

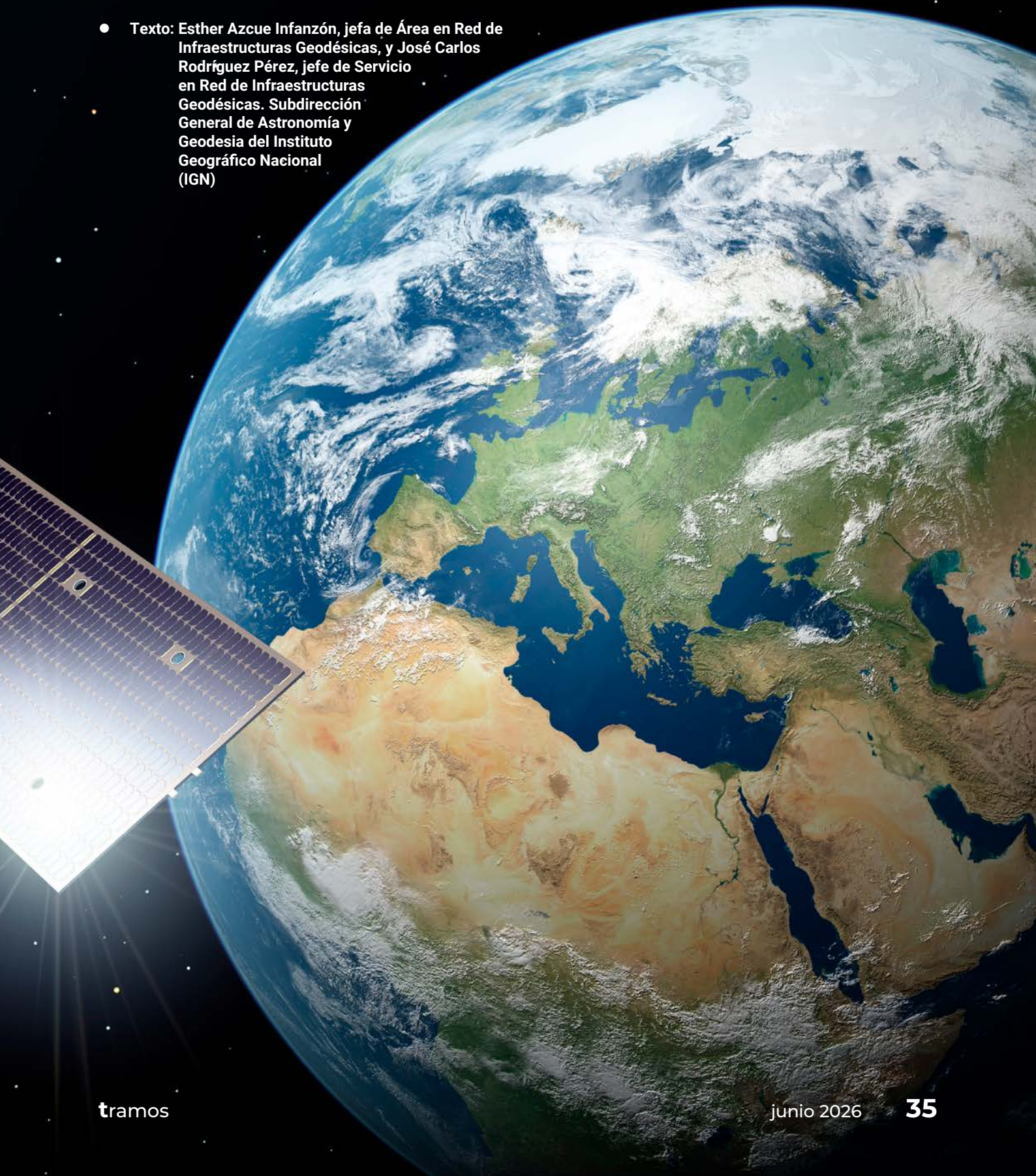
Fuente: ESA



La ciencia que mide un planeta en movimiento

La geodesia nos muestra que la Tierra no es un escenario pasivo, sino un sistema dinámico que responde constantemente a lo que ocurre en su interior y en su superficie. Medir esos cambios, aunque sean diminutos, nos permite entender mejor el planeta que habitamos y cómo está cambiando ante nuestros propios ojos.

