

Geodesia Espacial

■ Texto: JOSÉ ANTONIO LÓPEZ PÉREZ y JOSÉ ANTONIO LÓPEZ FERNÁNDEZ.
Subdirección General de Astronomía, Geofísica y Aplicaciones Espaciales.

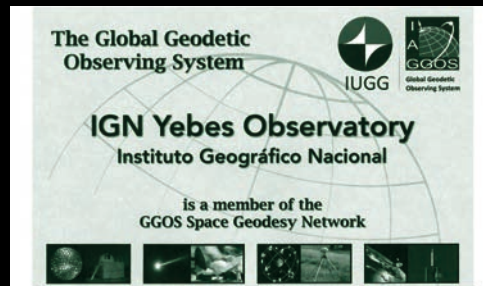


Imagen de la erupción
submarina de El Hierro
en 2011.



Una apuesta hispano-lusa para el conocimiento
de la Tierra y del cambio global

La Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales (Raege)

El Instituto Geográfico Nacional ha puesto en marcha, junto con el Gobierno Regional de Azores (Portugal), el proyecto de la Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales (Raege), formado por cuatro estaciones de geodesia espacial que se integrarán en las redes globales de observación geodésica. Raege convertirá al IGN en uno de los centros más importantes del mundo en geodesia espacial.

La respuesta

a una pregunta tan sencilla como "¿dónde estoy en este preciso instante?" no es ni simple ni evidente. Para empezar, depende de quién la plantea, para qué fin necesita conocer la posición y con cuánta precisión.

En efecto, para un conductor es suficiente conocer su posición con la precisión que le ofrece su navegador, una decena de metros. Sin embargo, el contratista de una carretera necesitará precisiones centimétricas para la construcción de la misma, y un investigador sobre el cambio climático necesitará, por ejemplo, precisiones milimétricas para monitorizar los cambios del nivel medio de la altura del mar. Si es importante conocer cuánto cambia la temperatura de nuestro planeta, no lo es menos determinar con precisión dónde y cuándo se produce ese cambio.

Para dar respuesta a esta variedad de necesidades, es necesario disponer de una infraestructura de medida a escala global, la infraestructura geodésica de precisión, constituida por diferentes técnicas

que se complementan entre sí, ofreciendo la precisión en la posición que se requiere en cada caso. Estas técnicas son las de geodesia espacial, a saber: GNSS (sistema global de navegación por satélite), VLBI (interferometría de muy larga línea de base), SLR (distanciometría láser a satélites) y DORIS (orbitografía doppler y radioposicionamiento integrado por satélite), que son complementadas con la gravimetría.

La geodesia mide parámetros fundamentales de la Tierra: su forma, su rotación y orientación en el Espacio y su campo gravitatorio, así como las variaciones temporales de los mismos. En estas variaciones reside información fundamental para comprender los cambios que sufre nuestro planeta y sus causas. Los geodestas han establecido una red de puntos de referencia precisos y estables sobre la superficie terrestre. Usando estos puntos (las estaciones geodésicas) han materializado un Marco de Referencia Terrestre Internacional, el ITRF, equipando estos puntos con alguna técnica de geodesia

La geodesia mide parámetros fundamentales de la Tierra y aporta información fundamental para comprender los cambios que sufre nuestro planeta

espacial o la combinación de ellas. Los satélites de observación de la Tierra (altimetría, salinidad, gases, temperatura, meteorología, ...), los planetas y los objetos más distantes del universo, los cuásares (que establecen un marco de referencia celeste, ICRF), apoyan y complementan la infraestructura geodésica global.

