

Procesamiento de estaciones permanentes GNSS en el área ibérica. Proyecto IBERRED. Algunos casos particulares

REVISTA **MAPPING**
Vol. 22, 157, 70-77
enero-febrero 2013
ISSN: 1.131-9.100

Marcelino Valdés Pérez De Vargas, Miguel Ángel Cano Villaverde, Laura García-Cañada(*)

Resumen:

El Área de Geodesia del Instituto Geográfico Nacional (IGN) procesa de forma continua la mayor parte de las estaciones permanentes públicas de Sistemas de Navegación Mundial por Satélite (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) del área geográfica de la Península Ibérica y países colindantes, que pertenecen a diferentes instituciones. Los objetivos principales de este procesamiento son: el control del marco de referencia de la forma más densa posible, obtención de coordenadas precisas para otros proyectos y monitorización del comportamiento de las diferentes estaciones. No sólo son calculadas las posiciones de forma continua sino que además, se realiza el reprocesamiento ocasional de estas posiciones cuando existen mejores modelos o la posibilidad de cálculo en un mismo marco de referencia. Algunas de las estaciones han evolucionado fuera de la tendencia esperada, por ejemplo las estaciones de Lorca donde se ha detectado un hundimiento progresivo a parte de ligeros desplazamientos debidos al terremoto de mayo de 2011.

Abstract:

The Department of Geodesy of the Instituto Geográfico Nacional (IGN) processes continuously the vast majority of the public GNSS permanent stations in the Iberian Peninsula and neighbouring countries which belong to different institutions. The main objectives of these processings are: the control of the reference frame as dense as possible, getting precise coordinates for other projects and monitoring the behaviour of the different stations. The positions are not just calculated continuously, occasional re-processings are performed as well. They are carried out when better models or the possibility to process in a same reference frame exist. Some stations have evolved beyond the expected trend, such as the case of stations in Lorca, where have been observed a gradual subsidence and slight shifts due to earthquake in May 2011.

Palabras clave:

GNSS, IGN, Lorca, marco de referencia.

Keywords:

GNSS, IGN, Lorca, Reference Frame.

Marcelino Valdés Pérez de Vargas
Instituto Geográfico Nacional
mvaldes@fomento.es

Miguel Ángel Cano Villaverde
Instituto Geográfico Nacional
macano@fomento.es

Laura García Cañada
Instituto Geográfico Nacional
lgarcia@fomento.es

Recepción 22/04/2012
Aprobación 24/09/2012

Introducción

La irrupción de los Sistemas de Navegación Mundial por Satélite (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) durante las últimas décadas ha producido cambios muy importantes en la Geodesia. Esta nueva técnica no sólo ha proporcionado una gran mejora en la precisión de las coordenadas finales, que las hace sensibles a movimientos de la superficie terrestre antaño inimaginables de observar, sino que adicionalmente son capaces de realizar mediciones de forma continua y automática a lo largo del tiempo. A consecuencia de ello surgieron como redes geodésicas, las redes de estaciones permanentes GNSS. La observación y cálculo de estas redes permanentes proporciona coordenadas diarias de cada una de las estaciones. A partir de ellas se crean las series temporales para cada una de las componentes de las coordenadas de cada estación. En definitiva, no sólo se conoce la posición de los puntos que forman la red, sino además su variación con el tiempo. En España y en los países colindantes se han instalado numerosas redes de estaciones permanentes GNSS en los últimos años. Y aunque generalmente su objetivo principal es proporcionar correcciones en tiempo real, el análisis de los datos de post-proceso, con las mejores metodologías de cálculo geodésico existentes, permite un gran número de aplicaciones. Entre ellas podemos enumerar: control de los marcos de referencia utilizados de forma práctica en un territorio dado, obtención de coordenadas precisas que sean la base de obtención de otros productos como pueden ser meteorológicos u orbitales, estudios geodinámicos o detección de movimientos locales de muy diversas causas.

El Área de Geodesia del Instituto Geográfico Nacional (IGN) puso en marcha el denominado proyecto IBERRED [QUI04-1] que consiste en el cálculo y análisis de series temporales de coordenadas de estaciones permanentes GNSS en el área de la Península Ibérica con la máxima densidad posible. Los datos de entrada son procesados con un software riguroso para obtener la máxima precisión y consistencia. La red actualmente procesada consta de alrededor de 340 estaciones.

Este proyecto tiene vocación de continuidad y mejora permanente. A día de hoy ya permite presentar algunos resultados que aunque preliminares, demuestran la idoneidad y utilidad de un proyecto de este tipo con implicaciones interdisciplinarias en ramas de la Meteorología,

Geodinámica, Volcanología o Sismología aparte de la Geodesia.

En este artículo se presenta las características de la red procesada, del procesamiento, la metodología de creación y análisis de series temporales, y por último algunos resultados concretos reseñables.

Red IBERRED

Este proyecto pretende la captación de datos post-proceso, en formato independiente del receptor (Receiver Independent Exchange, RINEX) [GUR05], de una red lo más densa posible de estaciones permanentes GNSS en el área de la Península Ibérica y alrededores. Se procesan estaciones de las que existen datos con acceso público y gratuito o un acuerdo bilateral con el IGN. En caso de existencia de varias redes en un mismo territorio que puedan producir una densidad excesiva para nuestros fines, se da preferencia a la que pertenezca a alguna administración, ya que se supone un mayor compromiso de permanencia en el tiempo.

Son diversas las entidades e instituciones poseedoras de estas redes, casi todas son dependientes de administraciones públicas y algunas de empresas privadas. Muchas de las estaciones adicionalmente están integradas de forma voluntaria a alguna red internacional de estaciones GNSS, como es la red perteneciente a la Sub-comisión para Europa de Marcos de Referencia de la Asociación Internacional de Geodesia (EUREF) llamada red permanente de EUREF (EUREF Permanent Network EPN) [BRU09] o la perteneciente al Servicio Internacional GNSS (International GNSS Service, IGS) llamada Red de Seguimiento del IGS (IGS Tracking Network) [DOW09].

