

# Tecnologías GPS / GNSS: Presente y Futuro

Ezequiel Pallejá<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería del Ejército, Departamento de Ingeniería en Agrimensura y Tecnicatura en Geomática, Laboratorio de Geociencias, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.  
epalleja@fie.undef.edu.ar

**Abstract.** Esta conferencia explora el estado actual y las perspectivas futuras de las tecnologías GPS y GNSS. Se ofrece una visión histórica de su desarrollo, junto con una descripción de las constelaciones actuales (GPS, GLONASS, BEIDOU y GALILEO). Se analizan las aplicaciones prácticas existentes y se destacan los desafíos, como los obstáculos en entornos urbanos y las limitaciones de uso en interiores. Además, se describen los avances en las constelaciones existentes, la integración del GNSS con tecnologías emergentes, y se proyectan desarrollos futuros, incluyendo la próxima generación de GPS, su uso en dispositivos móviles, aplicaciones no convencionales de la señal GPS, participación en IoT, robotización, y su expansión en geodinámica y microgeodesia. Se hace hincapié en la importancia de fortalecer los marcos de referencia internacionales y nacionales, y de promover la investigación académica dentro de la Facultad de Ingeniería del Ejército, a través de la carrera de Ingeniería en Agrimensura y la Tecnicatura en Geomática, apoyadas por el Laboratorio de Geociencias.

**Keywords:** GPS, GNSS, constelaciones, tecnología, IoT, geodinámica, robotización.

## 1. Introducción

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés, Global Positioning System), también conocido como NAVSTAR (Navigation System with Timing and Ranging), ha revolucionado el campo de la geodesia y la navegación desde su implementación a finales del siglo XX. Este sistema fue desarrollado originalmente por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para uso militar, pero su capacidad para proporcionar servicios de posicionamiento y sincronización con alta precisión en cualquier lugar del planeta, las 24 horas del día y de manera gratuita, lo ha convertido en una herramienta esencial para aplicaciones civiles, militares y científicas.

### 1.1. Definición y Contexto

El origen de los sistemas de navegación por satélite se remonta al 4 de octubre de 1957, cuando la Unión Soviética lanzó el Sputnik 1, el primer satélite artificial en orbitar la Tierra. Este evento marcó el inicio de una nueva era en la ciencia espacial y sentó las bases para el desarrollo de sistemas como el GPS, siendo actualmente uno de los componentes del Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS, Global Navigation Satellite Systems, un conjunto de constelaciones satelitales que incluye, además de GPS, a GLONASS (Rusia), BEIDOU (China) y GALILEO (Europa).

### 1.2. Importancia del GPS y GNSS

Actualmente, las aplicaciones del GPS y GNSS abarcan diversos campos, desde la navegación en dispositivos móviles hasta el monitoreo de movimientos tectónicos a escala global. La integración de estos sistemas con tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas (IoT), la navegación inercial y la fotogrametría, está generando nuevas oportunidades en sectores como la agricultura de precisión, la robótica y la geodinámica.

### 1.3. Objetivos

Esta conferencia revisará los hitos históricos de los sistemas GPS y GNSS, los avances tecnológicos recientes, sus principales aplicaciones en sectores clave, y los desafíos actuales que enfrenta la navegación por satélite. También se discutirán las tendencias futuras, como el desarrollo de sistemas GNSS para la Luna y Marte, y la importancia de los Sistemas de Referencia Geodésicos a nivel global y local, con especial enfoque en Argentina.

## 2. Historia y desarrollo del GPS / GNSS

La historia del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y del **Sistema Global de Navegación por Satélite** (GNSS) está profundamente ligada a los avances en la tecnología espacial y geodésica desde mediados del siglo XX. El punto de partida de esta evolución se remonta al 4 de octubre de 1957, cuando la Unión Soviética lanzó el Sputnik 1, el primer satélite artificial en orbitar la Tierra.