Hoy en día, esta infraestructura permite medir variaciones anuales como un aumento del nivel medio del mar del orden de un par de milímetros, desplazamientos del centro de masas de la Tierra de decenas de milímetro, cambios en la duración del día del orden de millonésimas de segundo y desplazamientos de los polos terrestres del orden de centímetros. Estas precisiones permiten monitorizar deformaciones milimétricas en la corteza terrestre, ofrecer servicios de posicionamiento en tiempo real con aplicaciones en agricultura, minería, navegación por satélite y cuantificar efectos asociados al cambio global que no pueden ser detectados directamente. El 26 de Febrero de 2015, la Organización de Naciones Unidas (ONU), en su asamblea



Emplazamientos de las estaciones del proyecto RAEGE.

plenaria número 80, adoptó la resolución 69/266 “Marco de referencia geodésico mundial para un desarrollo sostenible”, mediante la cual la Asamblea General literalmente:

- Insta a los Estados Miembros a compartir abiertamente datos, normas y convenciones geodésicas, con carácter voluntario, a fin de contribuir al marco de referencia mundial y a las densificaciones regionales mediante los mecanismos nacionales pertinentes y la cooperación intergubernamental, y en coordinación con la Asociación Internacional de Geodesia;
- Invita a los Estados Miembros a comprometerse a mejorar y mantener la infraestructura geodésica nacional como un medio esencial para mejorar el marco de referencia geodésico mundial;
- Invita también a los Estados miembros a establecer actividades de cooperación multilateral a fin de subsanar el déficit de infraestructura y las duplicaciones con miras a la elaboración de un marco de referencia geodésico mundial más sostenible;

En este contexto, la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) estableció el programa GGOS (Global Geodetic Observing System), con el propósito de obtener información valiosa sobre nuestro planeta, los fenómenos que afectan a su dinámica y los efectos del cambio global. Para ello resulta necesario desplegar una red de estaciones repartidas por todo el mundo, que incluyan el mayor número de técnicas de geodesia espacial (GNSS, VLBI y SLR) en el mismo emplazamiento, “co-location”,

La importancia de la interferometría de muy larga línea de base.....

La interferometría de muy larga línea de base (VLBI) es una técnica observacional de la radioastronomía que emplea a varios radiotelescopios repartidos por el planeta para operar como si de un solo radiotelescopio equivalente de mucho mayor tamaño se tratara, tan grande como la distancia entre los mismos. Ello permite observaciones con una altísima resolución angular, microsegundos de arco (equivalente a poder distinguir desde la Tierra dos pelotas de tenis en la Luna). Esta técnica es utilizada tanto por la astrono-

mía como por la geodesia. Por un lado, el VLBI astronómico permite la cartografía de muy alta resolución de los astros que se observan, revelando con gran detalle sus estructuras. Por otro lado, el VLBI geodésico puede permitir la determinación milimétrica de las distancias entre radiotelescopios y del periodo de rotación de la Tierra. El análisis de estas medidas, y de su evolución en el tiempo, proporcionan información de vital importancia sobre nuestro planeta y Raega va a contribuir muy significativamente a obtener esta información.

complementadas con técnicas geofísicas, como la gravimetría.

El proyecto RAEGE

La respuesta de España a la resolución de la ONU y al programa GGOS la está materializando el Mitma a través del proyecto de la Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales (RAEGE), proyecto que desarrolla el IGN en colaboración con el Gobierno Regional de Azores (GRA). Para la ejecución de este importante proyecto hispano-luso, se firmó un convenio entre el IGN y el GRA, y un posterior *Memorandum of Understanding* (MoU). Su objetivo es la construcción, instalación y puesta en servicio

de cuatro Estaciones Geodésicas Fundamentales, dotadas de, al menos, dos técnicas de observación geodésica global y gravimetría, con emplazamientos en Yebe (Guadalajara), situada en la placa tectónica euroasiática; Canarias, en la placa africana; Santa María (Azores), también en la placa africana, y Flores (Azores), en la placa tectónica americana. RAEGE, además de contribuir a GGOS, es un proyecto con un marcado interés por la tectónica de placas aprovechando así el emplazamiento estratégico de España y Portugal. Esta configuración de emplazamientos permitirá la realización de estudios geodinámicos y espaciales



Radiotelescopio RAEGE de 13,2 metros en Yeves que fue cofinanciado con fondos FEDER.

a escala regional (Macaronesia y Península Ibérica) y a escala global, por estar integrada en GGOS.

Cada estación estará compuesta por un radiotelescopio para VLBI, por receptores GNSS geodésicos y por gravímetros, instalándose, además, en Yeves una estación de SLR.

