

Ingeniería

■ Texto: ANSELMO FERNÁNDEZ GARCÍA y RAFAEL ABELLA MELÉNDEZ. Observatorio Geofísico Central.
JOSÉ MANUEL SERNA PUENTE y JOSÉ ANTONIO LÓPEZ PÉREZ. Centro de Desarrollos Tecnológicos. Subdirección
General de Astronomía, Geofísica y Aplicaciones Espaciales.
ESTHER AZCUE INFANZÓN. Área de Geodesia. Subdirección General de Geodesia y Cartografía



El Mitma en las zonas polares

Ingeniería geográfica extrema

Las regiones polares albergan parte de los secretos indispensables para comprender la evolución de nuestro planeta. En ellas se originan importantes procesos que posteriormente afectan al resto de la Tierra y sólo un análisis profundo de las variaciones en sus condiciones geodésicas y geofísicas hará posible una detección temprana de los efectos de dichas variaciones y permitirá el establecimiento de estrategias de protección civil y medioambiental.

El Instituto Geográfico Nacional (IGN),

con competencias en geodesia espacial y geodinámica y garante del Sistema Geodésico de Referencia Oficial, está aumentando de manera considerable su papel y actividad en los entornos polares, contribuyendo a una mejor monitorización del clima y a una georreferenciación cada vez más precisa. Las condiciones geofísicas de las zonas antárticas, por su gran actividad volcánica, han motivado también que la presencia del IGN sea necesaria adquiriendo mayores responsabilidades y por parte de las investigaciones en las regiones polares se centran en el estudio del clima (paleoclima) ya que las capas de hielo esconden información sobre sus cambios durante miles de años. Pero recientemente, los estudios polares también nos ofrecen una visión sobre nuestro futuro. La fusión del hielo afecta directamente a la altura del nivel medio de los océanos, a la circulación de corrientes oceánicas, a la temperatura global, a la migración de las especies, etc. Se prevén subidas de temperatura de hasta cinco grados y del nivel

del mar de hasta 70 cm para el fin de este siglo, según estimaciones conservadoras. El cambio climático en las regiones polares va a tener además un impacto socioeconómico importante. De continuar la fusión de los casquetes polares se producirá un aumento de la accesibilidad de las regiones árticas, surgiendo nuevas rutas entre Europa y Asia, facilitando oportunidades económicas para el turismo, el transporte y la pesca. Ya sea por razones estratégicas ante el cambio global o por intereses comerciales, la presencia de Europa en los polos y, por extensión, de España, está más que justificada.

La presencia de nuestro país en las regiones polares es especialmente importante en la Antártida puesto que disponemos de dos Bases Antárticas (BAE) en la isla Livingstone "BAE Juan Carlos I" y otra en la isla Decepción "BAE Gabriel de Castilla". El Comité Polar Español (CEP), que preside el Ministerio de Ciencia e Investigación, tiene a su cargo la gestión de las actividades en las zonas polares. El Instituto Geográfico Nacional, en base a sus competencias, ha iniciado actividades en la Antártida y en el entorno ártico, aumentando nuestra cobertura

global y llevando nuestros estudios y desarrollos a los extremos del mundo.

Estación GNSS en la Antártida

Durante los meses de febrero y marzo de 2020 se desarrollaron en la cima del monte Reina Sofía (isla Livingston, Antártida) los trabajos de instalación de una nueva estación permanente GNSS que formará parte de la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS (ERGNSS) del Instituto Geográfico Nacional. Esta estación ayudará a mejorar el sistema de referencia geodésico global y sus datos podrán ser usados en distintas áreas de aplicación, como la geofísica, meteorología o glaciología, permitiendo el mejor conocimiento y estudio de la zona.

