

# La geodesia espacial, una herramienta de Futuro

Jorge Gárate, José Martín Davila

*Este trabajo pretende dar una visión de las principales técnicas utilizadas en la actualidad en Geodesia Espacial, junto con alguna de sus aplicaciones, entre las que destaca su contribución a la materialización práctica de los sistemas de referencia. Además de la gran difusión del sistema GPS, sin duda la más popular de las técnicas que se describen, la facilidad de acceso a los datos y el nivel de precisión alcanzado, hacen de esas técnicas un importante complemento de los métodos de estudio e investigación tradicionales de muchas otras disciplinas.*

## 1. Introducción

El desarrollo de la Geodesia Espacial durante la recta final del siglo XX ha dado lugar a un aumento espectacular en la precisión con la que se obtiene la situación de puntos de la superficie terrestre por métodos relativamente baratos y de fácil implementación, de modo que no es difícil determinar cual es la velocidad del punto que se está situando con respecto a un sistema de coordenadas apropiado. Hay una amplia variedad de disciplinas, como por ejemplo la Geomorfología o la Sismología que pueden beneficiarse de ello. Aunque es, sin duda, en el campo de la Navegación en el que se han producido los avances más significativos, gracias a lo que se ha difundido la utilización del sistema de posicionamiento global GPS. Gracias a él, el navegante obtiene su situación de forma precisa e instantánea en cualquier lugar del mundo, y con independencia de cuales sean las condiciones meteorológicas.

Pero para lograr precisiones elevadas es necesario materializar, en primer lugar, un sistema de referencia suficientemente bien determinado. En la definición de tal sistema de referencia es necesario utilizar una combinación de métodos de observación: Interferometría de Base Muy Larga, conocido por sus siglas en inglés VLBI (Very Long Baseline Interferometry), Telemetría Láser sobre satélites artificiales (SLR), observaciones sobre el mencionado sistema de posicionamiento global por satélite (GPS), y junto a ellos el sistema francés de determinación de órbitas a partir del efecto Doppler conocido por las siglas DORIS.

En la terminología geodésica, la materialización del sistema de referencia se denomina marco de referencia. Se construye a partir de un conjunto de puntos desde los que se efectúa algún tipo de las observaciones mencionadas. Dichos puntos, junto con sus coordenadas y el modo en que evolucionan en el tiempo, constituyen el marco de referencia. Los producidos por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra, al que nos referiremos mediante sus siglas en inglés



Figura 1. Radio Telescopio de Fairbanks, Alaska

IERS, para materializar el Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS) reciben el nombre de Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF).

## Interferometría de Base Muy Larga (VLBI)

En la técnica VLBI dos o más radiotelescopios, como el de la figura 1, observan simultáneamente una misma radio fuente extragaláctica. La gran distancia a la que tales fuentes se hallan de nosotros permiten hacer la suposición de que se encuentran en el infinito. De ese modo, las ondas que se reciben en cada telescopio serían paralelas entre sí, como se muestra en la figura 2. Cada observatorio graba sus medidas refiriéndolas a una base de tiempos precisa. Posteriormente, esas observaciones simultáneas se comparan en un correlador, de modo que se determina la diferencia de tiempo entre la llegada de la señal de radio a cada uno de los observatorios, y esa diferencia de tiempos se transforma en distancia al multiplicarla por la velocidad de la luz. Se forma el triángulo que aparece en la figura 2, del que se ha observado el lado  $d$ , y se quiere determinar la distancia  $b$ . Tras una serie de observaciones sobre distintas radio fuentes, y la correspondiente resolución

