



Tesis Doctoral

DOCTORADO EN INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

**APLICACIONES INNOVATIVAS DEL
POSICIONAMIENTO SATELITAL A TIEMPO REAL**

María Fernanda Camisay Bande

2021

Directora: Dra. María Virginia Mackern

Codirector: Dr. Claudio Brunini

*Dedico este trabajo a mi hijo Alfredo, por motivarme a finalizar esta etapa,
a Esteban, por acompañarme y darme fuerzas en cada momento,
a mis padres y hermanos por su ejemplo de superación,
y a Virginia por su apoyo en todos estos años.*

PRÓLOGO

La presente tesis se desarrolla en cumplimiento de los requerimientos para acceder al grado académico de Doctor en Ingeniería en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, en octubre de 2020.

Esta tesis fue supervisada por la Dra. María Virginia Mackern investigadora de CONICET, docente-investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Juan Agustín Maza y por el Dr. Claudio Brunini, director del Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO) y del grupo de Georreferenciación Satelitaria de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) de la Universidad Nacional de La Plata e investigador de CONICET. Se agradece profundamente la dedicación y compromiso de cada uno de ellos en todos estos años.

La investigación fue principalmente financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), a través del otorgamiento de becas de formación Tipo I y II. Luego, se contó con el apoyo de la Universidad Nacional de Cuyo, con una beca de finalización de doctorado de la Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado (SECTYP-UNCuyo). Cabe destacar el importante aporte y apoyo por la Universidad Juan Agustín Maza, tanto desde la Facultad de Ingeniería como desde el área de Ciencia y Técnica.

Así mismo se agradece a toda la comunidad SIRGAS (Sistema de Referencia para las Américas) y en especial al grupo de trabajo SIRGAS en Tiempo Real a través de su grupo humano y de sus coordinadores Roberto Perez Rodino y Gustavo Noguera. Y a todos los compañeros del centro de análisis de atmósfera neutra CIMA, en especial a María Laura Mateo y Ana María Robin.

RESUMEN

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) han sido diseñados con el objetivo de obtener la posición de un usuario en tierra a partir de observaciones a los satélites, en Tiempo Real (RT). Sin embargo, dicha posición no puede conocerse con exactitud en el momento de la observación, ya que existen diversos errores que influyen en la señal transmitida por los satélites. Por tal motivo los servicios de posicionamiento y las diferentes técnicas o métodos de medición se han desarrollado, para así lograr mejorar la posición del observador.

Antes de la aparición de los métodos diferenciales en tiempo real, las aplicaciones RT eran limitadas, ya que solo contemplaban el posicionamiento absoluto con precisiones de decenas de metros. Por el contrario, los métodos diferenciales de post-procesamiento, fueron empleados por una gran cantidad de ciencias y aplicaciones, como la Geodesia y la Topografía, para la determinación precisa de coordenadas.

En este contexto, en el capítulo primero de esta tesis, se pretende introducir al lector sobre los sistemas de posicionamiento satelital a tiempo real y en las nuevas técnicas de observación. Se describen los métodos diferenciales RT, de código (DGPS), de fase (RTK) y las soluciones de red (Net RTK); como así también el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP). Se presentan los antecedentes y la motivación de la implementación del protocolo NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) y del formato estándar RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services), para la transmisión de datos y correcciones GNSS en tiempo real.

Las primeras aplicaciones de los sistemas de posicionamiento RT, se centraron en el posicionamiento relativo. Por ese motivo, en el capítulo 2 se describen los mensajes correctivos empleados en las técnicas DGPS, RTK y Net-RTK. Se exponen experiencias de medición y se cuantifican las precisiones de cada método. Resulta fundamental tener en cuenta el Marco de Referencia en la generación de correcciones, ya que estas técnicas permiten una georreferenciación inmediata.

En el capítulo 3 se presentan los avances y requerimientos del PPP a tiempo real, una descripción del método de cálculo y configuración del software más utilizado por la comunidad científica BNC (BKG NTRIP Client). Se relata una experiencia de monitoreo en la zona de Cuyo, Argentina, durante 6 meses de observación, y el análisis de precisión y exactitud de la técnica. Finalmente se dan recomendaciones en cuanto a su utilización para georreferenciación, teniendo en cuenta la influencia del Marco de Referencia y la época de las correcciones aplicadas.

En los siguientes capítulos, se describen en detalle dos aplicaciones innovativas del PPP: el monitoreo geodinámico y de deformaciones corticales, y el monitoreo atmosférico de la variable vapor de agua (IWV) desde la estimación del retardo troposférico (ZTD) en las señales GNSS.

En el capítulo 4, se presentan experiencias de monitoreo geodinámico frente a eventos sísmicos de moderada a alta intensidad. Se desarrolla una metodología de análisis, que permite comparar los resultados (desplazamientos) obtenidos de las observaciones GNSS con los registros sismológicos, mostrando una marcada correspondencia entre ambos registros (tanto en amplitud, como en la determinación del tiempo de llegada de las ondas sísmicas).

Se propone en el quinto capítulo, una metodología para estimar valores de ZTD y su correspondiente IWV sobre las estaciones GNSS de Argentina, con el menor retardo o latencia posible. Se desarrolla una estrategia de cálculo del IWV desde observaciones GNSS, para aplicaciones que requieren inmediatez y predicción. Para validar la estimación ZTD e IWV con PPP, se han utilizado los productos troposféricos finales de SIRGAS y las mediciones de radiosondeos.

Finalmente, en el capítulo 6 se resumen las conclusiones surgidas de cada capítulo. En función de los avances logrados en cada tema, se proponen tareas a futuro. El aprovechamiento de las actuales redes GNSS a tiempo real en las dos aplicaciones innovativas mostradas, es la contribución más significativa de esta investigación.

ABSTRACT

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) has been designed with the aim of providing the user's position on the ground from satellites observations, in Real Time (RT). However, this position cannot be known exactly at the time of observation, since there are many errors that affect the satellites signals. For this reason, positioning services and different measurement methods or techniques have been developed to improve the quality of the observer position.

Before the advent of real-time differential methods, RT applications were limited, since they only contemplated absolute positioning with accuracies of tens of meters. On the other hand, differential post-processing methods were used by a large number of sciences and applications, such as Geodesy and Land Surveying, which use satellite positioning systems as precise measurement tools.

In this context, in the first chapter of this thesis, it is intended to introduce the reader to real-time satellite positioning systems and new observation techniques. Differential RT, code (DGPS), phase (RTK) and network solutions (Net RTK) methods are described; as well as the Precise Point Positioning (PPP). The background and motivation for the implementation of the Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) protocol and the Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) standard format for the transmission of GNSS data and real-time corrections are presented.

The first applications of RT positioning systems focused on relative positioning. For this reason, Chapter 2 describes the corrective messages used in DGPS, RTK, Net-RTK techniques. Measurement experiences are exposed and the precisions of each method are quantified. It is essential to take into account the Reference Framework of the corrections, since these techniques allow immediate geolocation.

Chapter 3 presents the advances and requirements of PPP in real time. A description of the most used scientific community software, BNC (BKG NTRIP Client) is presented, its calculation method and configuration. A monitoring experience is also reported in Cuyo area, Argentina, during 6 months of observation, and the precision and accuracy of the technique. Finally, recommendations are given regarding its use for geolocation, taking into account the influence of the Reference Framework and the epoch of the applied corrections.

In the following chapters, two innovative applications of PPP are described: geodynamic and crustal deformation monitoring, and atmospheric monitoring of the

water vapor variable (IWV) from the estimation of tropospheric delay (ZTD) in the GNSS signals.

In chapter 4, geodynamic monitoring experiences are presented from moderate to high intensity seismic events. An analysis methodology is developed, to compare the results (displacements) obtained from the GNSS observations with the seismological records, showing a marked correspondence between both records (both in amplitude and in determining the arrival time of seismic waves).

In the fifth chapter, a methodology to estimate ZTD values and its corresponding IWV on GNSS stations in Argentina is proposed, with the least possible delay or latency. An IWV calculation strategy is developed from GNSS observations that can be used in applications that require real time estimation and prediction. To validate the ZTD and IWV estimation with PPP, the final tropospheric products of SIRGAS and the radiosonde measurements have been used.

Finally, chapter 6 summarizes the conclusions from each chapter. Depending on the progress made in each topic, future tasks are proposed. The utilization of the current real-time GNSS networks in the two innovative applications shown is the most significant contribution of this research.

TABLA DE ABREVIATURAS

APC: Antenna Phase Center

BNC: BKG NTRIP Client

BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

C/A: Coarse Acquisition

CODE: Center for Orbit Determination in Europe

CSRS-PPP: Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning

DGPS: Differential GPS

EGNOS: European Geostationary Navigation Overlay Service

EPN: EUREF Permanent Network

FKP: Flächenkorrekturparameter (Solución de red RTK)

GLONASS: Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema

GMF: Global Mapping Function

GNSS: Global Navigation Satellite Systems

GPS: Global Positioning System

IERS: Servicio Internacional de Rotación y Sistemas de Referencia de la Tierra

IGS: International GNSS Service

IGS03: Corrección de órbitas y relojes, transmitida por el servicio RTS

IRIS: Incorporated Research Institutions for Seismology

IWV: Intagrated Water Vapor

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NAVSTAR: NAVigation Satellite Timing And Ranging

NavIC: Navigation with Indian Constellation

NGS: National Geodetic Survey

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NTRIP: Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

MAC: Master Auxiliary Concept

PPP: Precise Point Positioning

PRC: Pseudo Range Correction

QZSS: Quasi-Zenith Satellite System Constellation

RAMSAC: Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo

RINEX: Receiver Independent Exchange Format
RT: Real Time
RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK: Real Time Kinematic
RTS :IGS Real Time Service
SAC: Seismic Analysis Code
SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
SIRGAS-RT : Proyecto SIRGAS en Tiempo Real
SMN: Servicio Meteorológico Nacional de Argentina
SSR: State Space Representation
VRS: Virtual Reference Stations
ZTD: Zenith Tropospheric Delay

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1: LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SATELITAL A TIEMPO REAL	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Técnicas de Posicionamiento en Tiempo Real	3
1.3 Formato para correcciones a Tiempo Real: RTCM	6
1.4 Métodos de transmisión de las correcciones RT: Protocolo NTRIP.....	10
1.4.1 Componentes básicos del Sistema NTRIP:.....	13
1.4.2 Tiempo de Latencia.....	15
1.4.3 Tecnologías de comunicación celular	16
1.5 Servicios de posicionamiento RT	18
1.6 Servicios de posicionamiento RT en Latinoamérica.....	25
1.6.1 Proyecto SIRGAS en Tiempo Real (SIRGAS-RT)	25
1.6.2 Casters nacionales de la región.....	27
1.6.3 Caster SIRGAS.....	27
1.7 Conclusiones	28
CAPITULO 2: NUEVAS TECNOLOGÍAS ASOCIADAS AL POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL EN TIEMPO REAL	30
2.1 Introducción.....	30
2.2 Correcciones RT para el posicionamiento diferencial	31
2.3 Correcciones de Red RTK	34
2.4 Experiencias de aplicación: DGPS y RTK (NTRIP).....	36
2.4.1 Equipamiento, configuración y comunicación a Internet.....	36
2.4.2 1° Caso de medición: Santa Rosa, Mendoza.....	37
2.5 Experiencias de aplicación: Soluciones de red (Net-RTK)	40
2.5.1 Precisiones de las soluciones de RED según la distancia entre estaciones.....	43
2.6 Los marcos de referencia en las correcciones NTRIP	44
2.6.1 Análisis del Marco de Referencia en los servicios RT regionales.....	45
2.6.2 Influencia del Marco de Referencia en el posicionamiento RT-NTRIP.....	46
2.7 Conclusiones	48
CAPITULO 3: POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO EN TIEMPO REAL.....	50
3.1 Introducción.....	50
3.2 Correcciones para el Posicionamiento Puntual Preciso.....	52
3.3 Software de cálculo PPP y configuración específica	54
3.4 Productos RTS (IGS Real Time Service) aplicados en PPP-RT	58
3.5 Monitoreo de una estación GNSS mediante PPP-RT, precisiones de la técnica	61
3.6 Los Marcos de Referencia en el PPP.....	64
3.7 Aplicación del PPP en la Georreferenciación	67
3.8 Conclusiones	69
CAPITULO 4: APLICACIONES INNOVATIVAS DEL PPP EN EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA TERRESTRE.....	71

4.1	Introducción.....	71
4.2	Monitoreo PPP de eventos sísmicos	73
4.2.1	Metodología desarrollada	73
4.2.2	Sismo de Illapel, 2015.....	75
4.2.3	Sismos de moderada magnitud.....	79
4.3	Estimación de desplazamientos sísmicos mediante PPP y comparación con datos sismológicos.....	81
4.3.1	Metodología utilizada.....	81
4.3.2	Sismo Valparaíso, 2017.....	83
4.3.3	Sismo de Ridgecrest California 2019	86
4.4	Contribución de la red RAMSAC (GNSS) a los estudios sismológicos	94
4.5	Conclusiones	96
CAPITULO 5: APLICACIONES INNOVATIVAS DEL PPP EN EL ESTUDIO DE LA ATMOSFERA.....		98
5.1	Introducción.....	98
5.2	Cálculo de ZTD con diferentes herramientas PPP (tiempo real).....	100
5.2.1	PPP con BNC.....	102
5.2.2	PPP a través del servicio canadiense en línea CSRS.....	104
5.2.3	PPP con el software BERNESE	106
5.3	Estimación del retardo cenital troposférico (ZTD) en Argentina, mediante PPP con Bernese 108	
5.3.1	Validación de ZTD estimados con PPP, con productos troposféricos de SIRGAS 110	
5.3.2	Validación ZTD-PPP en estaciones IGS.....	111
5.3.3	Validación ZTD-PPP en estaciones de radio-sondeos	112
5.4	Valores atmosféricos (presión y temperatura) para el cálculo de IWV a tiempo real	114
5.5	Cálculo de IWV desde ZTD _{PPP}	115
5.5.1	Validación de IWV en estaciones SIRGAS-CON	118
5.5.2	Validación IWV _{PPP} con observaciones de radiosondas.....	119
5.6	Optimización del cálculo ZTD _{PPP}	119
5.7	Metodología sugerida para el cálculo IWV _{PPP} a cuasi Tiempo Real.....	120
5.8	Conclusiones	121
CAPITULO 6: CONCLUSIONES GENERALES		123
6.1	Los servicios de posicionamiento satelital en Tiempo Real	124
6.2	Las técnicas de medición en tiempo real y su relación con los marcos de referencia	126
6.3	Aplicaciones innovativas del posicionamiento a tiempo real.....	127
6.4	Tareas futuras.....	129
REFERENCIAS		130
Anexo I: Mensajes RTCM 2.X.....		137
Anexo II: Mensajes RTCM 3.0		138
Anexo III: COORDENADAS DE CONTROL- Experiencia RTK-DGPS.....		139

Anexo IV: Diferencias RTK-NTRIP respecto a coordenadas de control	139
Anexo V: Diferencias DGPS-NTRIP respecto a coordenadas de control	141
Anexo VI: Experiencia NET-RTK - Ruta 80 intersección Ruta 8, Uruguay	143
Anexo VII: Experiencia NET-RTK San Jacinto, Uruguay.....	143
ANEXO VIII: Archivo de coordenadas Servicio CSRS-PPP.....	146
Anexo IX: Receptores RAMSAC-NTRIP e intervalo de registro.....	146

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Comparación de tamaño de datos según la versión RTCM.....	7
Tabla 1-2: Grupos principales en el mensaje RTCM 3.0	7
Tabla 1-3: Campos más relevantes de la base de datos RTCM 3.x	8
Tabla 2-1: Campos que contiene el mensaje 1001.....	33
Tabla 2-2: Estructura del mensaje 1006 RTCM 3.x.....	34
Tabla 2-3: Precisiones Soluciones de Red.....	44
Tabla 2-4: Servicios RT-NTRIP regionales.....	45
Tabla 3-1: Mensajes RTCM para correcciones PPP.....	53
Tabla 3-2: Correcciones a las órbitas y relojes publicados por el IGS.....	58
Tabla 3-3: Diferencias producidas en el cálculo PPP, IGS02 (izquierda) vs IGS03 (derecha)	60
Tabla 3-4: Porcentaje de valores alejados (outliers) en el monitoreo PPP.....	63
Tabla 3-5: Exactitud PPP a Tiempo Real (valores atípicos filtrados) Valores expresados en [cm]..	63
Tabla 3-6: Precisión del Monitoreo PPP-RT. Valores expresados en [cm]	64
Tabla 4-1: : Velocidad de la onda sísmica propagada en diferentes direcciones.....	78
Tabla 4-2 : Desplazamientos Resultantes Terremoto California [cm].....	90
Tabla 4-3: Coordenadas previas y posteriores al sismo de California (Fuente: coordenadas diarias ssss.cwu.final_igs14.pos, publicadas por UNAVCO).	90
Tabla 5-1: Configuración métodos de cálculo de ZTD	101
Tabla 5-2: Comparación ZTD(SIR) - ZTD(PPP-BNC) [m].....	103
Tabla 5-3: Estadísticos validación ZTDppp con respecto a ZTDigs [m], luego de la reducción del bias mensual.....	112
Tabla 5-4: Estadísticos comparación ZTD-PPP vs Radiosondeos [m], luego de la reducción del bias mensual.....	113
Tabla 5-5: Constantes de refractividad atmosférica utilizadas: Rieger (2002) " <i>Best average</i> ".....	116
Tabla 5-6: Coeficientes a y b de la ecuación 4 del modelo Tm comparado	116
Tabla 5-7: Estadísticos validación IWV(PPP) con IWV(RS) [mm].....	119

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Esquema de protocolos en las capas de Internet. Fuente: [https://www.dummies.com/wp-content/uploads/288315.image0.jpg]	11
Figura 1-2: Componentes del Sistema de comunicación NTRIP [Weber, et al. 2003]	14
Figura 1-3: Sistema NTRIP en el posicionamiento diferencial a tiempo real. Fuente: [http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/07-SesTecnicas_RTK.pdf]	15
Figura 1-4: Tiempos de latencia [Weber et al., 2003]	16
Figura 1-5: Cobertura Internet 4G América del Sur. Fuente http://opensignal.com/	17
Figura 1-6: Cobertura del servicio GDGPS (NASA). Funte: https://www.gdgps.net/images/world-small.png	18
Figura 1-7: Red IGS en Tiempo Real, servicio RTS. Fuente: http://www.igs.org/network?network=rts	20
Figura 1-8: Estaciones del servicio europeo EUREF-IP. Fuente: https://www.epncb.oma.be/_networkdata/network_status/	21
Figura 1-9: Red de estaciones Server-NTRIP españolas. http://www.ign.es/web/resources/geodesia/visorGeodesia/index.html	21
Figura 1-10: Servicio RT en California. Fuente: http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/crtn/	22
Figura 1-11: Servicio AZGPS, California	24
Figura 1-12: Servicio eGPS, Georgia	24
Figura 1-13: Capacidad instalada SIRGAS-RT.	26
Figura 2-1: Puntos elegidos para el relevamiento RT	37
Figura 2-2: Configuración DGPS-NTRIP con navegador GPS	38
Figura 2-4: Diferencias medias de coordenadas entre pos-proceso y RTK-NTRIP	39
Figura 2-3: Configuración RTK utilizada	39
Figura 2-5: Diferencias de coordenadas control vs DGPS	40
Figura 2-6: Configuración REGNA-ROU Uruguay, servicios a tiempo real, marzo de 2013.	41
Figura 2-7: Precisiones RT- Soluciones de red y puntual (UYLA)	42
Figura 2-8: Tiempo requerido para la resolución de ambigüedades- Soluciones de red y puntual (UYLA)	42
Figura 2-9: Experiencia San Jacinto	43
Figura 2-10: Diferencias horizontales, experiencia zona limítrofe Uruguay-Argentina	47
Figura 3-1: Esquema metodológico del cálculo PPP con software BNC	55
Figura 3-2: Configuración de módulo PPP en software BNC	56
Figura 3-3: Opciones específicas para el cálculo PPP	58
Figura 3-4: Solución PPP, estación MZGA (General Alvear, Mendoza), comparación utilizando productos IGS02 vs IGS03, día GPS 309 año 2014.	59
Figura 3-5: Solución PPP, estación MZAC (Mendoza Centro), comparación utilizando productos IGS02 vs IGS03, día GPS 309 año 2014.	59
Figura 3-6: Residuos monitoreo PPP	62
Figura 3-7: Estadísticos de los residuos horizontales (combinación N y E) para cada estación.	62

Figura 3-8: Residuos coordenadas PPP en MZAC, seis meses de monitoreo. Comparación datos totales (izquierda), luego de filtrar valores atípicos (derecha).	63
Figura 3-9: Combinación de correcciones CLK individuales, provenientes de los centros de análisis IGS.	65
Figura 3-10: Introducción de parámetros de transformación (ITRF2005-ITRF2008) y envío del stream (CLOCK) al caster SIRGAS-RT, con software BNC.....	65
Figura 3-11: Diferencias de coordenadas PPP, estación MZGA, utilizando corrección de orbitas y relojes referida a POSGAR07. (A) diferencias respecto a coordenadas control (época 2006,632) (B) diferencias coordenadas control actualizadas a la época de las observaciones (2014.92).	66
Figura 3-12: Configuración para almacenar correcciones de orbitas y relojes con BNC.	68
Figura 4-1: Sismo Illapel 2015, localización del epicentro y estaciones GNSS analizadas.....	75
Figura 4-2:Desplazamiento de la estación CSLO (CASLEO, San Juan). Coordenadas instantáneas por PPP, día GPS 259-2015.....	76
Figura 4-3: Materialización de estaciones permanentes GNSS, CSJ1 (izquierda), CSLO (derecha)..	76
Figura 4-4: Desplazamientos en la coordenada ESTE producidos por el terremoto de Illapel 2015. La línea negra vertical indica el momento de ocurrencia del sismo en el epicentro.....	77
Figura 4-5:Localización del epicentro sismo Illapel 2015 y estaciones GNSS analizadas. Direcciones estudiadas.....	77
Figura 4-6: Tiempo de llegada de la onda sísmica a las diferentes estaciones, desde la ocurrencia del terremoto.	78
Figura 4-7:Movimiento instantáneo de la estación CSJ1 durante el sismo.	79
Figura 4-8: Ubicación sismo San Juan, enero de 2021.....	80
Figura 4-9: Desplazamiento estación CSLO, sismo San Juan 19/01/2021	80
Figura 4-10:Redes sismológicas de Chile, disponibles en IRIS	81
Figura 4-11:Estaciones GNSS y sismológicas monitoreadas, sismo Valparaíso 2017	83
Figura 4-12: Serie temporal estación BN05, día del sismo Valparaíso 2017.....	84
Figura 4-13: Desplazamientos co-sísmicos Sismo Valparaíso 2017, componente Este.....	84
Figura 4-14: Comparación registro GNSS BN05 (arriba) y sismológicos VA01 (abajo). Componente Norte. Sismo de Valparaíso, 2017.....	85
Figura 4-15: Comparación registros GNSS y sismológicos, llegada de las ondas sísmicas S y P, y ondas superficiales durante el sismo de Valparaiso.	86
Figura 4-16: Sismo California (6/7/2019). Ubicación del epicentro, estaciones GNSS utilizadas....	87
Figura 4-17: Serie temporal estación CCCC, ubicada a 25 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC).	88
Figura 4-18:Serie temporal estación P595, ubicada a 20 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC)	88
Figura 4-19: Series temporal estación P570 ubicada a 60 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC).....	89
Figura 4-20: Series temporal estación P580 ubicada a 45 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC).....	89

Figura 4-21: Validación DR con respecto a las series UNAVCO.....	91
Figura 4-22: Comparación coordinada “este” entre la estación sismológica LRL y la estación GNSS, CCCC. Primeras tres señales: aceleración, velocidad y desplazamiento LRL, cuarta señal: desplazamiento GNSS.....	93
Figura 4-23: Intervalos de registro High-rate de las estaciones de la red RAMSAC.....	94
Figura 4-24: Red Coco-Net Caribe [https://coconet.unavco.org/lib/images/coconet-map.png].....	95
Figura 4-25: Distribución de estaciones sismológicas (rojo) y GNSS (azul) en Argentina.....	96
Figura 5-1: Estaciones GNSS utilizadas para el cálculo piloto de ZTD _{PPP} , febrero-marzo 2016	101
Figura 5-2: Estimación ZTD con BNC. Estaciones: MZAC (Mendoza Centro); CORD (Córdoba); GUAY (Villaguay, Entre Rios); EBYP(Posadas, Misiones).....	104
Figura 5-3: Diferencias ZTD (SIR) - ZTD (PPP-CSRS) [m]	105
Figura 5-4: Estimación ZTD con servicio CSRS. Estaciones: MZAC (Mendoza Centro); CORD (Córdoba); GUAY (Villaguay, Entre Rios); EBYP(Posadas, Misiones).....	106
Figura 5-5: ZTD estimados por la técnica PPP con Bernese (rojo) y comparado con posprocesamiento de SIRGAS (azul). Estaciones: MZAC (Mendoza Centro); CORD (Córdoba); GUAY (Villaguay, Entre Rios); EBYP(Posadas, Misiones).....	107
Figura 5-6: Estaciones GNSS utilizadas para el cálculo ZTD por PPP con Bernese, 2019.....	109
Figura 5-7: Coeficientes de correlación ZTD _{SIR} -ZTD _{PPP}	109
Figura 5-8: Serie anual (2019) ZTD estimado con Bernese PPP (azul) y por SIRGAS pos-proceso (rojo). Estaciones: AZUL (Buenos Aires); CATA (Catamarca); MZGA (Mendoza); EBYP(Posadas, Misiones).....	110
Figura 5-9: Comparación ZTD _{SIR} vs ZTD _{PPP} , aplicada la reducción de bias [m]	111
Figura 5-10: Valores estadísticos comparación ZTD-PPP vs ZTD-IGS [m]	112
Figura 5-11: Localización de estaciones GNSS y meteorológicas por radio de cercanía.	115
Figura 5-12: Serie anual (2019) IWV estimado con Bernese PPP (azul) y por SIRGAS pos-proceso (rojo).....	117
Figura 5-13: Mapas de IWV _{ppp} . Izquierda: estación cálida (principios de otoño). Derecha: estación fría (invierno).	118
Figura 5-14: Comparación IWV SIR vs IWV PPP [mm]	119

CAPITULO 1: LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SATELITAL A TIEMPO REAL

1.1 Introducción

Los sistemas globales de navegación satelital agrupados bajo la sigla GNSS (del inglés Global Navigation Satellite Systems), se hallan claramente ubicados entre las tecnologías novedosas de mayor impacto [Brunini y Azpilicueta, 2007]. Todos estos sistemas han tenido, tienen y tendrán como principal objetivo y aplicación la Navegación. Esta, necesita la determinación inmediata de la posición, lo que se denomina Posicionamiento en Tiempo Real, prescindiendo de las grandes exigencias de precisión de la Geodesia Espacial [Dalda et al., 2010].

Existen en la actualidad diversos sistemas de navegación, el primero en desarrollarse fue el sistema TRANSIT, creado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para la Marina norteamericana, y que en 1967 pasó a estar operativo para aplicaciones civiles. El mismo utilizaba el efecto Doppler, a través de mediciones de variación de frecuencia a satélites TRANSIT, para obtener datos de posicionamiento. De este modo la cuenta Doppler entre dos posiciones concretas del satélite permitía calcular la diferencia de distancia entre dos posiciones del satélite y el receptor. En 1992 contaba con trece satélites orbitando con trayectorias polares y circulares a una altitud de 1100 km, de los cuales 7 se encontraban en uso y los restantes como reserva. Esta constelación fue reemplazada por satélites NOVA, de los cuales sólo fueron construidos tres debido a que el desarrollo del sistema NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging), o simplemente GPS (Global Positioning System) lo reemplazó a partir de 1994. De allí se dice que TRANSIT fue el antecesor de GPS, sustituyendo el sistema Doppler, frente a la necesidad de proporcionar mejor posicionamiento a tiempo real [Mena, 2008].

El sistema estadounidense GPS, está formado por una constelación de satélites NAVSTAR de cuatro generaciones. Los satélites de la primera generación, fueron lanzados entre 1978 y 1985, cubriendo el territorio de los Estados Unidos. La segunda generación se lanzó luego de 1991, y las subsiguientes se realizaron para sustituir aquellos satélites que estaban fuera de funcionamiento. De esta forma, hacia fines de 1993 se completó la constelación, formada por 24 satélites con cobertura global. Como es sabido, cada satélite transmite en dos frecuencias portadoras denominadas L1 y L2, las que transportan dos códigos más el mensaje de navegación; actualmente algunos satélites transmiten también la frecuencia L5. Luego la posición de un punto se puede conocer con una precisión mayor a 10 metros, cuando se utiliza el código civil C/A (Coarse Acquisition) de manera absoluta o aislada. Mientras que, con métodos relativos y con mediciones de la fase portadora se pueden alcanzar precisiones milimétricas. Cabe aclarar, que desde 2014 se encuentran disponibles tres nuevas señales L2C, L5 y L1C, que mediante el programa CNAV (Civil Navigation) permite mejorar la navegación civil [<https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>].

Casi simultáneamente a GPS, se desarrolló el sistema ruso GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema) que se encuentra operativo desde principios de 1996. Luego de la desintegración de la URSS (Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas), la Federación Rusa tomó el control sobre la constelación y decidió continuar con su desarrollo. El programa fue dividido en 3 fases, proponiendo la primera restauración de 18 satélites e introduciendo un vehículo espacial mejorado con más vida útil (de una inicial de 3 años en la primera generación de satélites se pasó a 7 años en los de segunda generación) denominados GLONASS-M. En tanto que la segunda etapa (2006-2011), planificó llevar el sistema a un estado completamente operativo con 24 satélites situados en tres planos orbitales y siguiendo una órbita inclinada de 64.8°, e introdujo otra mejora en los satélites llamados GLONASS-K, siendo más pequeños y más precisos.

La constelación de GLONASS se mueve en órbita alrededor de la Tierra con una altitud de 19.100 km algo más bajo que el GPS (20.200 km) y cada satélite tarda aproximadamente 11 horas y 15 minutos en completar una órbita. Al igual que GPS, emiten dos frecuencias portadoras moduladas por un código de precisión, uno estándar y el mensaje de navegación. Los códigos se utilizan para posicionamiento absoluto en tiempo real, alcanzando 50 a 70 metros en precisión estándar (SP) y siendo diez veces mejor con posicionamiento de alta precisión (HP).

A septiembre de 2020, GLONASS cuenta con una constelación de 27 satélites: 23 operativos, 2 en mantenimiento, 1 en reserva orbital y 1 en pruebas de vuelo. Mientras que GPS, consta de 32 satélites: 30 activos, 1 en estado de ingreso al sistema y 1 en mantenimiento [www.glonass-iac.ru].

A su vez, se están desarrollando otros sistemas de posicionamiento como es el caso del proyecto europeo GALILEO o el sistema BeiDou, de origen chino. Este último, comenzó funcionando como un servicio de posicionamiento local para la República de China, funcionando con satélites geoestacionarios que daban cobertura en dicha zona y se conoció como la primera generación BeiDou-1. La segunda etapa de este sistema, aumentó la cantidad de satélites y la cobertura, ofreciendo posicionamiento para la región de Asia-Pacífico, entre otros servicios. Desde el 31 de julio de 2020, se encuentra activa y completa la tercera etapa, conocida como BDS-3, ofreciendo un servicio global de navegación a partir de 24 satelitales de órbita media (MEO) [<http://en.beidou.gov.cn/>].

Por otra parte, el proyecto Galileo ha sido diseñado en contraste con GPS y GLONASS, para aplicaciones netamente civiles. Intentará solucionar problemas de cobertura, como el que se presenta en la parte norte de Europa, dada la actual inclinación de las órbitas respecto al Ecuador. Así como también informar frente a posibles errores o fallas, garantizando estabilidad y seguridad del sistema. Este sistema se proyecta con tres niveles de cobertura: uno global, uno regional para Europa y otro local para aeropuertos y zonas urbanas. Además, se ofrecerán tres tipos de servicios distintos: uno de acceso abierto, gratuito y básico; un servicio de acceso controlado de nivel 1, por el que se deberá pagar una tarifa, para aplicaciones comerciales y profesionales que requieren cierta garantía del servicio; y finalmente, un servicio con acceso controlado de nivel 2, pago también y cuyas aplicaciones no permiten interrupciones o distorsiones en la recepción de la señal. Respecto a las precisiones,

se estima para el posicionamiento absoluto una media de 4 m en horizontal y tan solo 8 metros en vertical [Mena, 2008].

Si bien se esperaba que para el año 2010 se encontrara operativo, problemas económicos y políticos de la Unión Europea han provocado atrasos en los plazos de este proyecto. Los dos primeros satélites europeos de navegación, GIOVE-A y -B, fueron lanzados en los años 2005 y 2008, respectivamente, con el objetivo de reservar las frecuencias asignadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y de probar en órbita la tecnología desarrollada para la nueva constelación. Luego a fines de 2011 se lanzaron los dos primeros satélites del programa y el 12 de octubre de 2012 los dos siguientes, lo que confó la constelación mínima de cuatro satélites completamente operativa de este sistema [www.esa.int]. A marzo de 2021, ya se encuentran orbitando 26 satélites, y se espera para 2024 se haya lanzado la segunda generación de satélites Galileo [<https://galileognss.eu/category/galileo-space-segment/>].

Por lo tanto, los actuales sistemas operativos globales como GPS, GLONASS, GALILEO y BeiDou conforman hoy los GNSS, e incluyen a los proyectos venideros. Sin embargo, aún existen algunos problemas de integración, como por ejemplo la transformación continua de datum que se debe hacer entre GPS y GLONASS por no referir a un sistema de referencia común. No obstante, existen en la actualidad receptores que permiten la recepción de señal en diversos sistemas, es decir, vienen preparados para recibir las frecuencias que emiten los satélites GPS, GLONASS, Galileo y Beidou. Cabe mencionar que existen otros sistemas de navegación regionales, como QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) servicio que permite posicionamiento preciso en la Asia y Oceanía. Como así también el sistema NavIC (Navigation with Indian Constellation), que brinda servicios para la región de India [<http://mgex.igs.org/>].

1.2 Técnicas de Posicionamiento en Tiempo Real

Los sistemas de navegación satelital fueron diseñados con el objetivo de proporcionar la posición de un usuario en tierra a partir de observaciones a los satélites. Sin embargo, dicha posición no puede conocerse con exactitud en el momento de la observación, ya que existen diversos errores que influyen en la señal transmitida por los satélites. Por tal motivo se han desarrollado las diferentes técnicas de posicionamiento con el objetivo de mejorar la posición del observador.

Existen diversos métodos y técnicas de posicionamiento. Una primera clasificación de las técnicas podría comprender aquellas que permiten obtener la posición en el instante de observación, denominadas técnicas en tiempo real o “RT” (del inglés Real Time), en contrapartida con aquellas que necesitan un cálculo posterior o “pos-procesamiento”. Dicha clasificación estuvo íntimamente ligada con la precisión, ya que las técnicas a tiempo real resultaban ser mucho menos precisas que las de pos-procesamiento [Mena, 2008].

Otro criterio de clasificación podría contemplar el tipo de posicionamiento, diferenciando el posicionamiento absoluto del relativo. En el primer caso un único receptor calcula su posición solamente en función de las observaciones realizadas a los satélites, mientras que, en el método relativo o diferencial, se necesitan al menos dos receptores midiendo simultáneamente, con el objeto de reducir los errores de la señal (que afectan de forma semejante a ambos receptores).

Antes de la aparición de los métodos diferenciales en tiempo real, las aplicaciones RT eran limitadas ya que solo contemplaban el posicionamiento absoluto con precisiones de decenas de metros. Por el contrario, los métodos de pos-procesamiento fueron utilizados por una gran cantidad de ciencias y aplicaciones, como la Geodesia y la Topografía, que utilizan los sistemas de posicionamiento satelital como herramientas de medición precisa.

Finalmente, en función del observable que utilizan para el cálculo de la posición, las técnicas de posicionamiento podrían clasificarse según utilicen, los códigos o las fases portadora de la señal satelital. Detalles sobre los observables de la señal pueden ser encontrados en Seeber (2003).

De esta manera, el *posicionamiento absoluto con código a Tiempo Real*, es la técnica más sencilla y más utilizada por los usuarios de los sistemas de navegación. Se realiza con un único receptor y consiste en la solución de una intersección inversa de todas las pseudo-distancias satélite-receptor observadas. Para el caso del sistema GPS, desde que la disponibilidad selectiva fue desactivada, un observador aislado puede conocer su posición con un radio de error de 10 a 15 metros. Es el tipo de posicionamiento que utilizan los vehículos y millones de usuarios en sus teléfonos celulares para ubicarse, o llegar a un determinado lugar. Mientras que esta precisión puede ser adecuada para algunas aplicaciones como la navegación, existen muchas otras que necesitan conocer de manera más precisa la posición del observador [RTCM SC No 104, 2004].

Posteriormente aparecieron las denominadas *técnicas de posicionamiento diferencial a tiempo real*. Surgió primero el concepto de posicionamiento diferencial GPS con mediciones de *código* en tiempo real. La técnica se denominó **RTDGPS** (del inglés "Real Time Differential GPS") o simplemente *DGPS* y para implementarla, el receptor remoto debe recibir correcciones a sus propias mediciones, generadas y emitidas por una base, en el instante de medición. Dichas correcciones son transmitidas, desde la base al remoto, por algún sistema de comunicación, principalmente de radio. El posicionamiento se realiza resolviendo sistemas de simples diferencias, donde las incógnitas son las tres coordenadas de los puntos y el estado del oscilador de los receptores en cada época. Esta técnica permite mejorar ampliamente la precisión del posicionamiento absoluto de código, incluso en distancias base-remoto mayores a 200 km, ofreciendo una precisión cercana al metro y en algunos casos decimétrica [Dalda et al., 2010].

Las correcciones recibidas por el receptor pueden ser de dos tipos: correcciones a las pseudodistancias satélite-receptor, denominadas PRC (Pseudo Range Correction) o correcciones a las coordenadas. Las primeras son generadas para cada pseudodistancia observada, comparándolas con las pseudodistancias teóricas calculadas a partir de la posición conocida de la estación base; estas correcciones y su variación en el tiempo (RRC, Range Rate Correction), son calculadas época por época para cada uno de los satélites observados. Luego el receptor remoto aplica dichas correcciones sobre los satélites que esté utilizando para calcular su posición. Mientras que las segundas son directamente diferencias o incrementos en las coordenadas (ΔX , ΔY , ΔZ), calculadas en función de la coordenada conocida de la estación base; luego el receptor remoto aplica dicha corrección directamente a su posición. El método es más sencillo, pero su aplicación no es rigurosamente correcta si la base y el móvil no observan los mismos satélites [Dalda et al., 2010].

Subsiguientemente aparecieron las técnicas de posicionamiento diferencial a tiempo real considerando las mediciones de *fase*. La técnica se denominó *RTK* (del inglés “Real Time Kinematic”) y permite posicionar a un receptor estático o en movimiento (de allí el nombre “kinematic”) con una precisión de pocos centímetros en tiempo real [Teunissen, 1995; Kim y Langley, 2000]. El concepto es idéntico al posicionamiento relativo convencional con pos-procesamiento, pero en este caso el cálculo es realizado de forma inmediata luego de la recepción de las observaciones, obteniendo las coordenadas corregidas en el momento de medición. Para ello, se incorporan los algoritmos de cálculo de los programas comerciales de pos-proceso en las controladoras de los receptores, y tanto el receptor base como el remoto deben estar equipados con un sistema de comunicación.

En este caso, el receptor remoto debe recibir además de correcciones, las observaciones de código y fase de la estación base. De esta manera el remoto podrá realizar un posicionamiento diferencial en el instante posterior a la observación y obtener en el campo, la posición corregida. Esta técnica resultó ser sumamente productiva, ya que permite relevar y replantear numerosos puntos en forma precisa a tiempo real. Sin embargo, necesita un medio de comunicación entre la estación base y el remoto, así como también respetar cierta distancia limitante entre ambos equipos (la cual depende del tipo de enlace de comunicación).

Cambiando totalmente el concepto, a finales de 1990, aparece el *Posicionamiento Puntual Preciso PPP*, que permite obtener coordenadas precisas, pero mediante posicionamiento absoluto.

El término posicionamiento puntual se refería históricamente a la estimación de coordenadas de un receptor analizando la información de pseudodistancia y fijando los parámetros orbitales a los valores transmitidos en el mensaje de navegación. Luego la calidad de los resultados se limitaba al ruido inherente del código o pseudorango (no mejor que ± 40 cm con código P y ± 3 m para código C/A), a la precisión de los parámetros orbitales (algunos metros) y a la calidad en los relojes GPS (de unas decenas de metros) [Zumberge y Bertiger, 1996]. Luego al combinar la fase portadora y el código, y mejorar la precisión de los parámetros satelitales, a unos pocos centímetros, se pudo obtener precisiones en las coordenadas semejantes a las del posicionamiento diferencial [Zumberge et al., 1997a].

El aumento en la cantidad de redes de estaciones GNSS permanentes en todo el mundo permitieron el desarrollo de correcciones satelitales precisas, en particular correcciones a las órbitas y a los relojes de los satélites. Estas correcciones hicieron posible el posicionamiento de alta precisión con un solo receptor [Zumberge et al., 1997a ; Zumberge et al., 1997b].

La técnica PPP utiliza observaciones de fase de portadora (sin realizar ni simples, ni dobles, ni triples diferencias), además de las observaciones de código, que junto con órbitas y relojes satelitales precisos, permiten lograr precisiones en el posicionamiento absoluto de unos pocos centímetros [Kouba y Heroux, 2000; Witchayangkoon, 2000; Abdel-Salam, 2005]. Es una técnica de posicionamiento puntual atractiva, que complementa la técnica de posicionamiento relativo existente. Este método de posicionamiento elimina la necesidad de que el receptor móvil se encuentre en las cercanías del receptor base. Además, las soluciones PPP están directamente relacionadas con el marco de referencia global en el que se encuentran las órbitas de los satélites, solución IGS correspondiente a la época de observación.

En la actualidad, gracias a la disponibilidad on-line de las observaciones del receptor y de las correcciones a las orbitas y relojes satelitales, PPP puede ser implementado a tiempo real. Para poder obtener la posición de un observador corregida mediante PPP, se necesitan entonces tres flujos de datos: las efemérides de los satélites, las correcciones a dichas órbitas y relojes y las propias observaciones del receptor en cuestión.

El International GNSS Service (IGS), ofrece diversos productos para este fin, siendo los más utilizados las efemérides transmitidas a tiempo real y las correcciones a las efemérides calculadas por los centros de análisis de dicho servicio.

Si bien los tipos de posicionamiento no han cambiado y se han mantenido en el tiempo, nos encontramos en un escenario donde prevalecen las técnicas de posicionamiento que permiten determinar coordenadas precisas a tiempo real. Considerando la precisión, el posicionamiento diferencial de fase RTK se encuentra en el primer lugar, luego le sigue PPP, y finalmente el posicionamiento diferencial de código DGPS. Sin embargo, estas nuevas técnicas exigen nuevas tecnologías asociadas a la comunicación.

1.3 Formato para correcciones a Tiempo Real: RTCM

Las correcciones diferenciales se crearon para mejorar la precisión de las coordenadas de los usuarios en tiempo real. El objetivo primordial de estas correcciones, es reducir la influencia de los errores producidos por la disponibilidad selectiva (desactivada desde 2000), por la atmósfera (refracción ionosférica y retardo troposférico), errores en las efemérides y en los relojes de los satélites. Descripción de los principales errores del posicionamiento pueden encontrarse en Leick (2004).

A pesar de estas ventajas, la utilización de correcciones RT no tuvo un gran desarrollo hasta que no existió un estándar en la transmisión de datos.

En la técnica DGPS, con soluciones submétricas, se adoptó desde el principio el formato definido por la organización internacional "RTCM" (Radio Technical Commission for Maritime Services). Dentro de esta comisión existe un comité especial, el RTCM-SC 104 (RTCM Special Commite 104), encargado de establecer estándares respecto al posicionamiento diferencial (DGPS). De esta forma, el RTCM-SC 104 define los diversos tipos de mensajes que contienen datos e información de las estaciones de referencia y del sistema [RTCM SC No 104, 2010]. Como consecuencia, hoy en día, este formato se encuentra disponible prácticamente en todos los navegadores y receptores GPS.

Sin embargo, respecto a las correcciones de fase, no se estableció desde un comienzo la utilización de este formato. En contrapartida, existían en la industria una pluralidad de formatos de corrección RTK. Los formatos de los mensajes eran completamente diferentes según la marca del receptor que los generaba y cada estación base transmitía las correcciones en su propio lenguaje, haciendo prácticamente imposible trabajar en tiempo real utilizando diferentes marcas de receptores GPS.

Viendo la necesidad de aprovechar la misma base por receptores de diferentes marcas, se hizo notorio el requerimiento de un formato estándar que permitiese el intercambio. Luego, la comisión RTCM creó una nueva versión de su formato, incorporando correcciones a la fase portadora.

De esta manera, el formato RTCM se volvió un estándar en la transmisión de correcciones RT y se ha ido perfeccionando en sus diferentes versiones. Solo por nombrar las principales características, encontramos que la primera versión 2.0 incluía únicamente correcciones al código observado. Luego en la versión 2.1, se incorporan las correcciones de fase. Posteriormente en la 2.2, se incluyen los observables y correcciones para el sistema GLONASS. Y en la versión 2.3 se agrega la definición e información de las antenas. Por último, la 3.0, además de cambiar su estructura, agrega correcciones de Red RTK (Net-RTK) [RTCM SC No 104, 2013].

Las versiones 2.x (2.0, 2.1, 2.2 y 2.3) del formato RTCM, están compuestas por 64 mensajes binarios, que se transmiten a modo de flujo o “streaming”, de allí que los datos transmitidos suelen llamarse “streams”. El formato de los mensajes consiste en secuencias de palabras de 30 bits. Cada mensaje contiene cabecera o encabezado y cuerpo. La cabecera está compuesta por dos palabras: la primera es fija y contiene lo que se denomina preámbulo (preamble): el tipo de mensaje y el identificador de la estación de referencia; la segunda palabra contiene la marca de tiempo, el número de secuencia, la longitud de mensaje y la salud o estado de la estación de referencia. En el cuerpo se encuentra toda la información para cada tipo de datos. El mensaje completo resulta entonces un archivo binario compactado ideal para procesamiento en tiempo real [RTCM SC No 104, 2010]. La descripción de cada uno de los mensajes RTCM 2.x se puede encontrar en el **Anexo I**.

La versión RTCM 3.0 y sus posteriores (3.x), cambia sustancialmente respecto a sus antecesoras. La estructura del formato se describe como una base de datos y la información que se envía son solo los campos de dicha base. El propósito del cambio fue que los datos pudiesen distribuirse a múltiples usuarios (broadcast) y con menor tamaño que las versiones anteriores. Por lo tanto, se reduce el tamaño de la transferencia de datos, respecto a las versiones RTCM anteriores, como se muestra en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Comparación de tamaño de datos según la versión RTCM

Versión	Transferencia	Contenido
RTCM 2.0	0.5 kbit/s	DGPS
RTCM 2.1-2.3	5 kbit/s	DGPS+RTK
RTCM 3.0	2 kbit/s	DGPS+RTK+NetRTK

En la versión 3.x, los tipos de mensajes se encuentran estructurados en diferentes grupos. Luego el usuario utilizará el grupo de mensajes, de acuerdo al tipo de receptor que posea y a la finalidad que se persiga. De todas formas, está estandarizado que para aplicaciones RTK, por ejemplo, toda estación base debe transmitir al menos un mensaje en los grupos principales: observables, coordenadas de la estación e información de antena (Tabla 1-2)

Tabla 1-2: Grupos principales en el mensaje RTCM 3.0

GRUPOS	SUB-GRUPO	TIPO DE MENSAJE
Observables	L1 GPS	1001

	1002
L1/L2 GPS	1003
	1004
L1	1009
GLONASS	1010
L1/L2	1011
GLONASS	1012
Coordenadas de las estaciones	1005
	1006
Descripción de Antena	1007
	1008

Los parámetros que se transmiten en los mensajes son campos de la base de datos. Existen más de 400 campos disponibles que se repiten en todos los mensajes y se identifican como: DF(número), por ejemplo DF001, DF050, etc. Cada tipo de mensaje (1001, 1002, etc.) contendrá unos u otros campos según la información que se trasmite. En la Tabla 1-3, se detalla el contenido de los campos más relevantes para posicionamiento RTK.

Tabla 1-3: Campos más relevantes de la base de datos RTCM 3.x para RTK

Nº Campo	Descripción
DF001	Reservado
DF002	Nº Mensaje
DF003	ID E.P.
DF004	Tiempo GPS
DF010	Indicador de código GPS L1: 0=C/A, 1=P
DF011	GPS L1 Pseudodistancia
DF012	GPS L1 Fase- L1 Pseudodistancia
DF016	Indicador de código L2
DF017	GPS L1-L2 Diferencia en pseudodistancias
DF018	GPS L2-L1 Fase-Pseudodistancia

Luego los campos numerados desde el 34 al 50, se comportan de la misma manera, pero para el Sistema GLONASS. El detalle de todos los mensajes que componen el formato RTCM 3.x, se puede ver en el **Anexo II**.

Por otra parte, debido a la mayor disponibilidad de señales GNSS, se ha creado el mensaje o versión MSM (Multiple Signal Message), con el objeto de obtener la máxima compatibilidad con el formato RINEX 3, transmitir la información esencial incorporando nuevas señales GNSS, y convertirse en un mensaje universal para los sistemas de navegación existentes y futuros [RTCM SC No. 104, 2013]. Estos mensajes MSM, tienen una estructura semejante a los RTCM 3.0, y están agrupados según diversas aplicaciones y transmiten diferentes tipos de información, tal como se detalla en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: Aplicaciones e informacion mensajes MSM

	Descripción	Aplicación	Nº Mensaje RTCM				
			GPS	GLONASS	Galileo	QZSS	BDS
MSM1	GNSS códigos o pseudorangos (comprimidos)	DGNSS	1071	1081	1091	1111	1121
MSM2	GNSS observaciones de fase (comprimidas)		1072	1082	1092	1112	1122
MSM3	GNSS códigos y fases (comprimidas)	RTK	1073	1083	1093	1113	1123
MSM4	Códigos y Fases GNSS (completos) y CNR (carrier-to-noise ratio)		1074	1084	1094	1114	1124
MSM5	Códigos , Fases y tasas de cambio (rate) completos y CNR (carrier-to-noise ratio)	Compatibilidad RINEX	1075	1085	1095	1115	1125
MSM6	idem 4 pero con mayor resolución	RTK extendido y NetRTK			1096	1116	1126
MSM7	idem 5 pero con mayor resolución	Compatibilidad RINEX extendida	1077	1087	1097	1117	1127

Resumiendo, la transmisión de datos y correcciones GNSS se realiza actualmente, en un único formato denominado RTCM, del cual existen distintas versiones, que contiene distintos tipos de mensajes. La versión 2.x (2.1, 2.2. y 2.3) está compuesta por 64 “tipos de mensajes” diferentes, donde cada uno contiene información de alguno de los observables o correcciones GNSS, como por ejemplo el mensaje 1 contiene las correcciones PRC (Ver Anexo I). En la versión 3.0 se incorpora el concepto de “base de datos” con “campos” que se repiten para todos los tipos de mensajes. Cada mensaje contendrá los campos que correspondan según los datos que se quieran transportar, es decir no incluirá los 57 campos, sino sólo los que correspondan al tipo de mensaje. Finalmente, debido a la disponibilidad de nuevas señales GNSS, se han diseñado los mensajes MSM, multi señal, para garantizar una completa compatibilidad con el formato RINEX 3, y universalizar el formato a todos los GNSS actuales y futuros.

1.4 Métodos de transmisión de las correcciones RT: Protocolo NTRIP

Considerando ahora el medio de transmisión, desde sus orígenes las técnicas RT han utilizado enlaces radiales para el envío de correcciones, mediante radio transmisores. Las tecnologías más utilizadas son: UHF (Ultra High Frequency) en frecuencias de 300 MHz a 3 GHz; y VHF (Very High Frequency) con frecuencias de 30 MHz hasta 300 MHz.

Este tipo de enlace es muy confiable pero su alcance está limitado por la potencia de los radiotransmisores. Por tal motivo, la distancia base-móvil es un factor limitante, así como también las posibles interferencias que hubiese en el terreno. Esta limitación, constituyó la razón principal para investigar nuevas formas de transmisión de la corrección.

Hacia fines de los 90, frente al gran desarrollo de las aplicaciones de Internet, capaces de transferir datos mediante paquetes IP (Internet Protocol), la transmisión de correcciones GPS mediante Internet y redes de telefonía móvil IP se convirtió en una muy buena alternativa frente al uso de los enlaces de radio y las redes clásicas terrestres de radiodifusión [Márquez, 2007].

De esta manera desde el año 2003, se ha comenzado a utilizar el protocolo NTRIP (del inglés "Networked Transport of RTCM vía Internet Protocol"), para la transmisión de correcciones y datos GNSS en formato RTCM, a través de Internet. Fue desarrollado por la agencia alemana de cartografía y geodesia, BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie). NTRIP es un protocolo de internet genérico, basado en el protocolo de transferencia de hipertexto HTTP/1.1 [Weber et al., 2003; Weber et al., 2005].

A continuación, se describen las características principales de Internet, para entender luego los detalles del protocolo NTRIP.

Desde sus comienzos, Internet fue diseñado bajo un modelo de capas o niveles. El modelo OSI (Open System Interconexion) fue uno de los primeros en aparecer, conformado por 7 capas [Zimmerman, 1980]:

1. Capa Física: se refiere al cableado, a los conectores. La transmisión eléctrica contiene bits sincronizados que permiten luego generar el flujo de información (junto con los datos se transmite el reloj o tiempo de los mismos).
2. Capa de Enlace: se le llama red subyacente, conecta 2 computadoras o entidades entre si. Es el equivalente a la red local de una oficina u hogar, cuando hay más de una computadora conectada.
3. Capa de Red o Capa IP: es la encargada de direccionar un paquete de datos de una red (subyacente) a otra (remota). Maneja las direcciones IP¹ a partir de los routers o gateways.

¹ Las direcciones IP son asignadas a cada usuario por el IANA (Internet Assigned Numbers Authority). La primera versión IPv4, consiste en número de 32 bits, lo que significa que solo pueden existir 2^{32} direcciones. Como todos los dispositivos deben tener una única dirección IP para que la comunicación por internet sea efectiva, estas se están agotando. Razón por la cual surge la versión IP v6 que consiste en un número de 128 bit para direccionamiento, lo que equivale a $2^{128} = 3.4 \times 10^{38}$ direcciones IP.

4. Capa de Transporte: es la encargada de la seguridad y confiabilidad de la red. Controla si los paquetes de datos llegaron a destino y en correcto estado. Permite el “flujo” de información.
5. Capa de Sesión: era utilizada en los comienzos de las redes, cuando el uso de la misma era compartido, es decir cada usuario tenía asignado un tiempo de empleo (time sharming). Los usuarios debían identificarse (log-in).
6. Capa de Presentación: se utiliza como traductor entre diferentes lenguajes, por ejemplo, de ASCII al lenguaje IBM.
7. Capa de Aplicación: se refiere a los programas o protocolos que permiten el uso de la red y de sus servicios (mail, web, ftp, etc.).

Este modelo fue el más utilizado desde los comienzos de la red de redes, pero luego fue suplantado por el denominado TCP/IP. Este nuevo modelo se basa en el anterior, pero presenta menos capas o niveles. De esta forma TCP/IP consiste en 4 niveles principales [Tanenbaum y Wetherall, 2011]:

1. Enlace: idem al modelo OSI
2. Internet: Equivalente a la capa de red del modelo OSI
3. Transporte: idem al modelo OSI
4. Aplicaciones: Suele incluir la capa “Sesión+ Presentación+ Aplicaciones” del modelo anterior.

Luego, dentro de cada capa o nivel existen distintos “protocolos” que representan un estándar o acuerdo en la comunicación de dos entidades, tanto para la generación (formato), encapsulamiento y transmisión de los datos (Figura 1-1). Existen entonces diversos protocolos, por ejemplo para transporte se utiliza el TCP y UDP; y para la capa de aplicación algunos ejemplos son: ftp, http (web), smtp (mail), etc.

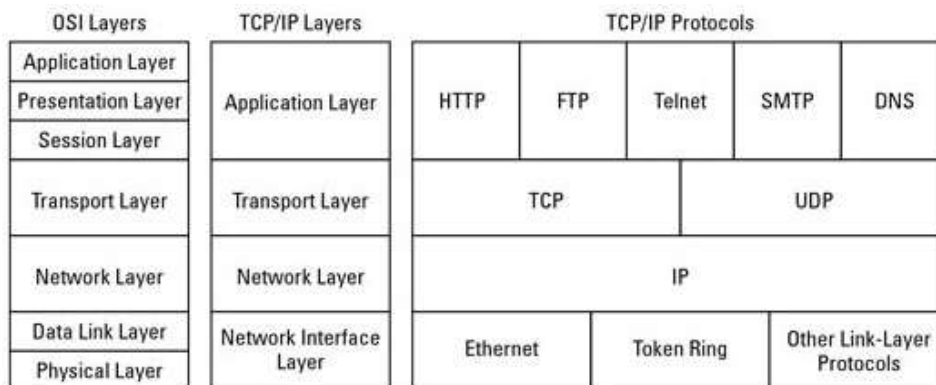


Figura 1-1: Esquema de protocolos en las capas de Internet. Fuente: [\[https://www.dummies.com/wp-content/uploads/288315.image0.jpg\]](https://www.dummies.com/wp-content/uploads/288315.image0.jpg)

De esta manera, las tecnologías asociadas a Internet han tenido un gran avance a partir de la década de los 90'. Huston (2008), destaca en su artículo “*A Decade in the Life of the Internet*” que Internet ha cambiado la forma en que cada uno de nosotros trabaja, juega o vive. El autor destaca la evolución de cada una de las capas o layers que componen la Internet, demostrando que algunas lo han hecho en mayor medida que otras.

