

cartografía y sistemas de geodesia espacial. gps, glonass



Autor: Josu Lanzuela Irigoyen (Ingeniero superior en geodesia y cartografía, Ingeniero técnico en topografía)

RESUMEN

En los últimos 20 años, la espeleología ha evolucionado espectacularmente tanto en la faceta deportiva como en la científica. Es en este último campo en el que el desarrollo de los sistemas de geodesia espacial ha puesto a nuestra disposición nuevas tecnologías que nos permiten ser más rigurosos y ambiciosos en los trabajos de divulgación científica que se plantea nuestro colectivo.

El presente artículo pretende describir el sistema de geodesia espacial actual más utilizado (GPS), el sistema público y gratuito de posicionamiento diferencial mediante el sistema RASANT, así como abordar conceptos cartográficos esenciales que todo el colectivo espeleológico podemos tener la necesidad de emplear en uno u otro momento en el desarrollo de nuestra actividad.

ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten 20 Jahren hat sich die Höhlenforschung in sportlicher als auch wissenschaftlicher Hinsicht ausserordentlich entwickelt. Im letzteren Bereich hat uns die Entwicklung der Weltraumgeodäsie neue Technologien zur Verfügung gestellt, welche uns erlauben, härter und eifriger in der wissenschaftlichen Bekanntmachung der Arbeiten und Aufgaben zu sein, die sich unser Kollektiv stellt.

Der gegenwärtige Artikel strebt danach, das aktuell gebräuchlichste System der Weltraumgeodäsie (GPS) zu beschreiben; ein öffentliches und kostenloses System, welches mittels der Anwendung RASANT die verschiedenen Lagen bestimmt, als auch hauptsächlich kartographische Konzepte erarbeitet, die wir alle aus dem Bereich der Höhlenforschung bei Bedarf früher oder später in dem Ablauf unserer Aktivitäten einsetzen können.

RESUME

Ces 20 dernières années, la spéléologie a évolué de façon spectaculaire tant dans la facette sportive comme celle scientifique. C'est dans ce dernier secteur où le développement des systèmes de géodésie spatiale a mis à notre disposition de nouvelles technologies qui nous permettent être plus rigoureux et ambitieux dans les travaux de divulgation scientifique que notre collectif se pose.

Cet article prétend décrire le système de géodésie spatiale actuel le plus utilisé (GPS), le système public et gratuit de positionnement différentiel à travers du système RASANT, ainsi qu'aborder des concepts cartographiques essentiels que tout le collectif de spéléologie pouvons avoir le besoin d'utiliser un moment donné ou un autre pour le développement de notre activité.

ABSTRACT

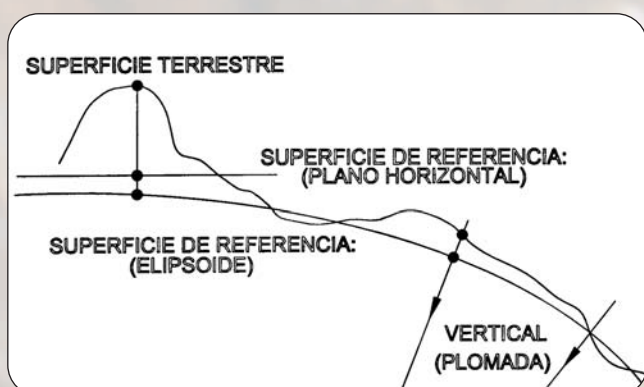
In the last 20 years, Speleology has spectacularly evolved in its sporting and scientific facets. It is in this last aspect where, the advances in geodesic spatial systems has given us new technologies that allowed us to be more rigorous and ambitious in the works of scientific divulgation that reflects our group accent.

This article wants to describe the spatial geodesic system currently best used (GPS), the free and public system of differential attitude by RASANT system as well as to undertake essential cartographic systems that all the Speleologist Group may have the need to use any time when developing our activity.

I. CUESTIONES SOBRE GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

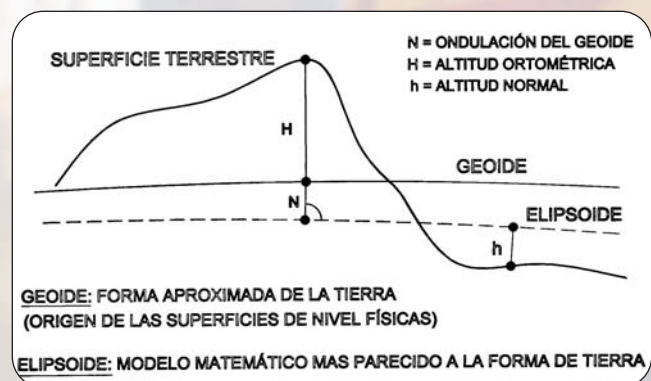
Una definición clásica de Geodesia: "Ciencia que se encarga de medir la forma y el campo de gravedad terrestre así como sus variaciones con el tiempo".

Uno de los problemas fundamentales de la Geodesia es el establecer sistemas de referencia donde referir las observaciones realizadas sobre la superficie terrestre. Cuando trabajamos con porciones pequeñas, se puede decir que el plano horizontal coincide con la superficie terrestre, en caso contrario las perpendiculares a ese plano ya no coinciden con las líneas de la plomada y no se pueden seguir proyectando los puntos sobre un plano horizontal, ya que las figuras aparecerían distintas al proyectar sobre otro.



Debido a la imposibilidad de definir la superficie real de la tierra por una expresión matemática, el problema se ha afrontado clásicamente adoptando diferentes superficies de aproximación, la esfera, el elipsoide de revolución, el elipsoide de tres ejes, el geoide (éste por razones físicas) etc.

A finales del S. XVII Newton afirmó que la forma de equilibrio de una masa fluida homogénea sometida a las leyes de la gravitación universal, y girando alrededor de un eje, era un elipsoide de revolución achatado por los polos. Efectivamente, como la composición interna de la tierra no es homogénea, y debido a la plasticidad de la tierra y a que la fuerza centrífuga es máxima en el ecuador, la forma generada del planeta es semejante a un **elipsoide** de revolución de poca excentricidad. Puede considerarse, con suficiente aproximación, a la tierra como una superficie elipsoidal, en donde las *superficies de nivel* (aquellas que son ortogonales en todos los puntos a las líneas de fuerza del campo gravitatorio terrestre) también serán elipsoides, pero que debido a la continua variación de la gravedad, *no son paralelos entre sí*. Aunque el modelo matemático exacto que más se parece a la forma de la tierra sea el elipsoide, se admite como forma real de la tierra la superficie de equilibrio formada por los mares en calma (prolongados por debajo de los continentes), es lo que llamamos **geoide**, superficie física sobre la cual la gravedad en todos sus puntos es normal a ella (superficie de nivel). La determinación de esta superficie es, por tanto, fundamental puesto que en la cartografía oficial es el origen de altitudes.



