

Centro de Análisis VLBI del Instituto Geográfico Nacional National Geographic Institute of Spain VLBI Analysis Center

PALOMAR, Christian ⁽¹⁾; AZCUE, Esther ⁽²⁾; PUENTE, Víctor ⁽³⁾

⁽¹⁾ Instituto Geográfico Nacional, Calle General Ibáñez Ibero Nº 3, Madrid, cpalomar@mitma.es

⁽²⁾ Instituto Geográfico Nacional, Calle General Ibáñez Ibero Nº 3, Madrid, eazcue@mitma.es

⁽³⁾ Instituto Geográfico Nacional, Calle General Ibáñez Ibero Nº 3, Madrid, vpuente@mitma.es

SUMMARY

The National Geographic Institute of Spain (IGN) has a solid experience regarding geodetic VLBI technical aspects, as well as an important observation infrastructure which is made of a 40 meter radiotelescope located at Yebes, participating in geodetic observations campaigns since 2008, and the VGOS radiotelescopes of the RAEGE project. In order to expand its contribution to the VLBI geodetic analysis, this institution created in 2018 an analysis team, becoming an official analysis center for the International VLBI Service of Geodesy and Astrometry (IVS) in march, 2020. In this contribution the main activities of this analysis center are presented.

PALABRAS CLAVE

Geodesia, Geodesy, Very Long Baseline Interferometry, Earth Orientation Parameters.

INTRODUCCIÓN

La motivación principal de este trabajo es presentar, de manera sucinta, las actividades que se desarrollan en el centro de análisis VLBI del Instituto Geográfico Nacional.

Atendiendo a las funciones que el RD 645/2020 atribuye a la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en materia de geodesia, el artículo 17, apartado c, encomienda a esta institución "La planificación y gestión de las redes geodésicas y gravimétrica de ámbito nacional, de la red de nivelación de alta precisión y de la red de mareógrafos que conforman el marco y Sistema de Referencia Geodésico español, la explotación y análisis de observaciones geodésicas y geodinámicas, el desarrollo de aplicaciones sobre sistemas de navegación y posicionamiento, así como la realización de trabajos y estudios relacionados".

El desempeño de esta tarea requiere de la creación y mantenimiento de una infraestructura geodésica de primer nivel para cada observable y sus datos obtenidos asociados. Es así como surge la idea de centro de análisis; de la necesidad de dar un sentido científico y en pro de la sociedad a los datos obtenidos por las distintas técnicas geodésicas.

En materia de GNSS, este centro tuvo su primer hito en 1998 con el procesamiento de los datos de la Red de Estaciones Permanentes GNSS (ERGNSS). En la actualidad, son numerosos los proyectos que involucran esta técnica; destacando, entre otros, el Servicio de Posicionamiento en Tiempo Real (SPTTR) que proporciona al usuario un sistema de posicionamiento en tiempo real basado en correcciones diferenciales, o el proyecto IBERRED cuyo propósito es obtener series temporales de posiciones y velocidades para cada una de las estaciones del área Ibérica.

El desarrollo de una infraestructura geodésica en la que tome parte la técnica VLBI, hace indispensable la creación de un centro de análisis en consonancia con el de GNSS visto. En primer término, es el centro astronómico de Yebes (Guadalajara, España) quien se postula como promotor de esta infraestructura convirtiéndose en un futuro no muy lejano en una Estación Geodésica Fundamental al implementar las técnicas de geodesia espacial más relevantes (GNSS, VLBI, SLR).

Yebes destaca por tener a su disposición un radiotelescopio de 40 metros de diámetro observando en campañas desde 2008, además de un radiotelescopio VGOS de 13 metros integrado en el proyecto de la Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales (RAEGE). Este proyecto tiene como objetivo la construcción, instalación y explotación con fines geodinámicos y

geodésicos de cuatro estaciones situadas en distintas placas tectónicas: Yebes (placa Euroasiática), Gran Canaria (placa Africana), Santa María (Azores, placa Africana), San Miguel (Azores, placa Norteamericana). Esta infraestructura geodésica singular estará integrada en el Global Geodetic Observing System (GGOS) [1].