- Texto: Esther Azcue Infanzón, jefa de Área en Red de Infraestructuras Geodésicas, y José Carlos Rodríguez Pérez, jefe de Servicio en Red de Infraestructuras Geodésicas. Subdirección General de Astronomía y Geodesia del Instituto Geográfico Nacional (IGN)



Vivimos sobre

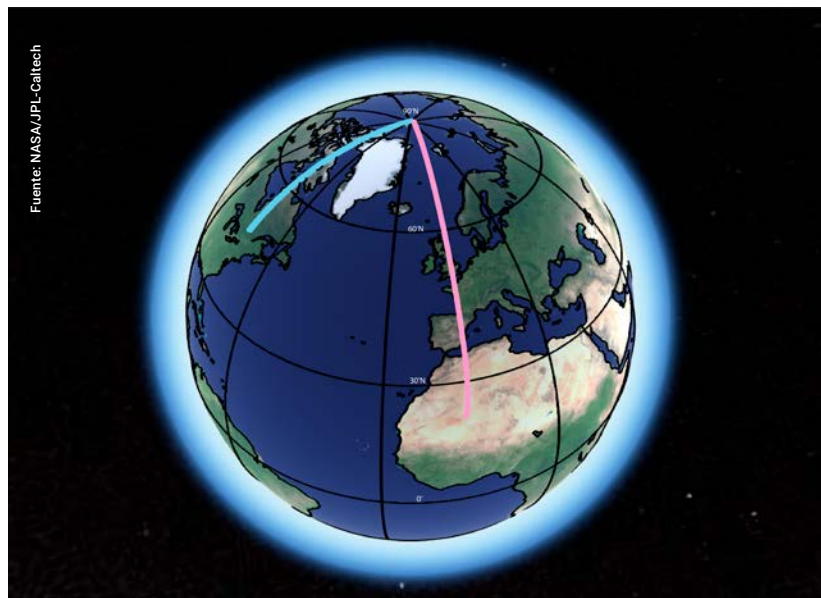
un planeta en constante transformación. Los continentes se desplazan, la Tierra gira con ligeras irregularidades, el nivel del mar cambia, los glaciares retroceden y el terreno puede elevarse o hundirse por procesos naturales o por la actividad humana. Para comprender y anticipar estos cambios, necesitamos medir la Tierra con una precisión extraordinaria, capaz de detectar variaciones a nivel de milímetros a escala global. Ésa es una de las misiones de la geodesia, la ciencia que estudia la forma, la gravedad y la rotación de nuestro planeta y que permite estudiar de manera continua cómo cambia en el tiempo.

Geodesia como infraestructura estratégica

La geodesia ya no es solo una disciplina científica: es una infraestructura estratégica de cualquier Estado moderno. Su impacto es transversal y sostiene áreas esenciales como la cartografía oficial, las infraestructuras de transporte, los sistemas de navegación por satélite, la seguridad aeronáutica y marítima, la defensa, la gestión del territorio, la respuesta ante emergencias y la monitorización del cambio climático, que se basan en un marco de referencia preciso y estable.

En este contexto, España desarrolla y mantiene capacidades geodésicas de primer nivel. El Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, a través del Instituto Geográfico Nacional, participa activamente en la vigilancia geodinámica del territorio y en la contribución a los marcos internacionales que sostienen la infraestructura geodésica del planeta. Proyectos internacionales como RAEGE (Red

Cualquier redistribución de masas en la Tierra o en su entorno, como el deshielo de los casquetes polares, los desplazamientos a gran escala de masas oceánicas o atmosféricas o, incluso, las influencias gravitatorias externas, altera la forma en que el planeta rota y se orienta en el espacio. Un ejemplo ilustrativo es el de una patinadora sobre hielo. Cuando gira con los brazos extendidos, rota lentamente. Al recogerlos, lo hace más rápido. No ha cambiado su energía, sino la forma en que su masa está distribuida respecto al eje de rotación. La geodesia mide estos cambios en la rotación terrestre, permitiendo asociarlos a los cambios de masas que los causan.



Antes del año 2000, el eje de giro de la Tierra se desplazaba hacia Canadá (línea azul). Gracias a la constante toma de observaciones geodésicas, se ha podido verificar un cambio en la dirección del eje de rotación entre 2003 y 2015 (rosa en la figura). Esta variación tiene sus causas en la redistribución de masas en el planeta, como, por ejemplo, la pérdida de masa helada en Groenlandia.



El Sistema Geodésico Global de Observación Terrestre (GGOS) depende de la Asociación Internacional de Geodesia, entidad responsable de coordinar las distintas técnicas que se usan para estudiar la Tierra y definir estándares comunes.