Comenzando por la capa de transmisión, la evolución de las conexiones dial up con unos pocos kilobits por segundo, hasta las actuales redes globales IP, en algunos casos con accesos de megabits por segundo, muestran un incremento del mil por ciento de la capacidad de la red, mientras que las transmisiones de terabits ya están tomando importancia.

Respecto a la capa IP, se señala que se han intentado realizar numerosos cambios pero ninguno ha prosperado, y se afirma que el protocolo IP actual no es muy diferente al IP de hace una década. Simplemente por un agotamiento en la asignación de números IP, se deberá migrar en los próximos años de IPv4 a IPv6, sin embargo el desarrollo de la tecnología permitirá una implementación incremental de IPv6, por lo que la transición se espera no sea traumática ni conflictiva. En Argentina se está trabajando activamente para lograr la transición con este protocolo, actualmente varias instituciones cuentan con implementaciones en IPv6, tales como CONICET, Universidades Nacionales, Privadas, entre otros [<http://www.ipv6.org.ar/>]. Sin embargo, aún son muy pocos los proveedores de internet que ofrecen direccionamiento IPv6.

Respecto a la capa de transporte, en 1998 el 95 % del uso de la red era TCP (Transmission Control Protocol) y el 5% restante UDP, pero en la actualidad esta proporción se ha modificado ya que UDP (User Datagram Protocol) es el protocolo más usado en la transmisión de vídeo y voz a través de una red.

Respecto a la capa de aplicaciones, se dice que está ha cambiado rotundamente, desde los primeros buscadores como Alta Vista en 1998, hasta las nuevas aplicaciones creadas por cooperación de los propios usuarios como Wikipedia o Youtube [Huston, 2008]. Otro ejemplo de crecimiento, ha sido el desarrollo de aplicaciones de intercambio de música y videos entre usuarios (peer-to-peer). Toda una revolución en el intercambio abierto de contenidos, aceptada bajo el término Web 2.0. Lo mismo ocurre con la implementación de telefonía de voz por IP, que desde 2008 se está desarrollando y cada vez tiene mayor auge. De allí que la capa de Internet que mayor desarrollo ha tenido, es la capa de las aplicaciones.

En este contexto surge el protocolo NTRIP que desde el 2003 fue diseñado para la transmisión de datos GNSS por Internet [Weber et al., 2003; Weber et al., 2005]. NTRIP, pertenece a la capa o nivel de "Aplicación" y soporta flujo o "streaming" de datos GNSS. Es un protocolo genérico, sin estado, basado en el protocolo de transferencia de hipertexto HTTP (Hyper Text Transfer Protocol).

Al tratarse de un protocolo de la capa de "Aplicación", existe la figura de cliente-servidor. El cliente es la aplicación que contacta al servidor, hace un pedido y espera una respuesta. El servidor es el encargado de responder, siempre debe estar activo o escuchando una petición. Cada uno de estos servidores está alojado en una dirección IP, pero es necesario conocer el puerto de comunicación, el que permite la conexión entre la aplicación y la red. Los puertos permiten que un mismo usuario (host) tenga múltiples comunicaciones entre sus aplicaciones y la red. Es por ello que podemos tener abierta una ventana de un navegador web, incluso con varias ventanas navegando al mismo tiempo y

simultáneamente otras aplicaciones que también requieren de conexión (Skype, Google Chrome, etc.)

Fue desarrollado como un protocolo de proceso abierto y sin propietario, cuyas principales características son:

- Se basa en el popular estándar de transmisión HTTP, que es relativamente fácil de implementar cuando existen clientes limitados y los recursos de los servidores están disponibles.
- Su aplicación no se limita a un contenido determinado o codificado, sino que tiene la capacidad de transmitir cualquier tipo de datos GNSS.
- Tiene el potencial para soportar el uso masivo. Puede difundir cientos de streamings simultáneamente y soportar hasta un millar de usuarios al aplicar el envío "broadcast" por Internet. No es una comunicación punto a punto, es decir de una dirección IP a otra, sino que el envío es multi-usuario, luego los clientes que así lo requieran pueden descargar los datos, de lo contrario el flujo se pierde y no puede ser reconstruido.
- En cuanto a las necesidades de seguridad, las estaciones proveedoras de stream y los usuarios no están necesariamente en contacto directo, y las correcciones no suelen ser bloqueadas por los firewalls o servidores proxy de protección de redes de área local.
- Permite la transmisión a través de cualquier red IP móvil, ya que utiliza el Protocolo de Control de Transmisión TCP / IP.

Esta es la descripción del primer protocolo NTRIP versión 1.0. Actualmente está en funcionamiento la versión 2.0, su desarrollo estuvo orientado a la implementación de un protocolo de Internet estándar HTTP, que pudiera trabajar con servidores proxy y soportara el envío de paquetes de datos en la capa de transporte UDP (User Datagram Protocol). Por lo tanto la versión 2.0 se basa tanto en el protocolo RTSP (Real Time Streaming Protocol) para el control de flujo en la capa de transporte TCP, como en el protocolo RTP (protocolo de transporte en tiempo real) para el transporte de datos en UDP sin conexión. Su objetivo primordial entonces es la transmisión de datos GNSS en forma de correcciones diferenciales para posicionamiento preciso y navegación [RTCM SC No 104, 2011].

1.4.1 Componentes básicos del Sistema NTRIP:

NTRIP consta de cuatro componentes: NtripSource, NtripServers, NtripCasters y NtripClients. El NtripCaster es el programa servidor HTTP, mientras que NtripClient y NtripServer actúan como clientes HTTP que peticionan al servidor Caster (Figura 1-2).

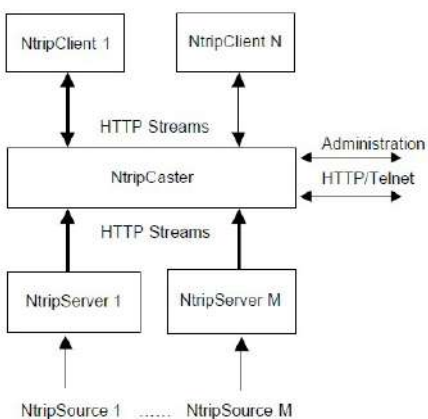


Figura 1-2: Componentes del Sistema de comunicación NTRIP [Weber, et al. 2003]

-**NtripSources:** se refiere a los receptores bases (estaciones GNSS permanentes) que generan las correcciones y datos GNSS, a partir de su posición conocida.

-**NtripServers:** son programas cuya principal función es transferir los datos desde una o varias estaciones (NtripSource) en formato RTCM, al caster. En los comienzos, el receptor base GNSS se conectaba a una computadora, que corriendo el programa NtripServer, generaba las correcciones en formato RTCM, y mediante el protocolo NTRIP los enviaba al NtripCaster para su distribución. Los receptores modernos, ya no necesitan una PC conectada para poder transmitir sus correcciones, sino que el mismo equipo puede acceder a internet y enviar sus datos. De esta forma las componentes NtripSource y NtripServer están unificadas.

-**NtripCaster:** es un programa servidor, encargado de recibir el streaming de datos proveniente de los servers y transferirlo a los usuarios. Cada servidor caster, puede recibir datos de una multitud de estaciones GNSS de referencia, y cada uno de estos flujos de datos tiene un identificador denominado MOUNTPOINT. La misión del caster no sólo se limita a la distribución de los streams, sino que también chequea la calidad e integridad de los datos recibidos y autentifica los usuarios. Dentro de sus funciones está la de enviar un mensaje que contiene información sobre el estado de las estaciones de referencia, por ejemplo si estuvieron ausentes durante algún periodo de tiempo, este se denomina "NABU" (NOTICE ADVISORY TO BROADCASTER USERS). Adicionalmente lleva una estadística de uso por estación y calidad de datos.

- **NtripUser o Cliente:** está conformado por los usuarios que reciben los streams de datos RTCM. Los mismos necesitan un programa o software cliente para acceder a los datos alojados en el caster. Primero necesitan ser aceptados por el caster NTRIP y, una vez autorizados, pueden seleccionar y recibir los datos GNSS y correcciones.

Para el caso del posicionamiento diferencial a tiempo real, hay que diferenciar 3 actores principales: las estaciones, el servidor caster y el usuario. La generación de correcciones diferenciales se realiza generalmente en la estación base o mediante un conjunto de observaciones procedentes de una red de estaciones de referencia. Luego el flujo de datos (stream) es enviado a un servidor o caster. Por último el usuario, utilizando

un programa cliente, accede a la dirección IP del servidor, para finalmente proporcionarle el flujo de datos al receptor y obtener así la posición corregida (Figura 1-3).

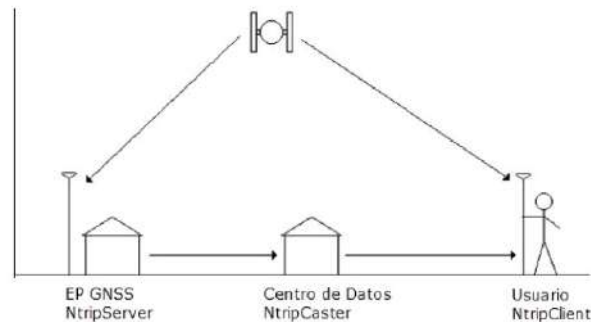


Figura 1-3: Sistema NTRIP en el posicionamiento diferencial a tiempo real. Fuente:

[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/07-SesTecnicas_RTK.pdf]

Más detalles del protocolo NTRIP se pueden encontrar en [<https://gssc.esa.int/wp-content/uploads/2018/07/NtripDocumentation.pdf>]

1.4.2 Tiempo de Latencia

Es el tiempo que transcurre entre la generación de un stream y su aplicación por parte del usuario. Para el caso del posicionamiento RTK-NTRIP, este tiempo incluye la generación de las correcciones en la estación base, su viaje al CASTER y el acceso al mismo por medio de internet móvil (apertura y decodificación de los paquetes) hasta su aplicación en el rover [Márquez, 2007].

La corrección diferencial DGPS o RTK está basada en el alto índice de correlación que existe entre los datos de la Base y el Rover, por lo que se necesita que idealmente la corrección en el Rover se realice en el mismo tiempo en que se generan los datos en la base, lo cual es prácticamente una utopía. En la práctica demoras de uno a dos segundos son aceptables.

Los tiempos de latencia que clásicamente se obtienen en la transmisión UHF están entre uno a dos segundos, y los obtenidos en pruebas experimentales NTRIP, son muy similares y siempre por debajo de los cuatro segundos, tiempo de latencia que podría bajar a menos de un segundo, una vez que las empresas telefónicas tengan menos carga y los paquetes de datos no pierdan la precedencia con respecto a la transmisión de voz.

La Figura 1-4 muestra la latencia de datos de corrección DGPS y RTK (RTCM 2.0 y 2.1) utilizando distintas tecnologías: conexión por cable entre receptores (wired) y redes de internet telefónicas móviles (GSM y GPRS). Se han encontrado latencias por debajo de cuatro segundos, lo que implica que Internet es un medio apto para este tipo de comunicaciones sin que exista una perceptible disminución de calidad.

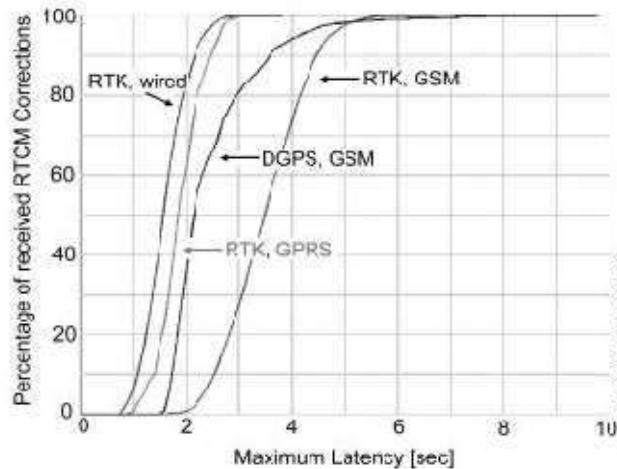


Figura 1-4: Tiempos de latencia [Weber et al., 2003]

1.4.3 Tecnologías de comunicación celular

Al igual que las diferentes capas protocolos y aplicaciones, la tecnología móvil de acceso a internet ha tenido diversos cambios y se sigue desarrollando continuamente. Para identificar las diferentes tecnologías se han denominado por generación, de allí que existen las de primera generación, las de segunda generación llamadas 2G y así sucesivamente hasta la actual cobertura 5/6G. A continuación, se detallan las más utilizadas en Latinoamérica, en orden cronológico de aparición:

-GSM (Global System for Mobile Communications): es una tecnología digital cuya primera funcionalidad es la transmisión de voz, pero que también permite la transmisión de datos a baja velocidad: 9,6 kbit/s. Esta velocidad es claramente insuficiente si la comparamos con los 56 kbit/s que permite un módem convencional de acceso a Internet a través de la línea telefónica. Se la conoce también con la denominación 2G (segunda generación). Por ello, se derivan una serie de limitaciones como son: establecimiento lento de la conexión, reducido ancho de banda, simetría del enlace (mismo ancho de banda para ambos sentidos de la comunicación), costo excesivo (facturación por tiempo de conexión) [Siegmund M. et al., 1998].

-GPRS (General Packet Radio Services): tecnología basada en la transmisión de paquetes y donde los canales de comunicación se comparten entre los distintos usuarios de forma dinámica. GPRS coexiste con GSM, pero ofreciendo al usuario un servicio portador más eficiente para las comunicaciones de datos, especialmente en el caso de los servicios de acceso a redes IP como Internet. La velocidad teórica máxima que puede alcanzar GPRS es de 171,2 kbit/s (unas 18 veces mayor que GSM). La velocidad de acceso que experimenta el usuario en la práctica está condicionada por distintos factores y suele ser bastante inferior: unos 40 kbit/s en el enlace descendente y 9,6 kbit/s en el ascendente [Ramos, 2008]. Las principales ventajas que aporta GPRS respecto a GSM son, además de una mayor velocidad de transmisión, la conexión permanente y tarifa por tráfico, convirtiéndolo en el portador ideal para los servicios WAP (Wireless Application

Protocol), el acceso a Internet (web browsing, ftp, e-mail) y el acceso a intranets de empresas. Se la conoce como tecnología 2.5 G.

- **EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution)**: Se trata de una tecnología que mejora el ancho de banda de la transmisión de los datos en GSM y GPRS, permitiendo teóricamente velocidades de datos de hasta 384 kbit/s, se puede considerar como precursora de UMTS. En realidad, EDGE y UMTS son tecnologías complementarias que de forma conjunta pueden dar apoyo a las necesidades de los operadores para lograr la cobertura y capacidad global de las redes de tercera generación [Ramos, 2008].

-**UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)**: Pertenece a las tecnologías 3G (tercera generación). Entre sus atributos se pueden destacar: conectividad virtual a la red todo el tiempo, diferentes formas de tarificación, ancho de banda asimétrico en el enlace ascendente y descendente, configuración de la calidad de servicio (QoS), integración de la tecnología y estándares de redes fijas y móviles, entre otros. En cuanto a las capacidades de transmisión de datos, se pueden establecer distintos entornos de trabajo, llegando incluso hasta los 2 Mbit/s en condiciones ideales de funcionamiento, como por ejemplo en el entorno interior de una oficina. Esta capacidad es muy superior a la de las tecnologías precedentes, posibilitando el desarrollo de servicios multimedia reales [Ramos, 2008].

-**LTE (Long Term Evolution - 4G)** En la actualidad se está utilizando mayormente la tecnología 4G. La misma está basada completamente en el protocolo IP. Esta tecnología puede ser usada por módems inalámbricos, teléfonos inteligentes y otros dispositivos móviles. La principal diferencia con las generaciones anteriores, es la capacidad para proveer velocidades de acceso mayores de 100 Mbit/s en movimiento y 1 Gbit/s en reposo, manteniendo una calidad de servicio (QoS) de alta seguridad [Akyildiz et al, 2010].

En América latina, se observa una buena cobertura de redes 4G, con un porcentaje mayor al 60 % en los países de México, Argentina, Perú y Panamá (Figura 1-5).



Figura 1-5: Cobertura Internet 4G América del Sur. Fuente <http://opensignal.com/>

1.5 Servicios de posicionamiento RT

Debido al gran incremento en la cantidad de estaciones GNSS permanentes que comenzaron a generar correcciones diferenciales, y a la mayor disponibilidad de conexión a Internet, fue posible utilizar el concepto de posicionamiento diferencial RT para ofrecer un servicio de correcciones diferenciales generado por estaciones GNSS permanentes mediante el protocolo NTRIP.

Los mismos comenzaron como proyectos pilotos, donde se realizaba la transmisión en modo de prueba y de a poco se fueron estableciendo como servicios, algunos de aplicación global, otros regionales y/o nacionales. Actualmente son brindados por universidades, por organismos públicos, por los Institutos Geográficos Nacionales o Militares, y en algunos casos como desarrollos privados de empresas relacionadas a la topografía e ingeniería civil.

En todos ellos se utiliza el protocolo de comunicación NTRIP, por tal motivo dichos servicios cuentan con tres partes principales que conforman el sistema NTRIP: las estaciones SERVER que generan las correcciones, un servidor central CASTER que recibe las correcciones y luego el USUARIO que accede a las correcciones conectándose a dicho CASTER.

Siguiendo esta premisa, la agencia estadounidense NASA (National Aeronautics and Space Administration) desarrolló un servicio denominado **GDGPS (Global Differential GPS)**, ofreciendo monitoreo GPS a tiempo real y un sistema de aumentación completo, de alta precisión y robustez [<https://www.gdgps.net/>]. Comenzó siendo la red de seguimiento GPS en tiempo real más grande del mundo, con más de 100 sitios que transmiten sus datos a los centros de operación, donde se procesan y analizan en tiempo real (Figura 1-6). Contribuyen a la red, 70 estaciones operadas por la NASA, y las restantes con contribuciones realizadas por organizaciones internacionales y entidades estadounidenses. La red GDGPS es altamente redundante, para poder proporcionar fiabilidad a muchas aplicaciones que dependen de este servicio, como por ejemplo monitoreo en tiempo real, integridad GPS y correcciones diferenciales precisas. Utiliza varios canales de comunicación, además de Internet, como redes terrestres y comunicación satelital.



Figura 1-6: Cobertura del servicio GDGPS (NASA). Fuente: <https://www.gdgps.net/images/world-small.png>

El GDGPS, cuenta con 4 laboratorios de tiempo. En particular, el Observatorio Naval de los Estados Unidos (USNO) contribuye con dos sitios de monitoreo dirigidos por su reloj maestro (Master clock), permitiendo que el sistema GDGPS pueda proporcionar la realización más precisa en tiempo real de la hora UTC, a sus usuarios a nivel mundial.

Normalmente, se tarda alrededor de 1 segundo en recibir los datos de seguimiento de la mayoría de los sitios de monitoreo y unos segundos más para el procesamiento y control de calidad. Los productos finales, tales como las correcciones precisas a las efemérides GPS, se disponen en un plazo de 5 segundos desde la recopilación de datos en los sitios remotos.

Este servicio fue diseñado para soportar las aplicaciones GPS más exigentes en tiempo real, a escala mundial, como por ejemplo para Posicionamiento Preciso y determinación de órbitas aplicados a todo tipo de usuarios (fijos, móviles, en tierra o aéreos), incluso para seguimiento de misiones y proyectos espaciales. A su vez, también es utilizado para el monitoreo en tiempo real del medio ambiente: utiliza estimaciones de retardo troposférico en tiempo casi real para calibrar las señales de radio de la nave espacial del espacio profundo. Como así también, los mapas del contenido total de electrones de la ionosfera (TEC) producidos por el JPL y la Agencia de Tiempo de la Fuerza Aérea (AFWA) en tiempo real, derivan del seguimiento de GDGPS. Sin embargo, este servicio no es de libre acceso para cualquier usuario, es necesario ser parte de alguna institución miembro del GDGPS.

Luego, el IGS (International GNSS Service) lanzó un proyecto piloto denominado **RTS (Real Time Service)** que actualmente ya se ha establecido como un servicio operativo. A través de él se transmiten correcciones diferenciales de las estaciones IGS distribuidas mundialmente (Figura 1-7) y brinda servicios para aplicaciones que requieren acceso en tiempo real a los productos de IGS. RTS transmite correcciones a las órbitas y relojes GNSS que permiten una notable mejoría en el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP). Así como también otras aplicaciones relacionadas, tales como la sincronización de tiempo y el monitoreo de desastres naturales, a escala mundial. RTS se basa en la infraestructura global IGS: la red de estaciones GNSS, centros de datos y centros de análisis que proporcionan los productos de alta precisión [<http://www.igs.org/rts>].

El RTS es operado por el IGS como un servicio público y los usuarios tienen acceso abierto a través de una simple suscripción. Este gran logro ha sido posible gracias a los esfuerzos de diferentes organizaciones, tales como la Agencia Federal Alemana de Cartografía y Geodesia (BKG), la dirección de Recursos Naturales de Canadá (NRCan), y el Centro de Operaciones Espaciales de la Agencia Espacial Europea (ESA/ESOC).

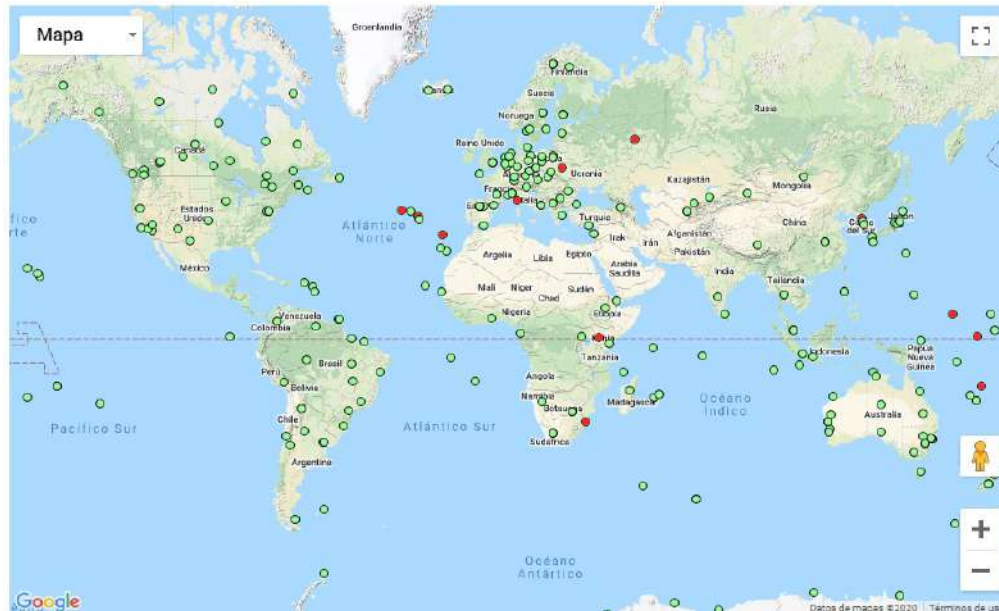


Figura 1-7: Red IGS en Tiempo Real, servicio RTS. Fuente: <http://www.igs.org/network?network=rts>

A nivel Europeo existe el servicio **EUREF-IP** [<http://www.euref-ip.net/home>]. En su origen, como “Proyecto Real-Time” pretendió estimular y desarrollar las herramientas necesarias para que las estaciones de la red permanente europea EPN (EUREF Permanent Network), ofreciesen sus datos en tiempo real. Hoy en día, existen 131 estaciones de la EPN que transmiten sus datos a través de Internet mediante NTRIP (Figura 1-8). Existe un estricto control para la incorporación de estaciones al servicio. Las estaciones que desean adherirse a la red deben poseer las características necesarias para convertirse en una estación de la red EPN, siguiendo el procedimiento adecuado, y cumpliendo con las especificaciones para transmitir el flujo de datos (streams) en tiempo real, así como también respecto a su contenido. Se le da mucha importancia a las coordenadas de la estación de referencia, que se incluyen en los mensajes RTCM. Estas coordenadas refieren al marco ETRS89. El acceso al servicio es gratuito, después de completar el registro de usuarios (ID de usuario y contraseña) los datos son proporcionados por la institución que opera la EPN regional (o EUREF-IP).

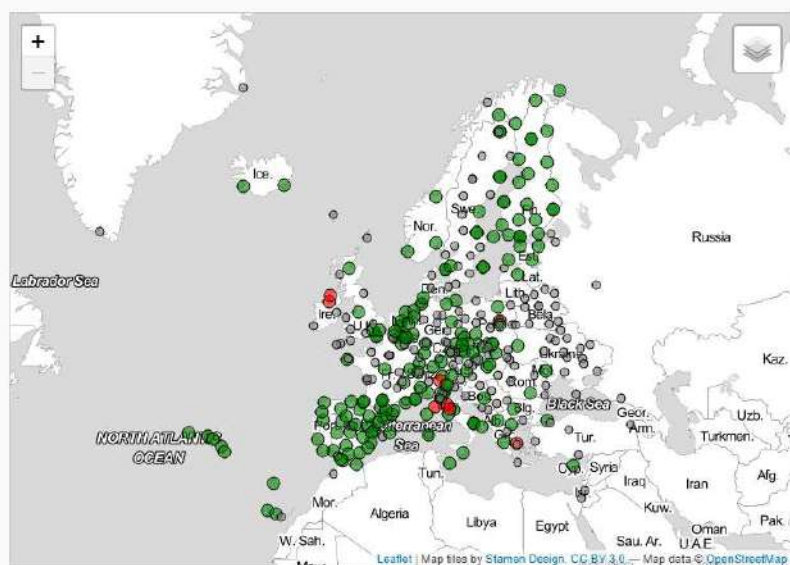


Figura 1-8: Estaciones del servicio europeo EUREF-IP. Fuente: https://www.epncb.oma.be/networkdata/network_status/

España ha sido uno de los países pioneros en transmisión de correcciones diferenciales, no siempre a través de Internet ya que en los inicios lo hacía a través de la Radio Nacional de España [<https://www.ign.es/web/gds-gnss-tiempo-real>]. El primer proyecto denominado RDS se inició en 1996 mediante la emisión de correcciones diferenciales de código en formato RASANT en la frecuencia FM no audible. Luego surgió el proyecto RECORD (Radio difusión Española de Correcciones Diferenciales), para la emisión de correcciones DGPS, mediante distintos medios terrestres o satelitales. Este proyecto se continuó con pruebas de emisión en radio digital (DAB) de correcciones de código y fase (RTK) con éxito y en su última fase se inició la emisión por Internet dentro del proyecto de EUREF-IP (EUREF over Internet Protocol). En el 2004, el Instituto Geográfico Nacional instaló un servidor secundario de EUREF-IP denominado IGNE.



Figura 1-9: Red de estaciones Server-NTRIP españolas. <http://www.ign.es/web/resources/geodesia/visorGeodesia/index.html>

En los inicios sólo contaba con tres estaciones transmitiendo desde el servidor del IGN: Madrid, Rioja y Málaga. Actualmente se puede acceder a las correcciones diferenciales DGPS+RTK de todas las estaciones del Instituto Geográfico Nacional de España (Figura 1-9). Se accede al caster a través de la dirección: <http://ergnss-ip.ign.es> o a través de la dirección IP "193.144.251.13" por los puertos 80 y 2101. Aproximadamente 40 estaciones están disponibles, transmitiendo la mayoría de ellas el mensaje RTCM 2.3 y 3.0, gracias a la colaboración del Instituto Cartográfico Valenciano, la Universidad Politécnica de Madrid y el Servicio de Información Territorial de las Islas Baleares.

A nivel americano, el país con más desarrollo en la materia es Estados Unidos. Respecto a su infraestructura geodésica, el National Geodetic Survey (NGS), perteneciente a la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), gestiona una gran red de estaciones de referencia continua denominada CORS (Continuos Reference Stations). La red CORS es un esfuerzo cooperativo multipropósito que involucra al gobierno estadounidense, instituciones académicas y organizaciones privadas. Cada agencia comparte sus datos con la NGS, y a su vez, analiza y distribuye los datos de forma gratuita.

Respecto a los servicios a Tiempo Real, el NGS no cuenta actualmente con toda la red operativa. Existió un proyecto Beta NGS en tiempo real, que disponía de un caster y 19 estaciones operativas, sin garantizar su funcionamiento continuo debido a su modalidad de prueba. Sin embargo este servicio, ya no está operativo. Como es de esperarse este proyecto no es el único en el país, existen otros caster y servicios a Tiempo Real regionales, dependientes de cada uno de los diferentes estados y de empresas privadas del país.

El estado con mayor cantidad de estaciones a tiempo real es California. El servicio CRTN (California Real Time Network) es ofrecido por un consorcio de miembros [<http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/crtn/>], entre ellos la Universidad de San Diego que desarrolla un programa de investigación desde el 2001, con el propósito principal de desarrollar sistemas de alerta temprana de desastres naturales, con precisión y en tiempo real, utilizando la tecnología GNSS. Cuenta con 2 casters, una para la región Sur y otro para la Norte (132.239.152.74 y 132.239.154.101), con 121 y 148 streams respectivamente (Figura 1-10).

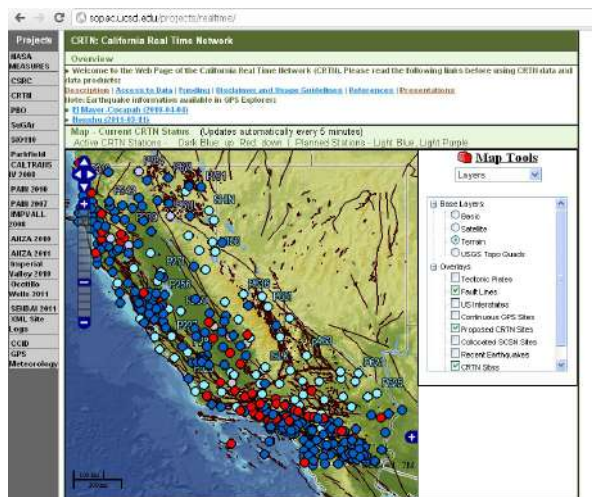


Figura 1-10: Servicio RT en California. Fuente: <http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/crtn/>

Además la Universidad Berkeley de este estado, lleva adelante un servicio de red en Tiempo Real denominado **Real-Time Streaming of BARD** (Bay Area Regional Deformation Network) GPS Data, orientado fundamentalmente al seguimiento de sismos, contiene 36 estaciones que transmiten el mensaje RTCM3.0 además de archivos BINEX transmitidos online [<http://seismo.berkeley.edu/bard/realtime/>].

En Washington, la **WSRN** (Washington State Reference Network) es una cooperativa Regional de redes GNSS a Tiempo Real, conformada por las principales ciudades de Washington (Seattle, Renton, Bellingham, Kent, Auburn, y Shoreline), el Departamento de Transporte y la agencia espacial SRCW [<http://www.wsrn.org/>]. Participan además academias científicas y proyectos como el Pacific Northwest Geodetic Array (PANGA), la Universidad Central de Washington y el Renton Technical College. El servicio a tiempo real no es gratuito se paga un canon anual y ofrecen también servicios de red virtual VRS (Virtual Reference Stations). Posee un caster de la WSRN que cuenta con más de 200 estaciones, transmitiendo mensaje RTCM y propietario (CMR). Algunas ciudades como Seattle poseen su propio caster conteniendo solo las estaciones que pertenecen a su territorio (dirección IP: 72.233.250.5:8080).

Otro ejemplo es el Estado de Oregón, allí el Departamento de Transporte ha puesto en funcionamiento y expansión la Red GPS en tiempo real **ORGN** [<https://www.oregon.gov/ODOT/ORGN/Pages/index.aspx>]. Esta red GPS consta de estaciones GPS de referencia de funcionamiento continuo (CORS), distribuidas en varias sub-redes ubicadas en el sur, centro y norte de Oregón a lo largo del corredor I-84. Cada sub-red se compone de estaciones GPS, espaciadas aproximadamente a 70 km. Se utiliza un software de red para configurar y monitorizar la calidad de los datos de las estaciones de referencia, y las correcciones que estas generan. Los datos de observación también se archivan y están disponibles en línea para los usuarios que necesitan pos-procesar sus datos. El servicio es gratuito, se debe solicitar una cuenta Rover para acceder a los productos y servicios ofrecidos a través del caster (dirección IP: 167.131.0.205:9879).

Existen otros servicios semejantes, de empresas privadas que ofrecen soluciones puntuales a tiempo real y de red virtual. La mayoría tienen costo diario, mensual o anual. En general todas las páginas web que ofrecen servicios GNSS a tiempo real, tienen disponibles en sus páginas instructivos de conectividad para distintos receptores y controladoras del mercado. A continuación, se dan ejemplos de empresas que poseen caster público, es decir indexado en la página oficial de NTRIP.

En los Estados de Georgia y Florida se puede contratar el servicio de “eGPS Solutions” una de las empresas con mayor cobertura de EEUU (Figura 1-12). En California existe una Cooperativa operada por AZ-GPS, que ofrece también servicios de red virtual, distribuido en tres redes como se puede observar en la Figura 1-11.



Figura 1-12: Servicio eGPS, Georgia



Figura 1-11: Servicio AZGPS, California

En la península noreste, en los estados de Nueva York, Pensilvania, Massachusette y Road Island, entre otros, KeyNetGPS ofrece un muy buen servicio con excelente cobertura. Cuenta con 189 estaciones operativas, y utiliza el software Trimble GPSNet, para la creación de un sistema de estaciones de referencia virtual (VRS). El servicio no es gratuito se debe abonar una suscripción [<http://www.keynetgps.com/>].

En la región Media-oeste, incluyendo las ciudades más grandes de Missouri, Nebraska, Indiana e Illinois del sur, se puede contratar el servicio de MidWest RTK-Network. Pagando un canon diario, mensual o anual, se puede acceder a las soluciones VRS o RTK Base-línea, sin embargo utiliza para dichas soluciones las estaciones de la red CORS [<http://www.mwrtnet.net/>].

En Florida, otra empresa privada es RTKLink que ofrece servicios de RTK para levantamientos topográficos, DGPS para mapeo, WAAS y Guiado UAV (vehículo aéreo no tripulado). Posee aproximadamente 90 estaciones base. Se abona mensualmente para acceder a los datos, y también se ofrece alquiler de equipamiento diario, semanal y mensual [<https://rtklink.claas.com/>].

Resumiendo, EEUU cuenta con más de 700 estaciones de la red CORS (Continuos Operation Reference Stations) optimizadas a tiempo real y transmitiendo correcciones diferenciales para posicionamiento RTK y DGPS. No existe un único caster nacional. Cada estado posee una red propia, administrando el acceso al caster y a las estaciones de cada región. Existen además una cantidad de empresas privadas que ofrecen correcciones puntuales y soluciones de red virtual, sin embargo, todos estos servicios son pagos. En la Tabla 1-5 se resumen los principales servicios estadounidenses.

Tabla 1-5 : Servicios de corrección RT estadounidenses

Nombre Servicio	Link de acceso	Zona de cobertura
California Real Time Network	http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/crtn/	California
Washington (WRRN)	http://www.wsrn.org/	Washington
Oregon	https://www.oregon.gov/ODOT/ORGN/Pages/index.aspx	Georgia y Florida
eGPS	http://www.egps.net/netservices.html	Alabama y Georgia

AZgps	https://www.azgps.net/#/	California, Arizona, Nuevo Mexico
KeyNetGPS	http://www.keynetgps.com/	Nueva York, Pensilvania, Massachusetts y Road Island
MidWest RTK-Network	http://www.mwrtnet/	Nebraska
RTK LINK	https://rtklink.claas.com/	Florida

1.6 Servicios de posicionamiento RT en Latinoamérica

1.6.1 Proyecto SIRGAS en Tiempo Real (SIRGAS-RT)

El Proyecto SIRGAS nace en 1995, como un proyecto de cooperación entre países de América del Sur para establecer y materializar un Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, de allí su nombre. Desde su creación, anualmente se realizan reuniones científicas donde se exponen los avances de cada uno de los grupos de trabajo que forman parte de este proyecto [www.sirgar.org].

Durante el simposio SIRGAS 2008 celebrada en Montevideo, Uruguay, se creó dentro del Grupo de Trabajo II (Ámbito Nacional), el proyecto SIRGAS en Tiempo Real (SIRGAS-RT), cuyo objetivo primario es evaluar la capacidad de distribución de correcciones GNSS en tiempo real y otros datos concordantes mediante NTRIP o herramientas similares. En esta reunión, Brasil, Argentina, Uruguay y Venezuela reportaron adelantos que en general, consistían en aumento del número de estaciones capaces de generar correcciones RT, instalación de nuevos “casters” y desarrollo de experiencias demostrando las potencialidades del método.

Las principales actividades del proyecto SIRGAS-RT han estado concentradas en establecer un inventario de las posibilidades tecnológicas (protocolos, software, hardware, infraestructura geodésica y de telecomunicaciones, etc.) disponibles para aplicaciones GNSS en tiempo real en los países del área; incluyendo estudios de factibilidad para la instalación de casters nacionales o regionales como soporte básico para el desarrollo de aplicaciones de este tipo [Noguera et al, 2014]. Estas actividades han sido extendidas mediante jornadas de capacitación y formación de recursos humanos permitiendo el fortalecimiento institucional de las entidades nacionales comprometidas con el marco de referencia SIRGAS. Su objetivo prioritario es que el aprovechamiento de las aplicaciones en tiempo real sea máximo, no solamente en aplicaciones prácticas como censos catastrales, infraestructuras de datos espaciales, agricultura de precisión, navegación, etc, sino también en aplicaciones científicas comprometidas con el estudio del cambio global, el modelado de la atmósfera, el seguimiento de deformaciones de la corteza terrestre, etc [<http://www.sirgas.org/es/sirgas-rt/>].

Durante la reunión SIRGAS2012 celebrada en Concepción, Chile, se impulsó la actividad del grupo, ya que se realizó una Escuela en Posicionamiento GNSS en Tiempo Real, con la presencia del principal desarrollador del protocolo NTRIP, Dr. Georg Weber. En esta oportunidad, se elaboraron algunas recomendaciones a seguir, como la realización de un relevamiento de la capacidad instalada en la red de estaciones SIRGAS-CON y la redacción de una guía que describa las especificaciones y los requerimientos necesarios para que una estación GNSS de operación continua sea parte de la infraestructura "SIRGAS en tiempo real" [[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Resoluciones SIRGAS 2012.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Resoluciones_SIRGAS_2012.pdf)].

Por otro lado, como parte de los eventos SIRGAS2017 realizados en Mendoza, Argentina, se llevó a cabo un Taller SIRGAS-RT, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo. El objetivo central fue dar continuidad a las actividades desarrolladas durante la escuela 2012 en la ciudad de Concepción; con el ánimo de promover el uso de la capacidad disponible de SIRGAS y analizar las posibilidades de ofrecer servicios en este contexto a la comunidad geodésica latinoamericana e internacional. Luego del taller, se establecieron importantes puntos de acción como por ejemplo unificar el marco de referencia en los streams transmitidos por el caster de SIRGAS, y estudiar la posibilidad de ofrecer nuevos servicios a partir de las estaciones

SIRGAS-RT

[[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/Boletin SIRGAS 22 2017.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/Boletin_SIRGAS_22_2017.pdf)].

Se ha tenido la oportunidad de participar activamente de este grupo de trabajo y contribuir a las actividades recomendadas [Noguera et al, 2014]. Como primera tarea se realizó un relevamiento de las estaciones SIRGAS-CON optimizadas a tiempo real. A través de una encuesta enviada a todos los responsables de las estaciones de la red SIRGAS-CON se obtuvo un primer análisis sobre la capacidad instalada respecto a las estaciones ServerNTRIP, así como también de los servidores caster. En la Figura 1-13 se observan resaltadas las estaciones que reportaron transmitir sus datos y correcciones RT, en cada país. Los detalles de cada nación pueden encontrarse en el Anexo II de [Noguera et al., 2014]. Por otra parte, se pudo redactar una guía de instalación para estaciones SIRGAS, sumando los requerimientos para que puedan producir sus correcciones y transmitirlos a un servidor central, dicha guía puede encontrarse en el Anexo I de la publicación antes mencionada.



Figura 1-13: Capacidad instalada SIRGAS-RT.

Fuente: <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/mapatr/>

Este primer relevamiento sobre las estaciones optimizadas a tiempo real se mantiene actualizado en un mapa interactivo disponible desde la Universidad de Rosario (Figura 1-13).

1.6.2 Casters nacionales de la región

El primer caster que estuvo disponible en la región fue el del servicio RBCM-IP de Brasil a partir de 2008. En Venezuela y Argentina, existieron algunos casters experimentales en la Universidad del Zulia, en la Universidad Nacional de Córdoba y en la Universidad Nacional de Rosario, que fueron creados con fines académicos y de investigación, pero que no prestan servicios actualmente. En todos los casos con transmisión de una cantidad pequeña de estaciones, A mediados de 2009 se puso en marcha el servicio de corrección diferencial RT en Uruguay. Para fines de 2010 se lanzó el proyecto RAMSAC-NTRIP en Argentina, que ponía a disposición de los usuarios las correcciones de 17 estaciones de la red nacional, que transmitían a tiempo real.

Con el correr de los años se fueron sumando algunas iniciativas en países como Ecuador, Chile y Perú. En estos países han prevalecido desarrollos privados, por lo que no cuentan aún con casters nacionales que publiquen los datos de todas las estaciones GNSS de su territorio.

En el Caribe existe un antecedente de un caster en Puerto Rico, cuya principal función es alertar sobre terremotos y tsunamis.

En la Tabla 1-6: se detallan las características técnicas de los casters nacionales relevados:

Tabla 1-6: Caster Nacionales

	RBCM-IP (Brasil)	IGM (Uruguay)	RAMSAC-NTRIP (Argentina)	PRSN (Univ. de Puerto Rico)
Dirección IP	186.228.51.52	rtk.igm.gub.uy	http://ntrip.ign.gob.ar	136.145.162.224
Puerto	2101	2101	/	2101
Software utilizado	NTRIP Caster 1.5.8/1.0	GNSS Spider 1.0	NTRIP Caster 2.0.14/2.0	NTRIP Caster Professional 2.0.15/2.0
Formatos	RTCM 3.0	RTCM 3.0- 2.3	RTCM 3.0-2.3	RTCM 3.0
Marco de Referencia	SIRGAS 2000	SIRGAS-ROU 98	POSGAR 2007	SIN INFORMAR
Época	2000.4	1995.4	2006.632	SIN INFORMAR
Otros productos	Correcciones de órbita y reloj Efemérides	Soluciones de red: VRS, FKP, MAX, iMAX	---	Correcciones de órbitas y relojes: Efemérides
URL	http://www.ibg e.gov.br/espanhol/ge ociencias/geodesia/r bmc/ntrip/	http://www.igm.gub.u y/2016/05/20/servicios- regna-rou/	http://ign.gob.ar/Nue strasActividades/Geodesia/ RamsacNtrip	http://prsn.uprm.ed u

1.6.3 Caster SIRGAS

En el simposio SIRGAS 2012, se tuvo la oportunidad de contar con la presencia del Dr. George Weber, creador del protocolo NTRIP, quien dispuso de dos licencias del software Ntrip Caster Professional desarrollado por la BKG, donado por esta agencia a la comunidad SIRGAS. Fueron instalados en la Universidad de Rosario, Argentina y en la Universidad de la Republica, Uruguay.

En una primera instancia se puso en funcionamiento un servicio denominado Caster SIRGAS Experimental, con la finalidad de publicar datos GNSS de estaciones SIRGAS-CON en

tiempo real utilizando el protocolo NTRIP. El caster se encuentra alojado en el Laboratorio del Grupo de Geodesia Satelital de Rosario, de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina y su identificación es IP: 200.3.123.65 Port: 2101.

Los usuarios interesados pueden acceder a los datos en forma libre y gratuita (con usuario y contraseña), luego de completar un formulario de registro. Por el momento, se publican datos a tiempo real de algunas estaciones permanentes de la región, así como también efemérides y correcciones a los relojes, de manera que pueden desarrollarse proyectos apoyados en posicionamiento relativo o en posicionamiento puntual preciso, obviamente ambos en tiempo real.

El segundo caster, llamado CASTER ESCUELA, se instaló en el Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica, Uruguay, con fines educativos. Puede utilizarse para aprender sobre la configuración tanto del CASTER como de los demás elementos del Sistema NTRIP, como así también para desarrollos científicos. De esta manera, este caster ha sido utilizado para las experiencias realizadas principalmente con soluciones RTK de red, que serán descriptas en el Capítulo 2.

1.7 Conclusiones

En el presente capítulo, se han expuesto los avances encontrados respecto a las técnicas y servicios de posicionamiento a Tiempo Real, con énfasis en las Américas. El gran desarrollo de nuevos sistemas de navegación y los avances en las tecnologías asociadas, en especial de la comunicación mediante Internet, ha generado un ambiente propicio para la creación de nuevas aplicaciones, mejorando las precisiones y aumentando la productividad.

Gracias a la creación del protocolo NTRIP y a la estandarización del formato RTCM, es posible hoy en día posicionarse a tiempo real, con un único receptor y de manera precisa. Ya sea vinculándose a una estación GNSS permanente que transmite sus datos on-line, como utilizando correcciones de reloj y órbitas de los satélites, con la técnica PPP. Sin embargo, la utilización de este protocolo de transmisión está limitado a la disponibilidad de un servicio de Internet en el sitio donde el usuario requiere posicionarse.

Todas estas aplicaciones no serían hoy posibles sin el trabajo que llevan a cabo día a día los servicios RT. Se estima que el servicio global con mayor desarrollo será el RTS-IGS, ya que sigue aumentando la cantidad de estaciones de su red, y mejorando los productos RT allí ofrecidos.

A nivel regional, EUREF-IP debe ser un ejemplo a seguir por la comunidad latinoamericana. Si bien el proyecto SIRGAS-RT no ofrece un servicio de correcciones diferenciales para todo Latinoamérica, sus iniciativas apuntan a servir de apoyo y guía en la implementación de servicios RT en los distintos países. En nuestro continente, son los Institutos Geográficos u organismos relacionados, quienes se han encargado de asumir esta responsabilidad.

Se observa que el país con más desarrollo, en cantidad de estaciones y servidores casters es Estados Unidos. Sin embargo, los servicios están administrados por cada uno de los Estados y/o por desarrollos privados de forma independiente, y generalmente son servicios pagos.

En América Latina, Brasil presenta mayor cantidad de estaciones optimizadas a Tiempo Real y sigue ampliando su servicio constantemente, incluso transmitiendo otros productos

como correcciones a las órbitas y relojes de los satélites para el Posicionamiento Puntual Preciso, en diferentes marcos de referencia (SIRGAS 95 y SIRGAS2000).

En Argentina, se aprecia una constante evolución del servicio RAMSAC-NTRIP, que año tras año incorpora nuevas estaciones GNSS a la red y mejora su infraestructura en cuanto a su servidor caster y registro de usuarios.

Finalmente se espera que el caster de SIRGAS, pueda seguir desempeñando su función como caster experimental, permitiendo incorporar nuevas estaciones a la red, como así también brindar servicios adicionales como lo hacen los servidores europeos. Actualmente se re-transmiten correcciones de órbitas y relojes calculadas por el IGS, en diferentes marcos de referencia. Con una visión a futuro sería ideal poder contribuir a la comunidad internacional con una solución regional de órbitas y relojes proveniente de las estaciones SIRGAS-CON.

CAPITULO 2: NUEVAS TECNOLOGÍAS ASOCIADAS AL POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL EN TIEMPO REAL

2.1 Introducción

Como se expuso en el capítulo 1, los sistemas de posicionamiento GNSS en tiempo real han tenido un gran desarrollo en las últimas dos décadas, permitiendo aumentar la precisión del posicionamiento, en base a una red de receptores situados en puntos de coordenadas conocidas. Estos receptores bases pueden procesar los observables, evaluar los errores del reloj y de la trayectoria del satélite, así como los efectos ionosféricos y troposféricos que sufre la señal.

Sin embargo, uno de los factores más limitantes del posicionamiento diferencial a tiempo real, es la distancia que separa al receptor base del remoto. Los errores ocasionados por la atmósfera de la Tierra, tienen una correlación espacial que se diluye a medida que aumenta la separación base – remoto [Raman y Garin, 2005]. Siendo la causa principal de esta limitación, el alcance del enlace que comunica al receptor remoto con la base.

Cuando el enlace de comunicación entre la base y el remoto es por medio de radio transmisores, con tecnologías UHF y VHF principalmente, la distancia teórica máxima de separación depende de la altura de ambos receptores, y de una constante relacionada a la refracción atmosférica y a la curvatura terrestre [Langley, 1998]. El alcance o rango de cada antena de radio depende también de la potencia del transmisor, en cada país existe una normativa al respecto. Por ejemplo, en Estados Unidos la potencia máxima permitida es de 35 W, mientras que en Europa esta varía de país en país [http://www.pacificcrest.com/library/Wireless_Data_Links_RTK.pdf]

Otra limitante del posicionamiento diferencial de fase, es el tamaño de los datos a transmitir, es decir el contenido de los mensajes. La transmisión de datos crudos, necesarios para el posicionamiento RTK, presenta mayores dificultades que el envío de correcciones de código. Por ejemplo, para transmitir correcciones de 12 satélites se necesitan más de 4800 bps (bits por segundo). Los tradicionales medios de comunicación radial permiten transmitir solo 2400 bps, por lo tanto fue necesario utilizar canales con mayor capacidad o transformar los datos a formato propietario, más liviano. Dependiendo de la legislación de cada país, se utilizaban canales UHF y VHF con la capacidad para transmitir mayor información, pero con menor potencia, de allí que el rango de influencia se redujo a pocos kilómetros.

Para solucionar estos inconvenientes, aparecen las nuevas tecnologías asociadas al posicionamiento GNSS. En primera instancia con la estandarización del formato de transmisión de datos y correcciones a través del mensaje RTCM, y luego, con el avance en las aplicaciones de Internet, surge el protocolo NTRIP y su utilización tanto para el

posicionamiento DGPS (código) como para RTK (fase) y para las soluciones de red (NetRTK).

En este capítulo se describirán los detalles de los mensajes RTCM y su utilización en las nuevas técnicas de posicionamiento diferencial a tiempo real. Se presentan experiencias de aplicación de estas técnicas (DGPS, RTK y NetRTK), detallando precisiones, ventajas y desventajas de cada una. Finalmente se exponen los recaudos a tener en cuenta respecto al Marco de Referencia de las estaciones GNSS permanentes, utilizadas como base y la influencia de estas coordenadas, en las soluciones a obtener por parte de posibles usuarios.

2.2 Correcciones RT para el posicionamiento diferencial

Las técnicas diferenciales en tiempo real, tuvieron una limitada difusión hasta el establecimiento del estándar en la transmisión de datos. En sus orígenes los formatos de los mensajes correctivos eran completamente diferentes según la marca del receptor GPS, entre ellos: DBEN de Ashtech, CMR y CMR++ de Trimble, RTCA usado por Novatel, Leica y Sokkia. La utilización del protocolo NTRIP, solucionó este problema ya que estandarizó el formato del mensaje de transmisión siendo únicamente válido el mensaje RTCM.

A continuación, se detalla el contenido de los principales mensajes RTCM versión 2.x, necesarios para el posicionamiento diferencial de código y fase [RTCM SC No. 104, 2010]:

Mensaje 1: CORRECCION PRC - Corrección a la Pseudodistancia

Contiene un conjunto de parámetros que permiten calcular correcciones a las pseudo distancias del código C/A de todos los satélites observados en la estación base (Ec. 1). Estos parámetros están asociado al instante de observación t_0 , y consisten en el error de la pseudo distancia de cada satélite $PRC(t_0)$, y la velocidad $RRC(t_0)$, con que dicho error está variando en el momento de observación (t_0).

Estos valores son utilizados por la estación remota para calcular las correcciones que serán aplicadas a las pseudo distancias observadas en el instante t:

$$PRC(t) = PRC(t_0) + RRC(t_0) (t - t_0) \quad (1)$$

$PRC(t_0)$: Diferencia entre la Distancia Geométrica calculada y la pseudodistancia observada por la estación base (corregida por los offset de los relojes del receptor y de los satélites y las correcciones relativistas de los satélites) en el instante t_0 y para cada satélite. No se aplica ningún modelo troposférico ni ionosférico.

Mensaje 2: VARIACIÓN (Δ) DE LA CORRECCIÓN DIFERENCIAL

Se utiliza para los equipos que no pueden decodificar las efemérides de los satélites de manera inmediata, mientras que la estación de referencia ya está haciendo uso de las efemérides más nuevas. Por lo tanto, estarán utilizando efemérides distintas produciéndose un error en el posicionamiento.

Se emplea cuando el receptor base cambia el mensaje de navegación y se emite hasta que el receptor remoto incorpora el nuevo mensaje. Este error se refleja en el parámetro IOD² de la estación de referencia (IODR) que será distinto al del usuario (IODU).

En la estación de referencia, se llevarán a cabo dos cálculos para la corrección de pseudodistancia (PRC) y para la tasa de cambio (RRC). El primer cálculo utilizará los últimos datos de navegación disponibles. Mientras que el segundo cálculo usará los datos de navegación más recientes. Luego la estación base, calcula la diferencia entre ambos cálculos, y determina los Δ PRC y los Δ RRC, que son los elementos que contiene este tipo de mensaje.

Mensaje 3: COORDENADAS DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA

Coordenadas X,Y,Z referidas al centro de fase de la estación de referencia para L1. Si dichas coordenadas no se encuentran en el Sistema de Referencia WGS84, se indica en el Mensaje 4.

Mensaje 18: DATOS CRUDOS DE LA MEDIDA DE FASE

Contiene las medidas de fase de la onda portadora sin corregir, con los siguientes parámetros:

- Indicador de frecuencia
- Indicador de la constelación: GPS (G)/GLONASS (R)
- Satellite ID: Número PRN
- Cumulative Loss of continuity: indicador de pérdidas de ciclos.
- Carrier Fase: Fase de la onda portadora

Mensaje 19: DATOS CRUDOS DE LA PSEUDODISTANCIA

Contiene las medidas de pseudodistancia sin corregir. Es semejante al mensaje 18 pero con dos parámetros distintos:

- SM: Smoothing interval, indica el error de multipath
- Pseudodistancia: medida de la pseudodistancia satélite-receptor

Mensaje 20: CORRECCIONES DIFERENCIALES DE LA FASE PORTADORA

Es muy similar a la corrección de pseudodistancias PRC (mensaje 1), pero se calcula usando las medidas de fase de la portadora de la estación base o de referencia (Ec. 2). La estación base calcula la corrección de fase (CPC) como la diferencia entre la distancia geométrica calculada u observada en ciclos (CGR – ComputedGeometricRange) y la distancia ajustada en función de las coordenadas conocidas de la estación base (ACR- AjustedCarrierRange).

$$CPC(t) = CGR - ACR \quad (2)$$

El receptor móvil aplica esta corrección a la observación medida (MUCR: Measured User Carrier Range), obteniendo la medida corregida (CUCR: Corrected User Carrier Range) (Ec. 3).

$$CUCR(t) = MUCR(t) + CPC(t) \quad (3)$$

² IOD (Issue of Data) Parámetro necesario para asegurar que el usuario y las correcciones emitidas por la estación están usando las mismas efemérides transmitidas y parámetros del reloj.

Mensaje 21: CORRECCIONES DIFERENCIALES DE LAS PSEUDODISTANCIAS

Contiene la misma información que el mensaje 1 pero cuenta con información adicional de la calidad de las medidas y es útil para el empleo en receptores de correlación cruzada. Los mensajes 20 y 21 poseen corrección por las efemérides.

Los mensajes del 31 al 36, contienen la misma información, pero referida al sistema GLONASS.

En cuanto a la versión 3.x, cada Tipo de Mensaje contiene información referida a un observable y/o una corrección [RTCM SC No. 104, 2013]. A continuación, se detallan los más relevantes para el posicionamiento diferencial:

Mensaje 1001: En la Tabla 2-1 se pueden observar los campos del mensaje 1001, uno de los más utilizado entre los usuarios locales. Contiene información relativa a la frecuencia L1. Este mensaje se genera tantas veces, como números de satélites se observen en la estación base.

Tabla 2-1: Campos que contiene el mensaje 1001

Datos del campo	Nº de campo
ID del satélite	DF009
Código indicador de L1-GPS	DF010
Pseudodistancia GPS L1	DF011
Fase L1- pseudodistancia L1	DF012
Indicador de tiempo de reloj de L1	DF013

Mensaje 1002: Es complementario al tipo 1001, ya que contiene la misma información que su antecesor, pero incluye además información del ruido de la onda portadora CNR (carrier-to-noise).

