

Evaluación del posicionamiento preciso GNSS-NRTK en los límites fronterizos de redes activas regionales en el SW y SE de la Península Ibérica

M^a SELMIRA GARRIDO CARRETERO¹, ELENA GIMÉNEZ DE ORY²,
M^a CLARA DE LACY PÉREZ DE LOS COBOS¹, JUAN ANTONIO ARMENTEROS¹
ANTONIO J. GIL CRUZ¹

¹Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra (CEACTierra), Universidad de Jaén, Spain.

²Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura / Universidad Pontificia de Salamanca, Madrid, Spain.
mgarrido@ujaen.es

Recibido: 5/05/2014

Aceptado: 3/10/2014

Resumen

El posicionamiento RTK reduce los efectos de los errores orbitales y de refracción ionosférica y troposférica mediante la formación de dobles diferencias entre los observables de fase. Estos efectos se incrementan al aumentar la longitud de la línea de base. No obstante, el uso de correcciones generadas en tiempo real por una red GNSS activa permite que los errores dependientes de la distancia sean reducidos, aumentando la fiabilidad del sistema y la exactitud de posicionamiento en tiempo real. En las regiones fronterizas, la exactitud y la precisión de posicionamiento NRTK tienden a degradarse en los límites de la red donde el receptor móvil no está rodeado de estaciones de referencia y las correcciones NRTK son extrapoladas. La coherencia entre los marcos de referencia propagados a los usuarios por redes activas vecinas debe ser también controlada. En este estudio se presentan los resultados de los tests realizados considerando las soluciones simultáneas NRTK y post-proceso en puntos de control situados en las zonas fronterizas entre Portugal y la Comunidad de Andalucía y entre las comunidades autónomas de la Región de Murcia y de la Comunidad Valenciana, en el SW y SE de la Península Ibérica respectivamente, con el fin de analizar los servicios ofrecidos en tiempo real. El análisis está basado en cuatro redes regionales GNSS activas próximas a estas zonas de frontera: RENEP, RAP, REGAM y ERVA. Los resultados confirman que es posible alcanzar una precisión y exactitud a nivel centimétrico con el posicionamiento NRTK, incluso en regiones fronterizas y considerando soluciones NRTK extrapoladas en los límites analizados.

Palabras clave: GNSS, NRTK, Red Activa, Calidad, Precisión, Exactitud.

Testing precise GNSS-NRTK positioning at the limits of regional active networks in SW and SE of the Iberian Peninsula

Abstract

RTK positioning reduces the effects of orbit errors and ionospheric and tropospheric refraction by forming double-differences between the phase observables. These effects grow with increasing baseline length, however, the use of corrections generated in real-time from an active GNSS network allows the distance-dependent errors to be reduced, increasing the reliability of the system and the accuracy of real-time positioning. In border regions, the accuracy and precision of NRTK positioning tend to degrade at the limits of the network where the rover is not surrounded by reference stations and the NRTK corrections are extrapolated. The coherence between the reference frames propagated to the users by neighboring active networks should be also checked. In this study, the test results of post-processed and simulta-

neous NRTK positioning at test points located in the border areas between Portugal and the Community of Andalusia and between the autonomous communities of the Region of Murcia and the Valencian Community, in the SW and SE of the Iberian Peninsula respectively, are presented in order to analyze the real-time services offered. The analysis is based on four GNSS regional active networks present in these border areas: RENEP, RAP, REGAM and ERVA networks. The results confirm that it is possible to achieve centimetre-scale precision and accuracy with NRTK positioning, even in border regions considering extrapolated NRTK solutions in the limits analyzed.

Key words: GNSS, NRTK, Active Network, Quality, Precision, Accuracy.

Sumario: Introducción. 1. Redes activas en el SW y SE de la Península Ibérica. 2. Adquisición y procesamiento de datos de observación. 3. Discusión y Resultados. 4. Conclusiones. Agradecimientos. Referencias Bibliográficas.

Referencia normalizada

Garrido, M.S., Giménez, E., Lacy, M.C., Armenteros, J.A., Gil, A.J. (2014). Evaluación del posicionamiento preciso GNSS-NRTK en los límites fronterizos de redes activas regionales en el SW y SE de la Península Ibérica. *Física de la Tierra*, Vol. 26, 119-134.

Introducción

Las redes GNSS activas, también conocidas como redes RTK, han cobrado especial relevancia en los últimos años por ser de gran utilidad en un gran número de aplicaciones geomáticas que van más allá de las puramente topográfico-geodésicas. Ejemplo de ello es su utilización en agricultura de precisión (Freeland et al., 2012), guiado de maquinaria (Ortiz et al., 2013) o control de evolución de sistemas dunares (Garrido et al., 2013), entre otras novedosas aplicaciones. Las principales ventajas, desde el punto de vista técnico, que ofrece la solución de red RTK (*NRTK-Network based Real Time Kinematic Positioning*) son la modelización precisa de las fuentes de error que intervienen en el posicionamiento RTK (principalmente errores troposféricos, ionosféricos y orbitales), la mejora en la resolución de ambigüedades, la ampliación del área de trabajo al reducirse los errores dependientes de las distancia y la disposición de un marco de referencia estable (Euler y Zebhauser, 2003; Vollath et al., 2002). Desde un punto de vista práctico, las principales ventajas son el aumento de la rentabilidad y del rendimiento en aquellos proyectos que utilizan este tipo de red como marco de referencia activo (Wübbena et al., 2001). Los modelos VRS (Virtual Reference Station) (Landau et al., 2002) y MAC (Master Auxiliary Concept) (Euler et al., 2001), con sus soluciones comerciales MAX (Master-Auxiliary Corrections) e iMAX (individualized Master-Auxiliary Corrections) (Takac y Zelzer, 2008), son los más extendidos a la hora de generar las correcciones de red (Janssen, 2009). Todas ellas son compatibles con el formato estándar RTCM 3.0 (RTCM, 2004).