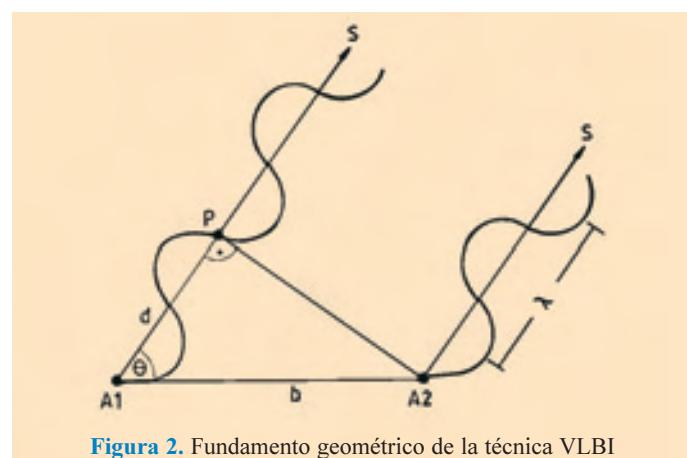


Figura 2. Fundamento geométrico de la técnica VLBI

del problema geométrico se determina la distancia entre las antenas con gran exactitud. Por regla general, las observaciones geodésicas se realizan en sesiones de 24 horas en las que se trabaja sobre un cierto número de radio fuentes diferentes distribuidas por todo el cielo. Los observatorios pueden y suelen estar muy separados.

Mediante esta técnica se han medido las coordenadas geocéntricas de unos 120 sitios, tanto fijos como "móviles", sobre más de 600 radio fuentes. Más de la mitad de los observatorios tienen un historial de observaciones lo suficientemente largo como para que pueda determinarse su velocidad, además de su situación.

Este tipo de observaciones también se utilizan en Astronomía para la determinación y mantenimiento del sistema celeste de referencia (ICRS) al que se refieren las posiciones de las estrellas. Además, el VLBI es la única técnica capaz de medir todos los parámetros que determinan la orientación de la Tierra de forma precisa y simultánea, a excepción de la posición de su centro de gravedad. Para su determinación se utiliza, como veremos a continuación, la telemetría láser sobre satélites artificiales.

En la actualidad, la determinación de las variaciones en la orientación de la Tierra, y la de las coordenadas de posiciones terrestres y objetos celestes se realizan de forma regular y rutinaria con precisiones estimadas del orden de +/-0.2 milésimas de segundo de arco o mejores.



**Figura 3.** Estaciones VLBI incluidas en el servicio internacional IVS

El conjunto de las estaciones que utilizan esta técnica de observación (fig. 3), junto a los centros de análisis de sus datos, se agrupan en el Servicio Internacional VLBI (IVS). Para ampliar información sobre esta técnica, puede consultarse la página web de esta organización <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>, de donde hemos tomado las figuras 1 y 3. También puede encontrar información básica, entre otros, en el capítulo 4 de 'Satellite Geodesy', de G. Seeber, editorial de Gruyter, del que hemos sacado la figura 2. o en 'Basic Geodesy' de J.R. Smith, editado por Landamark Enterprises.

## Telemetría Láser sobre satélites artificiales (SLR)

Con la telemetría láser sobre satélites artificiales (SLR) se mide el tiempo que tarda un pulso emitido por un transmisor láser en alcanzar un satélite y regresar al lugar desde donde se transmitió (fig. 4). La distancia entre el satélite y el lugar de observación es aproximadamente igual a la mitad del tiempo invertido en realizar el viaje de ida y vuelta multiplicado por la velocidad de la luz.

Para que la técnica funcione es preciso que el satélite sobre el que se está transmitiendo esté equipado con uno o varios retroreflectores, que son prismas diseñados especialmente para que el pulso que incida sobre uno de ellos se refleje en la misma dirección y sentido contrario, retornando al lugar desde el que se transmitió.

Para contribuir a la materialización del sistema de referencia los satélites más usados son los Lageos y Lageos-2, lanzados respectivamente en 1976 y 1992 (fig. 5). Son satélites esféricos, densos, situados en diferentes planos orbitales pero orbitando ambos a una altura aproximada de unos 6000 kilómetros sobre la superficie de la Tierra. Es posible medir la distancia a esos satélites con un error menor de 1 centímetro a partir de un único pulso láser.

Las medidas SLR deben corregirse por refracción atmosférica teniendo en cuenta la composición instantánea de la componente de la parte seca de la troposfera; es necesario por tanto realizar medidas de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa en el observatorio para determinar los retardos en la propagación de la energía.