Los sistemas de navegación global por satélite (GNSS, Global Navigation Satellite System) están constituidos por un conjunto de satélites en órbitas medias que permiten la determinación de posiciones de puntos de la superficie terrestre y su entorno en cualquier tiempo y en cualesquiera condiciones meteorológicas. El GNSS se ha convertido en una herramienta esencial en el ámbito

Aurora boreal sobre el Observatorio de Ny-Ålesund.



de la geodesia, es decir, en el estudio de la forma y figura de la Tierra y sus variaciones en el tiempo. Redes de estaciones permanentes distribuidas por todo el mundo observan de forma continua y sus datos son clave en multitud de aplicaciones y en especial en la definición de los sistemas geodésicos de referencia. Ejemplos de redes GNSS son: la red internacional *International GNSS Service (IGS)*, con más de 500 estaciones distribuidas homogéneamente por todo el mundo y base para la materialización del sistema de referencia internacional; la red europea *European Permanent Network (EPN)* con más de 350 estaciones por toda Europa y base para la materialización del sistema de referencia europeo, o la red ERGNSS del IGN, base del Servicio de Posicionamiento en Tiempo Real en España, que cuenta con 120 estaciones distribuidas por todo nuestro país, algunas de titularidad propia y otras compartidas con comunidades autónomas y Puertos del Estado.

La homogénea distribución de estas estaciones por todo el planeta es fundamental, pues sus datos son utilizados para la obtención de productos y servicios globales. Además de contribuir a la defini-

ción de los sistemas de referencia como se ha citado anteriormente, sus datos son usados para desarrollar, por ejemplo, modelos de la ionosfera o el cálculo de órbitas de satélites. Por ello, y dada la falta de densidad de estaciones en la región antártica, la instalación de la nueva estación será una contribución muy importante tanto para el estudio y control del entorno local de la estación como para la mejora de los modelos y productos globales.

Trabajos de instalación durante la campaña

Un equipo formado por personal del Instituto Geográfico Nacional, de la Escuela de Guerra del Ejército de Tierra y de la Universidad Politécnica de Madrid, ha trabajado conjuntamente durante la segunda fase de la campaña antártica para la instalación y puesta a punto de la estación. Los trabajos a realizar se dividieron en dos fases. En la primera, el trabajo se centró en la búsqueda del emplazamiento idóneo para la estación: con horizonte despejado, estable geológicamente, con visibilidad a puntos de interés y cercana a fuentes de alimentación eléctrica e Internet.

Durante la segunda fase, una vez elegido el emplazamiento, tuvieron lugar los trabajos de monumentación (anclaje del mástil que sostendrá la estación a la roca), nivelación e instalación de la estación.

Durante esta campaña se han efectuado observaciones de más de 15 días, posteriormente analizadas en postproceso, y se han medido los parámetros de consumo energético de la estación que permitirán en futuras campañas adaptarla para que esté operativa todo el invierno antártico, característica indispensable para las estaciones permanentes.

Aplicaciones e importancia de la estación

La nueva estación permitirá mejorar el sistema geodésico de referencia global y será una más entre las 120 estaciones GNSS de la ERGNSS, imprescindible como soporte a la navegación y posicionamiento terrestre. Se integrará además en la red internacional IGS. Con ella se podrá contar con datos continuos en un entorno de nieve permanente cercano al mar, permitiendo la investigación aplicada en condiciones que en España son muy poco frecuen-





Nivelación del clavo de referencia de la estación.

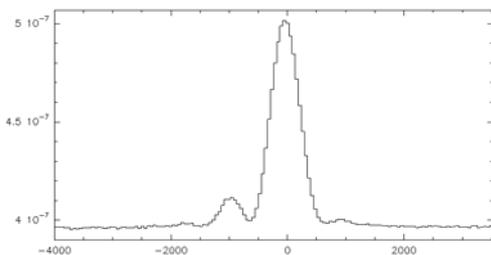


Estación permanente GNSS en la cima del Monte Reina Sofía, denominada BJCI.



Radiotelescopios gemelos tipo VGOS del Observatorio de NMA en Ny-Ålesund (Svalbard, Noruega).

```
43.2 CAS-A VLBIX N13M-POWR 0:21-NOV-2017 R:21-NOV-2017
RA: 23:23:24.72 DEC: 58:48:54.0 Eq 2000.0 Home 0.0° Offs: +0.0 +0.0
Unknown tou: 0.000 Tsys: -1. Time: 1.67E-02min El: 69.2
N: 142 ID: 67.00 AO: 0.000 Da: -53.01
FG: 8400.00000 Df: 1.0000E+09 Pos. Ang.: 90.00 Eq
```



Observación de Casiopea-A en banda X con el receptor tribanda en el primer radiotelescopio de NMA en Ny-Ålesund.

tes y se registran en escasas y muy concretas ubicaciones. Estos datos se utilizarán además para la elaboración de series temporales que contribuyan al estudio de la geodinámica de la zona.

