



# NAVEGANDO CON SATÉLITES

## (O CÓMO POSICIONARSE CON GPS Y GALILEO CON ERRORES DE POCOS CENTÍMETROS, EN TIEMPO-REAL Y A ESCALA CONTINENTAL)

Manuel Hernández-Pajares, J.Miguel Juan, Jaume Sanz

Dept. de Matemática Aplicada IV y Física Aplicada, Grupo de Astronomía y Geomática,  
Univ. Politécnica de Catalunya (gAGE/UPC)  
E08034-Barcelona  
(e-mail de contacto: manuel@mat.upc.es)

Los sistemas de navegación por satélite constituyen un avance tecnológico que sin duda no tardará en ser muy familiar. En particular el «Sistema de Posicionamiento Global», conocido corrientemente como GPS, ha llegado por ejemplo a expandir el concepto de reloj, de modo que en estos momentos ya es posible adquirir relojes de pulsera que junto a la hora proporcionan de forma continua las coordenadas geográficas tridimensionales. Estos «relojes», constituidos como núcleos de mapas inteligentes, están llamados a facilitar y guiar el recorrido en automóvil por rutas óptimas.

El sistema GPS fue concebido hace cosa de treinta años por el Pentágono para uso militar. Dispone de una constelación de más de veinticuatro satélites que emiten señales a modo de radiofaros y que permiten navegar en todo momento, y circunstancia meteorológica con un error del orden de varios metros. Cabe decir que estos satélites están orbitando alrededor de la Tierra a una altura media de 20200 kilómetros sobre la superficie terrestre y con un periodo de unas 12 horas (dando dos vueltas cada día). Por otro lado, el cálculo de la posición se obtiene resolviendo un sencillo problema geométrico de triangulación, donde a partir de las distancias de al menos cuatro satélites GPS, medidas por el receptor (a partir de la señal emitida por los mismos) y de sus órbitas, se puede determinar la posición tridimensional del usuario en cualquier lugar del planeta.

En los años ochenta, la ciencia «civil» empezó a desarrollar con éxito nuevas estrategias de procesamiento de la señal GPS que permitieron un posicionamiento con errores centimétricos, y que se han aplicado de inmediato en ingeniería y topografía, así como en la monitorización de los movimientos de placas tectónicas (esto es, el movimiento o deriva de los continentes). Desde entonces son muchos y significativos los avances que se vienen obteniendo gracias a este sistema. Entre ellos está su uso como un gran «scanner» planetario que permite reconstruir tomográficamente la atmósfera terrestre, en concreto la parte superior llamada Ionosfera, que es la que más afecta a la señal GPS.

En el congreso del 'Institute of Navigation' (ION-GPS99), uno de los más referenciados en su campo, celebrado en 1999 en Nashville (Estados Unidos), demostramos que con GPS es factible conocer con un error inferior a los diez centímetros la posición en tiempo real (es decir, inmediatamente) de cualquier móvil situado a centenas de kilómetros de la estación de referencia más cercana. Todo ello incluso en el caso de tormentas geomagnéticas, cuando la Ionosfera es perturbada notablemente por la irrupción de partículas muy energéticas del viento solar.

Este avance no se podría comprender plenamente si se ignora la tensión de intereses contrapuestos entre militares y civiles en los Estados Unidos. Mientras los primeros procuran restringir la precisión a los usuarios no autorizados, los segundos intentan lo contrario. Paradójicamente, todos se nutren de la misma fuente de fondos públicos.

En este contexto se desarrolló hace más de diez años el concepto de 'Differential GPS' (DGPS), que consiste en posicionar un receptor GPS respecto a otro que se toma como referencia y del que se conocen perfectamente sus coordenadas. De esta forma se consigue cancelar buena parte de los errores, básicamente la parte común de propagación, errores en las orbitas y relojes de los satélites.

