



CÁTEDRA DE TELEDETECCIÓN

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO



Equipo docente: Ing. Fabian Reuter

Abril 2026

INDICE

PRÓLOGO	5
POSICIONAMIENTO	7
TRIANGULACIÓN - TRILATERACIÓN.....	8
Triangulación.....	8
Caso de Estudio: Detección de incendios por triangulación	10
Trilateración.....	13
Caso de Estudio: Estación Total.....	14
Integración con los GNSS	18
INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS GNSS.....	20
Definición y conceptos básicos de los GNSS.....	21
Evolución histórica de los sistemas de navegación por satélite	22
Principios de funcionamiento de los GNSS	24
Medición del tiempo: la clave para la precisión	25
TIPOS DE SEÑALES GNSS.....	26
Recepción y procesamiento de señales GNSS	27
Cálculo de posición y tiempo	27
Error en las mediciones	28
Errores sistemáticos.....	28
Errores aleatorios.....	30
Precisión en las mediciones.....	31
Mitigación de errores.....	32
Geodesia y referencia espacial	34
PRINCIPALES SISTEMAS GNSS	¡Error! Marcador no definido.
GPS.....	36
Segmento espacial.	36
Segmentos de Control Terrestre	38
Segmento de usuario.....	38
GLONASS.....	39
Características y evolución del sistema GLONASS	39
GALILEO.....	41
BEIDOU	43
Expansión del sistema BeiDou	44

Características y mejoras del sistema BeiDou.....	45
SISTEMAS REGIONALES. QZSS - IRNSS	46
QZSS	46
IRNSS.....	47
DIFERENCIAS ENTRE LOS SISTEMAS GNSS	49
APLICACIONES DE LOS GNSS	51
Navegación personal y automotriz	51
Navegación en lagos y ríos.....	51
Geodesia y topografía.....	52
Búsqueda y rescate	52
Seguridad y emergencias	53
Logística y Trazabilidad	53
Aviación y Drones	53
Caso de Estudio: Aplicaciones de los GNSS - LiDAR	54
Aplicaciones LiDAR	55
Batimetrías.....	55
Modelos de elevación y de dosel.....	56
Estudios de vegetación.	56
Integración del LiDAR con GNSS y Otros Sensores	58
Limitaciones y Desafíos	58
Caso de Estudio: Aplicaciones de los GNSS - Agricultura de precisión	59
Usos de los GNSS en la Agricultura de precisión	61
MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO CON GNSS	63
1.- CLASIFICACIÓN SEGÚN EL NÚMERO DE RECEPTORES	65
Posicionamiento absoluto	65
Posicionamiento relativo	66
2.- CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE OBSERVABLES	69
Posicionamiento por código	70
Posicionamiento por fase de la portadora (DGPS).....	71
3.- CLASIFICACIÓN SEGÚN LA FORMA DE OBSERVACIÓN.....	72
Posicionamiento estático	72
Posicionamiento estático rápido	74
Posicionamiento cinemático	75
Cinemático Puro o Continuo	76

Stop and Go	77
Posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK).	78
Correcciones Diferenciales.....	78
4.- SEGÚN EL MOMENTO DEL PROCESAMIENTO DE DATOS.....	80
Procesamiento en Tiempo Real	80
Post-procesado.....	81
Caso de Estudio: Red RAMSAC.....	82
RAMSAC: estaciones, datos y procesamiento	84
RAMSAC-NTRIP: Posicionamiento de precisión en tiempo real	85
Cómo acceder a RAMSAC: recursos y herramientas	86
Caso de Estudio. Análisis de especificaciones de Receptores GNSS Bifrecuencia....	87
RMS en GNSS.....	90
GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS EN EL TEXTO	92
BIBLIOGRAFIA	98
DECLARACIÓN	101

PRÓLOGO

El posicionamiento constituye uno de los pilares fundamentales sobre los cuales se sostiene el conocimiento científico moderno del territorio, y su relevancia se vuelve particularmente trascendental en el ámbito de las ciencias, donde comprender la distribución, dinámica y evolución de los fenómenos naturales depende de la capacidad de ubicar con precisión cada observación dentro del espacio geográfico. Desde la delimitación de ecosistemas hasta el monitoreo del cambio climático, desde la planificación de aprovechamientos forestales hasta la evaluación de impactos ambientales, toda interpretación rigurosa de la realidad territorial requiere saber con exactitud dónde ocurren los procesos que se estudian.

A lo largo de la historia, la humanidad ha buscado formas de ubicarse en el espacio, desde las primeras observaciones astronómicas utilizadas por civilizaciones antiguas hasta los sofisticados sistemas satelitales contemporáneos capaces de determinar posiciones con exactitud centimétrica.

En este proceso, el posicionamiento dejó de ser un recurso exclusivo de navegantes o cartógrafos para convertirse en una herramienta esencial en múltiples disciplinas científicas. En el campo ambiental, este cambio significó la posibilidad de comparar datos tomados en distintos lugares y momentos, identificar patrones espaciales, modelar procesos ecológicos y evaluar transformaciones del paisaje. Para la ingeniería forestal, implicó la capacidad de gestionar recursos con precisión espacial, optimizar inventarios, planificar cosechas sustentables, diseñar redes de caminos forestales, delimitar áreas de conservación y monitorear perturbaciones como incendios, plagas o deforestación.

La importancia del posicionamiento se vuelve aún más evidente cuando se considera la naturaleza intrínsecamente espacial de los procesos ecológicos. Los fenómenos ambientales no ocurren de manera aislada ni aleatoria; están condicionados por gradientes geográficos, variables topográficas, patrones climáticos y relaciones espaciales entre componentes del paisaje. La distribución de especies vegetales, por ejemplo, depende de factores como altitud, pendiente, orientación, disponibilidad hídrica y características edáficas, todos los cuales poseen una dimensión espacial explícita. Del mismo modo, la propagación de un incendio forestal está determinada por la continuidad del combustible, la dirección del viento, la humedad relativa y la configuración del relieve, variables que solo pueden analizarse correctamente cuando se conocen sus posiciones y relaciones espaciales.

El desarrollo de tecnologías de posicionamiento de alta precisión ha transformado radicalmente la práctica profesional en las últimas décadas. Los sistemas globales de

navegación satelital, la fotogrametría digital, los sensores LiDAR, los drones de mapeo y los sistemas de información geográfica han ampliado la escala, velocidad y exactitud con que pueden obtenerse datos espaciales.

En el contexto actual de crisis ambiental global, la relevancia del posicionamiento adquiere una dimensión aún mayor. Problemas como la deforestación, la degradación de suelos, la pérdida de biodiversidad, la expansión urbana descontrolada y el cambio climático requieren monitoreo continuo, análisis multiescalar y comparación de datos a lo largo del tiempo. Todas estas tareas dependen de la capacidad de ubicar con precisión cada observación dentro de un sistema espacial consistente.

El posicionamiento ha sido, desde los primeros mapas dibujados a mano hasta la navegación autónoma de vehículos y drones, una de las necesidades fundamentales de la humanidad. Hoy, esa capacidad de saber dónde estamos, hacia dónde vamos y cómo llegar descansa en gran medida en los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), una tecnología que ha transformado silenciosamente nuestra vida cotidiana.

Este Serie Didáctica está dirigido a estudiantes, profesionales y técnicos que desean no solo utilizar receptores GNSS, sino entender en profundidad la tecnología que los sustenta. Porque en el mundo actual, donde la precisión espacial es sinónimo de eficiencia y seguridad, dominar el posicionamiento satelital no es solo una competencia técnica: es una herramienta estratégica.

Que estas páginas sirvan como guía para explorar, con rigor y curiosidad, el fascinante universo del posicionamiento.

POSICIONAMIENTO

Desde un enfoque científico-técnico, posicionar implica asignar coordenadas cuantificables (por ejemplo X, Y, Z; latitud, longitud y altura; o coordenadas proyectadas en un sistema cartográfico) que permitan describir la localización de algo en el espacio de manera reproducible y verificable.

En ingeniería, esto no es solo un concepto abstracto: es la base de cualquier inventario forestal georreferenciado, de la delimitación de áreas protegidas, del monitoreo de deforestación, del seguimiento de incendios y de la planificación territorial. Sin posicionamiento preciso, los datos espaciales carecen de valor científico, porque no pueden compararse ni integrarse con otras capas de información.

En ciencias forestales y ambientales, el posicionamiento cumple además una función integradora dentro de los sistemas de información geográfica. Cada dato ambiental —una medición de carbono en suelo, la altura de un árbol, la presencia de una especie invasora o la ubicación de un foco de incendio— adquiere valor analítico cuando está vinculado a coordenadas espaciales. Esto permite superponer capas temáticas y analizar relaciones espaciales complejas, como correlacionar la distribución de especies con variables climáticas, evaluar la proximidad de desmontes a cursos de agua o modelar la propagación potencial de incendios en función de topografía y combustible vegetal.

El posicionamiento es el proceso de determinar la ubicación exacta de un objeto, persona o punto dentro de un sistema de referencia determinado. Ese sistema puede ser:

- Geográfico → coordenadas en la Tierra (latitud, longitud, altura).
- Cartesiano → ejes X, Y, Z en un plano o espacio.
- Relativo → posición respecto a otro objeto o punto conocido.

El **posicionamiento geográfico** se basa en coordenadas angulares sobre la superficie terrestre: latitud, longitud y altura. Matemáticamente, este sistema está definido sobre un elipsoide de referencia que aproxima la forma de la Tierra (como WGS84 en la mayoría de aplicaciones GNSS). La latitud representa el ángulo entre el plano del ecuador y el punto considerado; la longitud es el ángulo respecto al meridiano de referencia (Greenwich); y la altura puede referirse al elipsoide (altura elipsoidal) o al nivel medio del mar (altura ortométrica).

El **posicionamiento cartesiano**, que puede entenderse en dos escalas distintas: cartesiano tridimensional geocéntrico (X, Y, Z) y cartesiano plano proyectado (como Gauss Krugger y

UTM). En aplicaciones de campo, trabajamos más frecuentemente con sistemas proyectados planos como Gauss Kruger, que convierten la superficie curva en un plano mediante proyecciones matemáticas. Aquí las coordenadas están en metros (Este y Norte), lo que facilita cálculos de superficie de parcelas, distancias entre puntos de muestreo etc.

El **posicionamiento relativo**, por su parte, no se basa necesariamente en coordenadas absolutas respecto a la Tierra, sino en la posición respecto a otro punto conocido. Este concepto es esencial en topografía y en técnicas GNSS de alta precisión como RTK (Real Time Kinematic) o posicionamiento diferencial. En estos métodos, se establece una estación base en un punto de coordenadas conocidas (absolutas) y se calcula la posición de un receptor móvil midiendo diferencias de fase de la señal satelital. Lo importante aquí no es tanto la posición global absoluta, sino la precisión relativa entre base y rover. Este enfoque permite alcanzar precisiones centimétricas bajo condiciones adecuadas.

TRIANGULACIÓN - TRILATERACIÓN

Existen dos métodos clásicos que permiten materializar el posicionamiento a partir de diferentes tipos de observaciones: la triangulación y la trilateración.

Ambos métodos tienen el mismo objetivo: calcular la posición de un punto desconocido a partir de datos medidos desde puntos conocidos. Sin embargo, difieren en el tipo de información que utilizan, en la lógica geométrica que los sustenta y en las tecnologías que los implementan.

En términos conceptuales, podría decirse que la triangulación responde a la pregunta “¿en qué dirección está el punto?”, mientras que la trilateración responde a “¿a qué distancia está el punto?”.

Triangulación

La triangulación determina la posición de un punto desconocido midiendo ángulos desde dos o más puntos conocidos cuya posición ya está definida.

La triangulación era el método preferido y principal para levantamientos de control horizontal, especialmente si se tenían que cubrir áreas extensas. Ghilani y Wolf (2012).

La triangulación funciona construyendo triángulos geométricos entre puntos conocidos y el punto desconocido. Si se conoce la distancia entre dos estaciones de observación (línea base) y se miden los ángulos hacia el punto objetivo desde cada estación, es posible determinar su

ubicación mediante trigonometría. Este método fue históricamente el principal sistema para crear redes geodésicas nacionales y cartografía de gran escala antes de la aparición de los sistemas satelitales. Su precisión depende principalmente de la exactitud en la medición angular y de la geometría del triángulo formado: cuando los ángulos son equilibrados, la precisión es alta; cuando son muy agudos u obtusos, los errores se amplifican.

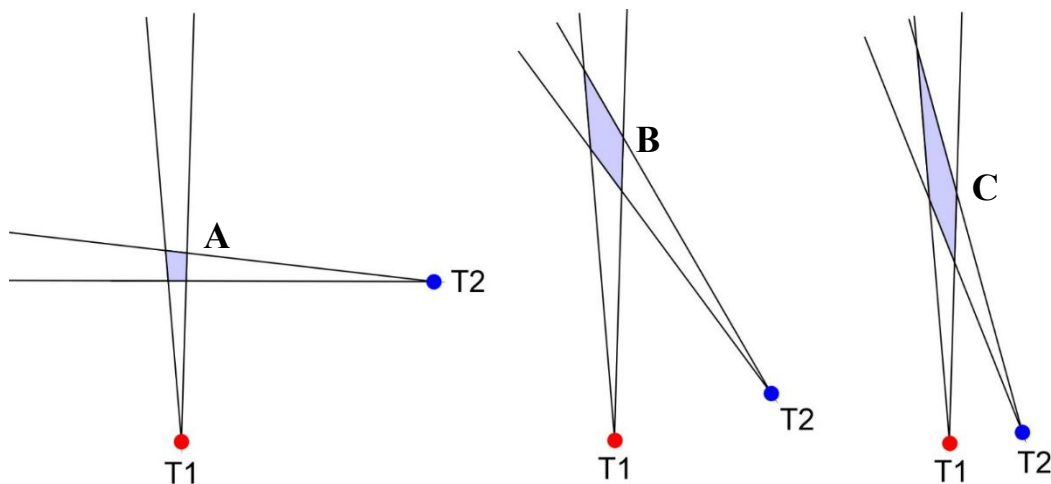


Figura 1. Posicionamiento de un área por triangulación. T1 y T2 son los puntos de observación.
Elaboración Propia.

En la imagen claramente se observa que existe una fuerte dependencia en la precisión obtenida al determinar la posición de un área de interés, esto es debido a la posición relativa de los puntos de observación con respecto a esa área de interés.

Esta falta de precisión aumenta en las figuras desde la figura A con la mejor precisión hasta la “C” con la menor precisión, esta aseveración es posible demostrarla gráficamente debido al aumento de la superficie en común de las observaciones.

En aplicaciones ambientales y forestales, la triangulación puede emplearse para ubicar incendios observados desde torres, localizar animales radiomarcados mediante antenas direccionales o determinar posiciones inaccesibles sin necesidad de desplazarse físicamente hasta el punto. Su principal ventaja es que permite posicionar objetos lejanos sin medir distancias directas; su principal limitación es que pequeños errores angulares pueden generar grandes errores espaciales cuando el objetivo está a gran distancia.

Características técnicas de la triangulación:

- Requiere instrumentos para medir ángulos (teodolitos, alidadas).
- Muy sensible a errores angulares.
- Precisión depende mucho de la geometría (ángulos cercanos a 90° son ideales).

En la práctica forestal y ambiental, estos principios se aplican de distintas formas:

- Torres de vigilancia y observadores humanos: cada punto de observación mide mediante una alidada, el azimut (ángulo de dirección), hacia una columna de humo. La intersección de estas líneas define la ubicación probable del incendio en un SIG.
- Sistemas automáticos con cámaras y teledetección fija: cámaras panorámicas o térmicas en puntos fijos generan azimuts automáticos hacia focos detectados; al combinarlos, se obtiene la posición por triangulación

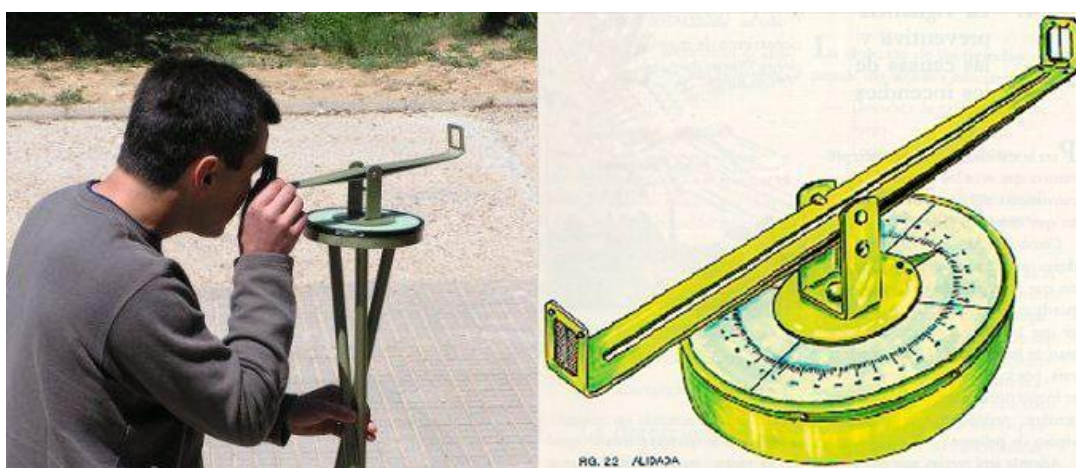


Figura 2. Determinación de un Angulo con alidada. Sanjuán Fernández, (2016).