La gran estabilidad orbital de estos satélites permite calcular, a partir de las observaciones, los coeficientes de los armónicos esféricos que definen el potencial del campo gravitatorio terrestre y definir con precisión la posición del centro de gravedad de la tierra. La situación obtenida se usará como origen del sistema de referencia terrestre. Estos cálculos se han efectuado con regularidad desde 1987, obteniendo una precisión en su determinación de unos pocos milímetros.

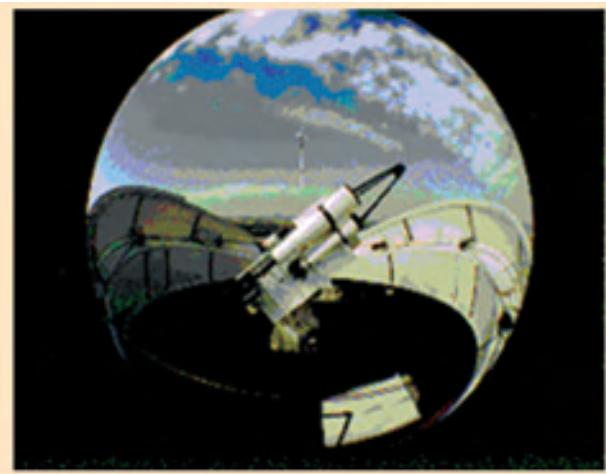
Desde 1976, más de 100 observatorios, principalmente fijos, pero también móviles, han conseguido efectuar medidas SLR sobre el Lageos. En la mayoría de los casos esto ha hecho posible la determinación de las coordenadas del observatorio correspondiente con un error menor de 2 centímetros.

Durante las tres últimas décadas, la red de estaciones SLR se ha constituido en una potente fuente de datos para el estudio tanto de la parte sólida de la Tierra como de los océanos y de la atmósfera, incluyendo:

- Detección y monitorización de movimientos tectónicos, deformación de la corteza, rotación de la Tierra y movimiento del polo: las medidas SLR proporcionan determinaciones precisas del movimiento de las estaciones a escala global en el marco de referencia. Combinadas con modelos de gravedad y variaciones en la rotación de la Tierra estos resultados contribuyen a modelar los proce-



**Figura 4.** La estación SLR del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (Cádiz)



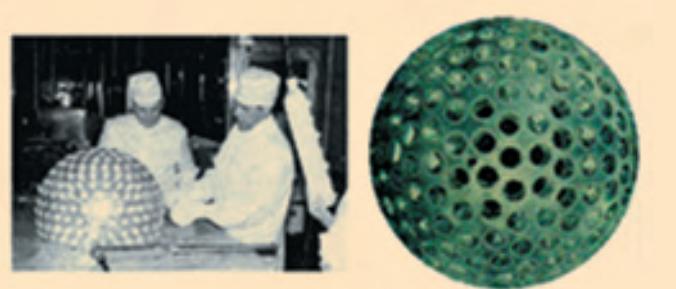
sos de convección en el manto terrestre, al proporcionar constreñimientos a los procesos del interior de la Tierra.

- Modelado de las variaciones espaciales y temporales del campo gravitatorio terrestre, así como de las variaciones milimétricas del centro de gravedad del sistema formado por la tierra sólida, océanos y atmósfera (fig. 7): las medidas SLR sobre los Lageos han proporcionado los valores más precisos de la constante gravitacional terrestre GM, y han confirmado que no sufre variaciones seculares.
- Investigación de las complejas mareas oceánicas, cuyo conocimiento es imprescindible para aislar los procesos climatológicos que se desarrollan en los océanos.
- Detección y seguimiento del efecto rebote y la subsistencia post-glacial. En los últimos 12.000 años la corteza terrestre ha sufrido los efectos de la deglaciación que ha fundido las capas heladas relacionadas con la última edad de hielo. Un conocimiento detallado de ese rebote permite una correcta interpretación de los datos de variación del nivel del mar adquiridos de forma global en los mareógrafos. Los mareógrafos proporcionan medidas del nivel del mar con respecto a puntos próximos de la corteza terrestre, pero estos a su vez pueden estar afectados de movimientos verticales. Las observaciones SLR y otras técnicas de observación geodésica contribuyen a la discriminación de la parte de la variación del nivel del mar que corresponde a cada uno de estos efectos.