Entre otros objetivos también se pretende el empleo de técnicas como la reflectometría GNSS para medir tanto la variación de la capa de nieve como la del nivel del mar, aspectos críticos en la monitorización del cambio climático. Se trata de una nueva técnica de detección remota que utiliza las señales GNSS reflejadas en la superficie terrestre y que se puede utilizar para estudios científicos relacionados con la altura de la superficie del mar, el estudio de los vientos oceánicos, los estudios de la cobertura de hielo marino y de la superficie nival y los cambios en la vegetación y humedad del suelo, entre otros. Esta técnica se está empleando en diferentes estaciones de la península ibérica, pero no es posible generalizarla por la poca casuística de las condiciones climáticas extremas.

Sus datos serán de utilidad también en aplicaciones meteorológicas, campo en el que las medidas GNSS presentan gran sensibilidad en función al contenido de vapor de agua que está presente en la atmósfera. El cálculo del retraso que sufren las señales en su propagación, con suficiente celeridad y precisión, puede servir para la mejora de los modelos de predicción meteorológica. El IGN cuenta con experiencia en dicho campo, participando como centro de análisis del proyecto europeo *Eumetnet EIG GNSS Water Vapour Programme* (E-GVAP) estimando en intervalos horarios y a tiempo casi real el retraso troposférico de las señales GNSS, que posteriormente se utiliza para la mejora de los modelos matemáticos de predicción.

Finalmente, los datos de la estación también podrán utilizarse para testear el sistema de geoposicionamiento europeo Galileo en latitudes extremas. El sistema Galileo, en el que el Mitma participa activamente, tiene la intención de ofrecer posicionamiento fiable en latitudes cercanas a los $\pm 80^\circ$, y se da la circunstancia de que la red GNSS todavía no dispone de estaciones con una latitud similar a la señalada.

La tecnología del IGN de norte a sur. Del Ártico al Antártico.

En los polos norte y sur ya se dispone de tecnología desarrollada en el IGN para la observación de la Tierra. El 6 de enero de 2015 se firmó un acuerdo de cooperación entre el IGN y la Autoridad Cartográfica Noruega (*Norwegian Mapping Authority, NMA*) con el propósito de intercambiar información en los campos de la geodesia y la cartografía, puesto que ambos institutos tienen intereses comunes y participan en proyectos internacionales relacionados con estos campos, como VGOS (*VLBI Global Observing System*). Este acuerdo, y su posterior *Memorandum of Understanding* (MoU), que recoge los detalles del mismo, ha creado un perfecto modelo de sinergia entre ambas instituciones. De una parte, el IGN se comprometió a construir dos receptores de banda ancha tipo VGOS para los radiotelescopios gemelos que NMA ha construido en el Observatorio de Ny-Ålesund, en el archipiélago de las islas Svalbard, a $78,9^\circ$ de latitud norte, siendo éste el lugar habitado más cercano al polo norte. Además, el compromiso incluye el suministro del *software* de control de los radiotelescopios y de los receptores. De este modo, NMA suplía la carencia de



Radiotelescopio de 9 metros de la estación GARS en la Antártida.

un laboratorio con capacidades tecnológicas para el desarrollo de sus propios receptores.

De otra parte, NMA además de asumir los costes para la instalación y puesta en marcha de los receptores, proporciona las licencias necesarias para el uso del *software* "WHERE", desarrollado por la propia NMA, para el análisis de datos de VLBI y SLR (*Satellite Laser Ranging*), e imparte cursos de formación sobre dicho *software* al personal del IGN.

Mientras se construía en Yeves el primero de los receptores VGOS para NMA, se prestó un receptor tribanda (S/X/Ka) para las pruebas de verificación y calibración y para las primeras observaciones del primero de los radiotelescopios gemelos. Por este motivo, en abril de 2017, dos ingenieros del Observatorio de Yeves se desplazaron a Ny-Ålesund para la instalación y puesta en marcha de este receptor.

El receptor quedó correctamente instalado y funcionando, y se pudieron realizar la mayoría de las pruebas mencionadas. Sin embargo, fue necesario volver en junio y en noviembre de 2017 para sustituir los amplificadores de

banda X que, en ambas ocasiones, habían sido destruidos por los radares de los cruceros que transportan turistas en verano a través del fiordo en cuya costa se encuentra el observatorio.