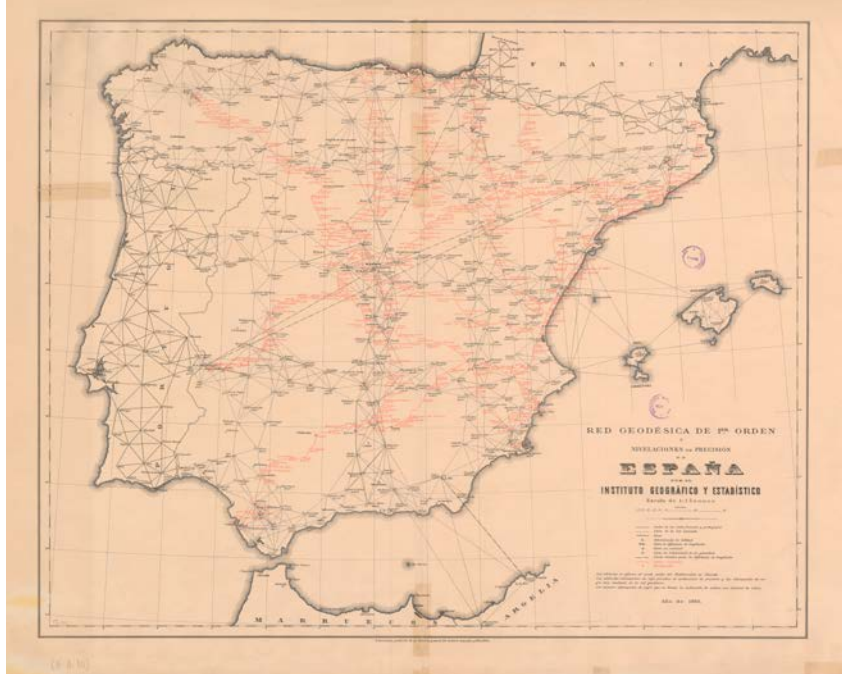
Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales), con estaciones geodésicas de última generación, o la participación española en los servicios internacionales coordinados por GGOS (Global Geodetic Observing System), consolidan el papel de nuestro país al máximo nivel en la red mundial que observa la Tierra y que proporciona los productos geodésicos que la comunidad internacional necesita.

Gracias a las observaciones geodésicas es posible que cada obra pública, cada mapa y cada sistema de posicionamiento se base en un marco común, preciso y coherente: un verdadero 'lenguaje geoespacial del Estado'.

Geodesia en España: Instituto Geográfico Nacional

En España el desarrollo de la geodesia está estrechamente ligado a la historia del Instituto Geográfico Nacional (IGN), creado en 1870 con un mandato claro: disponer de un marco geométrico de referencia riguroso que sirviera de base para la elaboración del Mapa Topográfico Nacional. Este marco consistió en la medición de una red de puntos, conocida como red geodésica, determinando sus coordenadas de forma precisa y utilizándola como 'esqueleto' para la elaboración de la cartografía oficial, basada en rigurosas medidas y métodos matemáticos.

Desde entonces, el IGN ha sido el organismo responsable de garantizar que nuestro país cuente con redes geodésicas precisas, sistemas de referencia actualizados y servicios geoespaciales esenciales que sustentan la cartografía oficial, las infraestructuras, las telecomunicaciones, la navegación, la gestión del territorio y la seguridad.



Red geodésica de primer orden, base del Mapa Topográfico Nacional, en 1873.