Por otro lado las medidas SLR sobre satélites altimétricos contribuyen, mediante la determinación precisa de sus órbitas, al éxito de sus misiones dedicadas al levantamiento topográfico de la superficie marina para realizar modelos de circulación oceánica global, a determinar variaciones en volumen de las masas de hielo continentales y a completar topografías terrestres. También proporcionan un medio para llevar a cabo transferencia de tiempos por debajo del nanosegundo. Aunque teóricamente podría obtenerse también el tiempo universal UT1 y los valores de la nutación, no es fácil separar esos efectos de los errores orbitales. Por ejemplo, el UT1 se correlaciona con la longitud del nodo ascendente del plano orbital, de tal modo que si la situación del nodo fuera perfectamente conocida el UT1 se calcularía con gran exac-

titud. Sin embargo, en la práctica el nodo ascendente del Lageos presenta desplazamientos no modelados con un error cuadrático medio de 0.5 milisegundos por mes mientras que el valor estimado con precisión del UT1 sólo tiene utilidad para períodos menores de 60 días.

Estaciones y centros de análisis y de datos se engloban en este caso en el Servicio Internacional de Estaciones Láser (ILRS). Su página web <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/> ofrece una información muy completa sobre el tema. Las figuras 5 a 8 proceden de dicha página web.

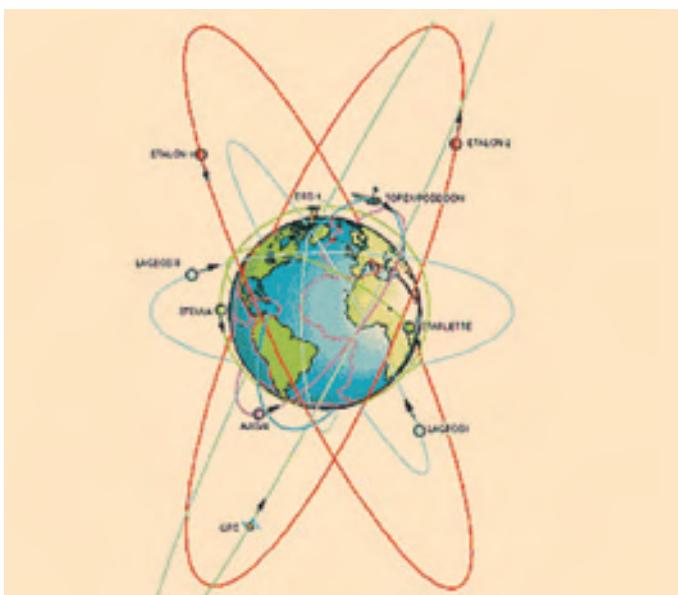


**Figura 5.** Satélite geodésico LAGEOS. La fotografía da una idea de su tamaño real

## El Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El GPS ha supuesto, sin duda, una revolución en el campo de la Geodesia, al permitir obtener posiciones relativas entre lugares muy distantes entre sí de una forma cómoda, rápida y barata.