2.1. Redes GNSS procesadas:

A parte de las estaciones pertenecientes a redes internacionales (EPN, IGS), el resto de estaciones procesadas pertenecen a las siguientes instituciones:

- Red Nacional de Estaciones Permanentes (Rede Nacional de Estações Permanentes, RENEP) del Instituto Geográfico Portugués (IGP).
- Red GNSS Permanente (Réseau GNSS Permanent, RGP) del Institut National de L'Information Géographique et Forestière (IGN) de Francia.
- Red de Estaciones de Referencia GNSS del IGN (ER-GNSS) [QUI04-2].
- Red Geodésica Activa en Tiempo Real (ERVA) del Insti-

tuto Cartográfico Valenciano (ICV).

- Red de Estaciones de Referencia GPS (CATNET) del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC).
- Red de Estaciones Permanentes GNSS de Galicia (GALNET) de Cartogalicia S.L.
- Red de Estaciones GNSS de Castilla y León del Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACYL).
- Red de Estaciones de Referencia (MERISTEMUM) de la Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia.
- Red Andaluza de Posicionamiento (RAP) del Instituto de Cartografía y Estadística de Andalucía.
- Red de Estaciones Base GPS de la Comunidad de Madrid (REBCM).
- Red Geodésica Activa (REGAM) de la Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia.
- Red Geodésica Activa de Navarra (RGAN) de la Comunidad Foral de Navarra.
- Red de Estaciones de Referencia GNSS del Euskadi (RGE) del Gobierno Vasco, Diputaciones Forales y Universidad del País Vasco.
- Red de Estaciones Permanentes GNSS de La Rioja.
- Red Extremeña de Posicionamiento GNSS (REP) de la Consejería de Fomento de la Junta de Extremadura.
- Red de Estaciones Permanentes de Canarias (REPC) de Cartográfica de Canarias, S. A. (GRAFCAN).
- Red GNSS Activa (RGAC) de la Universidad de Cantabria.
- Red GNSS Activa (RGAPA) del Principado de Asturias.
- Red Geodésica Activa de las Islas Baleares de SITIBSA.

En la Tabla 1 se muestran las entidades con estaciones permanentes procesadas en este proyecto. Las estaciones pertenecientes a una red internacional (EUREF, IGS) no se contabilizan en la red de ámbito geográfico inferior ya sea en la tabla o en el artículo en general.

| Red GNSS | Ámbito Geográfico | Nº de Estaciones |
|-----------------------|-------------------|------------------|
| Redes Internacionales | | |
| IGS | Mundial | 27 |
| EPN (EUREF) | Europa | 54 |
| Redes Nacionales | | |
| ERGNSS (IGN) | España | 19 |

| Red GNSS | Ámbito Geográfico | Nº de Estaciones |
|------------------|----------------------|------------------|
| RENEP (IGP) | Portugal | 33 |
| RGP (IGN) | Francia | 14 |
| Redes Regionales | | |
| ERVA | Comunidad Valenciana | 7 |
| CATNET | Cataluña | 9 |
| GALNET | Galicia | 17 |
| GRAFCAN | Islas Canarias | 17 |
| ITACYL | Castilla y León | 33 |
| MERISTEMUM | Región de Murcia | 7 |
| RAP | Andalucía | 22 |
| REGAM | Región de Murcia | 9 |
| REGAPA | Asturias | 8 |
| REBCM | Comunidad de Madrid | 6 |
| Red de La Rioja | La Rioja | 5 |
| REP | Extremadura | 12 |
| RGAC | Cantabria | 5 |
| RGAN | Navarra | 14 |
| RGE | País Vasco | 11 |
| SITIBSA | Islas Baleares | 8 |
| Otras | Europeas | 3 |
| | Total | 340 |

Tabla 1. Redes Procesadas en IBERRED.

2.2. Distribución geográfica de estaciones:

Se muestran el mapa de estaciones procesadas totales. Como se observa, se pretende el cálculo de las estaciones existentes en la Península Ibérica y alrededores, en especial la zona denominada Macaronesia.

Y en la Figura 2 las estaciones procesadas, con detalle en la Península Ibérica, que es la zona principal de estudio. Se puede observar como las regiones con menos estaciones son Aragón y Castilla la Mancha. En el caso de Aragón ya existe una red y existen conversaciones para la captación automática de los datos.



Figura 2. Estaciones Procesadas en IBERRED en la Península Ibérica y Baleares.

En el caso de Castilla la Mancha no existe aún una red de ámbito regional.

Los datos en formato RINEX son en algunos casos captados de servidores públicos de las distintas redes y en otros son directamente enviados a un servidor del IGN. Una vez que es chequeada la calidad de estos datos con el programa de Traducción, Edición, Corte/pega y Chequeo de Calidad (Translation, Editing, Cut/Splice and Quality Check, TEQC) [EST99], éstos quedan preparados en el servidor de datos para su cálculo.

Procesamiento

Las características generales del procesamiento, que tiene como fin la obtención de las coordenadas diarias de cada una de las estaciones, son las que siguen: el procesamiento se basa en la metodología general de resolución de ecuaciones de dobles diferencias de fase [LEI95], el sistema procesado es solamente el GPS hasta el momento y los productos de partida necesarios para el cálculo, en relación con efemérides o relojes de los satélites son productos precisos IGS [DOW09]. El programa de cálculo utilizado es Bernese en su versión 5.0 del Instituto de Astronomía de la Universidad de Berna (Astronomischen Instituts der Universität Bern, AIUB) [DAT07].

3.1. Cadencia de los procesamientos:

La cadencia temporal de realización de los cálculos depende de si es el procesamiento rutinario o los procesamientos ocasionales. De forma habitual y totalmente ato-

mática se realiza el procesamiento rutinario una vez por semana donde se calculan las coordenadas de las estaciones de los siete días de una semana. Ese cálculo se realiza con una demora respecto a las observaciones de unos 15 días. Esta dilación viene motivada por el propio retraso de los productos precisos del IGS. En cuanto a los procesamientos ocasionales, estos tienen diversos motivos. Por un lado la existencia de fallos en el automatismo de los cálculos o la aparición de nuevas observaciones que no estaban disponibles en el procesamiento rutinario, pero sobre todo y más importantes son los procesamientos ocasionales o reprocesamientos que viene motivados por la existencia de nuevos productos IGS con mejores cualidades o la existencia de nuevos modelos que supongan un aumento en la precisión de las coordenadas finales.

