



Sobre los Sistemas Satelitales de Navegación Global: guía básica para ecólogos

On Global Navigation Satellite Systems: a primer for ecologists

¹Dennis Denis Ávila*, ²Daryl David Cruz Flores²

RESUMEN

¹ Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Cuba.

² Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.

*Correspondencia: dda@fbio.uh.cu

Recibido: 20 de noviembre de 2020

Aceptado: 15 de enero de 2021

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES: DDA y DDCF contribuyeron igualmente a la revisión de bibliografía, escritura y revisión del documento final.



Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons



<https://eqrcode.co/a/IIMrcU>

La aparición de los Sistemas Globales de Navegación Satelital o GNSS en 1974, con el sistema GPS han conducido a un fuerte cambio en los métodos de trabajo de campo y actualmente, los receptores GNSS son herramientas básicas para muchos investigadores. A pesar de ello, muchas veces se ignoran los aspectos básicos de funcionamiento de estos sistemas de posicionamiento satelital a pesar de que, en investigaciones enfocadas al análisis de la biodiversidad u otros aspectos ambientales, estos pueden tener repercusiones metodológicas. Elementos relacionados con las nuevas constelaciones satelitales, la precisión, las fuentes de errores o los tipos de receptores deben considerarse para tomar datos de campo o identificar el equipo más apropiado para los objetivos de un estudio específico. Por esta razón, en la presente comunicación se dan a conocer los aspectos básicos de la tecnología de los GNSS actuales, que deben ser conocidos por los investigadores de campo que los utilizan. Se ofrecen los conceptos básicos de estos sistemas y se discuten aspectos relacionados a sus precisiones y fuentes de error que deben ser tenidos en cuenta cuando se utilizan en investigaciones científicas.

Palabras clave: coordenadas geográficas, GNSS, GPS, mapear, sistemas de ubicación

ABSTRACT

The emerging of Global Navigation Satellite Systems or GNSS in 1974, with the first GPS system, has led to a strong change in field work methods. Currently, GNSS receivers are basic tools for many researchers. Despite this, many people ignore the basic aspects of the operation of these satellite positioning systems, despite the fact that in researches focused on the analysis of biodiversity or other environmental aspects, these may have methodological repercussions. Issues related to new satellite constellations, accuracy, error sources or receiver types must be taken into account when collecting field data or identifying the most appropriate equipment for the objectives of a specific study. For this reason, this communication presents the basic aspects of current GNSS technology, which should be known by the field researchers who use them. The basic concepts of this field and elements about its precisions and sources of error are offered. These elements should be considered when using these systems in scientific research.

Keywords: geographic coordinates, GNSS, GPS, location systems, mapping

INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de las exploraciones y estudios de la naturaleza, los investigadores han hecho uso de mapas y métodos cartográficos para la ubicación espacial de elementos en la superficie de la Tierra. Antes, se dependía de mapas en papel, cintas métricas, teodolitos y brújulas, pero con el desarrollo de las tecnologías espaciales aparecieron los Sistemas Globales de Navegación Satelital o GNSS por sus siglas en inglés (*Global Navigation Satellite Systems*) (Nowak *et al.*, 2020). El sistema NAVSTAR (*Navigation System Timing and Ranging*), que se hizo operativo a partir del 17 de julio de 1974, fue la base del primer y más conocido sistema global de navegación: el GPS (*Global Positioning System*), cuyas siglas se han generalizado por el público a todos los sistemas satelitales y equipos que brindan las coordenadas de la ubicación geográfica. Sus primeros usos fueron militares, y su principal prueba de campo fue en la operación militar “Tormenta del Desierto”, de los EUA donde se demostró su valor táctico. En el año 2000 se liberó el servicio, eliminándose la función de disponibilidad selectiva que intencionalmente degradaba la precisión de la señal para uso del público y, desde ese momento, los GPS se han hecho herramientas de uso extensivo en múltiples ramas de la vida diaria (Bornschtlegel, 2009).

El rápido desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) y de la tecnología GNSS en los análisis espaciales relacionados con el ambiente y la vida silvestre, ha conducido a un fuerte cambio en los métodos de trabajo de campo (Sonti, 2015; Nowak *et al.* 2020). Los dispositivos GPS portables son herramientas básicas en el trabajo de campo de los investigadores (Nowak *et al.*, 2020). Los equipos de mayor precisión son, en la mayoría de los casos, caros para los investigadores (su precio mínimo puede rondar los 10 000 USD). Muchos modelos más asequibles han salido al mercado, con razones calidad - precio adecuados, sin embargo, son dispositivos generalmente diseñados para navegación o turismo, y sus propiedades no son amigables con la recolecta de atributos o datos más complejos (Nowak *et al.*, 2020). A pesar de ello, desde la primera década del siglo, los científicos ambientales han comenzado a hacer un uso intensivo de esta tecnología (Johnson y Barton, 2004; Rutter, 2007; Hauptvogel *et al.*, 2010; Dodd, 2011). El resultado de buscar ‘GPS’ en la base bibliográfica de PubMed muestra un comportamiento creciente en el número de artículos relacionados con estos equipos desde cerca de 500 en el año 2000 hasta 1784 en el año 2019.

Los sensores de señales GPS/GNSS no se restringen a equipos especializados, sino que, con la miniaturización de los circuitos y el abaratamiento de la técnica, en la última década se ha llegado a la producción masiva de receptores a pocos dólares por unidad. Muchos equipos han comenzado a incorporar estos servicios, desde automóviles, tabletas, teléfonos y hasta relojes de pulsera. La amplitud del uso de esta tecnología es demostrada por las estadísticas del Reporte de Mercado de la *European GNSS Agency* (GSA, 2019), que informaba que en este año ya existían 6.4 billones de dispositivos GNSS en uso. Este mercado está fuertemente dominado por los teléfonos inteligentes (*smartphones*) que abarcan el 84% de los receptores.