Una alidada es una regla equipada con un sistema de mira, que puede girar alrededor del eje vertical u horizontal de un instrumento, que sirve para medir ángulos.

Caso de Estudio: Detección de incendios por triangulación

Desde la perspectiva forestal y ambiental, la triangulación para definir una localización es un procedimiento fundamental que ha sido utilizado históricamente para la detección y localización de incendios.

La triangulación clásica se basa en la determinación de la posición de un punto desconocido mediante la medición de ángulos desde dos o más puntos de coordenadas conocidas. Cuando

un observador detecta una columna de humo, mide el ángulo horizontal (azimut) desde el norte geográfico hacia el punto donde observa el humo. Si ambas torres miden el ángulo hacia el mismo foco de humo, podemos trazar dos líneas de dirección que, al intersectarse, determinan la ubicación aproximada del incendio.

Ahora bien, en términos prácticos forestales, la triangulación presenta ventajas y limitaciones que deben analizarse críticamente. Su precisión depende de varios factores: la exactitud en la medición angular, la calidad del instrumento, la distancia entre torres y la geometría del triángulo formado. Si las torres están muy próximas entre sí y el incendio está muy distante, el triángulo se vuelve “agudo”, aumentando el error posicional.

Desde el punto de vista técnico, una torre de vigilancia forestal es una estructura elevada estratégicamente ubicada para maximizar el campo visual sobre una masa boscosa. A mayor altura de la torre, mayor radio de visibilidad. En terreno plano, una torre de 30 metros puede tener un horizonte visual de aproximadamente 20 Km., si se instala sobre una colina, ese radio aumenta significativamente.

La torre de vigilancia actúa como sistema de alerta temprana que reduce drásticamente el tiempo de respuesta, variable crítica en el comportamiento del fuego.

En Teledetección, utilizamos modelos digitales de elevación (MDE) para realizar análisis de cuencas visuales (viewshed analysis) en sistemas SIG, determinando qué áreas quedan cubiertas y cuáles generan sombras topográficas.

Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es, probablemente, la capa de mayor importancia de cuantas podemos incorporar a cualquier análisis, ya que no solo su ámbito de utilidad es amplísimo, sino que, como veremos, el número de resultados que podemos obtener de su análisis es igualmente variado y abundante. Victor Olaya, (2020)

El control de incendios forestales mediante torres de vigilancia para detección temprana es una estrategia clásica pero que al día de hoy sigue plenamente vigente. Aunque hoy disponemos de sistemas satelitales avanzados, las torres de vigilancia siguen siendo críticas especialmente en regiones donde la nubosidad frecuente, la latencia en la descarga de datos o la resolución espacial satelital no permiten una respuesta inmediata. En términos de gestión ambiental, la clave no es solo detectar el incendio, sino hacerlo en su fase incipiente — cuando aún es un foco superficial— porque el comportamiento del fuego sigue una dinámica exponencial donde los primeros minutos determinan la magnitud final del evento.

Ahora bien, en la actualidad estas torres han evolucionado hacia sistemas automatizados con cámaras de rotación 360°, sensores térmicos e inteligencia artificial para reconocimiento de humo. Estos sistemas pueden detectar cambios espectrales en el visible e infrarrojo cercano.

Aquí se integra la teledetección terrestre con la satelital. Por ejemplo, sensores en órbita como Terra y Aqua portan el sensor MODIS, capaz de detectar anomalías térmicas activas, mientras que Sentinel-2 permite cartografía post-incendio con resolución de 10 m. Sin embargo, estos satélites tienen tiempos de revisita específicos (horas o días). Las torres ofrecen vigilancia continua en tiempo real, lo que las convierte en complemento ideal del monitoreo.

Otro aspecto relevante es la propagación del error. Un error angular de apenas 1° puede traducirse en decenas de metros de error si el incendio está a varios kilómetros de distancia.



.Figura 3. Torre de vigilancia para operador humano y torres de vigilancia automática.

Tomado de (Henrico VA, 2020), (El Destape, 2026), (Gobierno de la Provincia de Córdoba, 2026)

Tal como nos referimos anteriormente, tenemos que si las torres están muy alineadas respecto al incendio, la intersección será muy imprecisa. En cambio, cuando el incendio forma un ángulo amplio respecto a la base entre torres (idealmente cercano a 60° - 90°), la precisión aumenta. Este concepto es análogo al de “Dilution of Precision” en GPS.

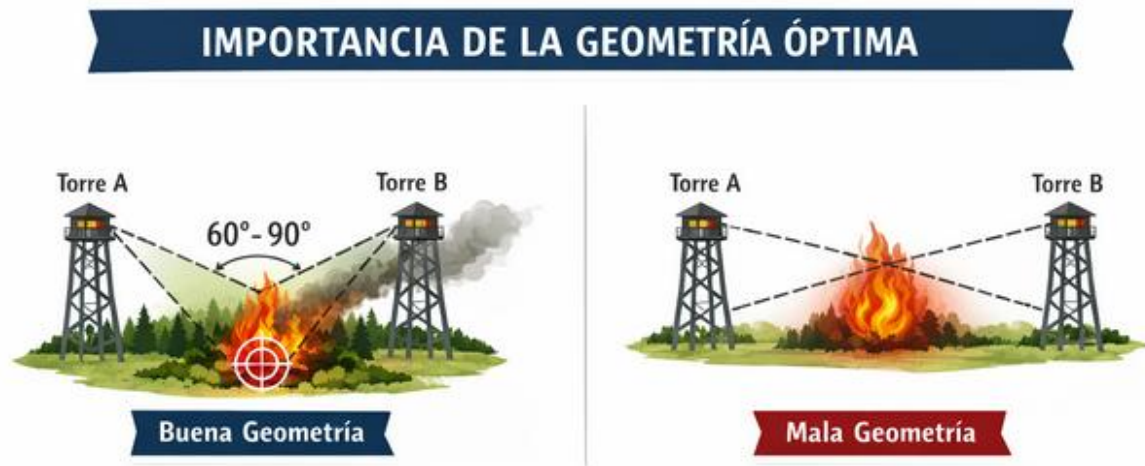


Figura 4. Error en la detección por triangulación. El error aumenta si las torres están alineadas con respecto al foco de incendio. Elaboración propia

Trilateración

La trilateración determina la posición midiendo distancias desde puntos conocidos en lugar de ángulos.

Antes de los GNSS, la triangulación y trilateración eran los procedimientos más económicos disponibles para establecer un control básico para proyectos de mapeo. Ghilani y Wolf (2012).

La trilateración, determina la posición midiendo distancias desde varios puntos de referencia conocidos. Cada distancia define una circunferencia (en dos dimensiones) o una esfera (en tres dimensiones) cuyo centro es el punto conocido. El punto buscado se encuentra donde se intersectan esas circunferencias o esferas. Matemáticamente, esto implica resolver un sistema de ecuaciones basado en distancias conocidos.

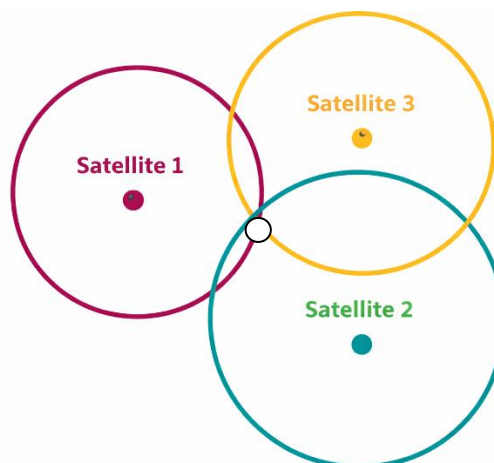


Figura 5. Trilateración sobre un plano (2D). Elaboración propia.

La trilateración es el principio geométrico fundamental sobre el cual operan todos los sistemas modernos de posicionamiento satelital.

En este método, el receptor calcula su posición midiendo el tiempo que tarda en llegar la señal desde varios satélites y transformando ese tiempo en distancias al tener en cuenta la velocidad de la luz.

La precisión de la trilateración depende principalmente de la exactitud en la medición de distancias y de la geometría espacial entre los puntos de referencia; configuraciones bien distribuidas producen resultados más confiables que configuraciones alineadas.

Características técnicas:

- Requiere mediciones de distancia precisas.
- Menos sensible a orientación instrumental.
- Es el método usado por GPS, Galileo, GLONASS y BeiDou.
- Permite automatización total (sin operador midiendo ángulos).

Un concepto crucial asociado a la trilateración es el DOP (Dilution of Precision), que describe cómo la geometría relativa de los satélites influye en la precisión de la solución. Si los satélites están agrupados en una misma región del cielo, la intersección de esferas es geoméricamente menos estable y el error aumenta. Si están distribuidos ampliamente, la solución es más robusta.

Caso de Estudio: Estación Total

La estación total constituye uno de los instrumentos más relevantes dentro del campo de la topografía moderna y del posicionamiento terrestre de alta precisión, representando una evolución tecnológica significativa respecto a los métodos clásicos de medición basados en instrumentos ópticos y procedimientos manuales. Su capacidad para integrar en un único dispositivo la medición de ángulos horizontales, ángulos verticales y distancias inclinadas, junto con sistemas electrónicos de procesamiento y almacenamiento de datos, la convierte en una herramienta fundamental para la obtención de información espacial tridimensional con altos niveles de exactitud. En el contexto actual, donde el análisis espacial adquiere un rol central en disciplinas como la agrimensura, la geodesia, la ingeniería y especialmente en las ciencias forestales y ecológicas, la estación total se posiciona como un instrumento clave para la generación de datos precisos en entornos complejos.

El principio de funcionamiento de la estación total se fundamenta en la aplicación de la trigonometría espacial, permitiendo determinar la posición de puntos en el espacio a partir de la medición de variables básicas como los ángulos y las distancias. El instrumento mide el ángulo horizontal, que define la orientación del punto respecto a una referencia, el ángulo vertical, que indica la inclinación en relación con el plano horizontal, y la distancia inclinada entre el equipo y el punto observado. A partir de estas mediciones, el sistema interno de la estación total calcula automáticamente las coordenadas tridimensionales del punto, ya sea en un sistema de referencia local o global, dependiendo de la configuración del levantamiento. Este proceso puede realizarse en tiempo real, lo que permite al operador verificar la calidad de los datos en campo y realizar ajustes inmediatos en caso de detectar inconsistencias. La precisión de estos cálculos depende tanto de la calidad del instrumento como de la correcta aplicación de los métodos de medición, lo que requiere un conocimiento técnico por parte del usuario.

Una estación total es un instrumento electrónico-óptico que combina un teodolito electrónico para la medición de ángulos horizontales y verticales, con un distanciómetro electrónico (EDM, Electronic Distance Measurement) en un solo cuerpo. Adicionalmente, integra un microprocesador capaz de calcular coordenadas tridimensionales, pendientes, desniveles y distancias reducidas a partir de las mediciones angulares y de distancia adquiridas de manera automática.

El distanciómetro electrónico, es uno de los componentes más críticos, ya que permite medir distancias mediante la emisión de ondas electromagnéticas que se reflejan en el objetivo y regresan al instrumento. Este sistema calcula la distancia en función del tiempo de tránsito de la señal, aplicando correcciones por condiciones atmosféricas para mejorar la exactitud de la medición. En muchos casos, se utilizan prismas reflectores para optimizar la señal, aunque los modelos más avanzados permiten realizar mediciones sin prisma, lo que resulta especialmente útil en ambientes forestales donde la colocación de reflectores puede ser dificultosa.



Figura 6. Estación Total Trimble C5. Tomado de RUNCO. (2026).

La precisión de la estación total es uno de sus atributos más destacados, permitiendo alcanzar errores mínimos en la medición de distancias y ángulos. Sin embargo, esta precisión puede verse afectada por diversas fuentes de error que deben ser cuidadosamente consideradas durante el levantamiento. Los errores naturales están asociados a las condiciones ambientales, como la temperatura, la presión atmosférica y la humedad, que influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas utilizadas en la medición de distancias. En ambientes forestales, estos factores pueden variar debido a la heterogeneidad del dosel. Por último, los errores operacionales dependen del manejo del equipo por parte del usuario, incluyendo aspectos como la nivelación, el centrado sobre el punto de estación y la correcta identificación del objetivo.

En términos metodológicos, la estación total permite aplicar diferentes técnicas de levantamiento que se adaptan a las características del terreno y a los objetivos del estudio. El método de radiación consiste en medir múltiples puntos desde una única estación, lo que resulta eficiente en áreas relativamente pequeñas y con buena visibilidad, siendo

ampliamente utilizado en inventarios forestales para la ubicación de árboles individuales y la generación de modelos de elevación digital (MED o DEM por sus siglas en inglés).

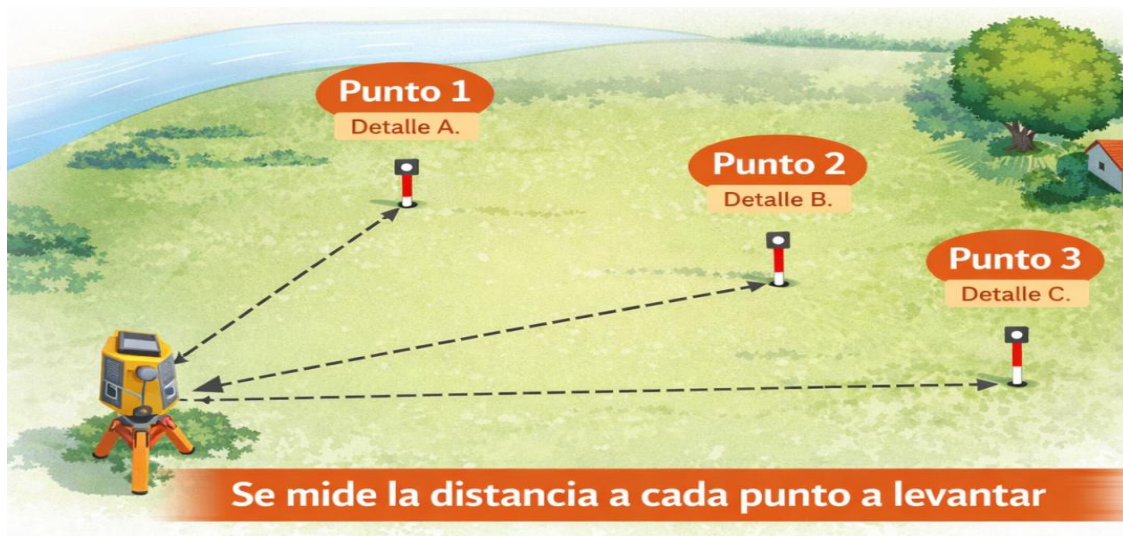


Figura 7. Medición con Estación Total de puntos por radiación. Elaboración propia.

La poligonación, por otro lado, implica el establecimiento de una serie de estaciones conectadas entre sí mediante mediciones de ángulos y distancias, permitiendo avanzar progresivamente en el terreno y cubrir áreas extensas con alta precisión. Este método es especialmente útil en bosques densos o terrenos accidentados, donde la visibilidad es limitada y es necesario establecer puntos intermedios para garantizar la continuidad del levantamiento.