3.2. Reprocesamientos:

El reprocesamiento más reseñable realizado hasta el momento es el producido con la aparición de productos del IGS reprocesados, que nos permitirán usar un mismo Marco de Referencia Terrestre Internacional (International Terrestrial Reference Frame, ITRF), en concreto en el marco de referencia terrestre IGS05 [GEN10] estrechamente relacionado con ITRF2005. La existencia de estos nuevos productos, efemérides y relojes de satélites, permitió reprocesar todos los datos existentes hasta ese momento, desde el año 1996. Hasta entonces los cálculos se habían realizado en el mismo marco de referencia en que se iban publicando los productos del IGS, estos fueron ITRF94, ITRF96, ITRF97 e ITRF00. Cada cambio de marco supone en la práctica un salto en las series de coordenadas que puede llegar a ser de algunos centímetros. Al reprocesar se consiguió entonces unificar todos los cálculos en un mismo marco de referencia, lo que posibilita un análisis de las series de coordenadas más eficaz.

Además y paralelamente a este cambio, se consiguió unificar los modelos de calibración del centro de fase de las antenas a modelos absolutos, cuando antaño se empezó con relativos. Por otra parte, la forma de modelar la troposfera se unificó y el modelo de cargas oceánicas pasó de GOT99.2 a FES2004 [VAL08]. Todas estas circunstancias dieron lugar a un conjunto de coordenadas con un cálculo homogéneo. En abril del 2011 un nuevo marco de referencia se empezó a utilizar en los productos IGS, el IGS08, estrechamente relacionado a ITRF08 [ALT11-1], con lo que a partir de entonces conviven coordenadas en IGS05 [FER09] con coordenadas en IGS08 en nuestras series; a la

espera de la publicación de productos IGS reprocesados en IGS08 para volver a reprocesar y unificar en IGS08.

3.3. Agrupación (clustering):

En el modelo de dobles diferencias, el aumento del número de estaciones procesadas aumenta el tiempo de cálculo de forma exponencial, pudiendo llegar a hacer inviable el tratamiento de las grandes matrices que se forman, en el momento del cálculo de los parámetros, en una computadora normal. Dado el alto número de estaciones procesadas, hasta 340, y la metodología de dobles diferencias utilizadas, la única opción de cálculo en este caso es la agrupación de estaciones en pequeñas subredes, con estaciones en común, que si sean tratables por la computadora. En este caso, los grupos se crean automáticamente para cada día por criterios de mínima distancia y siempre con menos de 20 estaciones por subred. Posteriormente, se agrupan las ecuaciones normales del ajuste de las subredes [DAT07], obteniendo de esta forma un resultado similar a la no agrupación.

3.4. Características principales de procesamiento:

En la Tabla 2 se detallan las opciones del cálculo utilizadas en el procesamiento. En esta tabla, por un lado se tratan los modelos utilizados y por otro lado los parámetros estimados en el ajuste.

Resultados

Una vez realizados todos los cálculos y comprobado que existe una buena repetibilidad entre los datos de los días de cada semana se obtienen los resultados finales para cada día. Estos son, por un lado los ficheros en el Formato de Intercambio Independiente de Soluciones (Solution Independent Exchange Format, SINEX) [ROT06], donde se definen las coordenadas finales así como sus precisiones además de los parámetros principales del ajuste estadístico del que provienen. Por otro lado las soluciones troposféricas en forma del Retraso Total en el Zenit (Zenith Total Delay, ZTD) para cada hora. Estos últimos datos son apropiados para estudios de comportamiento de la atmósfera en Meteorología [ROM09]. Pero estos resultados meteorológicos tienen una antigüedad de 15 días cuando son obtenidos y pierden parte de su utilidad por su demora. Para cálculos en tiempo casi-real existe otro proyecto en el que participa el IGN a nivel europeo, el proyecto de determinación de vapor de agua con GNSS de EIG EUMETNET (EUMETNET EIG GNSS Water Vapour Programme, E-GVAP)

[VED05]. Las coordenadas más actuales de IBERRED son utilizadas como dato de partida en este proyecto.

4.1. Series Temporales de Coordenadas:

Las coordenadas diarias obtenidas residen en los ficheros SINEX de cada día y se encuentran en el marco de referencia terrestre en el que fueron calculadas, que depende del marco de referencia de las órbitas y de las coordenadas de las estaciones que definen el datum. En el proyecto IBERRED los datos desde el año 1996 hasta abril de 2011 se encuentran en IGS05 y los datos posteriores en IGS08 expresados todos ellos en coordenadas cartesianas tridimensionales geocéntricas (X, Y, Z). Agrupando en tablas por estación estas coordenadas para cada día, tendremos las series temporales de coordenadas cartesianas diarias expresadas en el marco de referencia terrestre. Así se construyen las series numéricas en ficheros independientes para cada estación y también su representación gráfica. En la siguiente Figura 3 se muestra un ejemplo de este tipo de serie para la estación de YEBE en la provincia de Guadalajara. Con el ejemplo de esta estación en particular se pretende mostrar las diferencias básicas de los diversos tipos de series.

En la Figura 3. se observa más dispersión en las coordenadas X y Z. Esto se explica ya dada la posición geográfica de la estación y la mayor indeterminación GNSS en el cálculo de la altitud.