En la última década se han realizado en Europa numerosos trabajos con el fin de evaluar la calidad del posicionamiento RTK, entre los que se encuentran los llevados a cabo por Martin y McGovern (2012) en Irlanda, Garrido et al. (2011) y Giménez et al. (2011) en España, Edwards et al. (2010) y Aponte et al. (2009) en Reino Unido o Jämnäs et al. (2010) y Norin et al. (2009) en Suecia. La mayoría de los estudios se centran en el análisis del posicionamiento dentro de los límites de la red, sin embargo, es en las zonas fronterizas entre regiones vecinas, donde se dan una serie de circunstancias que pueden reducir el rendimiento en comparación con el

posicionamiento NRTK en óptimas condiciones geográficas. En primer lugar, la coherencia entre los marcos de referencia propagados por distintas redes activas puede ser un problema crítico en zonas de frontera (Benciolini et al., 2008). A ello se suma el hecho de que la exactitud y precisión del posicionamiento NRTK tienden a degradarse fuera de la red, donde las correcciones NRTK recibidas por el receptor móvil son extrapoladas. Con el fin de realizar un estudio de la fiabilidad de los servicios de posicionamiento preciso NRTK en zonas limítrofes entre regiones donde operan distintas redes activas, se han elegido dos áreas de estudio, en el SW y SE de la Península Ibérica respectivamente. La primera cubre la frontera entre Portugal y la Comunidad de Andalucía mientras que la segunda abarca la frontera entre la Comunidad Valenciana y la Región de Murcia (Fig. 1). En ambas zonas se analizará la consistencia entre los marcos de referencia implicados, la cobertura de los servicios y la exactitud y la precisión alcanzados en el posicionamiento NRTK.

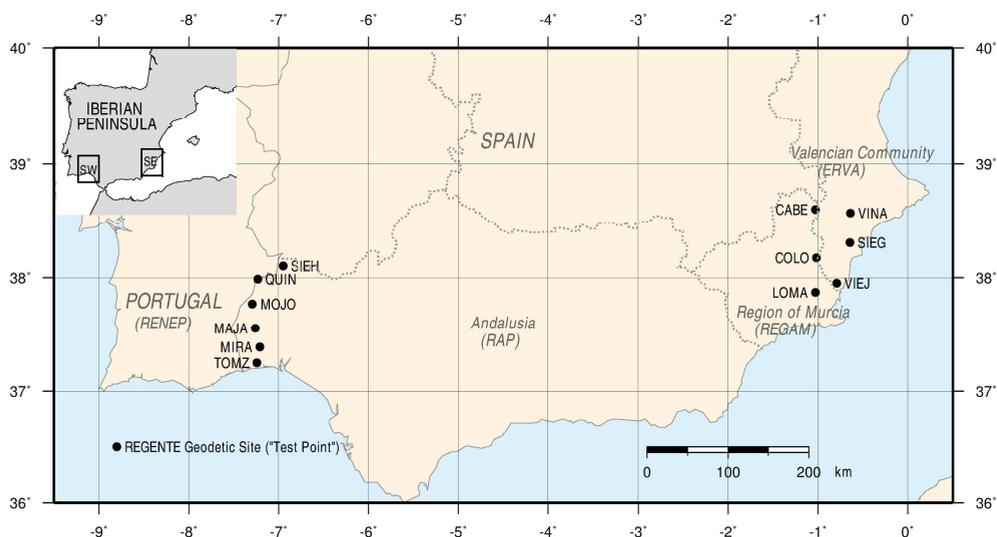


Fig. 1. Distribución de puntos de control junto a los límites fronterizos seleccionados como zonas de análisis del posicionamiento NRTK.

1. Redes activas en el SW y SE de la Península Ibérica

En el área de estudio localizada en el sudoeste de la Península Ibérica se considerarán dos redes de carácter activo: RENEP y RAP. RENEP es una red activa nacional portuguesa actualmente integrada por 44 estaciones de referencia distribuidas por la Península Ibérica (38), las islas Azores (4) y Madeira (2). Se trata de una red mixta en cuanto al equipamiento de sus estaciones y proporciona solución de red RTK basada en el modelo MAC generada utilizando datos GPS y GLONASS. Para este estudio se

dispone de las coordenadas de sus estaciones de referencia en el sistema ETRS89 (ETRF97). La Red Andaluza de Posicionamiento (RAP) es una red GPS activa que ofrece posicionamiento preciso en tiempo real en todo el territorio andaluz a través de un servicio gratuito de correcciones diferenciales. Esta infraestructura geodésica está gestionada por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA) junto con el Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz y está formada por 22 estaciones de referencia. Junto a la solución RTK basada en una única estación de referencia, ofrece solución de red basada en el modelo MAC en formato estándar RTCM 3.1. El marco de referencia de la RAP ha sido calculado en el sistema de referencia ETRS89 (ETRF05).

En el área de análisis localizada en el sudeste de la Península se utilizan los servicios de posicionamiento ofrecidos por las redes activas de carácter regional REGAM y ERVA. Ambas han sido determinadas en el sistema ITRS (ITRF05) a partir de estaciones de referencia pertenecientes a EUREF y transformadas a ETRS89 (ETRF05) siguiendo el procedimiento recomendado por Boucher y Altamimi (2011). La red ERVA (Red de Estaciones de Referencia de Valencia) es una red multipropósito de medición continua y posicionamiento por satélite que se inicia en 2005 con el fin de convertir a la Generalitat Valenciana en proveedor de datos GNSS, tanto en tiempo real (solución de red VRS - accesible a través de Internet utilizando el protocolo NTRIP) como en post-proceso. Este marco geodésico activo permite al usuario disponer de un sistema público de georreferenciación preciso y continuo, materializado en el territorio de la Comunidad Valenciana en el Sistema de Referencia Geodésico ETRS89. La red REGAM opera en el ámbito de la Región de Murcia. Con la adhesión de la Región de Murcia al Sistema Cartográfico Nacional, REGAM pasa a ser parte integrante del denominado Equipamiento Geográfico de Referencia Nacional y en consecuencia, de uso obligado en todos los procesos de elaboración de información geográfica y cartografía oficial. De las siete estaciones de referencia iniciales, ha pasado a contar actualmente con once. Las observaciones GPS y GLONASS realizadas desde sus estaciones son utilizadas para generar la solución de red dentro de la zona de cobertura de dicha red. La solución de red se facilita en los formatos iMAX y MAX, ambos basados en el modelo MAC.