Por el contrario, para las observaciones planimétricas (X, Y) y debido a que el geoide no es una superficie definida por una fórmula exacta, se emplea el elipsoide de revolución, modelo matemático relativamente sencillo que más se aproxima a la superficie terrestre. Para los cálculos geodésicos se define un *punto fundamental* en el que la normal al geoide coincide con la normal del elipsoide, siendo en ese punto ambas superficies tangentes. Para cualquier otro punto la normal al geoide y al elipsoide forma un ángulo llamado *desviación relativa de la vertical*. La distancia entre ambas superficies se le denomina *ondulación del geoide*.

Las dimensiones del elipsoide terrestre se han obtenido sucesivamente en base a los diferentes trabajos astrónomo-geodésicos y gravimétricos. Hoy día con la incorporación del GPS se ha adelantado enormemente en la tarea de la determinación del geoide.

SISTEMAS DE REFERENCIA

Establecer un *sistema de referencia clásico* implica adoptar la figura (superficie) que mejor se adapta a la forma de la tierra. La elección de un determinado elipsoide de referencia, es decir, de sus dimensiones y orientación con el cuerpo de la tierra caracterizan lo que se llama **el datum**, que nos fija, entre otros, los siguientes parámetros:

- Semiejes a y b del elipsoide o bien el semieje a y aplanamiento (α).
- Coordenadas x, y, z , del centro del elipsoide respecto del centro de masas terrestre.
- Giros para colocar el eje del elipsoide paralelo al de rotación de la tierra.

Además el datum debe fijar un origen de latitudes (φ), de longitudes (λ) y altitudes (h), y como ya se ha dicho, un punto astronómico fundamental en el que el geoide y el elipsoide elegido son tangentes o son paralelos y por tanto se conoce en ese punto la ondulación del geoide (distancia de éste al elipsoide).

A continuación se muestra un cuadro comparativo de los sistemas de referencia bidimensionales (X, Y) que se han utilizado oficialmente en el estado español:

Parámetros	Red Antigua (*)	Actual ED50
Elipsoide de Referencia	Struve 1860.	Hayford1924.
Semieje Mayor (a)	6778298.3 m.	6378388.0 m.
Aplanamiento α	1/299.73	1/297.00
Punto Fundamental.	Madrid.	Postdam (Alemania).
Latitud φ	40° 24' 30" N	Longitudes referidas a Greenwich.
Longitud λ	3° 41' 15" W	
Altitud h	655 m.	

(*) Longitudes referidas a Madrid.

Ambas redes tienen como datum altimétrico Alicante, siendo fundamental distinguir entre:

Altitud: Distancia medida verticalmente desde un punto a la superficie de nivel de referencia que constituye el origen de las altitudes de los mapas topográficos de un país. En nuestro caso las altitudes vienen referidas al nivel medio del mar en Alicante.

Altitud Normal: Es la longitud medida sobre la normal al elipsoide desde este a un punto sobre la superficie terrestre.

Altitud Ortométrica: Altitud de un punto de la Superficie Terrestre sobre el geoide, medida a lo largo de la línea de plomada. Debido a la falta de paralelismo entre las superficies de nivel o superficies equipotenciales en el campo de la gravedad, la altitud ortométrica es distinta para puntos de una misma superficie de nivel.

Por el contrario, en geodesia espacial se utilizan sistemas de referencia tridimensionales geocéntricos,

inerciales o casi inerciales y en los cuales se cumple la mecánica newtoniana. Los que más nos interesan y a los que nos vamos a referir son el WGS84 (GPS) y el Internacional Terrestrial Reference Frame (ITRF89), ÉPOCA 1989,0 (adoptado por los países con datum europeo como ETRF89).

El sistema de referencia terrestre es el World Geodetic System 1984, definido así:

- El origen es el centro de masas de la tierra.
- El eje Z es paralelo a la dirección del polo medio, definido por el Bureau Internacional de la Hora (BIH).
- El eje X es la intersección del meridiano origen (Greenwich) y el plano del ecuador medio.
- El eje Y, ortogonal a los anteriores.

Siendo los parámetros que definen el elipsoide de referencia:

- Semieje mayor $a = 6378137$ m.
- $\alpha = 1 / 298.257 = 0.00335281$
- $\omega = 7292,115 \times 10^{-14}$ radianes / s (velocidad de rotación).
- Constante de gravitación terrestre = 3968005×10^8 m³ s⁻²

SISTEMAS DE COORDENADAS

Es la elección del tipo de coordenadas, (no confundir con el tipo de proyección cartográfica) *que vamos a utilizar sobre la superficie auxiliar de referencia*, por tanto tendrán un origen y una parametrización diferente, a saber:

- Geodésicas (φ, λ, h)
- Geocéntricas (X, Y, Z)
- Polar (d, θ)
- Cartesianas (x, y)

REDES GEODÉSICAS

Las redes geodésicas son un conjunto de puntos debidamente señalados en el terreno mediante monumentaciones que garanticen su durabilidad en el tiempo y facilidad de observación. Estas redes de *vértices geodésicos* facilitan tanto el transporte de coordenadas a lo largo de un territorio determinado como el acceso de esas coordenadas a los usuarios del mismo.

La red geodésica española utilizó el elipsoide de *Struve*, con origen Madrid, que fue con el que se calculó la antigua red, por eso aún podemos encontrar mapas con origen de longitudes Madrid (ojo con los 3° 41' 15" W de diferencia con Greenwich). Actualmente se está empleando el de *Hayford* (1910), con punto fundamental en Postdam, adoptado como Elipsoide Internacional de Referencia en 1924. Las longitudes y latitudes geodésicas están referidas al elipsoide y las astronómicas al geoide.

Según sea la definición de estas redes, se tendrá:

- Redes planimétricas o bidimensionales (X, Y).
- Redes altimétricas o de nivelación.
- Redes tridimensionales geocéntricas (redes GPS etc.).

En 1950, los EEUU compensan las observaciones de la red geodésica española, denominándose a este ajuste *Sistema Geodésico RE.50*, (red bidimensional) apo-

yado en su sistema geodésico de referencia para Europa ED50. En 1968 el Servicio Geográfico del Ejército (SGE) decide adoptar el ED50 y la proyección UTM (abandonando el elipsoide de Struve y la proyección policéntrica) para la formación del mapa topográfico nacional 1:50.000. Dos años más tarde, en 1970 el Instituto Geográfico Catastral toma igual decisión.