### 2.1. Orígenes en la navegación por satélite

La capacidad de rastrear el Sputnik desde la Tierra permitió a los científicos comprender que las señales de radio emitidas por satélites en movimiento podían utilizarse para calcular posiciones terrestres. A lo largo de las décadas de 1960 y 1970, los avances en la tecnología espacial y de radiocomunicación impulsaron el desarrollo de sistemas más precisos y globales. En 1973, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos aprobó el desarrollo de un sistema más avanzado, conocido como NAVSTAR GPS, que buscaba ofrecer cobertura global y precisión en tiempo real.

## **2.2. Desarrollo y expansión del GPS**

El GPS comenzó a tomar forma con la puesta en órbita de sus primeros satélites en la década de 1970.

En 1992, el sistema GPS alcanzó su "capacidad plena" con la disposición en órbita de 24 satélites, lo que permitió una cobertura global completa. Desde entonces, se han seguido lanzando satélites, mejorando la precisión y la fiabilidad del sistema. En la actualidad, el sistema cuenta con más de 30 satélites operacionales.

## **2.3. El surgimiento de las constelaciones GNSS**

El éxito del GPS impulsó a otras naciones a desarrollar sus propios sistemas de navegación por satélite. En 1996, Rusia revitalizó su sistema **GLONASS**, que había estado en desarrollo desde la década de 1970. A su vez, la Unión Europea comenzó a desarrollar **GALILEO** en los años 2000, con la finalidad de tener un sistema propio e independiente, que alcanzó su capacidad operativa inicial en 2016. China, por su parte, comenzó a desplegar el sistema **BEIDOU**, cuyo desarrollo en fases culminó en 2020 con la creación de una constelación global que ofrece servicios de navegación y posicionamiento precisos a nivel mundial.

## **2.4. Hitos claves en la evolución del GPS y GNSS**

Hitos clave en la evolución de los sistemas de posicionamiento global incluyen:

**1973:** Decisión inicial para el desarrollo del GPS.

**1983:** GPS disponible para uso civil.

**1992:** GPS alcanza su capacidad plena con 24 satélites.

**2000:** Desactivación de la disponibilidad selectiva (SA), lo que mejoró la precisión del GPS para usuarios civiles.

**2010:** Modernización del GPS, con el lanzamiento de los satélites Block IIF.

**2019:** Integración de GPS y GLONASS, con más de 55 satélites en total.

**2020:** Implementación global de BEIDOU (China), con más de 100 satélites en el sistema GNSS completo.

### **3. Desafíos y Aplicaciones Actuales**

Los sistemas GPS/GNSS han demostrado ser herramientas valiosas en una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, a pesar de los avances significativos en la tecnología, persisten varios desafíos que afectan su rendimiento y precisión. En esta sección, se analizan tanto los desafíos como las aplicaciones actuales de estos sistemas.

#### **3.1. Precisión, Limitaciones, Errores y Correcciones**

La precisión de las mediciones GNSS puede verse afectada por diversos factores, como la ionósfera, la troposfera, y la geometría de los satélites. La señal GPS, al atravesar la ionósfera, puede experimentar retrasos y distorsiones que afectan la exactitud de las mediciones. La variabilidad en la ionósfera y la troposfera puede introducir errores en las mediciones GNSS. Los modelos de corrección atmosférica se utilizan para mitigar estos errores.

**Errores de Multipath:** La reflexión de las señales GNSS en edificios y otras estructuras puede causar errores de multipath, que afectan la precisión de la ubicación.

**Errores de Reloj:** Los relojes en los satélites y en los receptores no son perfectamente precisos, lo que puede introducir errores en la determinación de la posición.

**Error de Efemérides:** Los errores en los datos efemérides (órbitas de los satélites) pueden afectar la precisión de la localización. Los sistemas GNSS utilizan correcciones periódicas para mantener la precisión.

**Corrección Diferencial:** Las técnicas de corrección diferencial, como el DGPS (Differential GPS), se utilizan para mejorar la precisión al proporcionar correcciones en tiempo real basadas en estaciones de referencia fijas.