2. Adquisición y procesado de datos de observación

Con el objeto de evaluar el posicionamiento en tiempo real basado en los cuatro marcos activos considerados, se han seleccionado una serie de parámetros de evaluación entre los que se encuentran: análisis del marco de referencia de cada red, cobertura de los servicios y precisión y exactitud alcanzados en el posicionamiento NRTK. Para ello es necesario disponer de un valor de referencia para la posición planimétrica y altimétrica de cada punto de control. Para llevar a cabo esta evaluación se han seleccionado 12 puntos de control, 6 en cada una de las franjas de análisis (Tabla 1). Todos ellos son vértices geodésicos pertenecientes a la red geodésica tridimensional española REGENTE (Barandillo y Quirós, 1996). Cada vértice REGENTE dispone de tres placas de centrado forzado que garantizan la repetibilidad del estacionamiento en caso

de ser necesario. Dada la especial configuración de las zonas de análisis, la elección de los puntos de control se ha realizado prestando especial atención a que estuvieran situados lo más cerca posible de la línea de frontera (Fig. 1).

Tabla 1. Puntos de control seleccionados en las dos zonas de análisis consideradas al sur de la Península Ibérica.

| Zona de análisis | Punto de control | Id. Punto | Provincia | Fecha de observación |
|------------------|----------------------|-----------|-----------|----------------------|
| SW | Majar de los Luengos | MAJA | Huelva | 04-11-09 |
| | Miramundo | MIRA | Huelva | 04-11-09 |
| | Mojón | MOJO | Huelva | 05-11-09 |
| | Quintina | QUIN | Huelva | 05-11-09 |
| | Sierra Herrera | SIEH | Huelva | 06-11-09 |
| | Torre Marruza | TOMZ | Huelva | 03-11-09 |
| SE | Cabezuelas | CABE | Murcia | 18-01-09 |
| | Los Colorados | COLO | Murcia | 17-01-09 |
| | La Loma | LOMA | Murcia | 16-01-09 |
| | Sierra Gorda | SIEG | Alicante | 19-01-09 |
| | La Vieja | VIEJ | Alicante | 17-01-09 |
| | Viña | VINA | Alicante | 18-01-09 |

En cada uno de los puntos de control se han obtenido varias muestras relativas al posicionamiento NRTK distribuidas a lo largo de tres sesiones de observación. Para cada punto se dispone de 45 posiciones NRTK (15 por sesión) por cada una de las redes activas y soluciones consideradas, distribuidas en tres sesiones no consecutivas (Tabla 2). El tiempo transcurrido entre dos sesiones correspondientes a una misma solución está entre los 60 y los 90 minutos. Es importante destacar que en cada registro NRTK se ha considerado una resolución independiente de ambigüedades de fase, siendo almacenada la posición sólo si el tiempo de resolución de ambigüedades (TTFA: *Time To Fix Ambiguities*) es inferior a 90 segundos. Además, se ha aplicado un control de calidad tanto horizontal como vertical antes del registro de cada posición, siendo fijadas las tolerancias o valores máximos de $CQ_{\text{Horizontal}}$ en 30 mm y de CQ_{Height} en 50 mm. Simultáneamente se ha realizado una observación en modo estático, utilizando para este propósito un splitter que permite la conexión de dos receptores GNSS a la misma antena geodésica (Ong y Gibbings, 2005). La instrumentación empleada está compuesta por dos receptores geodésicos GPS LEICA GX1230 doble frecuencia con 12 canales en L1, 12 canales en L2, código y fase y capacidad para trabajar en tiempo real, una antena geodésica compacta Leica AX1202 SmartTrack L1/L2 con plano de tierra integrado, un teléfono móvil Siemens MC75 con tarjeta SIM Movistar, un splitter GPSSource de dos salidas amplificado y diverso material auxiliar (cables de conexión, flexómetro para medida de alturas, basada para estacionamiento en pilar sobre centrado forzado, etc.).

Tabla 2. Tests realizados en cada punto de control y en cada zona de análisis.

| Zona de análisis | Puntos de control | Tests aplicados | Red activa | Solución NRTK | Datos por sesión | Nº de sesiones |
|------------------|-------------------|-----------------|------------|---------------|------------------|----------------|
| SW | 6 | A | RENEP | MAC | 15 | 3 |
| | | B | RAP | MAC | 15 | 3 |
| SE | 6 | A | REGAM | MAC | 15 | 3 |
| | | B | ERVA | VRS | 15 | 3 |

La observación estática ha sido post-procesada con respecto a las estaciones de referencia más cercanas de cada una de las redes. Las coordenadas de estas estaciones son constreñidas a ± 2 mm en las componentes norte y este y a ± 4 mm en altura. El procesado de las observaciones se ha realizado con Bernese V 5.0 (Dach et al., 2007). Los observables de fase han sido preprocesados en modo línea base utilizando triples diferencias. En la estimación final, basada en el modelo de las dobles diferencias combinación libre de ionosfera con efemérides precisas (Dow et al., 2005), se ha utilizado una máscara de elevación de 3 grados y se ha aplicado una ponderación en función de la elevación del satélite. Se han aplicado calibraciones del centro de fase de la antena utilizando correcciones absolutas del centro de fase y se han estimado parámetros específicos de la troposfera para todas las localizaciones. A priori, la refracción troposférica ha sido modelada utilizando el modelo Dry-Niell (Niell, 1996) y la componente húmeda restante estimada con carácter horario para cada estación usando la función Wet-Niell (Niell, 1996) sin sigmas a priori. Se ha utilizado el método QIF (*Quasi Ionosphere Free*) para fijar las ambigüedades como enteros.

3. Discusión y Resultados

3.1. Análisis de los marcos de referencia implicados

La Tabla 3 muestra las discrepancias altimétricas, planimétricas y espaciales resultado de comparar las coordenadas estimadas en post-proceso a partir de los distintos marcos activos considerados con la solución REGENTE (ETRS89) correspondiente a cada vértice o punto de control disponible en las reseñas facilitadas a través de Portal Web del Instituto Geográfico Nacional (<http://www.ign.es>).

