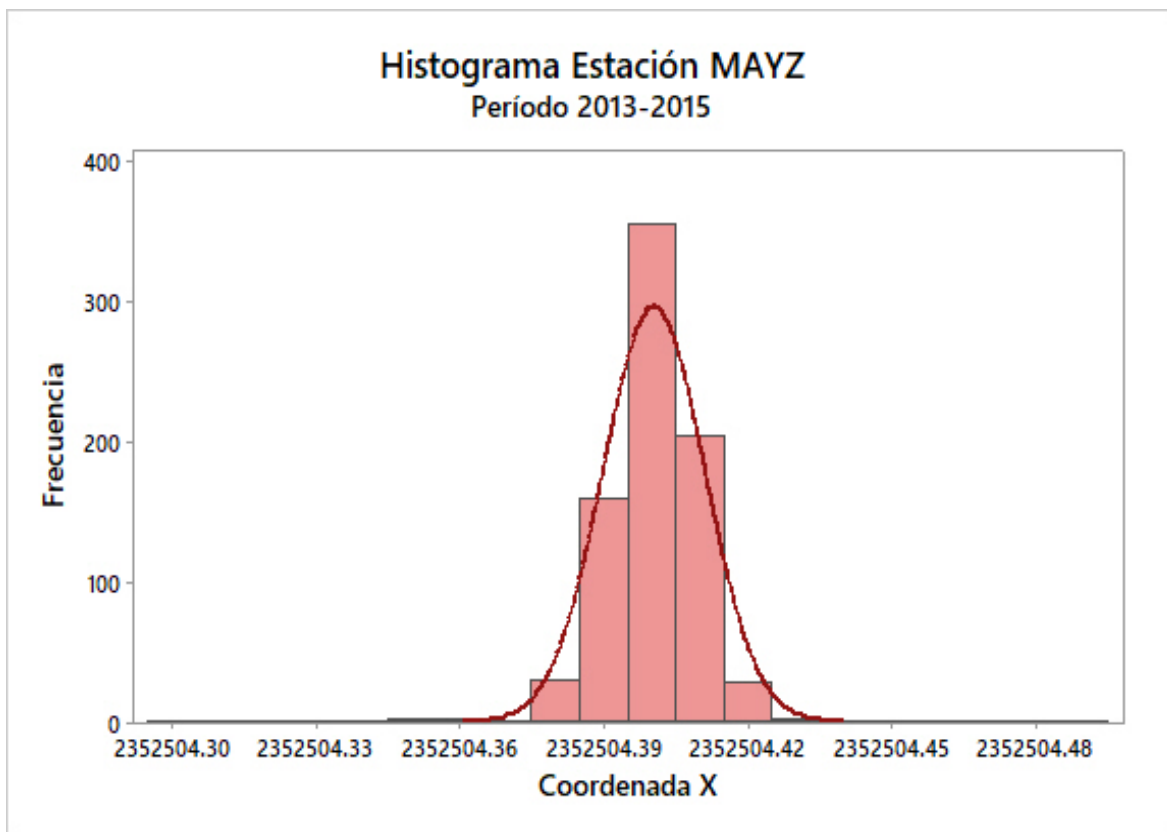


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### MAYZ

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 791  
PROMEDIO : 2352504.40064  
VARIANZA : 0.00011  
DESV. ESTANDAR : 0.01066  
VALOR MÁXIMO : 2352504.48700  
VALOR MÍNIMO : 2352504.29900  
COVARIANZA : 0.00011  
RANGO : 0.18800  
CURTOSIS : 22.52451  
OBLICUIDAD : -0.26926

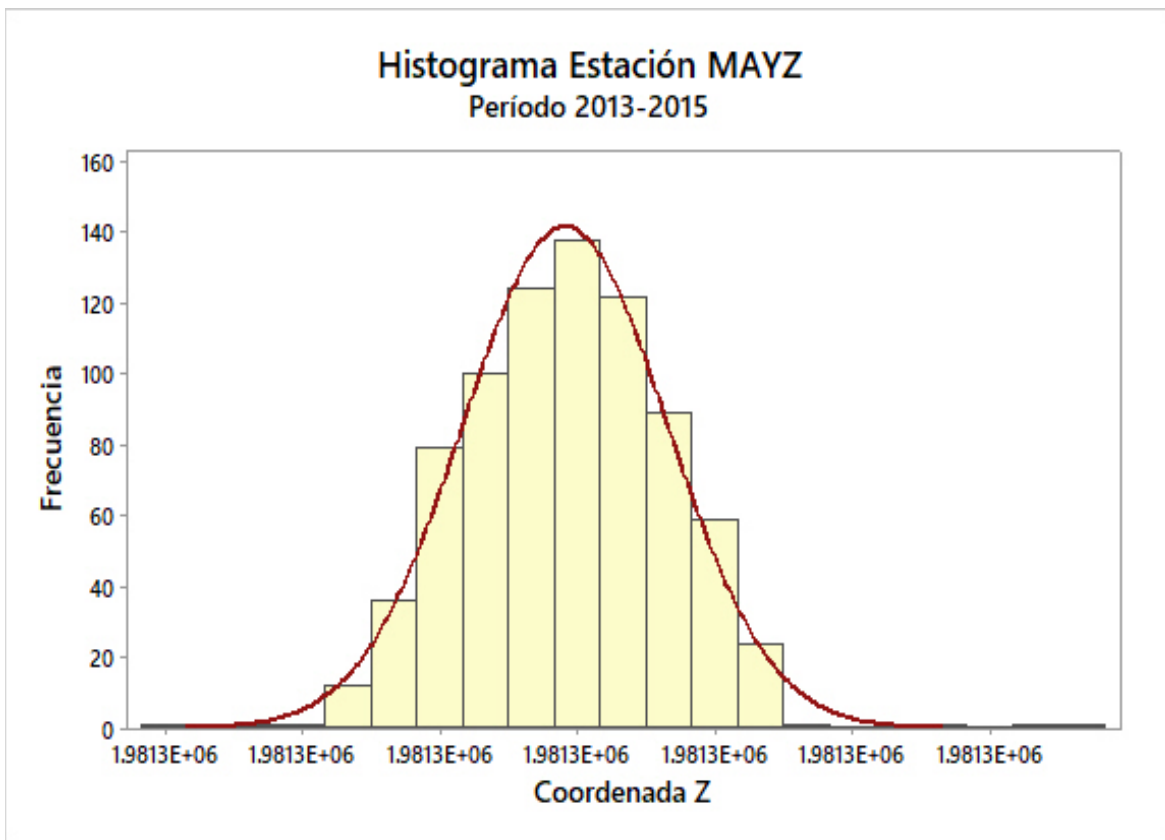




## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 791  
PROMEDIO : 1981262.30873  
VARIANZA : 0.00012  
DESV. ESTANDAR : 0.01113  
VALOR MÁXIMO : 1981262.36600  
VALOR MÍNIMO : 1981262.26600  
COVARIANZA : 0.00012  
RANGO : 0.10000  
CURTOSIS : 4.12465  
OBLICUIDAD : 0.16342