En este punto, hay que destacar que la estación SLR, cuya construcción ha sido licitada en julio de 2020 y estará terminada en enero de 2023, está siendo financiada con fondos europeos Feder de ayuda al desarrollo regional (proyecto Ydalgo).

En 2013 se inauguró el primero de estos radiotelescopios en el Observatorio de Yeves, también cofinanciado con fondos Feder, y en 2014 se terminó de construir el de la isla de San-

ta María. Actualmente se está identificando un nuevo emplazamiento para la estación de Gran Canaria, tras descartarse el elegido inicialmente en el término municipal de Artenara. Ello se ha debido a la reciente declaración de la zona implicada como Patrimonio de la Humanidad por la Unesco. Si bien se contaba ya con todos los permisos y autorizaciones para comenzar los trabajos de instalación en la zona de Artenara, el Mitma y el Cabildo de Canarias acordaron no comprometer dicha declaración y se ha optado por buscar un emplazamiento alternativo.

El radiotelescopio de la estación Raege en Gran Canaria se encuentra ya fabricado y debidamente almacenado a la espera de identificar su nuevo

emplazamiento. Se estima que puede entrar en servicio en 2023.

Respecto a la estación Raege en la isla de Flores, que será costeada íntegramente por el Gobierno Regional de Azores, ya está seleccionado el emplazamiento y, próximamente, se licitará el contrato de construcción del radiotelescopio y edificio de control. A finales de julio de 2020 se instalaron ya la estación meteorológica y el primer receptor GNSS en dicho emplazamiento.

Como reconocimiento al legado de ilustres marinos españoles y portugueses, cada radiotelescopio ha sido "bautizado" con el nombre de uno de ellos. El de Yeves ha sido denominado Jorge Juan y el de Santa María Cristóbal Colón. Las propuestas para



Radiotelescopio de la estación RAEGE en Santa María.

los restantes son actualmente Juan Sebastián Elcano y Fernando de Magallanes para Gran Canaria y Flores, respectivamente

La red VGOS de geodesia espacial

Los radiotelescopios Raega, junto con radiotelescopios equivalentes en prestaciones de otros observatorios geodésicos e institutos geográficos del mundo, se están integrando en la sub-red de GGOS dedicada a VLBI denominada VGOS (VLBI Global Observing System), que fue inicialmente impulsado por la International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), de la cual forma parte el IGN.

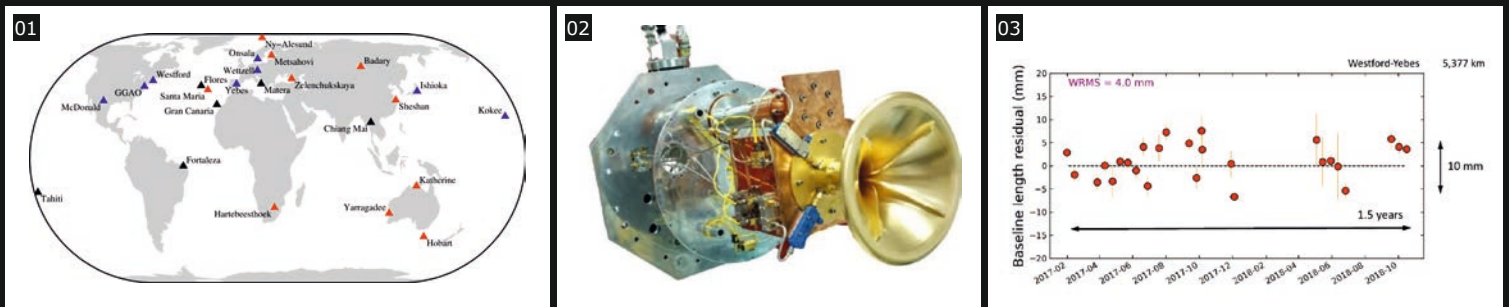
VGOS es una contribución internacional para cumplir con la resolución de la ONU men-

cionada anteriormente porque, a través de infraestructuras nacionales, y por medio de cooperación internacional, se va a lograr conseguir precisiones del orden del milímetro en la determinación de posiciones y de una décima de milímetro en la determinación de la variación anual de estas. Los datos de VGOS serán cruciales para seguir aumentando la precisión en el conocimiento de:

- los cambios en los parámetros de orientación y rotación de la Tierra (Earth Orbiting Parameters, EOP, en particular los cambios de su periodo de rotación, UT1, que sólo son medibles con radiotelescopios).
- el marco internacional de referencia terrestre (ITRF).