Para la zona de análisis SW, las discrepancias en 3D entre las coordenadas estimadas con respecto a la RAP con las coordenadas oficiales REGENTE, oscilan entre los 0.012 m y los 0.038 m. Discrepancias ligeramente de menor magnitud se presentan al comparar las coordenadas estimadas respecto a RENE, oscilando entre los 0.008 m y los 0.038 m. En ambos casos los valores máximos coinciden en el punto de control "MOJO". No obstante, la magnitud de las discrepancias entre las coordenadas "oficiales" y las estimadas en post-proceso respecto a las redes activas de referencia son inferiores a los cuatro centímetros en todos los casos. Las discrepancias RAP-

REGENTE presentan en planimetría aproximadamente igual magnitud y sentido en todos los puntos de control, presentando un comportamiento más irregular en la componente altimétrica. Las discrepancias RENEP-REGENTE, no muestran una tendencia tan clara, ni en planimetría (aún siendo ligeramente menores) ni en altimetría. Para justificar el hecho de que las discrepancias RENEP-REGENTE sean inferiores a las de RAP-REGENTE hay que recurrir a la revisión del marco de referencia de las redes implicadas, poniendo de manifiesto la mayor similitud entre los marcos de RENEP (ETRF97) y REGENTE (ETRF96) que entre RAP (ETRF05) y el mencionado REGENTE.

Tabla 3. Discrepancias obtenidas al comparar la solución estimada en el sistema ETRS89 respecto a cada uno de los marcos considerados con la solución REGENTE.

| Zona SW | | RENEP_(ETRF97) - REGENTE | | | RAP_(ETRF05) - REGENTE | | |
|-----------------|---------------|---|---------------|---------------|--|---------------|--|
| Id. Pto. | 1D (m) | 2D (m) | 3D (m) | 1D (m) | 2D (m) | 3D (m) | |
| MAJA | -0.009 | 0.014 | 0.016 | 0.009 | 0.028 | 0.029 | |
| MIRA | -0.003 | 0.018 | 0.018 | 0.009 | 0.008 | 0.012 | |
| MOJO | -0.035 | 0.015 | 0.038 | -0.023 | 0.030 | 0.038 | |
| QUIN | 0.002 | 0.008 | 0.008 | 0.010 | 0.019 | 0.022 | |
| SIEH | 0.020 | 0.013 | 0.024 | 0.024 | 0.019 | 0.030 | |
| TOMZ | -0.006 | 0.005 | 0.008 | 0.003 | 0.028 | 0.029 | |
| Zona SE | | REGAM_(ETRF05) - REGENTE | | | ERVA_(ETRF05) - REGENTE | | |
| Id. Pto. | 1D (m) | 2D (m) | 3D (m) | 1D (m) | 2D (m) | 3D (m) | |
| CABE | -0.046 | 0.023 | 0.051 | -0.031 | 0.003 | 0.031 | |
| COLO | -0.023 | 0.018 | 0.029 | 0.004 | 0.007 | 0.008 | |
| LOMA | -0.030 | 0.034 | 0.045 | -0.019 | 0.021 | 0.028 | |
| SIEG | -0.021 | 0.031 | 0.038 | 0.016 | 0.012 | 0.020 | |
| VIEJ | -0.021 | 0.048 | 0.053 | -0.006 | 0.030 | 0.031 | |
| VINA | -0.045 | 0.044 | 0.062 | -0.017 | 0.026 | 0.031 | |

En la zona SE, todas las soluciones estimadas están referidas a ETRF05. La magnitud de las discrepancias entre las coordenadas “oficiales” y las estimadas en post-proceso respecto a REGAM son superiores a los 5 cm en el cincuenta por ciento de los casos, debido en gran parte a unas mayores diferencias en la componente altimétrica. Se puede apreciar que se reduce el sesgo hasta los 3 cm entre las posiciones estimadas si se tiene en cuenta la solución obtenida a partir de ERVA.

3.2. Evaluación del posicionamiento NRTK

Los servicios ofertados por las redes analizadas para conseguir posicionamiento preciso en tiempo real son accesibles en todos los puntos y en ambas zonas de análisis, detectándose únicamente una incidencia correspondiente a un corte del servidor de la red REGAM durante la segunda sesión de observación en el punto de control “LOMA”. Aunque sólo han sido registradas aquellas soluciones en las que el tiempo

en fijar las ambigüedades de fase es inferior al minuto y medio, los tiempos de inicialización se mantienen estables para cada una de las redes activas consideradas en las zonas de análisis SW y SE.

Los registros de posición en tiempo real en los puntos de control seleccionados permiten llevar a cabo el análisis de la precisión y exactitud conseguidas con el posicionamiento NRTK. La exactitud refleja el grado de proximidad de la posición registrada en tiempo real con respecto de la posición verdadera considerada o valor de referencia, en este caso, la solución post-proceso estimada a partir de la observación en modo estático. La precisión en las posiciones NRTK obtenidas para una misma localización permite analizar el grado de dispersión y evaluar la repetibilidad de las soluciones. Exactitud y precisión son términos que representan realmente conceptos cualitativos (ISO, 2008). La precisión se expresará numéricamente por la desviación estándar como medida de dispersión. Por su parte, una medición (o registro de posición en este caso) será más exacta cuanto menor sea el error de medida, definido según la VIM (*International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms*) (ISO, 2012) como la diferencia entre un valor medido y un valor de referencia. Los errores de medida (diferencia entre el valor promedio de la posición registrada en tiempo real y la solución post-proceso) tanto horizontal como vertical y la desviación estándar en las componentes “Este”, “Norte” y “Up” en la zona SW se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4. Error de medida horizontal (H) y vertical (V) y desviación estándar (s) en las componentes “Este”, “Norte” y “Up” alcanzados en la zona de análisis al sudoeste de la Península Ibérica (n: Tamaño muestral; ND: Valor “no disponible”).