Paralelamente surge, en 2018, como complemento al desarrollo y a la contribución del análisis geodésico VLBI, un grupo de trabajo destinado a tal fin que se consolida tras grandes esfuerzos en marzo de 2020 como centro de análisis oficial del Servicio Internacional de VLBI para la Geodesia y Astrometría (IVS) [2]. Este organismo es el encargado de proporcionar datos y productos VLBI a la comunidad científica. En relación a sus productos, se pueden destacar las contribuciones relativas al marco de referencia celeste (CRF), marco terrestre (TRF) y Parámetros de Orientación de la Tierra (EOP).

Dentro de las líneas de trabajo desarrolladas por el centro y que quedan plasmadas en el presente trabajo, se destacan, entre otras, el análisis operacional de las sesiones R1/R4 a través de un reprocesado histórico de datos (1982-2022) y el análisis de las sesiones intensivas para el año 2022.

ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL CENTRO DE ANÁLISIS

La arquitectura que hay tras este centro podría resumirse en la combinación de dos elementos fundamentales: Scripts que permiten la ejecución de tareas automatizadas y software de procesamiento de datos VLBI. El flujo de trabajo comienza con la obtención de los datos necesarios que permiten al software llevar a cabo su tarea de procesado. Estos datos proceden del IVS anteriormente citado y del Servicio Internacional para la Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) [3]. Destacamos como datos de entrada los EOP a priori, los ficheros relativos a los códigos de las estaciones implicadas en la observación o *Number Stations Codes (ns-codes)*, así como aquellos ficheros que contienen datos sobre la excentricidad de las antenas o *Eccentricity Data (ECCDAT)*. El software de procesamiento utilizado por este centro es Where (Kirvik et al., 2017). Where es un software libre de Linux desarrollado y mantenido por la *Norweigeian Mapping Authority, (NMA)* escrito en Python, cuya gran ventaja es que descarga de forma automática los ficheros de configuración. La interacción con el software puede realizarse de dos maneras: a través de línea de comandos para lanzar una sesión individual, y a través de una interfaz gráfica propia del programa (There) que es la que permite las múltiples opciones de edición de cara a dar por satisfactorio el resultado de una sesión procesada. Esta interfaz permite entre otras cosas detectar y eliminar valores atípicos llevando a cabo un filtrado por estación de todas las que intervienen en el conjunto de la observación, y localizar y reparar *clock breaks*.

Tras la fase de procesado, el resultado es un fichero tipo Solution INdependent EXchange (SINEX) donde aparecen reflejados datos relativos a las coordenadas de las radio fuentes (marco celeste), coordenadas de las estaciones implicadas en la observación (marco terrestre) y EOP. El proceso finaliza tras una comprobación por parte del analista de la calidad de los resultados obtenidos primero, y enviando en segundo lugar dicho SINEX al repositorio de productos VLBI del *Crustal Dynamics Data Information system (CDDIS)* de la NASA.

A modo de ilustración, y con el propósito de dar sentido a una parte tan esencial como es el software dentro de la arquitectura del centro de análisis, se muestran, en la tabla siguiente, algunas de las características más relevantes del mismo:

Tabla 1: Características principales de Where.

Origen de los datos de entrada	VgosDB
EOP a priori	Bulletin B (IERS)
Modelo de troposfera	VMF1 (Böhm et al., 2006)
Modelo de precesión/nutación a priori	IAU_2006/2000A
Modelo de corrección de los EOP	IERS 2010 (Petit G. y Luzum B., 2010)
Método de interpolación de los EOP a priori	Lagrange
Modelo de marea terrestre	IERS 2010

Carga oceánica	TPXO.7.2 (Egbert, G.D. y L. Erofeeva., 2002)
Marea oceánica polar	IERS 2010
Deformación térmica de la antena	(Nothnagel, A., 2009)
Marco de referencia terrestre	ITRF 2014 (Altamimi et al., 2016)
Marco de referencia celeste	ICRF 3 (Charlot P et al., 2020)
Modelo de estimación	Filtro de Kalman

REPROCESADO HISTÓRICO DE DATOS (1982-2022)

El reprocesado histórico comprende un análisis de los resultados obtenidos para un conjunto histórico de datos de aproximadamente 40 años. Los datos a utilizar provienen de las sesiones tipo R1/R4 cuyas características se mencionarán en líneas posteriores. El propósito de este trabajo es contribuir a las futuras realizaciones del marco terrestre junto con las soluciones proporcionadas por otros centros de análisis.