**RTK (Real-Time Kinematic):** El método RTK permite obtener precisiones de centímetro en tiempo real mediante la corrección de la fase de la señal.

**PPP (Precise Point Positioning):** El PPP es una técnica que utiliza correcciones precisas de efemérides y modelos atmosféricos para lograr alta precisión en la determinación de la posición.

#### **3.2. Aplicaciones**

**Topografía y Cartografía:** Los sistemas GNSS se utilizan ampliamente para la elaboración de mapas y la medición topográfica. La alta precisión permite la creación de mapas detallados y la planificación de proyectos de construcción.

**Construcción de Infraestructuras:** En la construcción de grandes infraestructuras, como puentes y carreteras, el GNSS proporciona datos precisos para el diseño y monitoreo de la construcción.

**Optimización de Cultivos:** Los sistemas GNSS permiten la aplicación precisa de insumos agrícolas, como fertilizantes y pesticidas, optimizando el uso de recursos y mejorando el rendimiento de los cultivos.

**Navegación Terrestre:** Los sistemas GNSS son fundamentales para la navegación en automóviles, proporcionando direcciones precisas y ayudando en la planificación de rutas.

**Navegación Marítima y Aérea:** En la navegación marítima y aérea, los GNSS ofrecen una guía precisa y confiable, mejorando la seguridad y eficiencia del transporte.

Navegación de Drones: Los drones utilizan GNSS para la navegación precisa, la cartografía aérea y la inspección de infraestructuras.

Vehículos Autónomos: Los vehículos autónomos dependen de los sistemas GNSS para la navegación y la coordinación con otros sistemas de sensores.

### **3.3. Desafíos en entornos urbanos e interiores**

Obstrucción de Señal: En entornos urbanos, los edificios altos y otras estructuras pueden bloquear o reflejar las señales GNSS, afectando la precisión de la ubicación.

Ruido de Señal: La presencia de múltiples fuentes de señal en áreas urbanas puede causar interferencias y ruido que afectan la calidad de la señal GNSS.

Limitación de Señal: En interiores, las señales GNSS pueden ser bloqueadas por techos y paredes, lo que limita la capacidad de obtener datos de posición precisos.

Alternativas Tecnológicas: Para superar estas limitaciones, se utilizan tecnologías complementarias, como Wi-Fi, Bluetooth y sistemas de posicionamiento basados en interiores (IPS), que mejoran la localización en entornos cerrados.

## **4. Desarrollos Tecnológicos y Futuro del GPS/GNSS**

El desarrollo continuo de las constelaciones satelitales y la integración de nuevas tecnologías están marcando el rumbo del futuro del GPS y GNSS. A medida que aumentan las exigencias de precisión, disponibilidad y resiliencia en diversas aplicaciones, los sistemas globales de navegación por satélite están evolucionando para cumplir con estos desafíos.

### **4.1. Evolución de las constelaciones satelitales**

Las constelaciones satelitales que forman parte de los sistemas GNSS han experimentado importantes avances tecnológicos en los últimos años. El sistema GPS ha pasado por múltiples generaciones de satélites, desde el Block II hasta el Block III, mejorando no solo la precisión y la cobertura, sino también la capacidad de transmisión de nuevas señales. El sistema GLONASS de Rusia, el Galileo de Europa y el BeiDou de China también han expandido y mejorado sus respectivas constelaciones, alcanzando niveles de cobertura global comparables.

### **4.2. GNSS de próxima generación**

Uno de los desarrollos más destacados es la implementación de GNSS de próxima generación, que incluye mejoras en la interoperabilidad entre diferentes sistemas satelitales. La capacidad de trabajar con múltiples constelaciones simultáneamente, conocida como multiconstelación, ha permitido una mayor precisión y fiabilidad en entornos desafiantes, como áreas urbanas o montañosas, donde las señales pueden estar obstruidas. La próxima generación de GNSS también se está enfocando en la resistencia a las interferencias y la seguridad de las señales, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad a los ataques de suplantación de señales (spoofing) y jamming (bloqueo de señales).