Desde entonces y hasta la actualidad, es permanente el esfuerzo en mejorar tanto la calidad de las observaciones sobre la red geodésica como la búsqueda del datum más adecuado para la península y el continente europeo. Como consecuencia de esto tenemos sucesivamente el ED77, ED79, ED87, etc. Actualmente la Red Geodésica Nacional Convencional (datum ED50) se subdivide en dos: RPO (red de primer orden) y ROI (red de orden inferior), estando ya abandonada la antigua denominación de vértices de 1º, 2º y 3º orden. La ROI consta de 11.000 vértices monumentados en el terreno. Como complemento se tiene la red de Nivelación de Alta Precisión (NAP), en fase de reobservación, con 12.000 Km. de desarrollo. Datum vertical Alicante.

La aparición de las tecnologías GPS, han provocado un cambio significativo en el concepto de las redes geodésicas nacionales e internacionales, que en el estado español se traduce principalmente en:

CAMPAÑA IBERIA95

La campaña IBERIA95, realizada por el IGNE (Instituto Geográfico Nacional de España) y el Instituto Portugués de Cartografía e Cadastro (IPCC), tuvo como objetivo primordial la densificación en la Península Ibérica del "European Terrestrial Reference Frame 1989" (ETRF89), intentando establecer así una red geodésica tridimensional de alta precisión. La red está formada por 39 estaciones, de las cuales 12 son portuguesas. Resultando las coordenadas finales en el sistema de referencia ITRF96 para la época 1995.4 y en el sistema de referencia ETRS89.

PROYECTO REGENTE

La Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales (REGENTE) tiene como finalidad cubrir mediante aproximadamente 1.200 estaciones, todo el territorio del estado español con una densa red geodésica tridimensional de alta precisión. En cada Hoja del MTN 1/50.000 deberá existir, como mínimo, un vértice REGENTE coincidente con un vértice de la Red Geodésica Convencional (ROI) o con un clavo de una línea de Nivelación de Alta Precisión (NAP). Las observaciones se están apoyando en la red IBERIA95, de manera que quede asegurada la homogeneidad de REGENTE con ETRF89. La precisión que se pretende obtener se estima superior a 5 cm. en cada coordenada, utilizando el elipsoide asociado al sistema GRS80 (muy similar al WGS84) para la transformación de coordenadas tridimensionales en coordenadas geodésicas (altitudes en este caso referidas al elipsoide).

Con la finalización de REGENTE se pretende:

- Adoptar el nuevo Sistema de Referencia Terrestre

Europeo (ETRS 1989) para todos los trabajos geodésicos.

- Obtener parámetros precisos de transformación ED50-ETRS89 que permitan la adopción de este último sistema para la cartografía nacional.

- Calcular un geoide centimétrico para transformación de altitudes elipsoidales (GPS) en altitudes sobre el nivel medio del mar.

Actualmente se escucha frecuentemente que el GPS "mide mal las cotas". Esto no es exactamente así sino que en WGS84 el origen de altitudes es el elipsoide y en ED50 es el geoide (nivel medio del mar en Alicante). Como el geoide no es conocido con suficiente precisión, el error se produce en el cambio de datum. Actualmente ya se está realizando cartografía en el nuevo sistema (ETRS89), de manera que lo fundamental y más importante para nosotros (los usuarios de gama baja), será que podremos utilizar las tres coordenadas de nuestro receptor GPS directamente sobre la nueva cartografía sin necesidad de realizar cambios de datum, traducándose esto lógicamente en una navegación mucho más precisa sobre la misma.

PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS

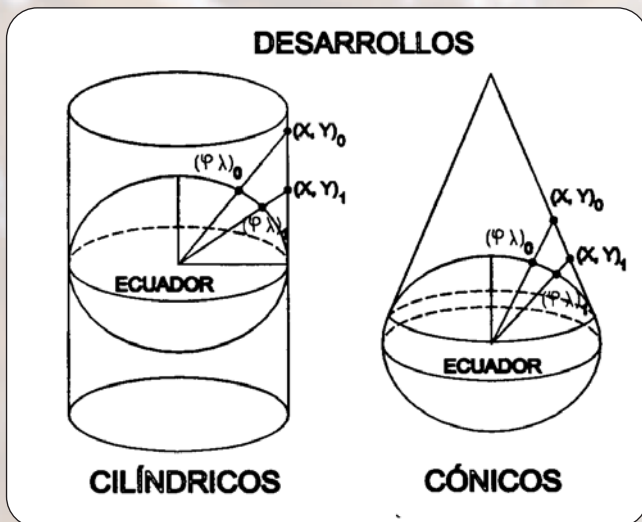
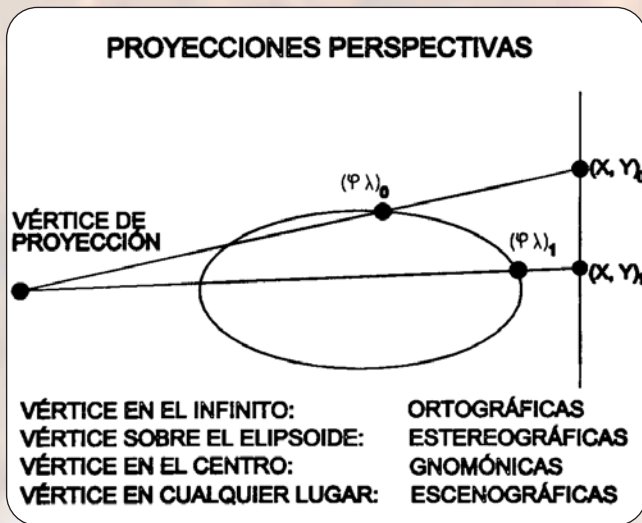
Básicamente tratan de solucionar el problema que surge al intentar representar una *superficie irregular* y no *desarrollable* como la de la tierra (ni la esfera ni el elipsoide son desarrollables) sobre el papel. Los mapas son la representación parcial de la superficie de la tierra en donde no se ha prescindido de la curvatura de la misma, en caso contrario le llamamos *plano*. Una característica común a ambos es el factor de escala, que relaciona el tamaño de un objeto en la realidad con el de su representación.

Los mapas son superficies planas, y lamentablemente, tratar de representar cualquiera de las superficies de aproximación (esfera, elipsoide etc.) en el papel es imposible si pretendemos conservar todas las distancias, ángulos y superficies. El *campo* de una proyección es el límite hasta donde puede aplicarse un desarrollo respecto del origen de la proyección, y a partir del cual las deformaciones lineales (0.9996 en la UTM) y angulares dejan ya de ser aceptables.

Una proyección es la correspondencia biunívoca matemática entre los puntos del elipsoide y sus transformados en un mapa. Esta correspondencia se define en función de las coordenadas geográficas (φ , λ) de cada punto del elipsoide y se transforman en el mapa en coordenadas cartesianas (x , y). Esta correspondencia es puntual y biunívoca entre los puntos del mapa y del elipsoide, siendo el número de proyecciones potencialmente ilimitado. En función de la magnitud que se conserva en la transformación, se tienen: proyecciones que conservan distancias (*automecicas o equidistantes*), proyecciones que conservan ángulos (conformes), proyecciones que conservan superficies (*equivalentes*) y las proyecciones que conservan parcialmente ángulos y distancias (*Afilácticas*).