Las sesiones R1/R4 son un tipología de sesión VLBI llevada a cabo dos días en semana (lunes y jueves), con una duración de 24 horas. Los productos obtenidos se clasifican en: parámetros de orientación de la tierra (coordenadas x e y del polo, tiempo rotacional terrestre, offsets del polo), coordenadas cartesianas tridimensionales de las estaciones, coordenadas ecuatoriales absolutas de las radio fuentes, retardos en la componente húmeda de la troposfera y sesgo en los relojes.

De cara a evaluar la calidad de los datos obtenidos en el reprocesado, se escogió una muestra aleatoria de los mismos de 5 años de duración (2016-2021). Estos datos son el resultado de las diferencias existentes entre los distintos EOP del centro de análisis del IGN frente a los parámetros de referencia del IERS.

El propósito del estudio consistió en estimar un intervalo de confianza para la media poblacional de las diferencias de cada EOP con una fiabilidad de 0.9973. Para ello fue preciso, en primer lugar, normalizar las diferencias obtenidas y observar en su conjunto si el vector obtenido (vector de residuos) seguía una distribución normal.

Garantizar la "normalidad" del vector de residuos implica prescindir de todos aquellos valores que no cumplan con una tendencia establecida; es lo que se conoce en estadística como valores atípicos. El primer paso para asegurar la calidad de las diferencias obtenidas fue llevar a cabo un test de detección de estos mismos valores. Para garantizar la fiabilidad en los resultados de 0.9973, se procedió a detectar y posteriormente eliminar todos aquellos valores que superaran en 3 veces la desviación típica para una distribución normal estándar.

Tras haber llevado a cabo dicho test, se procedió a hacer un estudio de la función de densidad de los datos (Figuras 1-5) y su representación gráfica para observar la distribución de los mismos, simetría y apuntamiento.

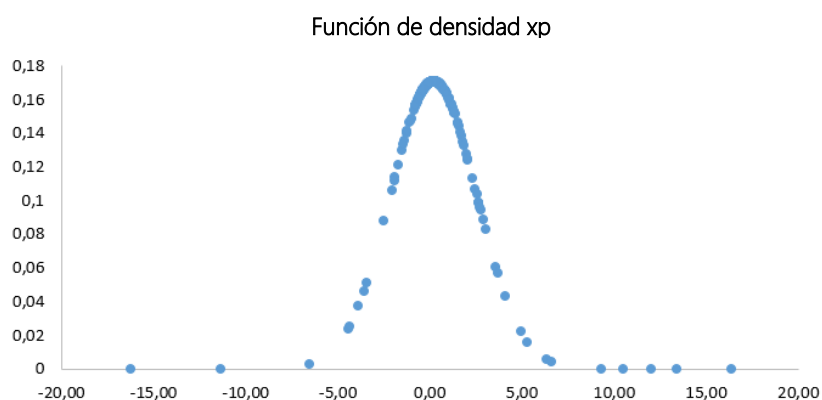


Figura 1: Función de densidad de la componente x del polo.

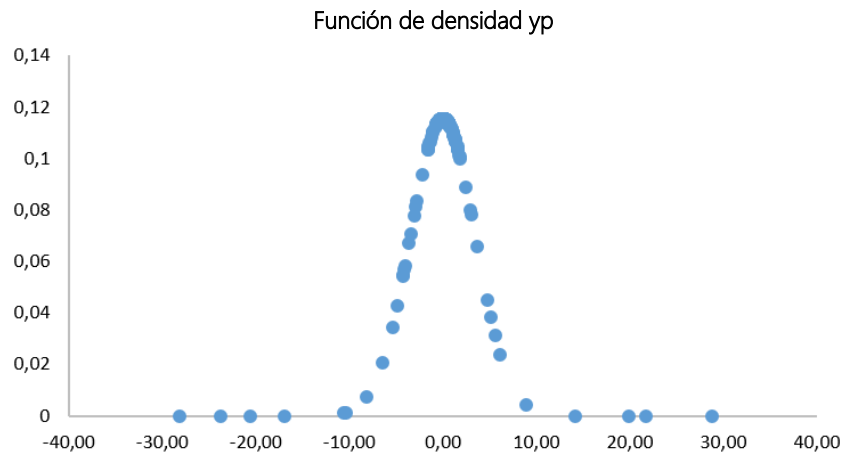


Figura 2: Función de densidad de la componente y del polo.