Con la introducción del DGPS, y mediante la técnica denominada 'Real Time Kinematics' (RTK) o alternativamente, dependiendo del contexto, 'Local Area DGPS' (LADGPS), se consiguen precisiones de unos cuantos centímetros para distancias inferiores a 10 kilómetros de la estación de referencia. A escalas mucho más amplias, de

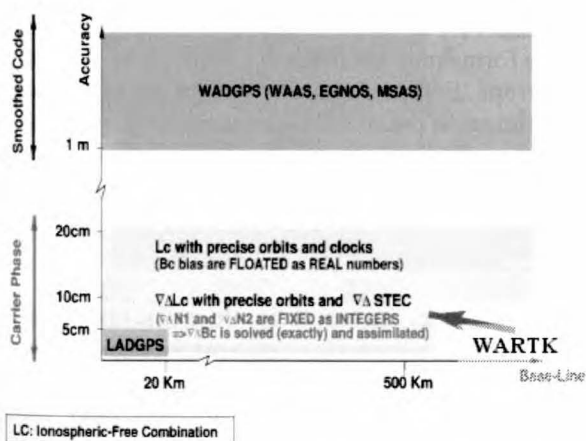


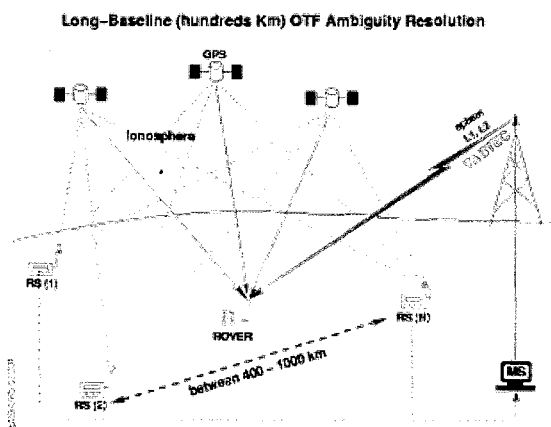
Figura 1: Exactitud en el posicionamiento frente a distancia a la estación de referencia más cercana, para distintas

unos 1000 kilómetros, se ha establecido el sistema 'Wide Area DGPS' (WADGPS) que permite un posicionamiento con errores del orden del metro para usuarios equipados con receptores adecuados.

La estrategia citada anteriormente —elaborada por el grupo Astronomía y Geomática de la Universidad Politécnica de Cataluña (gAGE/UPC), en colaboración con el Dr. Oscar Colombo (NASA)— permite extender las precisiones a escala local (LADGPS) a escalas continentales (WADGPS), tal como se puede ver en la figura 1.

El éxito de la nueva técnica (WARTK, "Wide Area Real Time Kinematics", patentada por UPC) radica en una predicción muy exacta de los efectos ionosféricos (alta atmósfera) sobre la propagación de la señal GPS. Mediante técnicas tomográficas similares a las usadas en medicina, en conjunción con el modelado muy preciso de los observables geodésicos, se reconstruye la distribución tridimensional de electrones libres. Los receptores de tierra, junto a la constelación de satélites GPS, forman un enorme escaner planetario que sondea continuamente la atmósfera y permite reconstruir, en tiempo real (inmediatamente), su distribución electrónica tridimensional.

Así, a partir de un conjunto de estaciones de referencia que recogen los haces de rayos procedentes de los satélites, y que pueden estar separadas cente-



**Figura 2:** Las correcciones WARTK, en particular las ionosféricas, se han de distribuir a los usuarios junto a las observaciones de los satélites.

nares de kilómetros (figura 2), se consigue modelar el efecto de la ionosfera en cada observación a partir de la estimación aproximada de la distribución tridimensional de los electrones libres que interactúan con las señales emitidas por los satélites GPS. Ello permite estimar en cualquier punto de la región de cobertura el efecto ionosférico con un error inferior a 2.7 cm; dentro del algoritmo de

posicionamiento, esta cantidad constituye un valor límite para modelar con una exactitud superior al centímetro las pseudodistancias receptor-satélite con las que se resuelve el problema de navegación.

Una de las virtudes de la estrategia de navegación presentada es su buen comportamiento en condiciones de alta actividad solar. Actualmente nos encontramos todavía en esta situación, después del máximo alcanzado en los años 2000-2001. La variación de esta actividad, que se repite cíclicamente cada once años —el llamado ciclo solar— está jugando un papel importante en la puesta al día de los resultados en posicionamiento GPS de precisión. La época de mayor efervescencia en el desarrollo de este tipo de aplicaciones ha coincidido con un periodo de baja actividad solar. A medida que ésta ha ido creciendo, buena parte de los modelos y algoritmos que involucraban a la Ionosfera y en su momento funcionaban, están dejando de funcionar.