El sistema de satélites GPS está diseñado de tal modo que en cualquier lugar del mundo se puedan recibir las señales de un conjunto de entre 4 y 8 satélites simultáneamente (fig. 9). Tales señales emitidas son dos ondas de radio en la banda L de frecuencias, concretamente a 1.227 y 1.575 MHz, moduladas por códigos elaborados a partir de ruido pseudoaleatorio. Los códigos permiten identificar al satélite emisor y construir el observable denominado pseudodistancia, básico en el uso del sistema, que puede considerarse en primera aproximación, como la suma de la distancia real que separa

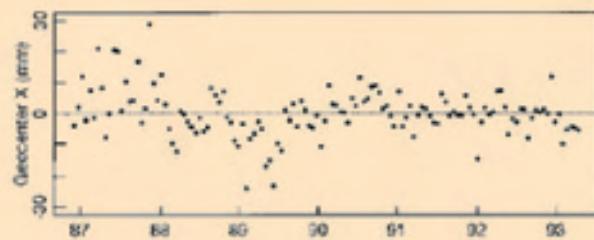


**Figura 6.** Constelación de algunos satélites observados por técnicas láser.

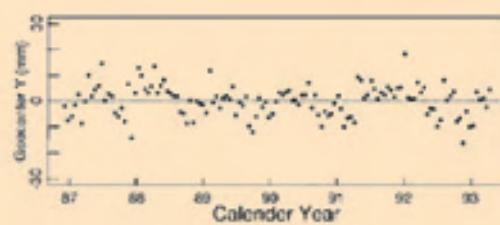
A partir de las pseudodistancias se puede conseguir el objetivo para el que se diseñó originalmente el sistema: determinar, de forma instantánea y continua, la posición geográfica de un móvil situado en cualquier lugar del mundo. Para ello se aplicarían, esencialmente, los fundamentos que se describen de forma gráfica en la figura 10.

Pero si en lugar de los códigos se utiliza como observable la señal portadora, aplicando un procedimiento interferométrico similar al descrito para las estaciones VLBI, podremos obtener la situación del receptor con un error de pocos centímetros. Si las observaciones sobre los satélites son suficientemente largas esos errores disminuyen, por una lado por la capacidad de modelar varios de los efectos perturbadores, y por otro lado por la utilización de métodos estadísticos sobre las series de soluciones obtenidas.

Desde 1992 un conjunto de receptores diseminados por la superficie del globo, se integra en el Servicio Internacional GPS para Geodinámica (IGS), en cuya página web <http://igscb.jpl.nasa.gov/>, el lector puede encontrar más información sobre este tema (fig. 11). Con el trabajo inte-



**Figura 7.** Variación de la posición del centro de gravedad terrestre



**Figura 8.** Estaciones SLR incluidas en el servicio internacional ILRS

al receptor del satélite más el desfase que tenga el reloj del receptor con respecto al sistema de tiempo de precisión con el que transmiten los satélites. Dicho desfase, que vendría expresado en unidades de tiempo, debe trasladarse a unidades de distancia. Basta para ello multiplicarlo por la velocidad de la luz.

Hemos prescindido, por brevedad, de efectos tales como la refracción atmosférica.

grado de los miembros de este servicio ha sido posible realizar una amplia densificación del ITRF, entre otras aplicaciones prácticas. Tales aplicaciones son muchas y están muy documentadas por lo que no vamos a hacer aquí un repaso exhaustivo. Baste citar unos ejemplos como su contribución a la monitorización del contenido de electrones de la ionosfera, o del contenido de vapor de agua en la troposfera que sirve para la determinación de la cantidad de agua precipitable en una zona muy localizada. Asimismo, junto con observaciones de nivel del mar hechas por satélites altimétricos, y medidas de dicho nivel en los mareógrafos, contribuye a monitorizar la evolución del nivel medio de los mares, separando el efecto de la variación del nivel del mar, de la posible variación de la altura del punto fijo en tierra al que se refieren las medidas de los mareógrafos.

Es importante destacar la sensibilidad del sistema a la hora de determinar la evolución de la situación de los puntos en los que se realizan las observaciones, lo que permite efectuar seguimientos del estado de la corteza en zonas tectónicamente activas, habiéndose convertido en una técnica complementaria ampliamente extendida en zonas de elevada actividad sísmica.

Esta técnica contribuye también a la evaluación del movimiento del polo, al estudio de la variación de la velocidad de rotación de la Tierra, o la monitorización de las variaciones de alta frecuencia en el tiempo universal con una precisión +/-60 milisegundos, aunque no contribuyan a la deter-

minación las variaciones de baja frecuencia, que quedan enmascaradas por la inestabilidad de la orientación de las órbitas, producida por fuerzas perturbadoras que no están suficientemente modeladas.