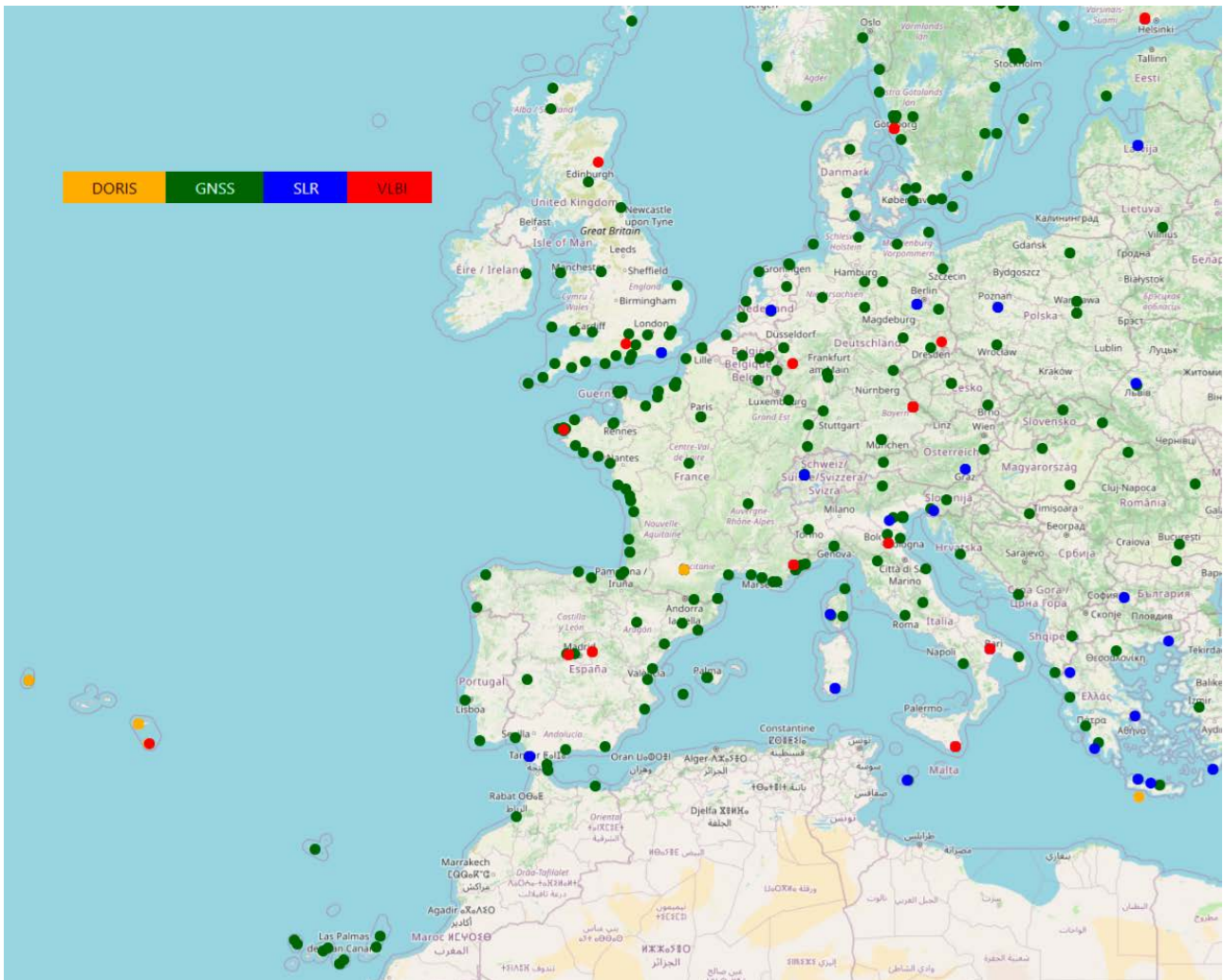
¿Cómo se determinan las coordenadas de puntos de una red geodésica?

Las coordenadas de los puntos de una red geodésica se determinan mediante triangulación, un método basado en la medición precisa de ángulos entre puntos visibles, a partir de una distancia inicial conocida, llamada base geodésica, que fija la escala de toda la red. En España, esta base fundamental se midió a mediados del siglo XIX en la llanura de Madridejos (Toledo), a cargo del general Ibáñez de Ibero, primer director del Instituto Geográfico Nacional.

La base es una línea recta de unos 14 kilómetros, elegida por la planitud y estabilidad del terreno. La distancia se midió directamente con reglas metálicas de precisión calibradas, y desde ella se extendió una red de triángulos que dio origen a la red geodésica clásica y a la cartografía moderna del país.



Vista general de la medición de la base de Madridejos (Toledo), lado de partida de la triangulación geodésica.



Observatorios y técnicas participantes en Europa en la definición del marco terrestre internacional ITRF2020.

¿Qué herramientas utilizamos actualmente para estudiar la Tierra?

En el pasado, la geodesia tenía un carácter regional, definiendo referencias en los distintos países que sirvieran como base a distintas aplicaciones prácticas. Actualmente, gracias a las grandes precisiones alcanzables con nuevas tecnologías, el ámbito de la geodesia se extiende a escalas globales para enfrentarnos a los grandes desafíos mencionados anteriormente. El punto de partida fundamental es que ningún cambio en nuestro planeta puede ser debidamente estudiado y referenciado espacialmente si no se define previamente respecto a qué se refiere. Éste es el objetivo de los sistemas y marcos de referencia.

Un sistema de referencia se define matemáticamente, fijando un origen de coordenadas, una orientación de los ejes del sistema y una escala. Los sistemas de referencia son una herramienta teórica, pero, para llevarla al terreno práctico, se usan los marcos de referencia terrestres, formados por un conjunto de puntos materializados en el terreno con coordenadas y velocidades que se conocen de forma muy precisa, que los usuarios utilizan como referencia para sus propias medidas.