Mensaje 1003: Contiene la información básica de los observables de fase, en ambas frecuencias L1 y L2. Además de los campos que se transmiten en el mensaje 1001, se incluyen la diferencia entre la pseudodistancia L1 y L2, la diferencia entre la fase L2 y la pseudodistancia L1 y el tiempo de recepción de la señal, sin saltos de ciclos.

Mensaje 1004: incluye la misma información que el mensaje 1003, a la cual se suma el ruido de la señal L2, en el campo DF012: CNR (L1/L2), ruido o error de la portadora (carrier-to-noise).

Los mensajes 1005, 1006 y 1032 contienen información de las coordenadas de la antena de referencia. En la Tabla 2-2 se muestra la estructura del 1006. Estas coordenadas deben ser cartesianas geocéntricas referidas al punto de referencia de la antena (ARP). No deben referir al centro de fase, ya que este no es un punto fijo en el espacio y no puede ser indicado en la antena. El mensaje 1006, a diferencia del 1005, contiene además la altura de la antena (desde la monumentación al ARP). El mensaje 1032 contiene la misma información que el 1005, pero se utiliza para las estaciones virtuales (VRS), cuando no hay una estación física [RTCM SC No. 104, 2013].

Tabla 2-2: Estructura del mensaje 1006 RTCM 3.x

Datos del campo	N° de campo
Numero de mensaje (1006)	DF002
Año de realización ITRF	DF003
Indicador GPS	DF021
Indicador GLONASS	DF022
Indicador Reservado a Galileo	DF023
Coordenada X del ARP	DF001
Coordenada Y del ARP	DF026
Coordenada Z del ARP	DF027
Altura de antena	DF028

2.3 Correcciones de Red RTK

Son muchas las ventajas del posicionamiento diferencial de fase RTK, por sobre los de código, como por ejemplo que los usuarios pueden alcanzar precisión centimétrica en tiempo real. Sin embargo para alcanzar dicha precisión, se debe tener en cuenta la distancia base-remoto. Según las recomendaciones del servicio RAMSAC-NTRIP, la estación de referencia debe estar a una distancia inferior a los 50 kilómetros para receptores doble frecuencia, y 20 kilómetros para receptores simple frecuencia.

Allí aparece la primera dificultad, ya que la distribución de estaciones permanentes en la región no es suficiente para garantizar una cobertura que asegure en cualquier sitio, dicha distancia base-móvil. Siendo lo más habitual en países como Brasil o Argentina, distancias promedio de 200 km entre estaciones. En respuesta a este inconveniente surgen como alternativa las soluciones RTK de red.

Las soluciones de red se utilizan para modelar y corregir los errores del posicionamiento satelital (errores atmosféricos y orbitales), principalmente aquellos errores dependientes de la distancia, mejorando las precisiones en el cálculo de la posición del usuario. Las fuentes de error más significativas son las condiciones de la ionosfera, de la troposfera y los cálculos orbitales [Euler et al., 2001].

Estos errores se categorizan en dispersivos, cuando dependen de la frecuencia de la señal emitida (L1, L2, L5), como es el caso del retardo producido por la ionósfera; y cuando no dependen de la frecuencia se denominan no dispersivos, como el caso del error troposférico y los errores de reloj de los satélites.

Los primeros desarrollos de soluciones de red fueron la Estación de Referencia Virtual, VRS por sus siglas en inglés "Virtual Reference Station" y los Parámetros de Corrección Zonales, FKP por sus siglas en alemán "Flächenkorrekturparameter" [Euler et al., 2001]. Con la aparición del formato RTCM 3.0 se pudieron generar otras soluciones, como el Concepto Master-Auxiliar (MAC) o i-MAX (Individual Master-Auxiliary Concept), entre otras.

El país de la región con más desarrollo en soluciones de red es Uruguay. Desde el año 2007, gracias al aporte del Instituto de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de la República (UdelaR), se implementó un Caster- NTRIP experimental con el Instituto Geográfico Militar (IGM), en el que se incluyeron todas las estaciones de la red uruguaya

REGNA-ROU. Este servicio de caster luego pasó a estar gestionado por el IGM, y en el 2011 quedó disponible como un servicio público [Pérez Rodino y Suarez, 2012].

También en Brasil, existen antecedentes sobre servicios de corrección de red iniciados desde el ámbito académico, en este caso desde la Universidad de San Pablo (UNESP). Es un servicio de correcciones diferenciales en red denominado NDGPS (Network Differential GPS) que brinda correcciones a las “pseudodistancias” en tiempo real.

El concepto de DGPS se basa en la alta correlación de los errores debidos a los efectos atmosféricos, relojes de los satélites y de las órbitas. Sin embargo, cuando la línea de base crece, su eficacia disminuye debido a que la correlación de error se reduce. Esta limitación puede ser subsanada mediante el uso de una red de estaciones de referencia y la aplicación del concepto de red DGPS [Alves et al., 2012].

Existen distintas soluciones de red que han sido desarrolladas por las diversas marcas de receptores, y que, con la estandarización, se han incluido en diferentes tipos de mensajes RTCM. A continuación, se enuncian las principales características de las soluciones RTK de red más utilizadas hasta el momento:

-FKP: del alemán “Flächenkorrekturparameter” hace referencia a los parámetros de corrección espacial o de un área específica. Consiste en el cálculo de gradientes horizontales, dependientes de la distancia, de errores introducidos por la ionósfera, la tropósfera y las órbitas, transmitidos conjuntamente con las observaciones crudas de la estación de referencia correspondiente.

-VRS: del inglés “Virtual Reference Stations”, también conocido como estación de referencia no física o computada, consiste en el cálculo de una estación virtual (en base a la información proveniente de una red de estaciones permanentes) que se ubica en las cercanías de la posición del rover. Es condición necesaria que el rover envíe su posición a través del mensaje NMEA (National Marine Electronics Association).

-MAC: del inglés Master Auxiliary Concept, donde la función fundamental del software que gestiona la red, es determinar una ambigüedad entera entre las estaciones de referencia. Una vez que las observaciones de fase son reducidas a un mismo nivel de ambigüedad, es posible calcular los errores dispersivos y no dispersivos para cada par satélite-receptor y para cada frecuencia.

Para reducir el volumen de información, se envían las correcciones y la información de las coordenadas de una única estación denominada Maestra o Master. De las demás denominadas Auxiliares, se envía diferencias de correcciones y de coordenadas. La información de corrección diferencial puede ser usada por el rover, simplemente para interpolar el error en su posición o para reconstruir toda la información de todas las estaciones de la red.

Luego las correcciones enviadas a partir de este concepto se denominan MAX, en este caso el rover es el encargado de interpolar las correcciones recibidas y calcular su posición corregida.

Existe además la solución de red i-MAX, que fue diseñada para aquellos receptores que no tienen la posibilidad de recibir mensajes de corrección en red. En este caso es el software de procesamiento de la red, quien produce las correcciones para una posición

determinada del rover, por lo tanto para esta solución es necesaria una comunicación de doble vía para que el usuario pueda enviar su posición a través del mensaje NMEA y recibir luego las correcciones correspondientes a su posición [Euler et al., 2004].

Los programas comerciales que calculan estas soluciones de red, generan mensajes RTCM específicos (versión 3.x), donde se destacan los siguientes:

Mensaje 1015: Corrección diferencial para el retardo ionosférico calculado. Se construye como una combinación lineal de ambas frecuencias (f_1 , f_2) e intervienen la corrección diferencial calculada para L1 y L2 (Ec. 4).

$$ICPCD = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} L1CD - \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} L2CD \quad (4)$$

L1CD, L2CD: Es la corrección diferencial para L1 o L2, calculada como simple diferencia de la corrección de fase estimada en la estación de referencia auxiliar menos la corrección de fase estimada en la estación de referencia maestra [RTCM 10403.2, 2013].

Mensaje 1016: Corrección Geométrica GPS/GLONASS. Los errores denominados geométricos son aquellos que no dependen de la frecuencia (no-dispersivos) como el error troposférico y de reloj del satélite. En este mensaje se transmite una corrección diferencial a la parte geométrica calculada basada en el nivel entero de la corrección diferencial L1/L2 (Ec. 5).

$$GCPCD = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L1CD - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L2CD \quad (5)$$

L1/L2CD: ídem anterior.

Mensaje 1034/1035: Gradiente FKP GPS/GLONASS. Contienen los gradientes FKP para las componentes del error geométrico (error troposférico y de reloj) y para el error dispersivo (ionosférico) en cierta dirección. Por ejemplo, para la distancia este-oeste respecto a la estación de referencia, se expresa en partes por millón.

La solución i-Max por su parte, no transmite ninguno de esos mensajes, ya que como se dijo está diseñada para receptores móviles que no tienen la posibilidad de trabajar con soluciones de red. Razón por la cual, en el **mensaje 1004** se transmiten las observaciones corregidas para la posición del rover, utilizando el método de interpolación.

Finalmente, como la solución VRS genera las observaciones y correcciones para una estación virtual, utiliza el **mensaje 1004** de observaciones, como si se tratase de una estación fija y en el **mensaje 1032** transmite sus coordenadas.

2.4 Experiencias de aplicación: DGPS y RTK (NTRIP)

2.4.1 Equipamiento, configuración y comunicación a Internet

Existen distintos métodos de configuración del sistema de medición-comunicación según el receptor satelital a utilizar y según el equipamiento de comunicación que se disponga. Lo

primero que se debe tener en cuenta, es la manera en que el receptor remoto, recibe las correcciones emitidas por la base y el tipo de conexión a Internet a utilizar.

Para las primeras experiencias que se realizaron durante el desarrollo de esta tesis, se utilizó un receptor RTK doble frecuencia (Trimble R6). Respecto a la conexión a Internet, se probaron diferentes métodos, desde acceso por Wifi cuando se trabajó dentro del predio de la Universidad Juan Agustín Maza, hasta conectividad móvil a través de un teléfono celular.

Actualmente, la configuración suele ser más sencilla, ya que los receptores RTK más modernos tienen la posibilidad de conectarse a Internet desde el mismo dispositivo, utilizando una tarjeta SIM. Sin embargo, si el equipo no dispone de esta tecnología, existen aplicaciones para celulares que permiten conectarse al servidor caster, descargar los datos de interés y enviarlos al receptor mediante una conexión Bluetooth. La app gratuita más utilizada en teléfonos con sistemas operativos Android es NTRIP Lefebure [<http://lefebure.com/software/android-ntripclient/>].

Otra opción aún más sencilla, es generar una red Wifi desde un teléfono móvil, sirviendo como módem inalámbrico, utilizando la conexión de datos móviles propia del celular. Luego, la controladora del equipo o el mismo receptor, se conecta a esa red wifi y puede descargar los datos GNSS y correcciones que necesite.

2.4.2 1° Caso de medición: Santa Rosa, Mendoza.

Con el objeto de evaluar la aplicabilidad de las nuevas técnicas a Tiempo Real en nuestra región, se planificaron algunas experiencias de medición. En la primera de ellas se utilizó como base la estación MZAE, ubicada en el Departamento Santa Rosa, ya que en el momento de realizar la campaña (2011) era la única estación permanente de la provincia que transmitía su corrección diferencial mediante el protocolo NTRIP.

Se realizó previamente una campaña clásica de levantamiento GNSS con mediciones estáticas, en los puntos elegidos a distancias variables desde 1 km hasta 50 km de la base MZAE (Figura 2-1). Esta tarea se llevó a cabo para obtener coordenadas precisas de los puntos sobre los cuales se mediría luego en la campaña a Tiempo Real. Se utilizaron dos receptores GPS simple frecuencia (Trimble 4600 y TechGeo, GTR-A, propiedad de la UMaza). En gabinete se procedió a procesar la campaña clásica de mediciones estáticas, de manera de obtener la mayor precisión posible en las coordenadas finales. El detalle del pos-procesamiento de dicha campaña se detalla en el **Anexo III: Coordenadas de control.**



Figura 2-1: Puntos elegidos para el relevamiento RT

Experiencia RTK- NTRIP (receptor geodésico)

Se trabajó con un receptor GPS Trimble R6, utilizando las correcciones de la estación permanente MZAE, obtenidas con el programa MobileNTRIP instalado en un celular Nokia E66, y luego transmitidas al receptor vía bluetooth (Figura 2-3).



Figura 2-3: Configuración RTK utilizada

Se comenzó en el punto ubicado a 1km de distancia de la estación permanente MZAE, dejando inicializar el equipo durante los primeros 17 minutos para que resolviera las ambigüedades en modo estático. Se grabaron en total cinco observaciones en cada punto, separadas por intervalos de 1 minuto. Este procedimiento se realizó en todos los puntos marcados (hasta los 50 km).

En cada uno de los puntos nombrados se midió entonces con las dos técnicas, DGPS y RTK a través del protocolo

NTRIP. La conexión a Internet fue provista por dos empresas de telefonía móvil distintas, y en ningún momento se tuvo dificultades de conexión.

Precisión RTK-NTRIP en función de la distancia a la base

En la Figura 2-4 se muestran las diferencias medias resultantes, calculadas entre las posiciones RT y las coordenadas de control (proyección Gauss Kruguer – G.K.). Se observa que en los puntos situados dentro de los primeros 25km, las diferencias están por debajo de los 3 centímetros. A partir de los 35 km, los residuos en las tres coordenadas aumentan con la distancia. El mayor error, se observa en la coordenada Este, que para una separación base-móvil de 50 km, alcanza los 50 cm.

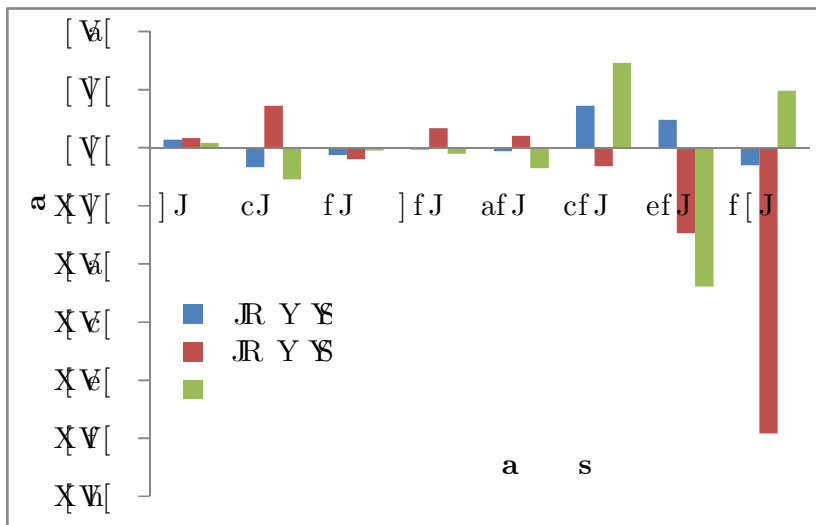


Figura 2-4: Diferencias medias de coordenadas entre pos-proceso y RTK-NTRIP

Las planillas de comparación entre las coordenadas de control y las obtenidas por RTK-NTRIP en la campaña Santa Rosa, se pueden observar en el Anexo IV.

Precisiones logradas con DGPS-NTRIP

La Figura 2-5 muestra las precisiones obtenidas en las coordenadas planimétricas, calculadas por diferencias respecto a las coordenadas de control. En la mayoría de los puntos, se obtuvieron algunos decímetros resultando en el peor de los casos inferior a dos metros. En altimetría la técnica no presentó mejoras con respecto al posicionamiento absoluto estándar, apreciándose diferencias promedio de 8.43 m, razón por la cual no se grafican junto con las diferencias planimétricas.

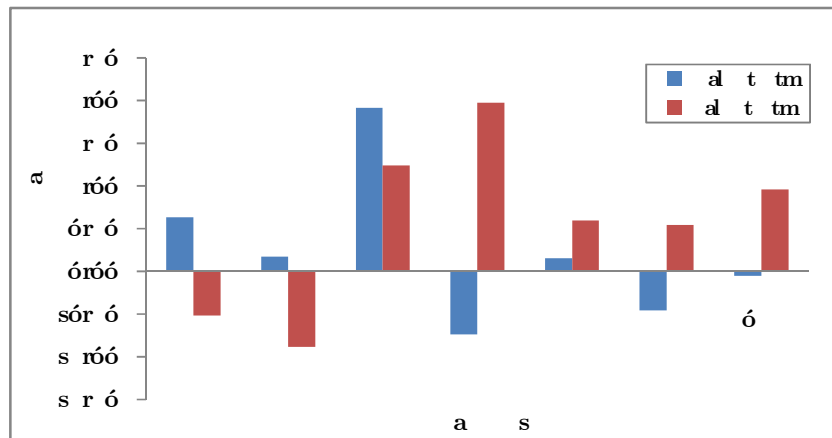


Figura 2-5: Diferencias de coordenadas control vs DGPS

Se observa que la precisión prácticamente no varía conforme aumenta la distancia base-remoto. Las diferencias medias se mantienen tanto para los puntos ubicados en las cercanías de la estación base, como aquellos alejados a más de 35 km.

Las planillas de comparación entre las coordenadas de control y las obtenidas por DGPS en la campaña de Santa Rosa se pueden observar en el **Anexo V**.

2.5 Experiencias de aplicación: Soluciones de red (Net-RTK)

Gracias a la participación en el proyecto SIRGAS-RT, se pudo realizar una pasantía de capacitación en las instalaciones de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Se trabajó en el departamento de Geodesia, perteneciente al Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, con el objeto de evaluar la precisión a obtener mediante la técnica RTK-NTRIP utilizando tanto correcciones provenientes de una única estación permanente (soluciones punto a punto), como soluciones de red. Específicamente se propuso evaluar cómo se comportaban las distintas soluciones de red y de qué manera influía la distancia entre las estaciones de la red y la estación remota.

Esta experiencia se realizó en el 2013, 7 estaciones de la red uruguaya REGNA-ROU (Red Geodésica Nacional-República Oriental del Uruguay), se encontraban configuradas como estaciones Server en tiempo real (UYMO, UYLP, UYRO, UYTA, UYPA, UYSO, UYDU). Respecto a los productos RT, se pudieron utilizar diferentes streams correspondientes a las 7 estaciones bases, los formatos estándar RTCM 2.x y RTCM 3.0 y los formatos

propietarios LB2 Leica y CMR Trimble. Se observaron cuatro soluciones de red: VRS, FKP, Max e i-Max, asociadas a distintas celdas fijas definidas por el administrador (Figura 2-6). Se pudo acceder a estos productos de forma gratuita, a través del caster del IGM: *IP: rtk.igm.gub.uy, Puerto: 8081*.

Cabe aclarar que en esta experiencia se participó de la instalación de una nueva estación: UYLA, con el objetivo de ensayar diferentes soluciones de red, y conformando diferentes redes de trabajo. Cada sub-red configurada se denomina “Celda”.

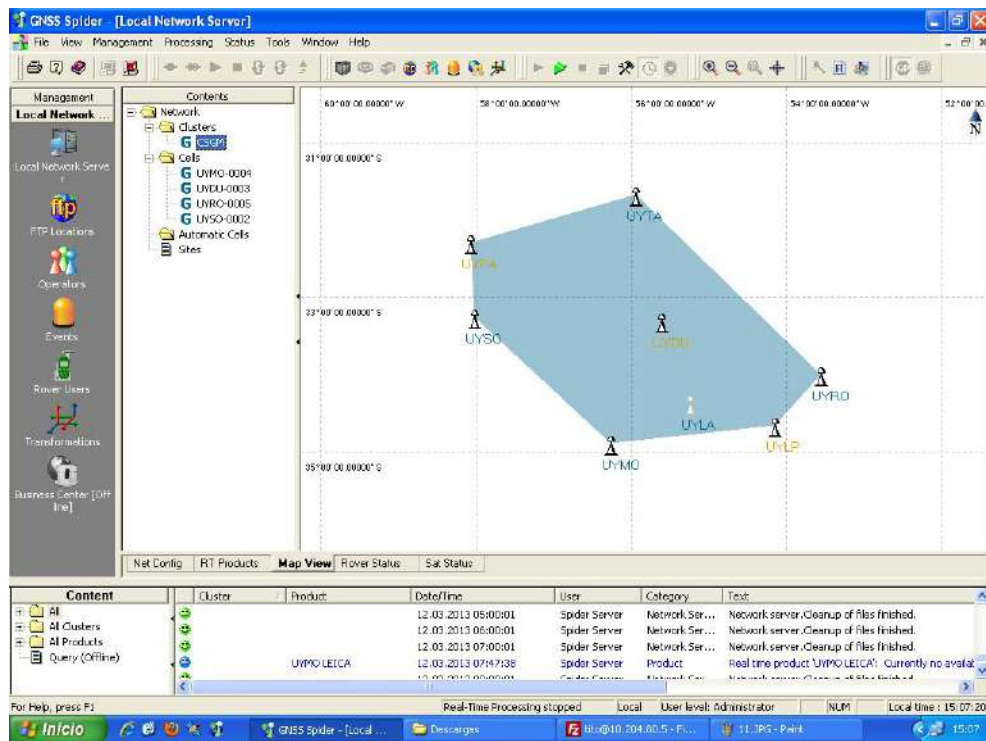


Figura 2-6: Configuración REGNA-ROU Uruguay, servicios a tiempo real, marzo de 2013.

La primera experiencia de campo se realizó en la intersección de las rutas 8 y 80, Departamento de Montevideo, con el fin de evaluar la disponibilidad y eficiencia de cada una de las soluciones de red configuradas. Se trabajó con dos receptores RTK doble frecuencia que soportan soluciones de red (Leica Viva SmartWorx GS08). Uno se instaló como base estática para poder almacenar sus observaciones, y haciendo un posterior procesamiento, tener coordenadas precisas de control, para compararlas con las soluciones de tiempo real.

El otro receptor se configuró como rover, y en él se ensayaron las diferentes soluciones tanto puntuales como de red. Se utilizó una tarjeta SIM con el servicio de datos activado para la conexión a Internet. En primer lugar, se ensayaron soluciones punto a punto tomando las estaciones UYLA (Lavalleja) y UYMO (Montevideo) como bases, para ello se seleccionaron los streams UYLA-RTCM-V3 y UYMO-RTCM-V3. En segundo lugar, se ensayaron soluciones de red VRS, FKP, MAX e iMAX sobre las distintas celdas creadas, en

principio con la opción celda automática (donde el programa elige las estaciones participantes en función de la distancia al rover) y luego con celda fija.

Una vez concluido el proceso de inicialización del receptor móvil, se procedió a medir sobre un mismo punto fijo, por aproximadamente 10 minutos para luego comparar las coordenadas obtenidas en tiempo real, con las coordenadas de control provenientes del pos-procesamiento. Dicha comparación se realizó utilizando coordenadas planas UTM, en zona 21 (Sistema de Proyección utilizado en el Uruguay). La planilla de resultados se puede ver en el [Anexo VI](#).

En la Figura 2-7 se observan las diferencias medias obtenidas para cada tipo de solución, respecto a las coordenadas control:

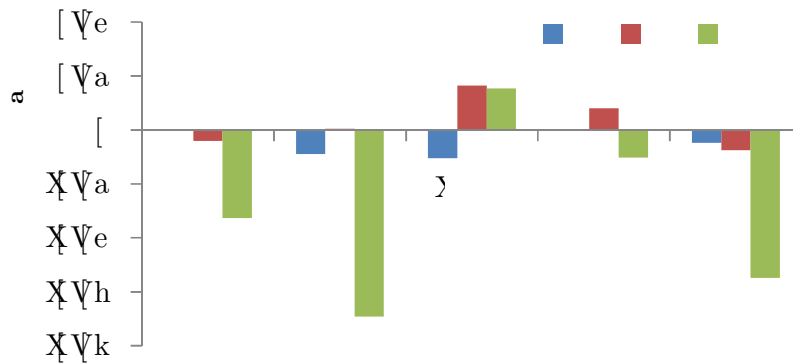


Figura 2-7: Precisiones RT- Soluciones de red y puntual (UYLA)

Se aprecia que las componentes horizontales en todos los casos presentan resultados muy precisos, con diferencias menores a los 2 centímetros. En el caso de las alturas, se aprecia una diferencia mayor, con valores cercanos a 6 cm en la solución MAX y en la solución puntual. Estas precisiones permiten que estas técnicas puedan ser empleadas en aplicaciones como la georeferenciación, notándose el gran beneficio de su utilización en caso de que no exista un estación permanente cercana.

La Figura 2-8 muestra el tiempo medio de inicialización (resolución de ambigüedades) en cada tipo de solución Net-RTK:

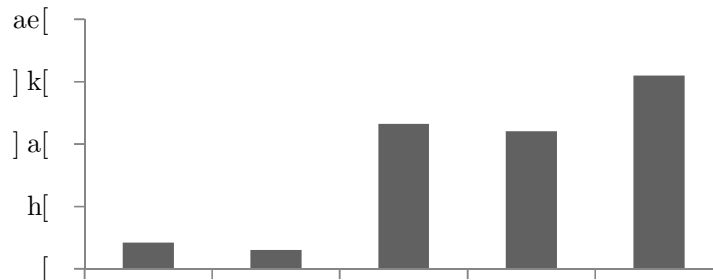


Figura 2-8: Tiempo requerido para la resolución de ambigüedades- Soluciones de red y puntual (UYLA)

La resolución más eficiente en esta experiencia resultó ser MAX, muy similar a VRS, permitiendo la inicialización del receptor remoto en menos de 30 segundos. Con las restantes soluciones se resolvió entre 2 y 3 minutos, tiempo muy apropiado para cualquier

tipo de aplicación. Se remarca que el receptor utilizado disponía de métodos de resolución rápidos. Incluso con la solución puntual UYLA, se realizó la inicialización en un tiempo muy breve, comparado con el método clásico de resolución geométrica que requiere un mínimo de 20 minutos.

2.5.1 Precisiones de las soluciones de RED según la distancia entre estaciones

Se realizó una segunda campaña de medición, en la ciudad de San Jacinto, situada a 50 km de Montevideo en dirección nor-este (Figura 2-9). Se configuraron cuatro celdas nuevas, dos celdas grandes, excluyendo la estación UYLA, una con la estación UYMO (Montevideo) como maestra y otra con UYDU (Durazno), ya que se deseaba experimentar soluciones con una estación lejana como master (ubicada a 140 km de San Jacinto). La tercera celda, más pequeña, se conformó con las estaciones UYLA, UYDU y con UYMO como maestra. Y la cuarta sub-red fue una celda automática, incluyendo a todas las estaciones. Se generaron entonces los cuatro correspondientes productos, tanto para la solución VRS como para MAX.

Nuevamente se instaló un receptor midiendo en modo estático, para obtener las coordenadas de control y con el equipo móvil se ensayaron los productos RT configurados. Para cada solución se midieron 10 puntos sobre el mismo sitio, con un intervalo de medición de 60 épocas cada 1 segundo, de manera de tener un muestreo apropiado para los fines de la investigación y poder realizar posteriormente un análisis estadístico de los resultados.

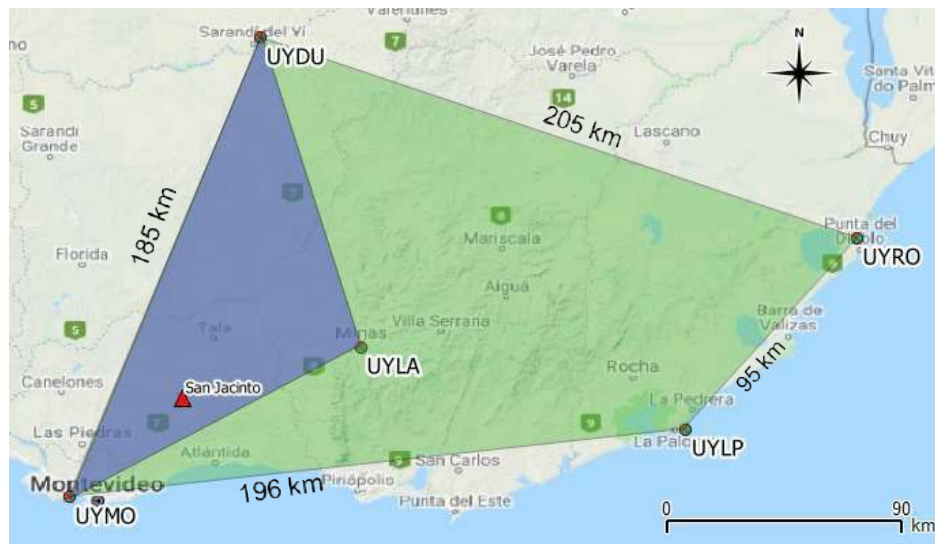


Figura 2-9: Experiencia San Jacinto

En la Tabla 2-3 se observan los valores promedio de las diferencias respecto a las coordenadas de control, para cada solución. La planilla completa de comparación se puede observar en el **Anexo VII**.

Tabla 2-3: Precisiones Soluciones de Red

Solución	Maestra	Nº EP	dN [m]	dE[m]	dV[m]
Puntual	UYMO		0.001	0.006	0.018
VRS	Automática	5	-0.001	0.000	-0.005
	UYMO	5	0.002	0.002	0.020
	UYDU	5	0.015	-0.016	0.043
	UYMO	3	-0.009	-0.011	0.004
MAX	Automática	5	-0.006	0.005	0.033
	UYMO	5	0.001	0.011	0.038
	UYDU	5	0.024	-0.008	0.039
	UYMO	3	-0.012	-0.001	-0.004

Si bien se aprecian algunas diferencias entre las distintas soluciones y celdas, todas presentan muy buenos resultados. Luego la celda que posee a la estación UYDU como maestra, es la que mayores diferencias presenta, sin embargo considerando que la misma se encontraba a 140 km del sitio de observación, los residuos encontrados fueron muy alentadores (menores a 2 cm en planimetría y a 4 cm en altura). Los resultados de la celda más pequeña (UYMO-uyla-uydu), sin considerar UYRO, evidencian una notable disminución en los residuos, sobre todo en altura.

En base a las experiencias realizadas con soluciones de red, se pudo comprobar que efectivamente ofrecen un mejor servicio respecto a las soluciones puntuales, ya que permiten trabajar a mayor distancia usuario-estación de referencia, garantizando las precisiones deseadas del posicionamiento preciso a tiempo real.

Por otro lado, estas soluciones permiten reducir significativamente el tiempo de inicialización del receptor móvil (30 s versus 120 s o más), además de brindar seguridad e integridad al servicio.

2.6 Los marcos de referencia en las correcciones NTRIP

Una de las principales aplicaciones de los métodos de posicionamiento en Tiempo Real, a través del protocolo NTRIP, es la Georreferenciación de parcelas. Antes de la aparición de las técnicas RT, esa tarea se llevaba adelante mediante posicionamiento GNSS relativo convencional: un receptor base sobre un punto de coordenadas conocidas y otro receptor (remoto) sobre el vértice de la parcela a georreferenciar. Luego se procesaban las observaciones obtenidas ya que sólo se alcanzaba precisión centimétrica realizando el correspondiente cálculo diferencial.

Actualmente, con las técnicas RT, es posible vincularse a un determinado marco de referencia, con precisión, en forma rápida (en el instante de medición), simple (con un único receptor recibiendo corrección del server) y segura (las correcciones están en el marco de referencia de la estación server).

Por lo tanto, una de las ventajas más relevantes de estas técnicas, es que permiten obtener coordenadas en el marco de referencia de las estaciones Server-NTRIP utilizadas, sin necesidad de realizar cálculos adicionales ni pos-procesamiento.

De esta forma, una correcta configuración de las estaciones GNSS permanentes que transmiten las correcciones RT-NTRIP, asegura no sólo la vinculación de los usuarios al marco de referencia sino alcanzar óptimas precisiones en las coordenadas resultantes.

Es recomendable que las coordenadas de las estaciones estén referidas al mismo marco de referencia en el que se encuentren las efemérides utilizadas, es decir a la última solución del marco de referencia internacional ITRF [Camisay et al., 2013].

2.6.1 Análisis del Marco de Referencia en los servicios RT regionales

Debido a la importancia del tratamiento del marco de referencia en las correcciones RT, se procedió a investigar esta característica en los servicios disponibles de la región. Se analizaron los tres servicios RT-NTRIP más desarrollados de Latinoamérica: RAMSAC-NTRIP en Argentina, REGNA-ROU en Uruguay y RBMC-IP en Brasil. Haciendo especial hincapié en la información que publican a sus usuarios respecto al Marco de Referencia de sus coordenadas.

Se realizó una búsqueda bibliográfica al respecto, y se hicieron consultas a los administradores. Se determinó que las correcciones que cada servicio transmite, se encuentran en el marco de referencia oficial del correspondiente país. Por otro lado, se concluyó que las coordenadas de las estaciones Server no han sido actualizadas, es decir están referidas a la época original del marco respectivo. Los detalles de cada servicio se aprecian en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4: Servicios RT-NTRIP regionales

Servicio	País	Marco de Referencia	Época
RAMSAC-NTRIP	Argentina	POSGAR 2007	2006.6
REGNA-ROU	Uruguay	ROU 98	1995.4
RBMC-IP	Brasil	SIRGAS 2000	2000.4

En el segmento del usuario, se evaluaron y observaron las diferentes aplicaciones que este utiliza para recibir las correcciones NTRIP. Estas aplicaciones “cliente” son variadas y pueden instalarse en computadoras, dispositivos móviles y actualmente en las controladoras de los receptores.

Se constató que los usuarios no tienen acceso a la información del marco de referencia en el momento de medición. Todos los programas analizados (GNSS Internet Radio, BNC Software, Controladoras Trimble y Leica, Spider Software, etc.) muestran al usuario solo el Mountpoint (nombre indentificadorio del stream). Este nombre por lo general contiene 4 dígitos que identifican a la estación permanente y luego poseen alguna descripción de la versión del formato RTCM que están utilizando. Por ejemplo, dos Mountpoint para la estación mendocina MZAC son: MZAC-v3.0 y MZAC-v2.3, que demuestran lo detallado. Sin

embargo, nada dicen del marco de referencia ni de la época a la que refieren las correcciones transmitidas.

Si bien una de las principales ventajas del posicionamiento diferencial RT, es que permite densificar los marcos de referencia de manera sencilla y rápida, la información sobre el marco no se reporta directamente, sino que se transmite indirectamente a través de la corrección que recibe el usuario y no es fácilmente identificable. De allí la importancia que esta información sea debidamente publicitada.

Luego de haber analizado la situación de las estaciones latinoamericanas operativas en los servicios RT-NTRIP, se observan dos problemáticas. Por un lado, los marcos nacionales de la región no materializan la última solución del ITRF, presentando una desactualización en sus marcos en algunos casos mayor a 20 años. Por otro lado, dichos marcos no son consistentes entre sí, considerando precisión centimétrica. Es decir que si un usuario quisiera vincularse a estaciones de países limítrofes tendría que tener presente esta situación y obtendría diferencias significativas en las coordenadas resultantes, según a qué estación se vinculase. En el apartado siguiente se presenta un caso de aplicación en la zona limítrofe entre Uruguay y Argentina, mayores detalles se encuentran en Camisay et al. (2013)

2.6.2 Influencia del Marco de Referencia en el posicionamiento RT-NTRIP

Se planificó una experiencia de aplicación en la zona litoral limítrofe Uruguay-Argentina, utilizando correcciones diferenciales de una misma estación Server, en tres marcos de referencia distintos.

Se utilizó la estación uruguaya UYSO, ubicada en la ciudad de Mercedes, departamento de Soriano, como base del posicionamiento, por ser la más cercana a la zona de estudio.

En el caster del Servicio Geográfico Militar (SGM) de Uruguay, se encuentra disponible el stream UYSO-RTCM-V3, el cual transmite observables y correcciones de la estación elegida. Este fue el stream base de la experiencia. A partir del mismo se trabajó con el software Leica GNSS Spider para crear tres nuevos sitios, tomando el stream de UYSO antes mencionado, y modificando las coordenadas de referencia en las siguientes tres opciones:

- 1- coordenadas ROU98, marco de referencia oficial de Uruguay.
- 2- coordenadas POSGAR2007 marco de referencia oficial de Argentina, y
- 3- coordenadas de la solución semanal SIRGAS 1741 (la última solución disponible al momento de generar la corrección).

Se indicó además el tipo de receptor (Trimble Net RS) y la antena (TRN 55971.00), para los tres casos.

Una vez disponibles los tres nuevos streams se constató en el software GNSS Surfer que efectivamente se estuviesen transmitiendo las coordenadas correspondientes en cada flujo de datos, para ello se decodificó el mensaje 1005.

Los tres streams se publicaron en el caster escuela de SIRGAS que funciona en la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UdelaR), Montevideo, Uruguay. Los Mountpoint se nombraron de manera tal de identificarlos según el marco de referencia.

La medición se realizó en Las Cañas, poblado cercano a la ciudad uruguaya de Fray Bentos. Se midió en 3 sesiones, una con cada Mountpoint. Se grabaron 120 épocas en cada sesión, a intervalos de 60 segundos. Simultáneamente se grabaron los observables correspondientes para realizar luego el procesamiento diferencial de dichos datos y utilizarlos para control. Finalmente, las posiciones obtenidas en la campaña de tiempo real se compararon con la coordenada pos-procesada vinculada a la solución SIRGAS de la semana 1741.

En la Figura 2-10 se observan las diferencias encontradas con los tres streams creados. Los mayores residuos se observan en la sesión 1 referidos al marco ROU98, alcanzando 20 cm de diferencia en la coordenada norte. En la componente Este, se observan diferencias medias menores a 5 cm en las primeras 2 sesiones (ROU98 y POSGAR07). Luego en la sesión 3, con coordenadas semanales, se observa la precisión de la técnica (diferencias menores a 2 cm).

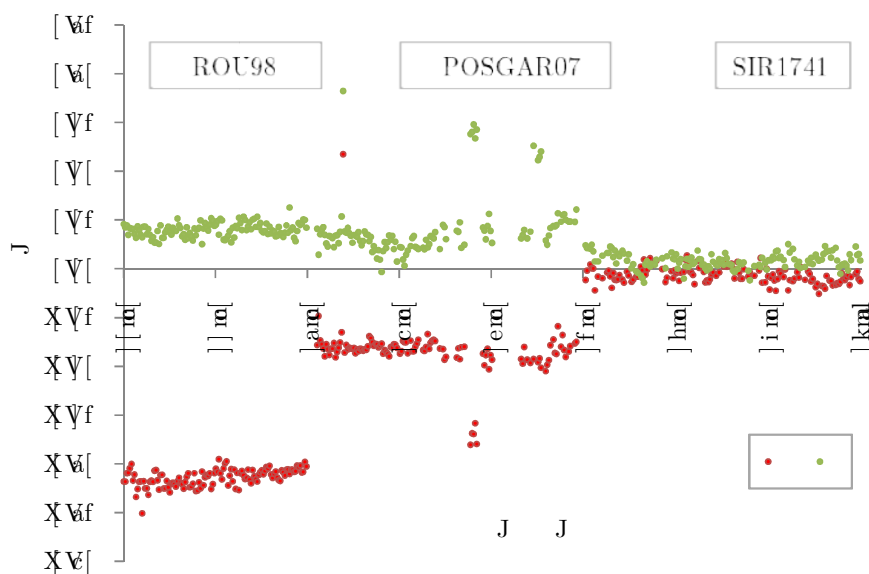


Figura 2-10: Diferencias horizontales, experiencia zona limítrofe Uruguay-Argentina

En los residuos de altura, no se aprecian diferencias entre las tres sesiones. Observándose un error medio de 5,6 cm y una desviación estándar de 3 cm, esto acuerda con resultados de otros autores [Mackern et al., 2009] en que la precisión en altura es entre dos y tres veces peor que la planimétrica. Esta imprecisión es superior a la influencia de los tres marcos de referencia analizados sobre el posicionamiento altimétrico.

Los resultados permiten asegurar que efectivamente la utilización de uno u otro marco en las coordenadas de la estación server UYSO, influye en la exactitud de las coordenadas finales del usuario.

2.7 Conclusiones

En este capítulo se presenta cómo han evolucionado las técnicas RT, principalmente en los desarrollos tecnológicos relacionados a la transmisión de correcciones. El desarrollo de las aplicaciones de Internet, ha permitido remplazar el enlace a través de radio transmisores por un protocolo TCP/IP que permite ampliar la distancia base-móvil y facilitar la logística del posicionamiento.

Por otro lado, el desarrollo del formato RTCM, en sus diferentes versiones, evidencia los principales avances en cuanto al contenido de las correcciones para el posicionamiento diferencial (RTK-DGPS). La incorporación de nuevos sistemas de posicionamiento (GLONASS y Galileo), la reducción del tamaño de los paquetes transmitidos y la incorporación de soluciones de red, son las mayores ventajas de las últimas versiones respecto a las primeras.

La estandarización de las correcciones a partir del formato RTCM, ha permitido el desarrollo de los actuales servicios de posicionamiento en tiempo real, ya que hace posible el intercambio de diversas marcas de receptores, permitiendo la implementación de nuevas aplicaciones e innovaciones.

En el caso del posicionamiento diferencial, a través del protocolo NTRIP, el usuario solo necesita un receptor. Se prescinde de la base propia, ya que es sostenido el crecimiento de estaciones GNSS permanentes que transmiten sus observaciones y correcciones en tiempo real. También se prescinde del sistema de comunicación por radio transmisores, con sus baterías, antenas y demás implementos, pero se necesita tener acceso a internet. De igual modo considerando la actual cobertura de redes de telefonía móvil, es factible que los usuarios puedan conectarse a Internet desde el mismo equipo o desde su teléfono celular.

Con las técnicas RT, es posible vincularse a un determinado marco de referencia, con precisión, en forma rápida (en el instante de medición), simple (con un único receptor recibiendo corrección del server) y segura (las correcciones están en el marco de referencia de la estación server), sin necesidad de realizar cálculos adicionales ni post-procesamiento. Siendo esta una de las ventajas más relevantes de RT-NTRIP.

Si bien en las aplicaciones RTK-NTRIP realizadas se alcanzaron las precisiones esperadas, se pudo probar que la utilización de Marcos de Referencia desactualizados produce una pérdida en la exactitud de la coordenada final.

Frente al incremento de nuevos servicios nacionales de posicionamiento RT, se considera conveniente que utilicen coordenadas oficiales en las estaciones Server, siempre que estas estén actualizadas.

Dado que es posible utilizar estaciones Server provenientes de distintos países, los marcos nacionales deberían ser consistentes o bien re-publicar sus streams en algún marco de referencia regional (como por ejemplo SIRGAS) que permitiese la interacción entre los servicios, sin pérdidas de exactitud y precisión.

Se recomienda utilizar un marco de referencia actualizado para todas las estaciones de la región, siendo una buena alternativa la última solución multianual SIRGAS disponible.

En las condiciones que se presentan actualmente los servicios, cuesta predecir hacia dónde se inclinarán los desarrollos futuros. Existen dos grandes líneas de investigación dentro de las tecnologías RT, por un lado, las soluciones de red han tomado gran valor dentro de los desarrollos comerciales, y por el otro, el posicionamiento puntual preciso PPP, presenta grandes avances dentro de la comunidad científica.

CAPITULO 3: POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO EN TIEMPO REAL

3.1 Introducción

Las aplicaciones de los sistemas satelitales de navegación global se extienden a numerosos campos de las ciencias y de las ingenierías creando nuevas líneas de investigación, desarrollo y transferencia que, en muchos casos, culminan con la implantación de un nuevo producto o servicio pasible de ser explotado comercialmente [Brunini y Azpilicueta, 2007]. La posibilidad de integrar un sensor GNSS con un dispositivo móvil de comunicación está diversificando el campo de aplicación de los GNSS de un modo imprevisible [COM, 2004].

Actualmente, cualquier usuario que dispone de un receptor GNSS, es capaz de conocer su posición en instantes, pero existen errores propios de la observación que deben ser corregidos para obtener coordenadas con mejor precisión. Hoy en día, con los avances en las técnicas de comunicación, y en especial en las tecnologías de Internet móvil, que permiten la transmisión de correcciones en tiempo real, esos errores pueden corregirse o al menos eliminar su influencia.

De allí surgen diferentes técnicas de posicionamiento, que pretenden mejorar la precisión del observador. El posicionamiento diferencial con pos-proceso, ha sido la técnica más empleada para aplicaciones científicas, debido a las precisiones que permite alcanzar, sin embargo, requiere de la observación simultánea de dos receptores y su posterior cálculo o pos-procesamiento. Tal es que SIRGAS, ha logrado precisiones en las coordenadas horizontales mejores que 1 mm y 3 mm en altura [http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol25/06_GTI_reporte_2020.pdf]. No obstante, las técnicas de pos-procesamiento clásicas no responden a los requerimientos de tiempo real.

Una alternativa es la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), que consiste en el cálculo de la posición de un observador aislado (puntual) a partir de las observaciones que este realiza a los satélites, incorporando modelos correctivos específicos.

Inicialmente esta técnica se aplicó en modo pos-proceso, como una técnica rápida de obtención de coordenadas [Zumberge et al., 1997a]. Luego surgieron los servicios PPP en línea, que permiten obtener las coordenadas del observador, enviando archivos de observación RINEX. Las precisiones de estos servicios dependen del tipo de efemérides e intervalo de medición, permitiendo lograr precisiones mejores que 10 cm para observaciones de como mínimo una hora, y mejor que 3 cm en sesiones más prolongadas [Gomez et al., 2013].

Afortunadamente desde el año 2003, esta técnica puede aplicarse en Tiempo Real, gracias a la disponibilidad de datos y correcciones en internet mediante el protocolo

NTRIP [Weber et al., 2003, Weber et al. 2005]. NTRIP, permite la transmisión online de los datos observados por los receptores GNSS, como así también de los modelos correctivos, como se introdujo en el capítulo 1. Sin embargo, existen algunas limitantes a resolver para garantizar una buena coordenada PPP, como la resolución de ambigüedades y el tiempo de convergencia de la solución.

Como se mencionó en el capítulo 2, las soluciones RTK de red, transmiten las observaciones de una estación GNSS permanente junto con los parámetros de la red que describen los errores dependientes de la distancia o bien las observaciones de una estación virtual cercana al usuario. Este mecanismo, se denomina representación del espacio de observación, OSR (Observation Spatial Representation). En contraste con este concepto surge el SSR (State Space Representation) que permite la representación completa del estado de los GNSS, a partir de los datos espaciales y de tiempo. Luego, el posicionamiento denominado PPP-RTK utilizando datos de representación SSR es un concepto posible, que puede aplicarse en redes pequeñas, regionales o globales [Wabbena et al, 2005]. Este nuevo posicionamiento, consiste entonces en un PPP basado en redes RTK, que permiten la resolución de ambigüedades, factor limitante del PPP, y brinda precisión centimétrica en pocos segundos [Schmitz, 2012]. Ya que la resolución de ambigüedades enteras es obligatoria en las redes RTK, todos los componentes de error se pueden modelar con precisión y en forma continua.

Existe un grupo de trabajo especial dentro de la comisión RTCM-SC104 dedicada al SSR, encargada de contribuir en la corrección de los errores que afectan a la señal GNSS. Actualmente dispone de correcciones a las órbitas y relojes de los satélites, corrección al código e indicadores de calidad, que permiten PPP en tiempo real para usuarios con receptores doble frecuencia. Dichas correcciones son recomendaciones estándares y están incluidas en la versión 3.x del formato RTCM.

Cómo planes a corto plazo de esta comisión, se desean incluir estimaciones del contenido total de electrones en la dirección vertical, VTEC (Vertical Total Electron Content) y correcciones a la fase, permitiendo de este modo que usuarios con receptores simple frecuencia puedan realizar también PPP en tiempo real. Y como tareas futuras, se desea incorporar el STEC (Slant Total Electron Content) y el retardo troposférico, para poder alcanzar su mayor objetivo: brindar posicionamiento PPP-RTK a cualquier usuario. Por el momento entonces, utilizando las correcciones de reloj y órbitas de los satélites, contenidas en los mensajes SSR, es posible realizar PPP en equipos doble frecuencia obteniendo precisión centimétrica.

En este capítulo se presentan los avances y requerimientos del Posicionamiento Puntual Preciso a tiempo real, una descripción del método de cálculo y configuración de uno de los software más utilizados por la comunidad científica BNC (BKG NTRIP Client). También se relata una experiencia de monitoreo en la zona de Cuyo, Argentina, durante 6 meses de observación PPP a tiempo real, y el análisis de los resultados sobre la precisión y exactitud de la técnica. Finalmente se dan recomendaciones en cuanto a su utilización para

georreferenciación, teniendo en cuenta la influencia del Marco de Referencia y la época de las correcciones aplicadas.

3.2 Correcciones para el Posicionamiento Puntual Preciso

La capacidad de predecir las órbitas de los satélites GNSS y el estado de sus relojes ha sido una de las principales mejoras en los sistemas de posicionamiento, de las últimas dos décadas. Un factor decisivo para lograr esas mejoras fue el despliegue, bajo la coordinación del International GNSS Service (IGS), de una red global de rastreo con alrededor de cien estaciones GNSS que proporcionan datos RT (Real Time).

Luego, la disponibilidad de orbitas y relojes precisos en tiempo real ha movilizó el desarrollo de técnicas basadas en el posicionamiento puntual preciso en tiempo real, en contraposición con el posicionamiento diferencial. Ya no es necesario que un receptor base genere y transmita al remoto la información requerida por el método diferencial. En su lugar, un servidor transmite al receptor remoto las orbitas y los relojes precisos requeridos por el método PPP [Bisnath y Gao, 2009].

El servicio RT-IGS [<http://www.igs.org/rt>] calcula correcciones a las órbitas y a los relojes de los satélites y las pone a disposición de los usuarios en su Caster-NTRIP. Este servidor ofrece diferentes productos que contienen corrección a las órbitas y a los relojes. Coexisten las soluciones individuales producidas por los centros de análisis (RT-AC) y algunas combinaciones de dichas soluciones [<http://www.igs.org/rt/products>]. Estas combinaciones dan seguridad y estabilidad a las soluciones de cada centro, como se detalla a continuación:

-IGS01: Combinación de las soluciones de los distintos centros de análisis (AC) por época, producida por el software desarrollado por ESA/ESOC. Las épocas de este producto son completamente independientes entre sí. La combinación permite eliminar el desfase (offset) de los relojes calculado por cada AC, con el fin de alinear los relojes en cada solución. Luego, los relojes alineados se seleccionan para detectar valores atípicos y se combinan calculando un valor de reloj promedio ponderado para cada satélite. Los estados de la órbita se combinan utilizando el valor promedio de las contribuciones de cada AC. Esta corrección refiere al centro de fase de las antenas, existe también la combinación ICG01 (que surge del mismo procedimiento) pero referida al centro de masa CoM (Center of Mass).

-IGS02: es una combinación por filtro de Kalman, generada por el software BNC (BKG NTRIP Client). Contiene correcciones solo para la constelación GPS. La información de las órbitas proviene de la solución de efemérides ultra-rápidas IGS. Luego, los relojes de los satélites estimados por los centros de análisis individuales son utilizados como pseudo-observaciones en el proceso de ajuste del filtro de Kalman. Cada observación es modelada como función lineal de tres parámetros estimados: desfasajes (offset) específicos de cada AC, offset del satélite, común a todos los AC y la corrección de reloj actual que representa el resultado de la combinación. Los offset de reloj de los satélites son considerados como parámetros estáticos, mientras que los específicos de cada AC y los offset de satélite son parámetros estocásticos con un ruido asociado. Luego la solución se obtiene por un ajuste con mínimo constreñimiento. Respecto a las órbitas, se utiliza un algoritmo recursivo para

detectar saltos o valores atípicos (outliers). Se calcula la mayor diferencia entre los offset específicos de los AC y la posición media de los satélites. Si esa diferencia es mayor a una tolerancia, las correspondientes correcciones para tal AC son descartadas para la época afectada. El programa requiere unos pocos minutos para converger y alcanzar una buena precisión, pero una vez alcanzada dicha precisión no se pierde, a menos que el programa deba re-iniciarse por algún motivo.

-IGS03: Es una combinación por filtro de Kalman, se calcula con el programa BNC y sigue la misma metodología que el producto IGS02, pero incluye la constelación GPS y GLONASS. Los AC utilizan para las órbitas los productos ultra rápidos del IGS (IGV), o sus propias estimaciones.

Todos estos productos transmiten correcciones a las órbitas y a los relojes de los satélites, que deben ser aplicados en las efemérides transmitidas. Contienen correcciones u “offsets” respecto a la órbita generada por las efemérides transmitidas en la dirección de la trayectoria, transversales y radiales, siempre referidos al marco de referencia centrado y fijo con la Tierra (ECEF- Earth-centered Earth-fixed). Estas correcciones están expresadas en el Marco de Referencia Internacional coincidente con el de las efemérides, actualmente ITRF2014 [Altamini et al., 2016].

Existen otras soluciones para diferentes marcos de referencia como por ejemplo para: ETRF2000, GDA94, NAD83 y DREF91. Para América Latina se han calculado dos productos, referidos a SIRGAS95 y SIRGAS2000, que son calculados y transmitidos por el IGS, también se re-publicitan en el caster de SIRGAS (<http://200.3.123.65:2101>) y en el caster brasilero del IBGE (<http://gps-ntrip.ibge.gov.br:2101/>). Por todo lo mencionado, dentro de la corrección está implícito el marco de referencia en el que se posicionará el usuario PPP.

Finalmente, resulta indispensable contar con efemérides transmitidas para que los algoritmos de cálculo PPP, puedan aplicar las correcciones mencionadas. En general, en los streams de las estaciones permanentes GNSS, se incluyen las efemérides (además de las observaciones y correcciones). Pero en algunos casos esto no ocurre y es necesario incorporar un stream específico de efemérides. Para ello el servicio RT-IGS pone a disposición dos streams de efemérides:

-RTCM3EPH: Efemérides transmitidas para GPS, GLONASS y Galileo, generadas por el software BNC, a partir de las observaciones recibidas por la mayor parte de estaciones de la red IGS. El el mensaje se transmite cada 5 segundos, en formato RTCM 3.x

-RTCM3EPH01: Son efemérides transmitidas únicamente para GPS y generadas con el software DLR’s RETICLE. Al igual que el anterior, los datos provienen de la red de estaciones IGS, se generan en RTCM versión 3.x y se transmiten cada 5 segundos.

Los mensajes del formato RTCM, utilizados para la transmisión de estas correcciones se detallan en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Mensajes RTCM para correcciones PPP

Mensaje	Descripción	intervalo	Latencia
1057	Corrección de órbita GPS	emitido c/ 10 s	6 s o menor
1058	Corrección de reloj GPS	emitido c/ 10 s	6 s o menor

1059	Bias de código GPS	al menos una vez por minuto
1060	Corrección de órbita y reloj GPS	emitido c/ 10 s 6 s o menor
1061	Indicador de calidad (URA) GPS	emitido c/ 10 s 6 s o menor
1062	Corrección de reloj GPS High Rate	emitido c/ 10 s 6 s o menor
1063	Corrección de órbita GLONASS	emitido c/ 10 s 6 s o menor
1064	Corrección de reloj GLONASS	emitido c/ 10 s 6 s o menor
1065	Bias de código GLONASS	al menos una vez por minuto
1066	Corrección de órbita y reloj GLONASS	emitido c/ 10 s 6 s o menor
1067	Indicador de calidad (URA) GLONASS	emitido c/ 10 s 6 s o menor
1068	Corrección de reloj GLONASS High Rate	emitido c/ 10 s 6 s o menor

3.3 Software de cálculo PPP y configuración específica

Considerando el posicionamiento puntual preciso a tiempo real, existen dos programas de licencia libre que han demostrado estabilidad en sus cálculos, y son ampliamente utilizados por la comunidad científica: RTK-Lib (Real Time Kinematic Library) [Takasu, 2013] y BNC (BKG Ntrip Client) [Weber et al., 2016]. Ambas realizaciones permiten posicionamiento preciso en cualquier lugar del planeta, donde se disponga de conexión a Internet [<http://www.igs.org/rtk/access>].

Se eligió trabajar en las experiencias de aplicación para esta tesis con BNC, por presentar buenos resultados en cuanto a la precisión en tiempo real [Alcay y Turgut, 2017; Amhed et al., 2016]. Se detallan los ítems a tener en cuenta a la hora de configurar y utilizar este programa para el cálculo PPP. Más detalles pueden consultarse en el manual técnico del software [<http://software.rtcn-ntrip.org/export/HEAD/ntrip/trunk/BNC/src/bnchelp.html>].

El algoritmo de cálculo de PPP-BNC es sencillo y permite corregir los errores producidos por mareas terrestres y por los efectos de rotación relativa satélite-receptor. Cabe aclarar que BNC aplica corrección al centro de fase de las antenas (APC) de los satélites, pero no la variación de dicha corrección, por tener una magnitud menor a 2 cm. Los offset de antena de los receptores se pueden especificar, al igual que las correcciones al centro de fase de las antenas receptoras. No se aplican correcciones por carga oceánica ni atmosférica, ya que en general son valores muy pequeños. De igual forma no se consideran efectos debidos a la rotación polar (Polar Tides) por su pequeña magnitud.

El cálculo requiere esencialmente un stream de observables proveniente de un receptor doble frecuencia (puede ser de cualquier estación GNSS permanente) y correcciones de órbitas y relojes (por ejemplo, IGS03). El formato admitido es el estándar RTCM. En el caso en que el stream de observaciones no contenga efemérides transmitidas (mensaje tipo 1019, 1020, y 1045) se debe incorporar un segundo stream, como por ejemplo las efemérides transmitidas por el IGS a tiempo real (RTCM3EPH).

De esta manera, con BNC, se puede calcular la posición precisa de un sitio de observación contando con sus mediciones en tiempo real, siempre que estén disponibles los productos recién descritos. La Figura 3-1 esquematiza la metodología de trabajo mediante el módulo PPP de BNC.