### **4.3. GNSS en dispositivos móviles**

El uso de GNSS en dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes, se ha convertido en una de las aplicaciones más populares y cotidianas. Las mejoras en los receptores GNSS de bajo costo han permitido que los dispositivos móviles ofrezcan servicios de localización con precisiones que oscilan entre 5 y 8 metros. Sin embargo, el desarrollo de receptores de mayor precisión, así como la integración de sensores adicionales, está acercando las capacidades de los dispositivos móviles a niveles de precisión anteriormente reservados para equipos especializados. El futuro de GNSS en dispositivos móviles también se está orientando hacia la integración con aplicaciones de realidad aumentada (AR), donde el posicionamiento preciso es clave para la superposición de información digital en el mundo físico.

#### **4.4. GNSS en IoT y robotización**

El Internet de las Cosas (IoT) y la robotización están integrando GNSS en una amplia gama de dispositivos y aplicaciones. En el sector industrial, los robots autónomos, tanto en fábricas como en agricultura y logística, utilizan GNSS para navegar de manera precisa y eficiente. En el futuro, se espera que la robotización autónoma continúe creciendo, con GNSS como un componente clave para permitir el posicionamiento preciso de vehículos, máquinas y equipos en diversos entornos, desde ciudades inteligentes hasta operaciones en áreas remotas.

#### **4.5. Nuevas aplicaciones: GNSS lunar y espacial**

El futuro del GNSS no está limitado a la Tierra. Los desarrollos actuales están explorando la posibilidad de implementar sistemas GNSS para la Luna y Marte, con el fin de apoyar las misiones espaciales y futuras colonias humanas en estos cuerpos celestes.

### **5. Aplicaciones y Desafíos Actuales del GPS/GNSS**

Los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) han transformado múltiples sectores, desde la navegación hasta la ingeniería geodésica y la robótica. Sin embargo, junto a los avances tecnológicos y las múltiples aplicaciones de estas tecnologías, también surgen desafíos que deben ser abordados para mejorar su precisión y fiabilidad en diversos entornos.

#### **5.1. Aplicaciones actuales del GPS/GNSS**

Las aplicaciones del GPS y GNSS abarcan una amplia variedad de campos, tanto en entornos profesionales como en la vida cotidiana. A continuación, se describen algunas de las áreas más destacadas:

**Topografía y Geodesia:** Las técnicas de medición diferencial con fase y el uso de estaciones de referencia permiten precisiones de nivel centimétrico, lo cual es crucial para proyectos de construcción, monitoreo de deformaciones estructurales y mapeo detallado.

**Agricultura de Precisión:** El GNSS es un componente clave en la optimización de la producción agrícola, permitiendo la navegación autónoma de maquinaria, la gestión eficiente de recursos y la siembra de precisión.

**Navegación Terrestre, Marítima y Aérea:** El GPS es ampliamente utilizado en la navegación de vehículos terrestres, barcos y aviones, mejorando la seguridad y la eficiencia de las rutas.

**Vehículos Autónomos y Drones:** La robotización y el uso de drones dependen del GNSS para realizar tareas de manera autónoma, desde la entrega de paquetes hasta el monitoreo ambiental. La combinación de GNSS con otras tecnologías como sensores inerciales y visión por computadora mejora la capacidad de navegación en tiempo real.

**IoT (Internet de las Cosas):** Los dispositivos conectados a la red, como sensores y vehículos, utilizan GNSS para el monitoreo y control remoto en tiempo real, facilitando la logística, el transporte y la infraestructura inteligente.

## 5.2. Desafíos actuales del GPS/GNSS

A pesar de sus amplias aplicaciones, el GPS y GNSS aún enfrentan limitaciones y desafíos técnicos, principalmente relacionados con la precisión en determinados entornos y la vulnerabilidad de las señales.