La elección del tipo de proyección depende del uso que se pretenda del mapa, aunque en general, en los mapas actuales la proyección más utilizada es la conforme. Las proyecciones, en función de las definiciones geo-

métricas de los distintos sistemas tenemos: *Naturales o poliédricas*: Consiste en dividir la superficie de la tierra mediante meridianos y paralelos en trapezios esféricos de pequeña extensión y proyectar cada uno de ellos sobre el plano tangente al elipsoide, en el punto medio, formando una hoja o mapa (antigua proyección del Mapa Topográfico Nacional). *Proyecciones*: la transformación resulta de proyectar la superficie de referencia sobre un plano, desde un único punto llamado vértice de proyección. *Desarrollos*: La superficie terrestre (esfera o elipsoide) en vez de proyectarse sobre un plano, se proyecta sobre un cono o cilindro convenientemente elegido, después el cono o cilindro se desarrolla sobre el plano.



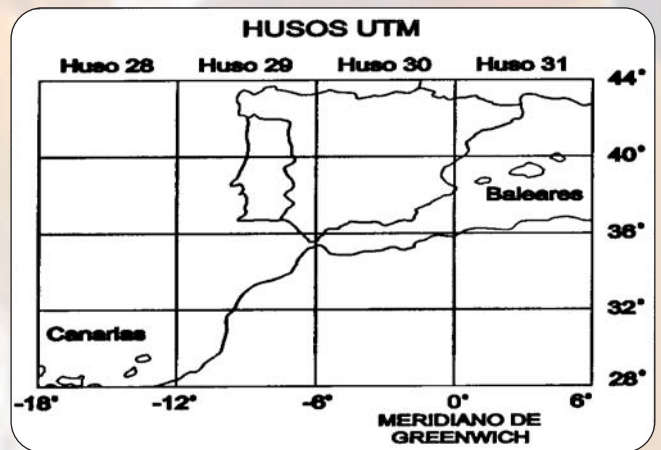
PROYECCIÓN UTM

Es la proyección adoptada oficialmente en el estado español, geoméricamente, en esta proyección se considera la tierra como un elipsoide de revolución (Hayford) tangente interiormente a un cilindro a lo largo de un meridiano. Las condiciones que se le aplica a esta proyección son las siguientes:

- La proyección debe ser conforme¹ (conservar los ángulos).
- El meridiano central debe ser automecoico.

- El ecuador y el meridiano central de cada huso se representarán por líneas rectas.
- El origen de coordenadas en la proyección será la intersección del ecuador y el meridiano central del huso.

Ahora bien, este sistema, aplicado a grandes extensiones de longitud, hace que nos vayamos alejando del meridiano de tangencia, lo cual causa deformaciones considerables. Por ello, se recurre al artificio de subdividir la superficie terrestre en 60 husos o zonas iguales de 6 grados de longitud, con la cual resultan 60 proyecciones iguales, pero cada una con su respectivo meridiano central. Los husos se numeran del 1 al 60 a partir del meridiano de 180° de longitud respecto del de Greenwich, por lo que este meridiano separa los husos 30 y 31, estando el estado español comprendido entre los husos 28, 29, 30 y 31. Cuando nos refiramos por tanto a la posición de un punto en proyección UTM es imprescindible, además de sus coordenadas X, Y, Z, citar el huso al que pertenece.



Por último recordar que esta proyección NO conserva las distancias, por lo que aunque la deformación lineal (k) sea pequeña y pueda no ser relevante para la mayoría de nuestros trabajos, ésta existe:

Alicante

Huso: 30
 φ : 38° 20' 43" N
 λ : 00° 28' 58" W
 X: 719991.48
 Y: 4247195.40
 k: 1.0001959
 ω : 1.7359

Castellón

Huso: 30
 φ : 39° 59' 10" N
 λ : 00° 02' 16" W
 X: 752936.90
 Y: 4430495.24
 k: 1.0003874
 ω : 2.1161

1- por la teoría de funciones de variable compleja, toda función de la forma $y + ix = f(\varphi + \lambda)$ es conforme.

Valencia

Huso: 30

 φ : 39° 28' 31" N λ : 00° 22' 34" W

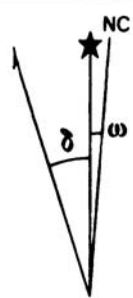
X: 725704.74

Y: 4372881.96

k: 1.0002271

 ω : 1.8542

El parámetro ω (convergencia de meridianos), es el ángulo que forma la transformada del meridiano que pasa por un punto (con dirección al norte geográfico), con la dirección del norte de la cuadrícula o UTM (paralela al meridiano central del huso) en dicho punto. Por eso en los mapas, la cuadrícula UTM forma un pequeño ángulo con los bordes del mapa, en donde estos, si que indican el norte geográfico.

DATOS PARA EL CENTRO DE LA HOJA**Convergencia de Cuadrícula**

$$\omega = 1^{\circ} 27' (1^{\circ} 61') (26^{\circ\circ})$$

Declinación magnética para

1 de Enero de 1987

$$\delta = 3^{\circ} 12' (3^{\circ} 56') (57^{\circ\circ})$$

Variación anual de la declinación

$$\Delta \delta = -8,1 (-15') (-2^{\circ\circ},4)$$

Datos de declinación deducidos del Mapa Geomagnético de 1980

II. GEODESIA ESPACIAL. GPS, GLONASS

Dentro de los Sistemas de Geodesia Espacial, tenemos la Constelación NAVSTAR (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) y la Constelación GLONASS (Sistema Global de Navegación por Satélite), con el principal objetivo de poder posicionar un objeto en la superficie de la Tierra a través de las señales emitidas en forma de ondas de radio por los satélites de dichas constelaciones, que dicho objeto procesa en la superficie, determinando así su posición con una precisión variable en función del tipo de información recibida, tiempo de recepción y condiciones de la emisión.

Este posicionamiento se produce apoyándose sobre un sistema de referencia inercial cartesiano, que en el caso de la constelación americana NAVSTAR es el sistema WGS-84 (ver apartado anterior), y en la constelación rusa GLONASS el sistema PZ-90. El Sistema GLONASS es similar al GPS en muchos aspectos, pero dado que la mayoría de los receptores que manejamos son exclusivamente receptores GPS, será este el sistema que desarrollaremos con mayor detalle, estableciéndose al final del apartado una comparativa de precisiones entre ambos sistemas.

INTRODUCCIÓN AL SISTEMA GPS.