- el marco internacional de referencia celeste (ICRF).
- variaciones del nivel del mar.
- movimientos de placas tectónicas.
- efectos del cambio climático sobre el planeta.

La precisión de los marcos de referencia ICRF e ITRF es crítica para el control de las órbitas de los satélites y de las posiciones de las sondas de espacio profundo, así como para la navegación sobre la superficie terrestre, ya sea por tierra, mar o aire. Es por ello que los operadores de satélites y las agencias espaciales necesitan estos datos para el éxito de sus actividades. Puede decirse, por tanto, que el uso cotidiano de los navegadores GNSS, por ejemplo, no sería posible sin



01. Mapa de radiotelescopios VGOS en funcionamiento (azul), en pruebas (rojo) y en próxima construcción (negro). **02.** Interior de un receptor VGOS de banda ancha para RAEGE. **03.** Error en la determinación de la longitud de la línea de base entre Westford (USA) y Yebes mediante observaciones del proyecto VGOS.

los datos que proporcionan los radiotelescopios de las redes de geodesia espacial.

Actualmente, los radiotelescopios tipo VGOS en funcionamiento son ocho: Ishioka (Japón), Koike Park, McDonald, Goddard y Westford (EE. UU.), Onsala (Suecia), Wettzell (Alemania) y Yebes (España).

Desarrollos tecnológicos para Raege: Un caso de éxito

La construcción de Raege y su instrumentación constituye un caso de éxito de inversión pública. La iniciativa del IGN ha incentivado el desarrollo de tecnología y el retorno a las empresas españolas, en especial en lo que se refiere a los radiotelescopios. Inicialmente los radiotelescopios de Raege constituyen un desafío tecnológico en el estado del arte. Los radiotelescopios de 13,2 m de diámetro y más de 100 t deben moverse a grandes velocidades (12 °/s o lo que es lo mismo, una revolución completa en 30 s), ofreciendo una precisión de apuntado de segundos de arco

(equivalente a diferenciar una moneda de un euro a varios kilómetros) incluso en condiciones meteorológicas con vientos de 40 km/h. Inicialmente el IGN adquirió en 2010 tres radiotelescopios de estas características adjudicándose el contrato a una empresa alemana, sin embargo, gran parte de la construcción fue subcontratada a la empresa española Asturfeito. A raíz de este contrato, países como Noruega o Japón adquirieron el mismo modelo, que también fue construido por la misma empresa, lo que ha resultado finalmente un volumen de negocio de varios millones de euros.

Por otra parte, los ingenieros del Observatorio de Yebes se encargaron de diseñar y desarrollar los receptores que han de instalarse en los radiotelescopios RAEGE. En efecto, para poder obtener estos resultados científicos, los radiotelescopios están dotados de receptores criogénicos ultrasensibles. No en vano, el Observatorio de Yebes fue calificado en 2015 como Centro de Desarrollos Tecnológicos de la IVS, cali-

ficación que sólo tienen siete institutos en todo el mundo, como el Massachusetts Institute of Technology (MIT, USA), la NASA y los institutos homólogos al IGN en Rusia, Canadá, Japón y Suecia.

En el Observatorio de Yebes se ha desarrollado tecnología de primer nivel para los radiotelescopios Raege y VGOS. El primer tipo ha sido un receptor tri-banda, capaz de recibir señales en tres bandas de frecuencia simultáneamente en doble polarización circular: banda S (2.2 – 2.7GHz), banda X (7.5 – 9 GHz) y banda Ka (28-33 GHz). Este receptor fue instalado en el primer radiotelescopio RAEGE, en Yebes, y fue muy importante para verificar las capacidades técnicas y la eficiencia de los radiotelescopios diseñados para Raege, y para hacer medidas geodésicas compatibles con la mayoría de los radiotelescopios de la IVS, que no contaban aún con receptores tipo VGOS de banda ancha.