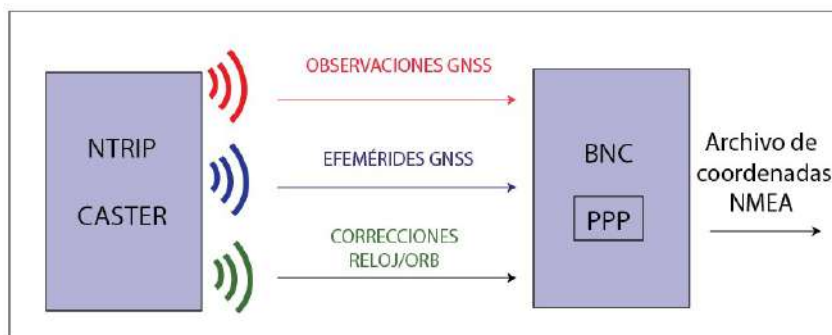


Figura 3-1: Esquema metodológico del cálculo PPP con software BNC.

Durante el desarrollo de esta tesis se han publicado varias actualizaciones del software BNC (2.9, 2.11, 2.12.0 - 2.12.14), sin grandes modificaciones en cuanto a la configuración. Por lo tanto, se describe la configuración de la versión 2.11, la cual puede aplicarse en las demás versiones.

Como se indica en la Figura 3-2, se debe configurar la pestaña PPP del programa. Se debe especificar el nombre de la estación GNSS (o receptor) que se quiere calcular, indicando el nombre o Mountpoint de la misma en el casillero 'Obs Mountpoint'. También se debe colocar el nombre del stream de correcciones en 'Corr Mountpoint' por ej IGS03. Vale aclarar que tanto el stream de observaciones como correcciones, deben haber sido incluidos o seleccionados previamente mediante el botón inferior Add Stream, aquí se especifican los datos del servidor Caster y Mountpoints seleccionados. Luego, si conocemos las coordenadas verdaderas de la estación, se pueden cargar y el software calculará la variación de coordenadas (residuos NEU) respecto a dichas coordenadas control (Marker Coordinates). También se pueden especificar las componentes de excentricidad de la antena (NEUp), cuando exista tal desplazamiento respecto al centro de fase de la misma.

Opcionalmente se puede especificar el nombre y ruta de almacenamiento del archivo de salida (NMEA file), también se puede indicar un puerto de comunicación, donde se alojará el mensaje NMEA. Es posible graficar la posición época a época activando el botón "PPP Plot", así como también se puede indicar una dirección de almacenamiento para el archivo Log (en la pestaña "General"), que guardará todos los detalles de la estimación PPP (información de satélites intervinientes, estimación de ambigüedades, corrección de reloj y troposférica, etc.).

Los resultados se muestran en la ventana inferior "LOG", y dependiendo de las opciones configuradas de procesamiento se muestra un valor por cada segundo.

A modo de ejemplo se puede ver en la primera línea del cuadro Log, de la Figura 3-2, la siguiente información: fecha y hora del cálculo (14-02-07 15:04:26), nombre de la estación o mountpoint (MZAC-v3.0), referencia de la época (15:04:09), cantidad de satélites procesados (10), las coordenadas XYZ con sus correspondientes errores en metros, y finalmente los desplazamiento N,E,Up (se observan valores fijados en 0.000 por encontrarse activado el modo Quick-start, ver detalle debajo).

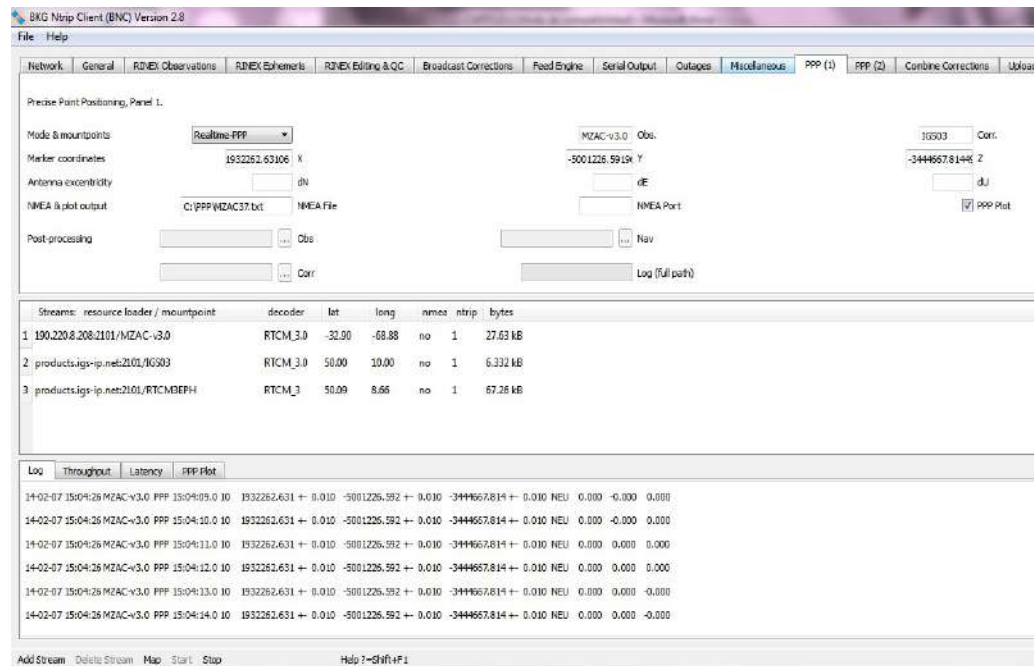


Figura 3-2: Configuración de módulo PPP en software BNC

Desde la pestaña PPP(2) del programa, se pueden especificar un conjunto de parámetros de configuración para el cálculo de la posición, los cuales se detallan a continuación:

Antenas: Se puede especificar la dirección donde se encuentra el archivo de corrección absoluta de los centros de fase de las antenas de satélites y receptores, en formato estándar (ANTEX). Luego se debe indicar el nombre de la antena (Antenna Name) que se esté utilizando para que puedan aplicarse dichas correcciones. El nombre debe tener 20 caracteres, se aconseja agregar espacios si el nombre no cumple esa cantidad de caracteres, caso contrario el programa no aplica tal corrección. Por ejemplo: 'JPSREGANT_SD_E ' (sin radome), 'LEIAT504 NONE' (sin radome), 'LEIAR25.R3 LEIT' (con radome modelo LEIT), etc.

Opciones Básicas: BNC para el procesamiento utiliza por defecto la combinación de código libre de ionosfera P3, habilitando la opción 'Use Phase Obs' se especifica que se utilizará además la combinación de fase libre de ionosfera L3. Si se desea estimar retardo troposférico, se debe activar el casillero 'Estimate Trop'. La misma se realiza a través de la fórmula:

$$T(z) = T_{apr}(z) + dT / \cos(z)$$

Donde $T_{apr}(z)$ es el retardo troposférico a-priori derivado de aplicar el modelo de Saastamoinen.

Por último, si se desean procesar observaciones GLONASS y Galileo hay que habilitar estas dos opciones: 'Use GLONASS', 'Use Galileo'.

Opción de sincronización: Por defecto BNC procesa cada época inmediatamente después de que recibe la información, utilizando las correcciones de reloj de los satélites disponibles en ese momento. Si se especifica un valor en el campo 'Sync Corr' significa que los datos son almacenados y el procesamiento de cada época se pospone hasta que las

correcciones de reloj de los satélites estén disponibles, por ejemplo 5 segundos (este es un tiempo apropiado ya que es la mitad del tiempo de actualización de la corrección de reloj). Hay que aclarar que esta opción puede causar una mayor demora en la solución PPP, sin embargo su uso permite evitar errores producidos por la demora en la recepción de las correcciones de reloj.

Opción Averaging: Es un tiempo expresado en minutos, que no debe ser mayor a 1440 (24 horas), se especifica para que BNC muestre valores promedios y sus RMS calculados a partir de los valores individuales obtenidos dentro de ese período de tiempo especificado. Los valores promedio para XYZ y sus RMS se observan en la pestaña “Log” usando el string ‘AVE-XYZ’, al igual que para el retardo troposférico y los desplazamientos NEUp.

Quick Start (QS): Permite una rápida convergencia del cálculo PPP, se debe contar con las coordenadas conocidas del sitio ya que la solución se fija a las coordenadas XYZ introducidas. Se expresa en segundos, se aconsejan 60 s.

Maximum Solution Gap: Tiempo en segundos entre dos soluciones consecutivas. Solo está disponible si la opción QS está activada, ya que cuando este tiempo se excede, por cortes o interrupciones en los streams, el algoritmo vuelve al modo QS y fija las coordenadas introducidas como referencia. Se aconseja colocar 60 segundos.

Audio Response: Es un sonido alerta, el cual se configura en el caso de uso para predicción y monitoreo de catástrofes. Genera un sonido cada vez que las componentes horizontales PPP difieren del valor especificado en una tolerancia especificada (ej. 0,2 m).

Sigmas: Se pueden especificar sigmas tanto para el código como para la fase. Los valores por defecto son 10 m para código y 0,20 m para fase.

Si se especifica un sigma menor que 10 m para código y uno mayor que 0,20 m para fase, BNC dará mejores resultados al principio pero tardará más en calcular la mejor solución (convergencia). En cambio, si se introduce un sigma mayor para código y uno menor para fase, los primeros resultados serán menos precisos, se tendrá un periodo más prolongado de convergencia, pero podría resultar en mejores posiciones a largo tiempo.

XYZ-Init: Es el sigma de las coordenadas. Cuando se conocen muy bien las XYZ de la estación es aconsejable colocar 0,01 m. El valor por defecto es 100.

XYZ White Noise: Es el sigma del ruido o error aleatorio (White noise) en la estimación de coordenadas. Se aconseja el valor 100, cuando se consideran posibles movimientos abruptos del rover.

Tropo Init: Sigma en metros para el modelo a-priori de la estimación troposférica. Valor recomendado 0,1.

Tropo White Noise: Sigma que indica la variación esperada del retardo troposférico. El valor $3e-6$ es el aconsejado ya que indica que suponiendo una observación a 1Hz, el efecto troposférico puede variar 0,01 metros / hora ($3600*3e-6=0,01$).

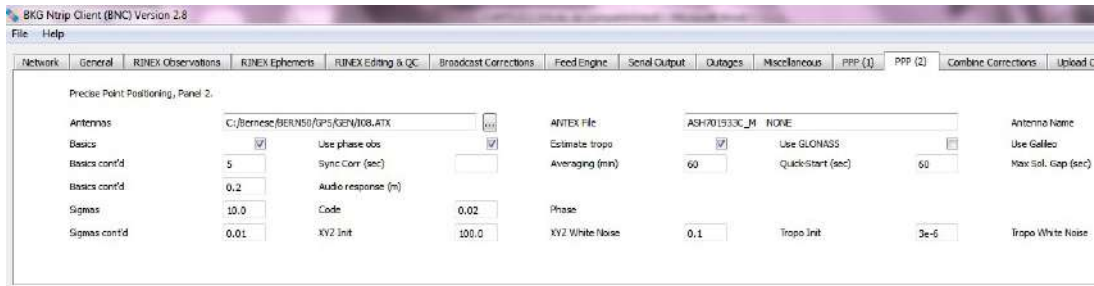


Figura 3-3: Opciones específicas para el cálculo PPP

3.4 Productos RTS (IGS Real Time Service) aplicados en PPP-RT

En la Tabla 3-2 se puede ver un listado de streams que contiene el caster del IGS. Se eligieron algunos ejemplos para mostrar las distintas alternativas que puede tener un usuario cuando necesita aplicar estas correcciones en el posicionamiento puntual.

Tabla 3-2: Correcciones a las órbitas y relojes publicados por el IGS

Producto	Punto de Ref.	GNSS	Marco de Referencia	Descripción
CLK11	APC	GPS+GLONASS	ITRF14	Corrección individual calculada por AC BKG
CLK15	CoM	GPS	ITRF14	Corrección individual calculada por AC WUHAN
IGS01	APC	GPS	ITRF14	Combinación de las correcciones individuales (clk) procesando una sola época
IGS02	APC	GPS	ITRF14	Combinación de las correcciones individuales (clk) utilizando filtro de kalman
IGS03	APC	GPS+GLONASS	ITRF14	Combinación de las correcciones individuales (clk) utilizando filtro de kalman
GDA9401/02			GDA 94	
NAD8301/02	APC	01= GPS 02=GPS+	NAD 83	Combinaciones con parámetros de transformación
SIRGAS200001/02		GLONASS	SIRGAS 2000	
SIRGAS9501/02			SIRGAS 95	

En esta tesis, con el objetivo de estudiar las distintas correcciones a los relojes de los satélites y la predicción de sus órbitas, en relación al mejoramiento del posicionamiento puntual preciso a tiempo real, se comenzó comparando las correcciones IGS02 e IGS03, sobre dos estaciones de Mendoza. Se configuraron dos rutinas PPP, para las estaciones MZGA (General Alvear, Mendoza) y MZAC (Centro, Mendoza), utilizando en un caso la corrección IGS02 (solo GPS) y simultáneamente en otra rutina con IGS03 (GPS+GLONASS). La Figura 3-4 muestra las diferencias de cada estimación PPP con respecto a las coordenadas de control, para la estación MZGA, donde se puede apreciar una mejoría al utilizar la corrección IGS03. Luego de la convergencia de la solución (los primeros 20 minutos), la corrección IGS02 produce variaciones en las coordenadas de hasta 20 cm, que no se observa con la solución IGS03.

Lo mismo ocurrió en la estación MZAC (Figura 3-5) donde las diferencias entre ambas correcciones en algunos casos superan los 20 cm.

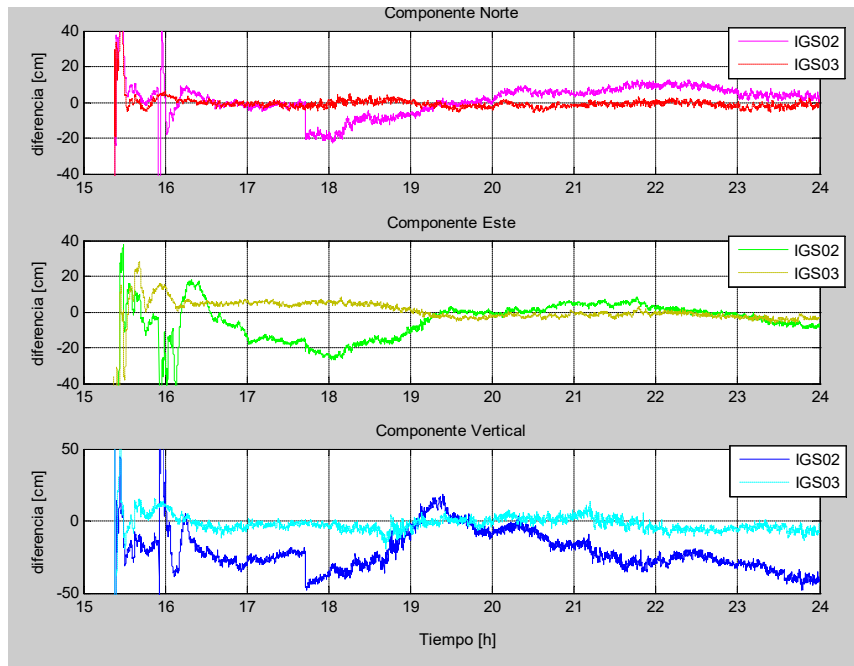


Figura 3-4: Solución PPP, estación MZGA (General Alvear, Mendoza), comparación utilizando productos IGS02 vs IGS03, día GPS 309 año 2014.

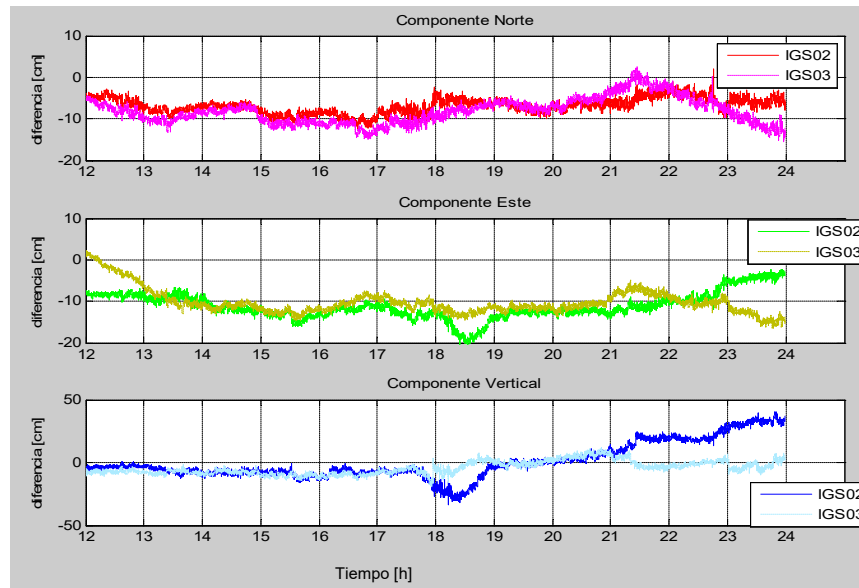


Figura 3-5: Solución PPP, estación MZAC (Mendoza Centro), comparación utilizando productos IGS02 vs IGS03, día GPS 309 año 2014.

La mejora probablemente se deba a que la corrección IGS03, al incluir los dos sistemas de posicionamiento (GPS+GLONASS), mejora la geometría y el cálculo PPP tiene mayor redundancia. En los casos analizados, la cantidad de observaciones no fue un inconveniente, por tratarse de estaciones GNSS permanentes. Pero en otros casos, donde no se cuenta con dicha cantidad de observaciones, es recomendable contar con la mayor redundancia para el cálculo de la posición.

Observando los archivos “logfile” para la experiencia realizada, se puede ver claramente cómo influye la existencia de mayor cantidad de satélites en la precisión de la posición calculada. En la Tabla 3-3, se pueden observar una síntesis extraída de los correspondientes reportes “logfile”. Se puede observar (diferencias remarcadas en rojo), cómo influye la existencia de mayor cantidad de satélites en la precisión de la posición calculada.

Tabla 3-3: Diferencias producidas en el cálculo PPP, IGS02 (izquierda) vs IGS03 (derecha)

14-11-15 00:00:00 Configuration read: C:\BNC\MZAC - IGS02.bnc, 3 stream(s)	14-11-15 00:00:00 Configuration read: C:\BNC\MZAC - IGS03.bnc, 3 stream(s)
14-11-15 00:00:09 MZAC-v3.0 PPP 23:51:05.0 7 1932261.945 +- 0.133 -5001224.727 +- 0.276 -3444667.239 +- 0.077	14-11-15 00:00:09 MZAC-v3.0 PPP 23:51:05.0 12 1932262.507 +- 0.059 -5001226.269 +- 0.095 -3444667.671 +- 0.039
14-11-15 00:00:09 Precise Point Positioning of Epoch 23:51:06.0	14-11-15 00:00:09 Precise Point Positioning of Epoch 23:51:06.0
23:51:06.0 RES G05 P3 -0.2330	23:51:06.0 RES G05 P3 -0.2492
23:51:06.0 RES G12 P3 -0.6998	23:51:06.0 RES G12 P3 -0.7098
23:51:06.0 RES G18 P3 1.0321	23:51:06.0 RES G18 P3 1.0381
23:51:06.0 RES G21 P3 -0.2291	23:51:06.0 RES G21 P3 -0.1896
23:51:06.0 RES G25 P3 -0.1804	23:51:06.0 RES G25 P3 -0.1903
23:51:06.0 RES G29 P3 0.5137	23:51:06.0 RES G29 P3 0.5302
23:51:06.0 RES G31 P3 -0.2113	23:51:06.0 RES G31 P3 -0.2450
23:51:06.0 RES G05 L3 -0.0042	23:51:06.0 RES G05 L3 -0.0051
23:51:06.0 RES G12 L3 -0.0110	23:51:06.0 RES G12 L3 -0.0100
23:51:06.0 RES G18 L3 0.0108	23:51:06.0 RES G18 L3 0.0103
23:51:06.0 RES G21 L3 -0.0098	23:51:06.0 RES G21 L3 -0.0078
23:51:06.0 RES G25 L3 0.0040	23:51:06.0 RES G25 L3 0.0035
23:51:06.0 RES G29 L3 0.0052	23:51:06.0 RES G29 L3 0.0047
23:51:06.0 RES G31 L3 0.0024	23:51:06.0 RES G31 L3 0.0019
	23:51:06.0 RES R09 L3 -0.0150
	23:51:06.0 RES R10 L3 0.0098
	23:51:06.0 RES R16 L3 -0.0140
	23:51:06.0 RES R18 L3 0.0272
	23:51:06.0 RES R19 L3 -0.0048
clk = -1.576 +- 0.250	clk = -0.320 +- 0.159
trp = 2.125 +0.132 +- 0.008	trp = 2.125 +0.086 +- 0.004
offGlo = 0.000 +- 1000.000	offGlo = 0.031 +- 33.005
amb G05 = -1.234 +- 0.194 nEpo = 1092	amb G05 = -2.159 +- 0.148 nEpo = 912
amb G12 = 0.002 +- 0.135 nEpo = 1092	amb G12 = -0.395 +- 0.142 nEpo = 912
amb G21 = -7.453 +- 0.153 nEpo = 1092	amb G25 = 6.615 +- 0.142 nEpo = 912
amb G25 = 6.362 +- 0.144 nEpo = 1092	amb G29 = -4.085 +- 0.140 nEpo = 912
amb G29 = -3.948 +- 0.129 nEpo = 1092	amb G31 = 0.160 +- 0.142 nEpo = 912
amb G31 = 0.085 +- 0.130 nEpo = 1092	amb R09 = -32.495 +- 33.005 nEpo = 912
amb G18 = -19.542 +- 0.128 nEpo = 139	amb R16 = -32.012 +- 33.005 nEpo = 912
	amb R18 = -34.939 +- 33.005 nEpo = 912
	amb R19 = -30.446 +- 33.005 nEpo = 912
	amb G21 = -6.949 +- 0.143 nEpo = 471
	amb R10 = -26.146 +- 33.005 nEpo = 471
	amb G18 = -19.623 +- 0.141 nEpo = 139

3.5 Experiencia de Monitoreo PPP-RT, precisiones de la técnica

Entre las principales aplicaciones del PPP en tiempo real (PPP-RT) se destaca el monitoreo del sitio de emplazamiento de las estaciones GNSS permanentes, con su correspondiente detección y advertencia de peligros [[https://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/201003457/IGS Real Time Service 141204.pdf](https://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/201003457/IGS_Real_Time_Service_141204.pdf)]

Tomando como ejemplo el monitoreo que se realiza sobre las estaciones GNSS europeas [<https://www.igs.org/rts/monitoring/>] se realizó una prueba piloto sobre cuatro EP GNSS ubicadas en el centro-oeste de Argentina, una región geodinámicamente activa. Se seleccionaron estaciones que transmitían sus observaciones online, 3 de ellas ubicadas en la provincia de Mendoza: MZAC (Mendoza Centro), MZSR (Mendoza, San Rafael) y MZAE (Mendoza este, Santa Rosa) y la cuarta CATA, en la provincia de Catamarca. Dicho monitoreo se realizó durante seis meses de observación continua, desde el 15 de febrero al 26 de agosto del 2015.

Se ejecutaron simultáneamente cuatro rutinas BNC (una por cada estación). En cada rutina se incorporó el stream de datos de observación de cada estación, con un muestreo de 1Hz es decir una observación por segundo. Se accedió a los mismos, desde el caster del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a través de la dirección *ntrip.ign.gob.ar*, puerto: 2101. En dicho servidor se pueden encontrar todas las EP de Argentina que transmiten sus observaciones a tiempo real [<http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/RamsacNtrip>].

Para facilitar la inicialización del cálculo PPP, se cargaron en las rutinas BNC, las coordenadas X,Y,Z de cada estación, obtenidas de la solución semanal de SIRGAS, disponibles en www.sirgas.org, correspondiente a la época inicial del monitoreo (sir15P1832.crd). De esta manera el cálculo de la posición inicial converge más rápidamente, y no se introducen valores erróneos en las series temporales.

Una vez configurados todos los parámetros necesarios se inició el cálculo PPP. Se realizó un monitoreo continuo, las 24 horas del día, estimando las coordenadas PPP cada un segundo.

Con el objeto de evaluar la precisión, exactitud y estabilidad de la técnica, se llevó a cabo el análisis estadístico de las coordenadas obtenidas para todo el período de observación. Para analizar la exactitud, se calculó la diferencia entre las coordenadas obtenidas por PPP a un intervalo de muestreo de 1 minuto y las coordenadas SIRGAS semanales correspondientes a la época inicial del período de observación (semana GPS 1832). Se obtuvieron archivos diarios con las diferencias de coordenadas en sus tres componentes, Norte, Este y Vertical, para cada una de las estaciones monitoreadas. Resultando un total de 1440 valores diarios para cada coordenada, durante un período de 165 días.

En la Figura 3-6 se exponen los resultados obtenidos del total de la muestra para la estación MZAC. Las demás estaciones presentaron resultados similares. Se observa una distribución normal. El mayor porcentaje de residuos o diferencias fueron menores que ± 10 cm, resultando un número significativamente menor con residuos entre ± 10 y ± 20

cm y aun menor entre ± 20 y ± 30 cm. Sólo el 0,3% de la muestra, en las componentes horizontales y el 0,6% de la muestra en la componente altura, presentaron residuos mayores a ± 50 cm.

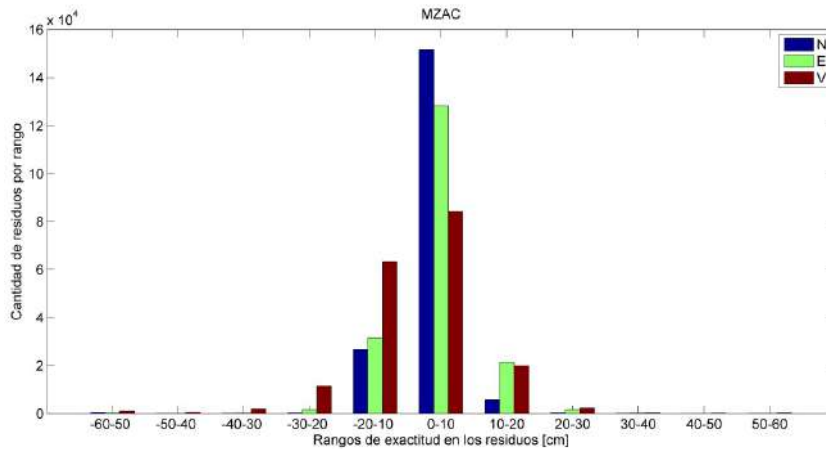


Figura 3-6: Residuos monitoreo PPP.

En el análisis se calcularon los principales indicadores estadísticos de una variable cuantitativa continua. Se determinó la media, el RMS, y los valores máximos y mínimos, del total de observaciones, en sus tres componentes (Figura 3-7).

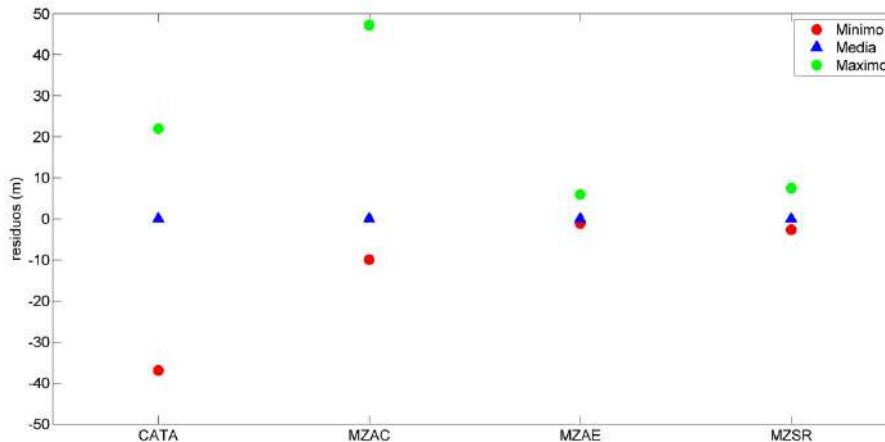


Figura 3-7: Estadísticos de los residuos horizontales (combinación N y E) para cada estación.

Dado que los valores de residuos máximos y mínimos eran muy alejados (cercano a los 50 metros) en relación al valor promedio, se decidió analizar los valores atípicos, eligiendo el método estadístico de diagrama de cajas. Este diagrama permitió conforme a [Salgado, 2014] graficar la tendencia central y la dispersión de las medidas de posición (mediana, cuartiles y desvíos intercuartiles). Se apreció la simetría de la distribución de la variable y los valores atípicos y extremos. En base a este análisis se determinaron los valores para cada componente, y se cuantificó su porcentaje con respecto al total de la muestra. Encontrando que dichos valores atípicos representaban aproximadamente entre el 3% y el 7% del volumen total de datos muestreados (Tabla 3-4), por lo cual se excluyeron de la muestra.

Tabla 3-4: Porcentaje de valores alejados (outliers) en el monitoreo PPP.

	CATA	MZAC	MZAE	MZSR
N° Observaciones	193158	185479	182265	187798
N° Outliers (promedio NEV)	9580	6713	13456	8275
% Valores atípicos	4,96	3,62	7,38	4,41

A modo de ejemplo se muestra el caso de la estación MZAC. Para los seis meses de análisis, se observó que sólo el 3,61% de los valores se escapaban de los límites inferior y superior del diagrama de cajas (Figura 3-8 izquierda). Una vez eliminados dichos valores atípicos, se realizó un nuevo diagrama de caja (Figura 3-8 derecha).

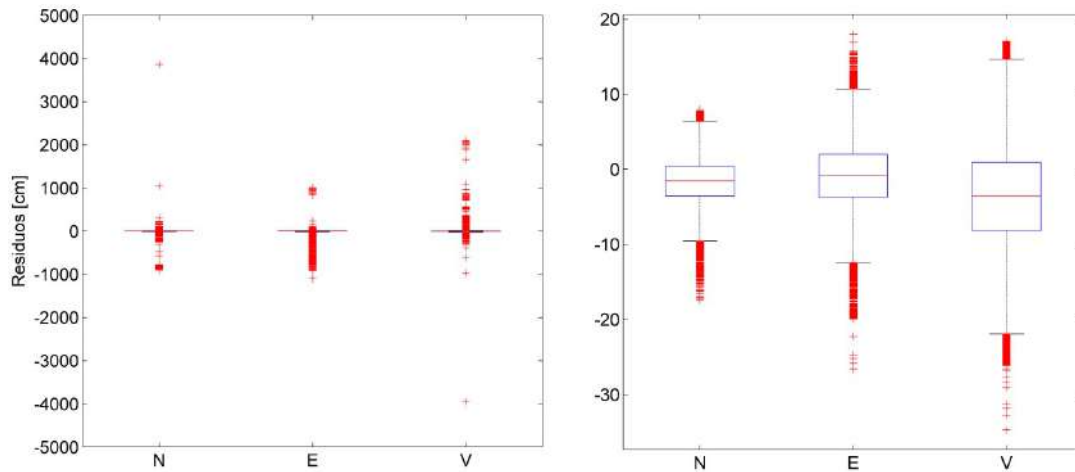


Figura 3-8: Residuos coordenadas PPP en MZAC, seis meses de monitoreo. Comparación datos totales (izquierda), luego de filtrar valores atípicos (derecha).

En la Tabla 3-5 se muestran los indicadores estadísticos (bias y RMS) obtenidos, habiendo filtrado los valores alejados con el método descripto. Resultando un bias promedio (entre las 4 estaciones analizadas) de -0.73 cm en las componentes horizontales, y de -2.74 cm en la altura. Respecto al RMS, se obtuvo un valor promedio en la componente horizontal de 4 cm y de 7 cm en la altura.

Tabla 3-5: Exactitud PPP a Tiempo Real (valores atípicos filtrados) Valores expresados en [cm]

	CATA			MZAC			MZAE			MZSR		
	N	E	V	N	E	V	N	E	V	N	E	V
Bias	-1,64	-0,96	-4,00	-1,27	-0,78	-0,18	-1,25	-1,10	-2,62	-1,61	2,78	-4,16
RMS	3,33	4,46	7,83	3,09	3,65	6,63	3,83	6,68	8,70	3,04	3,95	7,01

Para determinar la precisión y estabilidad de la técnica PPP utilizada, se calcularon las diferencias de coordenadas de un instante con respecto a su antecesor. De la misma manera, se obtuvieron archivos diarios con las diferencias para cada componente (N, E, V) por minuto y para cada una de las estaciones analizadas. En la Tabla 3-6 se observan los indicadores de precisión obtenidos, un RMS promedio de 3 milímetros en las componentes horizontales y de 7 milímetros en altura (no existe bias).

Tabla 3-6: Precisión del Monitoreo PPP-RT. Valores expresados en [cm]

	CATA			MZAC			MZAE			MZSR		
RMS	N	E	V	N	E	V	N	E	V	N	E	V
	0,31	0,26	0,68	0,28	0,22	0,57	0,43	0,36	1,01	0,27	0,22	0,58

A partir de la experiencia realizada mediante PPP, se concluye que tanto por la exactitud y precisión obtenidas, la técnica puede ser utilizada como herramienta para el monitoreo de estaciones GNSS en tiempo real, tanto para evaluar su correcto funcionamiento como para analizar su variación temporal frente a eventos geodinámicos. A lo cual se suma que mediante un análisis de residuos como el propuesto se pueden detectar tanto cambios repentinos en la posición, como documentar su evolución espacio-temporal, pudiendo identificar posibles tendencias.

Cabe mencionar que existen varios condicionantes que deben ser tenidos en cuenta para que el monitoreo sea efectivo. En primer lugar, es necesario contar con conexiones estables, tanto de las estaciones con el caster, como de los programas cliente que las reciben (en este caso el programa BNC). Sin embargo, se remarcan los beneficios por sobre la mencionada limitación, ya que esta técnica, simplemente contando con el stream de datos que transmite una estación GNSS y los productos RT del IGS, permite conocer su posición instantánea, con una exactitud mejor que 4 cm en planimetría y que 7 cm en altura. Este procedimiento puede ser aplicado a cualquier receptor GNSS que pueda transmitir sus observaciones en tiempo real, no solo a las estaciones permanente, notando el gran potencial de esta técnica.

3.6 Los Marcos de Referencia en el PPP

Una de las principales ventajas del posicionamiento a tiempo real, es que permite la georreferenciación instantánea. Cómo se trató en el capítulo anterior, en el caso de posicionamiento diferencial a tiempo real (DGPS, RTK y NetRTK), el marco de referencia y la época de las coordenadas depende de la configuración de las estaciones server NTRIP, pero ¿qué ocurre en el Posicionamiento Puntual Preciso?

Al tratarse de un posicionamiento absoluto, el marco de referencia es introducido por las coordenadas de los satélites. Comúnmente las efemérides están relacionadas a un marco de referencia internacional (actualmente IGB14).

Sin embargo, las correcciones a las órbitas y a los relojes de los satélites, pueden introducir parámetros de transformación, para modificar el marco de referencia en el cual se obtienen las coordenadas PPP. Si no se introducen parámetros de transformación, todas las posiciones obtenidas están en el mismo marco que las efemérides.

Para evaluar la aplicabilidad de aquellas correcciones que introducen un marco de referencia particular (mediante sus parámetros de transformación), se realizaron experiencias con las correcciones referidas al marco argentino POSGAR2007. Para estas pruebas, se utilizó el caster de SIRGAS, ya que se generaron correcciones nuevas, introduciendo parámetros de transformación en modo de prueba.

Se utilizaron las herramientas de BNC disponibles para tal fin, combinando dos soluciones individuales CLK (Figura 3-9) y luego enviando la nueva corrección al caster de SIRGAS-RT (Figura 3-10).

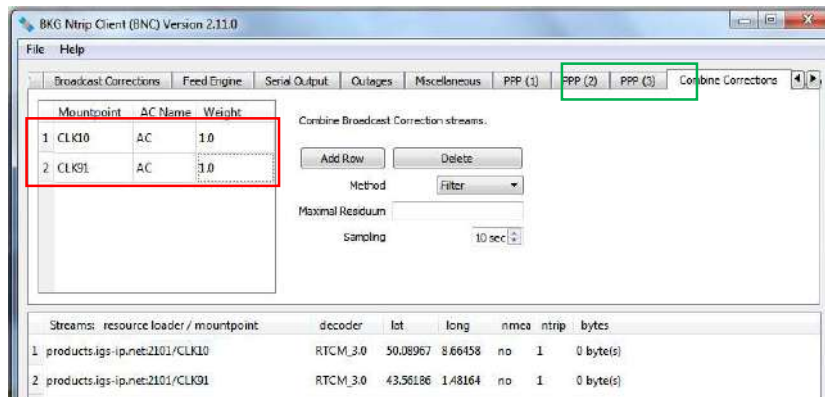


Figura 3-9: Combinación de correcciones CLK individuales, provenientes de los centros de análisis IGS.

Se eligieron los streams CLK10 y CLK91, provenientes de los centros de análisis BKG (Alemania) y CNES (Francia). Se introdujeron los parámetros de transformación entre POSGAR07 e ITRF2008 (marco de referencia de las efemérides al momento de realizar la experiencia), considerando que el marco nacional (POSGAR07) refiere a ITRF2005 [https://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt].

La nueva corrección creada se denominó CLOCK (Figura 3-10). Finalmente, y para enviarla al caster SIRGAS-RT, se debió solicitar un acceso a este servidor, con el correspondiente nombre o Mountpoint.

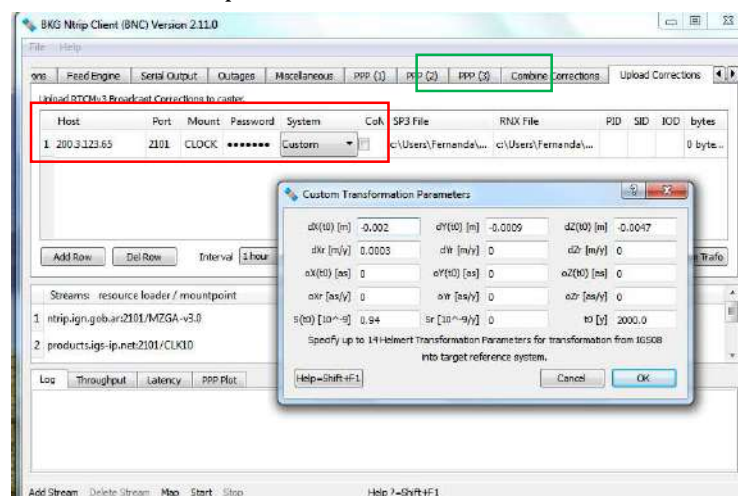


Figura 3-10: Introducción de parámetros de transformación (ITRF2005-ITRF2008) y envío del stream (CLOCK) al caster SIRGAS-RT, con software BNC.

Una vez que se obtuvo esta nueva corrección, se utilizó para calcular la posición puntual de la estación mendocina MZGA. Luego, se calcularon las diferencias de las posiciones PPP estimadas respecto a las coordenadas oficiales POSGAR07 de dicha estación (época 2006,632).

La Figura 3-11, muestra los resultados obtenidos. En la gráfica de la izquierda (A) se observan las diferencias respecto a la coordenada oficial POSGAR07. En las componentes Norte (N) y Altura (V), se observan diferencias o residuos coherentes con la precisión de la técnica (menores a 10 cm en la componente horizontal y a 20 cm en altura). Sin embargo, en la coordenada Este, las diferencias son significativas. Se encontraron residuos iniciales de 60 cm, que, si bien al principio del cálculo la solución es inestable, luego de la convergencia, estos residuos siguen siendo altos (valor promedio -25 cm).

Por esta razón, se decidió calcular nuevamente las diferencias del posicionamiento PPP, con respecto a una coordenada más actualizada. Se eligió la solución semanal de SIRGAS, correspondiente a la época de la observación (2014.92). Dichas diferencias se grafican a la derecha, parte B, de la Figura 3-11.

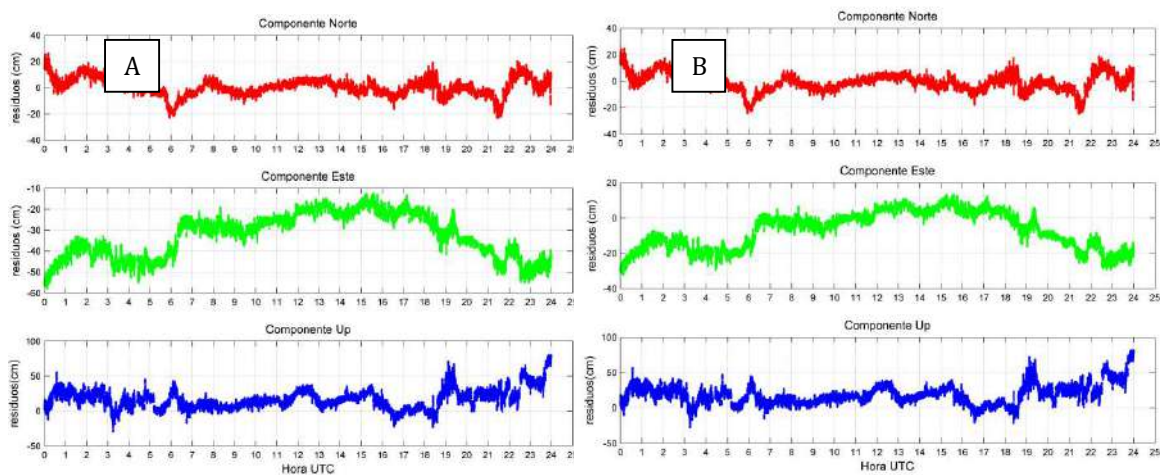


Figura 3-11: Diferencias de coordenadas PPP, estación MZGA, utilizando corrección de orbitas y relojes referida a POSGAR07. (A) diferencias respecto a coordenadas control (época 2006,632) (B) diferencias coordenadas control actualizadas a la época de las observaciones (2014.92).

Lo que se quiere mostrar en esta experiencia es que, en zonas geodinámicamente activas, como Mendoza, resulta fundamental, además de considerar los parámetros de transformación entre los marcos, tener en cuenta la época de referencia.

Por lo cual, si se desea utilizar PPP para obtener coordenadas en marcos nacionales que se encuentran desactualizados, no es suficiente sólo considerar los parámetros de transformación globales entre los diferentes marcos de referencia.

Si bien BNC, permite incluir la tasa de cambio (rate) o variación en el tiempo de los parámetros, no resulta adecuado aplicar una única velocidad para todos los puntos, sobre todo en zonas de mucha deformación.

En la Tabla 3-7 se puede observar como el cambio de marco de referencia no es tan significativo (fila 1), considerando la precisión de la técnica PPP, mientras que el cambio de época sí debe ser tenido en cuenta (fila 2).

Tabla 3-7: Diferencias de coordenadas, estación MZGA, entre POSGAR07 y la solución SIRGAS semanal (coordenada actualizada a la época de medición), unidades expresadas en [m].

	N	E	Up
Marco (ITRF2005-ITRF2008)	-0,0001	-0,005	-0,008
Época (2014,912-2006,632)	0,0143	-0,259	-0,004

El cambio de marco se realizó con los parámetros de transformación publicados en [https://itrf.ign.fr/doc ITRF/Transfo-ITRF2008 ITRFs.txt](https://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt), introducidos en BNC para generar la corrección. La diferencia por épocas se calculó con las diferencias de coordenadas entre la solución SIRGAS semanal (semana 1816) y las coordenadas oficiales POSGAR07.

El cálculo PPP se realiza con las observaciones que la estación GNSS permanente está realizando en la época de medición y con las coordenadas de los satélites para la misma época. Por lo tanto, si bien se obtienen las coordenadas finales en el marco de las correcciones se debe tener especial cuidado con la época de referencia. En este caso, la época de POSGAR07 es 2006,632 por lo que existe una desactualización de 8 años en las coordenadas oficiales respecto de la fecha de medición (2014,92).

3.7 Aplicación del PPP en la Georreferenciación

Una de las aplicaciones más utilizadas por los usuarios GNSS es la georreferenciación, y si el posicionamiento incluye las técnicas a tiempo real, esta es inmediata, de allí la importancia del marco de referencia en el que se obtienen las coordenadas.

La georreferenciación se utiliza en incontables tareas, como pueden ser: trabajos de agrimensura (georreferenciación de parcelas), aplicaciones GIS (sistemas de información geográfica), densificación de puntos de apoyo para fotogrametría (en la actualidad muy utilizados en los drones o VANTs, vehículos aéreos no tripulados), etc.

Si bien la técnica PPP-RTK aún no está disponible en la mayoría de los receptores comerciales, esta puede aplicarse mediante algunos softwares como BNC, o aplicaciones web. En todos los casos se necesita disponer en campo de una computadora, lo cual puede afectar la logística de medición. Sin embargo, el software BNC permite el cálculo PPP en modo pos-proceso utilizando los archivos RINEX de medición. La configuración es idéntica al Tiempo Real, pero requiere además de las observaciones, las correcciones a las órbitas y relojes almacenadas previamente.

Durante el desarrollo de esta tesis se almacenaron los archivos de corrección correspondiente al stream IGS03 y CLK91, desde el año 2015 a la fecha, de manera continua y automatizada en un servidor de la Facultad de Ingeniería (UNCuyo). Dichos archivos han sido compartidos con la comunidad científica de SIRGAS para realizar experiencias de cálculo, y se prevé ponerlas en un sitio público para que puedan ser utilizados por cualquier usuario, como un aporte científico de esta tesis.

El mismo software BNC posee una herramienta para almacenar el stream de correcciones de órbitas y relojes transmitidos a tiempo real. En la pestaña “Broadcast Corrections”, se debe especificar el directorio donde se guardará el archivo ASCII que contendrá la información transmitida en el mensaje, y el intervalo que se utilizará para grabar las correcciones. Previamente se debe seleccionar el stream de corrección a descargar por ejemplo IGS03, CLK91, etc., del correspondiente caster NTRIP (Figura 3-12).

Los archivos generados se nombran automáticamente, llevando el nombre del stream de corrección y el día GPS. El formato es propio de BNC, y la extensión del archivo especifica el año (.AAC). Por ejemplo, para el día 6 de enero de 2016, el archivo se denominará IGS03006.16C.

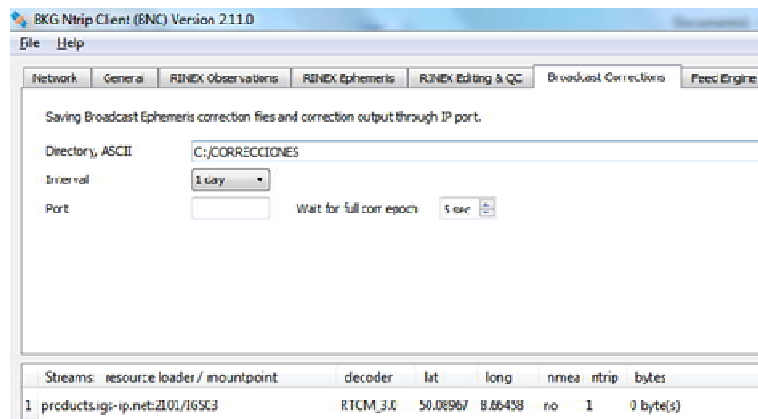


Figura 3-12: Configuración para almacenar correcciones de orbitas y relojes con BNC.

En base a lo expuesto un usuario que dispone de sus archivos de observación (en formato estándar de intercambio RINEX), y disponiendo de los archivos de corrección mencionados puede realizar el cálculo de sus coordenadas mediante PPP con esta herramienta, obteniendo una precisión y exactitud más que suficiente para aplicaciones de georreferenciación.

Esta aplicación puede ser muy útil cuando las estaciones permanentes dejan de estar operativas, por algún inconveniente temporario. Luego, es posible utilizar los RINEX de observación generados en campo, y en vez de procesarlos en modo diferencial con una estación permanente, se puede obtener la solución en Posicionamiento Puntual Preciso.

Sin embargo, sigue siendo importante considerar que las coordenadas obtenidas estarán vinculadas al marco de referencia de las órbitas. Con lo cual, si se desea emplear esta técnica para una georreferenciación en Argentina, por ejemplo, se deberán transformar las coordenadas obtenidas (actualmente en IGS2014) al marco de referencia al que refiere POSGAR2007 (ITRF2005) y retrotraer las coordenadas desde la época de medición a la época del marco (2006,632).

Cabe mencionar que el Grupo de Geodesia Satelital de Rosario (GGSR), perteneciente a la Universidad Nacional de Rosario (Argentina) ha desarrollado una herramienta muy útil para realizar estas transformaciones [<https://www.fceia.unr.edu.ar/gps/calc/>].

Indicando la fecha de medición, la aplicación devuelve las coordenadas referidas a POSGAR2007 (en la época de referencia del marco, 2006,632). Se realiza la transformación entre ITRF2008 e ITRF2005, dado que se desarrolló antes de la vigencia de ITRF2014. Para el cambio de época utiliza los modelos de velocidades desarrollados por SIRGAS y solo contempla los desplazamientos producidos por el terremoto de Chile de 2010 [Pestarini, 2016]. Dado que el factor de mayor impacto a la hora de georreferenciar en POSGAR2007, es la época del marco, esta herramienta aún puede ser utilizada, ya que los parámetros de transformación entre ITRF2014 e ITRF2008 no son tan significativas, en relación a la calidad o precisión de la técnica PPP.

3.8 Conclusiones

En este capítulo se han presentado los principales avances respecto de la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso en Tiempo Real. Los mismos han sido posibles gracias al esfuerzo realizado por el Servicio Internacional GNSS, ya que pone a disposición de todos los usuarios las correcciones transmitidas mediante el protocolo NTRIP a Tiempo Real.

Con la experiencia de monitoreo se ha demostrado la exactitud y precisión del cálculo PPP mediante el software BNC, uno de los más utilizados por la comunidad científica para la estimación de coordenadas en tiempo real. Obteniendo precisiones milimétricas (RMS promedio de 3 milímetros en las componentes horizontales y de 7 milímetros en altura), mientras que las diferencias de cada estimación PPP con respecto a la coordenada de control de cada estación arrojó un bias promedio de -0,73 cm en las componentes horizontales y tan solo de 2,74 cm en altura.

Respecto al Marco de Referencia, está claro que se introduce a partir de las efemérides de los satélites y sus correspondientes correcciones, por lo cual la mayoría de los cálculos PPP se obtienen en el marco de referencia internacional más actual (actualmente IGS2014). Luego, si un usuario necesita obtener las coordenadas en un marco de referencia específico, se concluye conveniente realizar el PPP en el marco de las órbitas y luego transformar las coordenadas resultantes al marco y a la época deseada.

En cuanto a la utilización del PPP-RTK para georreferenciación, es una herramienta válida y debería ser considerada en las normativas catastrales provinciales, ya que se ha demostrado que su precisión cumple con los requerimientos de mensura, sobre todo para zonas rurales o de poco valor de la tierra (precisiones de 5 y 10 cm en las componentes horizontales y verticales respectivamente). Cabe aclarar que se debe prestar especial atención a lo mencionado en el párrafo anterior. Se recomienda, en el caso de utilizar PPP para georreferenciación trabajar en el marco de referencia de las órbitas o correcciones y luego hacer la transformación de marco de referencia y adecuación de época correspondiente.

Si bien la georreferenciación de parcelas históricamente se ha realizado con posicionamiento diferencial, esta técnica ofrece una excelente alternativa, por ejemplo, cuando la estación permanente a la que se pensaba vincular estuvo fuera de

funcionamiento, o cuando por algún motivo no se logra una solución fija con precisión adecuada desde el método diferencial.

Por otro lado, el aumento de estaciones GNSS permanentes en tiempo real, y por consiguiente la posibilidad de combinar observaciones y poder estimar parámetros de corrección atmosféricos y orbitales, está mostrando un gran potencial para nuevas aplicaciones del Posicionamiento Puntual Preciso. Se destacan el monitoreo geodinámico, atmosférico e incluso la georreferenciación.

En los capítulos 2 y 3 de esta tesis se han expuesto los avances sobre las dos ramas fundamentales del posicionamiento a tiempo real: por un lado las técnicas de posicionamiento diferencial (DGPS, RTK-NTRIP y las soluciones de red Net-RTK) y por el otro, el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP-NTRIP). Las técnicas diferenciales, han sido más utilizadas en la industria y la topografía, por su alta productividad y agilidad. Mientras que el PPP, ha sido más probado en el ámbito científico, ya que hasta el momento la mayoría de los equipos comerciales no permiten este tipo de posicionamiento.

En los próximos capítulos, se describen en detalle dos aplicaciones innovativas del Posicionamiento Puntual Preciso, en el monitoreo geodinámico y de deformaciones corticales, y por el otro en el monitoreo atmosférico de la variable vapor de agua desde la estimación del retardo troposférico en las señales GNSS.

CAPITULO 4: APLICACIONES INNOVATIVAS DEL PPP EN EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA TERRESTRE

4.1 Introducción

Los sistemas de posicionamiento satelital, conocidos por la sigla GNSS (Global Navigation Satellite Systems), se han convertido en la técnica geodésica de densificación por excelencia. Sus posibilidades tanto técnicas como económicas y de instalación han permitido aumentar considerablemente la cantidad de puntos sobre la corteza de la Tierra.

A partir de estaciones GNSS de observación continua es posible monitorear el comportamiento de las coordenadas para una serie de tiempo, permitiendo estimar los desplazamientos que experimenta el punto que materializa dicha estación. El análisis continuo de la variación de estas posiciones permite detectar deformaciones sobre la corteza en una zona determinada y modelar dicha deformación a partir de las velocidades de desplazamiento conocidas [Mateo, 2011].

Las nuevas tecnologías GNSS relacionadas con las observaciones a Tiempo Real permiten conocer la posición de los puntos con muy buenas precisiones, en el instante de observación, como se mostró en el capítulo 2.

En el caso del Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), el cálculo de la posición de un observador aislado (puntual) a partir de las observaciones que este realiza a los satélites, incorpora modelos correctivos a las órbitas y relojes satelitales. Como se vio en el capítulo 3, esta técnica puede aplicarse en Tiempo Real, en regiones donde se ha implementado la transmisión online de las observaciones de las estaciones GNSS permanentes, como de los modelos correctivos a través del protocolo NTRIP. La técnica PPP-NTRIP puede utilizarse para monitorear el comportamiento de las estaciones GNSS permanentes en tiempo real.

Durante el desarrollo de esta tesis se ha contribuido en la implementación de esta técnica regionalmente a partir de aportes realizados en el proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas). La red SIRGAS-CON cuenta a la fecha con más de 420 estaciones GNSS de observación continua distribuidas en el continente [<http://www.sirgas.org>]. Considerando el total de estaciones de toda la red SIRGAS-CON, a septiembre de 2020, el 56% transmiten sus observaciones a tiempo real y dicho número se va incrementado cada año, en respuesta a las mejoras en el equipamiento y a la correspondiente conectividad de internet. Sin embargo, en los países como Brasil, Argentina y Uruguay ese porcentaje asciende a 84%.

Esta infraestructura está disponible, gracias al continuo esfuerzo de Institutos y Servicios Geográficos de los países de la región, unidades académicas y/o organismos del estado que mantienen operando a las estaciones GNSS permanentes y los servidores donde publican sus observaciones. Cabe mencionar que se utilizan para el cálculo de la posición puntual de una estación a tiempo real (PPP-RT), las correcciones a las órbitas y a los relojes de los satélites, calculadas por el IGS (Servicio Internacional GNSS),

en cuyo cálculo participan estaciones de la red SIRGAS-CON que integran la red global del IGS.

Existen antecedentes de la utilización de las observaciones de redes de estaciones GNSS permanentes en aplicaciones geodinámicas, como por ejemplo en monitoreo sísmico [Geng et al., 2016; Kouba, 2003], en la estimación de desplazamientos co-sísmicos [Allen y Ziv, 2011; Larson et al., 2003], en la localización de epicentros, fallas y estimaciones de mecanismos focales [Hohensinn et al., 2018; Melgar et al., 2015], entre otros.

Japón es uno de los países con mayor avance en esta temática. Posee una red muy densificada donde se combinan estaciones sismológicas y GNSS. Con la ocurrencia del Sismo Chuetsu-Niigata ocurrido en 2007 de magnitud 6.5, se han observado desplazamientos de hasta 40 cm en estaciones ubicadas a 20 km del epicentro [Larson, 2009]. Se ha observado también que el desplazamiento de la estación GNSS receptora no sólo está en función de la cercanía al epicentro, sino que también influye el acimut respecto a la dirección de ruptura. Se ha demostrado en Emore et al., (2007) que si bien la sismología con GNSS es menos precisa que los instrumentos de movimiento fuerte (strong motion), puede medir con mayor precisión los desplazamientos producidos por grandes terremotos.

En California también se han realizado estudios comparativos con redes GNSS en tiempo real y acelerómetros, donde se observa un muy buen acuerdo en fase y amplitud para las componentes horizontales, pero no así en la componente vertical [Allen y Ziv, 2011]. Sin embargo, la comparación de desplazamientos estimados por ambas técnicas es muy similar, sumado a que la técnica GNSS permite registrar grandes desplazamientos, imposibles de detectar con instrumentos sísmicos de banda ancha, donde se produce la saturación [Larson et al., 2003].