El Sistema GPS sustituye al antiguo sistema de las mediciones Doppler sobre la constelación Transit. Para ello, se aprovecha las condiciones de la propagación de las ondas de radio de la banda L en el espacio, así como la posibilidad de modular las ondas para que en ellas se pueda incluir la información necesaria que permita posicionar un objeto en el sistema de referencia apropiado. A continuación vamos a describir las generalidades del sistema GPS y sus características más importantes. Para ello, debemos dividir el sistema en tres sectores fundamentales y dependientes entre sí, el *sector espacial*, el *sector de control* y el *sector de usuarios*.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

La constelación (*el sector espacial*) está formada por seis planos orbitales, y en cada uno de ellos existe una órbita elíptica casi circular donde se alojan los satélites regularmente distribuidos. Los planos tienen una inclinación de 55° respecto al plano del ecuador, y se nombran como A, B, C, D, E y F. Cada órbita contiene al menos cuatro satélites. Los satélites se sitúan a una distancia de 20180 Km. respecto del geocentro, y completan una órbita en doce horas sidéreas, es decir, que el satélite completa dos órbitas exactas cada 360° de giro de la tierra.

Con estos fundamentos, se garantiza la presencia de al menos cuatro satélites sobre el horizonte en todos los lugares de la superficie de la Tierra.

Los satélites de la constelación NAVSTAR constan de un oscilador (reloj) que genera una frecuencia fundamental ν_0 de 10,23 MHz. A partir de esta frecuencia fundamental se generan dos portadoras en la banda L de radiofrecuencia, denominadas L1 y L2. El hecho de usar dos frecuencias permite determinar, en caso necesario y por comparación de sus retardos diferentes, el retardo ionosférico.

Además, existen dos formas de código pseudo aleatorio que se modulan sobre estas portadoras, son los códigos C/A (*Course/Acquisition*) y P (*Precise*), además de un mensaje, que da la información de los parámetros orbitales del satélite y del estado del reloj.

Los componentes de la señal y sus frecuencias son:

COMPONENTE	FRECUENCIA (MHz)	
Frecuencia Fundamental	ν_0	10,2300
Portadora L1	$154 \cdot \nu_0$	1.575,4200
Portadora L2	$120 \cdot \nu_0$	1.227,6000
Código P	ν_0	10,2300
Código C/A	$\nu_0/10$	1,0230
Código W	$\nu_0/20$	0,5115
Mensaje de Navegación	$\nu_0/204.600$	$50 \cdot 10^{-6}$

Los códigos, (secuencias de +1 y -1 equivalentes a los valores binarios de 0 y 1 respectivamente), se caracterizan por:

El código C/A se repite cada milisegundo, dando como resultado un código de 1023 chips, siendo la longitud aproximada de cada chip de unos 300 m. Este código está declarado de uso civil para todos los usuarios. El código C/A ofrece precisiones nominales decimétricas y se usa en el posicionamiento estándar *SPS* (Standard Positioning Service).

El código preciso P se compone de $2,3547 \cdot 10^{14}$ bits y se repite aproximadamente cada 266,4 días. Este código lleva una palabra denominada HOW que indica en que momento del código está cuando el receptor empieza a recibirlo, de este modo el receptor engancha el código y empieza a medir. El código P es secreto y de uso militar. Se origina a partir de la combinación de dos secuencias de bits, generados a partir de dos registros. La longitud de cada chip es de 30 m. Con el fin de proteger el código P, éste se encripta usando un código W, dando lugar al código Y. Si el código W está en curso se habla de que está conectado el A/S (Anti-Spoofing). El código P ofrece precisiones nominales métricas y se usa en el posicionamiento preciso PPS (Precise Positioning Service).

Los responsables del GPS estimaban que el servicio de posicionamiento preciso (PPS) ofrecería precisiones de 15 a 20 m. La sorpresa fue que estas precisiones se alcanzaban simplemente con el posicionamiento estándar (SPS), de manera que para evitar que usuarios no deseados dispusieran de un sistema de posicionamiento de precisiones mejores de 100 m. decidieron degradar el sistema. Esta degradación recibe el nombre genérico de SA, traducible como disponibilidad selectiva (desactivada desde el 1 de mayo de 2000).

El mensaje de navegación, que aporta toda la información necesaria para los usuarios del sistema, es mandado por los satélites, y consta esencialmente de información sobre el reloj de los satélites, parámetros orbitales (efemérides), estado de salud de los satélites y otros datos de corrección. El mensaje consta de 25 grupos de 1500 bits cada uno y divididos en cinco celdas. Cada grupo se transmite con una frecuencia de 50 Hz y tarda 30 s. Esto supone que el mensaje modulado completo sobre ambas portadoras tiene una duración de 12 min. 30 s.

Para el seguimiento continuo de todos los satélites de la constelación NAVSTAR se tiene el sector de control, que entre otras funciones tiene por misión:

- Establecer la órbita de cada satélite, así como determinar el estado de sus osciladores.
- Hallados los parámetros anteriores, emitirlos a los satélites para que éstos puedan difundirlos a los usuarios.

De este modo, el usuario recibe la información de las efemérides de posición de los satélites y el error que se está produciendo en su reloj, todo ello incluido en el mensaje de navegación.

Por último, el sector de usuarios, lo compone el instrumental que deben utilizar los usuarios para la recepción, lectura, tratamiento y configuración de las señales, con el fin de alcanzar los objetivos de su trabajo. Los elementos son el equipo de observación y el software de cálculo, que puede ser objeto de uso tras la campaña de observación, o bien realizable en tiempo real.

La antena de recepción tiene la misión de recibir las radiaciones electromagnéticas que emiten los satélites y transformarlas en impulsos eléctricos, los cuales conservan la información modulada en las portadoras. Se denomina centro radioeléctrico de la antena al punto que se posiciona en nuestra observación. El sensor recibe los impulsos de la antena receptora, y reconstruye e interpreta los componentes de la señal, es decir, las portadoras, los códigos y el mensaje de navegación. En definitiva, lo que hace es demodular la señal original.

El sensor correla los códigos, es decir, lo compara con una réplica que él mismo genera, y de este modo halla el tiempo que ha tardado en llegar la señal al receptor, obteniendo la distancia al satélite multiplicando esa diferencia de tiempos por el valor de la velocidad de propagación de las ondas en el vacío (aproximadamente unos 300.000 Km./s). Como estas distancias están afectadas de errores, se las denomina pseudo distancias. Para obtener medidas de pseudo distancia mediante diferencia de fase de las portadoras, el sensor reconstruye éstas por modulación bifase-binaria de los códigos modulados en ellas.

TIPOS DE RECEPTORES.