| Zona | Error de medida (m) | | | | | | Desviación estándar (m) | | | | | |
|------|---------------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | RENEP | | | RAP | | | RENEP | | | RAP | | |
| SW | n | H | V | n | H | V | s _E | s _N | s _U | s _E | s _N | s _U |
| MAJA | 45 | 0.011 | 0.076 | 31 | 0.011 | 0.019 | 0.005 | 0.011 | 0.018 | 0.008 | 0.009 | 0.022 |
| MIRA | 2 | 0.023 | 0.005 | 38 | 0.024 | 0.042 | ND | ND | ND | 0.014 | 0.020 | 0.039 |
| MOJO | 45 | 0.011 | 0.033 | 43 | 0.012 | 0.025 | 0.007 | 0.006 | 0.020 | 0.008 | 0.011 | 0.031 |
| QUIN | 45 | 0.016 | 0.010 | 45 | 0.015 | 0.030 | 0.007 | 0.009 | 0.012 | 0.012 | 0.010 | 0.025 |
| SIEH | 45 | 0.013 | 0.018 | 43 | 0.014 | 0.040 | 0.008 | 0.011 | 0.021 | 0.010 | 0.011 | 0.038 |
| TOMZ | 45 | 0.018 | 0.026 | 45 | 0.007 | 0.014 | 0.007 | 0.011 | 0.024 | 0.005 | 0.006 | 0.016 |
| Min. | | 0.011 | 0.005 | | 0.007 | 0.014 | 0.005 | 0.006 | 0.012 | 0.005 | 0.006 | 0.016 |
| Max. | | 0.023 | 0.076 | | 0.024 | 0.042 | 0.008 | 0.011 | 0.024 | 0.014 | 0.020 | 0.039 |
| Mean | | 0.015 | 0.028 | | 0.014 | 0.028 | 0.007 | 0.010 | 0.019 | 0.010 | 0.011 | 0.029 |

Los valores de desviación estándar en las componentes este, norte y altura (s_E, s_N y s_U) para las redes RAP y RENEP consideradas, muestran que la dispersión en las componentes norte y este, es inferior a 2 cm y en la componente altimétrica inferior a 4 cm. En general, la precisión en las componentes este y norte es superior, prácticamente el doble, a la de la componente altimétrica, como a priori cabría esperar. Cabe destacar la homogeneidad de la precisión obtenida para las componente este, norte y

altura al utilizar las soluciones de red ofrecidas por las distintas redes evaluadas. La falta de registros en el vértice “MIRA” al considerar la red RENEP como red activa de referencia o la mayor dispersión de los registros RTK estimados con respecto a la RAP en este punto, probablemente sean causados por el efecto multicamino, al estar situado dicho vértice en una zona de pinar y con una gran estructura metálica de vigilancia forestal en sus proximidades. Pese a las malas condiciones de observación, este vértice es incluido entre los puntos de control seleccionados debido al reducido número de puntos de control disponibles próximos a la línea de frontera en esta zona de análisis. Al margen de este hecho, hay que destacar que no se aprecian diferencias significativas en el posicionamiento NRTK respecto de las dos redes activas consideradas teniendo en cuenta los parámetros de evaluación considerados, es decir, consistencia con el marco de referencia oficial, cobertura del servicio, tiempo de resolución de ambigüedades, precisión y exactitud. Ambas redes activas generan correcciones de red basadas en la tecnología MAC y ofrecen un servicio gratuito de posicionamiento preciso, por lo que no hay signos evidentes que recomienden utilizar una red frente a otra.

En la Figura 2 se presentan, a modo de ejemplo, las posiciones NRTK obtenidas a partir de RENEP y RAP en el punto de control “QUIN” (Quintina) de la zona SW.

El análisis gráfico detallado (Figura 2) de precisión y exactitud del posicionamiento NRTK respecto a la red RENEP refleja el alto grado de exactitud en planimetría. Hecho que se mantiene en altimetría, presentando las posiciones RTK una escasa variabilidad con respecto al valor de control. El grado de dispersión en torno al valor de control en 2D es muy reducido, encontrándose todas las posiciones registradas dentro de un círculo de 2 cm de radio.

Si se considera la solución NRTK obtenida a partir de la RAP, se observa que en este punto se mantiene el nivel de exactitud, sin embargo, el grado de dispersión en torno al valor de control es algo mayor, tanto desde un punto de vista planimétrico como altimétrico. Para las soluciones de RENEP y RAP, el análisis por sesiones, tanto de los valores de precisión como de exactitud, refleja una alta repetibilidad.

La Tabla 5 recoge los errores de medida horizontal y vertical y la desviación estándar en las componentes “Este”, “Norte” y “Up” para los puntos de control situados en la zona SE.

Los resultados alcanzados muestran que los errores de medida horizontales en el posicionamiento diferencial en tiempo real considerando la solución de red de REGAM, varían entre los 0.009 m de los puntos de control “COLO” y “VIEJ” y los 0.017 m de “SIEG” (no se tiene en cuenta el dato de 0.005 m correspondiente a “LOMA” al disponer este punto únicamente de una sesión de observación respecto a la red REGAM). En la componente altimétrica los valores de exactitud empeoran, oscilando los errores de medida entre los 0.011 m de “VIEJ” y los 0.035 m de “COLO”. Considerando la red ERVA, la mayor exactitud en la componente horizontal se alcanza en el punto “SIEG” con un error de medida de 0.017 m y en la altimétrica en “VIEJ” con 0.011 m.