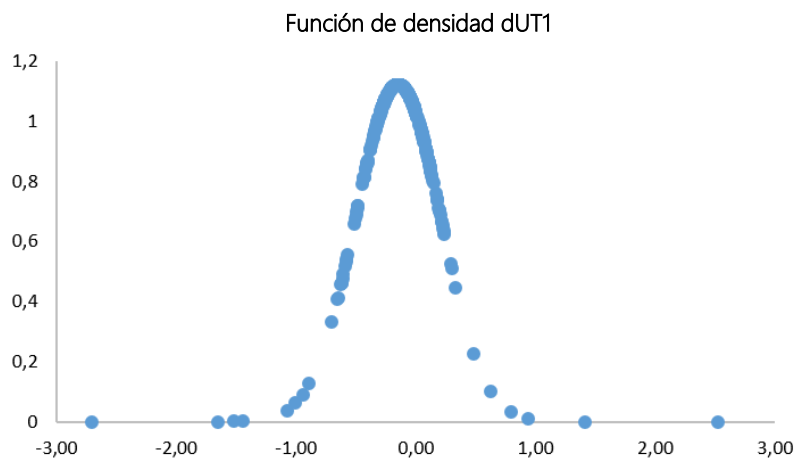


Figura 3: Función de densidad de la componente rotacional $dUT1$.

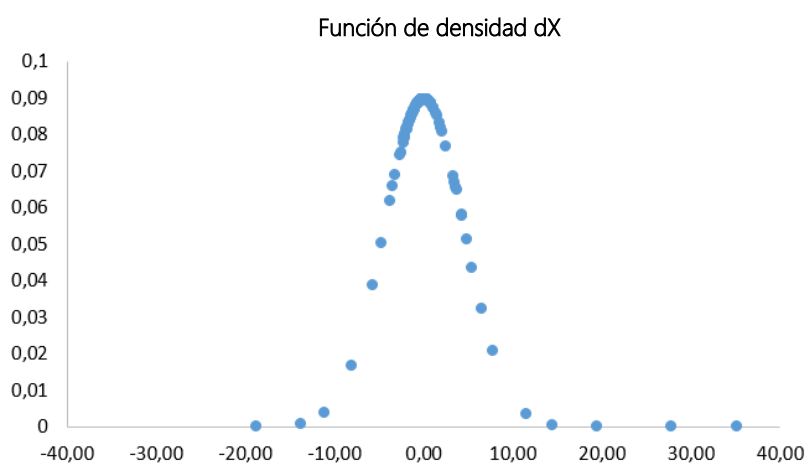


Figura 4: Función de densidad de la componente x del offset del polo.

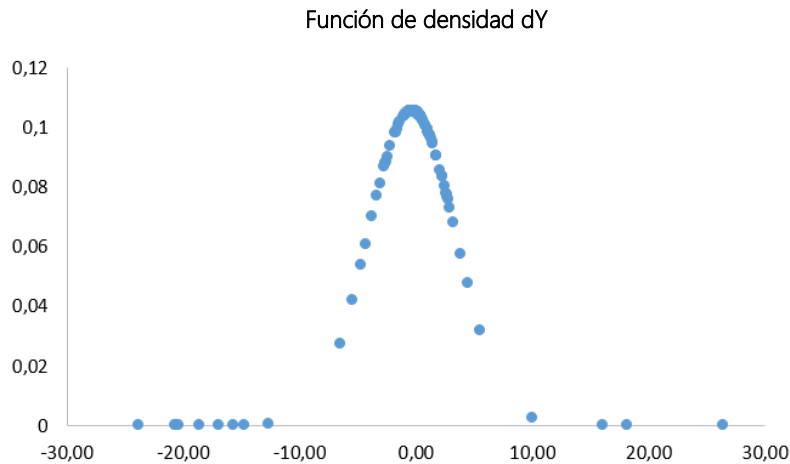


Figura 5: Función de densidad de la componente y del offset del polo.

El intervalo de confianza calculado para cada EOP se muestra en la tabla 2, junto con una tabla anexa (tabla 3) final de resultados. En esta última puede apreciarse el valor más probable de cada EOP con su error medio cuadrático (emc) asociado. Los resultados obtenidos se encuentran en el mismo orden de magnitud de la unidad correspondiente a cada EOP.