- *Navegación.* Reciben únicamente observables de código (tiempos). Son los instrumentos menos precisos, aunque últimamente al incluir cartografía etc., están mejorando enormemente sus prestaciones.
- *Monofrecuencia.* Reciben las observables de código y fase de la portadora L1. La precisión de estos instrumentos ya es significativa, y son de aplicación topográfica y geodésica en pequeñas distancias (hasta 100 Km.).
- *Bifrecuencia.* Reciben las observables de código y fase de las portadoras L1 y L2. La precisión y el rendimiento son mucho mayores debido a la posibilidad de combinar los datos y formar en post-proceso combinaciones de observables que agilizan el cálculo y eliminan los errores de retardo atmosférico. Están indicados en aquellos trabajos donde la precisión requerida sea máxima.

SISTEMAS DE CONTROL DE LA CALIDAD DE LAS OBSERVACIONES

El *User Equivalent Range Error (UERE)*, es la contribución al error en la medida de la distancia producida por una única fuente de error (no correlada con otras fuentes de error). Estas fuentes de error son los errores de propagación, marcha y estado de relojes, ruido de recepción y la incertidumbre de las efemérides.

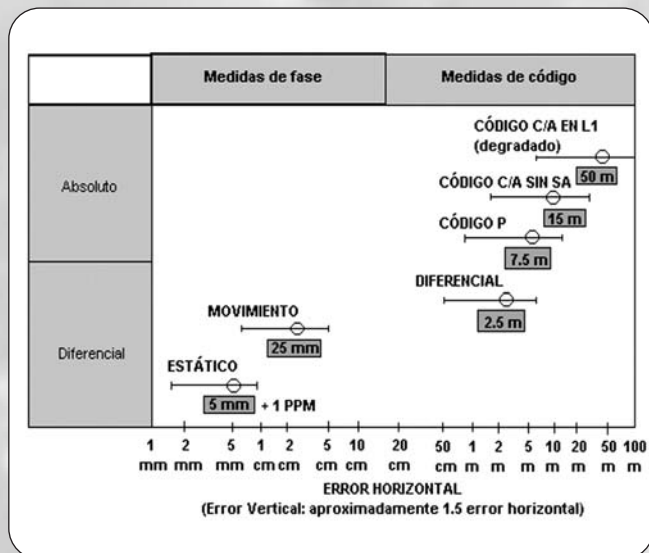
El parámetro *URA (User Range Accuracy)* es transmitido al usuario por los satélites e informa de la fiabilidad que puede obtener en las medidas. Se define como la diferencia entre la pseudo distancia y la distancia calculada a partir de las posiciones dadas de los satélites, teniendo en cuenta sólo los errores de reloj y de deriva. Para GLONASS, el valor del URA es de $\sigma_{URA} \pm 10$ m, mientras que para GPS sin SA es de $\sigma_{URA} \pm 7$ m, y con SA es de $\sigma_{URA} \pm 25$ m. La diferencia en los valores

de URA de 7 a 10 m entre los Sistemas GPS y GLO-NASS, es atribuida principalmente a la falta de corrección del efecto ionosférico en GLONASS.

El *DOP (Dilution Of Precision)* es un valor adimensional que indica la solidez de la figura que forman los satélites. Su valor ideal es 1, aumentando a medida que la geometría empeora. Los factores DOP más utilizados son:

- GDOP (x, y, z) y el estado del reloj.
- PDOP (x, y, z)
- HDOP (x, y)
- VDOP Solo altitud.
- TDOP Solo estado del reloj

El cuadro siguiente muestra el error típico esperado de los diferentes métodos de medida con un receptor GPS:



USO COMBINADO DEL GPS Y GLONASS.

Aunque están poco extendidos en el mercado de gama baja, existen receptores capaces de utilizar los dos Sistemas de Posicionamiento por Satélite, GPS y GLONASS, es decir, recibir señales de los satélites de la constelación GPS y de la constelación GLONASS. Para ello, los receptores deben establecer la relación entre los sistemas de tiempo y sistemas de referencia utilizados en los dos sistemas, calculando las posiciones usando los parámetros de transformación entre el sistema PZ-90 y el WGS-84.

El cuadro siguiente muestra el resultado del estudio realizado por el laboratorio Lincoln de Massachussets, de las precisiones que ofrecen ambos sistemas de posicionamiento y las precisiones de la observación combinada, analizando las precisiones obtenidas en posicionamiento absoluto usando en código C/A (GPS con SA activada) durante periodos de 24 h. Si la SA está desactivada, la precisión con GPS es mejor que la obtenida con GLONASS.

- Error horizontal (m):

GPS	GLONASS	GPS-GLONASS
20.6 (50%)	10.0 (50%)	6.5 (50%)
48.4 (95%)	21.2 (95%)	14.9 (95%)
62.9 (99%)	26.8 (99%)	25.8 (99%)

- Error vertical (m) :

GPS	GLONASS	GPS-GLONASS
26.7 (50%)	14.6 (50%)	16.7 (50%)
81.7 (95%)	39.1 (95%)	41.8 (95%)
105.1 (99%)	46.3 (99%)	49.5 (99%)

Con la disponibilidad de receptores GPS-GLONASS, el usuario puede tener acceso a un sistema combinado de hasta 48 satélites (con las dos constelaciones completas). Con todos estos satélites, los trabajos en barrancos y otras localizaciones de visibilidad limitada (zonas arboladas), es mejorada debido a la posibilidad de mayor información de mayor número de satélites. Las principales ventajas del uso combinado GPS-GLONASS son la mejora en la geometría de los satélites y la reducción del efecto, si se activase de nuevo, de la SA.

III DGPS MEDIANTE EL SISTEMA RASANT

SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA

Desde mediados de 1996 el *Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)*, el *Centre de Telecomunicacions de la Generalitat de Catalunya (CTGC)* y la *Direcció General de Transports (DGT)*, transmiten (a través de Catalunya Música) de manera oficial en Catalunya correcciones diferenciales con RASANT, cubriendo cerca del 80% del territorio catalán.

Un año más tarde, desde Junio de 1997, se transmiten correcciones diferenciales GPS en formato RASANT a través de emisoras de FM de Radio Nacional de España (RNE). El proyecto RECORD forma parte del programa del Área de Geodesia REPONTE (Red Española para Posicionamiento y Navegación) y trata de la difusión de correcciones diferenciales GPS a través de la subportadora no audible RDS (Radio Data System, Sistema de Datos en Radio) de las emisoras de Radio Nacional de España (RNE). La cobertura actual, cercana al 50% del territorio, es muy limitada.

Por otra parte, desde septiembre de 2002, el *Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la Universitat Politècnica de Valencia (UPV)* en colaboración con *Radio Nou*, mantiene operativo un sistema de emisión de correcciones diferenciales GPS. Según sus responsables, "es objetivo del Departamento que este servicio pase a ser gestionado por el *Institut Cartogràfic Valencià (ICV)*, si así lo entiende éste, como servicio gratuito y de asistencia al ciudadano".