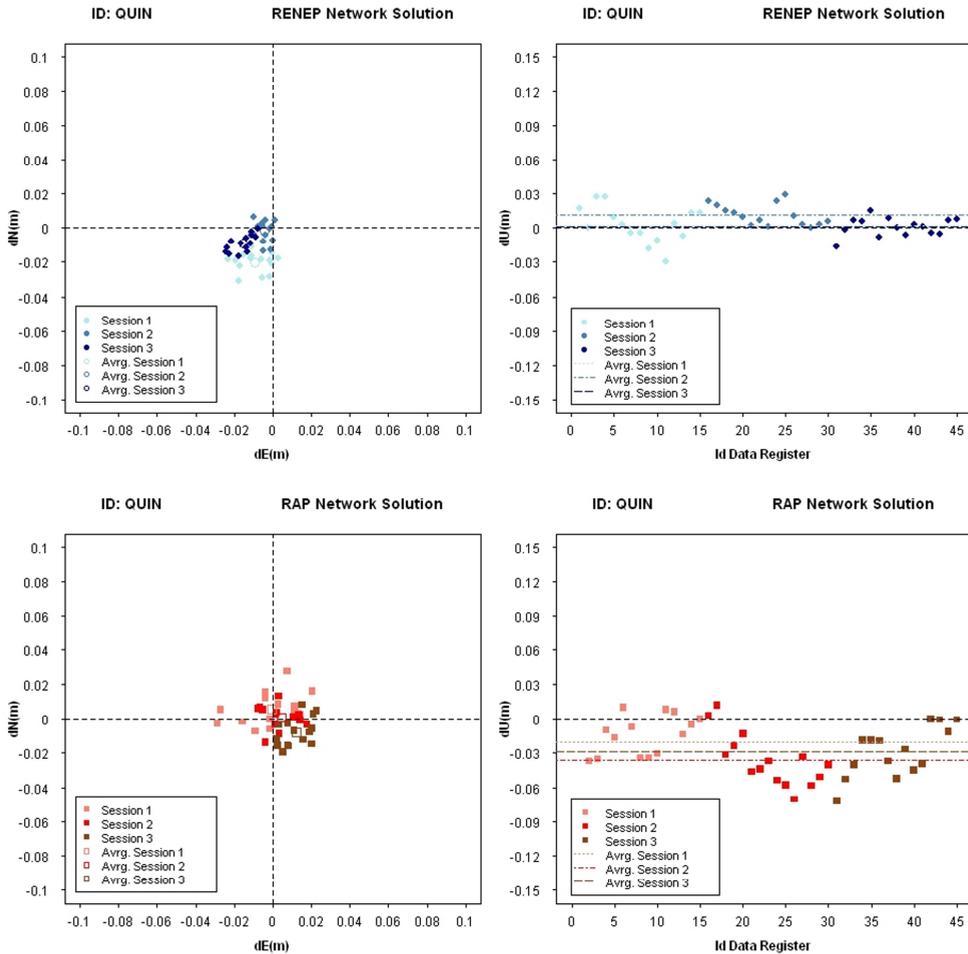


Fig. 2. Gráficos de dispersión y exactitud planimétrica y altimétrica, para las soluciones de red ofrecidas por RENE y RAP, en el punto de control “QUIN” de la zona sudoeste.

Por el contrario, los peores resultados de exactitud horizontal y vertical corresponden a “CABE” con 0.027 m y 0.048 m de error de medida respectivamente. Como cabía esperar, en la mayoría de los casos, la exactitud horizontal alcanzada es mejor que la exactitud vertical.

Tabla 5. Error de medida horizontal (H) y vertical (V) y desviación estándar (s) en las componentes “Este”, “Norte” y “Up” alcanzadas en la zona de análisis al sudeste de la Península Ibérica (n: Tamaño muestral).

| Zona | Error de medida (m) | | | | | | Desviación estándar (m) | | | | | |
|---------|---------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | REGAM | | | ERVA | | | REGAM | | | ERVA | | |
| SE | n | H | V | n | H | V | s _E | s _N | s _U | s _E | s _N | s _U |
| Id.Pto. | n | H | V | n | H | V | s _E | s _N | s _U | s _E | s _N | s _U |
| CABE | 45 | 0.012 | 0.019 | 45 | 0.027 | 0.048 | 0.006 | 0.006 | 0.014 | 0.006 | 0.011 | 0.023 |
| COLO | 45 | 0.009 | 0.035 | 45 | 0.025 | 0.022 | 0.007 | 0.008 | 0.037 | 0.016 | 0.017 | 0.027 |
| LOMA | 15 | 0.005 | 0.015 | 43 | 0.023 | 0.046 | 0.005 | 0.001 | 0.006 | 0.015 | 0.010 | 0.036 |
| SIEG | 45 | 0.017 | 0.027 | 45 | 0.017 | 0.014 | 0.010 | 0.013 | 0.038 | 0.009 | 0.008 | 0.020 |
| VIEJ | 45 | 0.009 | 0.011 | 45 | 0.021 | 0.011 | 0.004 | 0.006 | 0.015 | 0.007 | 0.010 | 0.013 |
| VINA | 25 | 0.016 | 0.029 | 45 | 0.021 | 0.033 | 0.009 | 0.008 | 0.037 | 0.011 | 0.012 | 0.041 |
| Min. | | 0.005 | 0.011 | | 0.017 | 0.011 | 0.004 | 0.001 | 0.006 | 0.006 | 0.008 | 0.013 |
| Max. | | 0.017 | 0.035 | | 0.027 | 0.048 | 0.010 | 0.013 | 0.038 | 0.016 | 0.017 | 0.041 |
| Mean | | 0.011 | 0.023 | | 0.022 | 0.029 | 0.007 | 0.007 | 0.025 | 0.011 | 0.011 | 0.027 |

Los valores de desviación estándar en las componentes este, norte y altura (s_E , s_N y s_U) para las redes REGAM y ERVA presentados en la Tabla 5, muestran que, también en esta zona, la dispersión en la componente norte y en la componente este, es mejor de 2 cm y en la componente altimétrica mejor de 4 cm.

Los resultados de exactitud, ligeramente mejores con REGAM que con ERVA, probablemente sean debidos a que REGAM dispone de un mayor número de estaciones de referencia próximas a la zona de análisis, más que al hecho de haber sido obtenidos a partir de distintos modelos (MAC con REGAM frente a VRS de ERVA).

Asimismo, cabe destacar la homogeneidad en la precisión obtenida en planimetría, no así para la componente altimétrica, al utilizar las soluciones de red ofrecidas por las distintas redes evaluadas con independencia del método empleado por ellas. Este hecho se comprueba con más detalle en la Figura 3, donde se recogen a modo de ejemplo las posiciones NRTK obtenidas a partir de REGAM y ERVA en el punto de control “COLO” de la zona SE.

4. Conclusiones

La coherencia entre las soluciones generadas por redes activas disponibles en regiones vecinas, gestionadas por diferentes organizaciones, se convierte en ocasiones en un problema crítico, siendo necesario garantizar al usuario que opere en la frontera entre dos o más redes de carácter activo que no obtendrá resultados significativamente distintos en función de la red que esté utilizando.