A pesar de esta irrupción masiva en las actividades humanas y especialmente en el campo de las investigaciones ambientales, muchas personas ignoran los aspectos básicos de funcionamiento de los sistemas de posicionamiento satelital. Eso es común en el empleo de equipos o funciones de uso diario que se suelen usar como “cajas negras”, sin que se afecte su utilidad. Pero en el campo de la investigación científica, donde los GNSS están teniendo un gran impacto sobre todo en estudios enfocados al análisis de la biodiversidad, estos aspectos pueden tener repercusiones metodológicas. Hay elementos relacionados con la precisión, las fuentes de errores o los tipos de receptores que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar una toma de datos de campo o identificar el equipo más apropiado para los objetivos de un estudio específico. Por esta razón, la presente comunicación tiene como objetivo exponer los aspectos básicos de la tecnología de los Sistemas Globales de Navegación Satelital actuales, que deben ser conocidos por los investigadores de campo que los utilizan.

DESARROLLO

CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS GLOBALES DE NAVEGACIÓN SATELITAL

El campo de las aplicaciones de GPS y sistemas de posicionamiento satelital tiene un lenguaje altamente técnico, manejado generalmente en idioma inglés y con conceptos poco afines a los investigadores en ciencias ambientales. Por ello, se han resumido las principales siglas, acrónimos y conceptos técnicos relacionados en la presente comunicación en la *Tabla 1*, que se identificarán en el texto por un número en superíndice que indica la fila de dicha tabla donde está su definición.

Denis y Cruz: Sobre los Sistemas Satelitales de Navegación Global

Tabla 1. Siglas y conceptos básicos relacionados con la tecnología de posicionamiento satelital.**Table 1.** Initials and basic concepts related to satellite positioning technology.

No.	Sigla o concepto (idioma inglés)	Nombre original completo (traducción)	Definición
1	GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema satelital de navegación global)	Sistemas de satélites múltiples que rodean la tierra por órbitas fijas emitiendo señales radiofónicas de frecuencias específicas que asisten la navegación y la ubicación sobre la superficie de la tierra.
2	NAVSTAR	<i>Navigation System Timing and Ranging</i> (Sistema de medición, sincronización y navegación)	Sistema de satélites orbitales mantenidos por la NASA, EUA, con fines de asistir en la navegación y aplicaciones militares.
3	GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i> (Sistema Satelital de navegación Global)	Sistema GNSS de 24 satélites, diseñado por la URSS y mantenido actualmente por Rusia.
4	GAL	Galileo	Sistema GNSS compuesto de 30 satélites mantenidos por la Comunidad Económica Europea y su agencia Aeroespacial Copérnico.
5	BDS	<i>BeiDou</i> (significa en Chino: Osa Mayor)	Sistema GNSS desarrollado y mantenido por China. Actualmente es el de mayor cobertura y precisión existente (42 satélites).
6	QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i> (Sistema satelital cuasi-zenital)	Sistema GNSS y SBAS ¹⁹ de alcance regional, formado por cuatro satélites y desarrollado por Japón.
7	IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i> (Sistema satelital de navegación regional de la India)	Sistema GNSS de siete satélites, desarrollado por La India.
8	<i>Multi-constellation receiver</i>	Receptores multi-constelación	Tipo de receptores que son capaces de captar señales de tipos diferentes de satélites (GNSS) simultáneamente.
9	<i>Dedicated equipment</i>	Equipos dedicados	Se llama a aquellos equipos que tienen una función única específica.
10	<i>Survey-grade receiver</i>	Receptores de nivel peritaje	Receptores GPS/GNSS de doble frecuencia y de máxima precisión espacial. Son los equipos de posicionamiento más profesionales y costosos.
11	<i>Mapping-grade receiver</i>	Receptores de nivel de mapeo	Receptores de GPS/GNSS de única frecuencia y de alta precisión, en equipos semi-profesionales dedicados.
12	<i>Consumer-grade receiver</i>	Receptores de nivel de consumidor	Receptores de GPS/GNSS de producción masiva e incorporados en muchos equipos de la vida diaria (automóviles, teléfonos, relojes).
13	<i>Carrier wave</i>	Onda portadora	Principal señal emitida por los satélites de los GNSS. Además de la frecuencia específica, porta información en su amplitud y fase.
14	<i>Crystal oscillator</i>	Oscilador cristalino	Tipo de reloj de muy alta precisión y bajo ruido que se emplea en los equipos GPS de gama media.
15	<i>Differential post-processing of data</i>	Post-procesamiento diferencial de los datos	Método para mejorar el estimado de posición que se hace por medios matemáticos, utilizando los datos crudos de dos equipos simultáneos (dos receptores o un receptor y una torre de referencia). Se hace con programas específicos, posteriormente, al trabajo de registro en campo. Aparece en los DGNSS ²⁵ y aumenta de manera muy notable la precisión de las ubicaciones.
16	<i>L1 Upper band</i>	Banda L1	Banda radiofónica entre 1575 MHz y 1587 MHz emitida por los satélites del sistema GPS y utilizada para determinar el posicionamiento y para transferencia de tiempo. Sus homólogas se denotan con la letra inicial del GNSS (B1, G1) excepto Galileo (E1).
17	Dual band GPS/GNSS	Receptor de doble frecuencia	Tipo de receptores GPS / GNSS que, además de la banda L1 son capaces de captar una banda baja (L2 o L5), con la cual compensan los efectos atmosféricos y permiten un post procesamiento diferencial, con lo que aumentan la precisión de la ubicación.