Ya en marzo de 2018, dos ingenieros del IGN viajaron nuevamente a Ny-Ålesund para trasladar el receptor tribanda al segundo radiotelescopio gemelo, y realizar sobre éste las pruebas análogas a las hechas sobre el primero. En septiembre de 2019, dos ingenieros y un técnico del IGN instalaron y pusieron en marcha satisfactoriamente el primero de los dos receptores de banda ancha tipo VGOS en el primer radiotelescopio gemelo.

La Agencia Federal de Cartografía y Geodesia de Alemania (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*, BKG) es la institución homóloga al Instituto Geográfico Nacional de España y, al igual que con NMA, se tienen intereses comunes y se participa en proyectos internacionales, como VGOS. El BKG opera la Estación Geodésica Fundamental de Wettzell, el Observatorio Geodésico Argentino-alemán (AGGO) y la estación de recepción antártica

alemana (German Antarctic Receiving Station, GARS) de la base O'Higgins, esta última fundada en 1991, en colaboración con el Centro Aeroespacial Alemán (DLR), y situada en el islote Isabel Riquelme, frente al cabo Legoupil de la península antártica.

El instrumento más importante en la base O'Higgins es un radiotelescopio de 9 metros de diámetro diseñado para soportar las extremas condiciones ambientales de la Antártida. Es usado para la adquisición de datos de satélites y su telecomando, y para medidas geodésicas. Para esto último contaba con un antiguo receptor en bandas S (2.2 – 2.37 GHz) y X (8.1 – 8.5 GHz) de una sola polarización.

En el año 2015, el BKG decidió llevar a cabo una actualización completa de este receptor, y de ese modo dotarlo de mejores prestaciones y mayores capacidades. Para ello, contrató estos trabajos al Observatorio de Yeves (por medio del Centro Nacional de Información Geográfica) que asumió el desarrollo, supervisión, instalación y puesta en marcha de este receptor renovado en la Antártida.



01



02



03



04

01. Personal del IGN en Ny-Ålesund en septiembre de 2019. **02.** Receptor instalado en el interior del radiotelescopio de la estación GARS. **03.** Personal del IGN y la UGR descargando datos del sensor sísmico instalado en la Playa de Colatinas, Isla Decepción. Fuente: *Ejército de Tierra. Diario de Operaciones Campaña Antártica 2019-2020.* **04.** Imagen obtenida con un prototipo de cámara web de bajo coste para el seguimiento de la actividad volcánica desarrollada en el IGN.

La geofísica del IGN en la Antártida: vigilando los fueles de Neptuno

Durante la Campaña Antártica Española 2019-2020, el Observatorio Geofísico Central (OGC) del IGN, ha tenido una doble presencia, por una parte, con su participación en el proyecto de Vigilancia Volcánica en la isla Decepción y por otra participando en el proyecto Bravoseis, liderado por la Universidad de Granada.

Vigilancia Volcánica en isla Decepción

La vigilancia volcánica de la isla Decepción es imprescindible para la apertura de la Base Antártica Española Gabriel de Castilla y el desarrollo de la actividad científica y técnica (y turística) internacional en la isla, por tratarse un volcán activo. De hecho, su alto nivel de actividad le clasifica como uno de los volcanes más activos de la Antártida, con un registro de más de 20 erupciones explosivas en los últimos dos siglos, la última en 1970. Además de esta actividad eruptiva se han registrado numerosos episodios de "unrest" volcánico (desviación del comportamiento de fondo de un volcán, indicativo de actividad en su interior y que podría ser preludeo de una erupción) en 1992, 1999 y 2014-2015. El riesgo asociado a su actividad es evidente, más aún, si tenemos en cuenta que durante los últimos episodios eruptivos acaecidos entre los años 1967 y 1970, dos bases científicas pertenecientes a Chile y Reino Unido fueron seriamente dañadas.