MEDICIÓN DIFERENCIAL (DGPS)

En el cuadro siguiente se muestran las fuentes de error en una medición GPS.

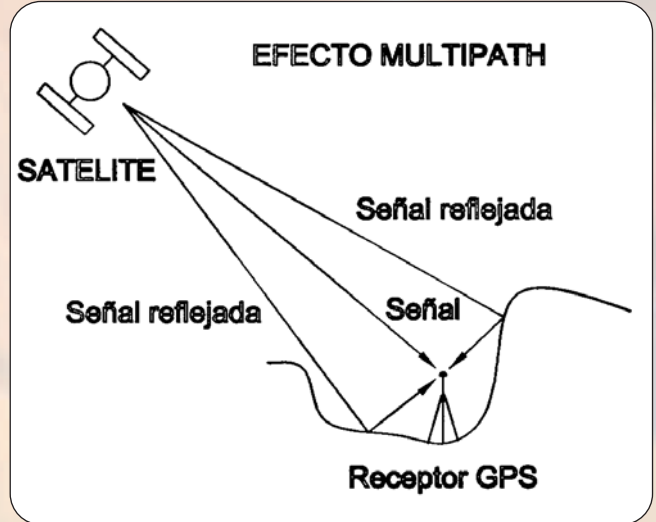
ELEMENTO	FUENTE DE ERROR
Satélite	<ul style="list-style-type: none"> · Errores en el oscilador (reloj). · Errores o variaciones en los parámetros orbitales.
Propagación de la señal	<ul style="list-style-type: none"> · Refracción ionosférica. · Refracción troposférica. · S/A. Disponibilidad selectiva. (Actualmente desactivada). · Pérdida de ciclos. · Multipath. (ondas reflejadas).
Receptor	<ul style="list-style-type: none"> · Errores en el oscilador. · Errores en las coordenadas de la estación de referencia. · Error en el estacionamiento. · Error en la manipulación del equipo. · Variación y desfase del centro de la antena.

Debido a que la mayoría de estos errores, que afectan a la precisión del posicionamiento, son muy similares en receptores relativamente cercanos entre ellos, puede situarse un receptor de referencia en un punto de coordenadas conocidas y, a partir de las observaciones de código, calcular una corrección para cada satélite.



El receptor de referencia calcula la distancia entre la posición de cada satélite (información transmitida por los propios satélites) y la posición del propio receptor de referencia (situado en un punto de coordenadas

conocidas). Comparando la distancia calculada con las pseudo distancias observadas, el receptor de referencia puede calcular una corrección de la pseudo distancia para cada satélite, así como también la velocidad de cambio de dicha corrección.



Existen varios sistemas que calculan correcciones diferenciales GPS. Unos calculan, mediante grandes cantidades de datos en bruto, un modelo ionosférico y troposférico para una zona determinada. Son los sistemas RACAL y OMNISTAR, que ofrecen (mediante suscripción y pago) precisiones submétricas en toda la zona de cobertura. Otros como el sistema RASANT, calculan las correcciones de código para una estación de referencia y las transmiten a los receptores móviles para que las hagan suyas, siendo de momento, público y gratuito.

SISTEMA RASANT

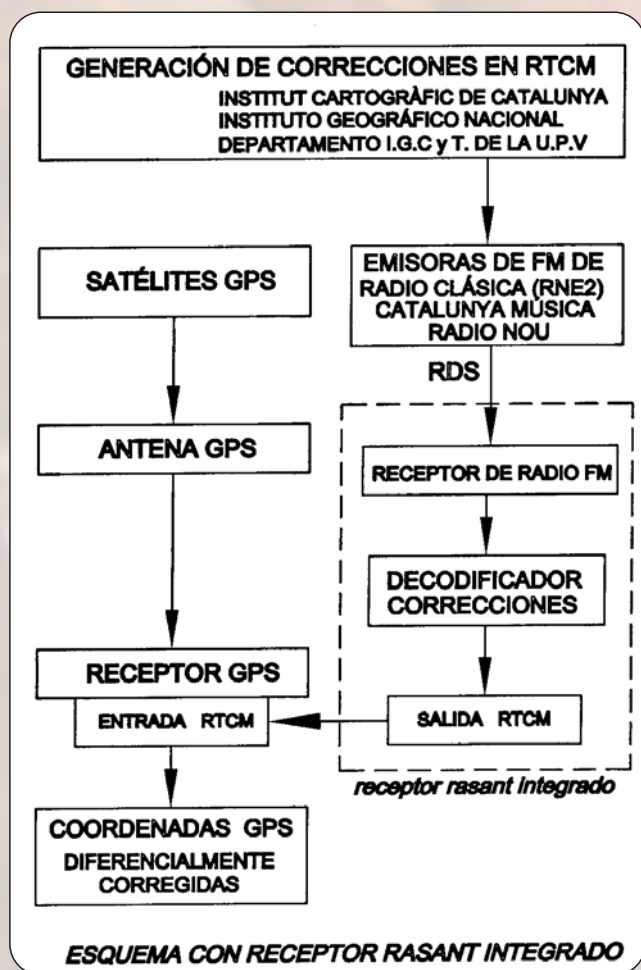
RASANT (*Radio Aided Satellite Navigation Technique*) es un estándar europeo de radiodifusión de correcciones diferenciales, que utiliza el sistema RDS (*Radio Data System*) de las emisoras FM como sistema de transmisión de datos. Desarrollado en Alemania con el propósito de ser un servicio DGPS (diferencial GPS) público y gratuito, de manera que sus formatos estén abiertos a prácticamente cualquier empresa que pretenda integrar soluciones de posicionamiento o navegación DGPS. El equipo para realizar posicionamiento DGPS con RASANT consiste en un receptor GPS con capacidad "input RTCM SC-104" (*Radio Technical Comision for Maritime Services Special Comité 104*) y un receptor RASANT. Un receptor RASANT es un receptor de radio FM con capacidad RDS y capacidad de descompresión de datos RASANT. El formato de datos RTCM SC-104 (en adelante RTCM) para la transmisión de correcciones diferenciales GPS se ha constituido como el estándar de los receptores GPS, de manera que la práctica totalidad de receptores GPS que pueden trabajar en modo diferencial aceptan correcciones diferenciales en formato RTCM.

Actualmente se está trabajando para definir mensajes que contengan correcciones diferenciales para los satélites de la constelación GLONASS.

FORMATO RTCM

El formato de datos RTCM es un formato recomendado por los responsables del sistema para la transmisión de correcciones diferenciales GPS. Hoy día se ha constituido como un estándar en toda la comunidad de receptores GPS, de manera que la práctica totalidad de receptores que pueden trabajar en modo diferencial aceptan correcciones diferenciales en formato RTCM.