Denis y Cruz: Sobre los Sistemas Satelitales de Navegación Global

No.	Sigla o concepto (idioma inglés)	Nombre original completo (traducción)	Definición
18	<i>Pseudorange</i>	Pseudo -rango	Indicador de distancia entre el receptor y el satélite, que se calcula multiplicando la velocidad de la señal por la duración de su recorrido. Es un pseudovalor y no una distancia real por las asunciones que se hacen sobre la geometría del recorrido de la señal y los efectos de retardo atmosférico.
19	RMS	<i>Root Mean Square</i> (Error cuadrático medio)	Medida de error espacial calculada como la raíz de la sumatoria de distancias al cuadrado entre la coordenada de un punto asumido como real y un grupo de coordenadas dadas por otro instrumento. Es equivalente al concepto estadístico de desviación estándar en un plano.
20	SBAS	<i>Satellite-Based Augmentation Systems</i> (Sistema de potenciación basado en satélite)	Sistemas de apoyo que aumentan la calidad de los sistemas GNSS haciendo un monitoreo preciso de las órbitas y las condiciones atmosféricas.
21	WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i> (Sistema de potenciación de área amplia)	Sistema SBAS del Departamento de defensa de los Estados Unidos que opera en Norteamérica (USDoD/FAA 2008) a partir de un determinado número de torres receptoras.
22	<i>Ionospheric scintillations</i>	Chispeo ionosférico	Efecto de las partículas cargadas de la ionosfera sobre las señales radiométricas emitidas por los satélites GNSS. Depende del estado de la atmósfera y las radiaciones (vientos) solares.
23	<i>Multi-path signal error</i>	Errores por multirrecorridos de la señal	Errores que se producen cuando las señales se reflejan en superficies sólidas antes de llegar al receptor, con lo cual se produce un retardo que causa estimaciones imprecisas de la distancia al satélite GNSS.
24	PDOP	<i>(Position Dilution of Precision)</i> (Dilución de precisión en la posición)	Un indicador de precisión de la medida del GPS: si es mayor de 6 es malo, bajo 4 es medio y bajo 2 es muy bueno.
25	dBm	Decibelios por miliwatt	Unidad de medida de la intensidad de la señal GPS.
26	DGNSS	GNSS diferencial	Sistema de posicionamiento que emplea post procesamiento diferencia de los datos en el cálculo de la ubicación.
27	PPP	<i>Precise Point Positioning</i> (Posicionamiento preciso en un punto)	Método de posicionamiento GNSS que calcula posiciones de precisión de pocos centímetros en buenas condiciones. Es una combinación de varias técnicas de refinamiento que se pueden utilizar con hardware de grado consumidor para producir resultados cercanos a equipos de nivel peritaje. Se utiliza con un solo receptor y se superponen un poco con los métodos de posicionamiento DGNSS, que utilizan estaciones de referencia permanentes para cuantificar errores sistémicos.
28	IGS	<i>International GNSS Service</i> (Servicio internacional GNSS)	Conjunto de estaciones en tierra que apoyan el funcionamiento de los sistemas GNSS.
29	LBS	<i>Location based services</i> (Servicios basados en ubicación)	Conjunto de servicios de los dispositivos móviles que dependen de saber la ubicación en tiempo real del usuario. Incluye sistemas de orientación, mapeo, información climática o de mercado, etc.
30	A-GPS	Sistema GPS-Asistido	Sistema implementado en los celulares que utiliza las distancias a las torres de telefonía como apoyo para la ubicación espacial, además de las señales GPS. Es ventajoso en los ambientes citadinos donde las señales GNSS se degradan y es más rápido, pero de menor precisión.

Denis y Cruz: Sobre los Sistemas Satelitales de Navegación Global

Un primer aspecto que debe tenerse en cuenta es que, aunque el sistema más conocido por el público es el GPS y a cualquier equipo de recepción se le suele otorgar ese nombre, en realidad es solo uno de los sistemas satelitales de navegación existentes. Por ello es más apropiado hablar de GNSS¹, término general que engloba todas las constelaciones de satélites alrededor de la tierra que permiten detectar la ubicación espacial de un punto sobre su superficie (Fig. 1). El GPS se refiere a la constelación de satélites NAVSTAR² del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, que fue la primera con esta función (el primer satélite se puso en órbita en 1974). Pocos años después apareció el sistema GLONASS³ de la antigua Unión Soviética (URSS), que permaneció desatendido por mucho tiempo, pero volvió a ser operativo desde febrero de 2011 (Urlichich *et al.*, 2011; IACPNT, 2017) y actualmente es manejado por Rusia. También existe el sistema GAL⁴ o Galileo de la Agencia Aeroespacial Europea Copérnico, operativo desde diciembre de 2016 (EGNSSA, 2017). Desde 2018 están activos los sistemas BDS⁵ o BeiDou de China (CNSA, 2017) y el Sistema de Satélites Quasi-Cenitales (QZSS⁶) de Japón el cual brinda, a nivel regional, servicios de posicionamiento y mejoras de las señales de otros sistemas (*augmentation system*) (Hao *et al.*, 2020). Finalmente, está el Sistema Satelital de Navegación Regional Indio (IRNSS⁷), que comenzó a ubicar sus plataformas satelitales desde 2012 y estuvo totalmente operativo en 2018, y que ofrece servicios de

posicionamiento y otros servicios de comunicación a la India y una zona geográfica estrecha a su alrededor (ISRO, 2017). Los receptores GNSS llamados “multi-constelación”⁸ son aquellos que pueden emplear señales de diferentes conjuntos de sistemas, logrando captar mayor cantidad de satélites simultáneos por lo que son más precisos que los receptores solamente GPS.