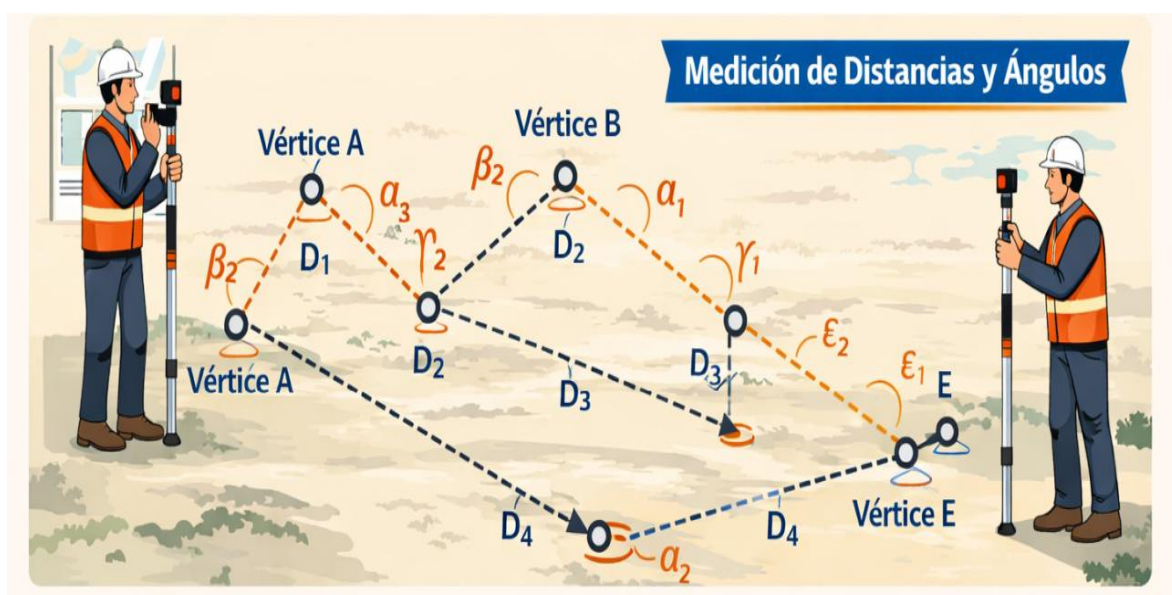


Figura 8. Medición con Estación Total de puntos por Poligonación. Elaboración propia.

Integración con los GNSS

La integración de la estación total con sistemas de referencia geodésicos constituye un aspecto fundamental para la georreferenciación de los datos y su posterior análisis en sistemas de información geográfica. En este sentido, la combinación con tecnologías GNSS permite establecer puntos de control con coordenadas conocidas en sistemas globales, los cuales sirven como base para el levantamiento con estación total.

La estación total puede trabajar en distintos sistemas de coordenadas según el propósito del relevamiento y los datos de apoyo disponibles:

- **Coordenadas arbitrarias:** se asigna un valor convencional al punto de estación (por ejemplo, E=1000.000, N=1000.000, Z=100.000) y una orientación inicial arbitraria. Útil cuando no se requiere georreferenciación absoluta, por ejemplo en levantamientos de parcelas experimentales de pequeña extensión.
- **Coordenadas planas (Gauss Krugger):** sistema proyectado ampliamente utilizado en cartografía forestal y ecológica. Permite integrar los datos con cartografía oficial, imágenes satelitales y plataformas SIG (QGIS, ArcGIS).
- **Coordenadas geodésicas (ϕ , λ , h):** latitud, longitud y altitud elipsoidal propias del sistema GPS/GNSS. Pueden ser transformadas a coordenadas proyectadas mediante dátum y proyección adecuados (en Argentina: POSGAR 07 – WGS84).

En el campo de la ecología, la estación total se emplea para la cartografía detallada de hábitats. En combinación con otras tecnologías, como el LiDAR o las imágenes satelitales, la estación total puede utilizarse para validar datos remotos y calibrar modelos espaciales, mejorando la precisión de los análisis y facilitando la integración de diferentes fuentes de información.

La aplicación de la estación total en entornos forestales y ecológicos presenta desafíos particulares que requieren una adaptación de las metodologías tradicionales de levantamiento.

En el interior del bosque, el haz del distanciómetro puede ser interceptado por ramas, hojas o troncos intermedios. Esto puede producir mediciones erróneas (lecturas de la obstrucción en lugar del objetivo). Es imprescindible asegurarse de que exista visibilidad directa entre el instrumento y el prisma antes de registrar la medición.

Es frecuente en el ámbito profesional la pregunta sobre cuándo utilizar una estación total y cuándo recurrir a un receptor GNSS. Lejos de ser tecnologías excluyentes, son herramientas

complementarias con ventajas diferenciales según las condiciones del terreno, la escala del trabajo y la precisión requerida.

Tabla 1. Comparación entre Estación Total y GNSS. Elaboración propia.

Criterio	Estación Total	GNSS
Principio de medición	Ángulos horizontales y verticales + distancias electrónicas (EDM). Requiere línea de visión directa.	Señales de satélites (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou). No requiere línea de visión al punto.
Sistema de referencia	Local o proyectado (coordenadas relativas al punto de estación).	Sistema global (WGS-84, ITRF) convertible a sistemas locales.
Precisión posicional	1–5 mm	5–30 mm RTK
	Alta precisión angular y lineal en distancias cortas-medias.	0.5–2 cm estático post-proceso
Precisión altimétrica	1–3 mm	~2× peor que planimetría. La componente vertical es la más débil del GNSS.
	Directa por ángulo vertical + trigonometría.	
Visibilidad requerida	Imprescindible	No requerida al punto
	Línea de visión entre instrumento y prisma/punto.	Necesita cielo despejado (ángulo $\geq 15^\circ$) para satélites.
Ambientes problemáticos	Zonas con obstáculos visuales (vegetación densa, tráfico).	Bajo follaje denso, cañones urbanos, túneles, interiores.
Condiciones climáticas	Calor y refracción afectan mediciones largas. Niebla limita el EDM.	Ionósfera y troposfera generan errores. La lluvia intensa puede degradar señal.
Personal requerido	Generalmente 2 personas (operador + portaprisma).	1 persona puede operar en modo RTK o cinemático.
Velocidad de trabajo	Más lenta en terrenos extensos; requiere estacionamientos múltiples.	Alta — miles de puntos por día en modo cinemático continuo.
Necesidad de puntos de control	Requiere bases conocidas para orientación y coordenadas absolutas.	RTK usa base GNSS o red CORS. Estático necesita al menos un punto de control.
Costo del equipo	USD 3 000 – 25 000 (según gama).	USD 5 000 – 60 000 (receptor RTK doble frecuencia + base).
Mantenimiento	Calibración periódica del colimador y EDM. Robusto en campo.	Firmware actualizable. Antena requiere cuidado especial.
Usos principales	Levantamientos catastrales urbanos, replanteo de obras, control de estructuras, minería subterránea.	Geodesia, catastro rural, control de redes, cartografía de grandes extensiones, navegación.
Integración con otros sistemas	Datos exportables a CAD/GIS. Algunos modelos incorporan escáner láser.	Salida directa en coordenadas geográficas/proyectadas. Integra con SIG, drones y vehículos autónomos.

En la práctica del trabajo forestal y ecológico, la estrategia más eficiente combina ambas tecnologías: el GPS de precisión (RTK o post-proceso) establece los puntos de control

primarios con coordenadas geográficas, y la estación total desarrolla el trabajo de detalle interno con alta precisión relativa. Esta combinación maximiza la productividad del equipo de campo y garantiza tanto la georreferenciación absoluta como la precisión relativa interna necesaria para los análisis espaciales.

Las estaciones totales modernas almacenan los datos directamente en memoria interna o en tarjetas SD, en formatos propietarios o estándar (CSV, XML, RAW, DXF). La transferencia al computador se realiza mediante cable USB, Bluetooth o Wi-Fi según el modelo. Los fabricantes más importantes, Leica, Trimble, Topcon, Sokkia y Nikon, proveen software específico de transferencia y procesamiento.

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS GNSS



Figura 9. Países Con Sistemas de Navegación por Satélite. Elaboración propia.

En el mundo en el que habitamos, la necesidad de conocer nuestra ubicación y navegar con precisión se ha vuelto esencial. Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) han revolucionado la forma en que nos desplazamos, cartografiamos y comprendemos nuestro entorno geoespacial. Desde el primer Sistema de Posicionamiento Global (GPS) hasta las constelaciones de satélites posteriores como GLONASS, Galileo y BeiDou, los GNSS han transformado nuestra vida diaria.

Esta Serie didáctica, nos sumergirá en el universo de los sistemas GNSS. Exploraremos sus fundamentos, cómo funcionan, sus aplicaciones en diversas industrias y cómo han transformado nuestra relación con la información geoespacial, descubriremos cómo han redefinido la navegación, la cartografía, la agricultura de precisión y muchos otros campos, proporcionando una precisión y confiabilidad sin precedentes.

Comenzaremos adentrándonos en los conceptos básicos. Conoceremos las diferentes constelaciones de satélites, y exploraremos cómo cada uno de ellos contribuye a brindar una cobertura global y una precisión mejorada.

Una vez que hayamos establecido los fundamentos, nos sumergiremos en las diversas aplicaciones de los GNSS.

Además, exploraremos cómo se integran con otras tecnologías complementarias, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Veremos cómo esta integración potencia la precisión y confiabilidad de los datos geoespaciales.

Incluiremos ejemplos y estudios de casos que ilustran cómo se han implementado con éxito en proyectos.

Definición y conceptos básicos de los GNSS

Llamamos Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) al conjunto de sistemas que, mediante una constelación de satélites artificiales, obtienen rangos de señales que permiten proveer posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea en tierra, mar o aire, ya que permiten obtener las coordenadas geográficas y altitud del punto a observar. Vilchez Benigno y Seco Granados, (2019).

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite han revolucionado la forma en que nos desplazamos, navegamos y percibimos el tiempo en todo el mundo. Estos sistemas se han convertido en una parte integral de nuestra vida cotidiana, proporcionando una precisión y una disponibilidad sin precedentes en la determinación de la posición geográfica. En este capítulo, exploraremos los fundamentos, incluyendo su definición, los principios de funcionamiento y los conceptos básicos involucrados.

Los Sistemas Globales de Navegación utilizan una red de satélites en órbita alrededor de la Tierra para proporcionar información precisa de posición, navegación y tiempo en cualquier lugar del planeta. Estos sistemas permiten a los receptores GNSS determinar su ubicación geográfica con gran precisión mediante la recepción y el procesamiento de señales emitidas por los satélites.

Los GNSS se basan en el principio de trilateración, que implica medir la distancia entre un receptor y varios satélites mediante la medición del tiempo que tarda una señal de radio en viajar desde el satélite hasta el receptor. Al combinar las mediciones de múltiples satélites, el receptor puede calcular su posición tridimensional con una precisión de varios metros a centímetros, dependiendo de la calidad del receptor y las condiciones ambientales.

El sistema GNSS más conocido y utilizado es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), desarrollado y mantenido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Además del GPS, existen otros sistemas GNSS operativos o en desarrollo. Estos incluyen el sistema ruso GLONASS, el sistema europeo Galileo y el sistema chino BeiDou. Cada sistema tiene su propia constelación de satélites y frecuencias de señal, pero todos funcionan utilizando principios similares de trilateración y medición del tiempo de la señal.

Para comprender mejor los GNSS, es importante familiarizarse con algunos conceptos básicos asociados:

1. **Satélites:** Los satélites GNSS son vehículos espaciales en órbita alrededor de la Tierra que transmiten señales de radio utilizadas por los receptores GNSS para determinar la posición y el tiempo. Estos satélites están equipados con relojes atómicos altamente precisos para garantizar mediciones de tiempo precisas.
2. **Receptores GNSS:** Los receptores son dispositivos electrónicos que capturan y procesan las señales emitidas por los satélites. Estos receptores determinan la posición, la velocidad y el tiempo mediante la medición del tiempo de viaje de la señal desde los satélites hasta el receptor.
3. **Constelación:** La constelación de satélites se refiere al conjunto de satélites GNSS en órbita alrededor de la Tierra. Cada sistema tiene su propia constelación de satélites, que está diseñada para proporcionar una cobertura global o regional.
4. **Cobertura:** La cobertura se refiere a la disponibilidad de señales GNSS en diferentes áreas geográficas. Los sistemas se han diseñado para proporcionar cobertura global, lo que significa que los receptores pueden recibir señales en cualquier parte del mundo. Sin embargo, la disponibilidad de señales puede verse afectada por obstrucciones, como edificios altos o terreno montañoso.
5. **Tiempo GNSS:** Además de proporcionar información de posición, también ofrecen información precisa de tiempo. Los relojes atómicos a bordo de los satélites permiten la sincronización precisa de dispositivos y sistemas en todo el mundo.

Evolución histórica de los sistemas de navegación por satélite

La evolución de los sistemas de navegación por satélite ha sido un hito importante en la historia de la tecnología. Desde los primeros intentos de navegación basados en señales de radio hasta los modernos sistemas globales de navegación por satélite, esta evolución ha revolucionado la forma en que nos desplazamos y navegamos en todo el mundo.

La idea de utilizar satélites en órbita alrededor de la Tierra para la navegación no es nueva. A mediados del siglo XX, durante la Guerra Fría, tanto Estados Unidos como la Unión Soviética llevaron a cabo investigaciones para desarrollar sistemas de navegación basados en satélites. Estos primeros sistemas se basaban en la idea de transmitir señales de radio desde el espacio que pudieran ser captadas por receptores en la Tierra.

Uno de los primeros sistemas de navegación por satélite en ser desarrollado fue el sistema TRANSIT de Estados Unidos. TRANSIT fue desarrollado por la Armada de los Estados Unidos en la década de 1950 y se convirtió en operativo en la década de 1960. Utilizaba una constelación de satélites en órbita polar y permitía a los submarinos nucleares balísticos calcular su posición con una precisión aceptable.

El sistema Transit utilizaba señales de radio de baja frecuencia y requería receptores voluminosos y pesados. Aunque fue un avance significativo en la navegación por satélite, el sistema Transit tenía limitaciones en términos de precisión y disponibilidad de señales. Sin embargo, sentó las bases para el desarrollo posterior de los sistemas de navegación por satélite.

El hito más importante en la evolución de los sistemas de navegación por satélite fue el desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) por parte del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, al desarrollar un sistema de navegación global para uso militar basado en satélites.

El GPS se diseñó para proporcionar posicionamiento y navegación precisa en cualquier lugar del mundo. La constelación de satélites GPS consiste en al menos 24 satélites en órbita, distribuidos en seis planos orbitales. Estos satélites transmiten señales en diferentes frecuencias, que son captadas y procesadas por receptores GPS para determinar la posición, la velocidad y el tiempo.

El GPS se convirtió en operativo en la década de 1990 y tuvo un impacto revolucionario en la navegación y en numerosos sectores, tanto civiles como militares. La precisión del GPS mejoró significativamente a lo largo de los años, y actualmente los receptores GPS comerciales pueden proporcionar mediciones de posición con una precisión de unos pocos metros o incluso centímetros en condiciones favorables.

A medida que el GPS se estableció como un sistema de navegación global, otros países también comenzaron a desarrollar sus propios sistemas de navegación por satélite. El sistema ruso GLONASS fue el primero en competir con el GPS y se convirtió en operativo en la década de 1990. Utiliza una constelación de satélites en órbita terrestre media.

En Europa, se desarrolló el sistema Galileo como una alternativa independiente al GPS. Galileo es un sistema civil y proporciona cobertura global con una constelación de satélites en órbita media y alta. Galileo se convirtió en operativo en 2016 y ha mejorado la disponibilidad y la precisión de las mediciones de posición en Europa.

China también ha desarrollado su propio sistema GNSS llamado BeiDou, comenzó como un sistema de navegación regional en la década de 2000 y se ha expandido para proporcionar cobertura global con una constelación de satélites en órbita media y geosíncrona. BeiDou se ha utilizado en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo navegación vehicular, aviación y agricultura de precisión.

A medida que los sistemas continúan evolucionando, se espera que se mejore aún más la precisión y la disponibilidad de las mediciones de posicionamiento. Se están desarrollando nuevas tecnologías y algoritmos para mitigar los errores y las interferencias, y se están explorando enfoques innovadores para mejorar la eficiencia y la precisión de los sistemas GNSS.

Principios de funcionamiento de los GNSS

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite se basan en una compleja red de satélites en órbita alrededor de la Tierra para proporcionar información precisa de posición, navegación y tiempo. Estos sistemas utilizan principios fundamentales de física y matemáticas para calcular la posición tridimensional de un receptor en cualquier parte del mundo.

El principio básico en el que se basan los GNSS es la trilateración. La trilateración tal cual fue ya expuesta, es un método utilizado para determinar la posición de un objeto en el espacio mediante la medición de las distancias a varios puntos de referencia conocidos. En el caso de los GNSS, los puntos de referencia son los satélites en órbita alrededor de la Tierra.