A nivel global, el marco de referencia internacional terrestre proporciona una base común para la determinación de posiciones en todo el mundo. Se obtiene a partir de la combinación de datos de cuatro técnicas de geodesia espacial:

- **VLBI** (Very Long Baseline Interferometry o interferometría de muy larga base), que es una técnica de radioastronomía que utiliza radiotelescopios distribuidos globalmente para observar simultáneamente fuentes astronómicas, permitiendo obtener mediciones precisas de la rotación terrestre.
- **GNSS** (Global Navigation Satellite System o sistema de navegación por satélite), que se basa en constelaciones de satélites que permiten determinar con alta precisión coordenadas en cualquier parte del mundo.
- **SLR** (Satellite Laser Ranging o telemetría láser a satélite), que mide la distancia entre una estación terrestre y un satélite mediante la emisión y recepción



Las cuatro técnicas de geodesia espacial que contribuyen a la realización del marco de referencia terrestre internacional. De izquierda a derecha, en la primera fila, GNSS (Gijón) y DORIS (Ny-Ålesund, Noruega), y en la fila inferior, VLBI (Yebes, Guadalajara) y SLR (Yebes, Guadalajara).

de pulsos de luz láser, logrando precisiones milimétricas en la determinación de órbitas.

- **DORIS** (Doppler Orbitography and Radiopositioning by Integrated Satellite o sistema Doppler de posicionamiento y determinación de órbita integrado por satélite), que utiliza señales de una red de balizas terrestres para determinar con alta precisión la órbita de satélites y su posición en tiempo real.

Estas técnicas permiten crear la referencia geométrica de la Tierra, mientras que otras muestran diferentes aspectos del sistema terrestre, como son las medidas de gravedad por satélite y sobre la superficie, proporcionando información sobre su distribución de masas, o las misiones de altimetría por satélite que estudian el nivel del mar, su topografía, corrientes y el comportamiento de las grandes masas heladas en nuestro planeta.

En resumen, el estudio y la monitorización de la Tierra se basan en la integración espaciotemporal

de información procedente de distintas técnicas geodésicas. La generación de productos geodésicos, como el marco de referencia terrestre internacional, requiere una infraestructura global que incluye observatorios, centros de datos y análisis, desarrollo de modelos, control de calidad y el uso de estándares y convenciones, con la participación de numerosas organizaciones y agencias a escala mundial.

Es aquí donde entra en juego el Sistema Global de Observaciones Geodésicas de la Tierra o GGOS.

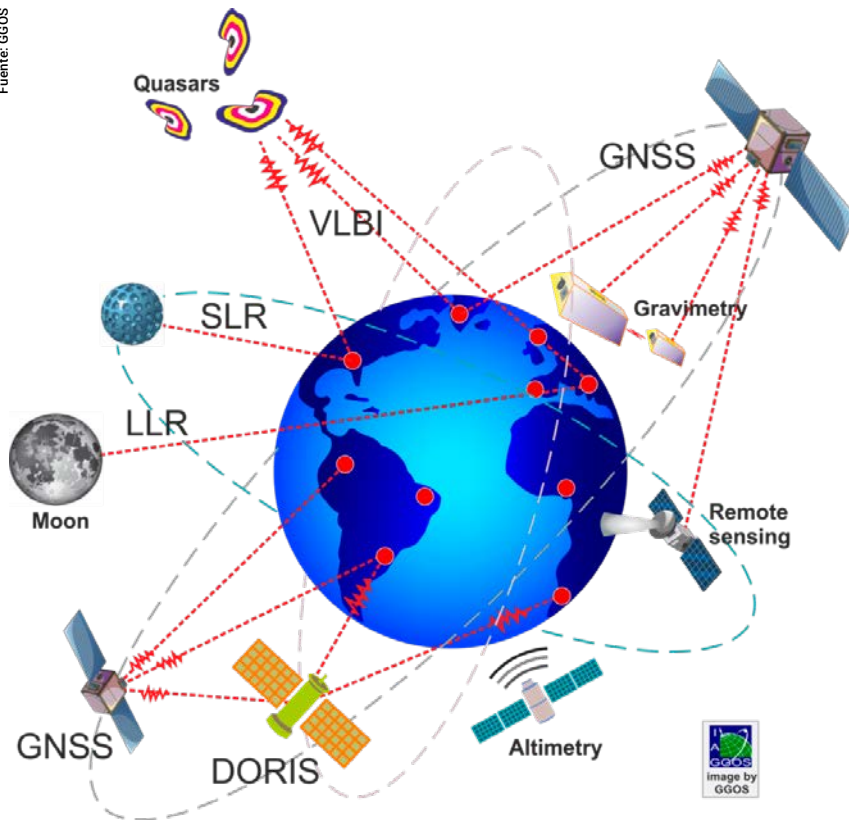
GGOS: el Sistema Global de Observaciones Geodésicas

GGOS representa la respuesta de la comunidad internacional de geodesia, coordinada a través de la Asociación Internacional de Geodesia, a la necesidad de monitorizar de forma continuada el sistema terrestre (tierra, océanos y atmósfera). Para realizar este objetivo, la geodesia se ocupa de la detección,

análisis y modelado de observaciones geodésicas recogidas por medio de diferentes técnicas.