Otro elemento importante a dominar es que los equipos dedicados⁹ de posicionamiento con receptores GPS/GNSS se clasifican en relación a su precisión en tres grupos: instrumentos de nivel peritaje (*survey-grade*¹⁰), instrumentos de mapeo (*mapping-grade*¹¹) e instrumentos de consumidor (*consumer-grade*¹²). Con los GPS de grado perito se alcanzan precisiones milimétricas (en el modo diferencial) porque usan las señales de dos bandas de frecuencias. La onda portadora¹³ de la señal de la segunda banda permite la corrección de errores ionosféricos (Giffard, 1999). La refracción de la onda en la ionosfera también produce un error que oscila entre 1 - 50 m, que varía en relación a la intensidad solar y el magnetismo de la Tierra, por lo que depende de la hora del día y del lugar en el planeta donde se encuentre el receptor. Estos equipos tienen varios mecanismos y protocolos para compensar múltiples errores que inciden en la calidad de la señal y consisten de dos unidades independientes, la antena y el receptor, así como de un software específico para procesar los datos. Son los equipos más caros (de precios rondando los 10 000 USD) y son producidos por pocas compañías a

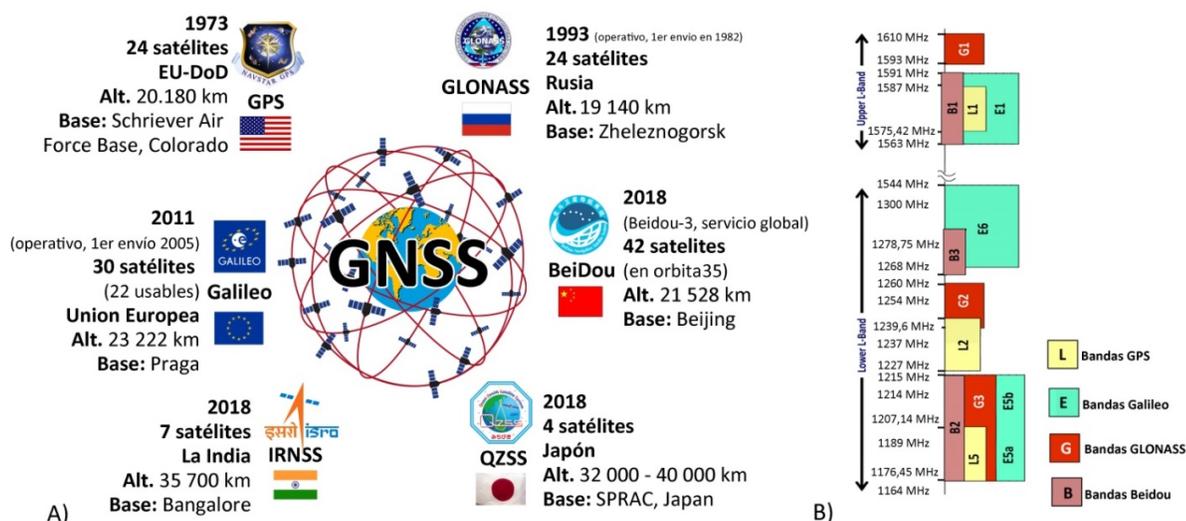


Figura 1. Características de los Sistemas Globales de Navegación Satelital que se encuentran actualmente operativos (A) y de uso liberado y bandas de radiofrecuencia que emplean (B).

Figure 1. Characteristics of currently operational and free of use Global Navigation Satellite Systems (A) and emitting radiofrequencies bands (B).

Denis y Cruz: Sobre los Sistemas Satelitales de Navegación Global

nivel mundial: *Javad*, *Leica*, *NovAtel*, *Septentrio*, *Topcon* y *Trimble*. Son equipos muy útiles en campos donde la alta precisión es importante como la geografía (en cartografías de precisión, para mediciones de estructuras o distancias pequeñas).

Los GPS de mapeo son más comunes, manuales y pueden llegar a tener precisiones de hasta 1 m (aunque lo más usual es entre 5 y 10 m) y son los que, generalmente, se usan para hacer mapas de aspectos naturales o para identificar localizaciones de especies. La mayoría solo usa una banda de las emitidas por los satélites, pero tiene un oscilador cristalino¹⁴ que reduce los errores relacionados a la dispersión del reloj del receptor. Por medio de las medidas de fase de la señal portadora y con un post-procesamiento diferencial de los datos¹⁵, con ellos es potencialmente posible disminuir los errores de posicionamiento incluso al orden de centímetros. Y finalmente, están los equipos de consumo, categoría en la que se encuentran los receptores de autos, celulares y otros equipos, que tienen precisiones máximas entre 2 - 5 m.