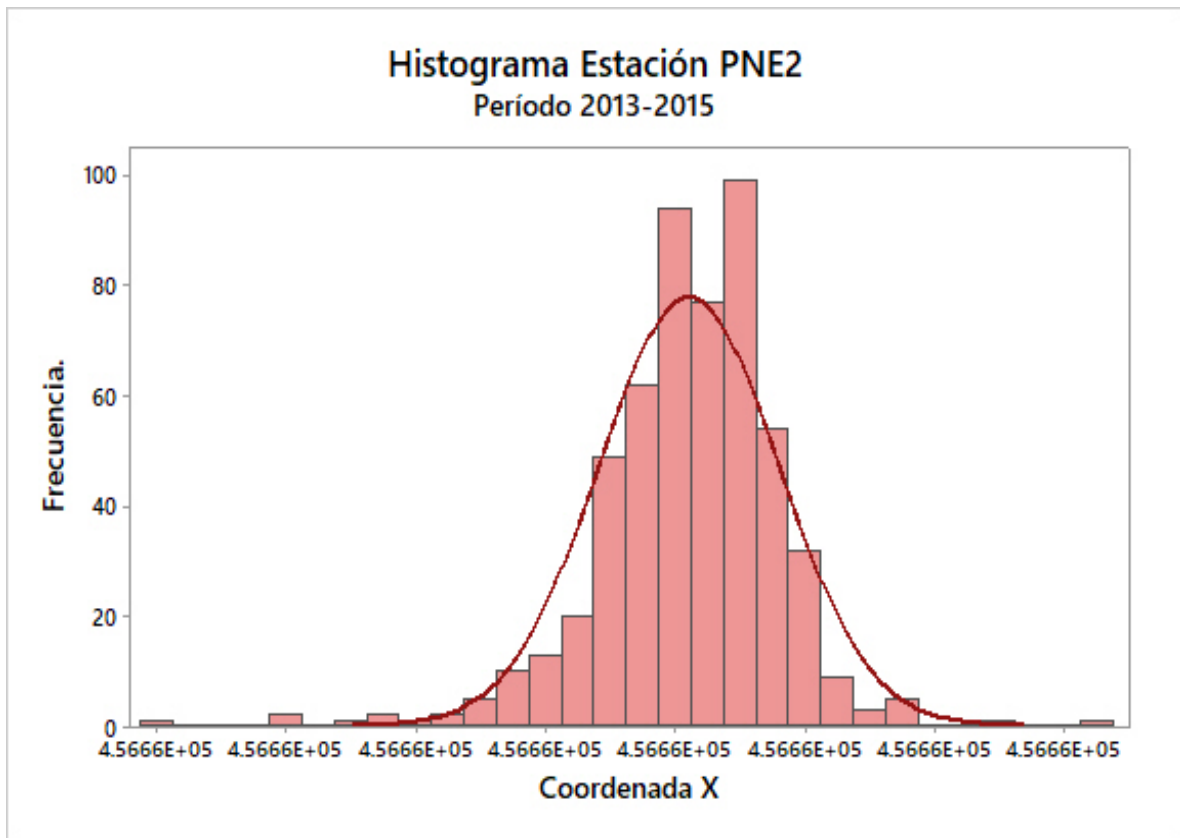


# Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

## PNE2

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

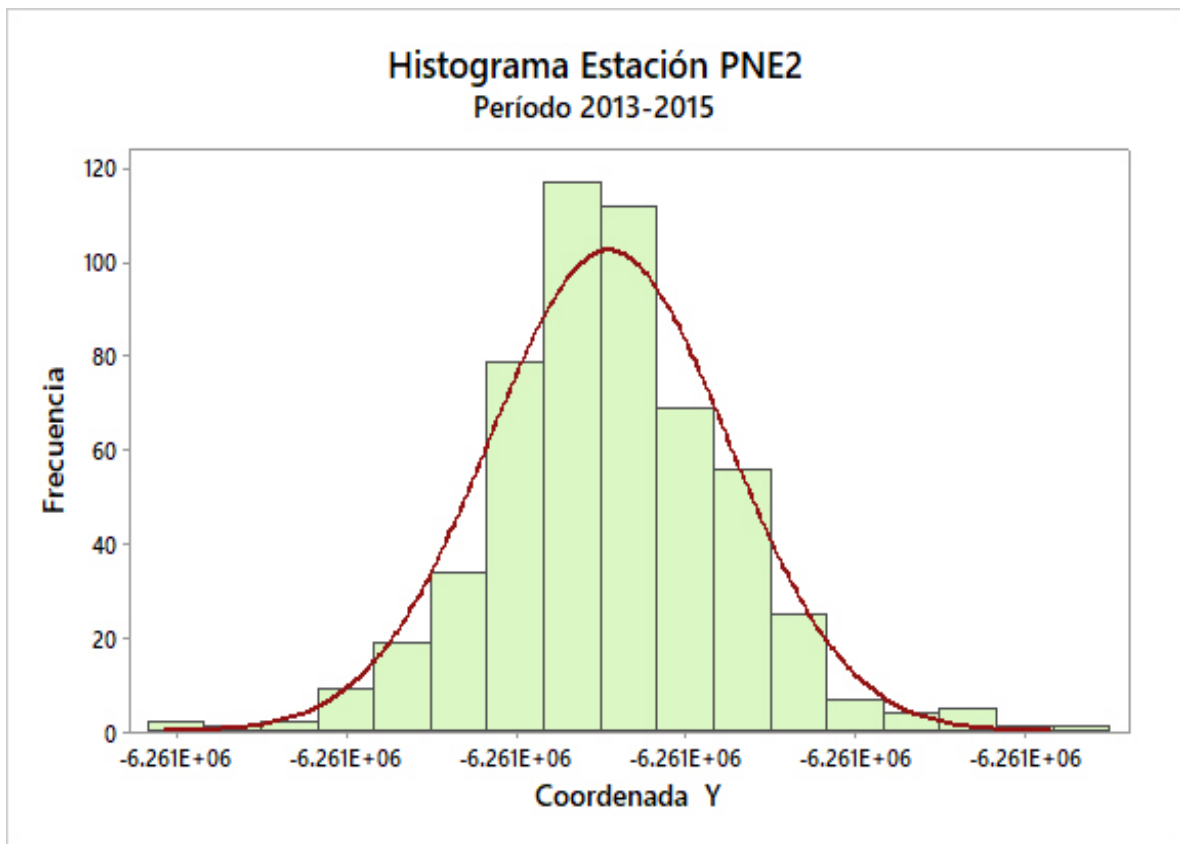
TOTAL DE DATOS : 543  
PROMEDIO : 456659.91360  
VARIANZA : 0.00005  
DESV. ESTANDAR : 0.00695  
VALOR MÁXIMO : 456659.94600  
VALOR MÍNIMO : 456659.87210  
COVARIANZA : 0.00005  
RANGO : 0.07390  
CURTOSIS : 7.68873  
OBLICUIDAD : -0.86493