El modelo tomográfico se ha puesto a prueba bajo diferentes condiciones de actividad geomagnética y perturbaciones (que junto con la el máximo del ciclo solar constituyen un auténtico talón de Aquiles de los modelos ionosféricos). Para ello se han utilizado datos procedentes de estaciones permanentes y móviles GPS en diferentes latitudes. Buena parte de los receptores permanentes corresponden a la red de estaciones que desde principios de los años noventa mantiene el 'International Geodynamical Service for GPS' (IGS) (se trata de una extensa base de datos con receptores distribuidos a lo largo de todo el planeta, y que son de libre distribución para la comunidad científica y técnica).

En el ámbito de las aplicaciones civiles, un posicionamiento en tiempo real con exactitudes de unos centímetros, a escala continental, puede simplificar las tareas y abaratar costes en actividades de ingeniería y topografía, además de abrir nuevas aplicaciones insospechadas en el campo del transporte. Por ejemplo para la aviación civil, genera expectativas de cara a la posibilidad de proporcionar de forma muy económica a miles de aeródromos de Europa, Estados Unidos y el Japón, categoría de aproximación precisa III, que supondría, por ejemplo, una exactitud «garantizada» en la coordenada vertical mejor que 60 cm. Queda pendiente sin embargo en esta aplicación cómo garantizar la alta integridad requerida en aviación civil.

Efectivamente, un servicio de posicionamiento subdecimétrico a escala continental puede ser factible utilizando una técnica como WARTK. Baste considerar que para poder proporcionar tales servicios con la técnica anterior RTK, válida para distancias inferiores a unos 10 kilómetros de la estación de referencia más cercana, harían falta en

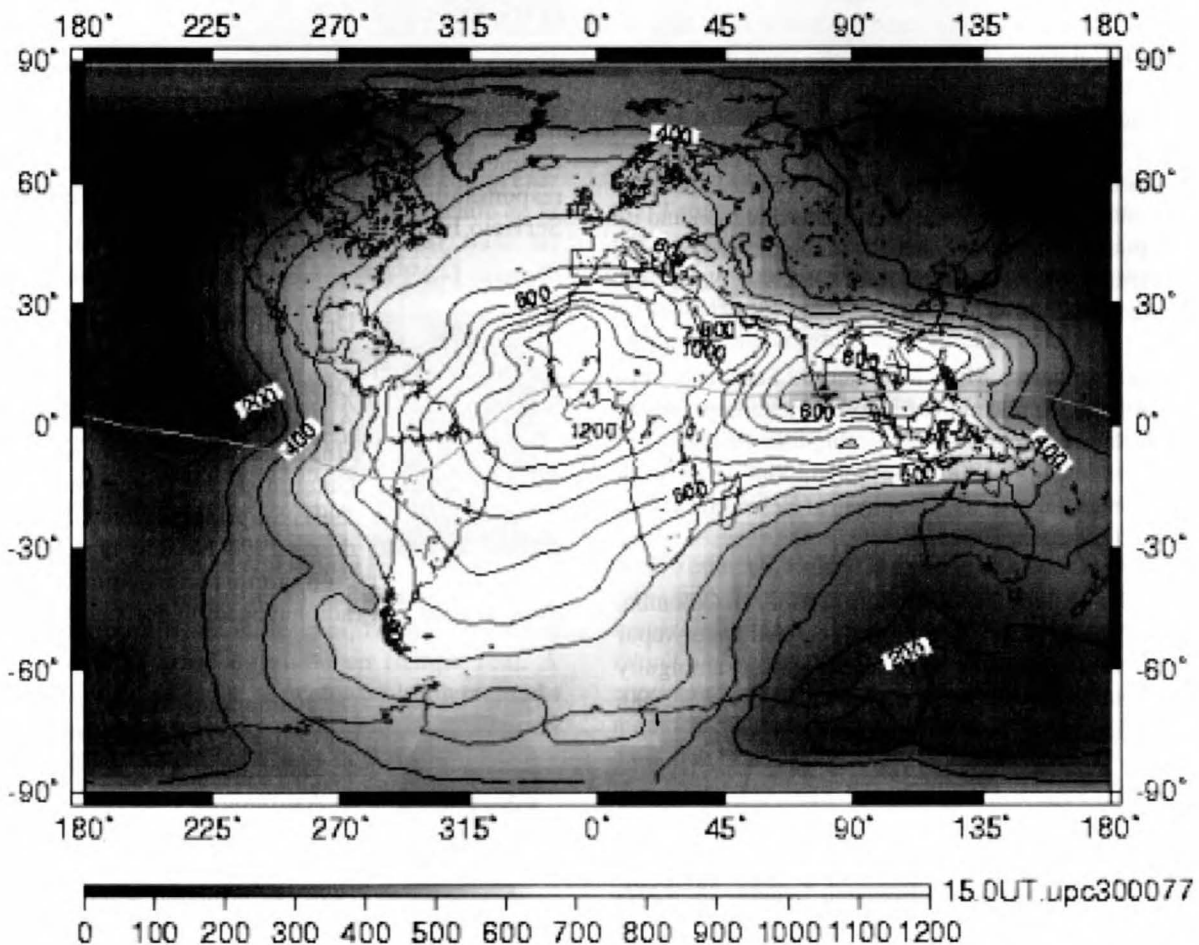
un país de tamaño medio como España (unos 500000 kilómetro<sup>2</sup>) un conjunto de más de 1000 estaciones de referencia. Y esto es poco factible, no únicamente por la inversión requerida (más de 10 millones de Euros solamente en los receptores) sino sobre todo por el esfuerzo de construcción, mantenimiento y coordinación de las más de 1000 estaciones permanentes. Y no digamos si, lógicamente, consideramos la extensión a escala continental. Por ejemplo para la Unión Europea, cerca de 10000 estaciones serían requeridas, aumentando toda la inversión y coordinación asociada en un orden de magnitud.