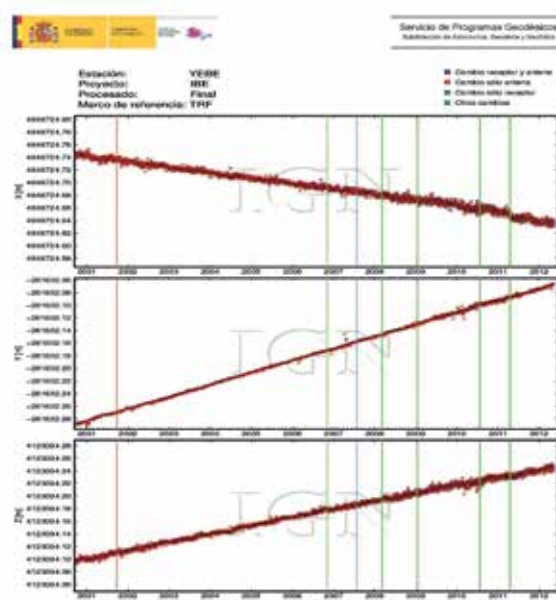


Figura 3. Serie Temporal de la estación YEBE (Yebe, Guadalajara) en coordenadas cartesianas tridimensionales geocéntricas con barras de error en el marco de referencia terrestre internacional (IGS05-IGS08).

| Aspecto | Característica |
|---|---|
| Modelos de medida | |
| Preprocesamiento | Preprocesamiento de fase baselina a baselina usando triples diferencias. En la mayor parte de los casos, los saltos de ciclo son fijados mediante la búsqueda simultánea en diferentes combinaciones lineales de L1 y L2. Si un salto de ciclo no puede fijarse, las observaciones afectadas son eliminadas y se establece una nueva ambigüedad de ciclo inicial. |
| Observable básico | Portadora de fase. El código se usa sólo para calcular los estados de los relojes de los receptores. |
| Máscara de elevación | 3° con ponderación dependiente de la elevación por $\cos^2(z)$. |
| Intervalo de datos | Para resolución de ambigüedades 30 segundos. Para procesamiento final 180 segundos. |
| Observable modelado | Dobles diferencias, con la combinación de libre ionosfera. |
| Calibraciones del centro de fase de la antenas terrestres | Correcciones absolutas del centro de fase basadas en modelo IGS08, se considera la calibración individual si ésta existe. |
| Calibraciones del centro de fase de la antenas de los satélites | - Absolutas del centro de fase basadas en el modelo IGS08. |
| Troposfera | Modelo a priori es Dry-Niell con estimaciones a intervalos horarios para cada estación usando la función de modelado Wet-Niell sin sigmas a priori. Los gradientes horizontales son estimados cada día y estación, en modo tilting, sin constreñimientos a priori. Estimación horaria para cada estación de los ZPD's, se generan los ficheros troposféricos. |
| Ionosfera | Se calcula un modelo regional. Sólo se usa en la resolución de ambigüedades. No es modelada en la solución final ya que se elimina formando la combinación libre ionosfera de L1 y L2. |
| Parámetros estimados (Valores a priori y sigmas) | |
| Ajuste | Algoritmos mínimos cuadrados ponderados. |
| Criterios de rechazo de observaciones | Los RINEX con menos del 10% de posibles observaciones son eliminados. Los Residuos de observaciones mayores de 2.5mm son eliminados. Las baselíneas donde se exceden los 5mm de sigma son excluidas. |
| Definición del Datum | Las estaciones del IGS con coordenadas y velocidades publicadas en IGS08: BRST, CAGL, CAGZ, GMAS, HERS, HERT, LROC, MAS1, MATE, ONSA, PDEL, RABT, SCOR, SFER, TLSE, VILL, YEBE, ZIMM son usadas con condición de mínimo constreñimiento de translación. |
| Troposfera | Constreñimientos absolutos y relativos: 5.0m Calculo de ficheros troposféricos con coordenadas de solución semanal. |
| Ionosfera | Uso de modelo regional ionosférico precalculado para resolución de ambigüedades con QIF. |
| Resolución de ambigüedades | Usando la estrategia quasi-ionosphere-free (QIF) con información regional de TEC a 10° |
| Estado de relojes | Relojes de satélite: las derivas se eliminan formando las dobles diferencias. Relojes receptor: derivas estimadas durante el preproceso usando las medidas de código. |
| Orbitas y ERP | Parámetros de rotación del polo y órbitas finales precisas del IGS. |
| Efemérides Planetarias | Modelo DE200. |
| Mareas | Según estándares IERS 1996/2000 |
| Cargas Oceánicas | Modelo FES2004 |
| Carga atmosférica | No se tiene en cuenta |

Tabla 2. Características principales de procesamiento.

Esta indeterminación de la altitud se proyecta en las coordenadas X y la Z cartesianas geocéntricas. Estas series, expresadas en este sistema de coordenadas, no son de gran utilidad práctica para detectar movimientos sobre la superficie terrestre, como si lo son las expresadas en coordenadas locales topocéntricas (Norte, Este, Elevación). Para ello se realiza la oportuna conversión al sistema topocéntrico local con origen en las coordenadas medias de cada estación. Habremos creado, en esta ocasión, las series temporales topocéntricas locales diarias de cada estación, como vemos en la Figura 4.

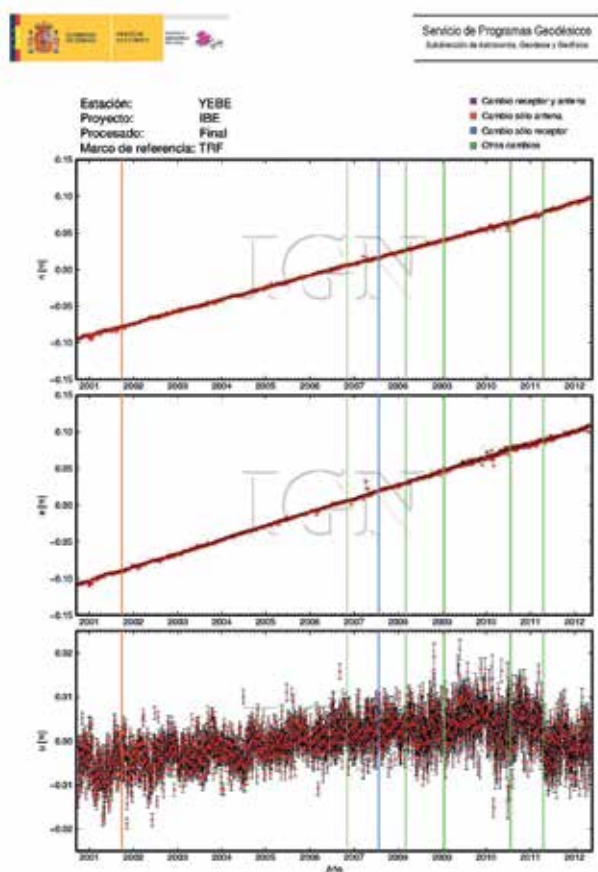


Figura 4. Serie Temporal de la estación YEBE (Yebes, Guadalajara) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error en el marco de referencia terrestre internacional (IGS05-IGS08).