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

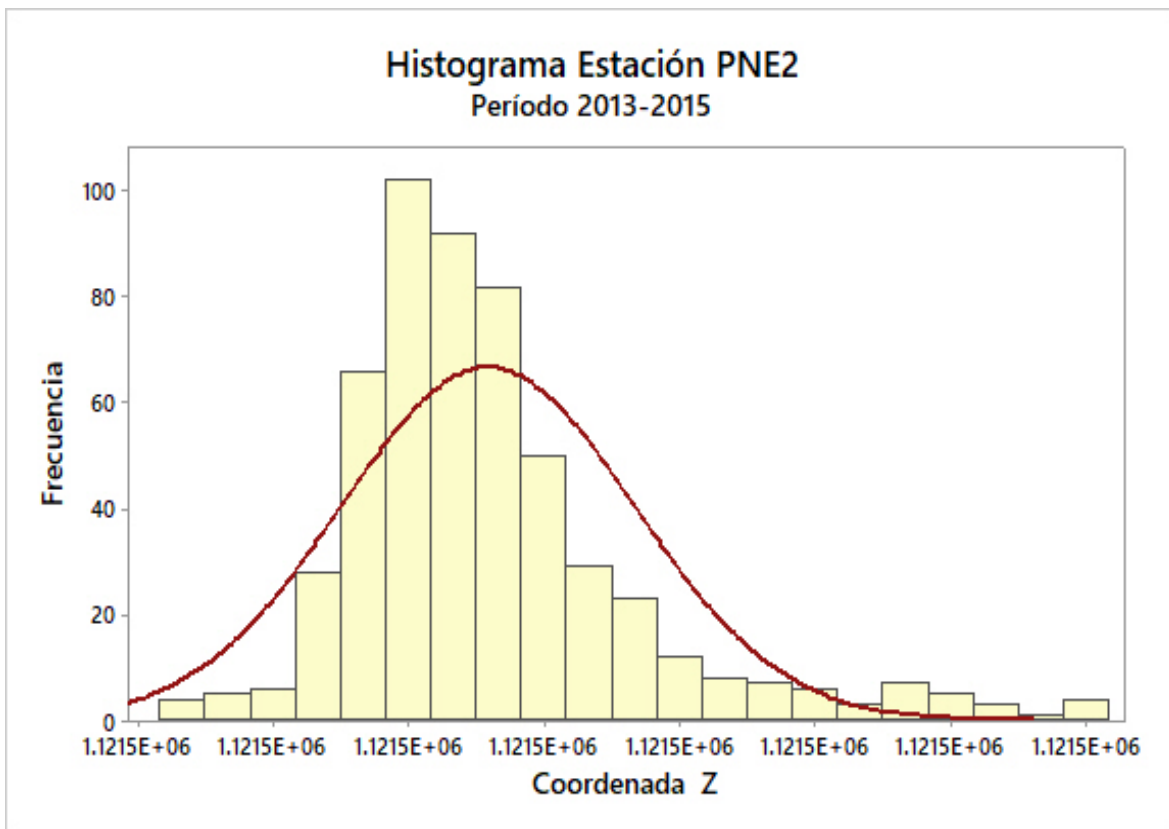
TOTAL DE DATOS : 543  
PROMEDIO : -6261477.07682  
VARIANZA : 0.00011  
DESV. ESTANDAR : 0.01053  
VALOR MÁXIMO : -6261477.03500  
VALOR MÍNIMO : -6261477.11500  
COVARIANZA : 0.00011  
RANGO : 0.08000  
CURTOSIS : 4.26550  
OBLICUIDAD : 0.15685



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 543  
PROMEDIO : 1121504.41560  
VARIANZA : 0.00004  
DESV. ESTANDAR : 0.00651  
VALOR MÁXIMO : 1121504.44200  
VALOR MÍNIMO : 1121504.40100  
COVARIANZA : 0.00004  
RANGO : 0.04100  
CURTOSIS : 6.08383  
OBLICUIDAD : 1.49040