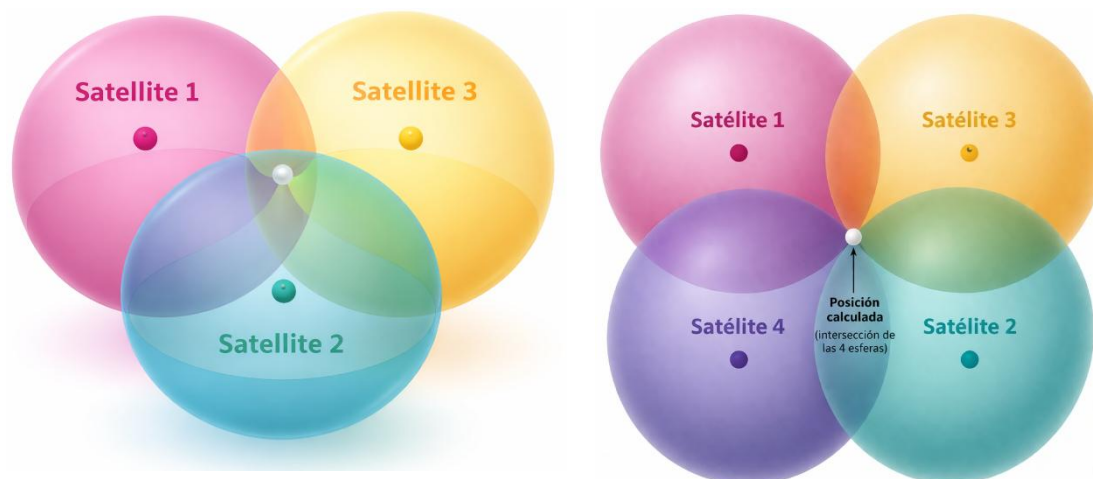


Figura 10. Trilateración espacial 3D. Elaboración propia.

La trilateración se basa en las distancias calculadas por la diferencia de tiempo que tarda una señal de radio emitida por un satélite en llegar al receptor. Al medir el tiempo de viaje de la señal desde varios satélites, el receptor puede determinar la distancia entre el receptor y cada uno de los satélites. Al combinar estas mediciones de distancia, el receptor puede calcular su posición tridimensional utilizando principios geométricos.

Medición del tiempo: la clave para la precisión

La medición precisa del tiempo es fundamental en los GNSS. Para que la trilateración funcione correctamente, se necesita una sincronización precisa entre los relojes de los satélites y el receptor. Los satélites están equipados con relojes atómicos altamente precisos, que son capaces de mantener la hora con una precisión extraordinaria.

Cuando un satélite transmite una señal, incluye información sobre el tiempo exacto en que se emitió. El receptor captura estas señales y compara el tiempo de recepción con el tiempo de transmisión para determinar la diferencia de tiempo de viaje de la señal. Al conocer la velocidad de propagación de la señal de radio, que es aproximadamente la velocidad de la luz, el receptor puede convertir la diferencia de tiempo en una distancia.

El receptor también tiene su propio reloj interno, pero es menos preciso que los relojes atómicos de los satélites. Por lo tanto, el receptor necesita corregir cualquier error en la sincronización del tiempo para obtener mediciones precisas de distancia. Esto se logra comparando el tiempo del receptor con el tiempo transmitido por los satélites y aplicando correcciones para compensar cualquier diferencia.

TIPOS DE SEÑALES GNSS

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite utilizan una variedad de señales transmitidas por satélites en órbita para proporcionar información precisa de posición, navegación y tiempo. Estas señales son captadas y procesadas por receptores para determinar la ubicación y otros datos relevantes, exploraremos a continuación los diferentes tipos de señales utilizadas.

Los GNSS utilizan diferentes frecuencias de señal para transmitir datos desde los satélites a los receptores. Los diferentes sistemas GNSS tienen sus propias especificaciones de frecuencia y características de señal. Algunos de los tipos de señales más comunes son:

1. Señales L1: Estas son las señales fundamentales en los sistemas GNSS y se utilizan para la navegación y la determinación de la posición. La frecuencia de la señal L1 es de alrededor de 1575.42 MHz. Esta señal es transmitida por los sistemas GNSS principales, como el GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou.
2. Señales L2: Las señales L2 son frecuencias adicionales utilizadas por los sistemas GNSS para mejorar la precisión y la disponibilidad de las mediciones. La frecuencia de la señal L2 es de alrededor de 1227.60 MHz. Algunos sistemas GNSS, como el GPS y Galileo, utilizan señales L2C para la navegación civil.
3. Señales L5: Estas señales son utilizadas principalmente por el sistema GPS y tienen una frecuencia de alrededor de 1176.45 MHz. Las señales L5 están destinadas a mejorar la precisión y la integridad de las mediciones de posicionamiento, especialmente en aplicaciones de seguridad crítica.
4. Señales E1 y E5a: Estas señales son utilizadas por el sistema Galileo. La señal E1 tiene una frecuencia de alrededor de 1575.42 MHz. y se utiliza para la navegación y la determinación de la posición. La señal E5a tiene una frecuencia de alrededor de 1176.45 MHz. y se utiliza para aplicaciones de alta precisión.
5. Señales B1 y B2: Estas señales son utilizadas por el sistema BeiDou. La señal B1 tiene una frecuencia similar a la señal L1 (alrededor de 1575.42 MHz.) y se utiliza para la navegación y la determinación de la posición. La señal B2 tiene una frecuencia similar a la señal L2 (alrededor de 1227.60 MHz.) y se utiliza para aplicaciones de alta precisión.
6. Señales G1 y G2: Estas señales son utilizadas por el sistema GLONASS. La señal G1 tiene una frecuencia de alrededor de 1602 MHz. y se utiliza para la navegación y la determinación de la posición. La señal G2 tiene una frecuencia de alrededor de 1246 MHz. y se utiliza para aplicaciones de alta precisión.

Recepción y procesamiento de señales GNSS

La recepción y el procesamiento de las señales de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite son aspectos fundamentales para determinar la posición, la navegación y el tiempo con precisión. Los receptores captan las señales transmitidas por los satélites y las procesan para obtener información de posición en tiempo real.

Un receptor consta de varios componentes esenciales que trabajan en conjunto para recibir y procesar las señales de los satélites. Los componentes principales de un receptor son:

1. Antena: La antena es responsable de recibir las señales emitidas por los satélites. Está diseñada para captar las señales de manera óptima y minimizar las interferencias.
2. Procesador de señal: El procesador de señal lleva a cabo el procesamiento digital de las señales recibidas y realiza operaciones como el filtrado, la demodulación y la decodificación. También se encarga de la adquisición y el seguimiento de las señales de los satélites.
3. Unidad de procesamiento central (CPU): La CPU es el cerebro del receptor. Se encarga de coordinar todas las operaciones del receptor, desde el procesamiento de señales hasta el cálculo de la posición. También se comunica con otros dispositivos o sistemas externos, si es necesario.
4. Memoria y almacenamiento: El receptor cuenta con memoria y almacenamiento para guardar datos como efemérides (información sobre la posición y la órbita de los satélites), almanaques (información sobre la disponibilidad de los satélites) y registros de mediciones.

Cálculo de posición y tiempo

El cálculo de posición y tiempo utilizando los Sistemas Globales de Navegación por Satélite es un proceso esencial para determinar la ubicación y el tiempo con gran precisión.

Para calcular la posición, el receptor debe recibir señales de al menos cuatro satélites, el proceso de cálculo de posición implica varios pasos clave, que se describen a continuación:

1. Adquisición: Durante la etapa de adquisición, el receptor busca activamente las señales de los satélites. El receptor debe adquirir y rastrear al menos cuatro satélites para determinar la posición tridimensional. Durante la adquisición, el receptor realiza una búsqueda de frecuencias para identificar las señales de los satélites.

2. Seguimiento: Una vez que el receptor ha adquirido las señales de los satélites, comienza la etapa de seguimiento. Durante esta etapa, el receptor mantiene el rastreo continuo de las señales de los satélites y realiza una serie de operaciones para medir la diferencia de tiempo de llegada de las señales.
3. Medición de la diferencia de tiempo de llegada: El receptor mide la diferencia de tiempo entre el momento en que un satélite emite una señal y el momento en que el receptor la recibe. Esta medición se realiza utilizando una señal de tiempo altamente precisa en el receptor y las señales de sincronización transmitidas por los satélites. (Códigos)
4. Cálculo de la distancia: Una vez que se mide la diferencia de tiempo, se utiliza la velocidad de la luz como constante para convertir esta diferencia de tiempo en una distancia. Cada satélite proporciona una esfera de posibles ubicaciones, y la intersección de al menos tres esferas permite determinar la ubicación tridimensional del receptor.
5. Corrección de errores: Durante el proceso de cálculo de posición, es necesario tener en cuenta varios factores que pueden introducir errores en las mediciones. Algunos de los errores comunes son los errores atmosféricos, los errores del reloj del receptor, los efectos de reflexión de señales (multipath) y los errores debidos a la geometría de los satélites.
6. Mejora de la precisión: Para obtener una posición más precisa, se utilizan técnicas adicionales como la combinación de mediciones en diferentes frecuencias, el uso de señales de portadoras. Estas técnicas ayudan a reducir los errores y mejorar la precisión de las mediciones de posición.
7. Actualización continua: El receptor actualiza continuamente la posición en tiempo real a medida que se reciben nuevas mediciones de los satélites. Esto permite un seguimiento en tiempo real de la posición y hace factible la navegación.

Error en las mediciones

Existen varios factores que pueden introducir errores en las mediciones. Estos errores se dividen en dos categorías principales: errores sistemáticos y errores aleatorios.

Errores sistemáticos

Los errores sistemáticos son errores consistentes y predecibles que afectan a todas las mediciones en una situación dada. Algunos de los errores sistemáticos más comunes son:

- Errores orbitales: Los errores en la determinación de la órbita de los satélites pueden afectar la precisión de las mediciones. Estos errores pueden ser causados por inexactitudes en los modelos utilizados para calcular las órbitas de los satélites.
- Errores de reloj: Los relojes atómicos utilizados por los satélites y los receptores no son perfectos y pueden tener errores en su medición del tiempo. Estos errores de reloj pueden afectar la precisión de las mediciones de tiempo y, por lo tanto, la precisión del cálculo de posición.
- Errores ionosféricos: La capa ionosférica de la atmósfera terrestre puede afectar las señales a medida que se propagan desde los satélites hasta los receptores. El contenido de electrones en la ionosfera varía con el tiempo y la ubicación, lo que puede introducir errores en las mediciones.
- Errores troposféricos: La troposfera terrestre también puede afectar las señales debido a la refracción atmosférica. Los cambios en la temperatura, la humedad y la presión atmosférica pueden causar retrasos en las señales GNSS, lo que resulta en errores en las mediciones.

Los errores troposféricos e ionosféricos se relacionan con el concepto de dispersión, es decir la redirección de la energía electromagnética por partículas suspendidas en la atmósfera o por moléculas grandes de los gases atmosféricos. La cantidad de dispersión que ocurre depende del tamaño de estas partículas, su abundancia, la longitud de onda de la radiación y el espesor de la atmósfera a través de la cual se desplaza la energía. Campbell, J., & Wynne, R. (2014).

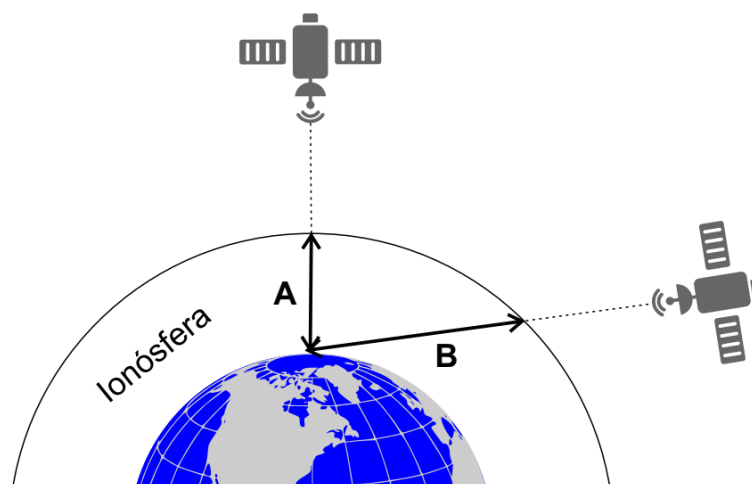


Figura 11. Influencia del espesor de la atmósfera en dispersión de señales. Elaboración Propia.

En el contexto del posicionamiento satelital, es práctica estándar excluir del procesamiento aquellas señales provenientes de satélites cuya elevación angular respecto al horizonte del

receptor sea inferior a aproximadamente 10 grados. Esta decisión no es arbitraria, sino que responde a múltiples factores físicos, geométricos que afectan directamente la calidad de las observaciones y, por ende, la precisión de las coordenadas obtenidas, esto es así pues cuando un satélite se encuentra a baja elevación, la señal que transmite debe atravesar una porción mucho mayor de atmósfera en comparación con un satélite ubicado cerca del cenit. Esto implica que tanto la troposfera como la ionosfera introducen retardos significativos en la señal. Estos retardos no solo son mayores en magnitud, sino también más difíciles de modelar con precisión. A bajos ángulos de elevación, estos modelos pierden efectividad, lo que incrementa el error residual en las observaciones.

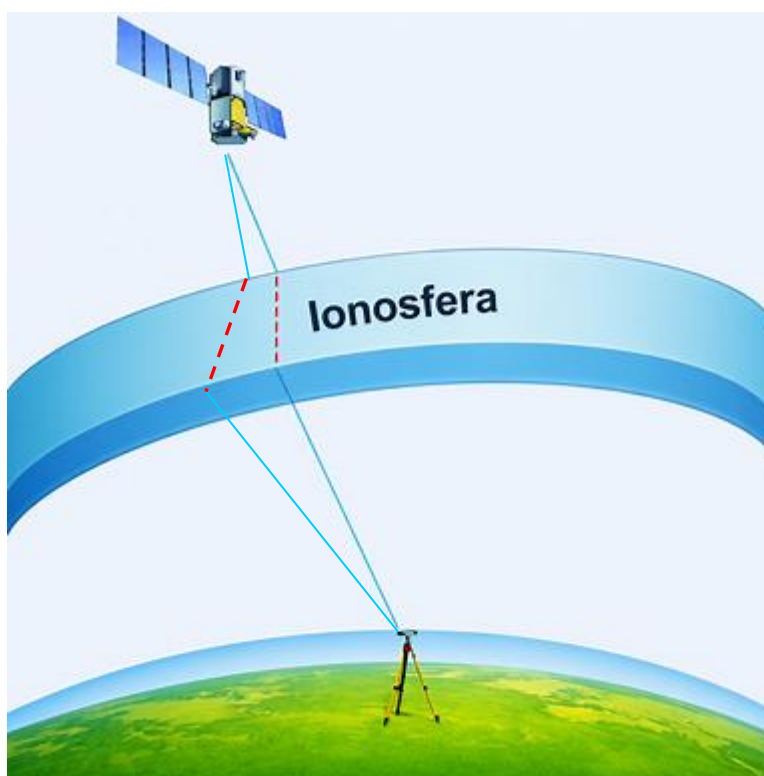


Figura 12. Retraso ionosférico diferencial según distintas longitudes de onda. Elaboración Propia.

Errores aleatorios

Los errores aleatorios son errores impredecibles y no sistemáticos que afectan las mediciones. Estos errores se deben a factores variables e incontrolables, como el ruido en las señales, las interferencias electromagnéticas y las limitaciones técnicas de los receptores. Los errores aleatorios pueden ser difíciles de eliminar por completo, pero se pueden reducir utilizando técnicas de procesamiento de señales y promediando múltiples mediciones.

Precisión en las mediciones

Aunque los GNSS ofrecen una precisión impresionante, existen diversas fuentes de error que pueden afectar las mediciones de posición. Estos errores pueden provenir de factores como el reloj del receptor, las condiciones atmosféricas, el efecto multipath (reflexiones de la señal en objetos cercanos) y las interferencias de radiofrecuencia.

La precisión en las mediciones se refiere a la capacidad de obtener resultados consistentes y cercanos al valor verdadero. La precisión se expresa generalmente en términos de error estándar, que indica la variabilidad de las mediciones respecto al valor verdadero.