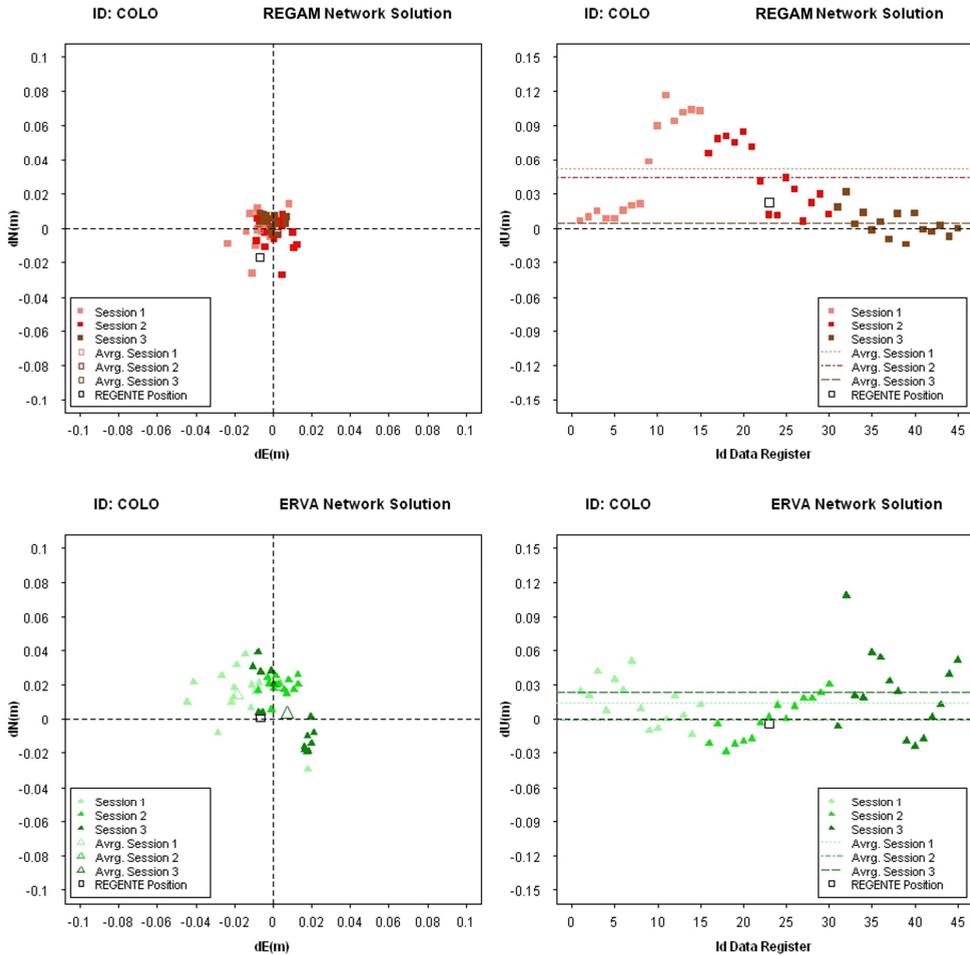


Fig. 3. Gráficos de dispersión y exactitud planimétrica y altimétrica, para las soluciones de red ofrecidas por REGAM y ERVA, en el punto de control “COLO” de la zona sudeste.

Con objeto de completar la información obtenida en campañas precedentes realizadas para evaluar el posicionamiento NRTK en el interior de marcos activos de carácter regional, se proyectan y realizan dos nuevas campañas de observación, en este caso en las zonas de frontera entre Portugal y Andalucía y entre la Región de Murcia y la Comunidad Valenciana. En ambas zonas de análisis nos encontramos ante el hecho de estar situados fuera de los límites geográficos definidos por las estaciones de referencia de dos redes activas que operan en regiones vecinas pero sin conexión entre ellas, por tanto, las correcciones de red facilitadas serán extrapoladas a la posición del receptor móvil. El objetivo final de las pruebas y análisis realizados es proporcionar, a

los profesionales del ámbito de la Geomática, información de utilidad para la realización de proyectos que requieran de alta precisión en este tipo de escenarios. Todo ello basado en resultados procedentes de datos de campo recogidos *ex profeso* y sobre los que se han aplicado procesos estadísticos rigurosos por un equipo independiente a los órganos de gestión de las redes analizadas. Para ello han sido aplicados test de control en doce vértices pertenecientes a la red REGENTE seleccionados como puntos de control y distribuidos en las proximidades de estas zonas de frontera durante dos campañas de observación realizadas en 2009. Cada punto de control dispone de coordenadas oficiales ETRS89 correspondientes al marco REGENTE facilitadas por el IGN. No obstante, se han determinado unas coordenadas precisas con respecto a las redes analizadas, disponiendo de una solución post-proceso para cada punto de control. Junto a estas soluciones, los registros de posición en tiempo real en los puntos de control han permitido llevar a cabo el análisis de la precisión y exactitud conseguidas con el posicionamiento NRTK. La exactitud o proximidad de la posición estimada respecto de la posición verdadera considerada, depende principalmente del marco de referencia considerado y está influenciada por errores de tipo sistemático no corregidos, mientras que la precisión, representada por la dispersión en las posiciones obtenidas para una misma localización, permite evaluar la repetibilidad de las soluciones. Los resultados confirman que es posible alcanzar una precisión y exactitud centimétrica en el posicionamiento en tiempo real aún en el caso de utilizar correcciones diferenciales extrapoladas. En todos los puntos se garantiza un nivel de exactitud centimétrico en el posicionamiento NRTK en zonas de frontera, presentando un mejor comportamiento la componente horizontal que la vertical. Es conveniente remarcar que, si bien el posicionamiento en tiempo real en las zonas limítrofes de las redes activas garantiza una buena exactitud en el promedio de múltiples registros, para una posición o registro aislado, su exactitud podría ser algo inferior (con errores de medida planimétricos de hasta cuatro centímetros, llegando incluso al decímetro en altimetría) como se desprende de las gráficas mostradas en el trabajo. Para una medida aislada no se puede evaluar la precisión puesto que no existe repetibilidad.

El análisis detallado de las sesiones de observación en cada punto de control no aporta información concluyente. No se aprecian tendencias significativas en los datos registrados en cada sesión, ni en la componente horizontal ni en la vertical, por lo que sería recomendable para futuras campañas aumentar el tiempo transcurrido entre las distintas sesiones de observación con el fin de introducir mayor variación tanto en las condiciones de la observación como en la geometría de la constelación.