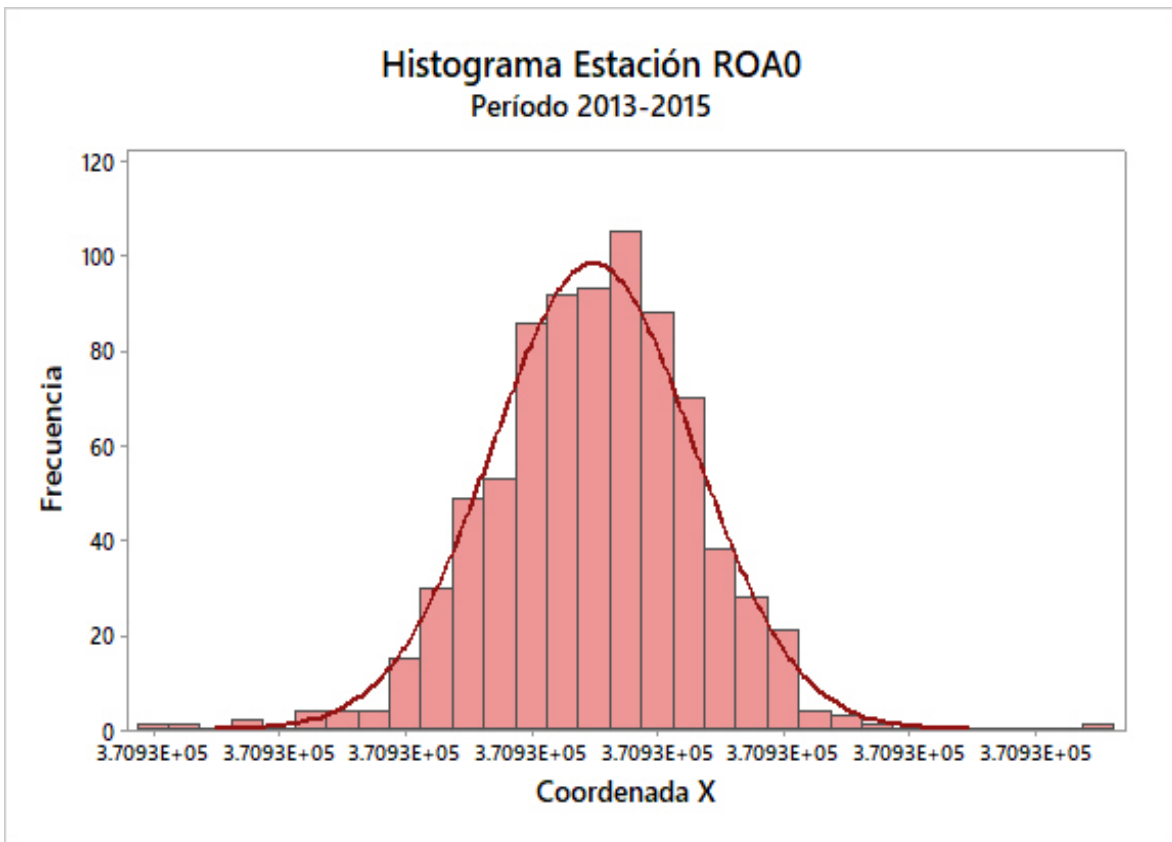


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### ROA0

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

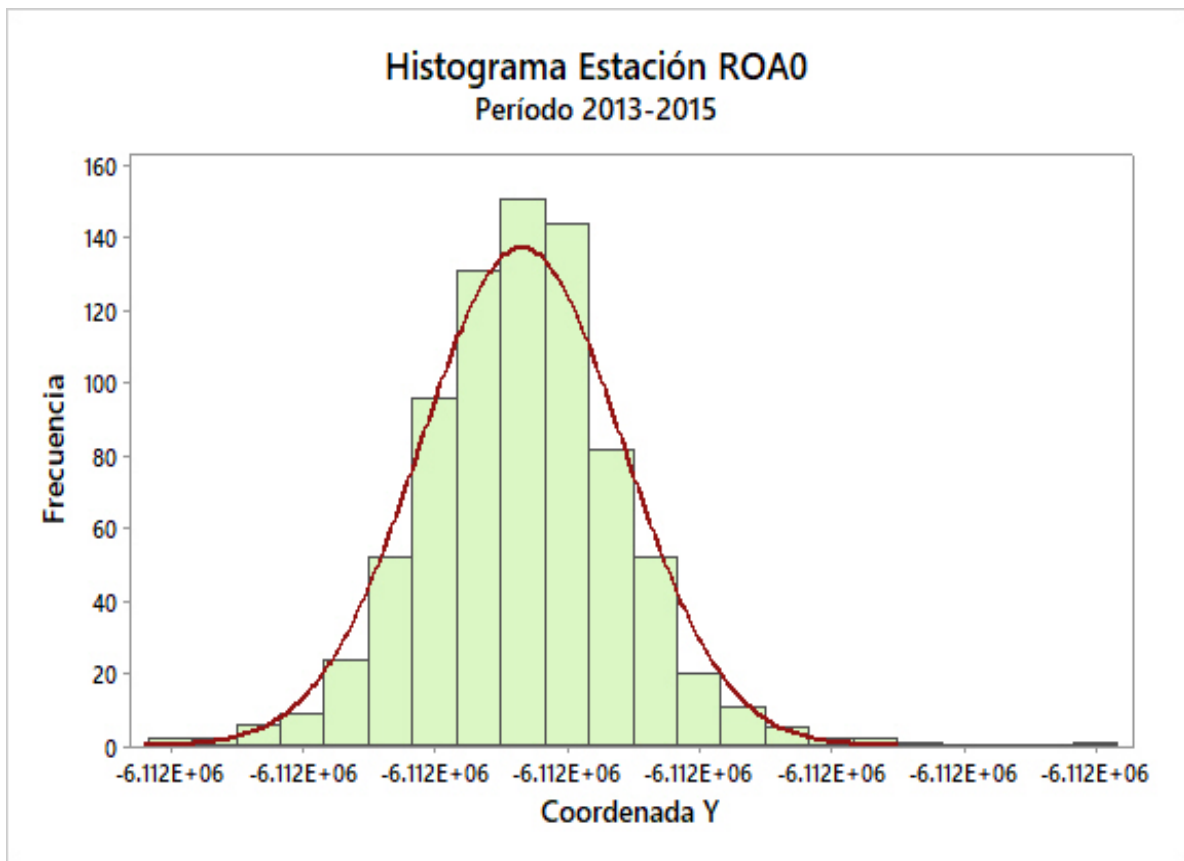
TOTAL DE DATOS : 793  
PROMEDIO : 370926.83245  
VARIANZA : 0.00006  
DESV. ESTANDAR : 0.00804  
VALOR MÁXIMO : 370926.87230  
VALOR MÍNIMO : 370926.79820  
COVARIANZA : 0.00006  
RANGO : 0.07410  
CURTOSIS : 4.26391  
OBLICUIDAD : -0.21205



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

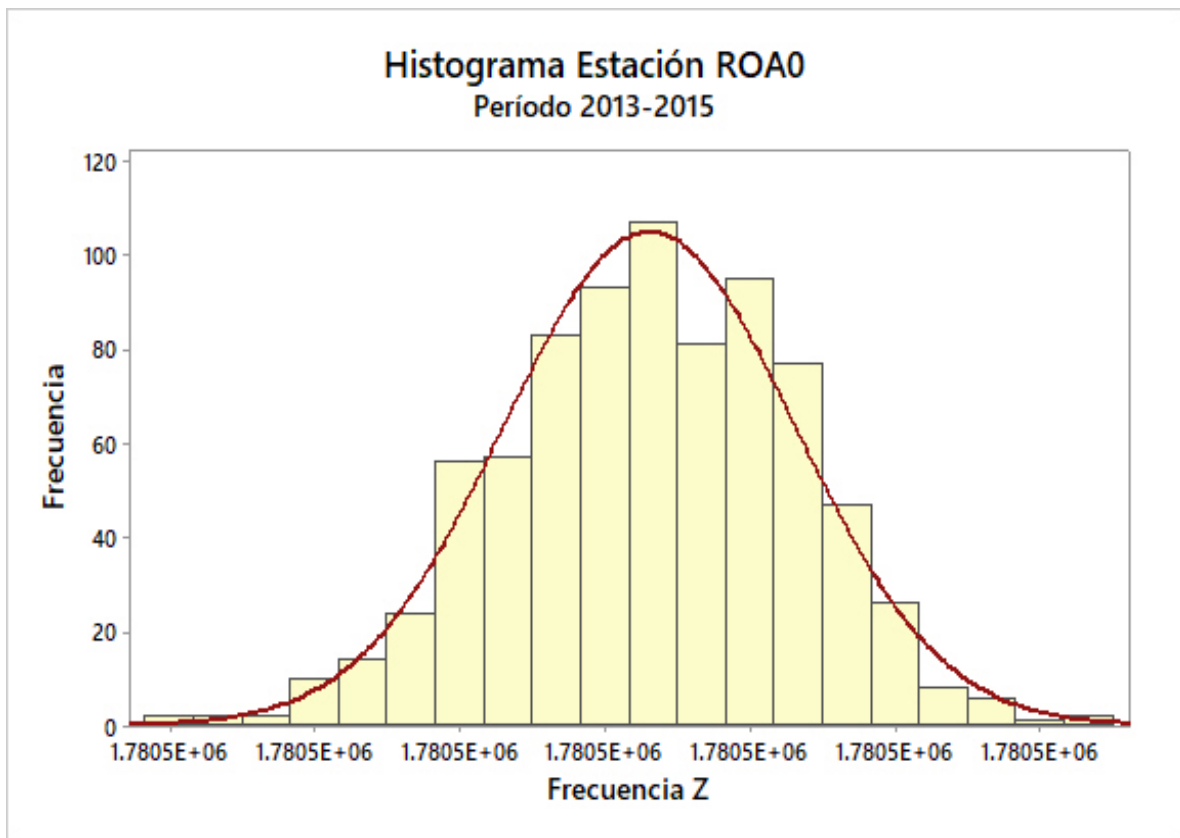
TOTAL DE DATOS : 793  
PROMEDIO : -6111584.00014  
VARIANZA : 0.00008  
DESV. ESTANDAR : 0.00921  
VALOR MÁXIMO : -6111583.94900  
VALOR MÍNIMO : -6111584.03400  
COVARIANZA : 0.00008  
RANGO : 0.08500  
CURTOSIS : 4.93483  
OBLICUIDAD : 0.25004



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 793  
PROMEDIO : 1780546.80390  
VARIANZA : 0.00004  
DESV. ESTANDAR : 0.00604  
VALOR MÁXIMO : 1780546.82200  
VALOR MÍNIMO : 1780546.78400  
COVARIANZA : 0.00004  
RANGO : 0.03800  
CURTOSIS : 2.97698  
OBLICUIDAD : -0.16876