En Argentina no se han observado antecedentes de la utilización de redes combinadas GNSS y sismológicas. El organismo encargado de la prevención y registro sísmico es el INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). En un reporte de este organismo realizado en 2016, se informó que la red sismológica nacional cuenta con 50 estaciones distribuidas en todo el país. De las cuales, 9 son sismógrafos de banda ancha, ninguno ubicado en la provincia de Mendoza, y 41 estaciones de período corto. Estas últimas son ideales para el estudio de sismicidad local de magnitud moderada a baja, debido a que se suele producir la saturación mecánica del instrumento, en fenómenos de mayor magnitud [Allen y Ziv, 2011].

Por otro lado, el INPRES tiene a su cargo la instalación y el mantenimiento de la Red Nacional de Acelerógrafos (RNA). La misma cuenta en la actualidad con 143 instrumentos, distribuidos en todo el país. Con los últimos 70 instalados, se han incorporado los mayores avances tecnológicos en la materia, como por ejemplo el registro digital, la adquisición de datos directamente a través de una computadora personal, la obtención de registros de muy alta definición, y la posibilidad del manejo a distancia, por medio de módem [<http://contenidos.inpres.gob.ar/acelerografos/RNA>].

Con los datos registrados por ambas redes (estaciones sismológicas y acelerómetros) el INPRES, estima la localización y magnitud sísmica, que son reportadas casi a tiempo real. Sin embargo, los datos registrados por estas estaciones no son de libre acceso, con lo cual no se pueden realizar estudios posteriores, implementar algoritmos de cálculo ni análisis de sismicidad local a partir de dichas estaciones.

Por otra parte, en Argentina se dispone de 90 estaciones GNSS operativas, transmitiendo sus datos a tiempo real con acceso abierto. La denominada red RAMSAC-Ntrip [<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/RamsacNtrip>], conforman el 70% de las estaciones de la red RAMSAC. Dichas estaciones podrían complementar a la red sismológica ofreciendo un valor agregado y una densificación sin precedentes en la región.

Como contribución, en este capítulo se muestran diferentes casos de monitoreo de deformaciones sísmicas, mediante estaciones GNSS permanentes a tiempo real y su correspondencia con los registros sísmicos.

Se presentan experiencias frente a eventos sísmicos de alta intensidad (como en el caso del terremoto de Illapel y Valparaíso, en Chile y Ridgecrest California), y luego se analizaron sismos de moderada magnitud (como el de San Juan en 2021). Se detalla una metodología de análisis, que permite comparar los resultados (desplazamientos y velocidades) obtenidos de las observaciones GNSS con los registros sismológicos, mostrando una marcada correspondencia en la llegada de las ondas sísmicas al sitio, principalmente de las ondas superficiales.

Estos resultados permiten considerar que la técnica GNSS, con observaciones de alta frecuencia, puede ser utilizada para contribuir con estudios sismológicos. En Argentina y países de la región, donde no se dispone de redes sismológicas muy densificadas y de acceso libre, se considera un gran aporte para el análisis de la tectónica local.

4.2 Monitoreo PPP de eventos sísmicos

4.2.1 Metodología desarrollada

En base a las precisiones obtenidas en el monitoreo PPP descrito en el Capítulo 3, y al estudio de la bibliografía mencionada, se decidió evaluar la aplicabilidad de la técnica PPP en la estimación de desplazamiento sísmicos.

Debido a que se analizaron eventos ya ocurridos, se utilizó el programa BNC (BKG NTRIP Client) [Weber et. al, 2016], en el modo pos-proceso. La metodología de cálculo es la misma que para la estimación de coordenadas en Tiempo Real [Camisay et al., 2017]. En este caso, se utilizaron los datos de observación (formato RINEX) de las estaciones GNSS de interés, las efemérides de los satélites (tanto GPS como GLONASS) y los archivos de corrección a las órbitas y relojes (IGS03) almacenados previamente, según se describió en el capítulo 3 (contribución de esta tesis). Sin embargo, la metodología que aquí se expone podría ser utilizada en tiempo real sin ningún inconveniente.

A raíz del estudio de un sismo ocurrido justo en la finalización de un día GPS (Sismo de Pedernales, Ecuador, ocurrido el 16/04/2016 a las 23:58 UTC), se utilizó también, el servicio

canadiense en línea CSRS-PPP [<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>]. El software BNC no permite procesar días GPS continuos y al comienzo del cálculo la solución PPP debe converger, por tal motivo se ensayó sobre esta nueva herramienta, y los resultados fueron muy semejantes.

El servicio canadiense requiere el envío de los archivos RINEX de observación, y una vez realizado el cálculo de la posición, se recibe por correo electrónico, los resultados del procesamiento PPP. CSRS-PPP utiliza efemérides precisas IGS (ultra-rápidas, rápidas o finales) para el cálculo de las coordenadas. En función del tiempo transcurrido entre la observación y el envío del archivo RINEX, el servicio utiliza la efeméride más precisa disponible.

El reporte de procesamiento de este servicio es muy completo, y además se recibe un archivo con extensión “.pos” que contiene el cálculo de la posición época por época, con los estimadores de precisión. En el Anexo VIII, se puede observar un extracto de este archivo, para el procesamiento PPP de una estación GNSS cercana al epicentro del sismo de Pedernales, Ecuador.

De esta manera, se procedió a analizar eventos sísmicos de moderada intensidad (magnitud 4 o mayor), estimando los desplazamientos registrados en distintas estaciones GNSS de la región. En cada evento sísmico estudiado, se analizó la distancia de cada estación GNSS al epicentro, el desplazamiento producido por el sismo, la dirección de movimiento, el tiempo en que tardó en llegar la onda sísmica a cada estación (a partir de la observación del desplazamiento) y el movimiento co-sísmico del sitio en las componentes norte, este y altura.

Una vez obtenidos los desplazamientos GNSS, se desarrolló una metodología para poder compararlos con los registros sismológicos. En primer lugar, se realizaron rutinas de programación propias, en Matlab, para generar archivos ASCII con los desplazamientos estimados en cada coordenada. Luego se emplearon diversas herramientas para adecuar estos registros al formato que manejan los programas empleados en sismología, y transformar dichos desplazamientos en velocidades, con el objeto de ser comparadas con los registros sismológicos.

Se utilizaron los programas “ascii2mseed” y “mseed2sac” [<https://github.com/iris-edu>] para realizar la transformación de formatos. Luego se emplearon las herramientas del software SAC (Seismic Analysis Code) [Goldstein y Snoke, 2005; Goldstein et al., 2003] para el análisis de datos y el cálculo de derivadas de los desplazamientos (para comparar velocidades). Así mismo se utilizó la herramienta de filtrado que posee este software [Mollova, 2007].

Esta metodología se logró optimizar en una aplicación desarrollada en lenguaje Python, que permite realizar de forma automatizada el cálculo de desplazamientos sísmicos (respecto a una coordenada de control de cada estación) y la transformación de formatos.

Finalmente, se utilizó también SAC software para la integración de aceleraciones y/o velocidades sísmicas, habiendo quitado la respuesta instrumental, con el objeto de comparar directamente los desplazamientos sísmicos por ambas técnicas (GNSS y sismología), y así evaluar la posible contribución de las estaciones GNSS permanentes en los sistemas de alertas tempranas [Allen y Kanamori, 2003].

4.2.2 Sismo de Illapel, 2015

Se analizó en particular el terremoto ocurrido el 16 de septiembre de 2015 en Illapel Chile, este alcanzó una magnitud 8,4 en la escala sismológica de magnitud de momento. El epicentro se ubicó a 37 kilómetros al noroeste de Los Vilos y a 37 kilómetros al suroeste de Canela Baja, en la región de Coquimbo, en el norte de Chile.

Para evaluar el grado de influencia del sismo a diferentes distancias del epicentro, se estudiaron los desplazamientos en 6 estaciones GNSS permanentes, llegando hasta los 1100 km. Se monitoreó la estación chilena SANT, ubicada en la ciudad de Santiago de Chile, y 5 estaciones argentinas: CSJ1, CSLO, MZAC, CORD y UNRO, distribuidas en la zona central de Argentina, en la dirección oeste-este (Figura 4-1).

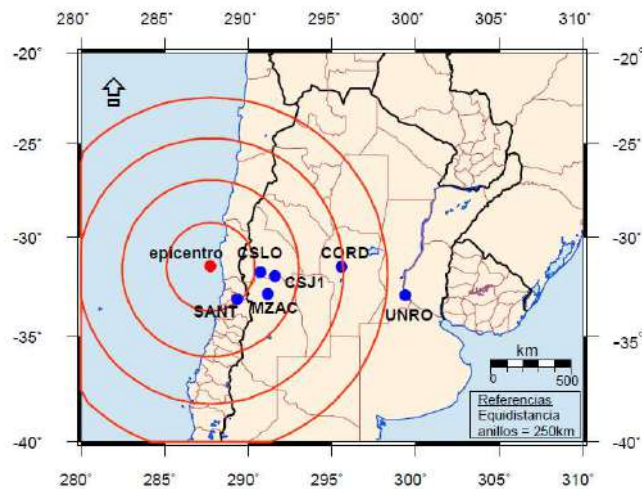


Figura 4-1: Sismo Illapel 2015, localización del epicentro y estaciones GNSS analizadas.

Se calcularon los desplazamientos a partir de BNC, como se describió en el ítem anterior y se representaron las variaciones en las componentes Norte, Este y Altura. Los mayores desplazamientos se observan en la componente Este, como se muestra en la Figura 4-2 (estación CSLO), lo cual se fundamenta por la naturaleza y ubicación de la falla de subducción donde se produjo el sismo.

De las antenas analizadas, CSLO (ubicada a 280 km del epicentro) fue la que presentó el mayor desplazamiento. La coordenada Este tuvo un movimiento instantáneo durante el sismo mayor a 20 cm, y un desplazamiento resultante (co-sísmico) del orden de 10 cm hacia el oeste.

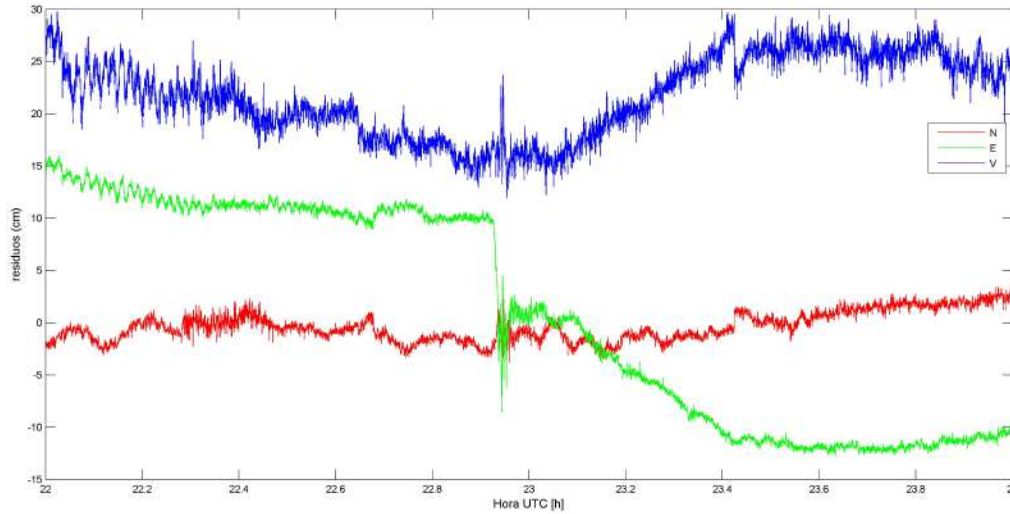


Figura 4-2: Desplazamiento de la estación CSLO (CASLEO, San Juan). Coordenadas instantáneas por PPP, día GPS 259-2015.

Si bien la estación más cercana analizada fue SANT, en ella se observó un desplazamiento menor a 5 cm, mientras que la mayor amplitud del desplazamiento co-sísmico, fue observado en la estación CSJ1, ubicada a 370 km del epicentro, con un movimiento total observado en la componente este de 30 cm. Cabe aclarar que esta estación está instalada en la azotea de un edificio de una planta, por lo cual el movimiento estimado puede estar influenciado por la respuesta sísmica de la estructura edilicia. Comparativamente la estación CSLO se encuentra materializada por una estructura metálica empotrada en roca (caso de ideal para estudiar el comportamiento ante eventos sísmicos) (Figura 4-3).

<p>3. INFORMACIÓN SOBRE LA LOCALIZACIÓN.</p> <p>Provincia: San Juan. Ciudad: Sarmiento. Tipo de Monumentación: Antena montada sobre estructura de hierro anclada en la terraza de edificio.</p> 	<p>3. INFORMACIÓN SOBRE LA LOCALIZACIÓN.</p> <p>Provincia: San Juan. Ciudad: Complejo Astronómico El Leoncito. Tipo de Monumentación: Estructura metálica de acero inoxidable empotrada en roca.</p> 
<p>CSJ1: https://www.ign.gov.ar/archivos/ramsac/estacion2.php?estacion=CSJ1</p>	<p>CSLO: http://www.ign.gov.ar/archivos/ramsac/estacion2.php?estacion=CSLO</p>

Figura 4-3: Materialización de estaciones permanentes GNSS, CSJ1 (izquierda), CSLO (derecha)

Para analizar la deformación resultante y el instante de llegada de las ondas sísmicas, con referencia a la distancia al epicentro, se graficó la variación temporal en la componente “este” para las seis estaciones estudiadas. En la Figura 4-4 se observa que la demora en el instante de llegada de la onda está relacionado con la distancia relativa de cada estación respecto al epicentro. Se observa también que la amplitud del

desplazamiento en las coordenadas disminuye en función del aumento con la distancia. En todas las estaciones se observó el mayor desplazamiento en la componente Este.

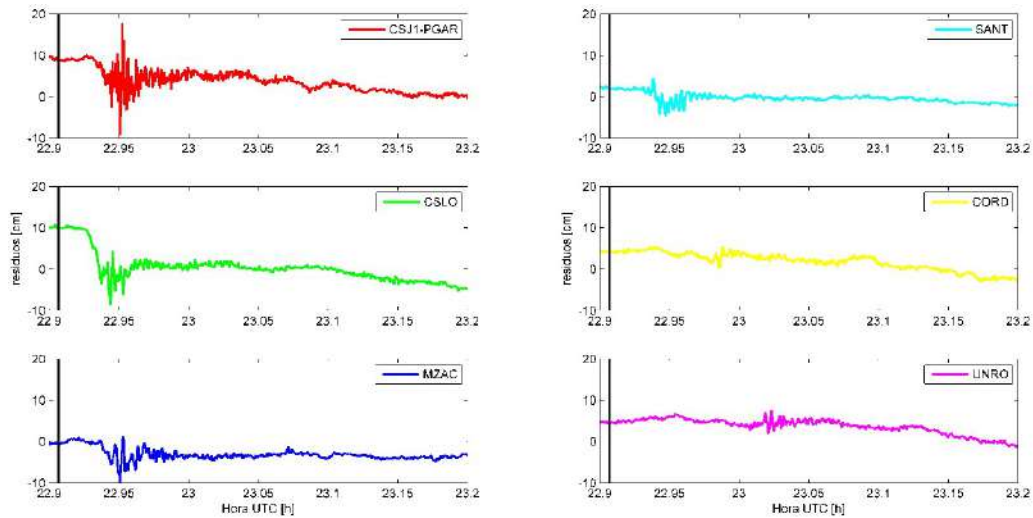


Figura 4-4: Desplazamientos en la coordenada ESTE producidos por el terremoto de Illapel 2015. La línea negra vertical indica el momento de ocurrencia del sismo en el epicentro.

Posteriormente se amplió el estudio a una cantidad mayor de estaciones, intentando analizar la velocidad y el momento de llegada de la onda sísmica en distintas direcciones (Figura 4-5)



Figura 4-5: Localización del epicentro sismo Illapel 2015 y estaciones GNSS analizadas. Direcciones estudiadas.

Se contabilizó el retardo o demora en percibirse el movimiento sísmico en cada estación, desde el momento de ocurrencia del terremoto en el epicentro. En la Figura 4-6 se muestra el retardo en la llegada de la primera onda sísmica percibida en cada sitio, aumentando en forma proporcional con la distancia al epicentro.

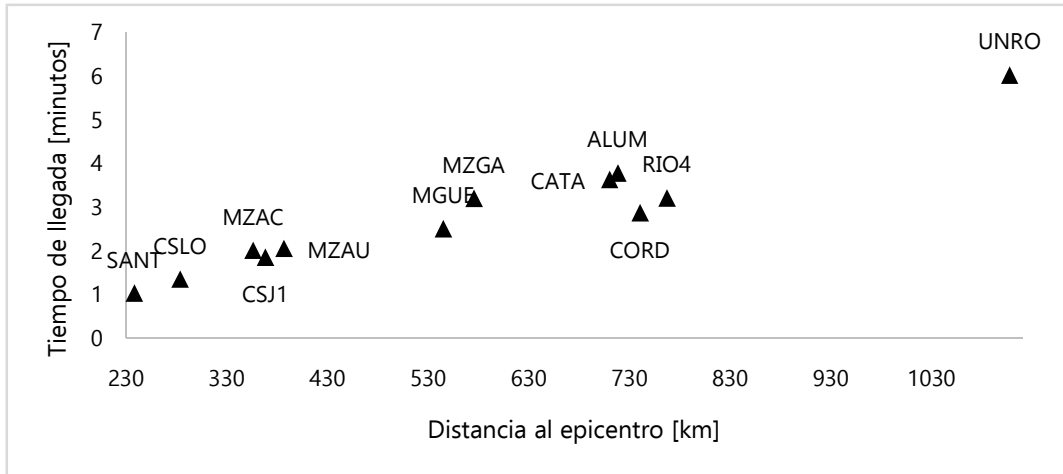


Figura 4-6: Tiempo de llegada de la onda sísmica a las diferentes estaciones, desde la ocurrencia del terremoto.

Analizando retardo y la distancia respecto al epicentro, se pudieron estimar las velocidades de propagación de la onda sísmica en cada una de las seis direcciones consideradas, tal como se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: : Velocidad de la onda sísmica propagada en diferentes direcciones

Estaciones GNSS	Distancia (km)	Velocidad (km/s)
Dirección 1		
ALUM	718,224	3,166
Dirección 2		
CATA	710,085	3,255
Dirección 3		
CSLO	283,464	3,507
CSJ1	368,138	3,312
CORD	740,424	4,301
Dirección 4		
MZAC	355,941	2,954
RIO4	767,006	3,985
UNRO	1107,403	3,062
Dirección 5		
MZAU	386,634	3,139
MZGA	575,387	2,994
Dirección 6		
SANT	237,979	3,866
MGUE	544,933	3,629

Se observa una velocidad promedio de 3,43 km/s, correspondiente a la velocidad de ondas superficiales.

A su vez, se calcularon las diferencias de coordenadas entre posiciones sucesivas (diferencias de cada coordenada con su inmediata anterior), para registrar el desplazamiento neto durante el evento. En la Figura 4-7 se muestra el movimiento

instantáneo de la estación argentina CSJ1, localizada en la provincia de San Juan, asemejándose a las gráficas de un sismógrafo.

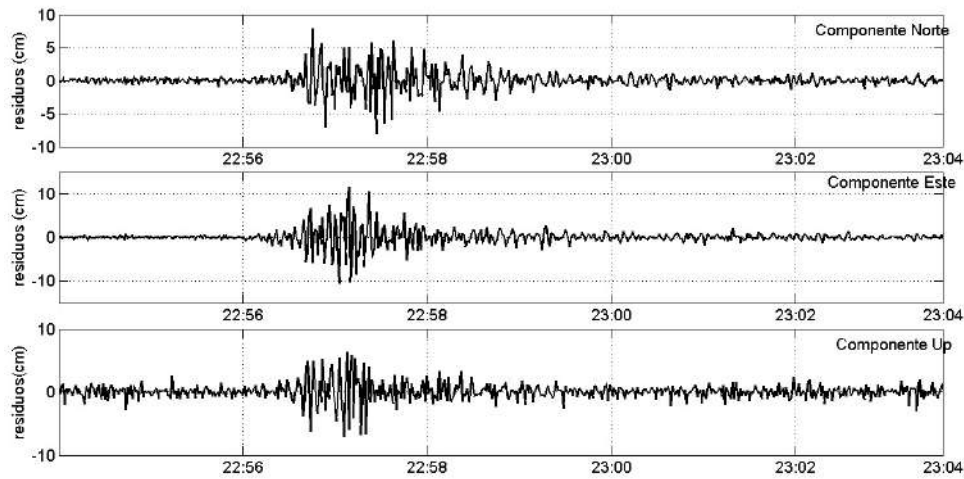


Figura 4-7: Movimiento instantáneo de la estación CSJ1 durante el sismo.

Los resultados del análisis de este evento no pudieron compararse con datos sísmicos, por la falta de disponibilidad de registros sísmológicos en las cercanías de las estaciones GNSS argentinas estudiadas. Esto motivó el análisis de eventos sísmicos similares, en otras regiones de América que dispusiesen de registros sísmológicos, con el fin de validar tanto los resultados obtenidos como la metodología de monitoreo propuesta desde las estaciones GNSS.

4.2.3 Sismos de moderada magnitud

Habiendo comprobado que la metodología de PPP detecta y cuantifica los desplazamientos co-sísmicos y las componentes de la deformación resultante, en sismos de gran magnitud como el de Illapel, se decidió estudiar sismos de menor magnitud y evaluar la respuesta de la técnica PPP ante desplazamientos menores.

Se estudiaron varios sismos en la región de Cuyo (Mendoza, San Juan y San Luis) de magnitud 4 a 6, considerando aquellos que ocurrieron a profundidades menores que 20 km. Se estudiaron numerosos eventos (no mostrados), pero no se pudo evidenciar en ningún caso, un desplazamiento notable en las coordenadas, debido a estos sismos.

Luego se decidió continuar el estudio, con sismo de magnitud mayor a 6, no son tan frecuentes en esta región, pero existen algunos antecedentes. Justamente en enero de 2021, ocurrió uno en la provincia de San Juan, con una magnitud de 6.4, según el reporte de INPRES [<https://www.inpres.gob.ar/desktop/epicentro1.php?s=20210119024622>]

Como muestra la Figura 4-8 el área de influencia abarca la zona sur de la sierra Pie de Palo. En las cercanías se encuentran 4 estaciones permanentes, CSLO (Casleo) y CSJ1(), y en la ciudad de San Juan, OAFA (Observatorio Feliz Aguilar) y UNSJ (Universidad Nacional de San Juan).



Figura 4-8: Ubicación sismo San Juan, enero de 2021

Se procesaron las observaciones de dichas estaciones con PPP, y se calcularon los desplazamientos con un intervalo de un segundo. Se graficaron las tres componentes (Norte, Este y Up o Altura). La estación CSJ1, fue la que tuvo mayor desplazamiento, pero como ya se mencionó se encuentra instalada sobre la azotea de un edificio. Luego la estación en roca CSLO, tuvo desplazamientos instantáneos mayores de 3 cm (Figura 4-11). En todas las estaciones monitoreadas se observa claramente el movimiento producido por el sismo.

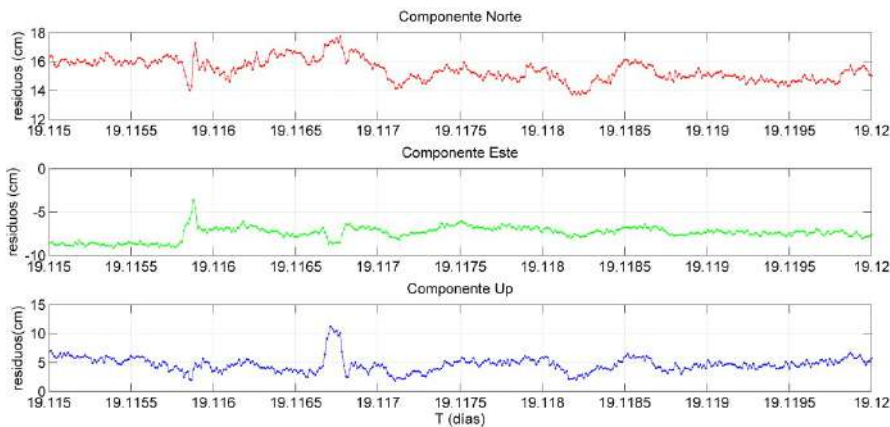


Figura 4-9: Desplazamiento estación CSLO, sismo San Juan 19/01/2021

En base a esta experiencia y a varios sismos menores analizados (no mostrados) se concluye que la precisión de la técnica PPP (3 mm para las componentes horizontales y 7 mm en vertical), permite el monitoreo sísmico en eventos de magnitud mayor a 6, con desplazamientos en las coordenadas mayores a 2 cm.

4.3 Estimación de desplazamientos sísmicos mediante PPP y comparación con datos sísmológicos

Dada la falta de disponibilidad de registros sísmicos, de libre acceso en Argentina, se decidió trabajar con redes de otros países donde se dispusiera de ambos datos (GNSS y sísmológicos) abiertos. Se comenzó observando la situación de Chile, por su cercanía.

Se utilizó el servicio brindado por IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) que, a través de la búsqueda de eventos sísmicos puntuales, permite descargar los registros sísmicos de las estaciones disponibles en la región de búsqueda [https://ds.iris.edu/wilber3/find_event].

Al buscar un sismo en particular, se pueden seleccionar diferentes redes sísmológicas y visualizarlas en el mapa del servicio. En Chile, existen al menos 3 redes nacionales que publican sus datos en este sitio, además las redes globales (como por ej.: GNS y Real Time) que poseen estaciones en todo el planeta (Figura 4-10). En esta figura también se puede apreciar la falta de estaciones sísmológicas en Argentina, con datos disponibles en este servicio.



Figura 4-10: Redes sísmológicas de Chile, disponibles en IRIS

4.3.1 Metodología utilizada

Los desplazamientos estimados mediante el procesamiento GNSS debieron ser tratados y transformados para llevarlos a un formato compatible con las observaciones de las estaciones sísmológicas. La metodología implementada para realizar este análisis comparativo entre registros del GNSS y de sismología se resume en los siguientes pasos:

- 1- **Identificación del sismo a analizar**, de magnitud 4 o mayor, y localización de estaciones GNSS y sísmológicas cercanas. Se utilizaron los catálogos de búsqueda de sismos del Servicio Sísmológico de Chile [http://www.sismologia.cl/] y para otras zonas el catálogo del servicio geológico de los Estados Unidos USGS [https://earthquake.usgs.gov/]. Para localizar las estaciones GNSS cercanas se empleó el software Google Earth, ya que se disponía de las redes GNSS a utilizar en archivos KML. Las estaciones sísmológicas se localizaron con el mapa de estaciones IRIS para cada evento.

2- **Descarga y almacenamiento de los datos GNSS para el procesamiento PPP**, se realizó la descarga de archivos RINEX de observación y navegación, desde los servidores de datos de las estaciones a procesar y de correcciones satelitales (previamente almacenadas).

3- **Procesamiento de datos GNSS con método PPP**: Se realizó con el software **BNC** y/o el servicio canadiense on-line **CSRS-PPP**, descritos en el capítulo 3.

4- **Cálculo de desplazamientos** respecto a la coordenada de referencia de cada estación GNSS, con rutinas de programación propias, desarrolladas en Matlab. Los programas de cálculo PPP, entregan la posición estimada época a época, para cada coordenada. BNC trabaja con coordenadas cartesianas geocéntricas (X,Y,Z), mientras que el servicio canadiense entrega coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura elipsoidal). Para cada caso, se confeccionó una rutina de programación que lee la coordenada estimada época por época y calcula la diferencia respecto a una coordenada de control. Luego se proyectan esas diferencias sobre el plano horizontal geodésico, para obtener los desplazamientos en las direcciones Norte, Este y Vertical. En este paso, se genera un nuevo archivo de texto (ASCII) por cada coordenada (N,E,V) con el formato necesario para ser ingresada en los programas de sismología.

5- **Transformación a formato mseed**: Con el programa “ascii2mseed”, se transforma el archivo de texto con los desplazamientos a formato estándar de análisis sísmológico “mseed”. Este programa funciona bajo el sistema operativo UNIX. Se ejecutó la siguiente sentencia:

```
>./ascii2mseed -o output.mseed input.txt
```

Siendo output.mseed el nombre del archivo de salida, e input.txt el archivo de entrada. Se puede generar un único archivo mseed con las tres componentes, utilizando un “*” para que transforme todos los archivos ASCII que se encuentren en el directorio.

Por ejemplo la siguiente sentencia

```
>./ascii2mseed valparaiso.mseed PPP_BN05_*.txt
```

Transforma en formato mseed los archivos con los desplazamientos en las componentes N, E y V de la estación BN05 (PPP_BN05_N.txt, PPP_BN05_E.txt, PPP_BN05_V.txt.). El archivo de salida en este caso es “valparaiso.mseed”

6- **Transformación a formato SAC**: Con el programa “mseed2sac” se transforma de formato mseed a formato SAC (Seismic Analysis Code) [<http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/software/downloads/sac/>], también funciona en entorno UNIX, y la sentencia utilizada para el ejemplo anterior es:

```
> mseed2sac valparaiso.mseed
```

El programa devuelve automáticamente tres archivos con extensión .SAC, uno para cada componente, y los nombra según el encabezado del archivo ASCII original. En el caso del ejemplo se generan: GP.BN05..N.2017.114.200000.SAC, GP.BN05..E.2017.114.200000.SAC y GP.BN05..V.2017.114.200000.SAC.

7- **Cálculo de velocidades**: Se realizó con software SAC, ya que contiene numerosas sentencias para el análisis de frentes de ondas y es muy utilizado por la comunidad científica para análisis sísmológico. Para el cálculo de velocidades a partir de desplazamientos se utilizaron los siguientes comandos:

```
> sac # Inicia el programa SAC
> read input.sac # Lee los archivos indicados
> DIF # Calcula la derivada del contenido leído en la sentencia anterior
```

```
> write append .d # Genera un nuevo archivo, con el mismo nombre pero con el sufijo ".d"
```

8- **Comparación con registros sismológicos:** se realizó con SAC software y con Seisan [Havskov y Ottemoller, 1999]. Este ultimo programa es empleado fundamentalmente para la localización y estimación de magnitudes sísmicas. El mismo funciona en sistemas operativos Windows y Unix. En este análisis se utilizó para observar la llegada de las primeras ondas sísmicas tanto en las estaciones sismológicas como en las estaciones GNSS. Los comandos utilizados fueron:

```
>wo # localiza el directorio donde deben estar los input
>dirf input.sac # lista los archivos a leer, usar *.sac para que lea todos
>mulplt # muestra en pantalla los frentes de onda listados en el comando anterior
>enter # identificar numero de archivo listado, o con enter muestra todos
También se utilizó Seisan para aplicar filtros a las observaciones.
```

4.3.2 Sismo Valparaíso, 2017

Se seleccionó para verificar la estrategia, el sismo ocurrido en Valparaíso, el 24 de abril del 2017 a las 21:38:30 hs (UTC), cuya magnitud en el epicentro fue de 6.9.



Figura 4-11:Estaciones GNSS y sismológicas monitoreadas, sismo Valparaíso 2017

Mediante la técnica PPP se monitorearon 6 estaciones GNSS pertenecientes al Ministerio de Bienes Nacionales de la República de Chile (BN) cercanas al epicentro (Figura 4-11). Se empleó el software BNC, ingresando archivos de observación y navegación en formato RINEX. También se ingresaron las correcciones de órbitas y relojes calculadas y transmitidas por el IGS, almacenadas previamente. Una vez obtenidas las coordenadas época por época, se calcularon los desplazamientos con respecto a la coordenada de control de cada estación (coordenadas ITRF2008 Época 2013,0).

El mayor desplazamiento se observó en la coordenada Este de la estación BN05, ubicada a 36 km del epicentro, con un movimiento co-sísmico de 10 cm, y un remanente en dicha coordenada de 5 cm al Oeste (Figura 4-12).

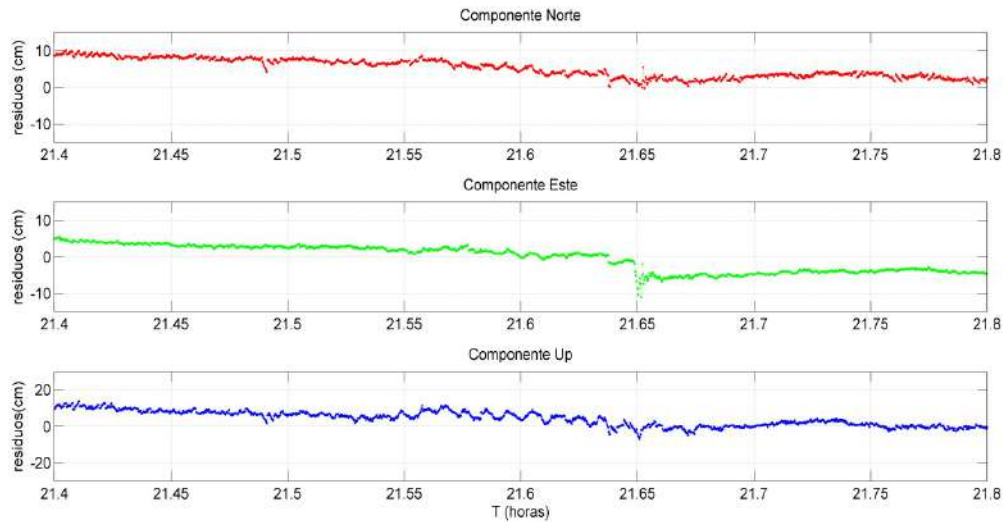


Figura 4-12: Serie temporal estación BN05, día del sismo Valparaíso 2017.

Se aprecia también en las estaciones BN06, BN07, y BN08 un desvío de 10 cm en la componente este, posiblemente ocasionado por la falta de actualización de la posición de referencia (Figura 4-13). En la estación BN17, ubicada en La Serena, este desvío es de 70 cm hacia el oeste, que corresponde al desplazamiento estimado en el sismo de Illapel, 2015 [https://www.igm.cl/div/pdf/MAPA_DE_DESPLAZAMIENTO_COSISMICO_TERREMOTO_DE_ILLAPEL_8.pdf].

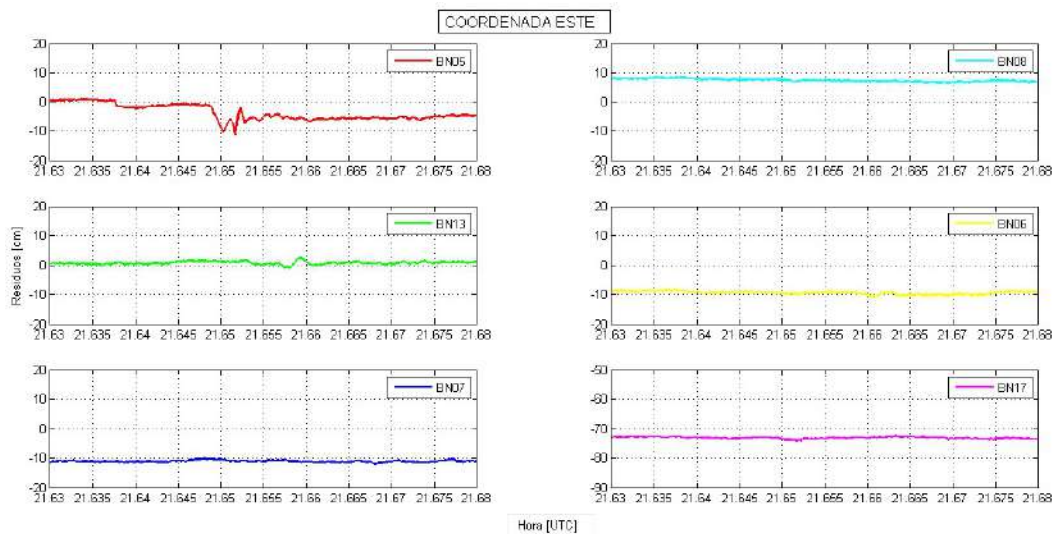


Figura 4-13: Desplazamientos co-sísmicos Sismo Valparaíso 2017, componente Este

Como se mencionó, se utilizó la coordenada oficial de cada estación (informada en el sitio web de Bienes Nacionales), calculada por el Instituto Geográfico Militar de Chile y vinculada al marco de referencia IGS08, época 2013.0. Sería recomendable incorporar las estaciones de Chile estudiadas, a la red de SIRGAS para poder contar con coordenadas actualizadas semanalmente en futuros monitoreos.

Los desplazamientos resultantes fueron derivados, mediante el software SAC, para obtener las velocidades correspondientes y poder compararlas con los registros sísmicos.

Se solicitaron los datos sísmicos en IRIS, buscando las estaciones más cercanas a los receptores GNSS (Figura 4-13). Se trabajó con la estación VA01, por ser la más cercana a la estación GNSS BN05, ya que fue la que registró mayor desplazamiento co-sísmico.

Luego, se ingresaron las velocidades provenientes de GNSS y los registros sismológicos de la estación VA01, al software SEISAN el cual permitió comparar gráficamente los movimientos registrados por ambos instrumentos.

Se filtraron los registros sismológicos, de frecuencias mayores a 1Hz para poder compararlos con los registros GNSS (una observación por segundo). Se compararon las velocidades de la estación sismológica VA01, con la GNSS BN05, distanciadas 2 km entre sí, observándose una muy buena correspondencia tanto en la dirección Este como en la Norte (Figura 4-14).

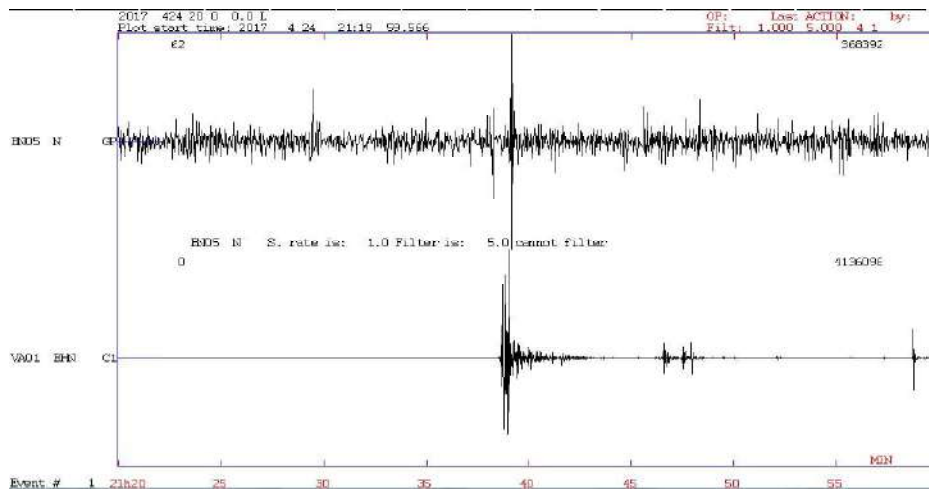


Figura 4-14: Comparación registro GNSS BN05 (arriba) y sismológicos VA01 (abajo). Componente Norte. Sismo de Valparaíso, 2017.

Si se acerca la escala de tiempo al momento del sismo, como se observa en la Figura 4-15, existe concordancia en el tiempo de llegada de las ondas superficiales en ambos instrumentos, pero no se alcanza a apreciar la llegada de las primeras ondas sísmicas (S y P) en la estación GNSS. Los registros GNSS presentan mayor ruido que los sismológicos en las tres direcciones, siendo mayor en la componente vertical. Por otro lado, se evidencia la diferencia en cuanto al intervalo de registro, cuando la frecuencia de observación de los receptores GNSS es de 1Hz (1 observación por segundo), la de los instrumentos sísmicos puede aumentar a 100 o 200 Hz.

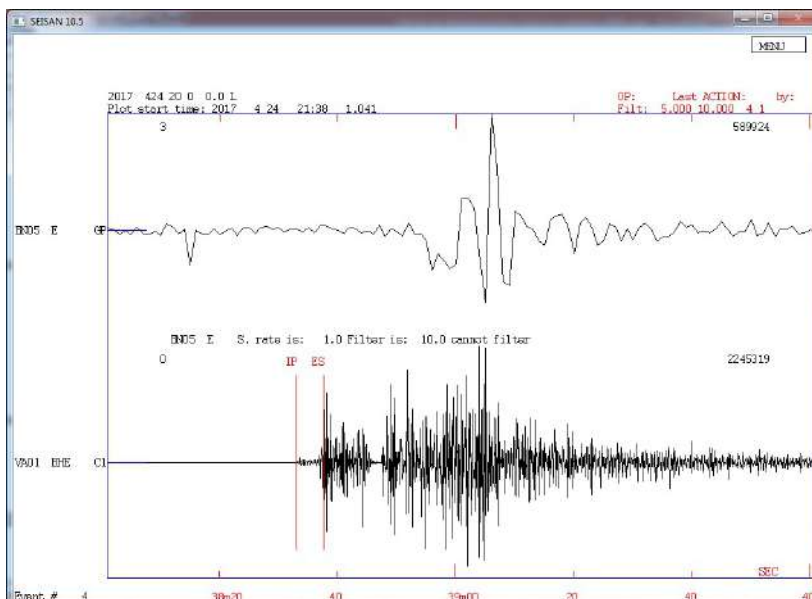


Figura 4-15: Comparación registros GNSS y sismológicos, llegada de las ondas sísmicas S y P, y ondas superficiales durante el sismo de Valparaíso.

Luego, se puede expresar que la técnica PPP permite monitorear desplazamientos producidos por eventos sísmicos, siendo necesario contar con una coordenada precisa y actualizada de las estaciones para utilizar de control en el cálculo de los desplazamientos co-sísmicos.

Si bien las comparaciones gráficas con las estaciones sismológicas muestran una buena correlación, es necesario aplicar filtros que disminuyan el ruido observado en los registros GNSS y aumentar la frecuencia de muestreo de esta técnica.

A partir de este caso de estudio, se decidió continuar el análisis procesando observaciones GNSS con un intervalo de registro mayor (high-rate), la búsqueda de estaciones se realizó con esta condición.

4.3.3 Sismo de Ridgecrest California 2019

Se seleccionó para este estudio el terremoto ocurrido en California, E.E.U.U., el 6 de julio de 2019, a las 3:19:53 (hora UTC). Se eligió este evento por su importante magnitud y por contar con datos disponibles tanto de estaciones GNSS con registro de alta frecuencia (high-rate), como de estaciones sismológicas. Se utilizaron 5 estaciones GNSS permanentes ubicadas en las cercanías del epicentro (Figura 4-16). Sus observaciones se descargaron del servidor de UNAVCO [<ftp://data-out.unavco.org/pub/highrate/>].

Se procesaron mediante PPP, 3 horas de observación con intervalos de registro de 5 Hz (0,2 segundos), desde las 2 a las 5 hs UTC, lo cual permitió obtener para cada estación sus series de coordenadas (en sus tres componentes). El procesamiento se realizó mediante el servicio on-line canadiense, CSRS-PPP [<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>].

Los resultados obtenidos se comparan con las series de coordenadas diarias de UNAVCO (University NAVSTAR Consortium Inc.)

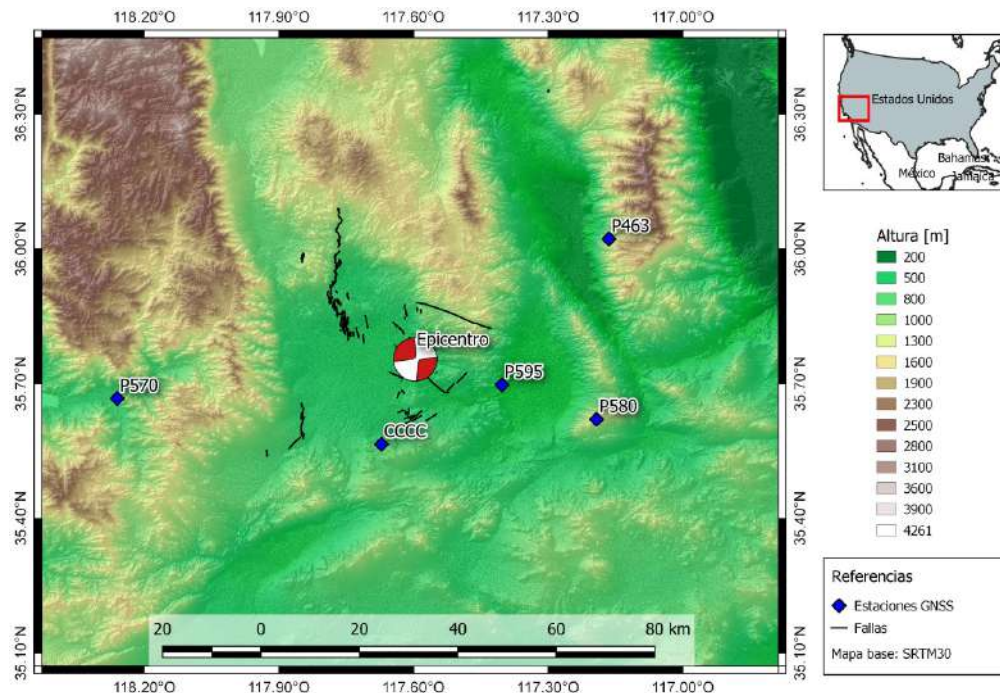


Figura 4-16: Sismo California (6/7/2019). Ubicación del epicentro, estaciones GNSS utilizadas.

A partir de las coordenadas estimadas con PPP, se calcularon con respecto a la coordenada de control de cada estación (IGS08), los desplazamientos en las tres componentes (Norte, Este y Altura). Observando los desplazamientos en las coordenadas, fue posible identificar en cada estación la amplitud máxima del movimiento producido por el sismo y cuantificar la deformación co-sísmica resultante.

En la Figura 4-17, se muestra la serie temporal de coordenadas en la estación CCCC y en la Figura 4-18, la estación P595, estaciones más cercanas al epicentro. En ambas figuras se puede apreciar el desplazamiento producido por el sismo, fundamentalmente en las coordenadas horizontales (Norte y Este).

La estación CCCC, ubicada a 25 kilómetros al oeste de la zona de fallamiento, muestra un desplazamiento resultante horizontal hacia el Nor-Oeste (20 cm) y un leve ascenso (2 cm), mientras que la estación P595, ubicada a 20 kilómetros al este de la zona de fallamiento, muestra un desplazamiento resultante horizontal hacia el Sur-Este (58 cm) y un ascenso más significativo (5 cm).

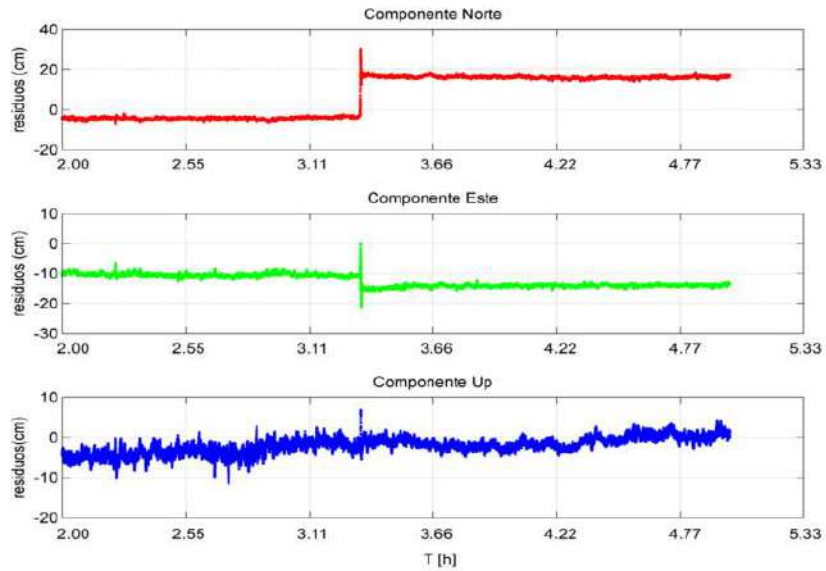


Figura 4-17: Serie temporal estación CCCC, ubicada a 25 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC).

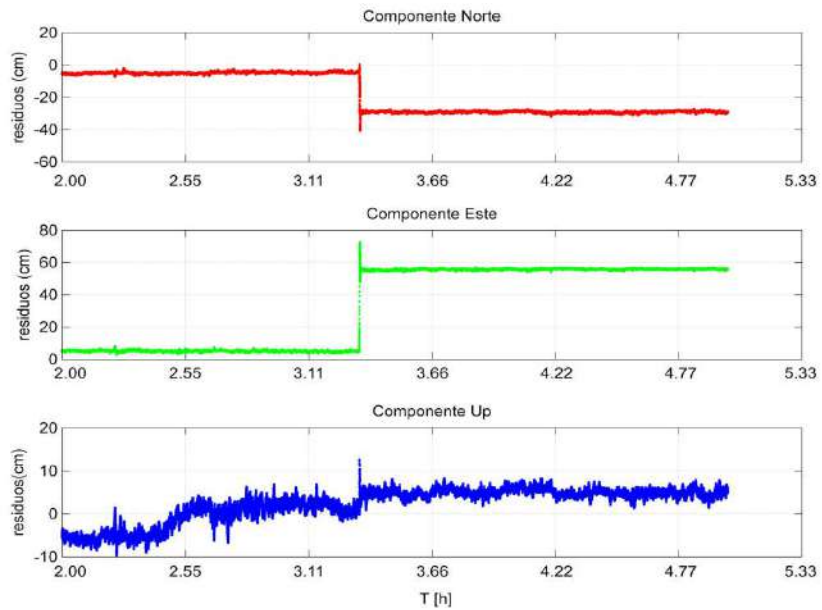


Figura 4-18: Serie temporal estación P595, ubicada a 20 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC)

Algo semejante se observa en la Figura 4-19 y Figura 4-20, correspondientes a las estaciones P570 y P580. Dichas estaciones si bien se encuentran más alejadas del epicentro, muestran una respuesta similar de desplazamiento. La estación P570, ubicada a 60 km al oeste del epicentro y al oeste de la zona de fallamiento, presenta un desplazamiento en sentido Nor-Oeste, mientras que la estación P580, ubicada a 45 km al este del epicentro y al este de la zona de fallamiento, se desplaza en sentido Sur-Este.

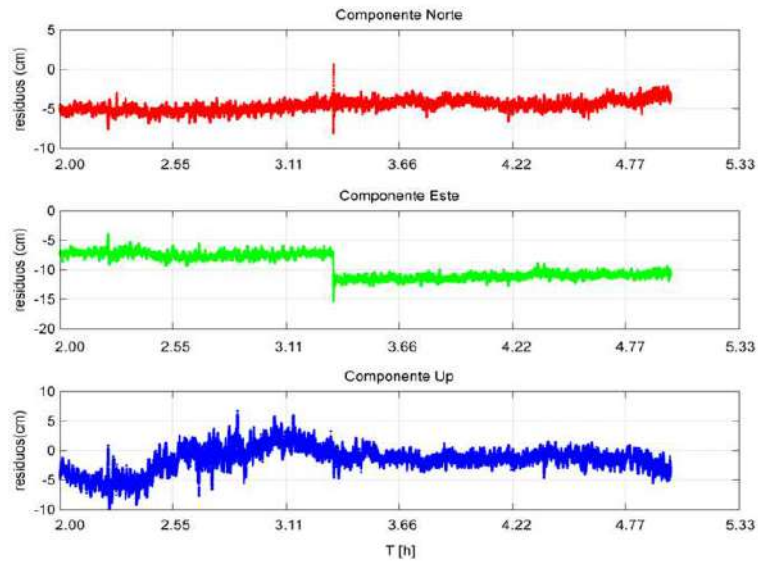


Figura 4-19: Series temporal estación P570 ubicada a 60 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC)

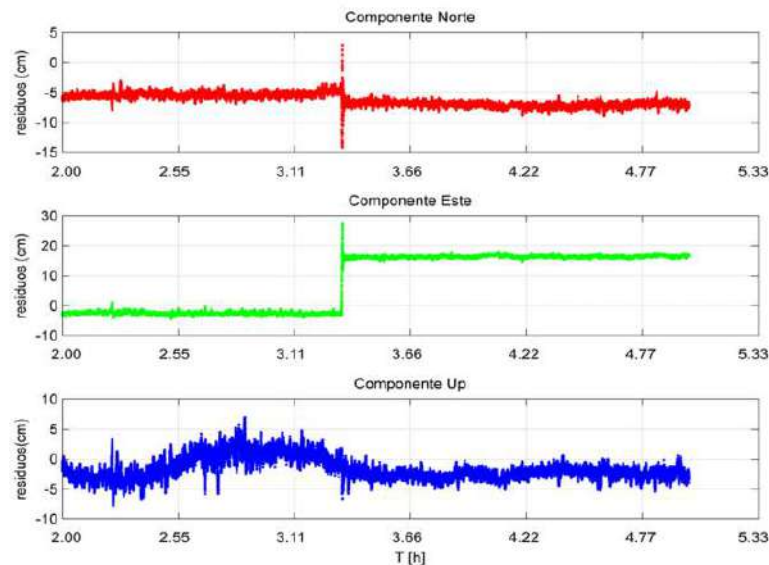


Figura 4-20: Series temporal estación P580 ubicada a 45 km del epicentro Sismo California (tiempo en hora UTC)

Una vez obtenidas las series temporales para cada estación, se aplicó un algoritmo de cálculo desarrollado para la detección rápida de desplazamientos resultantes (DR) producidos por eventos sísmicos. El programa, determina el mayor desplazamiento registrado (entre épocas sucesivas). Calcula un promedio de las posiciones previas y otro promedio de las posiciones posteriores a este “salto o discontinuidad”. Luego de la diferencia entre ambas posiciones promediadas (previa y posterior), estima el desplazamiento resultante en cada estación, producto del evento. En esta experiencia, se consideraron 2 minutos previos y posteriores al mayor desplazamiento detectado por el programa, para el cálculo de los promedios. El resultado del algoritmo es un archivo de texto (ASCII) que contiene los desplazamientos en las tres coordenadas para cada estación analizada.

La Tabla 4-2 presenta los desplazamientos resultantes (DR) calculados para el sismo estudiado. Cabe destacar que los DR pueden ser obtenidos muy rápidamente. Una vez obtenidas las series de tiempo de coordenadas PPP, la ejecución del algoritmo es inmediata. Si las estaciones GNSS transmiten sus datos a tiempo real, se puede calcular la serie PPP también a tiempo real y se podrían estimar los DR en forma casi inmediata (en este caso, con 2 minutos de latencia).

Tabla 4-2 : Desplazamientos Resultantes Terremoto California [cm]

Estación	N	E	Up
P463	-2,352	1,573	0,919
P570	0,037	-3,278	-0,595
P580	-1,801	16,378	-1,642
P595	-23,871	45,772	2,602
CCCC	18,927	-4,604	0,745

Variación de coordenadas determinadas por UNAVCO:

Como se mencionó las estaciones GNSS utilizadas pertenecen a la red NOTA (Network of the Americas) gestionada por UNAVCO [<https://www.unavco.org/>]. Dichas estaciones son procesadas por los centros de análisis de datos que conforman el proyecto GAGE (Geodesy Advancing Geosciences and EarthScope) y se dispone diariamente de la solución de coordenadas de todas las estaciones de la red [<ftp://dataout.unavco.org/pub/products/positions>]

La solución diaria es el resultado de una combinación de dos soluciones independientes: una se basa en el Posicionamiento Puntual Preciso, producido con el software GIPSY / OASIS en la Universidad Central de Washington (CWU) y la otra es una solución de red a partir de pos-procesamiento de dobles diferencias, realizada con el software GAMIT, en el Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México (NMT). Ambas soluciones son generadas a partir de productos rápidos del IGS (efemérides, parámetros de orientación y relojes satelitales), razón por la cual tienen una latencia de aproximadamente 24 horas [Herring et al., 2016].

Las coordenadas diarias de las 5 estaciones GNSS fueron extraídas de la solución final del centro de análisis CWU, referidas al marco de referencia ITRF2014. Se realizó el cálculo de los desplazamientos producidos por el terremoto, considerando en cada punto las coordenadas promedio de dos días previos al sismo y dos días posteriores (Tabla 4-3). Dichos desplazamientos fueron comparados con los DR calculados con el algoritmo antes mencionado.

Tabla 4-3: Coordenadas previas y posteriores al sismo de California. Unidad [m] (Fuente: coordenadas diarias ssss.cwu.final_igs14.pos, publicadas por UNAVCO).

Estación	Xprevio	Yprevio	Zprevio	Xpost	Ypost	Zpost
P463	-2358354,976	-4595829,857	3730988,422	-2358354,966	-4595829,883	3730988,405
P570	-2456509,110	-4569864,795	3698741,092	-2456509,147	-4569864,770	3698741,090
CCCC	-2412475,997	-4600711,919	3689538,417	-2412475,992	-4600711,787	3689538,593
P580	-2372609,840	-4618139,918	3695056,938	-2372609,660	-4618140,018	3695056,913
P595	-2386904,674	-4604247,818	3701367,054	-2386904,255	-4604248,245	3701366,878

En la Figura 4-21, se aprecian las diferencias de coordenadas, para cada estación. Donde la primera barra corresponde a los desplazamientos resultantes estimados por la estrategia desarrollada y la segunda es la calculada con las coordenadas publicadas en UNAVCO. Se observa una buena correspondencia entre ambas series. Los puntos P595, P580 y P463 (puntos localizados al este de la zona de falla) sufren un desplazamiento al sur y al este, disminuyendo con la distancia al epicentro. En los puntos CCCC y P575 que están al oeste de la zona de falla, se observa un desplazamiento al norte y al oeste.