Surgió en la década de 1990, impulsado por el reconocimiento de las sinergias derivadas de la creciente disponibilidad de observaciones satelitales globales, los avances en las tecnologías de adquisición, transmisión y análisis de datos geodésicos y la mejora sustancial de la exactitud de las observaciones. Sus promotores identificaron el potencial de las técnicas geodésicas modernas para monitorizar el cambio global y concibieron GGOS como un servicio a la ciencia y a la sociedad que trascendiera las tareas tradicionales de medición y cartografía de la superficie terrestre.

Un principio fundacional de GGOS fue el cimentar el sistema observacional en los componentes científicos y operacionales ya existentes de la IAG. De esta manera, GGOS actúa como un sistema integrador de dichos componentes para evolucionar desde la mera



Representación esquemática del Sistema Global de Observaciones Geodésicas GGOS.



provisión de productos geodésicos básicos al modelado e interpretación consistente de los procesos terrestres relevantes. Las principales tareas que GGOS aborda son la integración coherente de técnicas de observación, servicios y métodos de análisis bajo estándares comunes; la combinación de observaciones geométricas, gravimétricas y de orientación de la Tierra para caracterizar el sistema terrestre; la identificación de necesidades científicas y sociales y de los servicios y estrategias para satisfacerlas, y la promoción de la geodesia y de su visibilidad.

Aplicaciones

Los beneficios que ofrece el despliegue de infraestructura geodésica a nivel nacional y global son numerosos. La disponibilidad de un marco de referencia estable y exacto es indispensable para la observación terrestre con fines científicos, así como para el normal funcionamiento de cualquier sociedad

moderna. Gracias a dicho marco, es posible asignar coordenadas a puntos y objetos, y describir sus movimientos en el tiempo, desde una referencia en la superficie terrestre que experimenta un desplazamiento después de un terremoto, al movimiento de un vehículo o satélite.

El desarrollo tecnológico de las técnicas de geodesia espacial da lugar a nuevas aplicaciones y a su vez nuevos requisitos en cuanto a accesibilidad, exactitud y estabilidad de los nuevos servicios. Avances en las técnicas de posicionamiento por satélite, que permiten acceder a información posicional muy precisa en cualquier lugar del planeta y en tiempo real, posibilita una gran variedad de aplicaciones. Estas tecnologías han dado lugar a cambios fundamentales en la navegación y el transporte, pero también en áreas como el control de procesos (por ejemplo, agricultura, construcción o gestión de recursos), la monitorización de

infraestructuras (plataformas marinas, presas, puentes y otras obras de ingeniería civil), topografía y cartografía y observación de la Tierra. Las técnicas geodésicas son cruciales para la evaluación de riesgos naturales y antropogénicos, y ya juegan un papel determinante en la implementación de sistemas de alerta temprana de dichos riesgos, como fue el caso de la erupción volcánica de La Palma en 2021. El resultado es un incremento de la protección de vidas humanas, posibilitando un uso más racional de los recursos y el progreso hacia un desarrollo más sostenible.

A nivel científico, las observaciones y productos geodésicos son cruciales para maximizar los beneficios de los esfuerzos internacionales de observación del planeta. En primer lugar, proporcionando los fundamentos para obtener la información posicional necesaria para relacionar en el espacio y tiempo medidas obtenidas con diferentes técnicas a diferentes componentes

Radiotelescopio 14m

GNSS

Radiotelescopio 40m

Torre Solar



Observatorio de Yebes, Guadalajara, una de las cuatro estaciones que forman parte del proyecto RAEGE. Primera estación fundamental de GGOS de España.

del sistema terrestre (atmósfera, océanos, masas heladas, superficie terrestre, etcétera).

Adicionalmente, la geodesia ha pasado de ser una ciencia únicamente infraestructural, sobre la cual se sustentan otras actividades que requieren información posicional, a proporcionar observaciones que contribuyen directamente a expandir el conocimiento de varios sistemas terrestres de máxima relevancia. Por ejemplo, las observaciones producidas por los sistemas GNSS ofrecen información sobre el estado de la atmósfera en tiempo real (contenido de vapor de agua en la troposfera y de electrones en la estratosfera) que resulta muy valiosa para alimentar los modelos de predicción meteorológica. No existen observaciones equivalentes con una cobertura global y con una frecuencia temporal similar.

Otro ejemplo notable es la medida del nivel del mar, cuyo aumento en las últimas décadas

está relacionado con el incremento de temperatura debido al cambio climático. Los océanos son la más vasta reserva energética del planeta y, como tal, tienen una importancia singular a la hora de monitorizar y entender el estado y cambios del sistema terrestre desde un punto de vista energético. La medida del aumento del nivel del mar a escalas globales y regionales se realiza con una combinación de técnicas que incluyen mareógrafos, misiones satelitales de altimetría y gravimetría y sistemas de posicionamiento por satélite. La medida y monitorización precisa del nivel del mar es necesaria a escalas temporales de varias décadas para la correcta planificación de medidas de mitigación de riesgos en zonas costeras en amplias regiones del planeta, donde millones de personas están expuestas a impactos que pueden resultar muy costosos en términos de vidas humanas, así como enormes daños materiales

y destrucción de propiedades e infraestructuras.