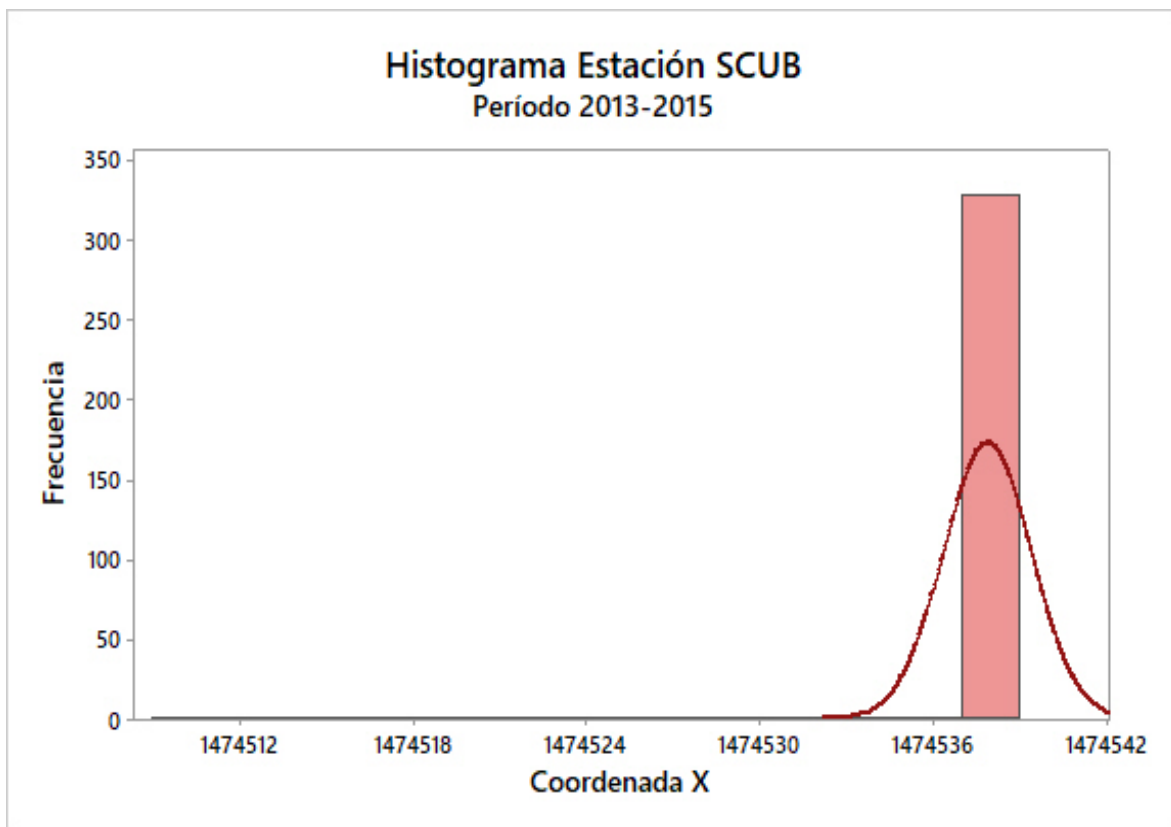


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### SCUB

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

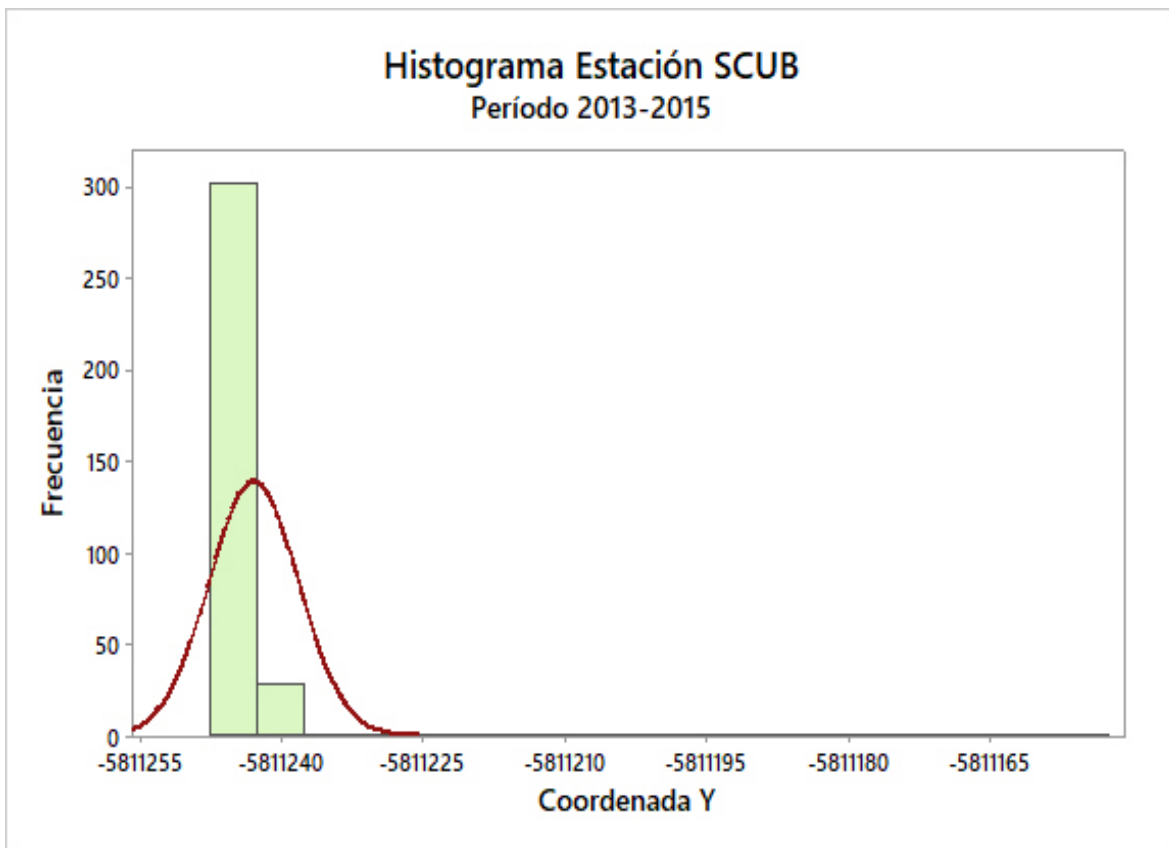
TOTAL DE DATOS : 331  
PROMEDIO : 1474537.89527  
VARIANZA : 2.32534  
DESV. ESTANDAR : 1.52491  
VALOR MÁXIMO : 1474538.72900  
VALOR MÍNIMO : 1474510.53000  
COVARIANZA : 2.32534  
RANGO : 28.19900  
CURTOSIS : 315.27476  
OBLICUIDAD : -17.56304