Se puede apreciar como en esta serie, la mayor dispersión afecta a la altura. El desplazamiento en las coordenadas Norte y Este corresponde en su inmensa mayoría al propio movimiento geodinámico dentro de un marco terrestre de referencia dado. Este tipo de series son más útiles de interpretar para la mayoría de aplicaciones.

Una de las formas de eliminar el desplazamiento superficial de los puntos debidos en gran medida al movimiento de placas tectónicas, es expresar las coordenadas en otro

marco de referencia que en vez de ser de ámbito internacional sea de ámbito regional. En nuestro caso disponemos de un sistema de este tipo, el Sistema Terrestre de Referencia Europeo (European Terrestrial Reference System, ETRS89), que además de ser oficial en la España y Portugal continentales, cumple la condición de ser fijo a la parte estable de la placa euroasiática [ALT11-2], condición que se cumple en la mayor parte de la Península. En la práctica, la transformación consiste en la aplicación a las coordenadas cartesianas geocéntricas, expresadas en los marcos de referencia terrestre, las expresiones recomendadas por EUREF [BOU11] con el resultado de obtener coordenadas en la realización de ETRS89 llamada ETRF2000, por un lado desde IGS05 lo que se anota como ETRF2000(R05) o desde el IGS08 lo que se nombra como ETRF2000(R08). Estas coordenadas en ETRF2000 se pueden expresar tanto en el sistema de coordenadas cartesiano geocéntrico (X, Y, Z) como en el sistema de coordenadas topocéntrico local (Norte, Este, Elevación) a través de la oportuna conversión. En la Figura 5 se muestra la serie en coordenadas topocéntricas locales para la misma estación que antes, YEBE.

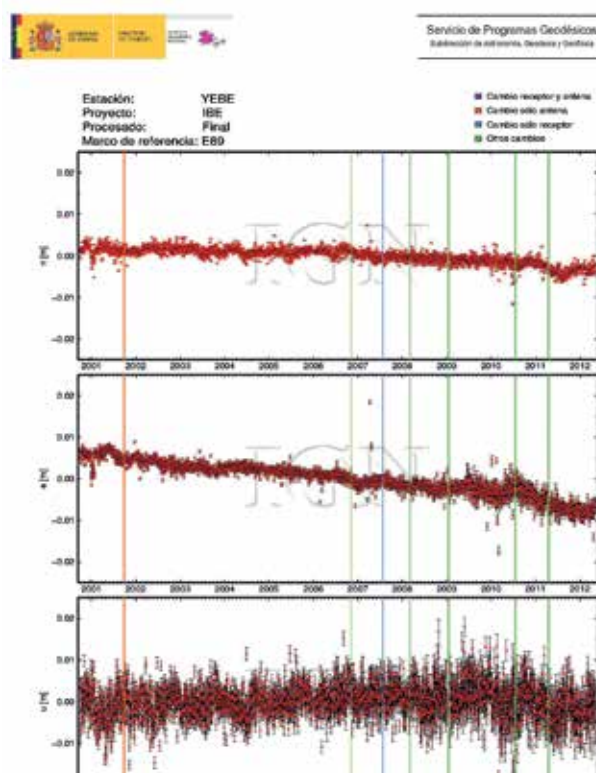


Figura 5. Serie Temporal de la estación YEBE (Yebes, Guadalajara) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error marco de referencia terrestre europeo (ETRF2000).

Se observa en la Figura 5 que prácticamente ha desapa-

recido el movimiento superficial de la estación aunque queda un ligero movimiento remanente que se puede explicar de forma general como un movimiento estrictamente local o que la localización del punto no cumple rigurosamente la pertenencia a la parte más estable de la placa euroasiática.

4.2. Cálculo de velocidades:

Al pretender utilizar estas series tal como están en el estudio de desplazamientos de los puntos en un periodo medio o largo, nos encontramos con que las series calculadas hasta este momento son series 'brutas'. Aún no se han estudiado los intervalos de datos que por una u otra cuestión sean erróneos y por lo tanto suprimibles o las coordenadas que por una u otra razón están fuera de tendencia (outliers), o incluso los saltos en las series que aparecen por diversas causas, la más frecuente un cambio de instrumental. En definitiva, a través del estudio de las series se encuentran estas anomalías que son debidamente anotadas y utilizadas para convertir las series en series limpias de anomalías.

En estas series 'limpias' ya si podemos estudiar los desplazamientos de los puntos. Una estrategia para encontrar anomalías de este tipo es el estudio de sus velocidades, que una vez vistas en el conjunto regional nos avisarán a simple vista de tendencias que no corresponden a lo esperable, de tal forma que iterativamente se refinarán, tanto las series, como las velocidades. Actualmente se está centrando el trabajo en la mejora de esta fase del proyecto.

Para el cálculo de estas velocidades se ha usado el programa de análisis de series temporales de coordenadas GNSS CATS [WIL08], que permite el cálculo de velocidades y el manejo de saltos en las series

Una vez limpiadas las series y seleccionadas aquellas con más de dos años y medio de datos, que es considerado el mínimo número de años para obtener unas velocidades fiables [BLE02], se calculan las velocidades tanto horizontales, a partir de las componentes Norte y Este, como verticales.



En las Figuras 6 y 7 se observan los vectores velocidad en el marco ETRF2000. Nos centramos en el área ibérica para observar mejor las características de las velocidades.