Contribución española a la geodesia global: el proyecto RAEGE

España contribuye notablemente a los esfuerzos internacionales para realizar y mantener marcos de referencia geodésicos y dar soporte a otras aplicaciones que se benefician de las observaciones efectuadas.

El proyecto RAEGE (Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales), una colaboración firmada entre el Gobierno de España, a través del IGN, y el Gobierno Regional de Azores, en Portugal, consiste en la creación de una red de estaciones de geodesia espacial que dan soporte a GGOS.

Cada una de las estaciones del proyecto contará con varias técnicas de geodesia espacial. La operación de diferentes técnicas en el mismo emplazamiento, enlazadas geoméricamente por medio de medidas topográficas

muy precisas, es clave para la comparación y correcta combinación de los resultados ofrecidos por las mismas a nivel global, y permite explotar las fortalezas de cada una de ellas. De esta forma, las diferentes técnicas operan como un complejo sistema global de observación.

Dos de las estaciones de RAEGE ya están finalizadas y son operacionales, en el Observatorio de Yebe (Guadalajara) y en la isla de Santa María, en Azores. Ambas cuentan con radiotelescopios para realizar observaciones de interferometría, con receptores de sistemas de navegación por satélite, y con gravímetros superconductores para la toma de medidas precisas de los cambios en el campo gravitatorio terrestre. Adicionalmente, en Yebe se ha construido una estación de telemetría láser a satélites, operativa desde 2025, que realiza medidas

muy precisas de las posiciones de ciertos satélites por medio de un láser. Disponiendo de tres técnicas de geodesia espacial independientes, Yebe es, por lo tanto, la primera estación fundamental del sistema GGOS en España. Las estaciones fundamentales son observatorios de primera importancia a la hora de combinar las diferentes técnicas empleadas para la realización de marcos globales de referencia, proporcionando los nodos espaciales sobre los cuales se realiza la combinación. En Gran Canaria ya están en marcha los trabajos de construcción de la tercera estación de RAEGE, cuya operación se espera hacia 2027.

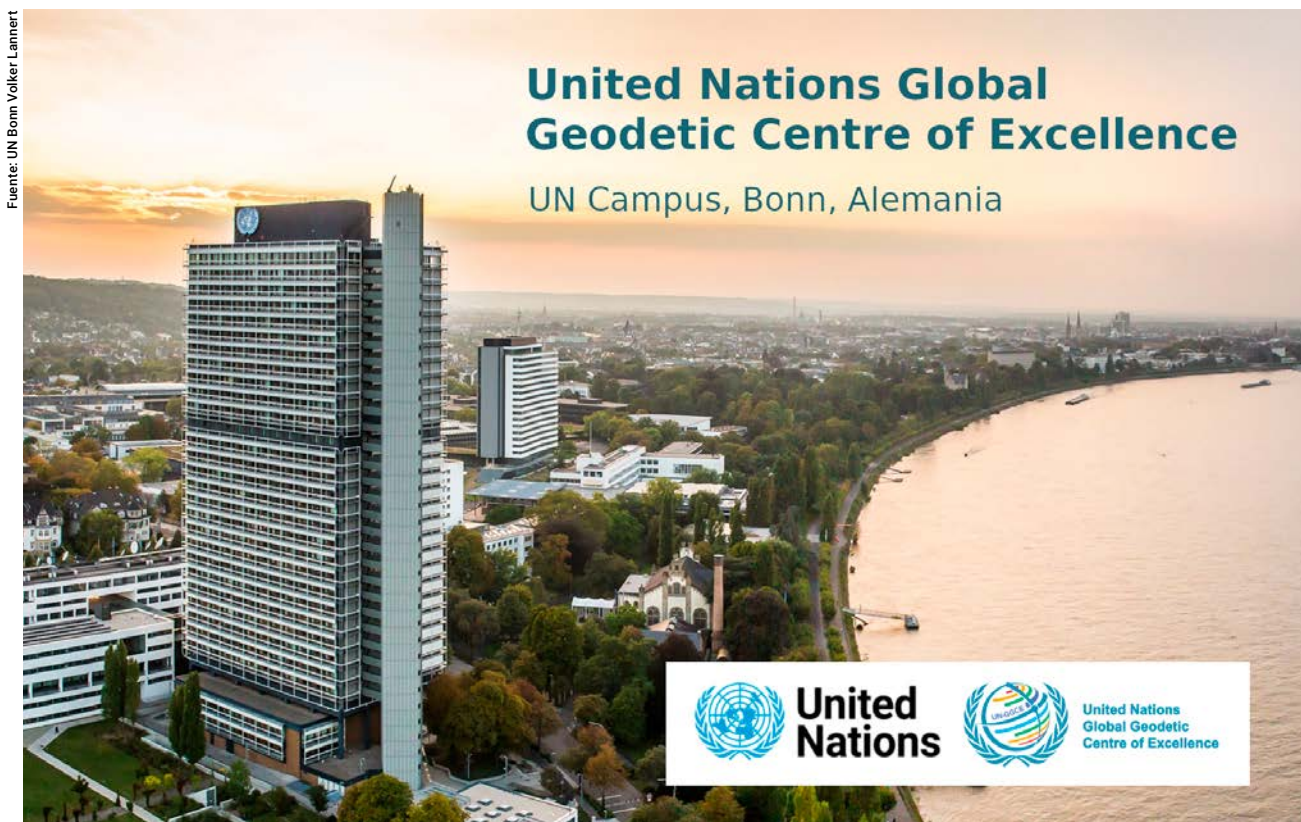
El IGN mantiene la red nacional de estaciones permanentes GNSS, la red de gravimetría y su propia red de mareógrafos. Otros recursos geodésicos que se desarrollan