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

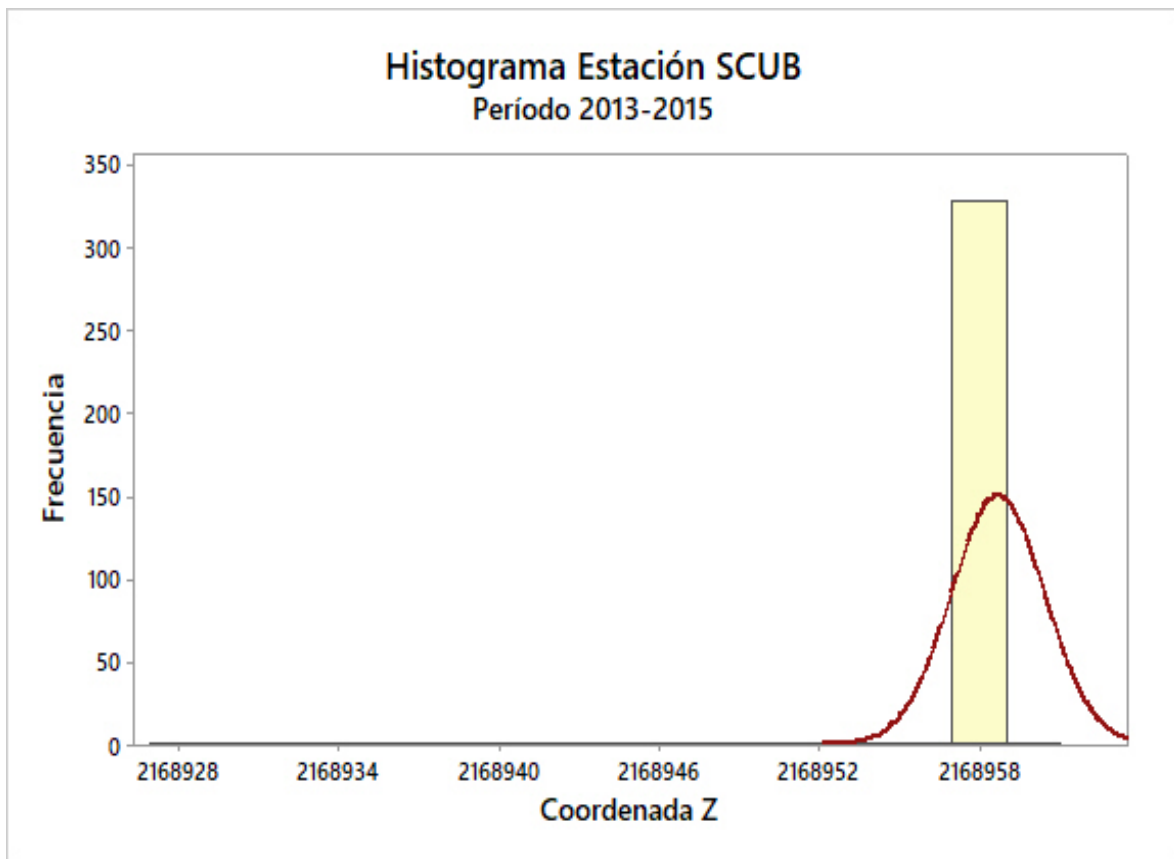
TOTAL DE DATOS : 331  
PROMEDIO : -5811242.81030  
VARIANZA : 22.56783  
DESV. ESTANDAR : 4.75056  
VALOR MÁXIMO : -5811157.24500  
VALOR MÍNIMO : -5811243.38500  
COVARIANZA : 22.56783  
RANGO : 86.14000  
CURTOSIS : 319.90026  
OBLICUIDAD : 17.73748



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 331  
PROMEDIO : 2168958.70235  
VARIANZA : 3.08369  
DESV. ESTANDAR : 1.75604  
VALOR MÁXIMO : 2168959.83500  
VALOR MÍNIMO : 2168927.14300  
COVARIANZA : 3.08369  
RANGO : 32.69200  
CURTOSIS : 317.08716  
OBLICUIDAD : -17.62158

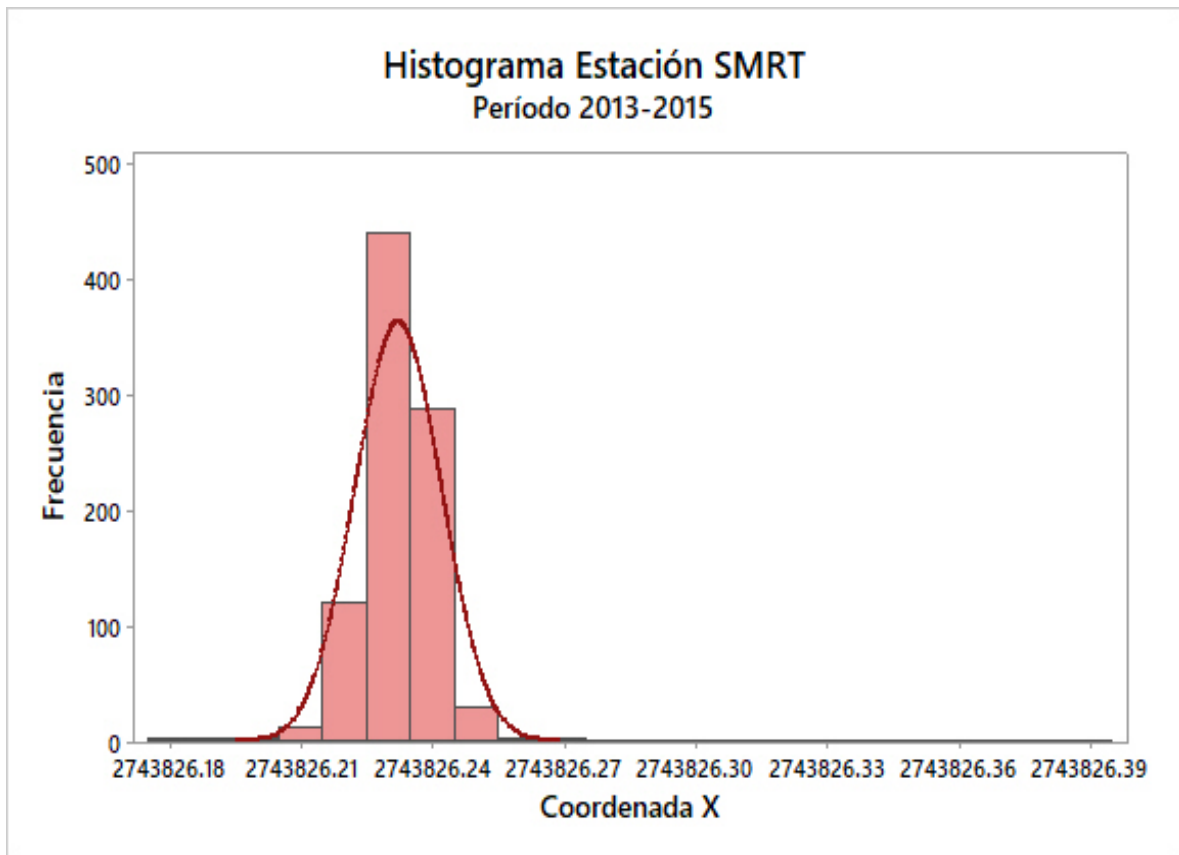


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### SMRT

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 903  
PROMEDIO : 2743826.23233  
VARIANZA : 0.00010  
DESV. ESTANDAR : 0.00990  
VALOR MÁXIMO : 2743826.39300  
VALOR MÍNIMO : 2743826.17700  
COVARIANZA : 0.00010  
RANGO : 0.21600  
CURTOSIS : 81.50332  
OBLICUIDAD : 4.21593