La vigilancia volcánica del volcán de la isla Decepción ha venido siendo desarrollada desde la década de los noventa del siglo XX por la Universidad de Cádiz

(UCA), la Universidad de Granada (UGR) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), bajo la coordinación el Comité Polar Español (CPE). Esta vigilancia se lleva a cabo mediante distintas series de observaciones: geodésicas, sismológicas, termométricas y sobre las variaciones en el nivel del mar, constituyendo series históricas. La presencia de personal del IGN en la última campaña supone la incorporación de la institución a dichas labores de vigilancia y ha permitido, gracias a la colaboración de las instituciones anteriormente citadas, conocer de primera mano la instrumentación y metodologías que vienen siendo utilizadas, así como las dificultades del trabajo en el entorno antártico. Además, se han podido conocer las instalaciones y medios tanto materiales como personales que el Ejército de Tierra pone a disposición de los participantes en la campaña. En los próximos años, la actividad y la responsabilidad del IGN se verán acrecentadas, ya que se hará cargo de las labores de inspección, valoración de actividad y alerta volcánica en la isla Decepción mediante la suscripción del consiguiente acuerdo entre el Mitma y el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del cual, el Mitma pasará a formar parte del Comité Polar Español (CPE). El IGN garantizará el mantenimiento de las series temporales hasta ahora existentes y participará en las decisiones de establecimiento y comunicación de apertura de la base en las campañas presenciales del verano austral. Esta nueva responsabilidad, precisará incrementar la presencia de personal del IGN en la isla y el robustecimiento de la red de vigilancia. ■

Proyecto Bravoseis.....

El IGN también está participando en el proyecto antártico español Bravoseis liderado por Universidad de Granada, que cuenta con un gran respaldo internacional, con personal provenientes de distintos centros de investigación tanto nacionales (CSIC, IGME, UCM, Universidad de Jaén, entre otros) como internacionales GFZ, NOAA, NASA, Universidad de Washington, INGV, ...). El objetivo de este proyecto es comprender la estructura cortical y el régimen tectónico en la región de las Shetland del Sur (Antártida), representar la estructura de los reservorios magmáticos y sistemas de alimentación relacionados con las estructuras submarinas de la cuenca central del Bransfield, e investigar los procesos internos que ocurren en los volcanes submarinos, usando análisis de la actividad sismo-volcánica. Por otra parte, va a permitir determinar el nivel de actividad volcánica que presentan los edificios submarinos del estrecho de Bransfield, lo cual, aparte del interés científico, supone un beneficio directo para la seguridad de las operaciones científicas y turísticas en la región donde se encuentran las dos Bases Antárticas Españolas.

El proyecto ya ha llevado a cabo tres campañas antárticas entre 2017 y 2020. Durante el primer año se llevó a cabo la instalación de 8 estaciones sísmicas terrestres de banda ancha con el apoyo logístico de los buques de investigación oceanográfica Sarmiento de Gamboa y Hespérides. Se instalaron una estación en las inmediaciones de la Base Antártica Española Gabriel de Castilla, dos estaciones en la isla Livingston, (cercanías del Campamento Byers y en la Base Juan Carlos I), y otra estación en la isla Rey Jorge, islas del archipiélago de las Shetland del Sur. Paralelamente se instalaron dos estaciones en la península antártica, una en las inmediaciones de la Base Antártica Argentina Primavera en la Caleta Cierva, y una segunda en la Base Antártica Chilena O'Higgins. En las cercanías de la península antártica se instalaron dos estaciones más en la isla Torre y en la isla Astrolabio.

Durante el segundo año se desplegó el resto de la instrumentación, que consistía en 7 estaciones sísmicas terrestre de banda ancha en las islas Snow, Media Luna, Robert, Gurruchaga,

Pingüino y dos más en la isla de Rey Jorge. Con todas ellas se tenía una buena cobertura para estudiar la sismicidad regional. En paralelo a las estaciones sísmicas terrestres, se instalaron 6 hidrófonos, 20 OBS (Ocean Bottom Seismometers, estaciones sísmicas que se colocan en el fondo del océano) en la cuenca central del estrecho de Bransfield donde se encuentran los volcanes submarinos objeto de estudio de dicho proyecto. Una vez instalados todos los equipos, tanto terrestres como marinos, se dejaron registrando durante todo un año para tener una idea de la actividad sísmica natural de la región, habiéndose registrado una gran cantidad de terremotos.

Durante la tercera y última campaña hasta el momento, se realizó una campaña de sísmica activa, que consiste en la realización de una serie de explosiones controladas de aire comprimido. Estas explosiones se realizaron desde el buque Hespérides. Con el registro de dichas explosiones por las diferentes estaciones se podrá estimar la estructura cortical de la zona que es el objetivo final del proyecto.