Tabla 2: Estimación intervalo de confianza para la media de cada EOP.

EOP	Media	emc	n	$Z(\alpha/2)$	$\bar{x} - z_{\alpha/2} \sigma / \sqrt{n}$	$\bar{x} + z_{\alpha/2} \sigma / \sqrt{n}$	Unidad
xp	0.225	2.338	401	3.00	-0.125	0.576	mas
yp	-0.016	3.455	405	3.00	-0.531	0.499	mas
dUT1	-0.149	0.355	400	3.00	-0.202	-0.095	ms
dX	0.150	4.457	401	3.00	-0.517	0.818	mas
dY	-0.294	3.783	403	3.00	-0.859	0.272	mas

Atendiendo a las variables de la tabla, n (tamaño de la muestra) es el número de residuos finalmente aceptado tras realizar el test de detección de valores atípicos, emc el error medio cuadrático para una observación aislada y $Z(\alpha/2)$ representa el valor crítico asociado a un nivel de confianza $(1-\alpha)$ de 0.9973, con α como nivel de significación para una distribución normal estándar.

Tabla 3: Estadísticos finales.

EOP	Media	emc	Unidad
xp	0.225	0.350	mas
yp	-0.016	0.515	mas
dUT1	-0.149	0.053	ms
dX	0.150	0.668	mas
dY	-0.294	0.565	mas

Donde, en este caso, el error medio cuadrático (emc) hace referencia al propio de la media.

ANÁLISIS DE LAS SESIONES INTENSIVAS PARA EL AÑO 2022

En este apartado se describen las principales características de las sesiones intensivas, presentándose además un estudio analítico basado en la comparativa de resultados obtenidos frente a otros centros para el año 2022.

Las sesiones intensivas presentan las siguientes características: son sesiones diarias en las que intervienen estaciones en una

configuración de línea base única o formando triángulos. Estas líneas base se caracterizan por ser de gran longitud. Otra característica importante, es que son sesiones de corta duración (1 hora). El propósito principal de este tipo de sesiones es la determinación del parámetro rotacional dUT1.

En lo referente a este tipo de sesiones, el centro de análisis VLBI del IGN pretende dar un salto cualitativo llevando a cabo un análisis operacional de las mismas una vez haya concluido el periodo de prueba.

La siguiente figura muestra una representación del dUT1 para el periodo del año 2022. En el eje de abscisas se muestra el rango temporal expresado en día del año (DOY); en el de ordenadas se muestra el valor del dUT1 expresado en milisegundos (ms).

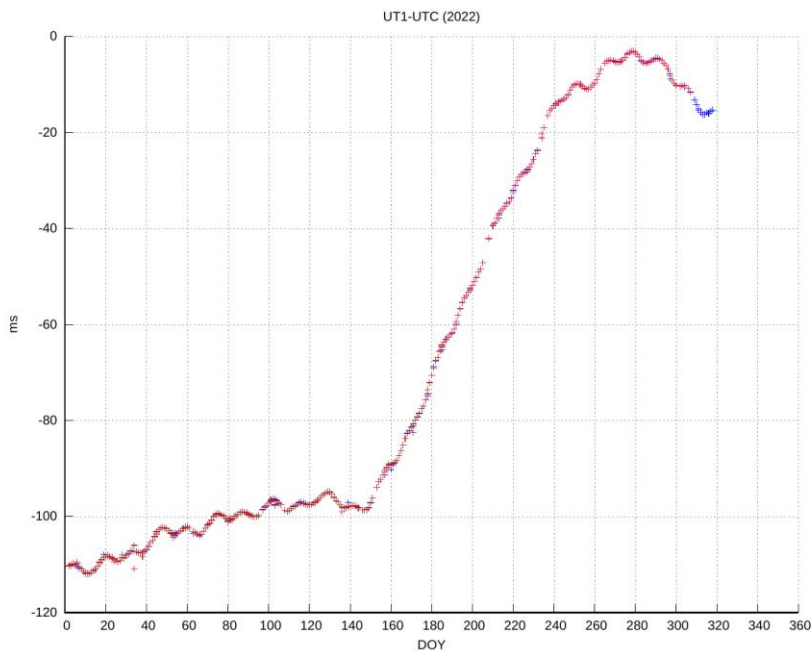


Figura 6: Representación gráfica del dUT1 de los distintos centros de análisis.