en España son redes permanentes GNSS de las comunidades autónomas, y la estación de telemetría láser en San Fernando (Cádiz), que el Real Instituto y Observatorio de la Armada opera y mantiene.

Estas infraestructuras, sumadas a la activa participación española en grupos de trabajo y representación a varios niveles de los servicios geodésicos internacionales, posicionan a España a la cabeza de los esfuerzos globales en este campo.

Un vistazo al futuro de la geodesia

El futuro de la geodesia y su importancia a nivel global y nacional estará definido por su presente más inmediato. En 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la Resolución 69/266 acerca del marco de referencia geodésico global para el desarrollo



El centro de excelencia de geodesia de las Naciones Unidas, en Bonn, fue creado en 2023 con el objetivo de impulsar la cooperación internacional entre Estados en el área de geodesia y el soporte a sus infraestructuras.

Fuente: UN Bonn, Volker Lannert

sostenible, destacando la importancia de la disponibilidad de productos geodésicos global e invitando a los Estados miembros a incrementar la cooperación en esta materia, la compartición de datos y a comprometerse a mejorar las infraestructuras necesarias para mejorar el marco de referencia. Desde entonces, la toma de conciencia por parte de Estados e instituciones relevantes acerca de la importancia de la disponibilidad de dichos productos está aumentando. Siguen existiendo muchos problemas de visibilidad acerca de la necesidad de mantener y operar un sistema de observación global, pero hay razones para el optimismo.

En 2023 se fundó el Centro de Excelencia de Geodesia Global de las Naciones Unidas (UN-GGCE), con sede en Bonn (Alemania). Este centro busca fomentar

la cooperación internacional con vistas a desarrollar un sistema geodésico de observación robusto para servir a las necesidades de todos sus usuarios. A pesar de que la condición de las infraestructuras a nivel global está amenazada en muchos casos por falta de inversión o problemas de recursos humanos, la labor del UN-GGCE para atraer la atención política hacia el problema está dando sus frutos. Así, se ha firmado recientemente un memorándum de entendimiento entre instituciones gubernamentales, agencias nacionales, compañías privadas e instituciones académicas de unos treinta países, con el fin de reconocer la necesidad de garantizar los servicios de posicionamiento, navegación y tiempo de manera robusta.

En 2024 el Comité Internacional de GNSS (ICG) de la Oficina de

Asuntos Espaciales de las Naciones Unidas (UNOOSA), cuyos miembros operan las constelaciones de sistemas de navegación GPS (EEUU), GLONASS (Rusia), Galileo (Europa) y BeiDou (República Popular China), reconoció los riesgos actuales que amenazan la estructura geodésica global, y la necesidad de reforzarla para asegurar la robustez de los múltiples servicios que proporcionan dichas constelaciones.

La hoja de ruta aún está por trazar, pero se advierte un creciente reconocimiento de la importancia y de los problemas que pueden afectar a la generación de productos que en muchos casos resultan invisibles, pero sin los cuales muchas actividades que forman parte de nuestra vida diaria no podrían realizarse. ■



Estación geodésica de Santa María (Azores, Portugal), segunda estación completada dentro del proyecto RAEGE. Gracias a su localización, extiende hacia el oeste la red europea de radiotelescopios geodésicos, mejorando su distribución y alcance, fundamentales para la monitorización del sistema terrestre.