Los equipos de recepción de señales para posicionamiento han utilizado históricamente la llamada *Upper L-Band*¹⁶ (rango de 1500 MHz), que es llamada L1 en el sistema GPS, E1 en Galileo y G1 en GLONASS (Fig. 1B). Estos receptores, en su forma “cruda”, generalmente logran precisiones de alrededor de los 30 m. Sin embargo, en los más recientes se ha incorporado una nueva banda (L5 en GPS, G3 en GLONASS y E5a y E5b en Galileo) que se emite en el rango de 1100-1200 MHz. Esta banda penetra las estructuras más fácilmente y se afecta menos por las reflexiones, además de que permite la corrección de efectos atmosféricos. Con estas ventajas, se aumentan las precisiones hasta 30 cm en los llamados receptores *Dual band GPS* o *Dual band GNSS*¹⁷ (o *Dual frequency*).

FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO SATELITAL

Los satélites de cada sistema de GNSS funcionan emitiendo continuamente señales radiofónicas específicas, con una señal o marca de tiempo de emisión a intervalos fijos. Cualquier equipo en tierra con receptores específicos de estas señales puede calcular su ubicación geográfica por triangulación, calculando la distancia al satélite a partir de las diferencias entre los momentos de emisión y recepción de cada señal (asumiendo que los relojes en ambos equipos están perfectamente sincronizados). La hora de emisión con

muy alta precisión está codificada en la propia señal dado que cada satélite es portador de un reloj atómico. A este indicador de distancia calculada se le llama pseudo-rango¹⁸. Las distintas constelaciones de satélites utilizan diferentes señales y muchos equipos modernos están incorporando la capacidad de recibir señales de múltiples sistemas al mismo tiempo. Mientras más satélites pueden ser captados, mayor es la disponibilidad en cada momento y lugar, y aumenta la precisión de ubicación: el error con un GPS L1 es de 11.5 m (RMS¹⁹), pero cuando se combina GPS & GAL baja a 6.7 m (Wu *et al.*, 2019).

También hay sistemas accesorios, con coberturas regionales, que aumentan el desempeño de los GNSS, que son los llamados SBAS²⁰ - *Satellite-Based Augmentation Systems* (GSA, 2019). Los cuatro más reconocidos son EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), que cubre Europa, WAAS²¹ (*Wide Area Augmentation System*) en Norteamérica y dos en Japón y alrededores: MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) y el sistema QZSS ya mencionado. Un caso específico es el sistema *StarFire*, propiedad privada de la compañía de maquinaria agrícola John Deere, de uso exclusivo para dar servicio de navegación autónoma a sus clientes. También existe la tecnología RTK, que consiste en terminales estáticos de recepción que, en tiempo real, corrigen, regeneran y retransmiten la señal a dispositivos móviles en alcance. Estos sistemas se basan en sistemas de torres receptoras en tierra que reciben las señales, rectifican las órbitas, tiempos y datos de las condiciones de la atmósfera superior, y las transmiten a una serie de satélites geoestacionarios. Estos re-envían la información en sus señales, que son captadas junto con las GNSS y se emplean para corregir los pseudo-rangos calculados.

FUENTES DE ERRORES Y SESGOS EN LOS GNSS

En los receptores GPS/GNSS la sincronización de los relojes es un aspecto crítico, ya que un error de 0.001 segundo equivale a 300 km de imprecisión en la distancia calculada. Las constelaciones de satélites GPS tienen su propia y precisa medida de tiempo (llamada tiempo-GPS) mantenida por relojes atómicos a bordo y emiten una señal de tiempo (un *click*) en la banda portadora L de fase modulada. Por esta razón, estos satélites también son utilizados como “sistemas de transferencia de tiempo”, es decir, empleados para sincronizar la medición del tiempo a escala global, siguiendo estándares únicos como el UTC (*Universal Time Coordinated*). La transferencia de tiempo de alta

precisión debe considerar el medio de recorrido (la atmósfera), que causa un retardo de cerca de $3.3 \mu\text{s}/\text{km}$ y por tanto debe corregirse, a menos que la distancia sea muy corta o se necesite poca precisión. El retardo de la ionosfera puede variar desde pocos nanosegundos (noche, dirección vertical) hasta cientos de nanosegundos (durante el día y a bajos ángulos de elevación). Afortunadamente, hay varios métodos de corrección que usan dos frecuencias o con medidas de la fase portadora. El retardo de la tropósfera es de una decena de nanosegundos y las inestabilidades del reloj del receptor físico y sus imprecisiones (llamadas errores de dispersión) generalmente son también de varios nanosegundos. Al final, se logran precisiones de menos de 40 nanosegundos, el 95% del tiempo. En los buenos receptores para posicionamiento el error del reloj llega a 10 nanosegundos (que equivale a 3 m de desplazamiento). También es por esta razón que cuatro satélites como mínimo son necesarios para estimados con poco error. Debe tenerse en cuenta, además, que un mismo recorrido o punto tomado en días diferentes puede variar en las coordenadas que se registran (al cambiar los satélites disponibles encima del mismo), por ello se recomiendan varias mediciones por punto en fechas distintas.

Así, la mayor fuente de error de los sistemas satelitales de posicionamiento está asociada a los efectos de propagación por la atmósfera, particularmente los retardos que se producen por las “chispas” en la ionosfera (*ionospheric scintillations*²²) (efecto de las partículas cargadas, que interactúan con el viento solar) y el vapor de agua de la troposfera. Ambos efectos son empleados por muchas estaciones meteorológicas terrestres para recopilar información sobre el estado de la atmósfera superior. Pero si en los receptores para posicionamiento estos sesgos no se estiman o eliminan, el error se mantiene por encima de 30 m (Kintner *et al.*, 2007; Lachapelle y Gratton, 2019). Las formas de enfrentar o compensar estas fuentes de error son las que diferencian los tipos de receptores según su calidad y aseguran las altas precisiones.