El objetivo del estudio, tal y como se mencionó en líneas anteriores, consistió en la comparación de los resultados obtenidos por el centro de análisis del IGN para el dUT1 frente a los de otros centros homólogos. Los centros de comparación fueron los siguientes: *U.S. Naval Observatory, (USNO)*; *Goddard Space Flight Center, (GSFC)*; *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, (BKG)*.

Debido a una mayor disponibilidad y continuidad de datos, se escogió como centro de referencia para el estudio BKG. Es importante reseñar que todos los valores estimados se encuentran referidos a una fiabilidad de 0.9973.

El análisis se desarrolló de la siguiente manera:

En primer lugar, y como sucedió con el estudio de las sesiones R1/R4, hubo que realizar un test de detección de valores atípicos, previa normalización de los datos. Éstos a su vez proceden de las diferencias obtenidas para los distintos centros tomando como referencia el del BKG antes mencionado. Una vez realizado el test, el siguiente paso consistió en la obtención de los histogramas de frecuencias normalizadas para cada centro (figuras 7-9).

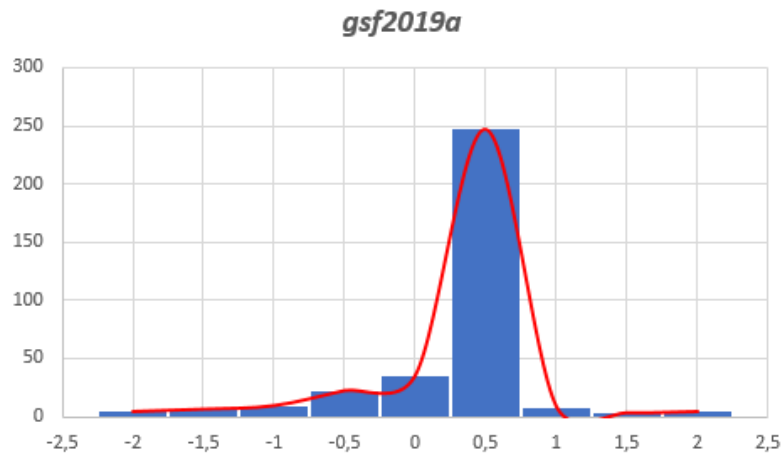


Figura 7: Histograma de frecuencias normalizadas para gsf2019a.

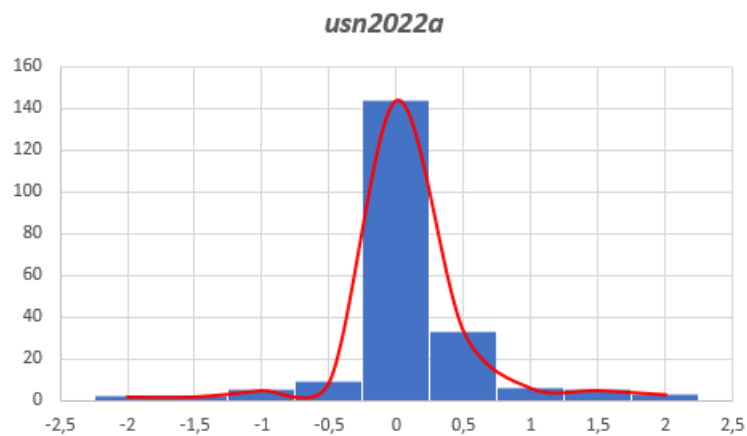


Figura 8: Histograma de frecuencias normalizadas para usn2022a.

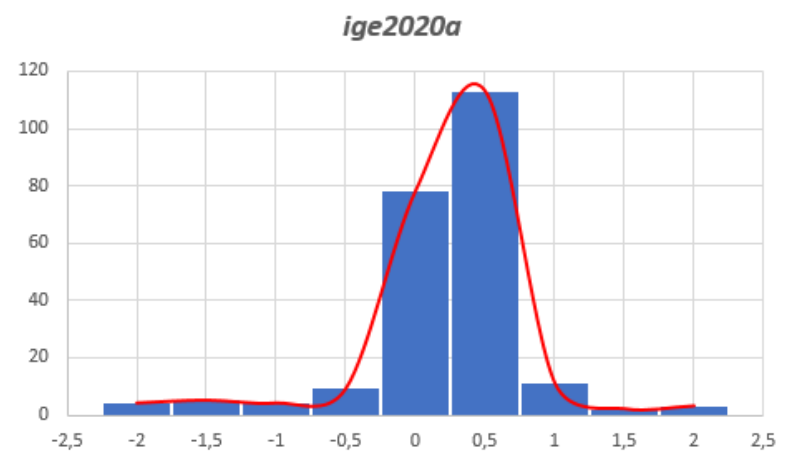


Figura 9: Histograma de frecuencias normalizadas para ige2020a.