La precisión en las mediciones puede verse afectada por varios factores, como la geometría de los satélites (DOP = dilución de precisión), la calidad del receptor, la duración de la observación y la presencia de obstáculos que bloquean las señales (multipath).

La dilución de precisión (DOP) es un parámetro que indica cómo la geometría de los satélites afecta la precisión de las mediciones. Los valores de DOP más bajos indican una mejor geometría, lo que resulta en una mayor precisión en las mediciones. Los valores de DOP más altos, por otro lado, indican una geometría pobre y pueden resultar en mediciones menos precisas.

La calidad del receptor también juega un papel importante en la precisión de las mediciones. Los receptores de alta calidad están diseñados para minimizar los errores internos y proporcionar mediciones más precisas.

La duración de la observación es otro factor a considerar. Cuanto más tiempo se observe una señal, más precisas serán las mediciones. Esto se debe a que un mayor tiempo de observación permite promediar errores aleatorios y mejorar la precisión general.

Por último, los obstáculos que bloquean las señales, como edificios altos o vegetación densa, pueden provocar errores de multipath. El multipath ocurre cuando las señales se reflejan en superficies y llegan al receptor por múltiples rutas. Estas señales reflejadas pueden interferir con las señales directas y causar errores en las mediciones.

Para mejorar la precisión de las mediciones, se han desarrollado técnicas y algoritmos para corregir estos errores. Uno de los métodos más utilizados es la utilización de estaciones de monitoreo ubicadas en puntos conocidos y equipadas con receptores de alta precisión. Estas estaciones registran mediciones precisas de posición y tiempo y las comparan con las mediciones del receptor (posicionamiento diferencial). Con base en estas comparaciones, se pueden calcular correcciones diferenciales para compensar los errores del receptor.

Además de estas correcciones, también se utilizan modelos atmosféricos para corregir los efectos de la propagación de la señal a través de la atmósfera. La atmósfera terrestre afecta la velocidad de propagación de la señal de radio, lo que puede introducir errores en las mediciones de distancia. Los modelos atmosféricos utilizan información sobre las condiciones atmosféricas, como la presión, la temperatura y la humedad, para calcular correcciones y mejorar la precisión de las mediciones.

Otro método utilizado para corregir errores es la utilización de señales adicionales transmitidas por los satélites. Por ejemplo, el GPS utiliza señales en frecuencias L1 y L2 para modelar la atmósfera porque la ionosfera es un medio dispersivo, lo que significa que ralentiza las señales de radio de forma diferente según su frecuencia. Al comparar el retraso entre ambas señales, los receptores pueden cuantificar y corregir casi todo el error inducido por la atmósfera, mejorando significativamente la precisión de la posición.

Mitigación de errores

Para mejorar la precisión y reducir los errores en las mediciones, se utilizan varias técnicas y métodos de mitigación de errores. Algunas de estas técnicas incluyen:

- **Mediciones diferenciales:** La técnica de observación diferencial implica comparar las mediciones de un receptor GNSS con las de una estación de referencia conocida con coordenadas precisas. Al restar las mediciones de la estación de referencia de las mediciones del receptor, se pueden eliminar los errores comunes, como los errores atmosféricos y los errores de reloj del receptor.
- **Filtrado y suavizado:** Las técnicas de filtrado y suavizado se utilizan para reducir los errores aleatorios en las mediciones. Estas técnicas implican promediar múltiples mediciones y eliminar las fluctuaciones no deseadas en los datos.
- **Uso de sistemas GNSS combinados:** La combinación de datos de múltiples sistemas GNSS, como GPS y GLONASS, puede mejorar la precisión y la disponibilidad de las mediciones. Al utilizar múltiples constelaciones de satélites, se aumenta el número de señales disponibles y se reduce la susceptibilidad a errores y obstrucciones.

El análisis de la precisión y el error en las mediciones es fundamental para comprender la confiabilidad de los resultados obtenidos y su aplicabilidad en diferentes contextos. A continuación, profundizaremos en algunos aspectos adicionales relacionados con este tema. En primer lugar, es importante tener en cuenta que la precisión y el error en las mediciones pueden variar según la ubicación geográfica y las condiciones ambientales. Por ejemplo, en

áreas urbanas densamente pobladas o en regiones montañosas, la presencia de edificios altos o relieve accidentado puede afectar la calidad de las señales y aumentar los errores. En contraste, en áreas abiertas y despejadas, la precisión tiende a ser mayor.

Además de la precisión, es importante considerar el concepto de exactitud en las mediciones. La exactitud se refiere a la proximidad de los resultados medidos al valor verdadero o aceptado como estándar. La exactitud puede verse afectada tanto por errores sistemáticos como por errores aleatorios. Los errores sistemáticos, como los errores de calibración del receptor, pueden introducir un sesgo en las mediciones, lo que afecta la exactitud. Por otro lado, los errores aleatorios están asociados con la variabilidad y la imprevisibilidad de las mediciones, lo que también puede afectar la exactitud.

Para evaluar la precisión y la exactitud en las mediciones, se utilizan técnicas de validación y comparación con puntos de control conocidos. Esto implica comparar las mediciones con puntos de referencia cuyas coordenadas se conocen con precisión. Al comparar las coordenadas obtenidas con las coordenadas de referencia, se pueden calcular las desviaciones y los errores, lo que proporciona una evaluación objetiva de la calidad de las mediciones.

Es importante tener en cuenta que la precisión y el error en las mediciones pueden ser diferentes para diferentes aplicaciones y usos específicos. En aplicaciones que requieren una alta precisión, como la topografía de alta precisión se requieren técnicas y equipos más avanzados para lograr los niveles de precisión deseados. Por otro lado, en aplicaciones más generales, como la navegación vehicular o el seguimiento de flotas, la precisión requerida puede ser menor y se pueden utilizar equipos más asequibles.

El error es la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero. Brinker, R. C., & Wolf, P. R. (2007).

$$\text{Error} = \text{Valor observado} - \text{Valor verdadero}$$

La **precisión** se refiere al grado de concordancia entre mediciones repetidas bajo las mismas condiciones. Indica qué tan consistentes son los resultados entre sí.

La precisión está asociada a la dispersión de los datos, no a su cercanía al valor verdadero.

La **exactitud** expresa qué tan cerca está una medición del valor verdadero.

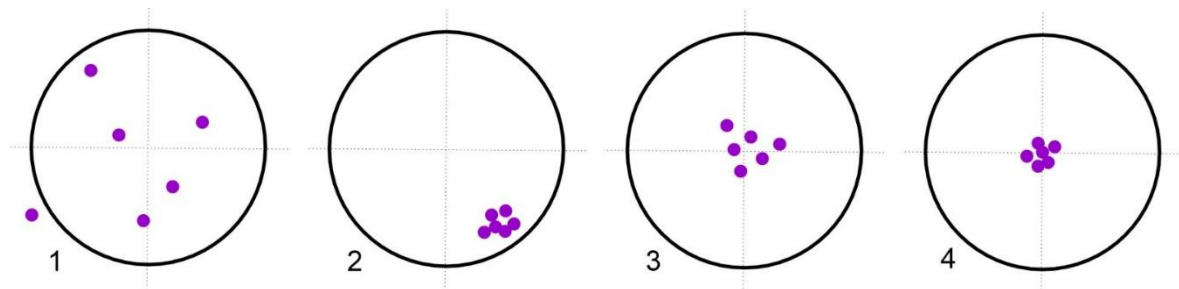


Figura 13. Distribución espacial de errores en posicionamiento GNSS. Elaboración propia.

Una medición GNSS puede ser:

1. Imprecisa e inexacta (A).
2. Precisa pero no exacta (B - resultados agrupados pero desplazados).
3. Exacta en promedio pero poco precisa (C- resultados dispersos alrededor del valor real).
4. Precisa y exacta (D- resultados agrupados y cercanos al valor verdadero).

La exactitud se evalúa comparando las coordenadas obtenidas con valores conocidos de una estación de referencia o punto de control.

En el posicionamiento, la meta es minimizar el error, aumentar la precisión (reducir la dispersión) y lograr la mayor exactitud posible.

Comprender estas diferencias permite interpretar correctamente los resultados y seleccionar la metodología adecuada según los requerimientos de cada aplicación.

Geodesia y referencia espacial

La geodesia es la ciencia que estudia la forma, dimensiones, orientación en el espacio y campo de gravedad de la Tierra, así como su variación en el tiempo. Su objetivo principal es determinar con la mayor precisión posible la posición de puntos sobre la superficie terrestre y establecer sistemas de referencia.

La geodesia desempeña un papel fundamental en los sistemas de navegación por satélite, ya que se ocupa de la determinación precisa de las coordenadas y altitudes de puntos en la superficie terrestre. En el contexto de los sistemas GNSS, la geodesia se utiliza para establecer una referencia espacial precisa y un sistema de coordenadas para el posicionamiento y la navegación.

En los sistemas GNSS, se utiliza un modelo de la forma de la Tierra y un sistema de coordenadas geodésicas para establecer la referencia espacial. Uno de los modelos más utilizados es el WGS 84,

El WGS84 es un modelo matemático completo de la Tierra que permite expresar la posición de cualquier punto del planeta mediante coordenadas.

El elipsoide de referencia utilizado es el elipsoide de WGS 84, una vez establecido el elipsoide de referencia, se utiliza un sistema de coordenadas geodésicas (Angulares), para representar la ubicación de los puntos en la superficie terrestre. El sistema de coordenadas geodésicas más utilizado es el sistema de coordenadas geográficas, que se basa en la latitud, la longitud y la altitud. La latitud representa la posición norte-sur de un punto, la longitud representa la posición este-oeste, y la altitud indica la distancia vertical desde el elipsoide de referencia. (Altura Elipsoidal).

La referencia espacial y el sistema de coordenadas establecidos mediante la geodesia son fundamentales para el posicionamiento y la navegación utilizando sistemas GNSS.

En topografía e ingeniería, cuando se habla de “cota” o “elevación”, normalmente se hace referencia a la altura ortométrica, que es diferente a la altura elipsoidal. Por ello, en aplicaciones GNSS es indispensable contar con un modelo geoidal adecuado para transformar correctamente las alturas elipsoidales en alturas ortométricas.

La altura ortométrica se define como la distancia medida a lo largo de la línea de gravedad desde el geoide hasta el punto considerado.

La mayoría de los receptores no entregan directamente la altura ortométrica, sino la altura elipsoidal (h).

PRINCIPALES SISTEMAS GNSS

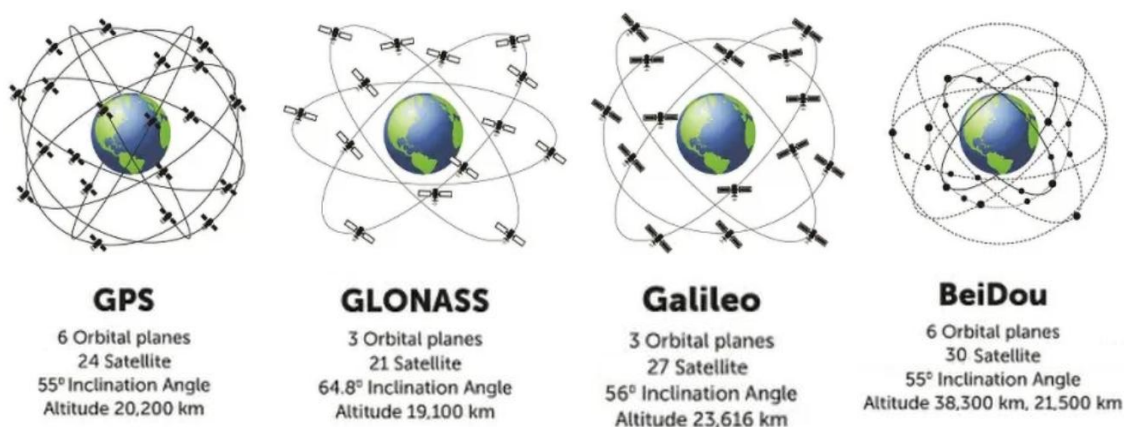


Figura 14. Principales sistemas GNSS. Tomado de Mettatec, (2023)

GPS

El primer Sistema de Navegación por satélite operativo fue el GPS, por sus siglas en inglés Global Positioning System en español: Sistema de Posicionamiento Global.

Es el sistema GNSS más conocido y utilizado en todo el mundo. Desarrollado y mantenido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, el GPS permite determinar la posición, velocidad y tiempo precisos en cualquier lugar del planeta.

El GPS se basa en una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra. Normalmente hay más de 30 satélites GPS operativos que transmiten señales de navegación hacia la Tierra. Estos satélites están distribuidos en seis planos orbitales diferentes y se encuentran en órbitas aproximadamente circulares a una altitud de aproximadamente 20,000 kilómetros.

Los satélites actúan como los puntos de referencia y las señales que transmiten proporcionan la información necesaria para calcular las distancias.

Los receptores GPS en la Tierra reciben estas señales y utilizan el tiempo de llegada de las señales para determinar la distancia entre el receptor y cada uno de los satélites.

A lo largo de los años, el GPS ha evolucionado y mejorado en términos de precisión, disponibilidad y funcionalidades adicionales. Por ejemplo, se han desarrollado técnicas de procesamiento de señales más avanzadas y algoritmos de posicionamiento para mejorar la precisión y reducir los errores.

A continuación se tratarán los segmentos que conforma el sistema GPS, pero los mismos componentes se repite para todos los demás sistemas GNSS.

Segmento espacial.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) se compone de una compleja arquitectura y una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra. Esta configuración permite la transmisión de señales desde los satélites hacia los receptores en la superficie terrestre, lo que posibilita la determinación precisa de la posición, velocidad y tiempo.

La arquitectura del GPS está diseñada para proporcionar una cobertura global y una disponibilidad continua de señales de navegación. La constelación de satélites se distribuye en seis planos orbitales diferentes, cada uno de ellos con una inclinación de aproximadamente 55 grados con respecto al ecuador terrestre.

Actualmente, el sistema GPS cuenta con más de 30 satélites operativos, aunque se han lanzado más de 50 en total a lo largo de la historia del sistema. Esto permite que siempre

haya un número suficiente de satélites visibles desde cualquier punto de la Tierra en cualquier momento dado, lo que garantiza la cobertura global del sistema.

Cada satélite GPS está equipado con una serie de componentes esenciales para su funcionamiento. Estos componentes incluyen una antena para la transmisión de señales y la recepción de comandos desde la Tierra, relojes atómicos altamente precisos para generar las señales de tiempo, sistemas de propulsión para el control y mantenimiento de la órbita, y sistemas de alimentación eléctrica para suministrar energía a todos los subsistemas del satélite.

La constelación de satélites GPS se distribuye en órbitas denominadas Órbitas Medias Terrestres (MEO, por sus siglas en inglés), que se encuentran a una altitud de aproximadamente 20,000 kilómetros sobre la Tierra. Esta altitud es óptima para asegurar una buena visibilidad de los satélites desde la mayoría de los lugares en la superficie terrestre, lo que permite a los receptores GPS recibir señales con la suficiente potencia y calidad para realizar mediciones precisas.

Los satélites GPS se encuentran en constante movimiento a lo largo de sus órbitas, siguiendo trayectorias predeterminadas y calculadas con precisión. Cada satélite completa dos vueltas alrededor de la Tierra en un día, y debido a la configuración de la constelación, al menos cuatro satélites GPS son visibles desde cualquier ubicación en la Tierra en un momento dado. La disposición de la constelación de satélites GPS en múltiples planos orbitales y la distribución uniforme de los satélites en cada plano garantizan una buena geometría de los satélites. Una buena geometría es crucial para obtener mediciones precisas y confiables, ya que permite una mejor intersección de las esferas de alcance de los satélites y una mejor distribución angular de los satélites en el cielo. Esto ayuda a minimizar los errores de medición y a mejorar la precisión del posicionamiento.

Además de los satélites operativos, el sistema GPS también incluye satélites de respaldo y de prueba. Estos satélites están disponibles para su activación en caso de que uno o más satélites operativos experimenten problemas o degradación en su rendimiento. Los satélites de respaldo y de prueba garantizan la continuidad del servicio y la confiabilidad del sistema. La constelación de satélites GPS es monitoreada y controlada desde una red de estaciones terrestres distribuidas en diferentes ubicaciones alrededor del mundo. Estas estaciones terrestres se comunican con los satélites GPS para realizar funciones de control, como el monitoreo de la salud de los satélites, la actualización de sus órbitas y relojes, y la sincronización de las transmisiones de señales.