Tal fue el éxito de este receptor que la estación japonesa de Ishioka encargó al Observatorio

de Yebes, a través del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), la construcción de un receptor tri-banda para su radiotelescopio VGOS. Un tercer receptor tri-banda fue construido también para la estación de RAEGE de Santa María.

El segundo tipo fue el receptor de banda ancha tipo VGOS, de 2-14 GHz con doble polarización lineal. Este receptor sustituyó al primer receptor tri-banda en la estación Raege de Yebes para ser ya completamente compatible con el proyecto VGOS y además permitió participar con éxito en 2016 en las primeras medidas geodésicas transatlánticas del proyecto VGOS entre las estaciones de Kokee Park, Goddard, Westford (estas tres en Estados Unidos), Wettzell (Alemania) y Yebes.

Dados los excelentes resultados de este segundo receptor, la Autoridad Cartográfica Noruega (Norwegian Mapping Authority, NMA) encargó al CNIG la construcción de dos receptores de banda ancha para sus radiotelescopios gemelos del tipo VGOS situados en Ny-Alesund (archipiélago de Svalbard, Noruega). El primero de estos receptores fue entregado e instalado por personal del Observatorio de Yebes en septiembre de 2019. El segundo se verá retrasado por la crisis de la Covid-19 hasta finales de 2020.

Análogamente, el Instituto Finlandés de Investigación Geoespacial (Finnish Geospatial Research Institute, FGI) encargó también un receptor de banda ancha para su radiotelescopio VGOS en el Observatorio de Metsähovi, que fue entregado e instalado en noviembre de 2019.

Ambos encargos se realizaron en el marco de convenios de colaboración suscritos por el IGN con NMA y FGI. Actualmente se esperan más encargos, como los de la próxima estación VGOS en Matera (Italia), en Hartebeesthoek (Sudáfrica) y en Tailandia. Además, se ha fabricado otro tipo de instrumentación tecnológica, como son los denominados calibradores de fase, para los radiotelescopios de la Agencia Federal de Cartografía y Geodesia de Alemania (BKG).

Mitma, por tanto, está exportando tecnología de receptores de radioastronomía a países tan relevantes como Japón, Alemania, Noruega y Finlandia. Uno de los primeros resultados más prometedores ha sido la determinación de la longitud de la línea de base entre los radiotelescopios de Westford y Yebes, estimada a partir de datos de observaciones VGOS. El valor nominal de esta línea de base es de 5.377 kilómetros y la dispersión en la determinación es de tan sólo 4 mm. Esto constituye un hito importante y excepcional que demuestra el enorme potencial del proyecto VGOS y, por ende, del proyecto RAEGE. Se espera aumentar dicha precisión hasta conseguir dispersiones de solo 1 mm.

Raege también se ha incorporado a un proyecto europeo denominado EU-VGOS en el que ha participado junto con los radiotelescopios de Onsala en Suecia y Wettzell en Alemania. El proyecto EU-VGOS se ha iniciado en 2018 y tiene como objetivo el desarrollo de experiencia en Europa en la correlación y posterior procesamiento de las observaciones VLBI geodésicas de banda ancha.

Raege convertirá al IGN en uno de los centros más importantes del mundo en geodesia espacial, permitiendo establecer colaboraciones científico-técnicas de gran interés con otros países

Conclusiones

Raege es sin duda un gran proyecto que convertirá al IGN en uno de los centros más importantes del mundo en geodesia espacial, estableciendo colaboraciones científico-técnicas de gran interés con otros países como, por ejemplo, Estados Unidos, Suecia, Portugal, Alemania, Japón, Noruega y Finlandia, y organizando congresos internacionales como el que tuvo lugar en 2019 en Gran Canaria, la reunión del grupo de trabajo de VLBI astrométrico europeo, EVGA, donde se reunieron más de 150 participantes procedentes de todo el mundo.

Se espera que la aportación de Raege a la geodesia espacial de precisión sea muy valiosa, contribuyendo a que esta técnica se convierta en esencial para la determinación de los cambios que suceden en la Tierra.

Cuantificar esos cambios con precisión es vital para conocer y comprender los fenómenos que los provocan, sus causas e intentar anticiparse a sus posibles efectos. ■