De igual forma, dado este principio de funcionamiento básico, se asume que el receptor GNSS deba recibir la señal en línea recta desde el satélite, para que la distancia estimada a partir del tiempo de recorrido sea precisa. Pero cuando hay objetos grandes se pueden reflejar las señales, incluso de satélites que no entran en el campo directo de visión del receptor, con lo cual se retrasan milésimas de segundos en llegar y aumenta el error en la

ubicación. Esto es lo que se llama errores por multirrecorrido (*multi-path signal error*²³) (Fig. 2) y es particularmente fuerte en ambientes citadinos. En las ciudades los edificios bloquean las señales directas y permiten solo la visibilidad de satélites en un espacio estrecho encima del receptor, y además las reflejan, con lo cual los errores de cálculo para la triangulación se incrementan. Aunque existen algoritmos en los receptores para identificar las señales reflejadas (a partir del comportamiento de la razón señal/ruido) siempre existe un impacto en la calidad del posicionamiento. Para estimar la calidad de recepción en un punto se emplea un indicador de reducción de precisión llamado PDOP²⁴. El algoritmo llamado de Cañón Urbano utiliza modelos tridimensionales de las ciudades como ayuda para mitigar, excluir o corregir los errores de multirrecorrido en estos contextos y son la base de los 3D-GNSS (Hsu *et al.*, 2015). En zonas de campo se deben considerar estos errores en lugares de relieve abrupto o en bordes de zonas boscosas. En las ubicaciones tomadas en un sendero que bordea un bosque se produce un desplazamiento evidente del recorrido real por las reflexiones de las señales en los árboles (Fig. 2C). En vehículos a velocidades considerables se debe tener en cuenta también el efecto Doppler.

Las señales GPS son muy débiles, su fuerza se mide en decibeles en relación a 1 mW (dBm²⁵). La atenuación atmosférica (el conjunto de efectos que atenúa las señales que atraviesan la atmósfera) hace que solo llegue a la superficie entre -125 dBm a -130 dBm (a cielo abierto), pero en las ciudades puede bajar hasta -150 dBm. Un receptor de buena sensibilidad puede adquirir señales de hasta -155 dBm, y una vez fijados los satélites puede mantener el seguimiento, aunque disminuya a -165 dBm. Estas señales tienen poca penetración en las construcciones y en el follaje de los árboles, aunque en este último, cuando no bloquea las señales, las transmite con un fuerte nivel de degradación (por las múltiples reflexiones) que compromete la precisión de la ubicación estimada. El uso de estas señales degradadas para generar la ubicación disminuye la precisión horizontal de cualquier receptor GPS (Modsching *et al.*, 2006), pero los receptores comerciales están mejor preparados para lidiar con estos errores. Wing *et al.* (2005) investigaron las precisiones de los GPS en diferentes condiciones de cobertura boscosa. El error medio fue entre 1 - 4 m en áreas abiertas, entre 1 - 7 m en coberturas moderadas, y aumentaba a 11 m en bosques cerrados.

Denis y Cruz: Sobre los Sistemas Satelitales de Navegación Global

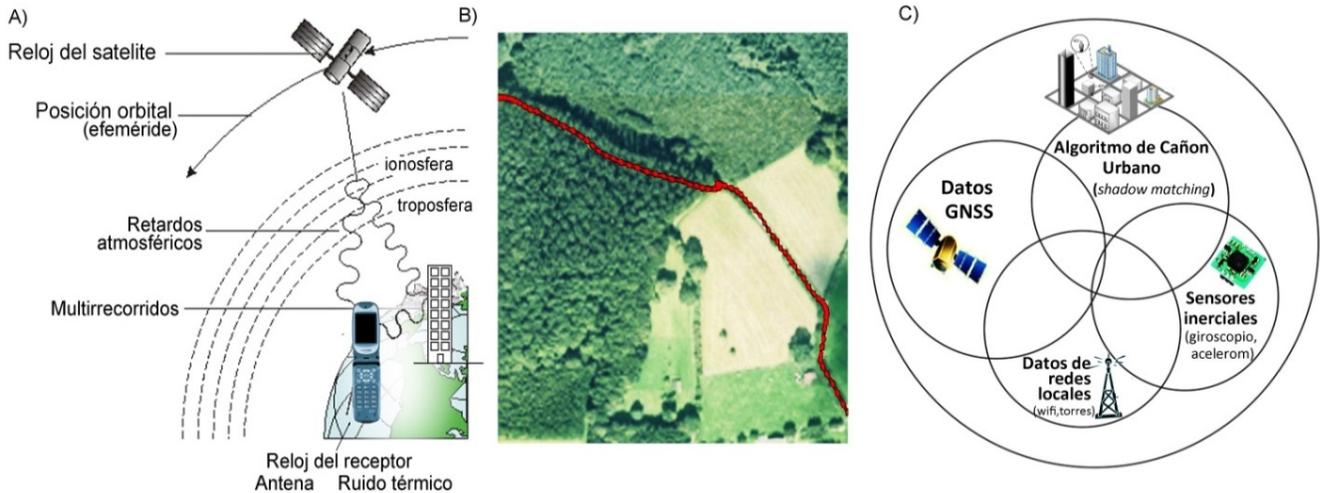


Figura 2. Fuentes de error en el sistema de GNSS (A). B) Desplazamiento de los registros de ubicación por el error de multi-recorrido en el borde de un bosque. C) Mecanismos complementarios que mejoran los sistemas de localización.