Segmentos de Control Terrestre

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) consta de varios sectores o segmentos entre los que tenemos: sector terrestre o de control y el sector de usuarios con sus receptores GPS. Estos desempeñan roles fundamentales en el funcionamiento y la utilización efectiva del sistema GPS.

El segmento terrestre del GPS incluye la estación de control maestra, las estaciones de monitorización y las estaciones de usuario. Cada uno de estos segmentos tiene funciones y responsabilidades específicas que contribuyen al funcionamiento y la operación global del sistema.

La estación de control maestra (MCS, por sus siglas en inglés) es el componente central del segmento terrestre. Está ubicada en una instalación de control operada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y es responsable del monitoreo y control de toda la constelación de satélites GPS. La MCS rastrea continuamente la posición y el estado de salud de los satélites, así como la precisión de sus relojes atómicos. También realiza ajustes y actualizaciones periódicas de las órbitas y relojes de los satélites para mantener su precisión y disponibilidad.

Las estaciones de monitorización son una red global de estaciones terrestres distribuidas en diferentes ubicaciones alrededor del mundo. Estas estaciones reciben señales de los satélites GPS y realizan mediciones precisas de los rangos y los tiempos de llegada de las señales. Estas mediciones se utilizan para calcular las correcciones de órbita y reloj de los satélites, así como para determinar la posición precisa de las estaciones de monitorización. La información recopilada por estas estaciones se envía a la estación de control maestra para su procesamiento y análisis.

Segmento de usuario

El componente principal del sector de usuario es el receptor, un dispositivo electrónico diseñado para captar las señales de radio que emiten los satélites en órbita.

El sector de usuario es extremadamente amplio porque abarca todos los tipos de dispositivos y aplicaciones que utilizan el GPS. Existen receptores simples, como los que incorporan los teléfonos móviles, que proporcionan posiciones con una precisión del orden de algunos metros. También existen receptores profesionales, que pueden alcanzar precisiones centimétricas o incluso milimétricas cuando se aplican técnicas diferenciales o métodos de

procesamiento avanzados. De esta manera, el sector de usuario puede adaptarse a una enorme variedad de necesidades, desde la navegación cotidiana hasta aplicaciones científicas de alta precisión.

Otra característica importante del sector de usuario es su diversidad de aplicaciones. En la actualidad, millones de dispositivos utilizan señales del GPS para realizar tareas de navegación terrestre, marítima y aérea. Los sistemas de navegación de vehículos, por ejemplo, permiten determinar la posición de un automóvil en tiempo real y calcular rutas óptimas para llegar a un destino. En la navegación, los receptores GPS proporcionan información fundamental para la seguridad y la orientación durante el desplazamiento. En el ámbito científico y técnico, el sector de usuario es indispensable para la cartografía, la agrimensura, el monitoreo y la agricultura de precisión entre otros usos.

GLONASS

El Sistema de Navegación Global por Satélite (GLONASS) es un sistema de posicionamiento global desarrollado y operado por la Federación Rusa. Al igual que el GPS, el GLONASS permite determinar la posición precisa, la velocidad y el tiempo utilizando una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra.

El desarrollo del sistema GLONASS se remonta a la década de 1970, cuando la Unión Soviética comenzó a diseñar un sistema de navegación global para uso militar y civil. El objetivo principal era proporcionar una capacidad de posicionamiento y navegación independiente de los sistemas desarrollados por otros países, como el GPS. El sistema fue diseñado inicialmente para funcionar en todo el territorio de la Unión Soviética y en áreas cercanas, pero su cobertura global completa fue alcanzada más tarde.

Características y evolución del sistema GLONASS

La constelación de satélites GLONASS consta de múltiples satélites en órbitas alrededor de la Tierra. Originalmente, se planificó una constelación de 21 satélites distribuidos en tres planos orbitales. Sin embargo, debido a diversos desafíos técnicos y financieros, el sistema GLONASS experimentó dificultades durante su desarrollo y operación. En los años 90, el sistema experimentó una disminución en el número de satélites operativos, lo que afectó su disponibilidad y precisión.

A medida que avanzaba la década de 2000, se inició un programa de modernización y renovación del sistema GLONASS. Este programa incluyó el lanzamiento de nuevos satélites y la mejora de la infraestructura terrestre para mejorar la precisión y la disponibilidad del sistema. Además, se introdujeron mejoras tecnológicas para permitir el uso combinado del GLONASS con otros sistemas GNSS, como el GPS, para obtener una mayor precisión y cobertura global.

Actualmente, el sistema GLONASS consta de una constelación de 24 satélites operativos, distribuidos en tres planos orbitales alrededor de la Tierra. Estos satélites transmiten señales en múltiples bandas de frecuencia, lo que permite una mayor precisión y resistencia a las interferencias. Cada satélite GLONASS lleva a bordo relojes atómicos altamente precisos para sincronizar la transmisión de señales y proporcionar una referencia de tiempo precisa. Una de las características distintivas del sistema GLONASS es su sistema de referencia geodésico. El GLONASS utiliza PZ-90, que significa Parametry Zemli 1990 goda (Parámetros de la Tierra 1990), es equivalente ruso al sistema WGS 84 utilizado por el GPS, definiendo el centro de la Tierra, orientación y escala para el posicionamiento.

La versión original de 1990 fue actualizada para mejorar la precisión y acercarse al ITRF (Marco de Referencia Terrestre Internacional). Las versiones actuales son PZ-90.02 y, más comúnmente PZ-90.11, que reducen las diferencias con WGS 84 a niveles subcentimétricos. El sistema GLONASS ha sido utilizado en una amplia gama de aplicaciones, tanto militares como civiles. En el ámbito militar, el GLONASS se utiliza para la navegación y el posicionamiento de tropas y vehículos, así como para la coordinación de misiones y la sincronización de actividades. En el ámbito civil, el GLONASS se utiliza en aplicaciones de navegación personal, sistemas de navegación para vehículos, sistemas de gestión de flotas, agricultura de precisión y muchas otras aplicaciones que requieren posicionamiento preciso. A medida que el sistema GLONASS evolucionó, se implementaron mejoras para mejorar la precisión y la disponibilidad del sistema. Esto incluyó el lanzamiento de satélites modernizados, mejoras en la infraestructura terrestre y la implementación de tecnologías avanzadas de procesamiento de señales. Estas mejoras han permitido una mayor precisión y confiabilidad en las mediciones proporcionadas por el GLONASS, y han mejorado su interoperabilidad con otros sistemas GNSS.

A lo largo de los años, el sistema GLONASS ha enfrentado desafíos y ha experimentado mejoras significativas en su funcionamiento. Uno de los desafíos clave fue la necesidad de aumentar el número de satélites operativos en la constelación para mejorar la precisión y la cobertura global del sistema. A medida que se lanzaron nuevos satélites y se implementaron

mejoras en la infraestructura terrestre, la disponibilidad del GLONASS mejoró considerablemente.

Además, el sistema GLONASS ha trabajado en estrecha colaboración con otros sistemas, como el GPS, para lograr una mayor interoperabilidad y una mejor precisión. Esto ha permitido a los usuarios combinar las señales de ambos sistemas y obtener mediciones más precisas y confiables.

Los receptores GLONASS pueden proporcionar actualizaciones de posición y navegación a una velocidad de hasta diez veces por segundo, lo que es crucial en aplicaciones de alta velocidad como la aviación y el transporte marítimo.

En cuanto a la evolución futura del sistema GLONASS, se espera que continúe mejorando y ampliando su capacidad. Se ha anunciado un plan para lanzar satélites GLONASS-K2, que contarán con características mejoradas en términos de precisión, potencia de señal y vida útil. Además, se están llevando a cabo investigaciones y desarrollos para implementar una nueva generación de satélites GLONASS-M, que utilizarán tecnologías más avanzadas y ofrecerán una mayor eficiencia.

El sistema GLONASS también ha promovido la cooperación internacional en el ámbito de los sistemas GNSS. Se han establecido acuerdos y convenios con otros países para permitir el intercambio de datos y la colaboración en el uso de sistemas de navegación global.

GALILEO

El Sistema de Navegación Global por Satélite Galileo es un proyecto desarrollado por la Unión Europea (UE) con el objetivo de proporcionar una alternativa independiente y complementaria a los sistemas existentes, como el GPS y GLONASS. El desarrollo del sistema Galileo comenzó en la década de 1990 y ha sido implementado en varias fases.

Galileo se ha planteado como un sistema que permita ser independiente a Europa del GPS y el GLONASS, pero que sea complementario a ambos y que permita la interoperabilidad con éstos. Es particularmente interesante porque implica a diferentes países que han buscado la forma de actuar conjuntamente para desarrollar el sistema de posicionamiento. García Álvarez (2008).

El desarrollo del sistema Galileo fue impulsado por la necesidad de contar con un sistema GNSS europeo que proporcionara una autonomía estratégica en términos de navegación y posicionamiento. El proyecto Galileo fue concebido como un sistema civil, con aplicaciones

en una amplia gama de campos, incluyendo transporte, navegación marítima y aérea, agricultura de precisión, gestión de emergencias y aplicaciones de tiempo y frecuencia.

El desarrollo del sistema Galileo se llevó a cabo en varias etapas clave:

1. Fase de definición: En la década de 1990, la UE comenzó a definir los requisitos y especificaciones del sistema Galileo. Se llevaron a cabo estudios de viabilidad y se estableció un marco de desarrollo para el sistema. Durante esta fase, se realizó una amplia consulta con la industria, los usuarios finales y los estados miembros de la UE para definir los objetivos y características del sistema.
2. Fase de desarrollo inicial: En 2003, se lanzó la fase de desarrollo inicial del sistema Galileo. Durante esta etapa, se llevaron a cabo actividades de diseño, desarrollo y construcción de la infraestructura satelital y terrestre del sistema. Se estableció el Centro de Control de Misión (MCC) y se comenzó a trabajar en la construcción de los satélites Galileo y las estaciones terrestres.
3. Fase de implementación: A partir de 2005, se inició la fase de implementación del sistema Galileo. Se lanzaron los primeros satélites Galileo en órbita y se comenzó a establecer una constelación operativa. Durante esta etapa, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas y verificaciones para garantizar el correcto funcionamiento y rendimiento del sistema.
4. Fase de plena operatividad: En diciembre de 2016, el sistema Galileo alcanzó la fase de plena operatividad inicial (IOV, por sus siglas en inglés). Durante esta etapa, se logró la cobertura global con una constelación inicial de satélites Galileo y se puso en funcionamiento la infraestructura terrestre completa. Se alcanzaron los requisitos mínimos de operación para proporcionar servicios de navegación y posicionamiento a los usuarios finales.

La estructura del sistema Galileo se basa en una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra, infraestructura terrestre y servicios asociados. A continuación, describiremos los componentes principales del sistema:

1. Satélites Galileo: El sistema Galileo consta de una constelación de satélites en órbitas medianas. Se planificó una constelación de 30 satélites en total. Cada satélite Galileo está equipado con relojes atómicos altamente precisos y sistemas de navegación y comunicación.
2. segmento terrestre: La infraestructura terrestre de Galileo incluye una serie de estaciones terrestres ubicadas en todo el mundo. Estas estaciones terrestres son responsables de la comunicación con los satélites Galileo, el monitoreo y control de la constelación, y la

- generación de las efemérides y parámetros necesarios para el cálculo de la posición y el tiempo por parte de los receptores.
3. Segmento de usuario: El segmento de usuario del sistema Galileo consta de los receptores utilizados por los usuarios finales. Estos receptores son dispositivos electrónicos que reciben y procesan las señales de los satélites Galileo, junto con otras señales GNSS disponibles, para determinar la posición, la velocidad y el tiempo con precisión.
 4. Servicios Galileo: El sistema Galileo ofrece una variedad de servicios a los usuarios. Estos servicios incluyen el Servicio Abierto (OS), que proporciona información básica de navegación y posicionamiento; el Servicio de Mensajería (MS), que permite la entrega de mensajes de información a los usuarios; el Servicio de Búsqueda y Rescate (SAR), que ofrece capacidades de localización y rescate en situaciones de emergencia; y el Servicio de Integridad (IS), que garantiza la confiabilidad y la seguridad de las señales Galileo. Estos servicios están diseñados para satisfacer las necesidades de una amplia gama de usuarios, desde aplicaciones comerciales y gubernamentales hasta aplicaciones científicas y de investigación.

El sistema Galileo, desarrollado por la Unión Europea (UE), ha desempeñado un papel fundamental en la mejora de la autonomía y soberanía de Europa en el campo de la navegación y el posicionamiento. A medida que la dependencia de los sistemas de navegación global por satélite se ha vuelto cada vez más importante en numerosos sectores, la capacidad de contar con un sistema propio se ha convertido en un objetivo estratégico para muchas naciones y regiones.

Galileo ha fortalecido la posición de Europa como líder en tecnologías de navegación y posicionamiento, impulsando la innovación, la competitividad y el crecimiento económico en la región.

BEIDOU

El sistema BeiDou, también conocido como COMPASS, es uno de los principales sistemas de navegación global por satélite en funcionamiento en la actualidad. Desarrollado y operado por la República Popular China, BeiDou ha experimentado una notable expansión en los últimos años y ha emergido como una alternativa confiable y sólida a otros sistemas GNSS, como el GPS de Estados Unidos, GLONASS de Rusia y Galileo de la Unión Europea.

El sistema BeiDou se compone de una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra, así como de una infraestructura terrestre y de control asociada. Al igual que otros sistemas, BeiDou permite a los usuarios determinar su posición, velocidad y tiempo con una precisión considerable utilizando señales transmitidas por satélites. El sistema BeiDou también opera en tres segmentos principales: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario.

El segmento espacial consta de una constelación de satélites en órbita media y órbita geostacionaria. Estos satélites transmiten señales de navegación y tiempo a los receptores en la Tierra. A medida que la constelación de satélites se ha expandido, el sistema BeiDou ha mejorado su cobertura global, lo que significa que los usuarios pueden acceder a señales BeiDou en casi cualquier lugar del mundo.

El segmento de control se encarga de la operación, el monitoreo y la administración de la constelación de satélites BeiDou. Este segmento garantiza el funcionamiento adecuado de los satélites, supervisa su rendimiento y realiza ajustes necesarios para mantener la precisión y la disponibilidad del sistema.

El segmento de usuario está compuesto por los receptores utilizados por los usuarios finales. Estos receptores reciben las señales transmitidas por los satélites BeiDou y utilizan algoritmos y técnicas de procesamiento para determinar la posición, velocidad y tiempo del usuario.

Expansión del sistema BeiDou

El sistema BeiDou ha experimentado una expansión significativa en los últimos años, tanto en términos de cobertura geográfica como de capacidad. Inicialmente, el sistema BeiDou se desarrolló para proporcionar servicios regionales en China y sus alrededores. Sin embargo, China ha realizado un esfuerzo continuo para expandir la cobertura de BeiDou a nivel global. En 2012, se lanzó la segunda generación de satélites BeiDou, conocida como BeiDou-2. Esta generación de satélites aumentó considerablemente el número de satélites en órbita y mejoró la precisión y la disponibilidad de las señales. Con el despliegue de BeiDou-2, el sistema BeiDou se convirtió en un sistema completo.

En junio de 2020, China completó el despliegue de la tercera generación de satélites BeiDou, (conocida como BeiDou-3). Esta generación incluye satélites en órbita media, órbita geostacionaria y órbita terrestre media. Los satélites BeiDou-3 mejoran aún más la

precisión y la cobertura del sistema, permitiendo una mayor confiabilidad y disponibilidad de las señales en todo el mundo.

Con la finalización del despliegue de BeiDou-3, el sistema BeiDou ha logrado una cobertura global y se ha convertido en un competidor clave en el campo de los sistemas. La constelación de satélites BeiDou-3 cuenta con una amplia distribución geográfica y un número suficiente de satélites para proporcionar señales confiables y precisas en todo el mundo.