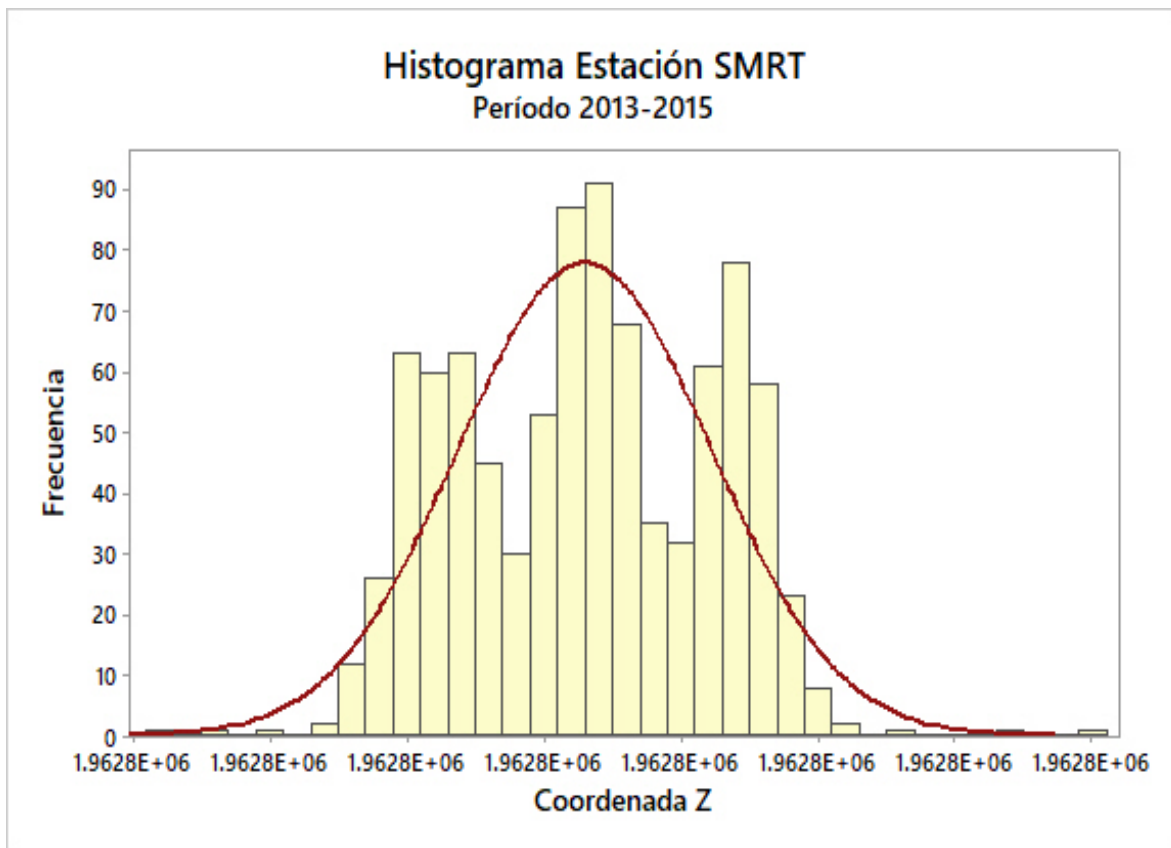




## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### \*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 903  
PROMEDIO : 1962823.07877  
VARIANZA : 0.00013  
DESV. ESTANDAR : 0.01154  
VALOR MÁXIMO : 1962823.12600  
VALOR MÍNIMO : 1962823.03900  
COVARIANZA : 0.00013  
RANGO : 0.08700  
CURTOSIS : 2.44006  
OBLICUIDAD : 0.01339