La presencia de edificios altos en áreas urbanas densas genera efectos de multitrayecto y pérdida de señal. Esto dificulta la obtención de posiciones precisas, un problema que afecta principalmente a aplicaciones de navegación en tiempo real y georreferenciación.

Las señales de los satélites GNSS se debilitan significativamente al atravesar techos y paredes, lo que limita su efectividad en interiores o túneles.

Las señales GNSS son vulnerables a interferencias tanto accidentales como intencionadas. Las interferencias pueden deberse a fenómenos atmosféricos o dispositivos electrónicos cercanos, mientras que los ataques de **spoofing** y **jamming** representan amenazas a la seguridad, pudiendo falsear o bloquear las señales de posicionamiento.

El GPS es entre 2 y 3 veces menos preciso en la determinación de alturas (altimetría) que en la localización horizontal (planimetría). Esto se debe a la geometría de las constelaciones satelitales y a la necesidad de combinar las lecturas del GNSS con modelos del geoide para obtener alturas precisas respecto a los niveles equipotenciales del campo de gravedad terrestre.

## 5.3. Perspectivas de mejora

Para superar estos desafíos, se están desarrollando soluciones tecnológicas y metodológicas que permitirán un uso más robusto y preciso del GPS y GNSS en el futuro. Entre ellas se incluyen:

La combinación del GNSS con otras tecnologías, como la navegación inercial, sensores visuales y radares, está mejorando la precisión y fiabilidad de las mediciones. Esto es especialmente relevante en entornos difíciles, como áreas urbanas densas o espacios interiores.

La expansión de las constelaciones GNSS con satélites de nueva generación, y la transmisión de señales adicionales en diferentes frecuencias, contribuirán a mejorar la precisión, reducir los errores y mitigar las interferencias en la señal.

La combinación de GNSS con redes Wi-Fi, Bluetooth y otras tecnologías de localización interna está mejorando la capacidad de posicionamiento en entornos donde la señal satelital es limitada.

El uso de redes de estaciones permanentes y servicios de corrección diferencial en tiempo real (como el **RTK**, o Cinética en Tiempo Real) permite mejorar considerablemente la precisión de las mediciones GNSS, llegando a obtener precisiones milimétricas en muchas aplicaciones.

Para mejorar la precisión de las mediciones GNSS, el uso de sistemas de corrección diferencial es esencial. Un ejemplo de esta tecnología es el protocolo **N-TRIP** (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), que permite la transmisión de correcciones diferenciales GNSS a través de internet.

## **6. El Marco de Referencia Geodésico en Argentina**

El estudio y materialización de los sistemas de referencia geodésicos es fundamental para comprender el alcance de los sistemas globales de posicionamiento, como GPS/GNSS.

En el ámbito local, Argentina cuenta con una red de estaciones permanentes, así como servicios de transmisión de correcciones por internet, cartografía y sistemas de información geográfica adaptados, varias redes geodésicas que en conjunto constituyen el marco POSGAR con miles de mojones, una red de nivelación que abarca gran parte del territorio nacional asociada a una red gravimétrica de gran extensión y precisión, modelos de geoide locales y experiencia en fotogrametría aérea y terrestre con aviones, drones y cámaras.

### **6.1 La Red RAMSAC y su Importancia**

En la actualidad, los marcos de referencia están siendo definidos con mucha precisión a través de las estaciones permanentes instaladas sobre el planeta.

Conforme con la tendencia internacional, en el año 1998, Argentina generó un Proyecto que consiste en la instalación de estaciones GNSS permanentes que permitan contribuir a materializar el Marco de Referencia Geodésico Nacional. El Proyecto se denominó RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo).

RAMSAC cuenta con estaciones distribuidas en todo el territorio argentino, lo que permite una cobertura geodésica continua y precisa.

Las estaciones de RAMSAC transmiten datos en tiempo real, lo que facilita la corrección de errores y mejora la precisión de las mediciones GNSS.