Características y mejoras del sistema BeiDou

El sistema BeiDou ofrece una serie de características y mejoras que lo distinguen de otros sistemas. A continuación, se detallan algunas de estas características:

- **Mayor precisión:** El sistema BeiDou ofrece una mayor precisión en el posicionamiento y el tiempo en comparación con sistemas GNSS. La incorporación de satélites en órbita geoestacionaria mejora la precisión de las mediciones, especialmente en regiones cercanas al ecuador. Además, BeiDou utiliza técnicas de procesamiento avanzadas para mejorar la precisión en entornos urbanos y en presencia de obstrucciones.
- **Mayor disponibilidad de señales:** La constelación de satélites BeiDou ofrece una mayor disponibilidad de señales en comparación con sistemas. Con una cobertura global y un mayor número de satélites en órbita, BeiDou proporciona una mayor probabilidad de recibir señales en áreas con obstrucciones o condiciones atmosféricas adversas.
- **Resistencia a interferencias:** El sistema BeiDou ha sido diseñado para ser resistente a interferencias intencionales o no intencionales. Utiliza técnicas de mitigación de interferencias para garantizar la continuidad y la confiabilidad de las señales en presencia de interferencias electromagnéticas o ruido ambiental.
- **Servicios adicionales:** Además de las señales de navegación estándar, el sistema BeiDou ofrece una variedad de servicios adicionales. Estos incluyen servicios de tiempo preciso, servicios de mensajería y servicios de búsqueda y rescate. Estos servicios adicionales mejoran la eficiencia y la seguridad en una amplia gama de aplicaciones, como la sincronización de redes de telecomunicaciones, la comunicación de emergencia y la gestión de flotas.

SISTEMAS REGIONALES. QZSS - IRNSS

Actualmente existen sistemas regionales de navegación por satélite desarrollados con el objetivo de mejorar la precisión, disponibilidad y autonomía en el posicionamiento satelital dentro de regiones geográficas específicas, aunque presentan diferencias importantes en su diseño y funcionamiento.

Estos reflejan una tendencia global hacia el desarrollo de sistemas regionales que complementan las grandes constelaciones GNSS. Esta combinación permite ofrecer servicios de posicionamiento más precisos, confiables y adaptados a las necesidades específicas de cada región, consolidando el papel de la navegación satelital como una herramienta esencial en la sociedad moderna.

Particularmente y por ahora, no son importantes para nosotros, ya que no tienen un cubrimiento espacial para nuestro país.

QZSS

El Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), un sistema desarrollado por Japón con el objetivo de mejorar la precisión y confiabilidad del posicionamiento satelital en la región Asia-Pacífico. A diferencia de los sistemas globales, QZSS es un sistema regional diseñado específicamente para complementar al GPS y otros sistemas existentes, en lugar de reemplazarlos. Su creación responde a la necesidad de superar limitaciones que afectan la calidad de la señal en entornos urbanos densos y zonas montañosas, donde los edificios altos o el relieve pueden bloquear o reflejar las señales satelitales.

Una de las características más distintivas del QZSS es el tipo de órbita que utilizan sus satélites, conocida como órbita cuasi-cenital. Estas órbitas están diseñadas de tal manera que los satélites pasan la mayor parte del tiempo sobre Japón y regiones cercanas, alcanzando posiciones muy elevadas en el cielo, casi directamente sobre los usuarios. Esta disposición reduce significativamente los problemas de visibilidad de los satélites, especialmente en ciudades con grandes edificios, donde las señales de sistemas tradicionales como el GPS pueden verse afectadas por el fenómeno conocido como “multipath”, en el cual las señales rebotan en superficies antes de llegar al receptor, generando errores en el cálculo de la posición.

El desarrollo del QZSS comenzó como una iniciativa estratégica de Japón para garantizar una mayor independencia tecnológica en materia de navegación satelital y, al mismo tiempo,

mejorar la calidad del servicio en su territorio. La constelación inicial del QZSS estaba compuesta por tres satélites en órbitas cuasi-cenitales y uno en órbita geostacionaria, lo que permitía asegurar que al menos uno de ellos estuviera siempre en una posición favorable para los usuarios en Japón. Con el tiempo, el sistema ha sido ampliado con el objetivo de aumentar su cobertura y mejorar aún más la precisión de los servicios ofrecidos.

QZSS proporciona varios tipos de servicios que lo convierten en un complemento altamente valioso. Uno de ellos es el servicio de posicionamiento estándar, similar al ofrecido por otros sistemas GNSS, que permite a los usuarios determinar su ubicación con precisión métrica. Sin embargo, uno de los mayores aportes de QZSS es su capacidad de ofrecer servicios de aumento, que consisten en la transmisión de correcciones que mejoran la precisión de las señales. Estas correcciones pueden compensar errores causados por factores como la atmósfera, las imprecisiones en las órbitas de los satélites o los desfases en los relojes.

Entre estos servicios de aumento se destaca el servicio de alta precisión, que puede alcanzar niveles de exactitud de pocos centímetros. Este tipo de precisión es fundamental para aplicaciones avanzadas como la agricultura de precisión, donde es necesario guiar maquinaria agrícola con gran exactitud; la construcción, donde se requiere posicionar estructuras con precisión milimétrica; y los vehículos autónomos, que dependen de información de posicionamiento extremadamente precisa para operar de manera segura. Además, QZSS también ofrece servicios de mensajería y alerta en caso de desastres, lo cual es especialmente relevante en un país como Japón, propenso a terremotos y otros fenómenos naturales.

En el caso específico del QZSS, Japón tiene planes de expandir su constelación de satélites para aumentar la cobertura y mejorar la calidad de los servicios. Esto podría permitir que el sistema tenga un impacto más allá de Japón, extendiéndose a otras regiones de Asia y el Pacífico.

IRNSS

El Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS), también conocido como NavIC, es un sistema regional de navegación por satélite desarrollado por la India con el objetivo de proporcionar servicios precisos de posicionamiento, navegación y tiempo dentro de su territorio y áreas circundantes. Aunque a diferencia de los sistemas globales como GPS o Galileo, su cobertura está enfocada principalmente en la región del sur de Asia. Este sistema fue concebido como una herramienta estratégica para garantizar la autonomía tecnológica

del país en materia de navegación satelital, reduciendo la dependencia de sistemas extranjeros en aplicaciones tanto civiles como militares.

El IRNSS funciona bajo los mismos principios fundamentales que otros sistemas GNSS, utilizando señales transmitidas por satélites para que los receptores en la Tierra puedan calcular su posición mediante el método de trilateración. Cada satélite emite información sobre su ubicación y el tiempo exacto de transmisión, lo que permite a los dispositivos calcular la distancia a múltiples satélites y determinar su posición con precisión. Para obtener una ubicación tridimensional completa, el receptor necesita al menos cuatro señales satelitales. La precisión del sistema depende de diversos factores, como la calidad de los relojes atómicos a bordo de los satélites, las condiciones atmosféricas y la geometría de la constelación en el momento de la medición.

El segmento espacial consiste en una constelación de satélites ubicados en órbitas geostacionarias y geosíncronas (GSO), lo que constituye una de sus características distintivas. A diferencia de otros sistemas GNSS que utilizan principalmente órbitas medias (MEO), los satélites del IRNSS están posicionados de manera que permanecen constantemente visibles sobre la región de interés, es decir, la India y sus alrededores. Esto permite una mejor cobertura y disponibilidad de señal en la zona, especialmente en comparación con sistemas globales que pueden tener menor visibilidad en ciertas regiones en determinados momentos.

Los satélites se ajustan a dos tipos de órbitas, denominadas geosíncronas y heliosíncronas. La primera, que también se denomina geostacionaria, es una órbita a 36.000 Km. de distancia. Su período orbital es el mismo que el de la Tierra, por lo que el satélite aparece siempre en la misma posición relativa (estacionario) respecto a la Tierra.

En cuanto a la órbita heliosíncrona, cuenta con una inclinación próxima a los 90° (casi Polar), lo que permite observar en cada momento una zona distinta del planeta, hasta completar la observación, ya que la órbita es perpendicular al movimiento terrestre. Esta órbita es la más habitual en los satélites de recursos naturales (Landsat, SPOT, IRS, IKONOS, Terra, Aqua, etc.). Chuvieco, E. (2010).

El sistema NavIC ha sido diseñado para proporcionar alta precisión dentro de su área de cobertura primaria, que incluye la India y una región que se extiende aproximadamente 1500 kilómetros más allá de sus fronteras. En esta zona, el sistema puede ofrecer una precisión de posicionamiento de pocos metros, lo que lo hace adecuado para una amplia variedad de aplicaciones. Además, su arquitectura basada en satélites GEO y GSO permite mantener una

geometría favorable de los satélites en el cielo, lo que contribuye a mejorar la calidad de la señal y reducir errores en la determinación de la posición.

DIFERENCIAS ENTRE LOS SISTEMAS GNSS

Cuando comparamos los sistemas GNSS, debemos hacerlo entendiendo que no son simplemente “GPS diferentes”, sino infraestructuras espaciales completas con arquitectura orbital, estructura de señal, marcos geodésicos, niveles de precisión, filosofías de diseño y objetivos estratégicos distintos. Los cuatro sistemas globales plenamente operativos hoy son GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rusia), Galileo (Unión Europea) y BeiDou (China). Todos permiten determinar posición tridimensional, velocidad y tiempo a partir de la medición extremadamente precisa del tiempo que tarda una señal electromagnética en viajar desde el satélite hasta el receptor.

La primera diferencia fundamental está en la arquitectura orbital. Todos utilizan satélites en órbitas medias (MEO), aproximadamente entre 19.000 y 23.000 Km. de altitud, pero difieren en número de satélites, planos orbitales e inclinación. GPS opera con alrededor de 30 satélites distribuidos en 6 planos orbitales inclinados a 55°. GLONASS utiliza 3 planos orbitales con una inclinación mayor (64,8°), lo que mejora su cobertura en latitudes altas; esta característica es particularmente ventajosa en regiones boreales donde la geometría satelital de GPS puede ser menos favorable. Galileo tiene 3 planos a 56° de inclinación. BeiDou es el sistema más complejo orbitalmente, porque combina satélites MEO con satélites geoestacionarios (GEO) y órbitas inclinadas geosíncronas (IGSO), lo que optimiza cobertura regional en Asia. Desde un punto de vista práctico cuanto mayor sea la cantidad total de satélites visibles, mejor será la geometría de posicionamiento (menor DOP, Dilution of Precision). Por ejemplo en un bosque denso donde parte del cielo está obstruido por el dosel, la disponibilidad multiconstelación puede duplicar el número de satélites utilizables, mejorando significativamente la precisión.

La segunda diferencia clave es la estructura de señal y el método de acceso múltiple. GPS y Galileo utilizan CDMA (Code Division Multiple Access), donde todos los satélites transmiten en la misma frecuencia pero con códigos distintos. GLONASS, en su diseño original, utilizó FDMA (Frequency Division Multiple Access), asignando frecuencias ligeramente diferentes a cada satélite; sus versiones más recientes también incorporan

CDMA para compatibilidad internacional. BeiDou emplea un sistema híbrido avanzado. Esta diferencia no es menor: influye en la complejidad de los receptores y en la forma en que se modelan errores ionosféricos. Desde la perspectiva ambiental, cuando utilizamos receptores geodésicos de doble o triple frecuencia para levantamientos RTK, la compatibilidad multiconstelación permite modelar mejor los retrasos atmosféricos y alcanzar precisiones centimétricas.

La tercera diferencia es el marco geodésico de referencia. GPS se basa en WGS84; GLONASS utiliza PZ-90; Galileo está alineado con el sistema europeo GTRF (compatible con ITRF); BeiDou utiliza CGCS2000. Aunque en aplicaciones cotidianas estas diferencias son prácticamente invisibles, en levantamientos de alta precisión (del orden de centímetros) pueden requerir transformaciones rigurosas.

En cuanto a precisión nominal, en modo autónomo (sin correcciones diferenciales) todos los sistemas ofrecen precisión horizontal de aproximadamente 3–5 metros en condiciones abiertas. Galileo fue diseñado para ofrecer ligeramente mayor precisión en servicio abierto, y BeiDou ha alcanzado estándares comparables. Sin embargo, en la práctica profesional no trabajamos en modo autónomo (posicionamiento Absoluto), cuando la exactitud es crítica. Utilizamos técnicas como DGPS, SBAS (WAAS, EGNOS), RTK.

Otra diferencia importante es el grado de control civil vs militar. GPS y GLONASS nacieron como sistemas militares; Galileo es el único diseñado explícitamente como sistema civil bajo control de la Unión Europea; BeiDou responde a la estrategia de independencia tecnológica china. Esto tiene implicancias en disponibilidad de servicios cifrados, continuidad operativa y políticas de acceso. La redundancia multiconstelación reduce vulnerabilidad ante posibles degradaciones intencionales o fallas técnicas.

También existen diferencias en los servicios adicionales. Galileo ofrece un servicio de búsqueda y rescate (SAR) integrado con el sistema internacional Cospas-Sarsat, permitiendo confirmación de recepción de señales de emergencia. BeiDou incluye servicios de mensajería corta en regiones específicas.

Desde el punto de vista físico, todos los sistemas enfrentan los mismos errores fundamentales: retraso ionosférico, retraso troposférico, error orbital, error de reloj,

multipath y ruido del receptor. Sin embargo, la posibilidad de trabajar con múltiples frecuencias y múltiples constelaciones mejora la capacidad de modelar estos errores. En bosques densos, el multipath —reflexión de la señal en troncos y follaje— puede introducir errores significativos. La integración multiconstelación mejora la redundancia geométrica y reduce la incertidumbre estadística en la solución.

Un ejemplo práctico: supongamos que estamos realizando un inventario forestal en un bosque denso y necesitamos posicionar con precisión parcelas permanentes de medición. Bajo dosel cerrado, la señal se atenúa y el cielo visible se reduce. Con solo GPS podríamos tener 5–6 satélites útiles; con GPS+GLONASS+Galileo podemos alcanzar 15 o más. Esto reduce el DOP, mejora la estabilidad temporal de la solución y disminuye el error horizontal.

APLICACIONES DE LOS GNSS

Los sistemas de navegación global por satélite desempeñan un papel fundamental en el campo de la navegación y el posicionamiento. La capacidad de determinar la posición y la velocidad con precisión utilizando señales de satélite ha revolucionado la forma en que nos desplazamos y nos orientamos en el mundo.

A continuación, exploraremos algunas de las aplicaciones de los GNSS en la navegación y el posicionamiento.

Navegación personal y automotriz

Una de las aplicaciones más comunes es la navegación personal y automotriz. Los sistemas de navegación basados en GNSS, se utilizan en dispositivos portátiles, teléfonos inteligentes y vehículos para proporcionar orientación y direcciones precisas a los usuarios. Ya sea que estemos caminando por la ciudad, conduciendo por carreteras desconocidas o buscando llegar a un lote, la navegación personal y automotriz nos permite encontrar rutas óptimas, evitar atascos de tráfico y llegar a nuestro destino de manera eficiente.

Navegación en lagos y ríos

Los GNSS también desempeñan un papel vital en la navegación. Los sistemas de posicionamiento global por satélite, se utilizan en barcos y embarcaciones para determinar

la posición, la velocidad y la dirección. Esto es especialmente importante en grandes lagos o en alta mar, donde no hay referencias visuales y la navegación depende en gran medida de las señales de satélite.

Además de la navegación básica, se utilizan en aplicaciones más avanzadas, como el seguimiento de rutas planificadas, por ejemplo, para la navegación de transectas para realizar estudios batimétricos.

Geodesia y topografía

Los GNSS son herramientas esenciales en el campo de la geodesia y la topografía. Se utilizan para la determinación precisa de coordenadas y elevaciones en el levantamiento de terrenos, la cartografía y otros trabajos topográficos. Los receptores de alta precisión se utilizan en combinación con técnicas de posicionamiento diferencial y mediciones en tiempo real para obtener resultados altamente precisos.

Estas aplicaciones son cruciales en la planificación y el diseño de proyectos de infraestructura, la monitorización de cambios de uso, el análisis de riesgos naturales y la delimitación de fronteras, permitiendo mediciones más rápidas y precisas en comparación con los métodos tradicionales.

Búsqueda y rescate

Los GNSS desempeñan un papel vital en las operaciones de búsqueda y rescate. Los dispositivos de localización personal (PLB), que son dispositivos portátiles que transmiten señales de socorro para proporcionar información precisa sobre la ubicación de una persona en peligro. Esto permite a los equipos de rescate responder rápidamente y localizar a las personas en situaciones de emergencia, como montañismo, senderismo o accidentes en el bosque.

También se utilizan en sistemas de gestión de emergencias y coordinación de equipos de rescate. La información precisa sobre la ubicación de los equipos de rescate y los recursos disponibles mejora la eficiencia y la efectividad de las operaciones de búsqueda y rescate.

Seguridad y emergencias

Los GNSS han mejorado significativamente la seguridad y la respuesta en situaciones de emergencia. Los sistemas de localización se utilizan en servicios de emergencia, como el rescate en montaña, la localización de personas perdidas o desaparecidas, y el seguimiento de vehículos de emergencia. Además, se han integrado en dispositivos personales de seguridad, como los sistemas de localización para niños o personas con necesidades especiales.