DIFFUSIÓN DE CORRECCIONES DIFERENCIALES VÍA RDS



El RDS es un sistema desarrollado por la Unión Europea de Radiodifusión (EBU/UER), que permite añadir a una señal convencional en modulación de frecuencia -FM-, una información adicional mediante la inclusión de un canal que contiene datos. Entre la información transmitida vía RDS tenemos: nombre de la emisora, tipo de programa, información horaria etc. La información RDS se transmite en subportadores inaudibles (57 Khz.) de los canales FM. Las condiciones de recepción de las señales RDS son idénticas a las de recepción del programa de radio.

UTILIZACIÓN DEL SISTEMA

La utilización del sistema RASANT requiere un receptor de radio FM con capacidad RDS acoplado a un receptor GPS (Garmin III Plus etc.) que admita correcciones diferenciales en el formato estándar RTCM. El receptor de radio RDS debe ser capaz de extraer la información de las correcciones diferenciales GPS de entre toda la información que se transmite en el sistema RDS.

En la práctica, es más cómodo utilizar receptores integrados RASANT, tienen una entrada de antena FM y una salida serie RS232 que conectaremos a nuestro receptor GPS. El receptor integrado, que se compone de un sintonizador FM con capacidad RDS junto con un procesador que reformatea las correcciones diferenciales de forma totalmente automática para nosotros.

Los receptores integrados RASANT pueden sintonizarse a una frecuencia predeterminada o escanear todo el espectro en busca de emisoras que incluyan RASANT en su información RDS. Para aumentar la robustez, algunos receptores RASANT tienen la posibilidad de incorporar un segundo sintonizador FM y doble antena para mejorar la calidad de recepción de la información RDS. Existe una decena de fabricantes de equipos FM/RDS/RASANT integrados (Grafinta RDS66C, TGPS2, etc.) con precios a partir de 500 €.

Finalmente decir que existen receptores integrados RASANT-GPS (GPS ACE II de Trimble por 870 €), en este caso las correcciones diferenciales RTCM se aplican automáticamente al receptor GPS integrado en el equipo, obteniéndose directamente posiciones GPS en modo diferencial. En estos equipos, únicamente tendremos que comprobar (observando los LEDs correspondientes), si el equipo recibe y tiene en cuenta las correcciones. El resultado son como veremos, unas coordenadas de error absoluto inferior a ± 5 m. en el 99% de los casos.

PRECISIÓN DEL SISTEMA

La precisión que puede obtenerse utilizando el sistema RASANT depende de varios factores:

- Calidad de las correcciones diferenciales GPS
- Geometría de los satélites (DOP).
- Edad de las correcciones diferenciales (inferior a 10s.).
- Distancia a la estación de referencia.
- Calidad del equipo del usuario.

En el caso de que utilizemos las emisoras de RNE2 (proyecto RECORD del IGN), la precisión decrece aproximadamente en 10 ppm (partes por millón = milímetros por kilómetro) a medida que nos separamos del centro emisor, que para el caso de Valencia ciudad supondría aproximadamente ± 3.5 m. Si por el contrario empleamos las correcciones diferenciales emitidas directamente a través de Radio Nou (Departamento de I.G.C y F. de la UPV), obtendremos en distancias inferiores a 100 km. de la estación de referencia, precisiones en el 99% de los casos superiores a los ± 2.5 m. (no se dispone de información de la magnitud del error para

alejamientos mayores).

COBERTURA ACTUAL

A continuación se muestra la lista de frecuencias de RNE que emiten correcciones DGPS:

FM Radio2 (Mhz.)

ALICANTE

Aitana 88.6,
Alcoi 92.3,
Benidorm 97.8,
Elda 88.1,
Santa Pola 100.1
Villena 97.1

CASTELLÓN

Benicasim 90.3

VALENCIA

Monduber 99.3,
Monte Picayo 106.6,
Onteniente, 96.7,
Utiel 96.6

OM-FM Radio1 (Khz.)

ALICANTE

(Bacarot) 729,

CASTELLÓN

(Almazora) 801,

VALENCIA

(El Palmar) 774

EXPECTATIVAS DE FUTURO DEL DGPS. EGNOS, WAAS, MSAS...

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), WAAS (Wide Area Augmentation System) y MSAS (MTSAT Satellite Bases Augmentation System) son sistemas de carácter regional (Europa, EEUU y Japón) que se están desarrollando actualmente y tienen por objeto complementar y mejorar las precisiones proporcionadas inicialmente por los sistemas GPS y GLONASS. Los tres sistemas tendrán unas prestaciones similares y aunque son sistemas regionales serán totalmente compatibles e interoperables, ya que están diseñados para la dar servicio a la navegación aérea mundial. La interoperabilidad EGNOS/MSAS y EGNOS/WAAS fue probada con éxito ente 1998-2000.

Estos sistemas calculan, mediante una serie de estaciones fijas situadas en tierra, un modelo zonal que corrige entre otros, los errores de propagación de las señales (el retardo ionosférico), de manera que las correcciones calculadas por éstas, sean enviadas inmediatamente a satélites geostacionarios para su distri-

bución a los usuarios civiles.

Desde septiembre de 2002 la fase II de WAAS está parcialmente en funcionamiento, EGNOS está previsto que comience a operar en pruebas en 2004, y en 2005 concluirá la fase II de MSAS, fecha en la que la infraestructura de EGNOS se integrará en GALILEO, (cuyo despliegue total se estima para 2008).

La precisión esperada de EGNOS se estima mejor que ± 4 m. en horizontal y ± 6 m. en vertical. Las precisiones actuales de WAAS para posiciones en los EEUU alcanzan los 1-2 m. en horizontal y 2-3 m. en vertical, siendo lógicamente para posiciones en Europa, inferiores.

Por otra parte, y mientras estos sistemas están 100% operativos (EGNOS en nuestro caso), el sistema RASANT es, sin duda alguna, un buen sistema de posicionamiento de precisión métrica en tiempo real, público, gratuito y que tenemos a nuestro alcance en la actualidad. Por otra parte las posibilidades que ofrece la implantación de la radio DAB (Digital Audio Broadcasting) y la intención de aumentar el número de estaciones que generen correcciones, hace factible pensar que este sistema alcance en un futuro no muy lejano, precisiones sub-métricas en posicionamiento en tiempo real y a un coste relativamente bajo.

IV. REFERENCIAS

- [1] A. Núñez, J. L. Valbuena, J. Velasco. 1992. GPS, La nueva era de la topografía.
- [2] F. Martín Asín. 1990. Geodesia y cartografía matemática.
- [3] Páginas oficiales del Instituto Geográfico Nacional (IGN), Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), Radio Nacional de España (RNE) y Radio Nou (9) y Agencia Espacial Europea (ESA).
- [4] Revista "Topografía y Cartografía" del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía. (COITT). N° 106 y 113.