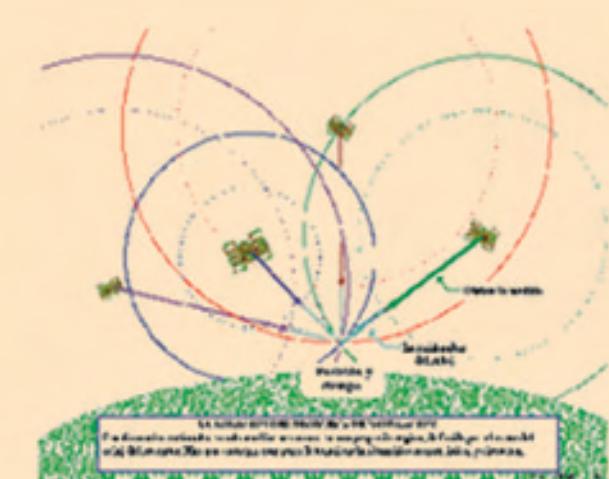
Otra aplicación de gran importancia es la que se conoce como transferencia de tiempo. Los satélites portan patrones atómicos muy estables para generar sus emisiones. Las características de tales patrones son similares a las utilizadas en los laboratorios de tiempo: lugares donde se define y monitoriza el segundo como unidad patrón de la magnitud tiempo. La observación de un mismo satélite de forma simultánea desde dos de esos laboratorios de tiempo permite comparar el estado de sus patrones atómicos de tiempo respectivos, en tiempo real, facilitando la elaboración común del Tiempo Universal Coordinado. En España la monitorización de la unidad de tiempo es responsabilidad del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, Cádiz.

El éxito de la misión GPS ha propiciado la aparición de otras misiones de fines y características similares. Además del sistema ruso GLONASS, en la actualidad se encuentra en fase de proyecto el nuevo sistema europeo de posicionamiento por satélite GALILEO, que debe estar listo a finales de esta década.



**Figura 9.** Visión artística de un satélite GPS en su órbita, y del conjunto de la constelación

Autor: Peter H. Dana, The Geographer's Craft Project, Department of Geography, The University of Colorado at Boulder en la pagina web <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>



**Figura 10.** Posicionamiento con GPS

Autor: Peter H. Dana, The Geographer's Craft Project, Department of Geography, The University of Colorado at Boulder en la pagina web <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>



**Figura 11.** Estaciones GPS incluidas en el servicio internacional IGS



**Figura 12.** Principio de funcionamiento del sistema DORIS

### Orbitografía Doppler por Radioposicionamiento Integrado sobre Satélite (DORIS)

DORIS es un sistema francés basado en la utilización del efecto Doppler en dos frecuencias de transmisión, que puede incluirse entre la instrumentación de misiones espaciales. De hecho ya lo ha sido en las misiones Spot2, Spot3, Spot4 así como en Topex/Poseidon, Jason o ENVISAT.

Al contrario que la mayoría de los sistemas de navegación, DORIS se basa en un enlace hacia el satélite. El receptor que está instalado en el satélite, mide el desplazamiento Doppler de la señal emitida por las estaciones de tierra en las frecuencias de trabajo (400 MHz y 2 GHz). El uso de dos frecuencias es necesario para reducir los errores por propagación ionosférica. Los datos recogidos se almacenan en los instrumentos instalados a bordo del satélite. El momento en que se envían esos datos a las estaciones de control situadas en tierra, depende de cual sea el satélite portador del sistemas DORIS. Por ejemplo, los satélites Spot 2 y 4 los envían cuando el satélite sobrevuela una de las estaciones receptoras situadas en Aussaguel (cerca de Toulouse, Francia) y en Kiruna (Suecia). En cambio, los satélites Topex o Jason los envían a través de satélites geoestacionarios a sus propias estaciones de control en tierra (fig. 12).