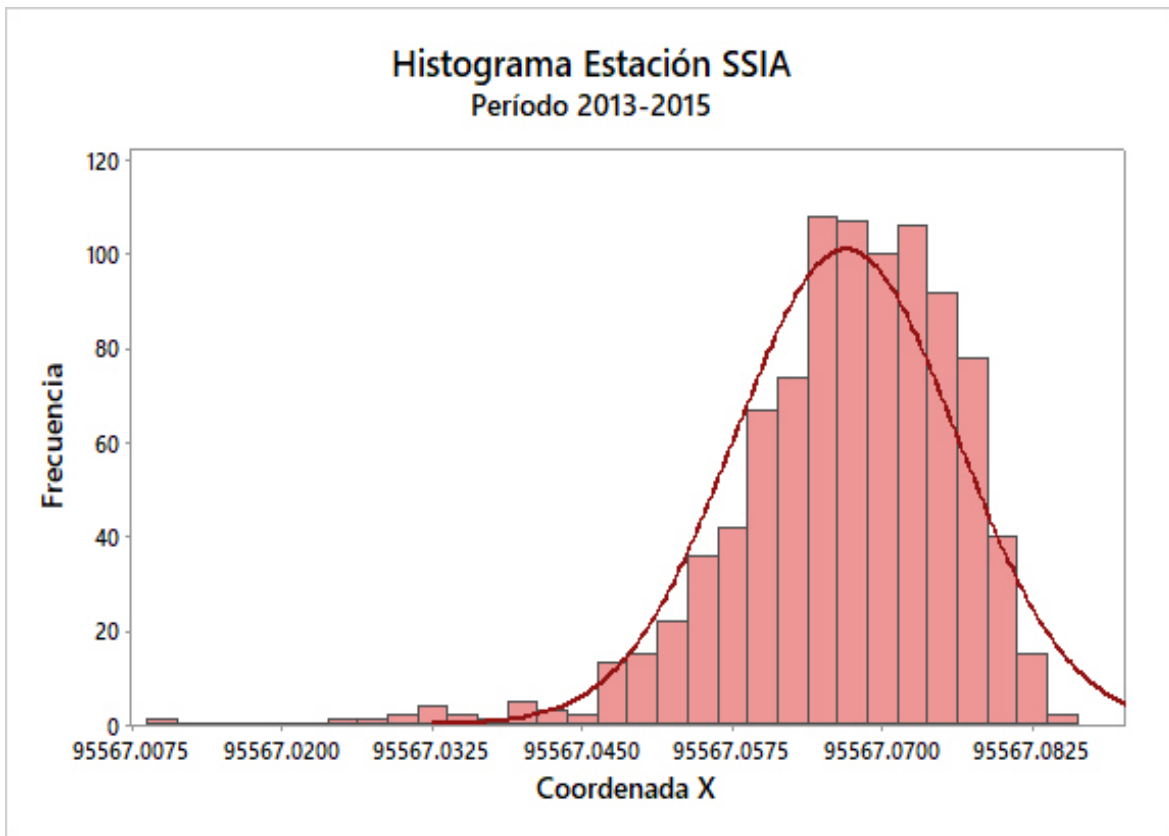


## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

### SSIA

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA X\*\*\*

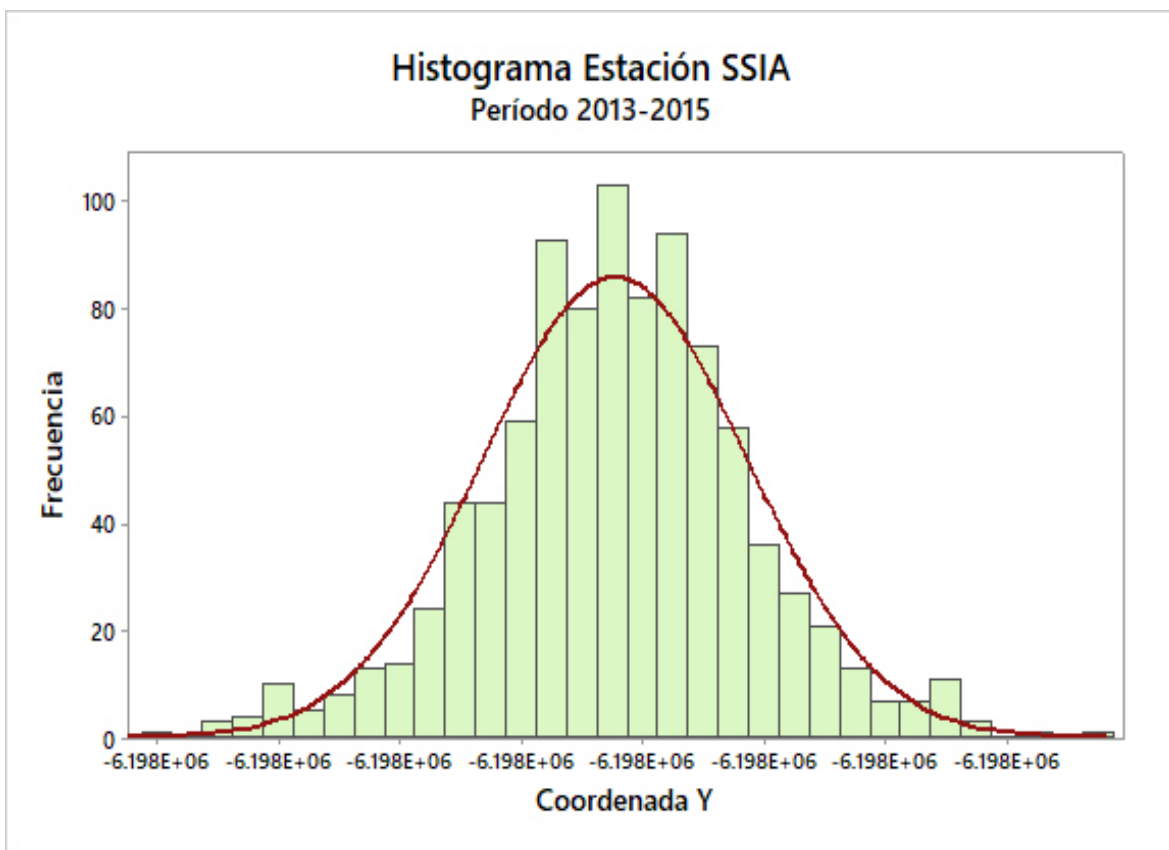
TOTAL DE DATOS : 939  
PROMEDIO : 95567.06696  
VARIANZA : 0.00009  
DESV. ESTANDAR : 0.00927  
VALOR MÁXIMO : 95567.08540  
VALOR MÍNIMO : 95567.00900  
COVARIANZA : 0.00009  
RANGO : 0.07640  
CURTOSIS : 6.05873  
OBLICUIDAD : -1.18045



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Y\*\*\*

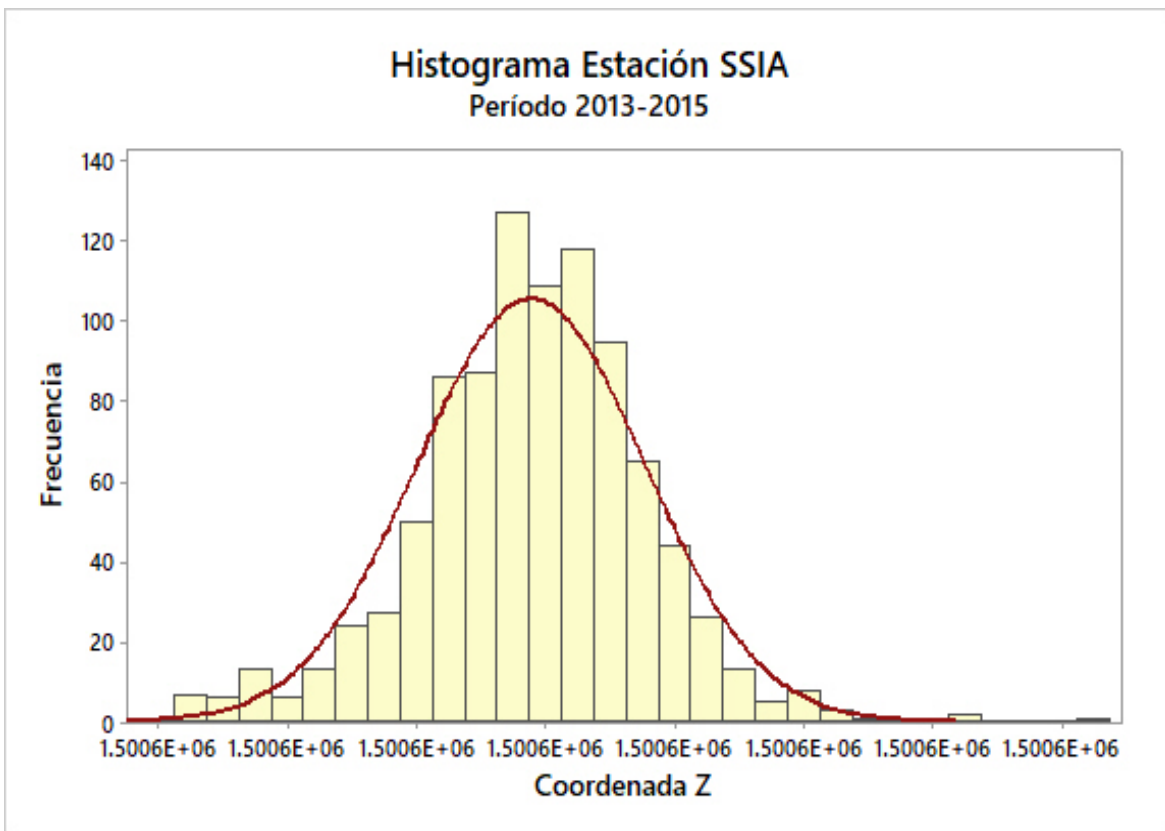
TOTAL DE DATOS : 939  
PROMEDIO : -6197785.56785  
VARIANZA : 0.00008  
DESV. ESTANDAR : 0.00872  
VALOR MÁXIMO : -6197785.53600  
VALOR MÍNIMO : -6197785.59900  
COVARIANZA : 0.00008  
RANGO : 0.06300  
CURTOSIS : 3.64684  
OBLICUIDAD : -0.07042



## Anexo 11 Resumen estadístico del procesamiento GAPS

\*\*\*RESUMEN ESTADISTICO DE COORDENADA Z\*\*\*

TOTAL DE DATOS : 939  
PROMEDIO : 1500590.58862  
VARIANZA : 0.00001  
DESV. ESTANDAR : 0.00358  
VALOR MÁXIMO : 1500590.60600  
VALOR MÍNIMO : 1500590.57700  
COVARIANZA : 0.00001  
RANGO : 0.02900  
CURTOSIS : 4.43079  
OBLICUIDAD : -0.05688



## Anexo 12 Resultado resumen de la rutina Cha-Gru

-----  
\*\*\* 1.RESUMEN CHAUVENET:  
-----

ARCHIVO:

SOLU\_BGGY\_131415

OUTLIERS ENCONTRADOS "X"

5

OUTLIERS ENCONTRADOS "Y" |

7

OUTLIERS ENCONTRADOS "Z"

3

VALOR TÍPICO CHAUVENET

3.29

FILA DE OUTLIER "X" ENCONTRADO

257.00

352.00

363.00

739.00

809.00

FILA DE OUTLIER "Y" ENCONTRADO

80.00

352.00

363.00

368.00

574.00

585.00

739.00