Por último, destacar que no se han detectado diferencias significativas en el comportamiento de las redes activas consideradas en las zonas de frontera bajo análisis en cuanto a cobertura, tiempo de resolución de ambigüedades, precisión y exactitud, más allá de la propia metodología (MAC o VRS) a la hora de generar dichas correcciones de red. Todas ellas ofrecen servicios gratuitos de posicionamiento preciso en tiempo real y no se han obtenido resultados concluyentes que recomienden utilizar una red frente a otra en las zonas de análisis consideradas.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto AYA2010-15501) (FEDER - Fondo Europeo de Desarrollo Regional). Agradecemos la inestimable colaboración y el apoyo prestado por el Instituto Geográfico Portugués (RENEP), el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, el Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz (RAP), la Infraestructura de Datos Espaciales de la Región de Murcia (REGAM) y el Institut Cartogràfic Valencià (ERVA). La Figura 1 ha sido realizada con Generic Mapping Tools (Wessel y Smith, 1998). Los autores agradecen al revisor los comentarios y aportaciones realizadas que sin duda han contribuido a mejorar la calidad del trabajo presentado.

Referencias Bibliográficas

- APONTE, J., MENG, X., TILL, C., MOORE, T., BURBIDGE, M., DODSON, A. (2009). Quality assessment of a network-based RTK GPS service in the UK. *J. Appl. Geodesy*, 3, 25-34.
- BARANDILLO, A., QUIRÓS, R. (1996). Proyecto REGENTE. Una nueva red geodésica nacional. *Física de la Tierra*, 8, 23-28.
- BENCIOLINI, B., BIAGI, M., CRESPI, M., MANZINO, A. M., ROGGERO, M. (2008). Reference frames for GNSS positioning services: Some problems and proposed solutions. *J. Appl. Geodesy*, 2, 53-62.
- BOUCHER, C., ALTAMIMI, Z. (2011). Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. EUREF: <http://www.epncb.oma.be/>
- DACH, R., HUGENTOBLE, U., FRIDEZ, P., MEINDL, M. (2007). *Bernese GPS software version 5.0 user manual*. Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland.
- DOW, J. M., NEILAN, R. E., GENDT, G. (2005). The International GPS Service: celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade. *Adv. Space Res.*, 36, 320-326.
- EDWARDS, S. J., CLARKE, P. J., PENNA, N.T., GOEBELL, S. (2010). An examination of network RTK GPS services in Great Britain. *Surv. Rev.*, 42, 107-121.
- EULER, H. J., ZEBHAUSER, B. E. (2003). The use of standardized network RTK messages in rover applications for surveying. *Proc. of ION NTM 2003*, Anaheim, California.
- EULER, H. J., KEENAN, C. R., ZEBHAUSER, B. E., WÜBBENA, G. (2001). Study of a simplified approach in utilizing information from permanent reference station arrays". *14th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Institute of Navigation*, Salt Lake City, Utah.

- FREELAND, R. S., BUSCHERMOHLE, M. J., WILKERSON, J. B., PIERCE, J. C. (2012). Precision Agriculture-Assessing Virtual and Single Reference Stations. *Appl. Eng. in Agric.*, 28(6), 913-922.
- GARRIDO, M. S., GIMÉNEZ, E., RAMOS, M. I., GIL, A. J. (2013). A high spatio-temporal methodology for monitoring dunes morphology based on precise GPS-NRTK profiles: Test-case of Dune of Mónsul on the south-east Spanish coastline. *Aeolian Res.*, 8,75–84.
- GARRIDO, M. S., GIMÉNEZ, E., DE LACY, M. C., GIL, A. J. (2011). Testing precise positioning using RTK and NRTK corrections provided by MAC and VRS approaches in SE Spain. *Spatial Sci.*, 56, 169-184.
- GIMÉNEZ, E., GARRIDO, M. S., DE LACY, M. C., GIL, A. J. (2011). Comparing RTK positioning from updated REGAM and MERISTEMUM CORS networks in Southeast Spain. *J. Appl. Geodesy*, 5, 23–35.
- ISO (2012). International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 3rd ed. International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland).
- ISO (2008). Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO/IEC 98-3. International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland).
- JANSSEN, V. (2009). A Comparison of the VRS and MAC principles for network RTK". *Proceedings of the IGSS Symposium*. Surfers Paradise, Australia.
- JÄMTNÄS, L., SUNNA, J. EMARDSON, R., JONSSON, B. (2010). Quality Assessment of Network-RTK in the SWEPOS™ Network of Permanent GNSS Stations. *FIG Congress 2010, Facing the Challenges – Building the Capacity*. Sydney, Australia.
- LANDAU, H., VOLLATH, U., CHEN, X. (2002). Virtual reference station systems. *J. Global Positioning Syst.* 1 (2), 137-143.
- MARTIN, A., MCGOVERN, E. (2012). An Evaluation of the Performance of Network RTK GNSS Services in Ireland. *FIG Working Week 2012. Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage*. Rome, Italy.
- NIELL, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths". *J. Geophys. Res.*, 101, 3227- 3246.
- NORIN, D., HEDLING, G., JOHANSSON, D., PERSSON, S., LILJE, M. (2009). Practical evaluation of RTCM Network RTK Messages in the SWEPOS™ Network. *Proc. Of ION ITM 2009*, Anaheim, California.
- ONG KIM SUN, G., GIBBINGS, P. (2005). How well does the Virtual Reference Station (VRS) System of GPS Base Stations™ Perform in Comparison to Conventional RTK? *Spatial Sci.*, 50, 59-73.
- ORTIZ, B.V., BALKCOM, K. B., DUZY, L., VAN SANTEN, E., HARTZOG, D. L. (2013). Evaluation of agronomic and economic benefits of using RTK-GPS-based

- auto-steer guidance systems for peanut digging operations. *Precision Agric.*, 14, 357–375.
- RTCM (2004). RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version 3.0, RTCM Paper 30-2004/SC104-STD.
- TAKAC, F., ZELZER, O. (2008). The relationship between network RTK solutions MAC, VRS, PRS, FKP and i-MAX”. *Proc. of ION GNSS 2008*, Savannah, Georgia.
- VOLLATH, U., LANDAU, H., CHEN, X. (2002). Network RTK versus Single Base RTK – Understanding the Error Characteristics. *Proc. of ION-GPS 2002*, Portland, Oregon.
- WESSEL, P., SMITH, WHF (1998). New improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, 79, 579.
- WÜBBENA, G., BAGGE, A., SCHMITZ, M. (2001). Network-Based Techniques for RTK Applications. *Proc. of IGPS Symposium - GPS JIN 2001*. GPS Society, Japan Institute of Navigation. Tokyo, Japan.