Figure 2. Error sources in GNSS (A). B) Drift of positions recorded along a track by effect of multipath error in a forest border. C) Complementary mechanisms that improve or enhance satellite navigation systems.

Más allá de la propia recepción de estas señales, el algoritmo de procesamiento que se utilice tiene un gran impacto en la precisión de la ubicación que se obtenga. Los algoritmos de post-procesamiento de los datos más eficientes son los diferenciales (DGNSS²⁶) que utilizan dobles frecuencias o dos equipos simultáneos (generalmente en equipos de nivel peritaje) y el llamado Posicionamiento Preciso en un Punto (PPP²⁷). El PPP es un algoritmo alternativo al GNSS diferencial, para obtener posiciones absolutas de un receptor GNSS usando solo la fase portadora y observaciones del pseudo-rango (Bisnath y Gao, 2009). Este se está empleando cada vez más por su mayor facilidad y en él las correcciones de órbitas y relojes se calculan usando numerosas estaciones permanentes en tierra del sistema IGS (*International GNSS Service*²⁸), con lo que se logran precisiones de centímetros (Zumbergue *et al.*, 1997; Wu *et al.*, 2019).

RECEPTORES GPS/GNSS EN DISPOSITIVOS MÓVILES

Si bien los equipos dedicados pueden ser relativamente caros (aunque su precio va disminuyendo progresivamente) y más difíciles de adquirir por restricciones comerciales o legales, la tecnología de posicionamiento global se ha infiltrado en muchos otros equipos de uso regular como autos, cámaras fotográficas y teléfonos celulares. Los dispositivos móviles como tabletas y celulares equipados con GPS se han vuelto de amplio uso (Nowak *et al.*, 2020). La creciente calidad de los sensores en los teléfonos, por

ejemplo, en las cámaras fotográficas, ha hecho que los celulares se hayan convertido en instrumentos esenciales en muchas actividades donde el empleo de equipos dedicados se ha vuelto obsoleto (GSA, 2019).

A partir del desarrollo de los servicios LBS (*Location based services*²⁹) en los teléfonos inteligentes, se incorporaron en ellos los receptores GPS (Bauer, 2013), pero además están equipados usualmente de un sistema asistido (A-GPS³⁰). Este es un mecanismo que emplea la red de telefonía celular de forma combinada a las señales satelitales para determinar las posiciones con mayor velocidad (Vallina-Rodríguez *et al.*, 2013), reducir el tiempo de adquisición de los GPS tradicionales y contrarrestar los errores de multi-recorrido en zonas citadinas (Bierlaire *et al.*, 2013), aunque se sacrifica precisión (Massad y Dalyot, 2018; Zandbergen, 2009; Zandbergen y Barbeau, 2011). La confiabilidad de estos sensores de nivel de consumidor en los teléfonos inteligentes para su uso científico fue recientemente valorada por Denis *et al.* (2021), quienes brindan argumentos para contrarrestar el prejuicio existente en su contra.

CONSIDERACIONES FINALES

La georreferenciación de la información de biodiversidad es vital en muchos campos de la Ecología y la Conservación, así como en estudios biogeográficos, de impacto ambiental, propagación de especies

Denis y Cruz: Sobre los Sistemas Satelitales de Navegación Global

invasoras y muchos otros. Estos constituyen las bases para correctas estrategias de manejo y conservación de los recursos naturales, de ahí que la importancia del dominio y uso adecuado de la tecnología de posicionamiento global vaya más allá de un simple valor teórico hasta las aplicaciones prácticas (Novak *et al.*, 2020). El empleo de los receptores GPS/GNSS en estos campos ha tenido, por ende, un crecimiento considerable en las últimas décadas aparejado a un incremento en la utilización de otras informaciones satelitales. Por encima de la cartografía geográfica tradicional, la producción de mapas de recursos, condiciones ambientales, distribuciones de especies, ecosistemas o rasgos vegetales potenciados por esta tecnología ha tenido un impacto significativo en las investigaciones ambientales. Productos que antiguamente podrían tardarse meses para ser obtenidos, ahora pueden actualizarse en pocas horas. Esto permite monitorear características espaciales y procesos que varían a mayores velocidades.

Los GNSS son campos activos de investigación y desarrollo, en los que se prevén grandes adelantos a corto plazo. En principio, se dan pasos para la homogeneización de las señales entre constelaciones, con lo cual se aumentaría la eficiencia y se abaratarían significativamente los costos de producción de receptores multi-constelación. Nuevos algoritmos de post procesamiento se están probando a diario al igual que sistemas de navegación dentro de edificaciones y otros lugares donde no se reciben las señales con suficiente intensidad o calidad.

Un impulso importante fue la incorporación de estas tecnologías a los teléfonos inteligentes, lo que las ha puesto al alcance de una cantidad significativa de personas. Esto ha permitido una generalización de las funciones de recopilación, transmisión y envío de datos en tiempo real, y proporciona a los investigadores nuevas formas de investigación y validación (Dickinson *et al.*, 2010) con apoyo público, que en su máxima expresión constituye la llamada ciencia ciudadana. Esta universalización, sin embargo, también denota la necesidad de un mayor conocimiento del funcionamiento de los sistemas de navegación.