Figura 7. Mapa de velocidades en elevación en ETRF2000 de estaciones en área de la Península Ibérica.

Se concluye en cuanto a las velocidades horizontales, que en líneas generales el comportamiento respecto a la realización ETRF2000 de ETRS89 en la península ibérica no es homogéneo aumentando el tamaño de los vectores de Norte a Sur con un aparente giro en el sentido retrógrado. Lo que nos da una idea del comportamiento geodinámico de la península. También en líneas generales no aparece ningún hundimiento ni levantamiento generalizado. Además, en un sentido más particular se observan esta-

ciones con comportamientos fuera de la tónica general, como ACOR (A Coruña), AVEL (Lleida), BAND (Ourense), LORC y LORC2 (Murcia), etc., a veces sólo en la velocidad horizontal o vertical y otras en ambas. Para estudiar con detalle el comportamiento concreto de una estación es preciso analizar en detalle su serie temporal, como haremos con algunos ejemplos a continuación.

4.3. Casos Particulares:

Algunas estaciones presentan resultados concretos que es interesante analizar en detalle. Son muchas las estaciones que a través del estudio de sus series permiten estudiar diversos fenómenos. El caso de la estación permanente instalada en El Hierro, llamada FRON, es muy ilustrativo ya que la observación de una elevación en la estación, junto a otros datos volcánológicos permitió estudiar la fase pre-eruptiva de la erupción que comenzó en octubre de 2011 [CAN12]. Son numerosos los casos y fenómenos observados,

ya sean de deformación o por causas puramente instrumentales. Dada la imposibilidad de comentar todos los casos, se han escogido tres de ellos, que demuestran el poder de detección de fenómenos del análisis de las series de coordenadas.

4.3.1. LORC (Lorca, Murcia): En Lorca se han observado dos fenómenos que se ilustran en la Figura 8. Por un lado un pequeño salto en las series motivado por el terremoto de mayo de 2011, que se observa sobre todo en la componente Norte y que llega a ser de algún centímetro.

Por otro lado, se observa un hundimiento de la estación de alrededor de 9 cm anuales y que concuerda con resultados obtenidos con Radar Interferométrico de Apertura Sintética (Interferometric synthetic aperture radar, InSAR) [GON11] que apuntan a un posible origen hidrológico.

4.3.2. ACOR (A Coruña, Galicia): En este caso también se observan dos fenómenos ilustrados en la Figura 9. Por un lado un hundimiento progresivo desde mediados de 2002 hasta mediados del 2003. El motivo que lo originó fue instrumental, la degradación progresiva del amplificador

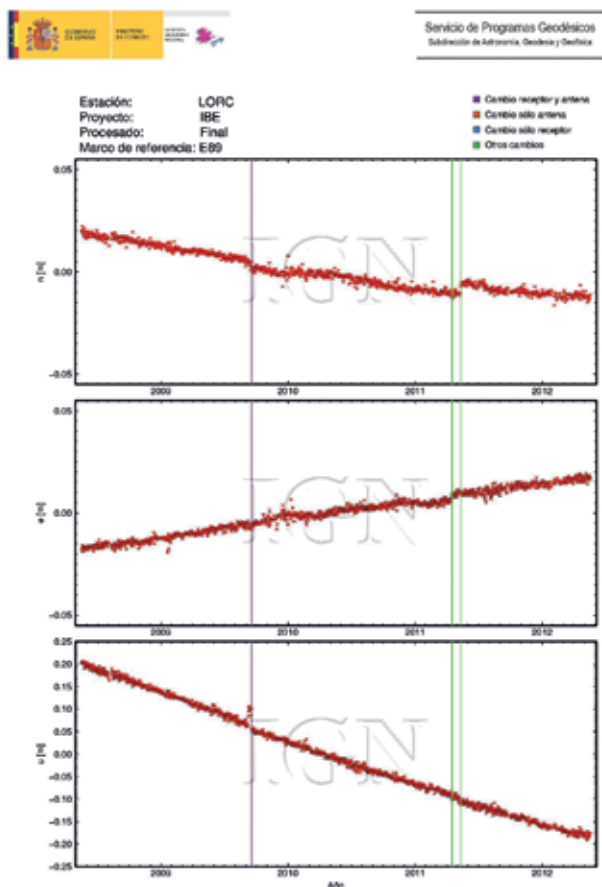


Figura 8. Serie Temporal de la estación LORC (Lorca, Murcia) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error marco de referencia terrestre europeo (ETRF2000).

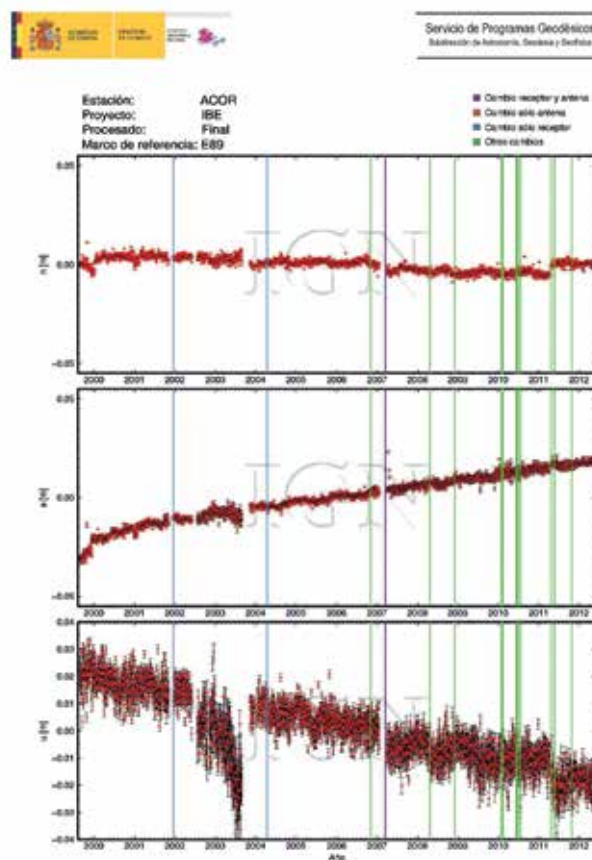


Figura 9. Serie Temporal de la estación ACOR (A Coruña, Galicia) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error marco de referencia terrestre europeo (ETRF2000).

de la antena hizo que la cantidad y calidad de los satélites seguidos fuera cada vez peor.