Ésta es la razón por la que un servicio factible de Navegación por Satélite a escala europea, con errores típicos de pocos centímetros, requiere una determinación ionosférica en tiempo real muy precisa. De esta forma se puede aumentar entre 10 y 100 veces la distancia entre estaciones de referencia, pudiéndose usar, por ejemplo, redes de GPS diferencial de Área amplia ("Wide Area DGPS"), con separaciones típicas de varios centenares de kilómetros o más. En otras palabras, WARTK permite que con sólo 20-30 estaciones (en vez de unas 10000) se pueda dar servicio de navegación

subdecimétrica en toda Europa. Y además estas redes ya se están construyendo con otro objetivo: el de proporcionar una navegación con errores de pocos metros y con integridad, que cumpla los estándares de la aviación civil, su principal aplicación (EGNOS en Europa, WAAS en Estados Unidos, MSAS en Japón, etc...).

Actualmente, la capacidad mencionada de generar correcciones ionosféricas diferenciales precisas a larga distancia, está siendo aplicada por los autores de este artículo en dos proyectos: (1) Desarrollo de una nueva técnica de navegación subdecimétrica instantánea ("single epoch mode") con los futuros sistemas de 3 frecuencias Galileo y GPS modernizado (WARTK-3, recientemente patentada por ESA). (2) Análisis de la calidad de las correcciones ionosféricas distribuidas para el uso de agencias de aviación civil (como EUROCONTROL en Europa).

En este contexto podemos mencionar asimismo un proyecto internacional que involucra a varias agencias con el objetivo primordial de generar cada 2 horas mapas globales de correcciones ionosféricas. Éste proyecto está realizándose ininterrumpidamente.



**Figura 3:** Ejemplo de mapa global de correcciones ionosféricas, calculado por UPC a partir de datos de unas 150 estaciones GPS distribuidas en todo el mundo (17 de Marzo de 2002, 15 UT). Las unidades son décimas de TECU (1 TECU = 0,16 cm en L1, aproximadamente).

te desde 1998, e involucra a cinco centros de análisis del Servicio GPS Internacional (IGS): CODE (Univ. Berna), ESA (Agencia Espacial Europea), JPL (Jet Propulsión Lab), NRCAN (Nacional Research Council of Canada) y UPC (los autores).