LITERATURA CITADA

- Bauer C. 2013. On the (in-) accuracy of GPS measures of smartphones: a study of running tracking applications. En: Proceedings of International Conference of Advances in Mobile Computing and Multimedia, Vienna (diciembre, 2013).
- Bierlaire M, Chen J, Newman J. 2013. A probabilistic map matching method for smartphone GPS data. *Transportation Research. Part C Emerging Technology*. 26: 78-98.
- Bornschlegel T. 2009. The history of the Global Positioning System GPS. Disponible en http://www.imamu.edu.sa/Scientific_selections/abstracts/Physics/ (consultado: 20 de agosto de 2020).
- CNSA. 2017. BeiDou Navigation Satellite System, Haidian District, Beijing (China). China National Space Administration. Disponible en <http://en.beidou.gov.cn/> (consultado: 20 de julio de 2017).
- Denis, D., Cruz, D.D., Ferrer-Sánchez, Y. y Felipe, F.L. 2021. Potencialidades de los celulares inteligentes para investigaciones biológicas. Parte 2: Receptores GPS/GNSS. *Revista Jard. Bot. Nac. Univ. Habana* 42: 209-216.
- Dodd M. 2011. Where are my quadrats? Positional accuracy in fieldwork. *Methods in Ecology and Evolution*. 2(6): 576e584. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00118.x>.
- EGNSSA. 2017. European Global Navigation Satellite System Agency, Prague (Czech Republic) and Saint-Germain-en-Laye (France). Disponible en <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-europeanglobal-satellite-based-navigation-system> (consultado: 10 de agosto de 2020).
- Giffard R. 1999. Estimation of GPS Ionospheric Delay Using L1 Code and Carrier Phase Observables. En: Proceedings of the 31st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Dana Point, CA (diciembre, 1999).
- GSA (European GNSS Agency). 2019. What is GNSS? Disponible en <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss> (consultado: 6 de agosto de 2020).
- Hao M, Jiao W, Jia X, Tao Q. 2020. Precise point positioning performance evaluation of QZSS centimeter level augmentation service. *CSNC - LNEE*. 652: 78-88.
- Hauptvogel R, Kuna R, Strba P, Hauptvogel P. 2010. GIS design for in situ conservation of rare and endangered species. *Czech Journal of Genetic and Plant Breeding*. 46: S50eS53. DOI: <https://doi.org/10.17221/696-CJGPB>.
- Hsu LT, Gu Y, Kamijo S. 2015. NLOS Correction/Exclusion for GNSS Measurement Using RAIM and City Building Models. *Sensors*. 15: 17329-17349.
- IACPNT. 2017. Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, Korolyov

Bauer C. 2013. On the (in-) accuracy of GPS measures of smartphones: a study of running tracking applications. En: Proceedings of International

- (Russia). Disponible en <https://www.glonasiac.ru/en/GLONASS/index.php> (consultado: 23 de agosto de 2020).
- ISRO. 2017. Indian Space Research Organisation, Bengaluru (India). Disponible en <http://www.isro.gov.in/spacecraft/satellite-navigation> (consultado: 19 de agosto de 2020).
- Johnson CE, Barton CC. 2004. Where in the world are my field plots? Using GPS effectively in environmental field studies. *Frontiers in Ecology and Environment*. 2 (9), 475e482.
- Kintner PM, Ledvina BM, de Paula ER. 2007. GPS and Ionospheric Scintillations. *Space Weather*. 5(S09003): 1-23.
- Lachapelle G, Gratton P. 2019. GNSS precise point positioning with Android smartphones and comparison with high performance receivers. En: Proceedings of the IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing, Chongqing (diciembre, 2019).
- Massad I, Dalyot S. 2018. Towards the crowdsourcing of massive smartphone assisted-GPS sensor ground observations for the production to Digital Terrain Models. *Sensors*. 18: 898.
- Modsching M, Kramer R, ten Hagen K. 2006. Field trial on GPS accuracy in a medium size city: the influence of built-up. En: Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation, and Communication (WPNC' 06) Hannover, (marzo, 2006).
- Nowak MM, Dziób K, Ludwisiak Ł, Chmiel J. 2020. Mobile GIS applications for environmental field surveys: A state of the art. *Global Ecology and Conservation* (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01089>.
- Rutter SM. 2007. The integration of GPS, vegetation mapping and GIS in ecological and behavioural studies. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 36(Supl.1): 63e70. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007001000007>.
- Sonti SH. 2015. Application of geographic information system (GIS) in forest management. *Journal of Geography and Natural Disasters*. 5:145. <https://doi.org/10.4172/2167-0587.1000145>.
- Urlichich Y, Subbotin V, Stupak G, Urlichich, Y., Subbotin, V., Stupak, G., Dvorkin, V., Povalyaev, A., Karutin, S. 2011. GLONASS Modernization. En: Proceedings of ION GNSS+ 2011. Portland, (septiembre, 2011).
- Vallina-Rodriguez N, Crowcroft J, Finamore A, Grunenberger Y, Papagiannaki K. 2013. When assistance becomes dependence: characterizing the costs and inefficiencies of A-GPS. *GetMobile*. 17: 3-14.
- Wing MG, Eklund A, Kellogg LD. 2005. Consumer-grade global positioning (GPS) accuracy and reliability. *Journal of Forestry*. 103: 169-173.
- Wu Q, Sun M, Zhou C, Zhang P. 2019. Precise Point Positioning using dual-frequency GNSS observations on smartphone. *Sensors*. 19: 2189. DOI: [10.3390/s19092189](https://doi.org/10.3390/s19092189).
- Zandbergen PA. 2009. Accuracy of iPhone locations: a comparison of assisted GPS, WiFi and cellular positioning. *Transaction on GIS*. 13: 5-26.
- Zandbergen PA, Barbeau SJ. 2011. Positional accuracy of assisted GPS data from high-sensitivity GPS-enabled mobile phones. *Journal of Navigation*. 64: 381-399.