Por otro lado, se observa un hundimiento constante y progresivo junto con un desplazamiento al Este que ocurre en toda la serie registrada. Se ha comprobado con mediciones de nivelación de alta precisión que el edificio que contiene la estación, el mareógrafo de A Coruña y situado en el extremo de un muelle, se está inclinando hacia el Este ligeramente.

4.3.3. 3CAN (Tres Cantos, Madrid): En este caso lo que nos muestra la Figura 10, sobre todo en la componente vertical, es una oscilación con un periodo de algo más de un año y con una amplitud de hasta 4 cm. El origen de este fenómeno es más complejo, si elimináramos un origen en la tipología de la monumentación, podríamos pensar en un posible origen hidrológico dada su estacionalidad. Pero estas no son aun más que conjeturas a la espera de estudios adicionales.

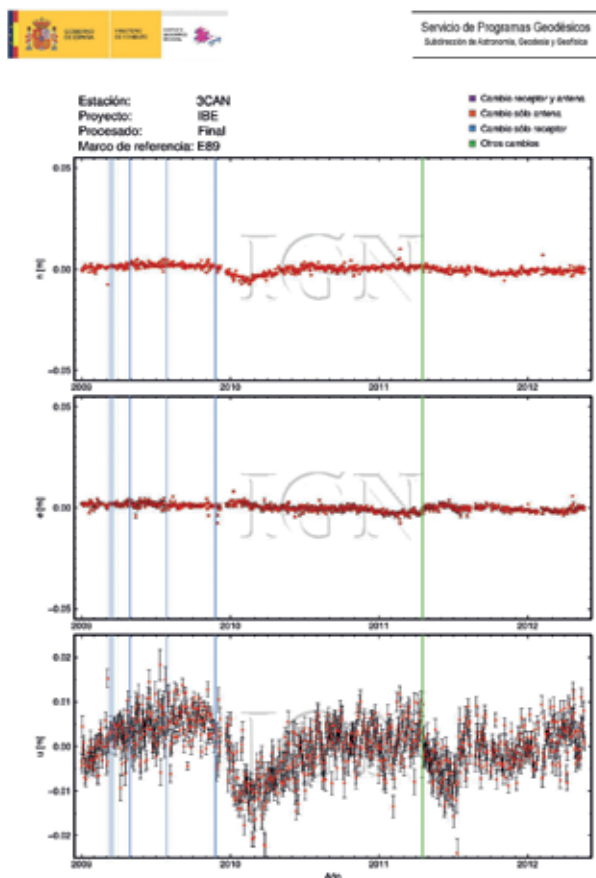


Figura 10. Serie Temporal de la estación 3CAN (Tres Cantos, Madrid) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error marco de referencia terrestre europeo (ETRF2000).

Conclusiones

El proyecto IBERRED detecta movimientos en la superficie terrestre con una precisión y distribución hasta hace pocos años difíciles de imaginar. Se demuestra que, dado el seguimiento constante que realiza, es la más adecuada de las herramientas posibles para cualquier estudio sobre los sistemas y marcos de referencia que utilizamos. Han sido varios los gestores de redes GNSS regionales que han pedido unas coordenadas adecuadas para sus estaciones al IGN.

El proyecto IBERRED ha sido el productor de esas coordenadas demostrando su utilidad práctica, ya que esas coordenadas son básicas cuando utilizamos las redes de correcciones en tiempo real. Las coordenadas calculadas, precisas y actualizadas, son el punto de partida para otros proyectos meteorológicos, como E-GVAP. IBERRED se comporta como un sensor de los movimientos de nuestro territorio, sus series nos muestran una gran variedad de fenómenos, ya sean instrumentales o físicos, como deformaciones de origen tectónico, volcánico o hidrológico.

Pero este proyecto dejaría de tener sentido si no continua actualizándose y mejorando. En primer lugar, en cuanto a las redes procesadas, que deberá tender a la completitud. La comunicación con los gestores de las distintas redes debería ser más activa y comprometida por ambas partes. **Pero técnicamente también se deberá mejorar la forma de estudio de las series, con análisis espectrales y análisis de ruido.** Se debe normalizar la forma en que se describen las anomalías de las series: saltos, ventanas de datos erróneos, puntos fuera de tendencia, que permitan su aprovechamiento en los reprocesamientos.

En breve se espera la publicación de productos reprocesados IGS, en IGS08, lo que implicará un nuevo reprocesamiento. El cálculo debe aprovechar las observaciones GLONASS y Galileo en un futuro cercano. Los resultados en las Islas Canarias han permitido detectar no sólo deformaciones puntuales, sino también permitirán estudios geodinámicos del área a más largo plazo. Muchas de las estaciones son de reciente instalación y es pronto para obtener conclusiones del archipiélago.

Este proyecto no sería posible sin el trabajo de tantas personas y la implicación de todas aquellas instituciones, Comunidades Autónomas y empresas que han hecho posible la existencia de cada una de las estaciones permanentes GNSS procesadas, que además en su gran mayoría son de disposición pública y gratuita. Nuestro agradecimiento por el gran valor que tiene su trabajo para la Geodesia.