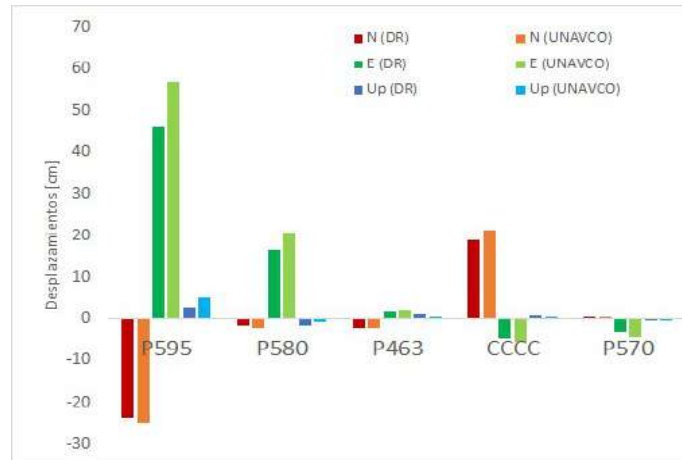


Figura 4-21: Validación DR con respecto a las series UNAVCO

De la validación con respecto a las coordenadas estimadas por el servicio UNAVCO, se obtuvo una diferencia promedio de -1,079 cm, acorde a lo obtenido en [Melgar et al, 2019].

Si bien la mayoría de los desplazamientos observados, tienen una magnitud decimétrica, dada la importancia del terremoto, en aquellas estaciones donde el desplazamiento es menor, debe tenerse en cuenta la precisión de la técnica de estimación de coordenadas PPP.

Para este caso de estudio, se calculó el desvío estándar (σ) de cada componente, y se estableció como medida de precisión 2σ . En la Tabla 4-4, se observan los valores encontrados, acordes con la precisión estimada de la técnica PPP, en el capítulo 3.

Tabla 4-4: Ruido en la estimación de desplazamientos sísmicos

[cm]	N	E	V
Ruido (2σ)	$\pm 0,442$	$\pm 0,366$	$\pm 0,862$

De esta forma, aquellos desplazamientos menores al ruido estimado, deben ser validados con otras técnicas para poder garantizar que se deben a la deformación producida por el sismo.

Cabe aclarar que ni en Argentina, ni en ningún país de América Latina, se dispone de un servicio de cálculo de coordenadas diarias para las estaciones GNSS, con lo cual, una estimación rápida de los desplazamientos co-sísmicos podría contribuir al conocimiento de la dinámica local, en caso de ocurrencia de sismos. Pudiendo brindar un aporte significativo mediante la cuantificación de los desplazamientos en las zonas de influencia, en pocos minutos, donde se encuentre operando una estación GNSS.

Se estima que se puede lograr el cálculo de desplazamientos con una latencia cercana a 2 minutos, siempre que se optimice el tiempo de procesamiento PPP necesario para conocer el movimiento instantáneo de cada coordenada. Se recomienda el monitoreo PPP en Tiempo Real (descrito en la capítulo 3) con el software BNC (BKG Ntrip Client).

Comparación con registros sismológicos:

Se realizó la búsqueda de estaciones sismológicas co-localizadas o en las cercanías de las estaciones GNSS. Utilizando el servicio Wilber 3 de IRIS se encontró la estación sismológica LRL ubicada a 10 km al sur de la estación GNSS CCCC. Se solicitaron sus registros sísmicos (velocidad y aceleración en las tres componentes N,E,Z) y se procedió a compararlos con los de GNSS.

Para que los desplazamientos obtenidos mediante la técnica GNSS puedan ser comparados con los registros de los instrumentos sísmicos, se siguió la misma metodología descrita para el sismo de Valparaíso. Cabe mencionar que se ha logrado automatizar esta tarea. Como contribución de esta tesis se desarrolló un programa que permite obtener los archivos en formato de entrada de SAC, a partir de los archivos de coordenadas (.pos) que se generan mediante la técnica PPP (servicio en línea CSRS). Dicho programa ha sido desarrollado para agilizar el cálculo de la variación de coordenadas, en sus componentes N, E y V, respecto a una coordenada de control para cada estación y el posterior cambio de formato (de ASCII a mseed y luego a SAC). Fue escrito en lenguaje de programación Python y se ejecuta de manera automática en un servidor LINUX.

De esta manera se obtuvieron los registros de las estaciones GNSS en formato SAC. En esta oportunidad el objetivo fue comparar los desplazamientos estimados por ambas técnicas (GNSS y sismología) de acuerdo a [Allen y Ziv, 2011]. Luego, para poder comparar los desplazamientos co-sísmicos, fue necesario quitar la respuesta instrumental de la estación sismológica LRL.

Las señales sismológicas, expresan la amplitud en una unidad adimensional llamada “cuentas” que no permiten observar el movimiento real del suelo. Una tarea muy importante es recuperar el desplazamiento del suelo a partir de la señal registrada, lo que se denomina corrección de la respuesta del instrumento [Havskov y Alguacil, 2004].

Esta operación se realizó con el software SAC con el comando “transfer” utilizando la siguiente sentencia [<http://ds.iris.edu/files/sac-manual/commands/transfer.html>]:

```
>transfer from polezero subtype PZfile to none FREQ 0.05 0.1 0.5 1
```

Donde PZfile corresponde al archivo de polos y ceros para cada componente, dichos archivos están disponibles junto con los registros sismológicos solicitados en IRIS.

Una vez quitada la respuesta instrumental de las tres componentes se procedió a integrar cada frente de onda, para obtener primero la velocidad y luego los desplazamientos registrados por la estación sismológica. Dicha operación también se realizó en SAC con el comando “integrate”.

En base a la experiencia del sistema de alertas tempranas de California (Elarm), se aplicaron filtros pasa-altas (high-pass) Butterworth de 0.075 Hz para remover los desvíos por frecuencias bajas después de la integración [Wu y Kanamori, 2008]. También se aplicó un filtro pasa-bajas de 3 Hz (low-pass), recomendado para el análisis de sismos de magnitud mayor a

4.5 [Allen y Kanamori, 2003]. Detalles sobre el filtrado de señales puede encontrarse en [Mallova, 2007].

A la señal GNSS se le aplicaron los mismos filtros, high-pass o pasa altas de 3 Hz y low-pass o pasa bajas de 0.075 Hz.

En la Figura 4-22 se observan los registros de la coordenada “este”, en ambas estaciones (sismológica y GNSS) en el momento del sismo. El primer registro corresponde a la aceleración de la estación LRL, habiendo quitado la respuesta instrumental (unidad m/s^2), luego se observa la velocidad (m/s) y la tercera señal corresponde al desplazamiento (m), habiendo realizado dos integraciones respectivamente. Finalmente, la última señal es el registro de la estación GNSS (desplazamiento “este”, en metros). Debido a que ambas estaciones no están co-localizadas (instaladas en el mismo sitio), se observa un desfase en la llega de las ondas sísmicas, sin embargo, se aprecia gran similitud en cuanto a amplitud, y comportamiento de las señales.

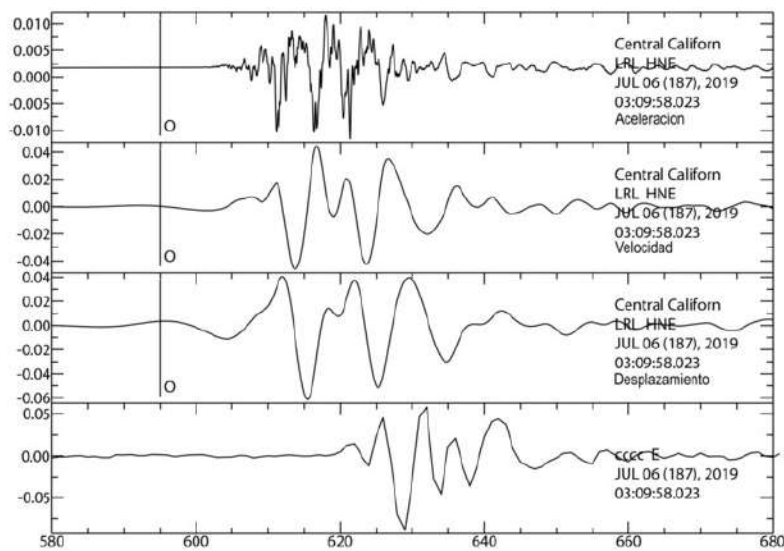


Figura 4-22: Comparación coordenada “este” entre la estación sismológica LRL y la estación GNSS, CCCC. Primeras tres señales: aceleración, velocidad y desplazamiento LRL, cuarta señal: desplazamiento GNSS.

Cabe aclarar que se ha trabajado con el registro de aceleración de la estación sismológica (HNN, HNE, HNZ), ya que los registros de velocidad del instrumento de banda ancha (BHN, BHE, BHZ) se encontraban saturados. Detalles sobre los canales, bandas y tipos de instrumentos sismológicos se pueden encontrar en el Apéndice A del manual SEED [http://www.fdsn.org/pdf/SEEDManual_V2.4.pdf].

Los resultados aquí encontrados permiten mencionar que el monitoreo PPP sobre estaciones GNSS podría contribuir con los sistemas de alertas tempranas (EWSs). Estos sistemas, generan una advertencia sobre un próximo movimiento de la corteza en pocos segundos, permitiendo la mitigación a corto plazo. Países como Japón, México y Taiwán poseen este tipo de alertas. Cuando la región donde ocurre el terremoto se encuentra a una cierta distancia de una ciudad poblada, los sismómetros pueden emitir una alerta electrónica antes de que los movimientos de la corteza lleguen. Por ejemplo, la ciudad de México está protegida

por un sistema de detección sísmológico en la costa a 300 km al sur-oeste de la ciudad, generando alertas unos 70 segundos antes [Allen y Kanamori, 2003].

El sistema ElarmS de California, estima la localización, tiempo y magnitud del sismo mediante la llegada de la onda P, antes de que ocurran los grandes movimientos (peak ground motion). Utiliza el período predominante (t_p) unos segundos después de la llegada de la onda P, para estimar la magnitud de los sismos. Este tiempo se determina por una fórmula, en función de la velocidad y el desplazamiento registrado por la componente vertical del instrumento de medición. Esos segundos o decenas de segundos desde que se emite el alerta hasta que llegan las ondas más destructivas, permiten la preservación personal e institucional. Las personas pueden resguardarse en lugares seguros, dejar sus puestos de trabajo cuando estos impliquen peligro, pueden detenerse trenes, aviones aterrizando, o autos desviarse de puentes, etc [Allen y Kanamori, 2003].

Existen numerables antecedentes de la utilización de redes GNSS para este fin [Hodgkinson et al., 2020; Floyd et al., 2020; Melgar et al., 2019; Leython et al., 2018; Xu et al., 2013; Allen et al., 2011; Crowel et al., 2009], con lo cual se plantea como tarea futura seguir en esta línea de investigación, estimando desplazamientos sísmicos desde las estaciones GNSS, con el objetivo de contribuir a los sistemas de alertas tempranas.

4.4 Contribución de la red RAMSAC (GNSS) a los estudios sísmológicos

En nuestro país, los registros GNSS están disponibles continuamente, mediante los servicios de la red RAMSAC, y a tiempo real mediante RAMSAC-NTRIP [<http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Principal>]. Para evaluar la capacidad de esta red para contribuir a la red sísmológica nacional, y en virtud de los resultados encontrados en la comparación de registros sísmicos y GNSS, se decidió analizar qué porcentaje de estaciones GNSS podrían registrar observaciones con una mayor frecuencia (al menos 5 Hz), tópicos que depende fundamentalmente del receptor GNSS.

De este análisis se obtuvo que más del 94 % del total de estaciones RAMSAC (118), podrían registrar sus observaciones con un intervalo de al menos 5 Hz.

En la Figura 4-23, se observa los intervalos de registro máximo que disponen las estaciones de la red y la cantidad total de estaciones en cada rango. En el **Anexo IX**, se observa el detalle de tipo de receptor que tiene cada estación de la red RAMSAC y la tasa máxima en que pueden registrar sus observaciones.

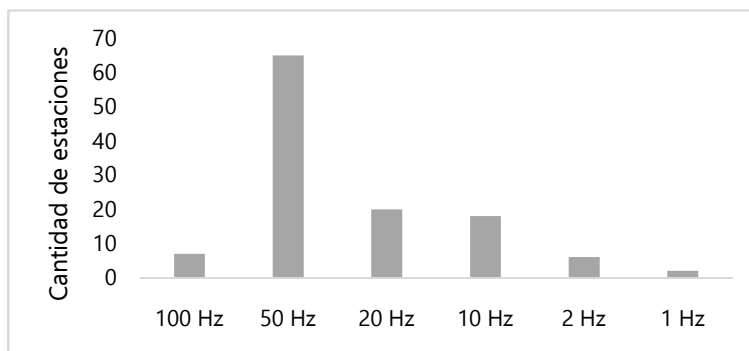


Figura 4-23: Intervalos de registro High-rate de las estaciones de la red RAMSAC

Si bien las estaciones tienen la capacidad de aumentar la frecuencia de registro, un factor a considerar es el volumen de información que se almacena. En el caso de elevar la frecuencia a 5 Hz, el espacio de almacenamiento debería quintuplicarse, es decir se tienen 5 observaciones por segundo, en vez de una sola, dificultando el espacio de almacenamiento de este volumen de información.

A pesar del tamaño de almacenamiento, varios países de Norteamérica y el Caribe, ya disponen de redes GNSS registrando a mayor frecuencia. En estos casos, los registros se almacenan en formato binario (que ocupa menos espacio) y se van auto-reemplazando al cabo de aproximadamente 7 días. La red COCONet (Figura 4-24), administrada por UNAVCO, dispone de una gran cantidad de estaciones en Centroamérica y el Caribe, y pone a disposición de los usuarios, todos los registros GNSS: con intervalos de registro para aplicaciones de geodesia y topografía (1 Hz) pero también con intervalos mayores (2,5 y 10 Hz).

En esta zona se dispone también de una amplia red de estaciones sismológicas disponibles en IRIS, con lo cual se ha trabajado sobre algunos eventos ocurridos en esta región y se planea seguir trabajando aquí por la buena cobertura y densificación de estaciones, pudiendo comparar ambos registros.



Figura 4-24: Red Coco-Net Caribe [<https://coconet.unavco.org/lib/images/coconet-map.png>]

En nuestro país el organismo encargado de la prevención y registro sísmico es el INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). La red sismológica nacional cuenta sólo con 9 sismógrafos de banda ancha, ninguno ubicado en la provincia de Mendoza, y 35 estaciones de período corto. Además, dispone en la actualidad, con 143 acelerómetros, distribuidos en todo el país [<http://contenidos.inpres.gob.ar/acelerografos/RNA>]. De esta forma el Instituto, utiliza ambas redes (de estaciones sismológicas y acelerómetros), y los datos registrados por estos instrumentos para la localización y estimación de magnitudes sísmicas, que son reportadas casi a tiempo real.

Sin embargo, los datos registrados por estas estaciones no están disponibles para su descarga, con lo cual no se pueden realizar estudios posteriores, implementar algoritmos de cálculo ni análisis de sismicidad local a partir de estas estaciones.

Con la metodología propuesta en este capítulo, se puede disponer de registros GNSS en formato sísmico, y contribuir a estudios de la tectónica local. La Figura 4-25, muestra cómo se complementarían ambas técnicas, aumentando notablemente la cantidad de estaciones de monitoreo.

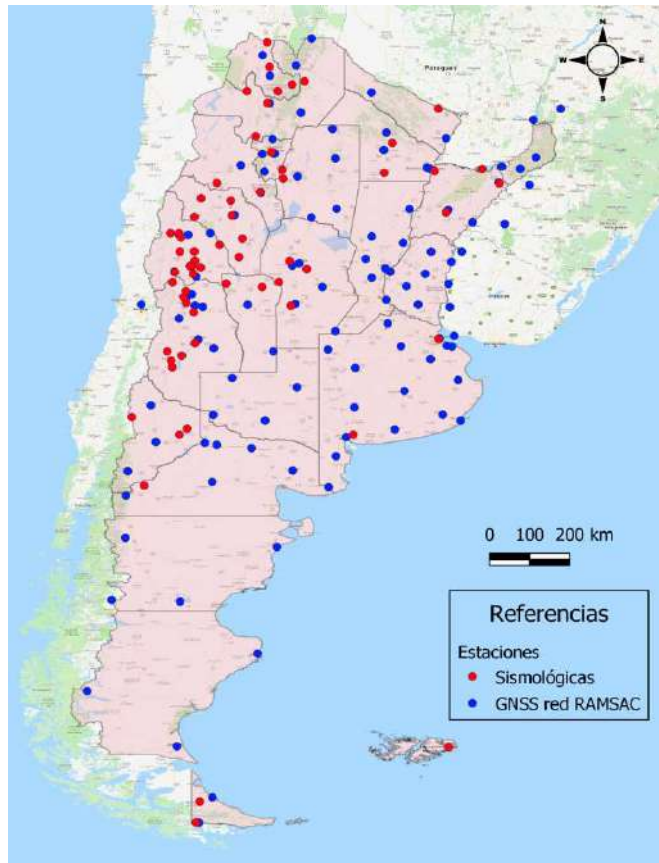


Figura 4-25: Distribución de estaciones sismológicas (rojo) y GNSS (azul) en Argentina.

4.5 Conclusiones

La técnica de posicionamiento puntual preciso (PPP) permite detectar deformaciones de la corteza producidas por eventos sísmicos de importante magnitud (mayores a 6). Los desplazamientos observados en las coordenadas se pueden estimar de forma casi inmediata, permitiendo registrar los movimientos co-sísmicos, y los desplazamientos permanentes, consistentes con las soluciones de pos-procesamiento. Sin embargo, resulta indispensable contar con una coordenada precisa y actualizada de las estaciones, para el cálculo de desplazamientos co-sísmicos.

En base a las experiencias realizadas y comparación con registros sismológicos, los resultados encontrados permiten mencionar que las estaciones GNSS podrían contribuir al estudio de eventos sísmicos, ya que registran el arribo y movimiento producido principalmente por las ondas superficiales.

En nuestro país, la actual red de estaciones GNSS RAMSAC puede contribuir a los estudios geodinámicos, y podría optimizarse ya que más del 94 % del total de estaciones, podrían registrar sus observaciones con un intervalo de al menos 5 Hz. Con la rutina desarrollada para convertir rápidamente los registros GNSS a formato sismológico, se observa que estas señales podrían ser utilizadas por la comunidad científica, y realizar un aporte significativo en los estudios sismológicos. Especialmente cuando los datos han sido

registrados con alta frecuencia, aportan información muy valiosa para el análisis de eventos sísmicos, e incluso contribuir con los sistemas de alertas tempranas (EWSs).

Se espera continuar en esta temática, y poder ofrecer un servicio de registros GNSS compatibles con los datos sísmicos (al menos en las estaciones de la región), para que puedan ser utilizados para el estudio de la tectónica activa de la provincia.

CAPITULO 5: APLICACIONES INNOVATIVAS DEL PPP EN EL ESTUDIO DE LA ATMOSFERA

5.1 Introducción

La Tierra es un sistema complejo en el que convergen gran cantidad de variables. Es conocido el rol fundamental que ocupa el agua en el desarrollo de la vida en nuestro planeta. En su estado gaseoso, el vapor de agua atmosférico, es objeto de constante estudio. Es el gas más abundante del efecto invernadero como principal regulador de la temperatura superficial del planeta. Los cambios de fase, la condensación y la evaporación, involucran a los intercambios de energía de calor latente, que afectan la estabilidad vertical de la atmósfera, la estructura, la evolución de sistemas de tormenta, y el balance energético del sistema climático mundial [Chahine, 1992].

Si bien mucho se conoce del vapor de agua y su incidencia sobre el planeta, la medición del mismo está limitada tanto espacial como temporalmente. Un mejor conocimiento de esta variable permitirá una mejor comprensión de los procesos atmosféricos, facilitando así también la previsión meteorológica. Sin embargo, la mayor dificultad que presenta la comprensión de la distribución de vapor de agua, se debe principalmente a su propia complejidad, tanto de movimiento como de transporte a lo largo de la atmósfera, resultando en una variable altamente cambiante en el tiempo y en el espacio. El conocimiento de esta variable requiere de una medición permanente y en lo posible a partir de una amplia red de observación que asegure su monitoreo espacial.

Tradicionalmente el vapor de agua integrado (IWV) de la atmosfera, se ha medido a partir de radiosondas lanzadas en lugares específicos a las 0 y 12 horas de tiempo universal (TU). Estas se han complementado a partir de las mediciones radiométricas sobre los mares y océanos con los radiómetros a bordo de satélites. Sin embargo, no es suficiente y resulta imprescindible implementar nuevas técnicas de monitoreo.

Frente a esta demanda surge la técnica, basada en la extracción del vapor de agua desde los retardos cenitales troposféricos (ZTD), sobre la señal GNSS [Davis, J.L. et al, 1985] como una alternativa muy potente por sus dos principales ventajas:

- Temporal: permite realizar mediciones continuas, las 24 horas del día, los 365 días del año, con intervalos de muestreo que pueden ir desde el segundo a los 60 o 120 minutos generalmente y
- Espacial: se dispone a nivel global, de una amplia red de estaciones de observación GNSS distribuidas en todo el planeta (principalmente sobre territorio continental).

Desde hace varios años se conoce la posibilidad de estimar el contenido de vapor de agua integrado desde las observaciones GPS (Global Position System) [Bevis et al. 1992]. Esta técnica geodésica puede ser utilizada como una importante herramienta de apoyo a otras ciencias orientadas a la investigación del clima. Las estimaciones actuales del retardo troposférico basado en GNSS (ZTD) permiten inferir valores de IWV con alta precisión, equivalente a la esperada a partir de técnicas de observación directa, como radiosondas y

radiómetros de microondas [Bonafoni et al., 2013; Van Baelen et al., 2005; Calori et al., 2016].

En Europa, la Red Permanente de EUREF (EPN) ha sido utilizada como una base de datos valiosa para el desarrollo de registros de datos climáticos, con los productos troposféricos GNSS [Bruyninx et al., 2019]. También se ha empleado como referencia en los re-análisis numéricos de predicción del clima y en simulaciones de modelos climáticos, y se utiliza para monitorear las tendencias y la variabilidad del IWV. Pacione et al. (2017) muestra el gran potencial que esta red GNSS del continente europeo, ofrece a los estudios atmosféricos. También Guerova et al. (2016), muestran las ventajas de la aplicación de productos troposféricos GNSS en la predicción y en el monitoreo del clima.

En América, se dispone de la red SIRGAS-CON (www.sirgas.org), red de estaciones GNSS continuas del proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) operativa como red de monitoreo geodésico, desde el año 2000 a la fecha. Cuenta actualmente con más de 420 estaciones GNSS continuas, distribuidas en los diferentes países de América Latina y el Caribe [Cioce et al., 2018]. La misma es utilizada con fines geodésicos y en lo que respecta a estudios atmosféricos está siendo utilizada para monitoreo ionosférico [<http://www.sirgas.org/es/iono-maps/>] y para análisis de la atmósfera neutra estimando los retardos cenitales troposféricos, conocidos como ZTD o ZPD [<http://www.sirgas.org/es/tropo-delays/>].

Estas estaciones son procesadas rutinariamente por los Centros de Análisis SIRGAS (AC), siguiendo las pautas y estándares establecidos por el Servicio Internacional de Rotación y Sistemas de Referencia de la Tierra (IERS) y el Servicio Internacional GNSS (IGS) [Sanchez et al., 2015 y Brunini et al., 2012]. Desde 2014, el procesamiento de datos GNSS incluye la estimación de los parámetros ZTD, por hora, basados en observaciones GPS y GLONASS [Camisay et al., 2020].

Existen varios antecedentes o estudios referidos al uso de estaciones GNSS para la estimación de IWV en América del Sur. Bianchi et al. (2016) presentan la estimación del IWV medio, basado en datos GNSS (IWV_{GNSS}) y sus tendencias durante 2007-2013, en más de cien estaciones SIRGAS-CON. Calori et al. (2015), propone una metodología de procesamiento, para determinar ZTD en la totalidad de estaciones SIRGAS, con intervalos de muestreo de 1 hora, aplicando técnicas de pos procesamiento, lo cual ha permitido alcanzar productos de gran precisión, con una latencia de entre 21 y 28 días posteriores a la fecha de la observación. Así mismo, para obtener los valores de IWV es necesario disponer de datos meteorológicos de presión y temperatura de cada sitio, que en la metodología propuesta por Calori et al. (2016) son extraídos del re-análisis europeo ERA Interim [Berrisford et al., 2011], cada 6 horas (00, 06, 12 y 18 hs UTC). Pudiendo obtener valores de presión y temperatura con una demora de aproximadamente 3 meses, con lo cual el cálculo del vapor puede estimarse con una demora de 90 días de producida la observación GNSS.

Evaluando el caso de Argentina, en Morichetti et al. (2018) se presentaron los primeros análisis del IWV, basados en la estimación ZTD de SIRGAS, en 11 estaciones

argentinas de la red RAMSAC, desde la mirada comparativa de distintas zonas climáticas. Dichos resultados muestran el gran potencial que ofrece esta técnica, ya que permitiría conocer y monitorear en forma indirecta a la variable atmosférica IWV, sin costos adicionales observacionales de instrumental.

Por otro lado, en Camisay et al. (2020), se muestra como la aparición de un aumento en los valores de IWV (anomalías positivas de IWV) precede a tormentas con abundante precipitación sobre el centro-oeste de Argentina (CWA). Este tipo de información proporciona una imagen más completa sobre los procesos atmosféricos involucrados en el desarrollo de procesos de convección, y cómo es posible aplicar este tipo de monitoreo en el desarrollo de planes de contingencia en la región.

Si bien las precisiones obtenidas en estos productos troposféricos de SIRGAS y sus correspondientes valores de IWV, cumplen el requerimiento para contribuir con los modelos numéricos de predicción del clima, la latencia en la disponibilidad de los mismos no es la requerida. Los productos ZTD de SIRGAS, surgen de un ajuste de las soluciones de los centros de procesamiento, con lo cual estas soluciones están disponibles entre los 21 y 28 días posteriores a la observación. Considerando el IWV, desde mediados de 2019, el centro de análisis de atmósfera neutra CIMA (Centro de ingeniería Mendoza Argentina), lugar donde se han desempeñado todas las experiencias de esta tesis, utiliza el recálculo ERA5 para la estimación de presión atmosférica y temperatura, el cual tiene un retraso de 5 días en la disponibilidad de los datos. Optimizando dos limitaciones que se tenían al utilizar su antecesor ERA Interim. En primer lugar, ERA5 dispone de los parámetros cada 1 hora, pudiendo aprovechar la totalidad de estimaciones de ZTD para el cálculo de IWV y por otro lado la reducción de la latencia a 5 días, frente a los dos meses que ofrecía ERA Interim.

Por todo lo antes mencionado es que se propone en este capítulo, una metodología para estimar valores de ZTD y su correspondiente IWV sobre las estaciones GNSS de la red SIRGAS-CON, aplicando la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso, con el menor retardo o latencia posible. El objetivo principal es entonces desarrollar una estrategia de cálculo del IWV desde observaciones GNSS que pueda ser utilizada en aplicaciones que requieran inmediatez temporal y predicción. Para validar la estimación ZTD e IWV con PPP, se han utilizado los productos troposféricos finales de SIRGAS [Mackern et al., 2020] y las mediciones de radiosondeos.

5.2 Cálculo de ZTD con diferentes herramientas PPP (tiempo real)

Para poder contribuir a los modelos numéricos de predicción del clima (NWP) existen estándares en cuanto a la precisión y latencia en la disponibilidad de los productos atmosféricos. Se establece un límite de 5 kg/m² para la precisión del vapor de agua integrado, que se logran considerando una tolerancia en la precisión del ZTD de 30 mm, utilizando el factor de conversión de Bevis et al. (1994) [Dousa and Vaclavovic, 2014]. Además, dichos productos deben tener una latencia máxima de 90 minutos para que puedan ser considerados a tiempo “cuasi-real” y aportar a los modelos de predicción

climática (nowcasting) [Guerova et al., 2016]. La precisión ideal en la estimación del IWW es de 1 kg/m² y debería actualizarse cada 5 minutos.

Con el objetivo de estimar el vapor de agua con dichos estándares, resulta indispensable calcular el retardo cenital troposférico lo más inmediato posible. Luego la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso es la adecuada para lograr ese objetivo, ya que permite estimar esta variable a tiempo real.

A continuación, se detallan 3 metodologías implementadas, como contribución de esta tesis, para la estimación del ZTD a partir de la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso. Se presenta el análisis de un caso de estudio piloto, desde el 21 de febrero al 27 de marzo de 2016, en 10 estaciones GNSS de la red SIRGAS-CON (Figura 5-1), y se comparan los valores obtenidos con los correspondientes estimados por SIRGAS en su solución de pos-procesamiento.

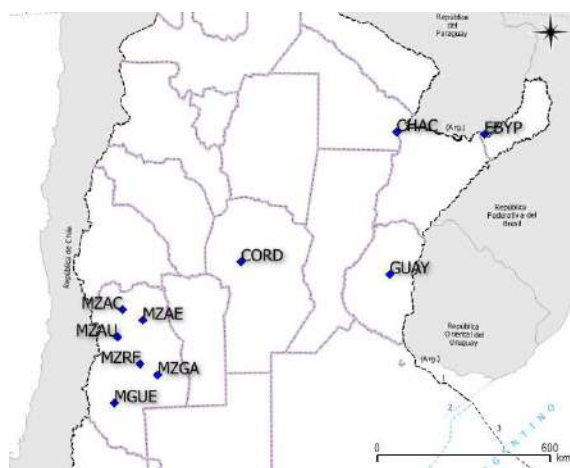


Figura 5-1: Estaciones GNSS utilizadas para el cálculo piloto de ZTD_{PPP}, febrero-marzo 2016

En la Tabla 5-1 se detalla sintéticamente la configuración de los tres métodos utilizados para el cálculo de ZTD mediante PPP, comparativamente a la metodología de cálculo empleada por SIRGAS en la estimación del ZTD por pos-procesamiento. Una descripción de cada uno de los modelos de cálculo se describe a continuación en los siguientes apartados 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3.

Tabla 5-1: Configuración métodos de cálculo de ZTD

	Pos-Procesamiento SIRGAS		Posicionamiento Puntual Preciso (PPP)		
Software	Bernese v5.2		BNC	CSRS	Bernese v5.2
Observaciones	GPS+GLONASS		GPS+GLONASS	GPS+GLONASS	GPS
Intervalo de muestreo	30 segundos		Streams RT	RINEX (1 s)	RINEX (1 s)
Angulo de elevación	3 grados		3 grados	10 grados	3 grados
Orbitas y ERP	Productos Finales IGS	igswwwD.sp3 igswww7.erp	Broadcast + IGS03 correction	Productos Finales IGS igswwwD.sp3	Productos Rápidos CODE
Corrección de Reloj	Productos Finales IGS	igswwwD.sp3	IGS03 stream correction	Finales IGS igswwwD.clk	Rapid (CODE) CODEwwwD.CLK

Modelo Troposférico A-priori y función de mapeo	Pre-procesamiento	GMF (Böhm et al., 2007) y VMF (Böhm et al., 2006)	GMF (Böhm et al., 2007)		
	Estimación De Parámetros	VMF + Gridded VMF1 coefficients (00, 06 12 and 18 UTC)	Saastamoinen (1973) $dT / \cos(z)$	Davis(GPT) Hopf(GPT) GMF	VMF + Gridded VMF1 coefficients (00, 06 12 and 18 UTC)
	Estimación de gradientes horizontales	CHENHER Model Chen and Herring (1997) (24 hours)	no	no	no
	Intervalo de estimación	1 o 2 hs	1 s	1 s	1 h

5.2.1 PPP con BNC

Como se mencionó en el capítulo 3, el software libre para cálculo PPP a tiempo real más utilizado por la comunidad científica es BNC (BKG Ntrip Client). Es una herramienta muy potente para el cálculo de la posición instantánea a partir de streams de datos transmitidos mediante el protocolo NTRIP, cuya precisión ha sido expuesta anteriormente, en el capítulo 3.

Para lograr la solución de coordenadas, el programa estima un retardo cenital troposférico total (ZTD) a partir de un modelo a priori, y luego de obtener la posición, calcula un valor correctivo a dicho modelo. Es posible analizar el valor de esta variable en el reporte final (archivo log) que genera el programa, y observar su comportamiento segundo a segundo.

Cabe aclarar que este programa utiliza el modelo a priori de retardo troposférico de Saastamoinen (1973) y estima el retardo troposférico a través de la siguiente fórmula:

$$T(z) = T_{apr}(z) + dT / \cos(z)$$

Donde $T_{apr}(z)$ es el retardo troposférico a-priori derivado de aplicar el modelo, z es el ángulo cenital de la dirección estación-satélite, y dT es la corrección diferencial al retardo troposférico a-priori estimada a partir de las observaciones GNSS, a la cual se le aplica la función de pesos, $1/\cos z$.

Por otra parte, se pueden especificar los sigmas a priori, para una determinada estación GNSS, con los siguientes parámetros:

Tropo Init: Sigma en metros para el modelo a-priori de la estimación. Valor recomendado 0,1 m.

Tropo White Noise: Sigma que indica la variación esperada del retardo troposférico. El valor $3e-6$ es el aconsejado ya que indica que suponiendo una observación a 1Hz, el efecto troposférico puede variar por $3600s * 3e-6 = 0,01$ metros por hora.

Para el caso de análisis, se calcularon los retardos cenitales totales (ZTD), cada una hora, con esta metodología, respetando la configuración de la Tabla 5-1, en las estaciones GNSS mencionadas (Fig. 5-1).

Una vez obtenidos los valores de ZTD, se procedió a compararlos con los correspondientes valores finales estimados por SIRGAS mediante pos-procesamiento, considerados grupo control. Para el caso de estudio analizado, se obtuvo un bias promedio de 11,8 cm y un rms de 12,50 cm. Los estimadores de precisión de cada estación se observan en la Tabla 5-2

Tabla 5-2: Comparación ZTD(SIR) - ZTD(PPP-BNC) [m]

ESTACION	BIAS	RMS	STD	MAX	MIN
CHAC	0,148	0,163	0,068	0,266	0,030
CORD	0,147	0,151	0,036	0,250	0,060
EBYP	0,146	0,160	0,067	0,286	-0,003
GUAY	0,090	0,106	0,056	0,249	-0,024
MGUE	0,097	0,099	0,021	0,146	0,055
MZAC	0,125	0,128	0,029	0,192	0,070
MZAE	0,122	0,126	0,033	0,201	0,058
MZAU	0,097	0,099	0,019	0,144	0,060
MZGA	0,098	0,104	0,035	0,181	0,033
MZSR	0,114	0,118	0,031	0,194	0,058

En la Figura 5-2 se pueden apreciar las series comparadas de ZTD, para cuatro de las 10 estaciones analizadas, para una semana de observación comprendida en el período de análisis. La estimación PPP no presenta grandes variaciones, es decir la estimación parece ser una constante, con algunas anomalías mínimas imperceptibles en los días analizados. Esta situación se observa en general en todas las estaciones estudiadas. Cabe aclarar que el programa BNC permite calcular el ZTD (y las coordenadas) máximo de 24 hs continuas, correspondientes a un mismo día calendario, y en el comienzo de cada día GPS nuevo, la estimación ZTD inicial coincide con el valor a priori, razón por la cual el cálculo se reinicia día a día.

A su vez, se observa que las series PPP presentan numerosos saltos o cortes, se procedió a analizar dichos instantes y el programa reporta que para esas épocas no logra calcular la posición de la estación por falta de datos. Si bien BNC fue diseñado para trabajar en tiempo real, esta experiencia se realizó utilizando el método PPP en modo post-proceso, que utiliza la misma rutina de cálculo solo que lo permite hacer offline. Para correr el programa en este modo, se necesita disponer de los archivos de observación de las estaciones GNSS (en formato estándar RINEX), las efemérides (transmitidas) y un archivo que contiene las correcciones a las órbitas y relojes. Para poder realizar este proceso offline dicho archivo debe ser previamente almacenado. Esta tarea se realizó

localmente en un servidor de la Facultad de Ingeniería, como contribución de esta tesis, como fue descrito en el Capítulo 3.

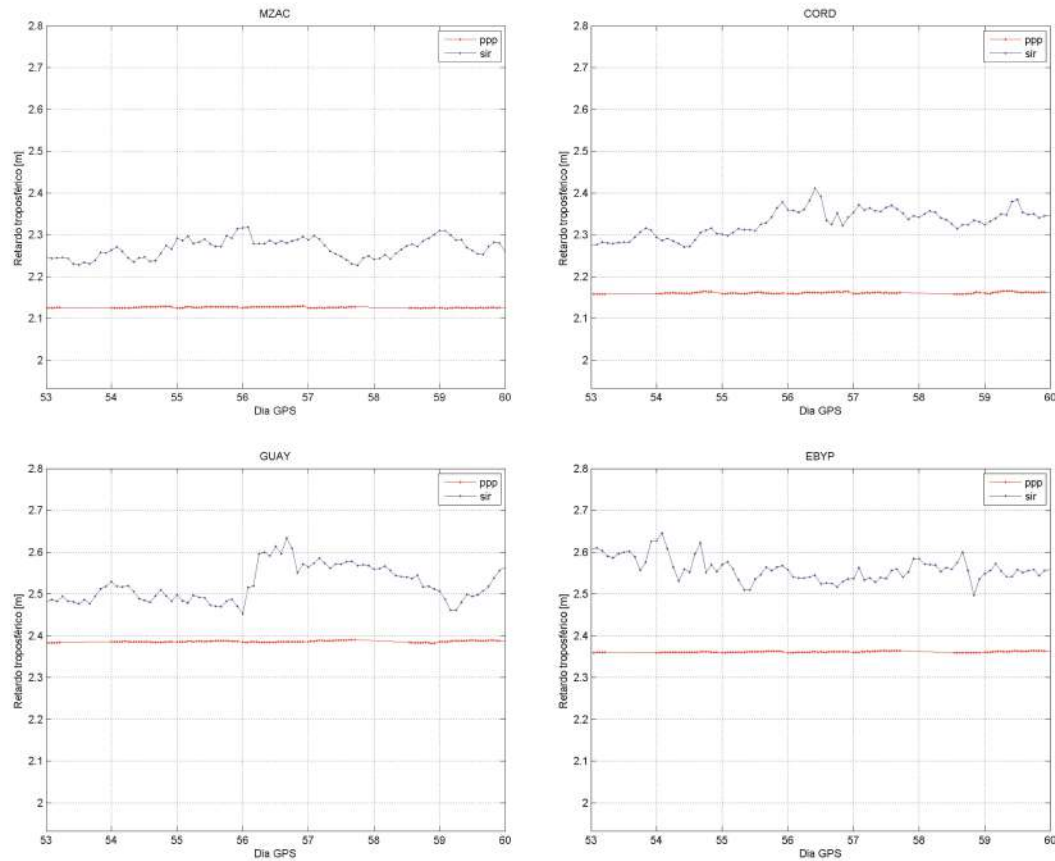


Figura 5-2: Estimación ZTD con BNC. Estaciones: MZAC (Mendoza Centro); CORD (Córdoba); GUAY (Villaguay, Entre Ríos); EBYP (Posadas, Misiones).

Por lo antes mencionado, el problema reportado como “falta de datos” puede deberse a algunos inconvenientes de resguardo de las correcciones a órbitas y relojes, por cortes de energía eléctrica del servidor o dificultades en la conectividad de la red de internet. En algunos casos las causas pueden ser faltantes en las observaciones provenientes de las estaciones GNSS o de las efemérides transmitidas, pero al trabajar con archivos RINEX, por lo general estos están completos, ya que se almacenan en el receptor y luego son puestos a disposición de los usuarios. Las mencionadas son las principales debilidades que presenta la técnica de posicionamiento PPP.

Los resultados mostrados tanto en la Tabla 5-2: Comparación ZTD(SIR) - ZTD(PPP-BNC) [m] Tabla 5-2 como en la Figura 5-2, no cumplen con los estándares mencionados, razón por la cual no se continuó trabajando con este programa. Se concluyó que las diferencias respecto a los valores estimados por SIRGAS, se deben fundamentalmente al modelo a priori troposférico, que como se dijo en BNC es el modelo de Saastamoinen y SIRGAS utiliza modelos más actuales y precisos (ver Tabla 5-1).

5.2.2 PPP a través del servicio canadiense en línea CSRS

Como otra alternativa disponible, se utilizó el servicio canadiense en línea CSRS-PPP [<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>], el cual permite calcular

posicionamiento preciso instante a instante a partir del envío desde la aplicación web, de archivos de observación RINEX. Este servicio estima las posiciones época a época, y calcula el retardo cenital troposférico para cada instante de estimación. Según el tiempo transcurrido entre la observación GNSS y el envío de los datos RINEX al servicio, se utilizan las mejores efemérides disponibles al momento del cálculo PPP. Para el caso de estudio, se utilizaron efemérides precisas, ya que la experiencia se realizó sobre observaciones previamente almacenadas (con más de 21 días de antigüedad).

Se replicó la experiencia, considerando las mismas estaciones y tiempo de medición que en el caso piloto reportado con BNC. Se enviaron archivos RINEX con 7 días de observación continua (para que el cálculo no se reinicie día a día) con un intervalo de registro cada 1 hora. Además, el servicio CSRS-PPP permite calcular observaciones fijas y cinemáticas, en este caso se eligió el modo cinemático para evaluar cómo cambia el ZTD instante a instante. Cabe aclarar que este servicio utiliza el Modelo Hidrostático de Davis, el Modelo de Hopfield, para la estimación del retardo húmedo y Global Mapping Function (GMF) como función de mapeo (Tabla 5-1)

Una vez obtenidos los valores ZTD, se procedió a compararlos con los correspondientes valores estimados por SIRGAS. Para el caso de estudio analizado se obtuvo un bias promedio de 5,699 cm y un rms de 6,649 cm. Los estimadores de precisión de cada estación se observan en la Figura 5-3

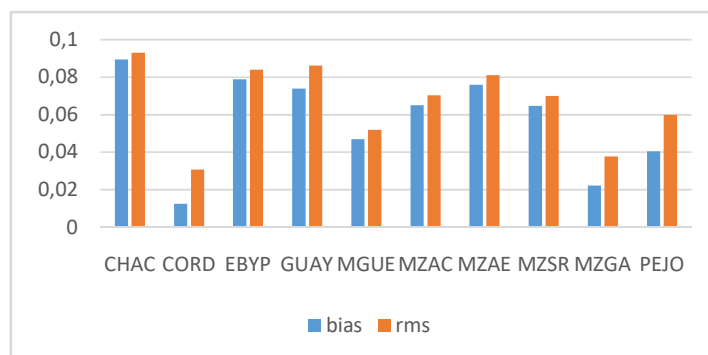


Figura 5-3: Diferencias ZTD (SIR) - ZTD (PPP-CSRS) [m]

Si bien mejoraron los estadísticos respecto al software BNC, la precisión encontrada no es acorde a los estándares descriptos y en las series de tiempo se vuelve a observar que la estimación ZTD no tiene grandes variaciones diarias, y parece ser una constante. En la Figura 5-4 se visualizan las series de cuatro de las 10 estaciones analizadas, para una semana de observación, en cuatro de las estaciones analizadas. La estimación en magnitud es semejante, pero no se aprecian las variaciones diarias.

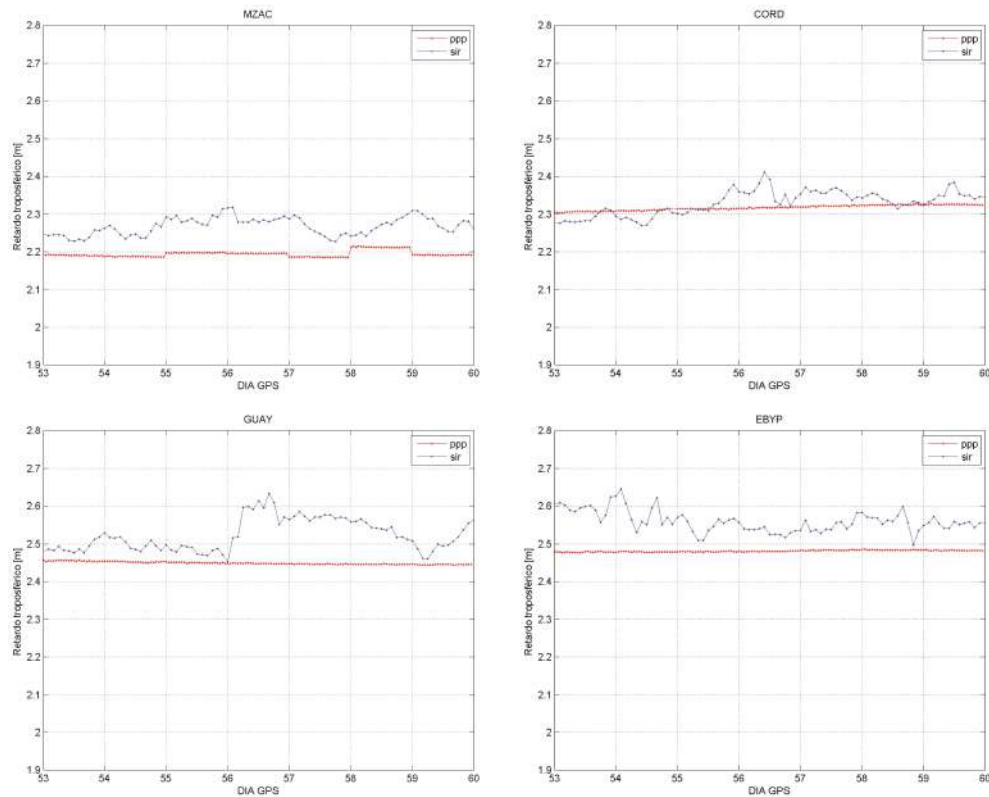


Figura 5-4: Estimación ZTD con servicio CSRS. Estaciones: MZAC (Mendoza Centro); CORD (Córdoba); GUAY (Villaguay, Entre Rios); EBYP(Posadas, Misiones).

Si bien las series de ZTD estimado con el servicio canadiense no muestran la variabilidad diaria que tiene la serie de SIRGAS, se observa una tendencia en la serie que acompaña el comportamiento de la variable.

Cabe aclarar que si bien este servicio se realiza con observaciones RINEX previamente almacenadas, se podría utilizar para aplicaciones de cuasi-tiempo real, enviando por ejemplo observaciones provenientes de los streams RT, que pueden guardarse en archivos horarios. Por ejemplo, se podrían almacenar las observaciones RT desde las 10 a las 11 horas, en un archivo RINEX, y realizar el envío al servicio, ya que la respuesta es casi instantánea, a los pocos minutos se podría disponer de la estimación ZTD producto de las observaciones antes mencionadas.

5.2.3 PPP con el software BERNESE

La tercera experiencia se realizó con el software científico Bernese 5.2 [Dach et al. 2015], que, si bien no posee herramientas para trabajar a tiempo real, permite realizar procesamiento PPP permitiendo algunas aplicaciones de cuasi-tiempo real.

En la Tabla 1 se observa la configuración principal del programa, pero se aclara que se realizaron algunas pruebas iniciales con distintos tipos de efemérides, priorizando la utilización de efemérides ultra-rápidas para obtener un producto a cuasi-tiempo real. Los resultados con efemérides ultra-rápidas no fueron óptimos, se cree que la falta de disponibilidad de correcciones de reloj (RINEX CLK) en la solución ultra-rápida, produce el ruido elevado y la falta de exactitud en el cálculo del ZTD.

Los mejores resultados fueron obtenidos con los productos rápidos de CODE (Centro de análisis de Orbitas de Europa, perteneciente a la Universidad de Berna - AIUB), razón por la cual las experiencias se realizaron con efemérides y relojes disponibles con 24 horas de demora (productos rápidos).

Para el caso de estudio se estimó entonces ZTD con intervalos de 1 hora, en las estaciones mencionadas y se compararon con los correspondientes valores estimados por SIRGAS. Se encontró un bias positivo de 4,995 cm (2 % del valor del ZTD promedio) y un rms de 5,494 cm

En la Figura 5-5 se observa para cuatro de las 10 estaciones analizadas, que la estimación de la variable ZTD con PPP utilizando Bernese, acompaña la variabilidad diaria, si consideramos la estimación de posproceso que realiza el centro cálculo de SIRGAS como control para su validación.

Con esta metodología se obtuvieron los mejores resultados. De allí que se seleccionó este software y metodología, para realizar una experiencia más completa, que será desarrollada en las secciones siguientes. Como contribución de esta tesis, se desarrolló una metodología para disminuir el bias positivo encontrado y un filtrado de valores anómalos del ZTD que permitió mejorar el rms aquí expresado.

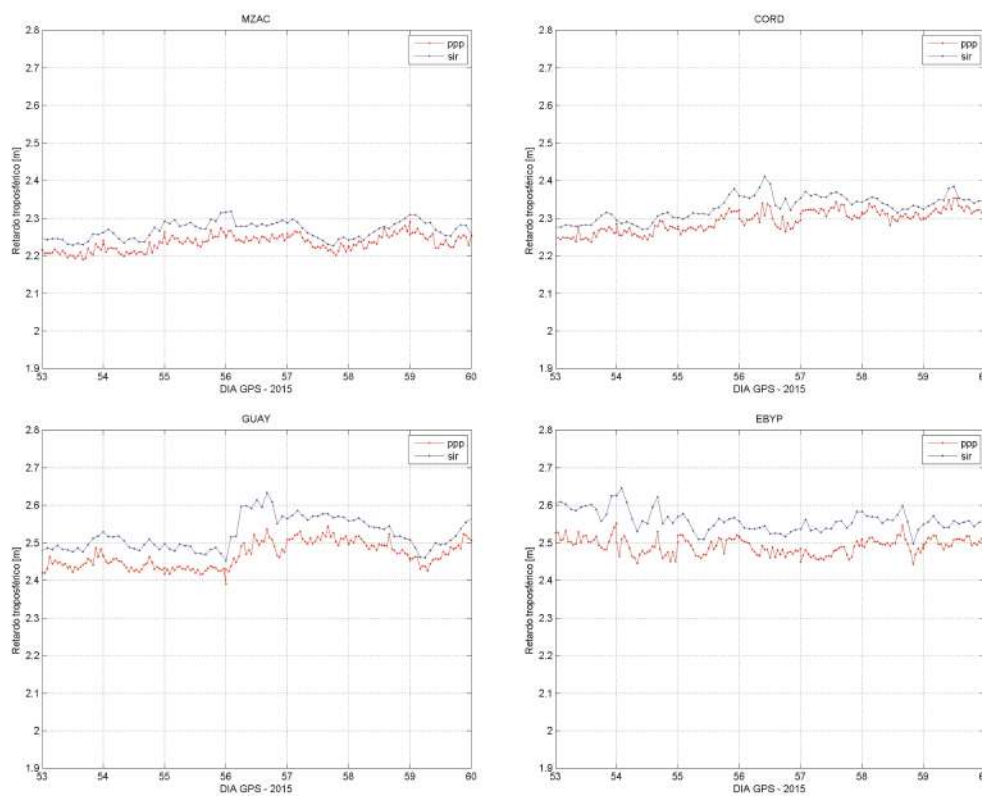


Figura 5-5: ZTD estimados por la técnica PPP con Bernese (rojo) y comparado con posprocesamiento de SIRGAS (azul). Estaciones: MZAC (Mendoza Centro); CORD (Córdoba); GUAY (Villaguay, Entre Rios); EBYP(Posadas, Misiones).

5.3 Estimación del retardo cenital troposférico (ZTD) en Argentina, mediante PPP con Bernese

Con el objetivo de analizar la precisión del método PPP para la estimación ZTD con el software Bernese 5.2 y su posible aplicación para la estimación del vapor de agua integrado, se realizó un procesamiento anual sobre todas las estaciones GNSS pertenecientes a la Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (RAMSAC) operativas para el año 2019 (Figura 5-6).

El procesamiento se organizó por campañas semanales, para un período de 365 días (enero a diciembre de 2019). Se descargaron los archivos RINEX de medición de todas las estaciones RAMSAC disponibles, resultando un promedio de 100 estaciones por semana.

Como se detalló en la Tabla 1, se utilizaron efemérides, parámetros de orientación terrestre y correcciones de reloj publicados como productos rápidos, por el centro de cálculo de órbitas CODE [<ftp.aiub.unibe.ch>].

Como modelo a priori troposférico en el pre-procesamiento se utiliza el GMF (Global Mapping Function), función de mapeo empírica que se basa en modelos numéricos del clima [Böhm et al., 2006]. La función de mapeo de Viena (VMF) se aplicó como modelo a priori para la componente seca del retardo ZTD y como función de mapeo para la estimación de los parámetros troposféricos [Böhm y Schuh, 2004]. Se utilizaron los coeficientes "GRID" correspondientes con intervalos de tiempo de seis horas, de acuerdo con las Directrices para los Centros de Análisis SIRGAS (AC) [http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Guias/2017_03_Guia_para_los_Centros_de_Analisis_SIRGAS_V2_2.pdf]. Cabe aclarar, que los GRID correctivos de VMF están disponibles también con 24 horas de retraso desde https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products/GRID/2.5x2/VMF1/VMF1_OP/.

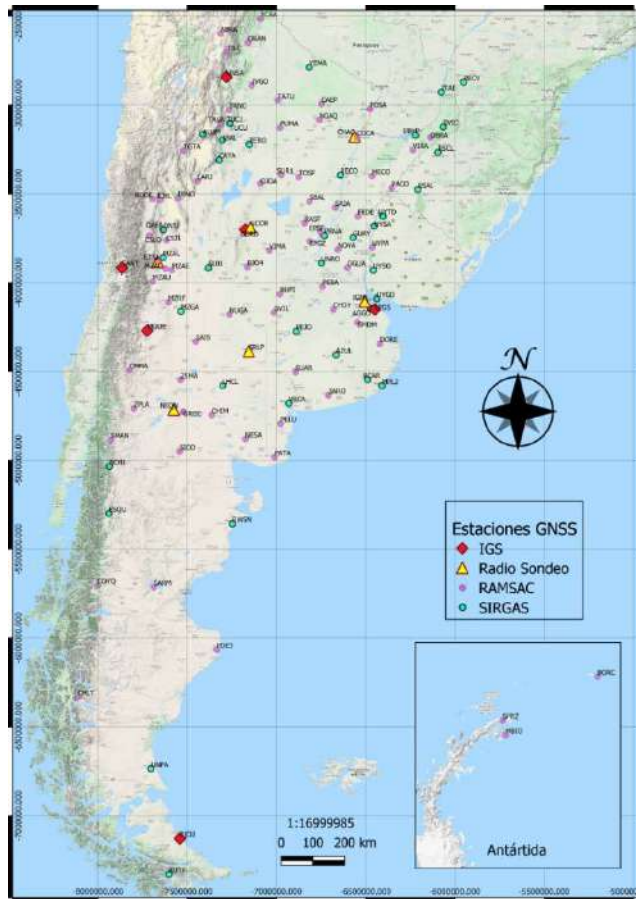


Figura 5-6: Estaciones GNSS utilizadas para el cálculo ZTD por PPP con Bernese, 2019.

Dichos valores fueron comparados con los correspondientes valores estimados por SIRGAS (para igual época de referencia), y se realizó un análisis estadístico que será ampliado en la siguiente sección. Para las 41 estaciones SIRGAS-RAMSAC, se obtuvo una correlación promedio para todas las estaciones de 0,911 (Figura 5-7).

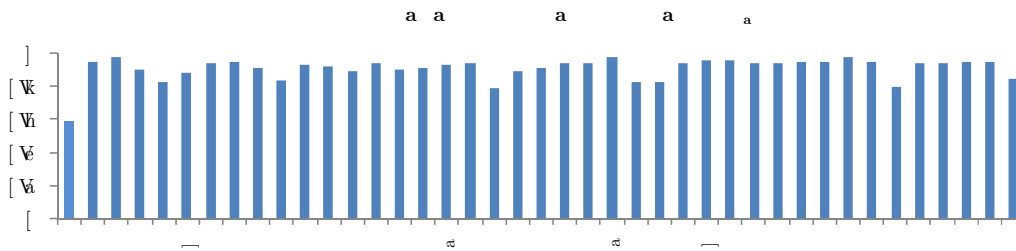


Figura 5-7: Coeficientes de correlación $ZTD_{SIR} - ZTD_{PPP}$

En la Figura 5-8 se observan las series temporales de ZTD, de cuatro estaciones GNSS de las 100 calculadas, y se comparan con la correspondiente serie de ZTD estimado por SIRGAS en su solución de pos-procesamiento, como control. Se puede apreciar la gran correlación en todas las series y la similitud que se observa en la variabilidad diaria y estacional con la solución PPP.