La tabla 4, muestra el resultado final de los valores estadísticos obtenidos para cada centro; su valor más probable, su error medio cuadrático (emc) asociado, y el tamaño final de la muestra tras haber realizado el test de detección de valores atípicos.

Tabla 4: Estadísticos finales.

EOP	C.A.	Media	emc	Unidad	n
dUT1	usn2022a	0.01	0.02	ms	211
dUT1	gsf2019a	-0.02	0.02	ms	348
dUT1	ige2020a	0.01	0.03	ms	234

A la vista de los resultados obtenidos, puede observarse que éstos se encuentran bajo el mismo orden de magnitud de la unidad correspondiente para cada centro de análisis.

FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Este último apartado pretende dar una visión generalista de las aportaciones previsibles del centro de análisis del IGN basadas en las siguientes vías de trabajo: participación en la realización del próximo marco terrestre, análisis operacional de las sesiones intensivas, integración de nuevos modelos de deformación gravitacional para las antenas en el software de procesamiento.

La materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS), requiere de la implicación de diversas técnicas basadas en la geodesia espacial (GNSS, VLBI, SLR, DORIS) cuyas soluciones individualizadas pero combinadas en su conjunto proporcionan coordenadas y velocidades de una serie de estaciones repartidas por todo el globo para una época de referencia determinada. Las soluciones VLBI son fundamentales para asegurar la orientación y la escala de este sistema terrestre. El propósito del reprocesado histórico así como las soluciones diarias obtenidas, es que sirvan junto con las soluciones proporcionadas por otros centros para las futuras realizaciones del marco terrestre.

El centro de análisis del IGN se encuentra, a día de hoy, en fase de pruebas en lo referente a proporcionar soluciones a las sesiones intensivas. Uno de los objetivos del estudio de este tipo de sesiones fue el de asegurar que se está trabajando en la misma dirección en cuanto a calidad de procesado y resultados de estas sesiones respecto a otros centros homólogos.

Modelar las variables que intervienen en una observación geodésica independientemente de cuál sea la técnica que se emplee, es una cuestión crucial si lo que se pretende es la obtención de mejoras notables en cuanto a resultados. Éste bien podría ser el objetivo de la creación y/o mejora de modelos de deformación gravitacional para las antenas VLBI que contribuyan (previa incorporación al software de procesamiento) a la consecución de estos objetivos.

REFERENCIAS

- [1] Global Geodetic Observing System, <https://ggos.org/>
- [2] International VLBI Service for Geodesy & Astrometry, <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/>
- [3] International Earth Rotation and Reference Systems Service, <https://www.iers.org/>
- [4] Kirkvik, A.-S., Hjelle, G.A., Dähnn, M., Fausk, I. and Mysen, E., Where (2017): "A New Software for Geodetic Analysis". *Proceedings of the 23rd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting*. DOI: 10.7419/162.08.2019, ISBN: 978-84-416-5634-5.
- [5] Böhm et al. (2006): "Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data". *JGR Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2005JB003629>
- [6] Petit G. and Luzum B. (2010): "IERS International Earth Rotation and Reference System Services Conventions 2010. IERS Technical Note 36". <http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html/>
- [7] Egbert, G.D. and L. Erofeeva. (2002): "Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**, 2002. TPXO.6.2, TPXO.7.2 and TPXO_Atlas

- [8] Nothnagel A. (2009): "Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI". *Journal of Geodesy*, Vol. 83(3), 787-792, DOI: 10.1007/s00190-008-0284-z.
- [9] Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., and Collilieux X.. (2016): "ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modelling nonlinear station motions". *JGR Solid Earth*. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- [10] Charlot P. et al., (2020): "The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry." *Astronomy & Astrophysics*, Volume **644**, id. A159, 28 pp. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038368>