Estos mapas (véase un ejemplo en figura 3), y muy pronto su combinación como producto oficial IGS, están disponibles en <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/YEAR/DOY> (en mayúsculas el año y día del año correspondientes). Uno de los próximos objetivos de las actividades ionosféricas IGS será calcular tales mapas globales de la ionosfera casi instantáneamente, de tal forma que puedan beneficiarse tanto aplicaciones científicas como tecnológicas.

Parece claro que nuestro futuro, en el que Europa está apostando fuertemente con el sistema GALILEO, está cada vez más en manos de la electrónica y de los satélites, los cuales a pesar de orbitar velozmente y a gran distancia, nos dejan saber «dónde estamos» con un precisión inusitada.

### MÁS INFORMACIÓN EN:

Colombo, O.L., M. Hernández-Pajares, J.M. Juan, J. Sanz and J. Talaya, Resolving carrier-phase ambiguities on-the fly, at more than 100 kilómetro from nearest site, with the help of ionospheric tomography, IONGPS'99, Nashville, USA, September 1999.

Hernández-Pajares M., J.M. Juan, J. Sanz and O.L. Colombo, Precise ionospheric determination and its application to real-time GPS ambiguity resolution, Institute of Navigation ION GPS'99, Nashville, Tennessee, USA, September 1999.

Hernández-Pajares, M., J.M. Juan, J. Sanz and O.L. Colombo, Application of ionospheric tomography to real-time GPS carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400-1000 kilómetro, and with high geomagnetic activity, Geophysical Research Letters, 27, 2009-2012, 2000a.

Hernández-Pajares, M., J.M. Juan, J. Sanz, O. Colombo, H. Van der Marel, Real-time integrated water vapor determination using OTF carrier-phase ambiguity resolution in WADGPS networks, ION GPS'2000, Salt Lake City, September 2000b.

Hernández-Pajares, M., J.M. Juan, J. Sanz, O.L. Colombo, and H. van der Marel, A new strategy for real-time Integrated Water Vapour determination in WADGPS networks, Geophysical Research Letters, 28, 3267-3270, 2001a.

Hernández-Pajares, M., J.M. Juan, J. Sanz, O.L. Colombo, Tomographic modeling of GNSS ionospheric

corrections: Assessment and real-time applications, ION GPS'2001, Salt Lake, USA, September 2001b.

Hernández-Pajares, M., J.M. Juan, J. Sanz, O.L. Colombo, Improving the real-time ionospheric determination from GPS sites at Very Long Distances over the Equator, Journal of Geophysical Research, 107(A10), 1296, doi:10.1029/2001JA009203, 2002.

### AGRADECIMIENTOS:

Los autores desean expresar su agradecimiento al profesor de la UPC, Miquel Escudero, por la revisión estilística realizada en una versión anterior de este trabajo.

### BREVES BIOGRAFÍAS:



Dr. Manuel Hernández-Pajares es profesor titular de Universidad del Dept. de Matemática Aplicada IV, grupo de Astronomía y Geomática, en la Universidad Politécnica de Catalunya, en Barcelona, desde 1993. Empezó a trabajar con sistemas de navegación por satellite (GPS) y aplicaciones geodésicas en 1989. Su principal tema de trabajo desde 1994 ha sido la determinación atmosférica (ionosférica y troposférica) y la radionavegación por satellite. Actualmente comparte sus obligaciones docentes con la responsabilidad de las actividades ionosféricas del Servicio Internacional GPS (IGS).



Dr. J. Miguel Juan Zornoza es profesor titular de Universidad del Dept. de Física Aplicada, grupo de Astronomía y Geomática, en la Universidad Politécnica de Catalunya, en Barcelona, desde 1991. Su principal tema de trabajo desde 1994 ha sido la determinación atmosférica (ionosférica y troposférica) y la radionavegación por satellite.



Dr. Jaume Sanz Subirana es profesor titular de Universidad del Dept. de Matemática Aplicada IV, grupo de Astronomía y Geomática, en la Universidad Politécnica de Catalunya, en Barcelona, desde 1988. Su principal tema de trabajo desde 1996 ha sido la determinación atmosférica (ionosférica y troposférica) y la radionavegación por satellite.