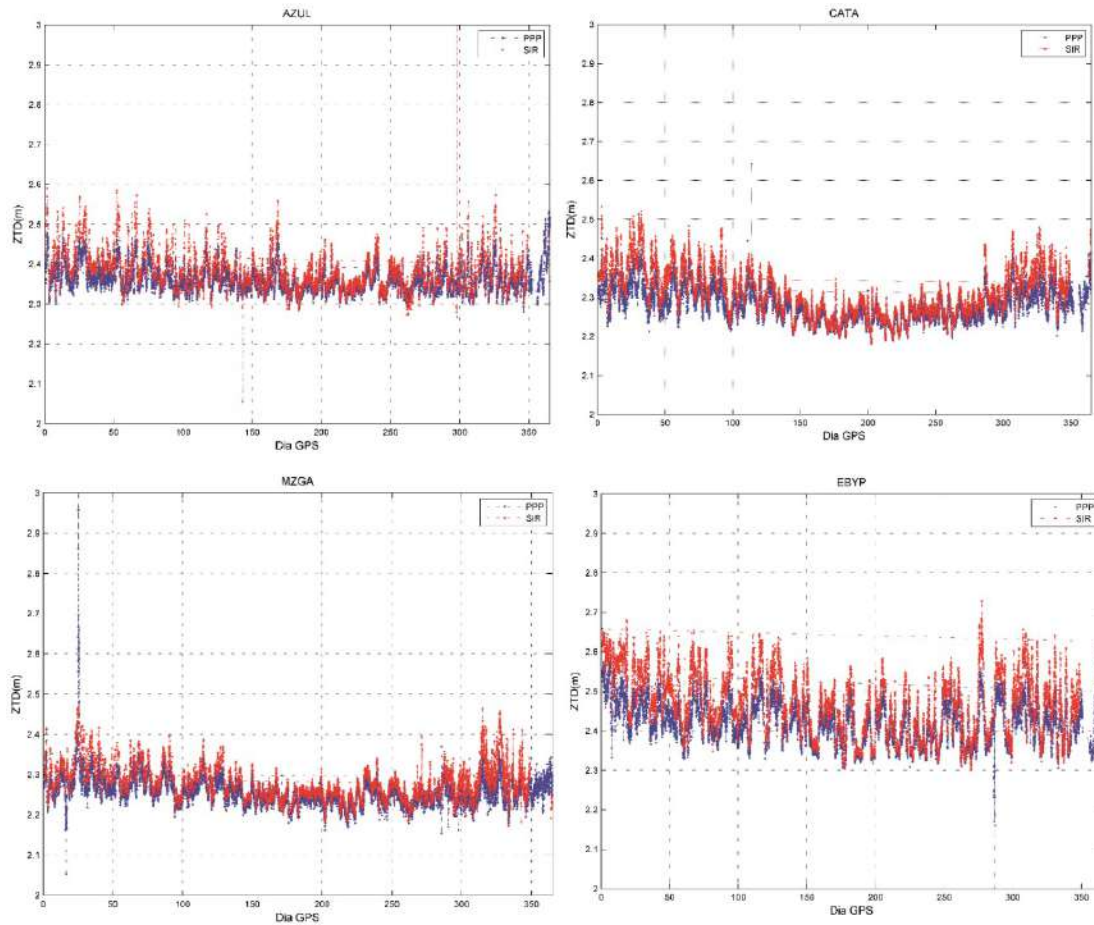


Figura 5-8: Serie anual (2019) ZTD estimado con Bernese PPP (azul) y por SIRGAS pos-proceso (rojo). Estaciones: AZUL (Buenos Aires); CATA (Catamarca); MZGA (Mendoza); EBYP (Posadas, Misiones).

5.3.1 Validación de ZTD estimados con PPP, con productos troposféricos de SIRGAS

Para validar los valores de ZTD obtenidos con la técnica de PPP, se utilizaron las estimaciones ZTD de la red SIRGAS, que surgen del procesamiento riguroso de los centros de procesamiento y del posterior ajuste por el centro de análisis de atmósfera neutra CIMA [<http://www.sirgas.org/es/tropo-delays/>]. Los centros de procesamiento estiman, junto con las coordenadas, los valores ZTD cada una hora para la sub-red que les toca procesar. Luego cada estación GNSS posee entre dos y cuatro estimaciones de ZTD para cada registro horario. Por ello, CIMA, aplica una metodología de ajuste, y calcula 24 valores diarios, para cada una de las estaciones de la red (alrededor de 420 estaciones).

Cabe mencionar que la estimación del ZTD proveniente del cálculo riguroso de SIRGAS, ha sido validada con otras técnicas obteniendo excelentes resultados. Con respecto a valores estimados por IGS (en 15 estaciones analizadas), se observa un rms de 6,8 mm y un bias negativo de 1,5 mm. Luego, con respecto a la estimación de ZTD proveniente de

radiosondeos, se ha obtenido un rms de 7,5 mm y un bias negativo de 2 mm [Mackern et. al, 2020].

Por lo antes mencionado, los valores ZTD ajustados de SIRGAS, fueron utilizados para validar los obtenidos por PPP en esta experiencia. La comparación se realizó en 41 estaciones, que son estaciones RAMSAC pertenecientes a la red SIRGAS, lo que representa el 47% de las estaciones argentinas para las cuales se estimó el ZTD con PPP (Figura 5-6).

Se calcularon entonces las diferencias $ZTD_{SIR} - ZTD_{PPP}$, en cada sitio, para los 365 días del 2019. Se calcularon, por cada estación, los estimadores de precisión para todo el período. Entre las 41 estaciones se obtuvo un bias promedio de 2,421 cm y un rms promedio de 3,423 cm. Si bien dichos valores fueron alentadores respecto a las precisiones obtenidas con otros software (ver experiencias con BNC y CSRS en la sección anterior), se decidió aplicar un esquema de reducción de bias mensual como se aplica en Dousa y Vaclavovic (2014).

Para ello, se calculó el bias promedio de cada mes analizado, es decir el promedio de las diferencias $ZTD_{SIR} - ZTD_{PPP}$ mes a mes. Luego se calcularon las nuevas diferencias ($ZTD_{SIR} - ZTD_{PPP}$), pero sumando previamente a cada valor individual de ZTD_{PPP} el bias del mes anterior. De esta manera se mejoró ampliamente la precisión, obteniendo un nuevo bias promedio de 2,27 mm y un nuevo rms promedio menor a 28 mm. En la Figura 5-9 se observan los estadísticos obtenidos por cada estación.

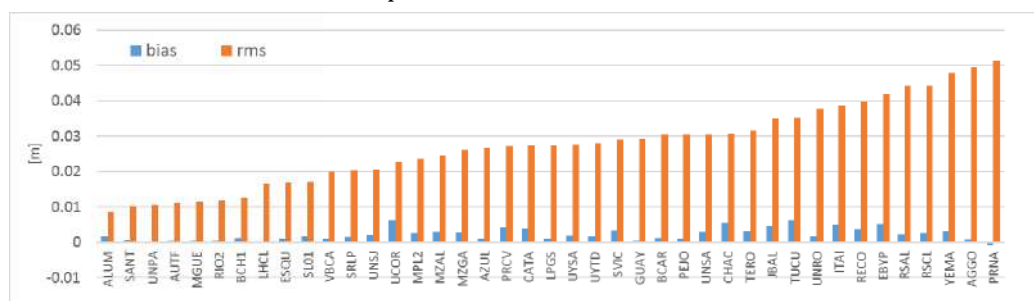


Figura 5-9: Comparación ZTD_{SIR} VS ZTD_{PPP} , aplicada la reducción de bias [m]

5.3.2 Validación ZTD-PPP en estaciones IGS

Desde el 2003, el Servicio Internacional GNSS (IGS) estima valores de ZTD para sus estaciones GNSS, empleando la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso. Debido a que en el cálculo se utilizan productos de órbitas y relojes finales, la estimación de ZTD está disponible con un retraso de aproximadamente 21 días. Este procesamiento produce un archivo por sitio por día que contiene una serie temporal de ZTD con resolución temporal de 5 minutos y una precisión formal de pocos milímetros [Buyn y Bar-Sever 2009]. A continuación, se detallan las principales características de este procesamiento según el reporte anual IGS 2019 [Villiger, A. y Dach, R., 2020] :

- Software: Bernese 5.2 — Posicionamiento Puntual Preciso.
- Función de mapeo: GMF [Böhm et al. 2006]
- Orbitas / Relojes / EOP: Solución final IGS (21 días de retraso)
- Resolución temporal de estimaciones de ZTD: 5 min (gradientes troposféricos estimados)

Debido a la buena precisión de estos productos, se utilizaron para validar los valores ZTD calculados por PPP. El análisis se realizó en las 6 estaciones IGS de Argentina (RIO2, MGUE, SANT, LPGS, CORD, UNSA). De aquí se vuelve a remarcar la importancia de calcular estos valores localmente, que además de disponerlos con menor latencia, permitirían densificar ampliamente la red de monitoreo atmosférico en nuestra región (100 estaciones de RAMSAC versus 6 estaciones IGS, en Argentina).

Se calcularon las diferencias ZTD para épocas comunes durante todo el año 2019, obteniendo un bias promedio de 1,903 cm y un RMS de 2,568 cm, en la Figura 5-10 se observan los valores estadísticos obtenidos en cada estación.

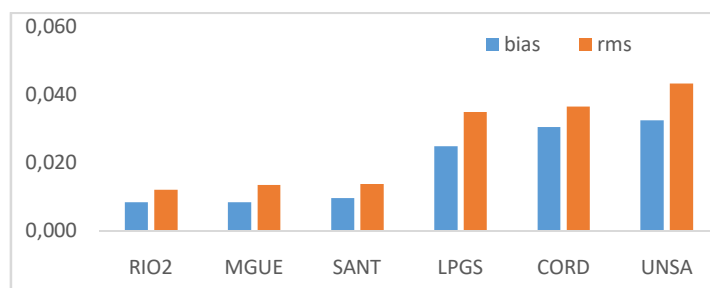


Figura 5-10: Valores estadísticos comparación ZTD-PPP vs ZTD-IGS [m]

De igual manera que con la validación con el retardo estimado por SIRGAS, se aplicó la metodología propuesta por Dousa y Vaclavovic (2014) para eliminar el bias mensual y mejoraron significativamente los resultados. En la Tabla 5-3 se observan los valores encontrados para cada estación. Se obtuvo un bias promedio de 3,5mm y un RMS promedio de 20mm.

Tabla 5-3: Estadísticos validación ZTD_{PPP} con respecto a ZTD_{IGS} [m], luego de la reducción del bias mensual

Station	bias	rms	std	max	min
CORD	0,0145	0,0297	0,0259	0,0929	-0,0512
LPGS	0,0019	0,0276	0,0275	0,3486	-0,159
MGUE	0,0009	0,0116	0,0116	0,0910	-0,0472
RIO2	0,0011	0,0106	0,0106	0,0732	-0,077
SANT	0,0009	0,0108	0,0108	0,0456	-0,0464
UNAS	0,0017	0,0301	0,0300	0,3644	-0,4695

5.3.3 Validación ZTD-PPP en estaciones de radio-sondeos

Otra variable que se utilizó para validar los valores de ZTD estimados con PPP, fue el retardo troposférico calculado desde el vapor de agua registrado por radiosondeos [Mackern et al, 2020]. Como se ha mencionado, estas sondas permiten estudiar diversos fenómenos atmosféricos, entre ellos el contenido de vapor de agua (agua precipitable). Sin embargo, las observaciones de radiosondas tienen un alto costo, lo que las hace poco ventajosas para proporcionar información tanto de alta resolución espacial como temporal. Por lo general, se realiza una observación diaria a las 12 UTC, ocasionalmente según el presupuesto disponible y la situación meteorológica, se realiza una medición adicional de la radiosonda a las 00 UTC. En nuestro país, solo se cuenta con datos en 6

sitios de radiosondeo, ubicados en los aeropuertos de Ezeiza (Buenos Aires), de Córdoba, de Mendoza, de Resistencia (Chaco), de Santa Rosa (La Pampa) y de Neuquén (recientemente puesto en funciones).

Los valores de vapor de agua integrado extraídos de los perfiles de radiosonda (IWV_{RS}), descargados desde Wyoming Weather Web - University of Wyoming [<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>] fueron utilizados para calcular los valores de retardo cenital húmedo (ZWD_{RS}) empleando las fórmulas de Askne y Nordius (1986), con las constantes físicas para la refractividad atmosférica de Rüeger (2002) (Ec. 1).

$$ZWD = \frac{(22,9744 - 375463/T_m)0,4614991785}{10^5} IWV \quad (1)$$

$$T_m = \frac{\int_H^\infty e/T dz}{\int_H^\infty e/T^2 dz} \quad (2)$$

$$ZHD = 0,002276738 \frac{P_{GNSS}}{1 - 0,00266 \cos(2\phi) - 0,28 \cdot 10^{-6} h_{GNSS}} \quad (3)$$

La temperatura media de la atmósfera (T_m) se integró a partir de los datos de los perfiles de radiosondas (temperatura y punto de rocío) (Ec. 2). Luego, los valores de retardo cenital seco ZHD_{RS} se obtuvieron de acuerdo con Davis (1985) (Eq.3), donde la presión se interpola a la altura de la estación GNSS (P_{GNSS}) de la presión proveniente de los perfiles de radiosonda.

De esta manera se obtuvieron valores de ZTD_{RS} , para todo el año 2019, en los 6 sitios donde existen radiosondas. Vale la pena recalcar que existen alrededor de 60 radiosondas en todo Latinoamérica y que estas solo generan uno o dos registros diarios en cada sitio (00 y 12 h UTC). Comparando esta cantidad, con la red SIRGAS-CON (con más de 420 estaciones), con ZTD estimado cada 1 hora, nuevamente destaca la significativa contribución de estimar esta variable mediante GNSS en el total de estaciones GNSS de la región.

Los valores ZTD_{RS} fueron comparados con los estimados por PPP en las estaciones GNSS más cercanas a la localización de las radiosondas. De la comparación anual (2019) se observó un bias promedio de 2,53 cm y un rms de 7,6 cm. Al igual que en las dos validaciones anteriores (respecto al ZTD estimado por SIRGAS y por IGS) se aplicó la reducción de bias mensual, reduciendo el bias promedio a 0,765 cm y el rms a 2,75 cm. La Tabla 5-4 muestra los estadísticos para cada sitio.

Tabla 5-4: Estadísticos comparación ZTD-PPP vs Radiosondeos [m], luego de la reducción del bias mensual

Station	bias	rms	std	max	min
CHAC	0,0133	0,0373	0,0349	0,1517	-0,0587
IGM1	0,0063	0,0284	0,0277	0,1401	-0,0809
MZAC	0,0044	0,0225	0,0221	0,0897	-0,0997
NEQN	0,0037	0,0226	0,0223	0,0926	-0,0981
SRLP	0,0069	0,0236	0,0226	0,107	-0,0412
UCOR	0,0113	0,0309	0,0288	0,1437	-0,0695

5.4 Valores atmosféricos (presión y temperatura) para el cálculo de IWV a tiempo real

Estimado el ZTD, mediante PPP, es necesario contar con valores de temperatura y presión atmosférica en el sitio donde está situada la estación GNSS, para el posterior cálculo del vapor de agua integrado troposférico (IWV). Debido a que el objetivo fue obtener IWV lo más pronto posible, fue necesario disponer de dichos valores atmosféricos a tiempo real.

Para ello se utilizaron los datos que provee el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN), sobre sus estaciones meteorológicas ubicadas en nuestro país. Se utilizó el servicio web que se ofrece en su sitio de internet [<https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos>], llamado “Estado del Tiempo Presente”. En este sitio se reporta el registro actual de todas las estaciones meteorológicas del país, y este se actualiza cada una hora. Sin embargo, este registro es reemplazado por el de la hora sucesiva sin quedar almacenados los registros anteriores. Por esta razón, se realizó un script en el entorno UNIX para que lea automáticamente los valores horarios (con una tarea programada en cada hora del día) y se almacenen en un archivo de texto, recopilando los datos diarios en un único archivo. De esta manera, se dispone en un servidor local, archivos diarios, con los registros horarios de todas las estaciones meteorológicas operativas de Argentina, desde agosto de 2018 a la fecha.

Si bien el SMN, dispone entre sus datos abiertos, el registro horario de cada estación, este se publica al día siguiente y presenta un formato diferente al de tiempo presente. Ocurre que en dicho cambio de formato, para todas aquellas estaciones que tienen una altura mayor a los 800 m.s.n.m., se pierde la información de la presión atmosférica a la altura de la estación meteorológica y en cambio se publica la altura geopotencial de 800 hPa o 1500 hPa según el caso, lo cual llevó a optar por la descarga de los registros de Tiempo Presente.

Una vez disponibles los datos, se realizó un análisis espacial de cercanía de las estaciones meteorológicas respecto a las GNSS, para vincularlas, estableciendo un radio inicial de 15 km y luego uno de 50 km (Figura 5-11) . Su utilizó la herramienta QGis para hacer la elección de estación meteorológica según el radio de cercanía. De esta manera se generó un vínculo entre la estación meteorológica a utilizar para aportar las variables de presión atmosférica y temperatura en el cálculo del IWV, sobre la base del ZTD estimado en cada estación GNSS.

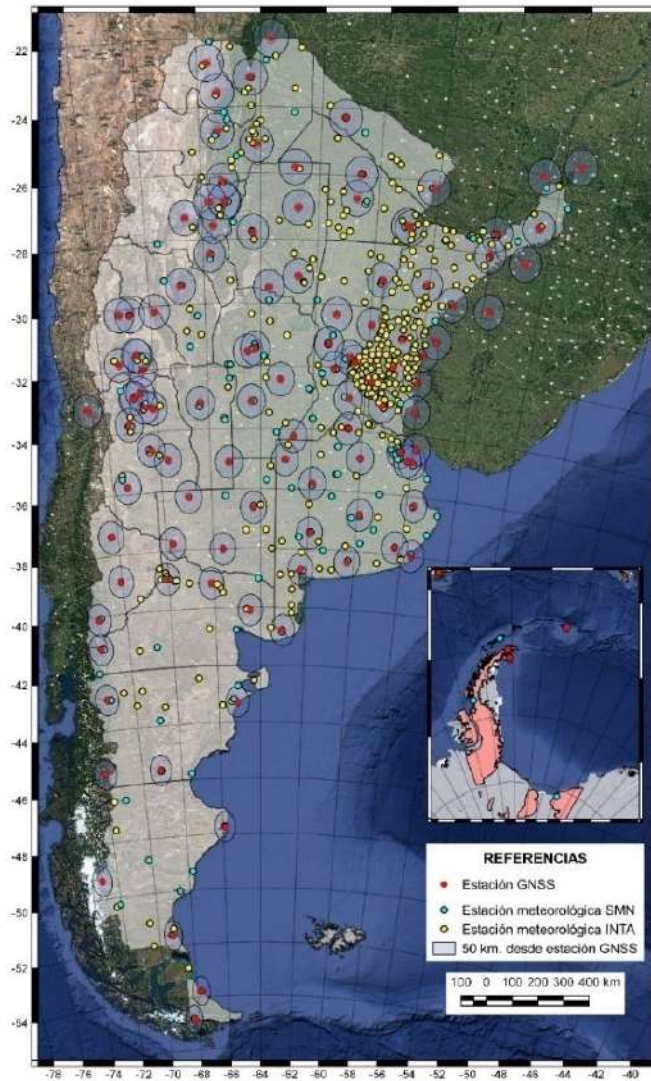


Figura 5-11: Localización de estaciones GNSS y meteorológicas por radio de cercanía.

5.5 Cálculo de IWV desde ZTD_{PPP}

Una vez calculado el retardo cenital troposférico y contando con valores de temperatura y presión atmosférica en el sitio de observación, es posible estimar el contenido de vapor de agua integrado (IWV) de la columna de aire sobre la estación GNSS. De esta manera, es posible conocer el vapor de agua con un nivel de precisión equivalente a lo esperado de las técnicas de observación directa, como las radiosondas y radiómetros de microondas [Bonafoni et al., 2013; Van Baelen et al., 2005; Calori et al., 2016].

Tomando como referencia la experiencia realizada para el cálculo IWV sobre estaciones SIRGAS-CON, a partir de la estimación de ZTD por pos-procesamiento, descrita en Camisay et al. 2020, se adaptó la metodología para poder calcular el vapor desde el ZTD estimado con PPP y utilizando los datos meteorológicos de tiempo presente (descritos en el apartado anterior), para esta experiencia.

Primero, se calculó la refracción troposférica causada por la componente hidrostática del aire, el retardo hidrostático cenital (ZHD), según Davis et al. (1985), Ec. 3. Para ello se considera el aire como un gas ideal suponiendo un equilibrio hidrostático y se calculó el ZHD en función de la presión atmosférica (P). En este caso, es necesaria la presión (en hPa) en el sitio de la estación GNSS (P_{GNSS}). La P medida en la estación meteorológica (P_{Met}) se corrigió por la diferencia de altura entre la estación Met (h_{Met}) y la estación GNSS (h_{GNSS}). Se aplicó una adaptación del modelo de presión estándar de Berg (1948), Ec. 4:

$$P_{GNSS} = P_{Met} (1 - 0,0000226 \cdot (h_{GNSS} - h_{Met}))^{5,225} \quad (4)$$

Luego, es posible obtener la componente húmeda del retardo troposférico, el retardo húmedo cenital (ZWD), restando el ZHD al ZTD. Finalmente, el vínculo entre ZWD y IWV viene dado por la cantidad adimensional de proporcionalidad (Π), de Askne y Nordius (1987), Ec. 5:

$$\Pi = 10^5 / \left(K_2' + \frac{K_3}{T_m} \right) R_w \quad (5)$$

Donde $K_2' = K_2 - m \cdot K_1$.

La constante m es la relación de las masas molares de vapor de agua y aire seco (M_w / M_d), y las constantes físicas K_1 , K_2 y K_3 provienen de la fórmula ampliamente utilizada para la refractividad atmosférica. Se utilizaron los coeficientes de Rüeger (2002), descritos en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5: Constantes de refractividad atmosférica utilizadas: Rüeger (2002) "Best average"

K_1 [K/mbar]	K_2 [K/mbar]	K_3 [K ² /mbar]	K_2'
77.689	71,2952 K/mbar	3,75463 10 ⁵	22,9744 K/mbar

R_w es la relación de la constante molar del gas y las masas molares del vapor de agua, igual a 0,461499.

La variable $1 / T_m$, es la inversa de la temperatura media en la columna atmosférica sobre los sitios GNSS, Ec. 6, que en este caso se consideran coincidentes con los sitios Met (T_{Met}). Se analizaron tres modelos basados en la relación entre T_m y la temperatura de la superficie (T_s) para la región: UNB98Tm1 [Mendes, 1999], BTm [Bevis et al. 1992] y dos casos (para rangos de latitud 15 ° S a 30 ° S y 30 ° S a 45 ° S) de GTm [Yao et al. 2014]. Los coeficientes utilizados en cada modelo se detallan en la Tabla 5-6.

$$T_m = a + b T_s \quad (6)$$

donde T_s (en Kelvin) es la temperatura de la superficie en el sitio GNSS.

Tabla 5-6: Coeficientes a y b de la ecuación 4 del modelo T_m comparado

Modelo T_m		a	b
UNB98Tm1	[Mendes 1999]	50,4	0,789
BTm	[Bevis et al. 1992]	70,2	0,72
GTm (latitud 15 °S-30 °S)	[Yao et al. 2014]	76,5865	0,7045
GTm (latitud 30 °S-45 °S)	[Yao et al. 2014]	-15,9259	1,0224

Para determinar el modelo correcto de T_m , se realizó una comparación con los valores de T_m extraídos de radiosondas. Dos estaciones de radiosondeos se utilizaron como sitios de prueba (2920 perfiles de radiosonda). La comparación se realizó durante dos años

(2017-2018), período en el que ambas estaciones de radiosondas tuvieron 2 lanzamientos diarios (00 h y 12 h). A partir de la estimación de bias y rms, se seleccionó el modelo UNB98Tm1 de Mendes (1999) para calcular la Tm.

Finalmente, el IWV se obtiene siguiendo la relación expresada en la ecuación 7, en la cual ZWD se da en unidades de longitud (m) y IWV se da en kg / m².

$$IWV = \Pi * ZWD \quad (7)$$

Siguiendo la metodología aquí descrita se procedió entonces a calcular el IWV_{PPP} a partir de las estimaciones ZTD_{PPP} comentadas en los apartados anteriores, para todo el año 2019, en las estaciones argentinas, de las que se pudo disponer de datos meteorológicos.

La Figura 5-12 muestra la serie temporal de IWV_{PPP} para 2 estaciones analizadas, donde se observa la correspondencia entre los valores estimados por PPP (azul) y la correspondiente serie temporal del vapor proveniente del cálculo ajustado de SIRGAS (rojo).

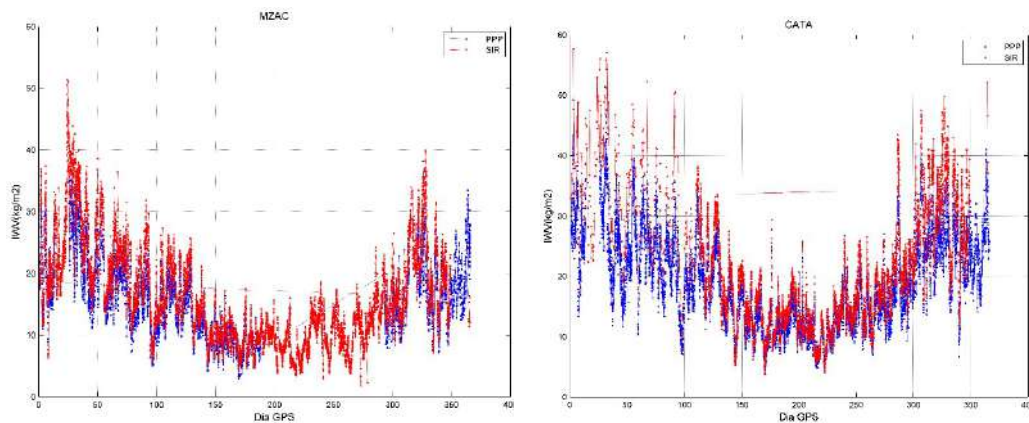


Figura 5-12: Serie anual (2019) IWV estimado con Bernese PPP (azul) y por SIRGAS pos-proceso (rojo)

Todos los cálculos para obtener el IWV han sido optimizados en una rutina desarrollada en Python, que se ejecuta de manera automatizada en un servidor Linux. Además de los valores calculados, la rutina genera series temporales y mapas de IWV diarios. En la Figura 5-14 se observan dos mapas característicos, uno de época cálida (principios de otoño) y otro de época fría (en invierno). En ambos mapas se observa la relación del contenido de vapor de agua con la temperatura y clima, sobre cada estación.

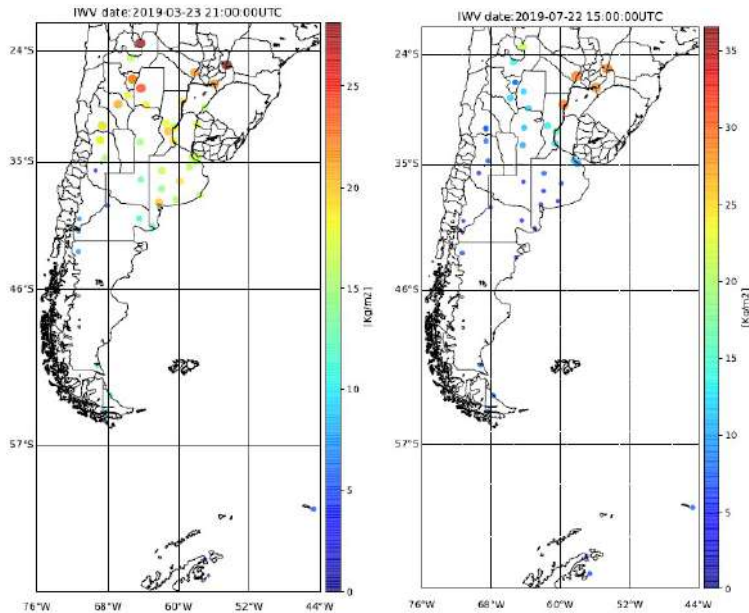


Figura 5-13: Mapas de IWV_{ppp}. Izquierda: estación cálida (principios de otoño). Derecha: estación fría (invierno).

5.5.1 Validación de IWV en estaciones SIRGAS-CON

Para validar los valores IWV_{ppp} se utilizaron los valores IWV_{SIR} estimados desde el ZTD ajustado proveniente del procesamiento riguroso de la red SIRGAS. Vale aclarar que el IWV_{SIR} se ha calculado con valores atmosféricos (presión atmosférica y temperatura) provenientes del re-análisis europeo ERA5. La exactitud y precisión del IWV_{SIR}, ha sido demostrada en Mackern et al. (2020), obteniendo, en comparación con IWV de radiosondeos, para un período de 5 años, un bias promedio de 0,41 kg/m² y un rms promedio de 3,5 kg/m².

Luego la validación del IWV_{ppp} se realizó sobre 33 estaciones que forman parte de la red argentina RAMSAC y a la vez son estaciones SIRGAS. El análisis estadístico se efectuó sobre los 24 valores diarios durante todo el 2019, se obtuvo un bias de 3,238 mm (o kg/m²) y un RMS medio de 4,370 mm (o kg/m²). En la Figura 5-14 se observan los valores individuales de cada estación.

Para el cálculo del IWV_{ppp} no se aplicó la reducción de bias mensual del ZTD_{ppp}, es decir el vapor de agua ha sido calculado con el ZTD_{ppp} original, sin la reducción de bias descripta. Sin embargo, se utilizó un filtro de 0,20 m en el error asociado a la estimación del ZTD_{ppp}, con lo cual los valores ZTD cuyo error fue superior a 20 cm fueron excluidos del cálculo.

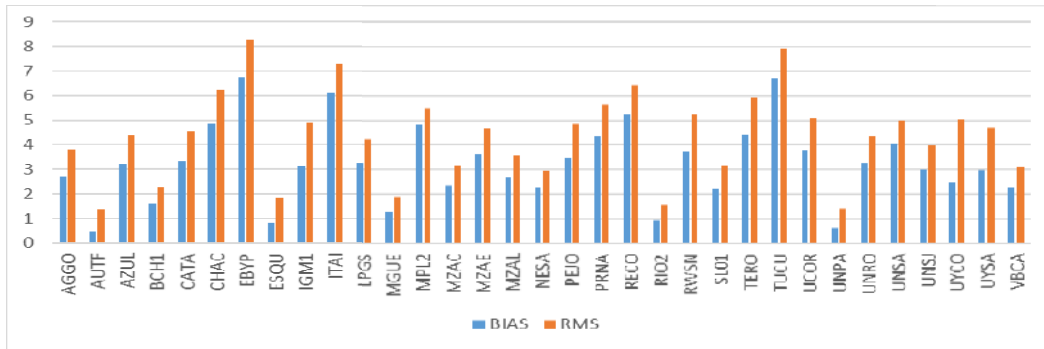


Figura 5-14: Comparación IWV SIR vs IWV PPP [mm]

Se estima que aplicando la reducción del bias mensual se podrían mejorar los resultados, alcanzando la precisión ideal para contribuir con los modelos numéricos de predicción del clima, que según Dousa and Vaclavovic, (2014) es de 1 kg/m², sin embargo, con el resultado obtenido mostrado se encuentra dentro de la precisión límite (5 kg/m² para la precisión del vapor de agua integrado).

5.5.2 Validación IWV_{PPP} con observaciones de radiosondas

Finalmente, los valores IWV_{PPP} fueron validados con los correspondientes valores provenientes de los perfiles de radiosondeos. Como se comentó en la validación del ZTD_{PPP} esta comparación solo se realizó en 6 estaciones GNSS correspondientes a las radiosondas lanzadas disponibles en el territorio argentino, volviendo a remarcar la importancia de estimar esta variable desde las estaciones continuas GNSS, permitiendo aumentar ampliamente la resolución espacial y temporal en la estimación del vapor de agua troposférico.

Se compararon los valores IWV de radiosondeos con los correspondientes IWV estimados por PPP, para el mismo registro temporal (fecha y horario de la radiosonda). En esta validación se obtuvo un bias promedio de 3,741 mm y un rms de 5,549 mm. En la Tabla 5-7 se muestran los estadísticos para cada estación.

Tabla 5-7: Estadísticos validación IWV(PPP) con IWV(RS) [mm]

Station	bias	rms	std	max	min
CHAC	6,5254	8,6701	5,7237	24,562	-26,4616
IGM1	4,3765	5,8972	3,9599	21,6347	-8,8312
MZAC	1,8251	3,6160	3,1292	14,6097	-13,4148
NEQN	1,1974	3,2896	3,0692	14,4641	-10,8501
SRLP	3,9307	5,3417	3,6230	20,8244	-2,1443
UCOR	4,5885	6,4813	4,5867	22,5925	-10,335

5.6 Optimización del cálculo ZTD_{PPP}

En base a las validaciones realizadas se puede asegurar que tanto el ZTD como el IWV estimados mediante PPP, pueden ser utilizados para contribuir a los modelos numéricos de predicción del clima (NWP), ya que los estimadores de precisión se encuentran dentro de los límites recomendados (5 kg/m² para la precisión del vapor de agua integrado, y 30

mm en ZTD, Dousa and Vaclavovic, 2014). Sin embargo, resta mejorar la latencia en la obtención de estas variables para que puedan ser consideradas en las aplicaciones de tiempo real. Se debería lograr una latencia máxima de 90 minutos, para que estas variables puedan ser considerados a tiempo “cuasi-real” y aportar a los modelos de predicción climática (nowcasting) [Guerova et al., 2016].

Con este objetivo se está trabajando en una experiencia de re-procesamiento de la estimación ZTD_{PPP} , utilizando productos orbitales provenientes del servicio de tiempo real del IGS, RTS (IGS Real Time Service).

Como se describió en el Capítulo 3, el servicio RT del IGS, proporciona correcciones a las órbitas y relojes de los satélites a tiempo real, mediante el protocolo NTRIP. Luego con el software BNC, es posible generar efemérides en formato SP3 y correcciones a los relojes en formato CLK, a partir de los mensajes transmitidos a tiempo real (IGS03 y RTCM3EPH).

Si bien existen efemérides ultra-rápidas con una precisión semejante a la de estas orbitas, la gran ventaja de utilizar esta herramienta, es que las correcciones de reloj (CLK) se pueden generar con un intervalo de actualización de 10 s, no disponible en los productos ultra-rápidos existentes.

Como aporte de esta tesis, se decidió entonces almacenar los archivos de orbitas y relojes provenientes de los mensajes correctivos, para poder luego procesar con el software Bernese 5.2, y así obtener el ZTD_{PPP} con menor latencia. Si esta metodología se aplica en tiempo real, se podría obtener un producto troposférico con un retardo de una hora, y su correspondiente IWV en menos de 90 minutos, tal como requieren los modelos de pronóstico. Se estima una hora en el retardo ZTD, ya que se podrían utilizar las herramientas BNC para la descarga de archivos de observación y orbitas en formato RINEX, desde los datos transmitidos a tiempo real, cada una hora.

Se realizó una experiencia piloto para la semana 2062 del año 2019. Los resultados han sido muy satisfactorios, ya que en la comparación con los obtenidos con productos rápidos de CODE, se obtuvo un bias promedio de -2,58 mm y un rms de 23 mm.

Por otro lado, en base a la metodología empleada en Europa, se observa que es necesario realizar un análisis de la calidad de los datos de observación (chequeo de RINEX), previo al cálculo del ZTD. Siguiendo a Vaclavovic and Dousa (2016), se realizó el control de RINEX con el software GNU-ANUBIS. Este programa realiza un análisis de las observaciones GNSS (soporta GPS, Galileo, GLONASS y Beidu), detecta observaciones afectadas por ciclos perdidos y errores de reloj. El objetivo que se plantea es poder descartar a partir de este monitoreo, aquellas observaciones con problemas previo a su incorporación en el cálculo de PPP. Este nuevo desarrollo se ha comenzado a aplicar en las experimentaciones del año 2020, se estima tener los primeros resultados para fines del 2020.

5.7 Metodología sugerida para el cálculo IWV_{PPP} a cuasi Tiempo Real

A continuación, se resumen los pasos metodológicos recomendados para el cálculo del IWV, a partir de ZTD-PPP y valores atmosféricos del servicio meteorológico nacional.

- 1- **Adquisición de datos transmitidos a tiempo real:** Con las herramientas del programa BNC (BKG Ntrip Client) es posible almacenar tanto los datos de observación de las estaciones server NTRIP, como así también efemérides y correcciones a las órbitas y relojes. Por lo tanto, se propone utilizar este software para la adquisición de datos en tiempo real, almacenándolos en archivos horarios.
- 2- **Estimación del ZTD-PPP cada 1 hora desde el procesamiento de observaciones GPS y GLONASS para estaciones argentinas.** Se recomienda el procesamiento con el software Bernese 5.2, tal cómo se describió en el apartado 5.3. La limitante en cuanto a la rapidez del cálculo son las efemérides a utilizar en el procesamiento PPP. Una vez lanzado el cálculo, se obtiene un registro horario del ZTD, en el formato propio de Bernese, generando un archivo TRP con la información de todas las estaciones.
- 3- **Obtención de valores meteorológicos:** Se recomienda utilizar los valores publicados por el SMN en su servicio Tiempo Presente, que permiten conocer el registro horario de temperatura y presión atmosférica, con lo cual el cálculo podría realizarse con 1 hora de retardo, los detalles están expresados en el apartado 5.4.
- 4- **Desarrollo de un proceso automatizado de cálculo del IWV.** Se utilizaron las rutinas de cálculo IWV detalladas en el apartado 5.5, a partir de los datos descriptos. Este procedimiento se ha automatizado en un servidor LINUX, diseñado de tal manera que ni bien se encuentran disponibles los retardos cenitales ZTD_{PPP} , el programa recopila la información meteorológica y calcula rápidamente la estimación del IWV.

5.8 Conclusiones

En este capítulo se ha detallado una aplicación inmediata de la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso sobre las estaciones GNSS permanentes, para monitoreo atmosférico. La misma se desarrolla sobre la base de calcular el vapor de agua integrado (IWV) a partir del retardo cenital troposférico (ZTD) estimado en el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) de las observaciones GNSS que operan a tiempo real en la región.

Se propone una metodología de cálculo para la estimación ZTD y de sus correspondientes valores IWV, sobre las estaciones argentinas de la red RAMSAC. Se realizó una experiencia de cálculo durante el año 2019, sobre estaciones en territorio argentino, ya que se pudo disponer sobre esta zona de los registros meteorológicos necesarios para el cálculo del vapor con menor latencia. Sin embargo, esta metodología propuesta puede ser tomada como referencia para todas las estaciones latinoamericanas SIRGAS que cuenten con una estación meteorológica cercana (se recomienda a una distancia menor que 30 km).

A partir de los resultados mostrados y validados es posible remarcar, la gran ventaja que ofrece la técnica indirecta GNSS, ya que permite aumentar ampliamente la resoluciones espacial y temporal de la estimación del IWV. Las técnicas directas que permiten conocer el IWV, como los radiosondeos terrestres, tienen una cobertura insuficiente, tanto espacial como temporal, dado su alto costo (el costo aproximado de una radiosonda es 100 dólares, y la misma se pierde, no puede reutilizarse) o los radiómetros satelitales que permiten estimar muy bien esta variable en los océanos, pero no así en los continentes.

Si bien las validaciones realizadas presentan muy buenos estimadores de precisión, se debe trabajar para poder obtener estos resultados reduciendo su latencia. Como se mencionó la limitante en el cálculo del ZTDPPP son las órbitas y las correcciones de reloj, habiendo encontrado los mejores resultados con las soluciones rápidas de CODE que tienen una demora de 24 hs. Sin embargo, para poder producir un producto en tiempo casi real (con 90 minutos de latencia), será necesario mejorar la metodología de procesamiento aplicando órbitas y relojes ultrarrápidos, o incluso utilizando correcciones de orbitas y relojes transmitidas en tiempo real [Guerova et al., 2016]. Esta tarea se ha comenzado a experimentar a partir de los resultados descritos y se espera poder continuar con estas experiencias de manera de tener resultados confiables en los próximos meses.

CAPITULO 6: CONCLUSIONES GENERALES

No cabe duda que los sistemas de posicionamiento satelital han tenido un gran desarrollo en las últimas décadas, y muchos han sido los cambios y avances en cuanto a los avances tecnológicos asociados. Desde el inicio de este trabajo de investigación, se ha intentado analizar mediante un abordaje técnico-científico los nuevos protocolos de comunicación y las técnicas de posicionamiento a tiempo real, para la determinación precisa de coordenadas en el instante de observación.

Se pretende que los primeros capítulos de esta tesis puedan clarificar los adelantos producidos en estas temáticas y servir de guías para la comunidad de geodestas y agrimensores que utilizan estos nuevos servicios para posicionarse y vincularse a los marcos de referencia actuales. Cabe mencionar que son muchos los usuarios de estas tecnologías de posicionamiento, por lo que esta contribución puede ser un aporte valorable para otras ciencias como la Ingeniería, la Geofísica, la Geología, la Sismología, la Meteorología, entre otras.

Debido a la participación activa en el grupo de trabajo SIRGAS-RT, se ha podido dar recomendaciones y conclusiones sobre la implementación y utilización de estos servicios en los países latinoamericanos, con lo cual esta tesis puede ser de referencia para los servicios y oficinas encargadas de la geodesia en los diversos países participantes de esta red.

Una vez adquiridos y comprendidos conocimientos sobre software de cálculo, protocolos de comunicación (NTRIP), estándares (RTCM) y técnicas de posicionamiento (DGPS, RTK, PPP), se profundizó su utilización en aplicaciones innovativas, siempre con el objetivo de lograr el máximo aprovechamiento de la actual infraestructura de las redes GNSS a tiempo real.

En cuanto al cálculo de coordenadas a tiempo real, se ha logrado vasta experiencia en el manejo de instrumental geodésico y de varios programas, especialmente del software BNC (BKG Ntrip Client), por ser una excelente herramienta de monitoreo a tiempo real. Se remarca que para poder utilizar este programa en modo pos-proceso es necesario disponer de las correcciones de órbitas y relojes satelitales previamente almacenadas. Debido a que estas correcciones se transmiten a tiempo real, si no son capturadas en su momento por un cliente NTRIP, toda la información contenida se pierde. De allí que se han generado archivos de correcciones desde el año 2015 a la fecha de forma continua, y han sido compartidos con la comunidad de SIRGAS. Con estas correcciones es posible analizar procesos geodinámicos ocurridos con anterioridad, y resulta sumamente importante para la georreferenciación, como se expuso en el Capítulo 3. Se considera que la estrategia utilizada para descargar y acumular en archivos diarios estas correcciones para su posterior utilización, es una contribución de esta tesis, la cual se pone a disposición de los científicos interesados.

Se continuó con el monitoreo geodinámico, utilizando el Posicionamiento Puntual Preciso para la estimación de desplazamientos sísmicos. Se demostró que esta técnica permite detectar variaciones en las coordenadas, producto de la deformación de la corteza producida por eventos de moderada a importante magnitud. Como una contribución importante de esta tesis, se ha logrado desarrollar una metodología que permite comparar los desplazamientos GNSS con registros sismológicos. Tanto el cálculo de desplazamientos, en función de la

diferencia de coordenadas instantáneas respecto a una coordenada de control, como la transformación de formatos (obteniendo las velocidades GNSS en archivos .SAC), ha sido automatizado, permitiendo obtener de manera muy ágil información muy valiosa para el análisis, estudio y posible mitigación de los efectos sísmicos.

Otra aplicación fue el monitoreo atmosférico, relativo a la estimación del vapor de agua (IWV) obtenido a partir de los retardos troposféricos (ZTD) de la señal GNSS, gracias a la participación activa en las tareas del centro de análisis de atmósfera neutra CIMA. Como se ha comentado, CIMA realiza un ajuste de los retardos troposféricos estimados por los centros de procesamiento de SIRGAS, generando productos troposféricos precisos y confiables para toda la red. También, ha desarrollado una metodología de estimación del IWV, incluyendo variables atmosféricas provenientes del re-cálculo ERA5. Si bien se ha demostrado la precisión y exactitud de ambos productos, los mismos poseen una latencia en el cálculo que no permiten ser asimilados por modelos numéricos de predicción meteorológica (NWM).

Luego ha sido una importante contribución de esta tesis, el desarrollo de una metodología que permite optimizar la disponibilidad de dichos productos. Dicha metodología incluye la estimación del ZTD mediante PPP (con software Bernese 5.2), obteniendo una solución ágil que solo depende de la disponibilidad de los datos y correcciones utilizados. Como se ha descrito, estos pueden obtenerse desde los servicios de tiempo real (streams de observaciones, efemérides y correcciones de orbitas y relojes satelitales).

Asimismo, en virtud de registrar las variables atmosféricas necesarias para la estimación del IWV en tiempo real, se ha logrado como otro aporte de esta tesis, una rutina automatizada que permite registrar los datos que transmite el Servicio Meteorológico de Argentina en su servicio "Tiempo Presente". Se cuenta entonces con una base de datos completa (en archivos diarios, con intervalo de una hora) de dichas variables para todas las estaciones meteorológicas de Argentina, que también se ponen a disposición para su utilización en otras disciplinas.

Finalmente, la metodología de reducción de bias aplicada a los retardos troposféricos obtenidos por la técnica PPP, ha permitido alcanzar los estándares de precisión requeridos en los modelos NWM.

En los apartados siguientes se resumen las principales conclusiones de los capítulos abordados en esta tesis, priorizando principalmente el aprovechamiento de las redes GNSS- RT ya instaladas tanto para la georreferenciación como para nuevas aplicaciones como el monitoreo geodinámico y atmosférico.

6.1 Los servicios de posicionamiento satelital en Tiempo Real

Los sistemas globales de navegación satelital agrupados bajo la sigla GNSS, se hallan claramente ubicados entre las tecnologías novedosas de mayor impacto [Brunini y Azpilicueta, 2007]. Todos estos sistemas han tenido, tienen y tendrán como principal objetivo y aplicación la navegación. Fueron diseñados para proporcionar la posición de un usuario en tierra a partir de observaciones a los satélites. Sin embargo, dicha posición no puede conocerse con exactitud en el momento de la observación, ya que existen diversos errores que influyen en la señal transmitida por los satélites. Por tal motivo se han desarrollado las diferentes técnicas de posicionamiento con el objetivo de mejorar la posición del observador en tiempo real (RT).

El gran desarrollo de nuevos sistemas de navegación y los avances en las tecnologías asociadas, en especial de la comunicación mediante Internet, ha generado un ambiente propicio para la creación de nuevas técnicas, mejorando las precisiones y aumentando la productividad.

Gracias a la creación del protocolo NTRIP y la estandarización del formato RTCM, actualmente es posible posicionarse a tiempo real, con un único receptor y de manera precisa. Ya sea vinculándose a una estación GNSS permanente que transmite sus datos on-line con la técnica RTK-NTRIP, o con la técnica PPP utilizando correcciones de reloj y órbitas de los satélites que se transmiten a tiempo real.

Todas estas técnicas no serían hoy aplicables sin el trabajo que llevan a cabo día a día los servicios RT. Dentro de los servicios que presta el IGS, el servicio que mayor desarrollo ha tenido en la última década es el RTS-IGS, ya que sigue aumentando la cantidad de estaciones de su red, y mejorando los productos RT allí ofrecidos.

A nivel regional, si bien el proyecto SIRGAS-RT no ofrece un servicio de correcciones diferenciales para todo Latinoamérica, sus iniciativas apuntan a servir de apoyo y guía en la implementación de servicios RT en cada uno de los países miembros. En nuestro continente, son los Institutos Geográficos u organismos relacionados con la cartografía y los sistemas de referencia, quienes se han encargado de asumir esta responsabilidad y llevan adelante excelentes servicios RT. Como ejemplo se destacan RAMSAC-NTRIP en Argentina, RBCM-IP en Brasil e IGM en Uruguay, descritos en el capítulo 1.

Se observa que el país con mayor desarrollo, en cantidad de estaciones y servidores caster es Estados Unidos. Sin embargo, los servicios están administrados por cada uno de los Estados y/o por desarrollos privados de forma independiente, y generalmente son servicios pagos.

En América Latina, Brasil presenta mayor cantidad de estaciones optimizadas a Tiempo Real y sigue ampliando su servicio constantemente, incluso transmitiendo otros productos como correcciones a las órbitas y relojes de los satélites para el Posicionamiento Puntual Preciso, en diferentes marcos de referencia (SIRGAS 95 y SIRGAS2000).

En nuestro país, se aprecia una constante evolución del servicio RAMSAC-NTRIP, que año tras año incorpora nuevas estaciones GNSS a la red y mejora su infraestructura en cuanto a su servidor caster y registro de usuarios.

Finalmente se espera que el caster de SIRGAS, pueda seguir desempeñando su función de caster experimental para incorporar nuevas estaciones a la red, como así también brindar servicios adicionales como lo hacen los servidores europeos. Actualmente se re-transmiten correcciones de órbitas y relojes calculadas por el IGS en diferentes marcos de referencia, sería recomendable poder contribuir a la comunidad internacional con una solución regional de órbitas y relojes proveniente de las estaciones SIRGAS-CON.

Del análisis realizado en las distintas redes que ofrecen servicios a tiempo real se sugiere, que América Latina siga como ejemplo el servicio europeo EUREF-IP. El mismo cuenta con los aportes de las distintas instituciones de los países europeos, complementándose con la estructura de EUREF-IP a nivel continental, ofreciendo servicios regionales. De esta manera, los distintos países podrían ir sumando sus estaciones a los servicios RT y colaborar en la generación de productos RT desde el servidor caster de SIRGAS.

6.2 Las técnicas de medición en tiempo real y su relación con los marcos de referencia

En los capítulos 2 y 3 de esta tesis se han expuesto los avances sobre las dos ramas fundamentales del posicionamiento a tiempo real: por un lado, las técnicas de posicionamiento diferencial (DGNSS, RTK-NTRIP y las soluciones en red Net-RTK) y por el otro, el posicionamiento puntual preciso (PPP-NTRIP). Las técnicas RTK y Net-RTK, han sido más utilizadas en la industria y la topografía, por su alta productividad y agilidad, debido a que los receptores GNSS traen incorporados los algoritmos de cálculo necesarios para su implementación. Mientras que el PPP, ha sido más probado en el ámbito científico, ya que hasta el momento, la mayoría de los receptores comerciales no están provistos del software específico para aplicar este tipo de posicionamiento.

En el caso del posicionamiento diferencial a tiempo real, se ha probado que resulta ser una técnica precisa y muy efectiva, ya que permite conocer la posición precisa en el momento de la medición. En base a las experiencias descritas en esta tesis, se puede considerar una exactitud menor a 3 cm en vectores menores a 30 km. Luego, las soluciones de red (Net-RTK) permiten aumentar aún más la distancia base-remoto, manteniendo la precisión RTK. Estas soluciones son muy útiles en países con escasa densidad de estaciones permanentes, como en nuestra región.

Gracias a la estandarización de los mensajes correctivos (RTCM) y su transmisión a tiempo real mediante el protocolo NTRIP, estas técnicas han tenido un gran desarrollo fundamentalmente por su productividad. A partir de la instalación de los servicios RT-NTRIP en los países de la región, esta técnica ha incrementado la comunidad de usuarios.

Las principales ventajas de esta técnica se podrían sintetizar en tres: en primer lugar los usuarios necesitan un único receptor, se prescinde de la base propia, la que es reemplazada por las estaciones GNSS permanentes que transmiten sus observaciones y correcciones en tiempo real, cuya cantidad crece sostenidamente al igual que su distribución geográfica mejora. En segundo lugar, se prescinde del sistema de comunicación por radio transmisores, con sus baterías, antenas y demás implementos. Si bien es mandatorio tener acceso a internet, considerando la actual cobertura de redes de telefonía móvil, es factible que los usuarios puedan conectarse a Internet desde el mismo receptor GNSS o desde sus teléfonos personales, condiciones que se van optimizando rápidamente. Como tercera ventaja cabe mencionar que con las técnicas RT, es posible vincularse a un determinado marco de referencia con precisión, en forma rápida (en el instante de medición) y segura, ya que las correcciones están en el marco de referencia de la estación Server-NTRIP, sin necesidad de realizar cálculos adicionales ni pos-procesamiento.

Como una contribución de esta tesis, surgida de las experiencias RTK-NTRIP realizadas con distintos servicios oficiales de la región, se pudo probar que la utilización de Marcos de Referencia desactualizados produce una pérdida en la exactitud de la coordenada final.

Frente al incremento de nuevos servicios nacionales de posicionamiento RT, se considera conveniente recomendar la utilización de coordenadas oficiales actualizadas en las estaciones Server. A su vez, dado que es posible utilizar estaciones provenientes de distintos países, los marcos nacionales deberían ser consistentes entre sí o bien re-publicar sus streams en algún

marco de referencia regional que permita la interacción entre los distintos servicios nacionales, sin pérdidas de exactitud y precisión. Se recomienda utilizar un marco de referencia actualizado para todas las estaciones de la región, siendo una alternativa factible la última solución multianual SIRGAS disponible.

Respecto al desarrollo de la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso, ha sido posible gracias al esfuerzo realizado por el Servicio Internacional GNSS, principalmente a partir de la publicación de correcciones de órbitas y relojes transmitidas mediante el protocolo NTRIP en Tiempo Real.

Con la experiencia de monitoreo de coordenadas descrita en el capítulo 4, se ha demostrado la exactitud y precisión del cálculo PPP comparable con la de las técnicas diferenciales, obteniendo precisiones de 3 y 7 mm en las coordenadas horizontales y verticales, respectivamente. Además de una significativa cantidad de aplicaciones como el monitoreo sísmico, co-sísmico, incluso orientadas hacia la localización de eventos y análisis de los mismos.

Respecto al Marco de Referencia, es importante destacar que se introduce a partir de las efemérides de los satélites y sus correspondientes correcciones, por lo que la mayoría de los cálculos PPP se obtienen en el marco de referencia internacional más actual (actualmente IGS2014).

Luego, si un usuario necesita obtener las coordenadas en un marco de referencia desactualizado, se recomienda realizar el PPP en el marco de las órbitas y luego transformar las coordenadas resultantes al marco y a la época deseados. Si bien es posible generar una corrección a las órbitas y relojes que incluya parámetros de transformación entre diferentes marcos de referencia, no se recomienda su utilización, ya que la época de referencia resulta fundamental y también debe ser considerada.

En cuanto a la utilización del PPP-RTK para georreferenciación, se concluye que es una herramienta válida y que debería ser considerada en las normativas catastrales provinciales, ya que se ha demostrado que su precisión cumple con los requerimientos de mensura ($\sigma_h < 5$ cm $\sigma_v < 10$ cm), sobre todo para zonas rurales o de poco valor de la tierra. Por lo tanto, se recomienda utilizar PPP para georreferenciación en el marco de referencia de las órbitas o correcciones y luego hacer la transformación de marco de referencia y adecuación de época correspondiente al marco de referencia oficial del país.

Si bien la georreferenciación de parcelas históricamente se ha realizado con posicionamiento Diferencial, la técnica PPP ofrece una excelente alternativa, por ejemplo, cuando la estación permanente a la que se desearía vincular está fuera de funcionamiento, o cuando por algún motivo no se logra una solución fija y/o la precisión adecuada en el método diferencial.

6.3 Aplicaciones innovativas del posicionamiento a tiempo real

En los capítulos 4 y 5 de esta tesis se han presentado dos aplicaciones del posicionamiento satelital a tiempo real, que han tenido gran desarrollo en las últimas décadas: el monitoreo geodinámico y el atmosférico. El objetivo de esta investigación, ha sido estudiar en profundidad los servicios de posicionamiento a tiempo real y desde esa mirada evaluar

posibles aplicaciones innovativas que aprovechen la actual infraestructura de las redes de estaciones GNSS permanentes.

En el monitoreo geodinámico, se ha demostrado que la técnica PPP, siguiendo la metodología propuesta, permite detectar deformaciones de la corteza producidas por eventos sísmicos de importante magnitud, ya que se pueden estimar desplazamientos co-sísmicos mayores a 2 cm (2σ). Los desplazamientos observados en las coordenadas se pueden estimar de forma casi inmediata, permitiendo registrar los movimientos instantáneos y los desplazamientos permanentes, consistentes con las soluciones de pos-procesamiento. Sin embargo, resulta indispensable contar con una coordenada precisa y actualizada de las estaciones para el cálculo de desplazamientos co-sísmicos, así como también considerar la monumentación de la estación.

En base a las experiencias realizadas y la comparación con registros sismológicos, los resultados encontrados permiten concluir que las estaciones GNSS pueden contribuir al estudio de eventos sísmicos (especialmente cuando los datos han sido registrados con alta frecuencia), ya que permiten detectar principalmente las ondas sísmicas superficiales, que en eventos importantes no pueden ser registrados por los instrumentos sismológicos, ya que se produce la saturación.

En Argentina, la actual red de estaciones GNSS RAMSAC puede contribuir a los estudios geodinámicos, y podría optimizarse, ya que más del 94 % del total de estaciones podrían registrar sus observaciones con un intervalo de al menos 5 Hz (5 observaciones por segundo). Con la rutina desarrollada para convertir rápidamente los registros GNSS a formato sismológico, se observa que estas señales pueden ser utilizadas por la comunidad científica, pudiendo así lograr un aporte significativo en el análisis de la tectónica regional.

Respecto al monitoreo atmosférico, se han presentado los resultados de calcular el vapor de agua integrado a partir del retardo cenital troposférico estimado por PPP. La metodología propuesta se ha ensayado sobre estaciones argentinas, por disponer sobre esta zona, los registros meteorológicos necesarios. No obstante, este método puede ser tomado como referencia para ser aplicado a todas las estaciones latinoamericanas SIRGAS, que cuenten con una estación meteorológica cercana.