Las observaciones proporcionan el modelo de fuerzas que actúan sobre el satélite. Ese modelo se utiliza para reconstruir su órbita con precisión. A partir de las órbitas se sitúan exactamente las estaciones en tierra. Dos de estas estaciones tienen como misiones específicas la sincronización del sistema con el Tiempo Atómico Internacional y la actualización del tiempo en los sistemas montados a bordo de los satélites.



**Figura 13.** Estaciones DORIS incluidas en el servicio internacional IDS

La fase operativa del sistema comenzó en 1990. La red permanente de seguimiento incluye 50 balizas regularmente distribuidas sobre la tierra, incluyendo estaciones en las principales placas tectónicas (figs. 13 y 14). Todas ellas están integradas en el Servicio Internacional DORIS. Tanto en su página web <http://ids.cls.fr/>, como en la del Instituto Geográfico Nacional de Francia <http://www.ign.fr/fr/PI/activites/geodesie/> dedicada al sistema DORIS, se puede encontrar información detallada sobre este servicio. De esta última página se han sacado las figuras que aparecen en esta sección.

Los resultados de posicionamiento geocéntrico obtenidos desde 1998 tienen una precisión de 2 cm, y las determinaciones diarias del movimiento del polo tienen una precisión de aproximadamente 1-2 milisegundos de arco.

## Referencias

Este breve resumen de las técnicas geodésicas espaciales, puede ser ampliado en multitud de libros y páginas web. Citemos a modo de ejemplo los libros 'Satellite Geodesy', de G. Seeber, editorial de Gruyter, que proporciona una visión completa del tema, 'Basic Geodesy' de J.R. Smith, editado



**Figura 14.** Estación DORIS de Ny-Alesund (Noruega)

por Landmark Enterprises, que pretende introducir al lector en el mundo de la geodesia aportando conceptos en lugar de fórmulas matemáticas. Es interesante, también, visitar las páginas web de los organismos internacionales que se ocupan de cada una de las técnicas: para el VLBI <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>; para el SLR <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>; para el GPS <http://igsrb.jpl.nasa.gov/> y para DORIS <http://ids.cls.fr/>, así como la del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra, <http://www.iers.org/> en el que están incluidas todas esas organizaciones. Por su interés didáctico en el tema del GPS nos parece también muy recomendable visitar a la página web de la Universidad de Colorado en Boulder <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html> desarrollada por Peter H. Dana.

**Jorge Gárate y José Martín Davila.**

están en el Real Instituto y Observatorio de la Armada.  
San Fernando (Cádiz).

## LIBROS Y PUBLICACIONES RECIBIDOS

- **Conferencias sobre computación.** Richard P. Feynman, prólogo de Alberto Galindo. Editorial Crítica. 326 pp. 2003.
- **Guía Celeste mensual.** Ian Ridpath, Wil Tirion. Editorial Cambridge. 2003. 57 pp.
- **El cuento de Albert: Un contratiempo con Einstein.** Ro  
drigo Alonso Calzada. Ikonos Press.2002. 144 pp.
- **Ciencias Físicas en primaria y secundaria.** Jesús Lahera y Ana Forteza. Editorial CCS. 2003. 231 pp.
- **Efectos de coherencia atómica en la interacción luz-materia.** Victor A. Malyshen, Francisco Domínguez-Adame. Editorial Complutense. 2003. 159 pp.
- **Localization & Energy transfer in Nonlinear Systems.** Luis Vázquez, Robert S. Mackay y María Paz Zorzano. World Scientific. 2003. 351 pp.
- **Radioprotección.** SEPR. Vol X. nº 35. 2003-12-17
- **Progress of theoretical Physics.** Vol. 110. nº 3. 2003.
- **Progress of Theoretical Physics Supplement.** N° 150. 2003. Let's Face chaos through nonlinear Dynamics.
- **Romanian Reports in Physics.** Romanian Academy. Vol. 55. nº 1. 2003.
- **Nuclear España.** N° 234. Octubre 2003.