La red está diseñada para ser redundante y fiable, garantizando la disponibilidad continua de datos incluso si alguna estación presenta fallos.

### **6.2. Contribución de la Facultad de Ingeniería del Ejército**

La Facultad de Ingeniería del Ejército (FIE) de Argentina desempeña un papel destacado en el desarrollo y la aplicación de tecnologías geodésicas en el país. Su contribución abarca tanto la formación académica como la investigación y el desarrollo en el campo de la geodesia y el GNSS.



La FIE ofrece programas de estudio en Ingeniería en Agrimensura – Orientación Geográfica y en Tecnicatura en Geomática que incluyen una formación exhaustiva en geodesia, GNSS y técnicas de medición avanzadas.

El Laboratorio de Geociencias de la FIE es un centro de excelencia en investigación geodésica. Aquí se desarrollan y aplican nuevas tecnologías y metodologías para mejorar la precisión y la utilidad de los sistemas GNSS.

La FIE realiza investigaciones avanzadas en microgeodesia, que incluyen estudios sobre deformaciones terrestres a pequeña escala, monitoreo de movimientos y análisis de datos geodésicos.

La facultad contribuye al desarrollo y adaptación de aplicaciones GNSS para necesidades locales, incluyendo la mejora de sistemas de referencia y la integración con otras tecnologías.

La investigación y el desarrollo llevados a cabo por la FIE han permitido avances significativos en la tecnología geodésica y su aplicación en el país.

La formación especializada ofrecida por la FIE prepara a los profesionales para enfrentar desafíos en el campo de la geodesia y la ingeniería GNSS.

La facultad participa activamente en proyectos nacionales e internacionales, fortaleciendo la capacidad del país en el ámbito de la geodesia y el GNSS.

## **7. Conclusiones y Recomendaciones**

Los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) han revolucionado el modo en que interactuamos con el mundo, proporcionando capacidades de localización y navegación sin precedentes. A medida que estos sistemas evolucionan y se integran con nuevas tecnologías, su impacto en diversos sectores continúa creciendo, trayendo tanto oportunidades como desafíos.

La evolución constante de los sistemas GNSS, desde los primeros satélites hasta los modelos de próxima generación, ha mejorado significativamente la precisión y la disponibilidad del posicionamiento global.

La precisión de los sistemas GNSS ha mejorado considerablemente. Sin embargo, aún persisten desafíos que persisten, como la precisión en altimetría, la vulnerabilidad a interferencias y la efectividad en entornos urbanos e interiores.

La integración del GNSS con tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT), la navegación autónoma y la exploración espacial está abriendo nuevas oportunidades y aplicaciones.

El desarrollo y la implementación de sistemas de corrección diferencial como N-TRIP y técnicas avanzadas como GNSS-IR están mejorando la precisión y la utilidad de los sistemas GNSS en aplicaciones especializadas, como el monitoreo ambiental y la navegación autónoma.

Es crucial seguir invirtiendo en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías y métodos para mejorar la precisión y la resiliencia de los sistemas GNSS.

La cooperación entre países y organizaciones internacionales es esencial para el desarrollo y la implementación de estándares globales y para abordar desafíos comunes en el campo del GNSS.

Es fundamental continuar promoviendo programas de educación y capacitación en geodesia y tecnologías GNSS, especialmente en instituciones académicas y centros de investigación.

La mejora de la infraestructura de referencia, como redes de estaciones permanentes y sistemas de transmisión de correcciones, es clave para ofrecer servicios de posicionamiento de alta precisión.

Los sistemas GNSS deben ser evaluados continuamente para adaptarse a las cambiantes condiciones tecnológicas y ambientales.

## 8. Referencias

1. Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (1997). **Global Positioning System: Theory and Practice**. Springer-Verlag.
2. GPS World. (2024). **BeiDou Navigation Service Platform Begins Trial Operations**. *GPS World*. <https://www.gpsworld.com/beidou-navigation-service-platform-begins-trial-operations>