Se remarca la gran ventaja que ofrece la técnica indirecta GNSS, que permitiría aumentar ampliamente la cobertura espacial a aproximadamente 420 estaciones GNSS en América Latina comparado con un máximo de 60 estaciones de radiosondeo, y 100 estaciones GNSS en Argentina, comparado con 6 estaciones de radiosondeo. Se destaca también como una significativa mejora la resolución temporal de la estimación del IWV propuesta desde GNSS. Se ha mostrado la metodología para determinar un parámetro por hora, contra a lo sumo dos registros diarios (00 y 12 horas UTC) que brindan los radiosondeos terrestres.

La exactitud obtenida en el retardo cenital ZTD_{PPP} como en el vapor IWV_{PPP} , permitiría contribuir a los modelos numéricos de pronóstico, quienes establecen una exactitud límite de 5 kg/s^2 para IWV, y 3 mm para ZTD. Sin embargo para que estos productos puedan ser considerados a tiempo “cuasi real”, se debe mejorar la latencia.

6.4 Tareas futuras

Por todos los resultados encontrados, se pretende seguir profundizando las aplicaciones aquí presentadas, principalmente aprovechando la actual infraestructura de las estaciones GNSS permanentes que transmiten sus datos en tiempo real.

En el monitoreo geodinámico, se espera poder continuar con el estudio de los sistemas de alertas tempranas y poder experimentar sobre la estimación rápida de magnitudes sísmicas y localización. Por otra parte, se desea poder ofrecer un servicio de registros GNSS compatibles con los datos sísmicos (al menos en las estaciones de la región), factibles de ser utilizados en el estudio de la tectónica activa.

Respecto a la estimación de ZTD e IWV, si bien las validaciones realizadas presentan muy buenos estimadores de precisión, se debe trabajar para poder obtener estos resultados reduciendo su latencia o "delay". Como se mencionó, la limitante en el cálculo del ZTD_{PPP} son las órbitas y las correcciones de reloj, habiendo encontrado los mejores resultados con las soluciones rápidas de CODE que tienen una demora de 24 horas. Sin embargo, para poder producir un producto en tiempo casi real (con 90 minutos de latencia), será necesario mejorar la metodología de procesamiento aplicando órbitas y relojes ultrarrápidos, o incluso utilizando correcciones de órbitas y relojes transmitidas en tiempo real [Guerova et al., 2016]. Esta tarea se ha comenzado a experimentar a partir de los resultados descritos y se espera poder continuarla de manera de tener resultados confiables en los próximos meses.



Ing. María Fernanda Camisay



Dra. María Virginia Mackern



Dr. Claudio Brunini

REFERENCIAS

- Abdel-Salam M. (2005) Precise Point Positioning Using Un-Differenced Code and Carrier Phase Observations, PhD thesis, The University of Calgary, Canada. https://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/YG/05.20229.MAbdel-salam.pdf
- Ahmed, F., Václavovic, P., Teferle, F.N. et al. (2016). Comparative analysis of real-time precise point positioning zenith total delay estimates. *GPS Solut* 20, 187–199 <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0427-z>
- Akyildiz Ian F., Gutierrez-Estevez David M., Chavarria Reyes Elias (2010) The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced, *Physical Communication*, Volume 3, Issue 4, Pages 217-244, ISSN 1874-4907, <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.08.001>.
- Alcay S, Turgut M (2017) Performance evaluation of real-time precise point positioning method. In: *IOP conference series: earth and environmental science*, vol 95, p 032023
- Allen, R. M., and H. Kanamori (2003), The potential for earthquake early warning in southern California, *Science*, 300, 786– 789.
- Allen, R. M. y A. Ziv (2011), Aplicación de GPS en tiempo real a la alerta temprana de terremotos, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L16310, doi: 10.1029 / 2011GL047947.
- Allen, R. M., H. Brown, M. Hellweg, O. Khainovski, P. Lombard, and D. Neuhauser (2009), Real-time earthquake detection and hazard assessment by ElarmS across California, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L00B08, doi:10.1029/2008GL036766.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L, Collilieux X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 121, DOI: 10.1002/2016JB013098
- Askne J, Nordius H (1987) Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Sci* 22:379–386. <https://doi.org/10.1029/RS022i003p00379>
- Alves, D. B. M; Dalbelo, L. F. A.; Monico, J. F. G. y Shimabukuro, M. H. (2012) “First Brazilian Real Time Network DGPS through the Internet: Development, Application and Availability Analyses”. *Journal of Geodetic Science*, DOI: 10.2478/v10156-011-0018-7, pag. 1-7.
- Berg H (1948) *Allgemeine Meteorologie*. Dümmler’s Verlag, Bonn, p 337
- Berrisford, P, Dee, DP, Poli, P, Brugge, R, Fielding, M, Fuentes, M, Kállberg, PW, Kobayashi, S, Uppala, S, Simmons, A, (2011). “The ERA-Interim archive Version 2.0”. ERA Report. Shinfield Park, Reading, 11/2011.
- Bevis M,, Businger S,, Herring T A, et al (1992) GPS meteorology: remote sensing of the atmospheric water vapor using the global positioning system. *J Geophys Res* 97:15787–15801
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T.A., Anthes, R.A., Rocken, C., Ware, R.H., (1994). GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J. Appl. Meteorol.* 33, 379–386.
- Bianchi, C.E., Mendoza, L.P.O., Fernández, L.I., Natali, M.P., Meza, A.M., Moirano, J.F., (2016). Multi-year GNSS monitoring of atmospheric IWV over Central and South America for climate studies. *Ann. Geophys.* 34, 623-639.
- Bisnath, S., Gao, Y. (2009) *Precise Point Positioning*, GPS World.

Böhm, J., and H. Schuh, 2004, "Vienna mapping functions in VLBI analyses", *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, <https://doi:10.1029/2003GL018984>.

Böhm, J., Niell, A.E., Tregoning, Paul and Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Schuh Geophys. Res. Lett.* 25. 10.1029/2005GL025546.

Bonafoni, S., Mazzoni, A., Cimini, D., Montoponi, M., Pierdicca, N., Basili, P., Ciotti, P., Carlesimo, G. (2013) Assessment of water vapor retrievals from a GPS receiver network, *GPS Solutions*, vol. 17, n. 4, pp. 475-484, 2013.

Brunini, C., Sánchez, L., Drewes, H., Costa, S., Mackern, V., Martínez, W., Seemuller, W., da Silva, A., (2012). Improved Analysis Strategy and Accessibility of the SIRGAS Reference Frame, in: Kenyon S., Pacino M., Marti U. (Eds), *Geodesy for Planet Earth. International Association of Geodesy Symposia*, vol 136. Springer, Berlin, Germany, pp. 3-10.

Brunini, C. y Azpilicueta, F. (2007) Estudio de Factibilidad para el desarrollo de un Sistema de Aumentación GNSS en Argentina, informe final, contrato GESA - Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas Universidad Nacional de La Plata - Secretaría de Comunicaciones de la Nación. https://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?keywords=&id=21267&convenios=yes&detalles=yes&conv_id=158358

Bruyninx, C., Legrand, J., Fabian, A. et al. (2019) GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network. *GPS Solut* 23,106. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0880-9>

Byun, S. H., y Bar-Sever, Y. E. (2009). A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service. *Journal of Geodesy*, 83(3-4), 1-7.

Calori, A., Santos, J.R., Blanco, M., Pessano, H., Llamedo, P., Alexander, P., de la Torre, A., (2016). Ground-based GNSS network and integrated water vapor mapping during the development of severe storms at the Cuyo region (Argentina). *Atmos. Res.* 176-177, 267-275.

Calori, A., Colosimo, G., Crespi, M., Mackern, M.V., (2015). Comparison of different techniques for retrieving the ZWD over South America and surrounding oceans. In: Sneeuw, N., Novák, P., Crespi, M., Sansò, F. (Eds.) *International Association of Geodesy Symposia*, vol. 142, pp 1-7.

Camisay, M.F., Striewe, E., Mackern, M.V. (2013) Los marcos de referencia en el posicionamiento satelital a tiempo real. *GEOACTA* 38(2): 183-193 (2013) ISSN 1852-7744

Camisay, M.F., Mateo M.L., Mackern, M.V. y Robin A.M. (2017). Aporte a estudios sismológicos, mediante estaciones SIRGAS-RT. *GEOCIENCIAS & GEODATOS: Instituto Geográfico Militar de Ecuador*, p - 70-75. ISSN-2477-9040

Camisay, M.F., J.A. Rivera, M.L. Mateo, P.V. Morichetti, M.V. Mackern, (2020). Estimation of integrated water vapor derived from Global Navigation Satellite System observations over Central-Western Argentina (2015–2018). Validation and usefulness for the understanding of regional precipitation events, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 197, 2020, 105143, ISSN 1364-6826, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105143>.

Chahine, M. T. *Eos* 73, 9, 13–14 (1992). 4. World Climate Research Programme Scientific Plan for the Global Energy and Water Cycle Experiment, WCRP-40

Cioce V., Martínez W., Mackern M.V., Pérez R., De Freitas, S., (2018). SIRGAS: Reference frame in Latin America. *Coordinates*, Vol. XIV, Issue 6, 6-10, June 2018. ISSN 0973-2136.

COM (2004) Paso a las fases de despliegue y explotación del programa de radionavegación por satélite, Comunicación de las Comunidades Europeas al Parlamento Europeo y al Consejo, Bruselas. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2004:0636:FIN:ES:PDF>

Crowell, B. W., Y. Bock, and M. B. Squibb (2009), Earthquake early warning using total displacement waveforms from real-time GPS networks, *Seismol. Res. Lett.*, 80(5), 772–782, doi:10.1785/gssrl.80.5.772.

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P. (2015) Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern, Bern. ISBN: 978-3-906813-05-9; Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297

Dalda Mourón A., González Matesanz F.J., Cano Villaverde M.A. et al. (2010) Apuntes para Curso Avanzado de Posicionamiento por Satélite, Universidad Politécnica de Madrid, Noviembre de 2010.

Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I., Rogers, A.E., Elgened, G., (1985). Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length. *Radio Sci.*, vol. 20, 1593-1607

Douša, J. and Vaclavovic, P. (2014) Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications, *Adv. Space Res.*, 53, 1347–1358, doi:10.1016/j.asr.2014.02.021.

Emore G, Haase J, Choi K, Larson KM, Yamagiwa A (2007) Recovering absolute seismic displacements through combined use of 1-Hz GPS and strong motion accelerometers. *Bull Seism Soc Am* 97(2):357–378. doi:10.1785/0120060153

Euler, H-J., Keenan C.R., Zebhauser, B.E. and Wuebbena, G. (2001) Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. ION GPS 2001, Salt Lake City, UT.

Euler, H-J, Seeber, S., Zelzer, O., Takac, F., and Zebhauser, B.E. (2004) Improvement of Positioning Performance Using Standardized Network RTK Messages, ION NTM 2004, January 26-28, 2004, San Diego, CA.

Floyd M. , Funning G. , Fialko Y. , Terry R. , Herring T. (2020). Survey and continuous GNSS in the vicinity of the July 2019 Ridgecrest earthquakes *Seismological Research Letters.*, doi: 10.1785/0220190324..

Geng, T., X. Xie, R. Fang, X. Su, Q. Zhao, G. Liu, H. Li, C. Shi, and J. Liu (2016) Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015 Mw7.8 Nepal earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 161–167, doi:10.1002/2015GL067044.

Gomez M.E., Del Cogliano D., Lahitte C., Rodríguez Tello M.N. (2013) Análisis de la performance de tres servicios de posicionamiento GPS online en Argentina. *GEOACTA* 38(2). Pag. 95-106, 2013, ISSN 1852-7744.

Guerova, G., Jones, J., Douša, J., Dick, G., de Haan, S., Pottiaux, E., Bock, O., Pacione, R., Elgered, G., Vedel, H., and Bender, M. (2016) Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 5385–5406, <https://doi.org/10.5194/amt-9-5385-2016>.

Goldstein, P., Snoko A., (2005). SAC Availability for the IRIS Community, Incorporated Institutions for Seismology Data Management Center Electronic Newsletter.

Goldstein, P., Dodge D., Firpo M., Lee Minner (2003). SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to “The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology”, Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.

Havskov J. y Ottemoller (1999). SeisAn Earthquake analysis software, Seis. Res. Lett., 70, 1999. http://www.seismosoc.org/publications/SRL/SRL_70/srl_70-5_es.html

Havskov J., y Alguacil G. (2004) Correction for instrument response. In: Havskov J., Alguacil G. (eds) Instrumentation in Earthquake Seismology. Modern Approaches in Geophysics, vol 22. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2969-1_6

Herring, T. A., T. I. Melbourne, M. H. Murray, M. A. Floyd, W. M. Szeliga, R. W. King, D. A. Phillips, C. M. Puskas, M. Santillan, and L. Wang (2016), Plate Boundary Observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products, Rev. Geophys., 54, doi:10.1002/2016RG000529

Hodgkinson, K.M. , Mencin, D.J. , Feaux, K. , Sievers, C. , Mattioli, G.S (2020). Evaluation of earthquake magnitude estimation and event detection for real-time GNSS Networks: Examples from recent events captured by the network of the Americas. Seismological Research Letters (2020) 91 (3): 1628–1645

Hohensinn, R.; Geiger, A (2018). Stand-Alone GNSS Sensors as Velocity Seismometers: Real-Time Monitoring and Earthquake Detection. Sensors 2018, 18, 3712

Huston G. (2008) A Decade in the Life of the Internet. The Internet Protocol Journal, Volume 11, Number 2.

Kim D, Langley RB (2000) GPS ambiguity resolution and validation: methodologies, trends and issues. In: Proceedings of the 7th GNSS workshop and international symposium on GPS/GNSS, Seoul, Korea, November 30–December 2, pp 213–221

Kouba, J. (2003), Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS, Stud. Geophys. Geod., 47(4), 741–755.

Kouba J. y Hèroux P. (2000) GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products, http://www.geod.nrcan.gc.ca/publications/papers/abs3_e.php

Langley, R. (1998). RTK GPS. GPS World 9 (9):70-76.

Larson, K. M., P. Bodin, and J. Gomberg (2003), Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake, Science, 300(5624), 1421–1424

Larson K. (2009), GPS Seismology, J. Geod., 83, 227–233, doi:10.1007/s00190-008-0233-x.

Leick A. (2004). GPS Satellite Surveying. 3rd Edition, Wiley, New York.

Leyton, F., Ruiz, S., Baez, J. C., Meneses, G., & Madariaga, R. (2018). How fast can we reliably estimate the magnitude of subduction earthquakes?. Geophysical Research Letters, 45, 9633–9641. <https://doi.org/10.1029/2018GL078991>

Mackern M. V., M.L. Mateo, A.M. Robin, A.C. Calori (2009). A Terrestrial Reference Frame (TRF), coordinates and velocities for South American stations: contributions to Central Andes geodynamics. Advances in Geosciences, 22, 181–184.

Mackern M.V., Mateo M.L., Camisay M.F., Morichetti P.V. (2020) Tropospheric Products from High-Level GNSS Processing in Latin America. In: . International Association of Geodesy Symposia. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/1345_2020_121

Mateo M.L. (2011). Determinación precisa de velocidades en las estaciones GNSS de medición continua de América Latina (red SIRGAS). Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina

Márquez A. (2007) "NTRIP Herramienta Indispensable para la Cartografía y el Catastro". II Jornadas Nacionales de Geomática. Mediciones Científicas e Industriales C.A. MECINCA. Caracas. Venezuela. <http://www.mecinca.com>

Melgar D., B. W. Crowell, J. Geng, R. M. Allen, Y. Bock, S. Riquelme, E. M. Hill, M. Protti, and A. Ganas (2015), Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 5197–5205, doi:10.1002/2015GL064278.

Melgar D. , Melbourne,T.I. , Crowell,B.W. , Geng,J. , Szeliga,W. , Scriver,C., Santillan,M. , Goldberg,D.E. (2019). Real-time high-rate GNSS displacements: performance demonstration during the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes. *Seismol. Res. Lett.* XX, 1–9, doi: 10.1785/0220190223.

Mena Berrios, Juan B (2008). Geodesia Superior Volumen 2: Proyecciones Cartográficas y Geodesia Espacial. Ed. Centro Nacional de Información Geográfica, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. ISBN 978-84-416-0767-5. Depósito Legal M-7818-2008. Madrid, España.

Mendes, V.B. (1999) Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques, (Ph.D. dissertation). Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No 199, Univ. of New Brunswick, Canada

Mollova G. (2007), "Effects of digital filtering in Data Processing of Seismic Acceleration Records", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2007, Article ID 29502, 2007.

Moricheti P., Mackern M.V., Camisay M.F., Mateo M.L. (2018) Aportes desde la red de estaciones SIRGAS-CON a la meteorología. 3° Encuentro Nacional de Investigadores de Agrimensura. Universidad de Nacional de Catamarca, Junio 2018.Libro, Trabajos Completos, ISBN 978-987-661-281-4.

Noguera G. Camisay M.F. y Pérez Rodino R. (2014) Actividades del proyecto SIRGAS en Tiempo Real (SIRGAS-RT). En: Primer Encuentro de Investigadores de Agrimensura, UMAZA-UNL 2014. Mendoza, Argentina.

Pacione R, Araszkievicz A, Brockmann E, Dousa J (2017) EPN-Repro2: a reference GNSS tropospheric data set over Europe. *Atmos Meas Tech* 10:1689–1705. <https://doi.org/10.5194/amt-10-1689-2017>

Pérez Rodino, Roberto y Tte. Cnel. Suárez, Norbertino (2012) Servicio de corrección diferencial para GNSS en tiempo real a través de Caster-Ntrip, una herramienta para el presente y futuro" Disponible en www.agrimensores.org.uy

Pestarini S. (2016) "Georreferenciación utilizando servicios de posicionamiento en línea y su aplicación en la Agrimensura". Disponible en <http://quijot.github.io/calc/calc.pdf>

Raman S, Garin L (2005) Performance Evaluation of Global Differential GPS (GDGPS) for Single Frequency C/A Code Receivers, ION GNSS 2005, Long Beach, CA, USA.

Ramos F., (2008) Telefonía móvil: GSM, EDGE, GPRS y UMTS. Disponible en: <http://www.radioptica.com>

RTCM Special Committee No. 104 (2004). Networked Transport of RTCM via Internet Protocol, Version 1.0. RTCM Paper 200-2004/SC104-STD. The Institute of Navigation. <http://www.ion.org/>

RTCM Special Committee No. 104 (2010) Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version 2.3. The Institute of Navigation, <http://www.ion.org/>

RTCM Special Committee No. 104 (2011) Networked Transport of RTCM via internet protocol (Ntrip) - Version 2.0 The Institute of Navigation, <http://www.ion.org/>

RTCM Special Committee No. 104 (2013). Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services, Version 3. The Institute of Navigation, <http://www.ion.org/>

Rüeger, J.M. (2002) Refractive index formula for radio waves, Proc. XXII FIG Int. Congr., April 19-26, 2002, Web. http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2002/Js28/JS28_rueger.pdf

Saastamoinen, J. (1973). Contributions to the theory of atmospheric refraction, Bulletin Geodesique No. 105-107, pp. 279-298; 383-397; 13-34.

Sánchez, L., Drewes, H., Brunini, C., Mackern, M.V., Martínez-Díaz, W., (2015). SIRGAS core network stability, in: Rizos C., Willis P. (Eds), IAG 150 Years. International Association of Geodesy Symposia, vol. 143. Springer, Cham, Switzerland, pp. 183-191.

Schmitz, M. (2012) RTCM State Space Representation Messages, Status and Plans. PPP-RTK & Open Standards Symposium, March 12-13, Germany, 2012.

Seeber Gunter (2003) Satellite Geodesy 2nd Edition. Ed. Walter de Gruyter, Berlin, New York. ISBN 3-11-017549-5

Siegmund M. Redl, Matthias K. Weber, Malcolm W. Oliphant. (1998) "GSM and Personal Communications Handbook". Artech House. London-Boston. ISBN-13: 978-089006.

Takasu, T., 2013. RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning. From <http://www.rtklib.com/>.

Tanenbaum, A. S. y Wetherall D. J. (2011). Computer networks, 5th ed, Prentice-Hall. ISBN-13: 978-0-13-212695-3 (alk. paper) ISBN-10: 0-13-212695-8 (alk. Paper)

Teunissen, P. (1995) The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. J. Geodesy, 70, pp. 65-82, 10.1007/BF00863419

Vaclavovic P, Dousa J (2016), G-Nut/Anubis - open-source tool for multi-GNSS data monitoring, In: IAG Symposia Series, Springer, Vol. 143, pp. 775-782, doi:10.1007/1345_2015_157

Van Baelen J., Aubagnac J.P., Dabas, A., (2005). Comparison of Near-Real Time Estimates of Integrated Water Vapor Derived with GPS, Radiosondes, and Microwave Radiometer". J. Atmos. Oceanic Technol., 22, 201-210

Villiger, A., Dach, R. (eds.) (2020). International GNSS Service Technical Report 2019 (IGS Annual Report). IGS Central Bureau and University of Bern; Bern Open Publishing DOI 10.7892/boris.144003

Wabben, G., Schmitz, M., Bagge, A. (2005) PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks. Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA, pp. 2584-2594.

Weber, G., Gebard, H., Dettmering, D. (2003) Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). Presentado en "A Window on the Future of Geodesy", IAG General Assembly, Sapporo, Japan.

Weber G., Dettmering D., Gebhard H. (2005) Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). In: Sansò F. (eds) A Window on the Future of Geodesy. International Association of Geodesy Symposia, vol 128. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27432-4_11

Weber, G., L. Mervart, A. Stürze, A. Rülke and D. Stöcker (2016) BKG Ntrip Client, Version 2.12. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Vol. 49, Frankfurt am Main, 2016.

Witchayangkoon B. (2000) Elements of GPS Precise Point Positioning, PhD thesis, The University of Maine, USA.

Wu, Y.M., y Kanamori H. (2008), Development of an earthquake early warning system using real-time strong motion signals, *Sensors*, 8, 1–9.

Xu, P., Shi, C., Fang, R. et al. (2013). High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units. *J Geod* 87, 361–372 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0606-z>

Yao, Y., Zhang, B., Xu, C., Chen, J., (2014). Analysis of the global Tm–Ts correlation and establishment of the latitude-related linear model. *Chin. Sci. Bull.* 59 (19), 2340–2347.

Zimmerman, H. (1980). OSI Reference Model-The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 28, no. 4, pp. 425-432, April 1980, doi: 10.1109/TCOM.1980.1094702

Zumberge J. F., Watkins M. M. and Webb F. H. (1997a) Characteristics and Applications of Precise GPS Clock Solutions Every 30 Seconds, *Journal of Navigation*, vol. 44, no. 4, pp. 449-456.

Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M. and Webb F. H. (1997b) Precise Point Positioning for The Efficient and Robust Analysis of GPS Data From Large Networks, *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, no. B3, pp. 5005-5017.

Zumberge, J. F., Bettiger W. I. (1996), Ephemeris and Clock Navigation Message Accuracy, in *Global Positioning System - Theory and Applications*, vol. I, edited by B. W. Parkinson and J. J. Spilker, 585-599, Am. Inst. of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington, D.C

Anexo I: Mensajes RTCM 2.X

Tipo de Mensaje	Título
1	Corrección Diferencial GPS
2	Variación de la Corrección Diferencial GPS
3	Coordenadas de la estación de referencia referidas al centro de fase
4	Sistema de Referencia de las estaciones bases
5	Estado de la constelación GPS
6	Mensaje nulo GPS- Reservado para contingencias
7	Almanaque de Radiofaros DGPS
8	Almanaque de Pseudo-satelites "pseudolite"
9	Corrección Diferencial Parcial GPS (no de todos los satélites)
10	Corrección Diferencial para el Código P
11	Corrección Diferencial para el Código C/A sobre L2
12	Parámetros de los pseudo-satélites (información del reloj y ubicación)
13	Parámetros de los transmisores en tierra
14	Tiempo en la semana GPS (en horas)
15	Retardo Ionosférico
16	Mensaje Especial GPS
17	Efemérides GPS
18	Observaciones de Fase RTK (sin corregir)
19	Observaciones de Código (sin corregir)
20	Corrección a la observación de fase
21	Corrección a la observación de código
22	Parámetros extendidos de la estaciones de referencia
23	Definición del Tipo de Antena
24	Coordenadas de la estación de referencia referidas al ARP
25	No definido
26	No definido
27	Almanaque extendido de Radiofaros DGPS
28	No definido
29	No definido
30	No definido
31	Correcciones Diferenciales GLONASS
32	Información de las estaciones de referencia GLONASS (Coordenadas del centro de fase)
33	Estado de la constelación GLONASS
34	Corrección Diferencial Parcial GLONASS (no de todos los satélites)
35	Almanaque de Radiofaros GLONASS
36	Mensaje Especial GLONASS
37	Variación del sistema tiempo GNSS
38-58	No definido
59	Mensaje Propietario
60-63	Multipropósito

Anexo II: Mensajes RTCM 3.x

Grupo	Sub-grupo	Tipo de Mensaje	
Observaciones	L1 GPS	1001	
		1002	
	L1/L2 GPS	1003	
		1004	
	L1 GLONASS	1009	
		1010	
		1011	
	L1/L2 GLONASS	1012	
		1071-1077	
		1081-1087	
		1091-1097	
	Coordenadas de las Estaciones de Referencia		1005
		1006	
		1032	
Descripción de Antenas		1007	
		1008	
Descripción de Antenas y Receptores		1033	
	Datos de las estaciones auxiliares	1014	
Correcciones Red RTK	Diferencias de Corrección Ionosférica GPS	1015	
	Diferencias de Corrección Geométrica GPS	1016	
	Combinación de corrección ionosférica y geométrica GPS	1017	
	Residuos red RTK GPS	1030	
	Residuos red RTK GLONASS	1031	
	Gradiente FKP GPS	1034	
	Gradiente FKP GLONASS	1035	
	Diferencias de Corrección Ionosférica GLONASS	1037	
	Diferencias de Corrección Geométrica GLONASS	1038	
	Combinación de corrección ionosférica y geométrica GLONASS	1039	
	Parámetros del Sistema	1013	
	Información operación auxiliar	Efemérides	1019
		Campo destinado a Texto	1020
		Información del error (bias) GLONASS	1230
		Transformaciones Helmert/ Molodenski abreviado	1021
Molodenski-Badekas		1022	
Parámetros de Transformación	Residuos de la representación	1023	
		1024	
	Parámetros de Proyección	1025	
		1026	
Parámetros de Representación Espacial (SSR)	Corrección a las órbitas GPS	1057	
	Corrección de reloj, satélites GPS	1058	
	Error (bias) de código GPS	1059	

Corrección combinada de órbitas y relojes GPS	1060
Estimador de la precisión (User Range Accuracy) GPS	1061
Corrección de Reloj GPS (con mayor frecuencia, c/30 s)	1062
Corrección a las órbitas GLONASS	1063
Corrección de reloj satélites GLONASS	1064
Error (Bias) de código GLONASS	1065
Combinación corrección de órbitas y reloj GLONASS	1066
Estimador de la precisión (User Range Accuracy) GLONASS	1067
Corrección de Reloj GLONASS (con mayor frecuencia, c/30 s)	1068

Información propietaria

4001-4095

Anexo III: COORDENADAS DE CONTROL- Experiencia RTK-DGPS

Marco de referencia POSGAR2007- Época 2006.632

PUNTO	LATITUD	$\sigma\phi$	LONGITUD	$\sigma\lambda$	h	σh
01 km	33° 14' 17,54058" S	0,022	68° 08' 43,96269" W	0,0240	626,119	0,047
03 km	33° 13' 43,41370" S	0,02	68° 09' 53,83217" W	0,0240	632,341	0,041
05 km	33° 13' 7,37521" S	0,022	68° 11' 22,67141" W	0,0220	636,252	0,029
15 km	33° 09' 18,17678" S	0,022	68° 16' 35,33763" W	0,031	650,878	0,0450
25 km	33° 06' 14,54929" S	0,014	68° 21' 27,79426" W	0,0180	662,664	0,031
35 km	33° 03' 55,48676" S	0,031	68° 28' 37,45934" W	0,0220	679,299	0,031
45 km	33° 02' 52,85130" S	0,014	68° 33' 45,68114" W	0,018	682,149	0,0270
50 km	33° 01' 4,98627" S	0,014	68° 36' 22,09649" W	0,024	687,166	0,0410

Coordenadas planas Proyección Gauss Kruger Faja 2

PUNTO	N (G.K.)	E (G.K.)
01 km	6322473,6059	2579637,4725
03 km	6323539,6499	2577836,9241
05 km	6324668,0661	2575545,2045
15 km	6331788,7530	2567497,2347
25 km	6337495,3942	2559953,0363
35 km	6341841,4696	2548833,4825
45 km	6343807,6630	2540846,1114
50 km	6347146,7414	2536800,2995

Anexo IV: Diferencias RTK-NTRIP respecto a coordenadas de control

Punto	X(G.K.)	Y(G.K.)	h	Comparación Estático vs RT			Observación
				N	E	h	
MZAE	6320631,713	2579201,525	635,723	6322473,6059	2579637,4725	626,119	Estación Base
25	6322473,594	2579637,448	626,101	0,0119	0,0245	0,018	Punto 8 (1km)
26	6322473,599	2579637,445	626,106	0,69	0,0275	0,013	
27	6322473,592	2579637,455	626,104	0,0139	0,0175	0,015	
28	6322473,595	2579637,456	626,108	0,0109	0,0165	0,011	
29	6322473,585	2579637,458	626,108	0,0209	0,0145	0,011	
30	6322473,585	2579637,472	626,136	0,0209	0,05	-0,017	

				6323539,6499	2577836,9241	632,341	Control
31	6323539,663	2577836,862	632,388	-0,0131	0,0621	-0,047	
32	6323539,679	2577836,903	632,383	-0,0291	0,0211	-0,042	
33	6323539,667	2577836,913	632,311	-0,0171	0,0111	0,030	Punto 7 (3km)
34	6323539,655	2577836,932	632,344	-0,5100	-0,790	-0,300	
35	6323539,654	2577836,885	632,337	-0,4100	0,0391	0,400	
36	6323539,615	2577836,977	632,337	0,0349	-0,0529	0,400	
				6324668,0661	2575545,2045	636,252	Control
37	6324668,098	2575545,217	636,255	-0,0319	-0,0125	-0,3	
38	6324668,067	2575545,209	636,249	-0,09	-0,45	0,3	
39	6324668,073	2575545,213	636,268	-0,69	-0,85	-0,016	Punto 6 (5km)
40	6324668,092	2575545,250	636,255	-0,0259	-0,0455	-0,3	
41	6324668,062	2575545,232	636,255	0,41	-0,0275	-0,3	
				6331788,7530	2567497,2347	650,878	Control
42	6331788,759	2567497,194	650,886	-0,60	0,0407	-0,8	
43	6331788,780	2567497,204	650,911	-0,0270	0,0307	-0,033	Punto 5 (15km)
44	6331788,729	2567497,205	650,867	0,0240	0,0297	0,011	
				6337495,3942	2559953,0363	662,664	Control
45	6337495,409	2559953,027	662,7	-0,0148	0,93	-0,036	
46	6337495,398	2559953,027	662,695	-0,38	0,93	-0,031	
47	6337495,412	2559953,6	662,702	-0,0178	0,0303	-0,038	Punto 4 (25 km)
48	6337495,379	2559953,4	662,704	0,0152	0,0323	-0,040	
49	6337495,401	2559953,8	662,699	-0,68	0,0283	-0,035	
50	6337495,403	2559953,024	662,696	-0,88	0,0123	-0,032	
				6341841,4696	2548833,4825	679,299	Control
51	6341841,518	2548832,418	679,191	-0,0484	1,0645	0,108	
52	6341841,511	2548832,428	679,159	-0,0414	1,0545	0,140	
53	6341841,477	2548832,433	679,120	-0,7400	1,0495	0,179	Punto 3 (35km)
54	6341841,501	2548832,425	679,141	-0,0314	1,0575	0,158	
55	6341841,516	2548832,439	679,139	-0,0464	1,0435	0,160	
56	6341841,516	2548832,431	679,168	-0,0464	1,0515	0,131	
				6343807,6630	2540846,1114	682,149	Control
57	6343807,653	2540845,211	682,989	0,010	0,94	-0,840	
58	6343807,550	2540845,192	682,821	0,1130	0,9194	-0,672	Punto 2 (45km)
59	6343807,610	2540845,194	682,701	0,0530	0,9174	-0,552	
60	6343807,388	2540845,043	682,707	0,2750	1,0684	-0,558	
61	6343807,703	2540845,1	682,3	-0,04	1,0114	0,146	
62	6343807,688	2540845,096	681,990	-0,0250	1,0154	0,159	Punto 2 (45km) bis
63	6343807,698	2540845,1	681,969	-0,0350	1,0114	0,180	
64	6343807,667	2540845,126	681,924	-0,40	0,9854	0,225	
				6347146,7414	25368,2995	687,166	Control
65	6347146,714	2536799,348	687,081	0,0274	0,9515	0,085	
66	6347146,723	2536799,333	686,922	0,0184	0,9665	0,244	
67	6347146,731	2536799,335	686,922	0,0104	0,9645	0,244	
68	6347146,793	2536799,385	686,861	-0,0516	0,9145	0,305	
69	6347146,753	2536799,201	687,152	-0,0116	1,0985	0,014	Punto 1 (50km)
70	6347146,761	2536799,200	687,150	-0,0196	1,0995	0,016	
71	6347146,766	2536799,203	687,170	-0,0246	1,0965	-0,40	
72	6347146,786	2536799,191	687,167	-0,0446	1,1085	-0,10	
73	6347146,778	2536799,170	687,182	-0,0366	1,1295	-0,016	

Anexo V: Diferencias DGPS-NTRIP respecto a coordenadas de control

Punto Nav	Coord X	Coord Y	Alt	Coord N (G.K.) / dif	Coord E (G.K.) / dif	Alt post / dif	Observ.
				6322473,6059	2579637,4725	626,119	
60	6322473,146723	2579635,529203	600	0,459	1,943	26,119	
61	6322473,126913	2579637,952545	600	0,479	-0,480	26,119	
62	6322473,237064	2579638,046657	600	0,369	-0,574	26,119	
63	6322473,123865	2579638,325367	600	0,482	-0,853	26,119	
64	6322473,013713	2579638,231255	599	0,592	-0,759	27,119	Punto 8
65	6322473,015237	2579638,044844	600	0,591	-0,572	26,119	(1km)
66	6322473,015237	2579638,044844	600	0,591	-0,572	26,119	
67	6322472,791886	2579638,229441	600	0,814	-0,757	26,119	
68	6322472,790362	2579638,415852	601	0,816	-0,943	25,119	
69	6322472,452287	2579639,065570	600	1,154	-1,593	26,119	
				6323539,6499	2577836,9241	632,341	
70	6323538,641037	2577838,629539	606	1,009	-1,705	26,341	
71	6323539,310239	2577838,168778	606	0,340	-1,245	26,341	
72	6323539,534299	2577837,890904	605	0,116	-0,967	27,341	
73	6323539,645957	2577837,798574	605	0,004	-0,874	27,341	
74	6323539,757615	2577837,706245	605	-0,108	-0,782	27,341	Punto 7
75	6323539,537277	2577837,518042	605	0,113	-0,594	27,341	(3km)
76	6323539,536533	2577837,611258	606	0,113	-0,687	26,341	
77	6323539,869272	2577837,613915	606	-0,219	-0,690	26,341	
78	6323539,980930	2577837,521586	606	-0,331	-0,597	26,341	
79	6323540,091099	2577837,615687	606	-0,441	-0,692	26,341	
				6324668,0661	2575545,2045	636,252	
80	6324664,022056	2575542,278025	604	4,044	2,926	32,252	
81	6324665,347231	2575543,034144	606	2,719	2,170	30,252	
82	6324665,347231	2575543,034144	606	2,719	2,170	30,252	
83	6324665,789438	2575543,224033	606	2,277	1,980	30,252	
84	6324666,339668	2575543,787684	607	1,726	1,417	29,252	Punto 6
85	6324666,450581	2575543,788544	607	1,616	1,416	29,252	(5km)
86	6324666,330277	2575544,999618	600	1,736	0,205	36,252	
87	6324666,551380	2575545,094563	601	1,515	0,110	35,252	
88	6324667,659786	2575545,196383	609	0,406	0,008	27,252	
89	6324667,659786	2575545,196383	609	0,406	0,008	27,252	
				6331788,7530	2567497,2347	650,878	
90	6331789,667661	2567494,971528	627	-0,915	2,263	23,878	
91	6331789,443262	2567495,343166	627	-0,690	1,892	23,878	
92	6331789,442618	2567495,436459	627	-0,690	1,798	23,878	
93	6331789,442618	2567495,436459	626	-0,690	1,798	24,878	
94	6331789,441329	2567495,623043	626	-0,688	1,612	24,878	Punto 5
95	6331789,440685	2567495,716336	626	-0,688	1,518	24,878	(15km)
96	6331789,556750	2567494,970762	625	-0,804	2,264	25,878	
97	6331789,556750	2567494,970762	625	-0,804	2,264	25,878	
98	6331789,445195	2567495,063289	625	-0,692	2,171	25,878	
99	6331789,445195	2567495,063289	625	-0,692	2,171	25,878	
				6337495,3942	2559953,0363	662,664	
100	6337531,786918	2559941,275575	616	-36,393	11,761	46,664	
101	6337527,564371	2559942,556621	619	-32,170	10,480	43,664	
102	6337519,673822	2559945,122104	624	-24,280	7,914	38,664	Punto 4
103	6337516,895951	2559945,945244	625	-21,502	7,091	37,664	(25km)
104	6337514,785248	2559946,492419	626	-19,391	6,544	36,664	

105	6337506,003424	2559949,705885	631	-10,609	3,330	31,664		
106	6337505,780463	2559949,891219	631	-10,386	3,145	31,664		
107	6337502,446331	2559950,990998	634	-7,052	2,045	28,664		
108	6337502,002694	2559950,988282	634	-6,608	2,048	28,664		
109	6337500,224719	2559951,537492	636	-4,831	1,499	26,664		
				6341841,4696	2548833,4825	679,299		
110	6341839,689688	2548834,317745	645	1,780	-0,835	34,299		
111	6341838,914265	2548834,127108	646	2,555	-0,645	33,299		
112	6341841,374226	2548830,123670	647	0,095	3,359	32,299		
113	6341841,702764	2548830,965798	648	-0,233	2,517	31,299		
114	6341842,361698	2548832,276513	652	-0,892	1,206	27,299	Punto	3
115	6341842,137093	2548832,835723	651	-0,667	0,647	28,299	(35km)	
116	6341841,802511	2548833,207609	652	-0,333	0,275	27,299		
117	6341842,023861	2548833,302100	652	-0,554	0,180	27,299		
118	6341841,357020	2548833,578943	652	0,113	-0,096	27,299		
119	6341841,797860	2548834,141467	652	-0,328	-0,659	27,299		
				6343807,6630	2540846,1114	682,1490		
120	6343808,462340	2540847,254812	647	-0,799	-1,143	35,149		
121	6343808,351822	2540847,160946	647	-0,689	-1,050	35,149		
122	6343808,463118	2540847,068004	647	-0,800	-0,957	35,149		
123	6343808,352600	2540846,974139	647	-0,690	-0,863	35,149		
124	6343808,242082	2540846,880274	647	-0,579	-0,769	35,149		
125	6343808,242082	2540846,880274	647	-0,579	-0,769	35,149		
126	6343808,242082	2540846,880274	647	-0,579	-0,769	35,149		
127	6343808,242082	2540846,880274	647	-0,579	-0,769	35,149		
128	6343808,242082	2540846,880274	647	-0,579	-0,769	35,149		
129	6343808,242471	2540846,786870	647	-0,579	-0,675	35,149	Punto	2
130	6343808,137396	2540845,385353	650	-0,474	0,726	32,149	(45km)	
131	6343808,031154	2540844,264047	655	-0,368	1,847	27,149		
132	6343808,031543	2540844,170644	655	-0,369	1,941	27,149		
133	6343807,921025	2540844,076778	655	-0,258	2,035	27,149		
134	6343807,921025	2540844,076778	655	-0,258	2,035	27,149		
135	6343807,810507	2540843,982913	655	-0,148	2,128	27,149		
136	6343807,810507	2540843,982913	655	-0,148	2,128	27,149		
137	6343807,921414	2540843,983375	655	-0,258	2,128	27,149		
138	6343807,921803	2540843,889971	655	-0,259	2,221	27,149		
139	6343807,810896	2540843,889509	654	-0,148	2,222	28,149		
				6347146,7414	2536800,2995	687,1660		
50	6347145,830465	2536798,979937	660	0,911	1,320	27,166		
51	6347146,495550	2536799,075864	660	0,246	1,224	27,166		
52	6347146,495900	2536798,982429	660	0,245	1,317	27,166		
53	6347146,829668	2536798,703370	660	-0,088	1,596	27,166		
54	634746,940574	2536798,703786	660	-0,199	1,596	27,166	Punto	1
55	6347147,158186	2536799,825838	659	-0,417	0,474	28,166	(50km)	
56	6347147,158186	2536799,825838	659	-0,417	0,474	28,166		
57	6347147,047630	2536799,731987	659	-0,306	0,568	28,166		
58	6347146,936374	2536799,825007	659	-0,195	0,474	28,166		
59	6347147,047630	2536799,731987	659	-0,306	0,568	28,166		

Anexo VI: Experiencia NET-RTK - Ruta 80 intersección Ruta 8, Uruguay

Id Pto	Dif N	Dif E	Dif h	Mountpoint	Observaciones
1	-0.008	-0.018	0.011	UYLA-RTCM-V3	Solución punto a punto
2	0.01	-0.015	-0.038	UYLA-RTCM-V3	Solución punto a punto -10' medición
3	0.007	-0.007	-0.104	VRS-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática
4	-0.007	0.007	-0.087	VRS-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática
5	-0.009	-0.001	-0.046	IMAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática- Master:UYLA
6	-0.012	-0.01	-0.049	IMAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática- Master UYLA- 4 AUX
7	-0.003	0.001	-0.097	MAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática
8	0	0.005	-0.073	FKP	Solución de red- Celda automática
9	-0.001	-0.015	-0.096	MAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda UYMO-uyla-uylp
10	-0.016	0.014	-0.088	MAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda UYLA-uymo-uylp-uyro
11	0.01	-0.033	-0.103	UYLA-RTCM-V3	Solución punto a punto- Antena DESCONOCIDA
12	-0.034	0.043	-0.164	UYMO-RTCM-V3	Solución punto a punto
13	0.013	-0.04	-0.028	UYLA-RTCM-V3	Solución punto a punto
14	-0.004	-0.012	-0.155	VRS-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática - sin UYLA
15	-0.127	0.065	-0.111	IMAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática- Master UYMO
16	-0.093	0.012	-0.243	IMAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática- Master UYMO
17	-0.019	0.002	-0.135	MAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática- Master UYMO- 3 AUX
18	-0.005	0	-0.164	MAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática- Master UYMO- 3 AUX
19	-0.01	0.011	-0.103	FKP	Solución de red- Celda automática - sin UYLA
20	0.012	0	-0.119	FKP	Solución de red- Celda automática- Pto IGM sobre puente - sin UYLA
21	-0.111	0.076	0.264	VRS-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática- sin UYLA Pto IGM sobre puente
22	-0.142	-0.001	-0.051	MAX-RTCM-V3	Solución de red- Celda automática- sin UYLA Pto IGM sobre puente -

Anexo VII: Experiencia NET-RTK San Jacinto, Uruguay

Id de punto	X local	Y local	h	dN	dE	dV	Solución
1	603702.467	6176298.34	68.447	-0.007	0.002	-0.014	UYMO Pto a pto
2	603702.467	6176298.33	68.478	-0.007	-0.010	0.017	
3	603702.474	6176298.34	68.451	0.000	0.003	-0.010	
4	603702.476	6176298.35	68.499	0.002	0.012	0.038	
5	603702.48	6176298.34	68.484	0.006	-0.004	0.023	
6	603702.477	6176298.34	68.48	0.003	0.004	0.019	
7	603702.471	6176298.35	68.495	-0.003	0.006	0.034	

8	603702.472	6176298.36	68.492	-0.002	0.018	0.031	
9	603702.477	6176298.35	68.485	0.003	0.011	0.024	
10	603702.485	6176298.35	68.48	0.011	0.015	0.019	
11	603702.461	6176298.32	68.473	-0.013	-0.015	0.012	VRS-Celda Automática
12	603702.466	6176298.33	68.498	-0.008	-0.013	0.037	
13	603702.472	6176298.35	68.499	-0.002	0.007	0.038	
14	603702.47	6176298.35	68.485	-0.004	0.008	0.024	
15	603702.474	6176298.36	68.459	0.000	0.022	-0.002	
16	603702.475	6176298.36	68.437	0.001	0.021	-0.024	
17	603702.471	6176298.36	68.44	-0.003	0.018	-0.021	
18	603702.476	6176298.35	68.429	0.002	0.007	-0.032	
19	603702.481	6176298.33	68.462	0.007	-0.011	0.001	
20	603702.48	6176298.32	68.425	0.006	-0.024	-0.036	
21	603702.473	6176298.32	68.409	-0.001	-0.024	-0.052	
22	603702.487	6176298.32	68.488	0.013	-0.024	0.027	MAX-Celda Automática
23	603702.485	6176298.32	68.51	0.011	-0.017	0.049	
24	603702.483	6176298.33	68.514	0.009	-0.011	0.053	
25	603702.476	6176298.34	68.514	0.002	-0.004	0.053	
26	603702.472	6176298.34	68.504	-0.002	0.002	0.043	
27	603702.466	6176298.35	68.496	-0.008	0.015	0.035	
28	603702.465	6176298.36	68.483	-0.009	0.025	0.022	
29	603702.462	6176298.37	68.457	-0.012	0.033	-0.004	
30	603702.455	6176298.36	68.474	-0.019	0.020	0.013	
31	603702.446	6176298.35	68.49	-0.028	0.006	0.029	
32	603702.447	6176298.35	68.499	-0.027	0.015	0.038	
33	603702.499	6176298.31	68.51	0.025	-0.034	0.049	VRS-UYDU-uymp-uyro
34	603702.501	6176298.3	68.514	0.027	-0.041	0.053	
35	603702.504	6176298.31	68.511	0.030	-0.034	0.050	
36	603702.505	6176298.3	68.51	0.031	-0.039	0.049	
37	603702.5	6176298.32	68.505	0.026	-0.020	0.044	
38	603702.483	6176298.32	68.493	0.009	-0.019	0.032	
39	603702.481	6176298.32	68.501	0.007	-0.015	0.040	
40	603702.478	6176298.34	68.505	0.004	-0.004	0.044	
41	603702.482	6176298.34	68.498	0.008	-0.002	0.037	
42	603702.479	6176298.35	68.499	0.005	0.008	0.038	
43	603702.47	6176298.36	68.498	-0.004	0.022	0.037	
44	603702.491	6176298.32	68.532	0.017	-0.023	0.071	MAX-UYDU-uymp-uyro
45	603702.495	6176298.32	68.527	0.021	-0.023	0.066	
46	603702.497	6176298.31	68.519	0.023	-0.025	0.058	
47	603702.498	6176298.32	68.508	0.024	-0.017	0.047	
48	603702.503	6176298.33	68.494	0.029	-0.007	0.033	
49	603702.498	6176298.34	68.5	0.024	0.000	0.039	
50	603702.49	6176298.36	68.497	0.016	0.016	0.036	
51	603702.505	6176298.33	68.481	0.031	-0.007	0.020	
52	603702.5	6176298.34	68.481	0.026	0.003	0.020	
53	603702.509	6176298.32	68.482	0.035	-0.023	0.021	
54	603702.496	6176298.35	68.483	0.022	0.013	0.022	
55	603702.483	6176298.32	68.503	0.009	-0.015	0.042	VRS-UYMO-uyia-uydu
56	603702.433	6176298.37	68.445	-0.041	0.028	-0.016	
57	603702.453	6176298.34	68.448	-0.021	0.003	-0.013	
58	603702.455	6176298.34	68.469	-0.019	0.003	0.008	
59	603702.459	6176298.34	68.461	-0.015	-0.004	0.000	
60	603702.46	6176298.33	68.441	-0.014	-0.010	-0.020	
61	603702.477	6176298.31	68.456	0.003	-0.028	-0.005	
62	603702.467	6176298.32	68.464	-0.007	-0.022	0.003	
63	603702.473	6176298.31	68.474	-0.001	-0.025	0.013	
64	603702.493	6176298.3	68.487	0.019	-0.038	0.026	
65	603702.458	6176298.34	68.456	-0.016	0.000	-0.005	

U - u y

66	603702.463	6176298.34	68.437	-0.011	-0.004	-0.024	
67	603702.451	6176298.34	68.443	-0.023	-0.004	-0.018	
68	603702.454	6176298.34	68.453	-0.020	0.001	-0.008	
69	603702.457	6176298.34	68.457	-0.017	0.005	-0.004	
70	603702.462	6176298.34	68.459	-0.012	0.002	-0.002	
71	603702.463	6176298.34	68.457	-0.011	-0.004	-0.004	
72	603702.465	6176298.33	68.466	-0.009	-0.005	0.005	
73	603702.472	6176298.34	68.474	-0.002	-0.002	0.013	
74	603702.472	6176298.34	68.467	-0.002	0.001	0.006	
75	603702.466	6176298.36	68.496	-0.008	0.019	0.035	
76	603702.481	6176298.34	68.45	0.007	0.005	-0.011	
77	603702.484	6176298.34	68.442	0.010	-0.001	-0.019	
78	603702.475	6176298.34	68.483	0.001	0.003	0.022	
79	603702.479	6176298.34	68.491	0.005	0.001	0.030	
80	603702.473	6176298.34	68.456	-0.001	-0.004	-0.005	
81	603702.472	6176298.33	68.484	-0.002	-0.005	0.023	
82	603702.481	6176298.33	68.494	0.007	-0.005	0.033	
83	603702.474	6176298.34	68.5	0.000	-0.001	0.039	
84	603702.478	6176298.34	68.509	0.004	0.003	0.048	VRS-UYMO-uylp-uyro-uydu
85	603702.477	6176298.36	68.475	0.003	0.020	0.014	
86	603702.487	6176298.36	68.468	0.013	0.018	0.007	
87	603702.492	6176298.36	68.473	0.018	0.017	0.012	
88	603702.489	6176298.36	68.494	0.015	0.019	0.033	
89	603702.479	6176298.36	68.505	0.005	0.018	0.044	
90	603702.472	6176298.35	68.497	-0.002	0.009	0.036	
91	603702.464	6176298.35	68.515	-0.010	0.009	0.054	
92	603702.466	6176298.34	68.522	-0.008	0.005	0.061	
93	603702.465	6176298.34	68.515	-0.009	0.000	0.054	
94	603702.464	6176298.33	68.526	-0.010	-0.006	0.065	MAX-UYMO-uylp-uyro-uydu

ANEXO VIII: Archivo de coordenadas Servicio CSRS-PPP

HDR GRP CANADIAN GEODETIC SURVEY, SURVEYOR GENERAL BRANCH, NATURAL RESOURCES CANADA

HDR ADR GOVERNMENT OF CANADA, 588 BOOTH STREET ROOM 334, OTTAWA ONTARIO K1A 0Y7

HDR TEL 343-292-6617

HDR EMA nrcan.geodeticinformationservices.nrcan@canada.ca

NOTE: Estimated positions are at the epoch of data

DIR	FRAME	STN	DAY	YEAR	YEAR-MM-DD	HR:MN:SS	NSV	GDOP	LATDD	LATM	LATSS	LONDD	LONM	LONSS	HGT(m)
BWD	IGb08	esmr	107.997	16/ 04/ 2016	55:00.0	10	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6569	
BWD	IGb08	esmr	107.997	16/ 04/ 2016	55:30.0	10	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6591	
BWD	IGb08	esmr	107.997	16/ 04/ 2016	56:00.0	10	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6847	
BWD	IGb08	esmr	107.998	16/ 04/ 2016	56:30.0	10	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6829	
BWD	IGb08	esmr	107.998	16/ 04/ 2016	57:00.0	10	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6819	
BWD	IGb08	esmr	107.998	16/ 04/ 2016	57:30.0	9	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6798	
BWD	IGb08	esmr	107.999	16/ 04/ 2016	58:00.0	9	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6831	
BWD	IGb08	esmr	107.999	16/ 04/ 2016	58:30.0	9	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6858	
BWD	IGb08	esmr	107.999	16/ 04/ 2016	59:00.0	9	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6845	
BWD	IGb08	esmr	108	16/ 04/ 2016	59:30.0	9	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.7046	
BWD	IGb08	esmr	108	17/ 04/ 2016	00:00.0	9	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.616	
BWD	IGb08	esmr	108	17/ 04/ 2016	00:30.0	9	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6054	
BWD	IGb08	esmr	108.001	17/ 04/ 2016	01:00.0	9	1.9	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6111	
BWD	IGb08	esmr	108.001	17/ 04/ 2016	01:30.0	8	2.1	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6327	
BWD	IGb08	esmr	108.001	17/ 04/ 2016	02:00.0	8	2	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6372	
BWD	IGb08	esmr	108.002	17/ 04/ 2016	02:30.0	8	2	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6289	
BWD	IGb08	esmr	108.002	17/ 04/ 2016	03:00.0	8	2	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6203	
BWD	IGb08	esmr	108.002	17/ 04/ 2016	03:30.0	8	2	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6196	
BWD	IGb08	esmr	108.003	17/ 04/ 2016	04:00.0	8	2	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6196	
BWD	IGb08	esmr	108.003	17/ 04/ 2016	04:30.0	8	2	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.6306	
BWD	IGb08	esmr	108.003	17/ 04/ 2016	05:00.0	9	2	0	56	4.74	-79	43	27.74	251.626	

Anexo IX: Receptores RAMSAC-NTRIP e intervalo de registro

ID estacion	Receptor	Intervalo registro
25MA	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
3ARO	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
ABRA	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
AGGO	SEPT POLARX4TR	Hasta 100HZ
ALTA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
ALUM	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
AUTF	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
AZUL	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
BCAR	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
BCH1	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
BCHE	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
BUE2	ASHTECH Z XII3	Hasta 2 Hz
CAEP	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
CATA	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz

CFAG	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
CHAC	LEICA GRX1200+GNSS	Hasta 20 Hz
CHIM	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
CHLT	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
CHMA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
CHOY	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
COCA	NOV GSV4004A	Hasta 20 Hz
CORD	JAVAD TRE_G3TH DELTA	Hasta 100 Hz
CSJ1	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
CSLO	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
DINO	LEICA GR25	Hasta 50 Hz
DORE	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
EBYP	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
EPGZ	LEICA GR25	Hasta 50 Hz
EPSF	TRIMBLE 5700	Hasta 10 Hz
ESQU	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
ETSJ	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
FEDE	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
FOSA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
GGUA	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
GRLS	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
GUAY	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
IGM0	ASHTECH Z XII3	Hasta 2 Hz
IGM1	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
JBAL	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
JCHL	LEICA GR25	Hasta 50 Hz
JVGO	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
LARJ	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
LHCL	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
LPGS	JAVAD TRE_3 DELTA	Hasta 100 Hz
MA01	SOK GSR2700 RSX	Hasta 20 Hz
MA02	SOK GSR2700 RSX	Hasta 20 Hz
MBIO	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
MECO	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
MGUE	SEPT POLARX4	Hasta 100HZ
MPL2	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
MPL2	LEICA MC1000	Hasta 10 Hz
MZAC	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
MZAE	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
MZAL	Trimble NETR9	Hasta 50 Hz
MZAR	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
MZAS	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
MZAU	LEICA GRX1200+GNSS	Hasta 20 Hz
MZGA	LEICA GRX1200+GNSS	Hasta 20 Hz
MZRF	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
MZSR	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz

NEQN	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
NESA	ASHTECH Z XII3	Hasta 2 Hz
NGAQ	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
NOYA	LEICA GR25	Hasta 50 Hz
NUGA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
OAFA	ASHTECH UZ12	Hasta 2 Hz
OJOA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
ORAN	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
PACO	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
PATA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
PDE2	LEICA RS500	Hasta 1 Hz
PDE3	LEICA GRX1200+GNSS	Hasta 20 Hz
PDES	LEICA RS500	Hasta 1 Hz
PEBA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
PEJO	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
PRCV	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
PRNA	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
PUMA	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
RASF	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
RECO	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
RIO2	JAVAD TRE_G3TH DELTA	Hasta 100 Hz
RIO4	LEICA GRX1200+GNSS	Hasta 20 Hz
RIOG	ASHTECH Z XII3	Hasta 2 Hz
RODE	LEICA GR25	Hasta 50 Hz
RUFI	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
RWSN	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
SAIS	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
SAJA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
SANT	JAVAD TRE_G3TH DELTA	Hasta 100 Hz
SARM	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
SBAL	LEICA GRX1200	Hasta 2 Hz
SICO	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
SL01	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
SMAN	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
SPRZ	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
SRLP	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
SUAR	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
SUR1	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
SURY	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
SVIC	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
TATU	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
TAVA	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
TERO	TRIMBLE NETR5	Hasta 20 Hz
TILC	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
TRNC	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
TUC1	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz

TUCU	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
UCOR	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
UNPA	LEICA GRX1200+GNSS	Hasta 20 Hz
UNRO	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
UNSA	JAVAD TRE_G3TH DELTA	Hasta 100 Hz
UNSJ	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
VBCA	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
VIMA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz
VIRA	TRIMBLE NETRS	Hasta 10 Hz
YCBA	LEICA GRX1200+GNSS	Hasta 20 Hz
YEMA	TRIMBLE NETR9	Hasta 50 Hz
ZPLA	LEICA GR10	Hasta 50 Hz