Referencias

- [ALT11-1] Z. Altamimi, X. Collilieux, L. Métivier, "ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame", *Journal of Geodesy* 2011, vol. 85 pp. 1332-1394, Springer Science + Business Media, 0949-7714 electronic: 1432-1394
- [ALT11-2] Z. Altamimi, "European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89)", <http://etrs89.ensg.ign.fr/>
- [BLE02] G. Blewitt, D. Lavallee, "Effect of annual signals on geodetic velocity", *Journ. Geophys. Res.*, Vol. 107(B7), 10.1029/2001JB000570, 2002.
- [BOU11] C. Boucher, Z. Altamimi, "Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign", <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>
- [BRU09] C. Bruyninx, J. Legrand, F. Roosbeek, "EPN Status and Network Management" Florence, Italy, May 27-30 2009, EUREF Publication, *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (En prensa)*
- [CAN12] M.A. Cano, L. García-Cañada, M.J. García-Arias, E. González, M.J. Moreno, J. Pereda, "Trabajos Geodésicos del IGN en el Hierro Durante la crisis volcánica" X Topcart 2012, I Congreso Iberoamericano de Geomática y Ciencias de la Tierra en este volumen.
- [DAT07] R. Datch, P.F., Hugentobler, M. Meindl "User Manual of the Bernese GPS Software Version 5.0" (2007)
- [DOW09] J.M. Dow, R. E. Neilan, C. Rizos, "The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems", *Journal of Geodesy* (2009) vol. 83, pp 191–198, DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3
- [EST99] L. H. Estey, C. M. Meertens, "TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data", *GPS Solutions* (pub. by John Wiley & Sons), Vol. 3, No. 1, pp. 42-49, doi:10.1007/PL00012778, 1999.
- [FER09] R. Ferland, M. Piraszewski, "The IGS-combined station coordinates, earth rotation parameters and apparent geocenter", *Journal of Geodesy* 2009, vol. 83 p. 385, Springer Science + Business Media, 0949-7714 electronic: 1432-1394.
- [GEN10] G. Gendt, J. Griffiths, Th. Nischan, J. Ray, "IGS reprocessing -- Summary of orbit/clock combination & first quality assessment (2010)" presentation at IGS 2010 Workshop, Newcastle upon Tyne, UK, 30 June 2010.
- [GON11] P.J. González, J. Fernández, "Drought-driven transient aquifer compaction imaged using multitemporal satellite radar interferometry" *Geology*, Junio 2011, vol. 39, pp. 551-554, first published on May 4, 2011, doi:10.1130/G31900.1
- [GUR05] W. Gurtner, L. Estey (2005): "RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11". <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex211.txt>.
- [QUI04-1] R. Quirós, M. Valdés, L. Lozano, M.A. Cano, J.A.S. Sobrino, "Análisis de series de estaciones GPS permanentes ibéricas en el IGN" 4ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Figueira da Foz (Portugal). 3-7 febrero 2004.
- [QUI04-2] R. Quirós, J.A.S. Sobrino, M.A. Cano, M. Valdés, "National Report of Spain: Spanish national GPS Reference Stations Network (ERGPS)". *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie. Band 33. EUREF Publication No.13. Frankfurt am Main* 2004. ISBN 3-89888-885-1 pp 283.
- [LEI95] A. Leick, "GPS Satellite Surveying" (1995), Wiley, ISBN 0-471-30626-6.
- [ROM09] P.M. Romero, E. Cuevas, R. Ramos, M. Valdés, M. Schneider, "Programa de vapor de agua en columna del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña: Análisis e Intercomparación de diferentes Técnicas de Medida" de la Serie de Notas Técnicas digitales del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña de la AEMET Nota Técnica digital Nº 1, Abril 2009.
- [ROT06] M. Rothacher, D. Thaller, "IERS Message nº 103"

(2006). <http://www.iers.org>.

- [VAL08] M. Valdés, L. García-Cañada, M.A. Cano, "Estado actual de procesamiento en el Centro de Análisis Local de EUREF (IGE)" 6ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Tomar (Portugal) Febrero de 2008.

- [VED05] H. Vedel, "E-GVAP, Meteorology and Geodesy Sinergy" Presentation of E-GVAP at EUREF Symposium Vienna, Junio 2005.
- [WIL08] S.D.P. Williams "CATS : GPS coordinate time series analysis software" GPS Solutions, Vol. 12, Nº 2, Marzo 2008, pp. 147-153.

Sobre los autores

Marcelino Valdés Pérez de Vargas:

Ingeniero Técnica en Topografía por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Ingeniero en Geodesia y Cartografía por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Diplomado de Estudios Avanzados en el programa de Geodesia y Geomática del departamento "Ingeniería Cartográfica, Geodesia, y Fotogrametría-Expresión Gráfica".

Miembro del Cuerpo de Ingenieros Técnicos en Topografía desde 1999 y del Cuerpo de Ingenieros Geógrafos desde el 2004, ejerciendo como tal en la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, actualmente en la Subdirección General de Geodesia y Cartografía.

Profesor Asociado en el Departamento de Estratigrafía de la Facultad y Escuela Universitaria de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid desde el 2000.

Miguel Ángel Cano Villaverde:

Licenciado en Ciencias Matemáticas, especialidad de Astronomía y Geodesia por la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Diplomado de Estudios Avanzados en el programa de doctorado Ciencia y Tecnología de la Ingeniería Geodésica y Cartográfica. Miembro del Cuerpo de Ingenieros Geógrafos del IGN desde 2001.

Jefe del Servicio de Programas Geodésicos desde el año 2006, Subdirección General de Geodesia y Cartografía, Dirección General del Instituto

Geográfico Nacional de España.

Secretario de la Sección de Geodesia de la Comisión Española de Geodesia y Geofísica. Ha sido Profesor Asociado durante 3 años en el Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica de al ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía.

Laura García Cañada:

Licenciada en Ciencias Matemáticas, especialidad de Astronomía y Geodesia, por la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y Diplomada en Estudios Avanzados en Geodesia, Geofísica y Meteorología (UCM).

Forma parte del Servicio de Vigilancia Volcánica del IGN desde 2007 como Titulada Superior de Actividades Técnicas y Profesionales en el Observatorio Geofísico Central, Subdirección General de Astronomía, Geofísica y Aplicaciones Espaciales, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional de España.

Anteriormente ha sido Ayudante en la sección departamental de Astronomía y Geodesia (UCM) durante tres años y a trabajado como titulada superior y becaria FPI en el CSIC.

A lo largo de estos años ha participado en diversos proyectos de investigación competitivos y su trabajo de investigación, realizado principalmente en procesado, análisis y control de deformaciones con GPS, ha dado lugar a la presentación de más de 20 comunicaciones en congresos y publicaciones.