Logística y Trazabilidad

Los GNSS desempeñan un papel crítico, permitiendo el seguimiento y la trazabilidad en tiempo real, desde su origen hasta su destino final. Esto facilita la planificación eficiente de rutas de transporte, el monitoreo de actividades en áreas rurales y la optimización de los procesos logísticos.

La trazabilidad es un proceso en el cual se registra toda la información correspondiente a los elementos involucrados en el historial de un producto, desde el comienzo hasta el final de la cadena de comercialización. Se define también trazabilidad como “aquellos procedimientos que permiten conocer la historia, ubicación y la trayectoria de un producto o lote de productos a lo largo de la cadena de suministros en un momento dado, a través de herramientas determinadas”. Scaramuzza et al. (2016).

Aviación y Drones

La aviación es otro campo donde los GNSS han revolucionado la navegación y el posicionamiento. Los sistemas de navegación se utilizan en aviones y drones para la navegación precisa en todas las fases del vuelo, desde el despegue hasta el aterrizaje.

Permiten la navegación por trayectorias especificadas, lo que significa que los drones pueden seguir rutas predefinidas con una precisión extrema. Esto mejora la eficiencia de los vuelos, aumentando la autonomía de vuelo.



Figura 15. Vuelo a 50 metros de altura con Dron sobre campo Agrícola. Elaboración propia.

Caso de Estudio: Aplicaciones de los GNSS - LiDAR

LiDAR es un sistema activo de teledetección con características particulares que lo diferencian de manera notable de otros sistemas de teledetección tanto ópticos pasivos como activos, por ejemplo de imágenes satelitales como MODIS, Landsat, o QuickBird; o de imágenes de RADAR (Radio Detection And Ranging). El tratamiento de los datos y los productos que derivan de su análisis es por tanto también diferente.

La tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging - detección y medición por luz) ha transformado de manera profunda las ciencias forestales y la ecología en las últimas dos décadas. Si bien su origen se remonta a las aplicaciones militares y cartográficas de los años setenta, su integración con los sistemas de posicionamiento satelital GNSS y con plataformas aéreas y terrestres ha abierto posibilidades antes inimaginables para el estudio, la gestión y la conservación de los ecosistemas forestales.

Dentro de las cualidades que ofrecen los sistemas LiDAR para la evaluación de recursos naturales destacan su alta resolución espacial y su buena penetración en el dosel, lo que permite medir con precisión aceptable variables dasométricas como la altura de los árboles y estimar otras como el área basal, el área de la copa, la densidad arbórea, el volumen de madera, y volumen de biomasa. (Ortiz Reyes et al., 2015)

El LiDAR es una técnica de teledetección activa que emite pulsos de luz láser y mide el tiempo que tarda el pulso en regresar al sensor tras rebotar en un objeto. A partir de ese “tiempo de vuelo” y de la velocidad de la luz, se calcula con precisión milimétrica la distancia al objetivo. Combinando millones de estos retornos con la posición y orientación exacta del sensor, proporcionadas por receptores GNSS de alta precisión y sistemas de navegación inercial (IMU/INS), se construye una nube de puntos tridimensionales (coordenadas en X, Y y Z), que reproduce fielmente la geometría del entorno.

Las nubes de puntos son el producto principal resultante de cualquier sistema LiDAR. Se trata de un conjunto denso de datos que reúne todas las reflexiones (ecos o retornos) producidas por los objetos al ser impactados por el haz de luz láser. Gracia (2017).

La precisión posicional del sistema LiDAR depende directamente de la calidad del posicionamiento GNSS. Los sistemas aerotransportados de alta prestación utilizan soluciones GNSS diferencial o cinemático en tiempo real (RTK), o bien postprocesado cinemático (PPK), alcanzando precisiones absolutas del orden de 5 a 15 centímetros en planimetría y altimetría. Esta integración es lo que permite georreferenciar cada pulso LiDAR con exactitud sub-decimétrica.

Aplicaciones LiDAR

Batimetrías

La batimetría es la ciencia que se encarga de medir y representar las profundidades y el relieve del fondo de cuerpos de agua, como ríos, arroyos y lagos o represas. Es el equivalente acuático de la topografía terrestre, ya que busca describir la forma y características del terreno bajo el agua.

Un LiDAR batimétrico es una tecnología de medición que permite conocer la profundidad y la forma del fondo en cuerpos de agua poco profundos, como ríos, lagos y zonas costeras. A diferencia del LiDAR terrestre, esta variante utiliza dos tipos de láser: uno infrarrojo y otro verde. El láser infrarrojo se refleja en la superficie del agua, ya que no puede penetrarla, mientras que el láser verde sí logra atravesar el agua y alcanzar el fondo en condiciones adecuadas.

La medición de la profundidad se obtiene comparando el tiempo de retorno de ambos pulsos. El primero indica la posición de la superficie del agua y el segundo la del fondo. Con esta diferencia, el sistema calcula la distancia entre ambos puntos, es decir, la profundidad. Además, mediante sistemas de posicionamiento como GPS y sensores de orientación, se

puede ubicar cada medición con precisión geográfica, lo que permite generar mapas detallados del fondo acuático.

Una de las ventajas del LiDAR batimétrico es su capacidad para cubrir grandes áreas en poco tiempo. También permite acceder a zonas de difícil alcance o peligrosas, como áreas con poca profundidad, como regiones con vegetación acuática.

Otra ventaja importante es su alta resolución espacial, lo que significa que puede detectar detalles finos en la topografía del fondo.

Sin embargo, el LiDAR batimétrico tiene algunas limitaciones. La más importante es que su efectividad depende de la claridad del agua. En aguas turbias o con muchos sedimentos, el láser verde pierde capacidad de penetración, lo que reduce la profundidad máxima que se puede medir.

Modelos de elevación y de dosel

Una de las primeras y más fundamentales aplicaciones del LiDAR es la generación de modelos de elevación del terreno (DEM, Digital Elevation Model) y modelos de superficie del dosel (CHM, Canopy Height Model). El DEM representa la topografía del suelo subyacente, filtrado de la vegetación y otros objetos, mientras que el CHM expresa la altura de la vegetación sobre el suelo. La diferencia entre el modelo de superficie digital (DSM, que incluye todos los objetos) y el DEM da como resultado el modelo de altura normalizada de la vegetación.

La capacidad del LiDAR para penetrar el dosel arbóreo a través de las aperturas entre las copas, imposible con sensores ópticos pasivos, es lo que permite generar DEMs precisos incluso en bosques densos.

Estudios de vegetación.

El inventario forestal tradicional, basado en parcelas de campo con mediciones individuales de árboles, es costoso, lento y de difícil extrapolación espacial. El LiDAR ha revolucionado este campo al permitir estimar con precisión atributos dasométricos a escala de rodal o de árbol individual, como la altura dominante, la altura media del arbolado, el área basal, el volumen de madera, la cobertura de copa y la densidad de arbolado.

Una de las grandes ventajas que supone el uso de datos LiDAR es que permite evaluar cualquier tipo de hábitat forestal arbóreo sea cual sea su extensión territorial. Por su elevada resolución espacial puede resultar especialmente útil para aquellos tipos de hábitat forestales

que por su escasa superficie no pueden ser evaluados con los datos de un Inventario Forestal Nacional al contar con muy pocas parcelas. Vayreda J, et. al. (2019)

Uno de los aportes más singulares del LiDAR es su capacidad para describir la distribución vertical de la vegetación con un detalle sin precedentes. A diferencia de las imágenes aéreas o satelitales convencionales, que solo captan la superficie del dosel, el LiDAR penetra el bosque y registra retornos en múltiples estratos: dosel superior, subdosel, arbustos y suelo. La estructura vertical del dosel es un determinante clave de la biodiversidad en los ecosistemas forestales. Bosques con mayor complejidad estructural tienen mayor número de estratos, mayor variabilidad en la altura de los árboles y tienden a albergar una mayor riqueza de especies de aves, reptiles, insectos y plantas.

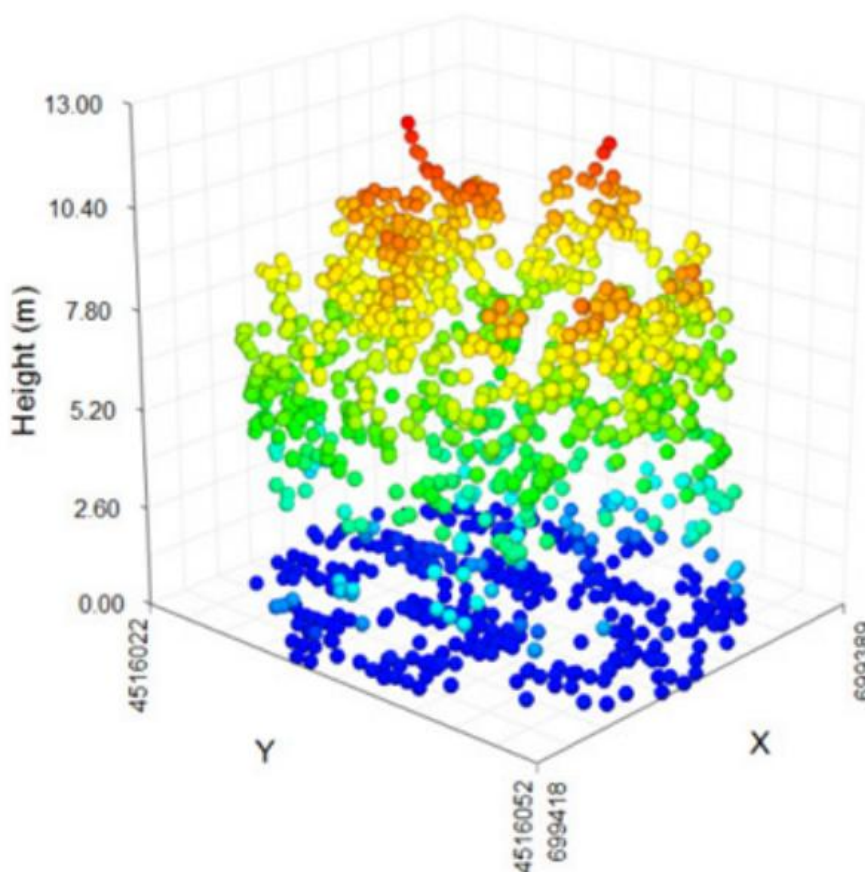


Figura 16. Datos Lidar de una zona con Cobertura Arbórea, en azul los datos del Terreno. Gracia. (2017).

El LiDAR ha permitido cuantificar esta hipótesis a grandes escalas espaciales y con mayor rigor que los inventarios de campo convencionales.

El LiDAR ha abierto una nueva era en la caracterización de los combustibles forestales y en la modelización del comportamiento del fuego. Los modelos de propagación del fuego, requieren información detallada sobre la carga de combustible superficial, la densidad del

dosel, la altura de la base del dosel y la continuidad vertical entre el combustible superficial y el arbóreo. Todos estos parámetros pueden derivarse de las nubes de puntos LiDAR con mayor precisión y extensión espacial que los métodos de campo convencionales.

Integración del LiDAR con GNSS y Otros Sensores

Como se ha señalado, el funcionamiento del LiDAR aerotransportado depende críticamente de la precisión del posicionamiento GNSS. El sistema de navegación integrado que combina receptores GNSS de doble frecuencia con unidades de medida inercial (IMU) de alta calidad determina en tiempo real la posición, velocidad y orientación (rumbo, cabeceo y balanceo) del sensor. El postprocesado de las trayectorias con software especializado y el uso de estaciones de referencia terrestres o de redes de corrección en tiempo real permiten alcanzar las precisiones posicionales requeridas. (Ramsac - Ntrip)

La fusión del LiDAR con sensores de imagen óptica, cámaras fotogramétricas, sensores hiperespectrales o multiespectrales, enriquece extraordinariamente el contenido informativo de los datos. La combinación de la información espectral con la estructural en 3D permite, por ejemplo, clasificar las especies arbóreas a partir de su firma espectral y su forma de copa, o cuantificar el estado fisiológico de la vegetación mediante índices espectrales como el NDVI, el EVI o el índice de contenido de clorofila.

Limitaciones y Desafíos

A pesar de sus enormes ventajas, el LiDAR presenta limitaciones que deben tenerse en cuenta en el diseño de los estudios forestales y ecológicos. La primera es de carácter económico: los vuelos LiDAR de alta densidad siguen siendo costosos, aunque el rápido abaratamiento de los sensores, especialmente los montados en Drones, está democratizando el acceso a esta tecnología. La segunda limitación es la necesidad de parcelas de campo para calibrar y validar los modelos.

El futuro del LiDAR en las ciencias forestales y ecológicas apunta a varios desarrollos convergentes. El abaratamiento y la miniaturización de los sensores continuarán impulsando la expansión del LiDAR, permitiendo levantamientos de alta densidad en parcelas experimentales y áreas de gestión forestal con costes accesibles para organismos públicos y empresas medianas. La integración de sensores LiDAR con cámaras RGB, multiespectrales e hiperespectrales en plataformas de ala fija o multirrotor producirá conjuntos de datos de extraordinaria riqueza informativa

Caso de Estudio: Aplicaciones de los GNSS - Agricultura de precisión

En el sector agrícola, los GNSS han desempeñado un papel crucial en la implementación de la agricultura de precisión, permitiendo a los productores realizar un seguimiento preciso de la ubicación y distribución de cultivos, monitorear la salud de las plantas, aplicar de manera eficiente fertilizantes y pesticidas, y optimizar el riego. Esto resulta en una producción más eficiente, sostenible y rentable.

La agricultura de precisión es una disciplina que utiliza tecnologías avanzadas, como los sistemas de información geográfica (SIG), para optimizar la producción agrícola-ganadera. Mediante el uso de datos geoespaciales, imágenes satelitales, sensores y sistemas de posicionamiento global, la agricultura de precisión permite una gestión más eficiente y precisa de los cultivos, lo que resulta en un mayor rendimiento, una reducción de costos y una menor huella ambiental.

La agricultura de precisión, conocida también como agricultura inteligente o manejo sitio-específico, representa una evolución fundamental en las prácticas agrícolas modernas, al adaptar las intervenciones a las necesidades específicas de cada porción de tierra dentro de un mismo campo, optimizando así el uso de recursos como agua, fertilizantes, semillas y pesticidas, y minimizando impactos ambientales negativos como la contaminación de suelos y aguas subterráneas.

En Argentina, un país con una tradición agrícola profunda y una economía fuertemente dependiente del sector agropecuario, la agricultura de precisión ha encontrado un terreno fértil para su desarrollo, posicionando al nación como uno de los líderes mundiales en adopción de estas tecnologías, solo por detrás de Estados Unidos y Alemania, con un crecimiento significativo en los últimos años que ha transformado la producción extensiva en las vastas llanuras pampeanas y otras regiones productivas. Este enfoque no solo busca aumentar la productividad, permitiendo incrementos en los rendimientos de hasta un 15% en cultivos como el maíz y la soja mediante el uso eficiente de insumos, sino que también promueve la sostenibilidad ambiental al reducir el desperdicio de recursos y las emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con objetivos globales como los Acuerdos de París sobre cambio climático y las metas de desarrollo sostenible de la ONU para una agricultura más resiliente y ecológica.

En el contexto argentino, donde la variabilidad climática, con fenómenos como sequías prolongadas en regiones como el NOA o inundaciones en la Pampa Húmeda, representa un desafío constante, la agricultura de precisión actúa como una herramienta clave para mitigar

riesgos, permitiendo a los productores tomar decisiones informadas basadas en datos en tiempo real, como mapas de variabilidad del suelo que identifican zonas con deficiencias nutricionales o estrés hídrico, y ajustando automáticamente las aplicaciones de insumos a través de maquinaria equipada con tecnología de tasa variable (VRT). Históricamente, la introducción de estas prácticas en Argentina se remonta a la década de 1990, impulsada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), que inició proyectos piloto en estaciones experimentales como la de Manfredi en Córdoba, donde se probaron los primeros monitores de rendimiento en cosechadoras y sistemas de guiado por GPS, evolucionando desde enfoques básicos de mapeo hasta sistemas integrados para predecir rendimientos y detectar plagas de manera proactiva.

Argentina se consolida como un referente regional, exportando no solo commodities agrícolas sino también conocimiento y tecnología a países vecinos como Brasil y Uruguay. La relevancia de este tema radica en su capacidad para enfrentar los desafíos actuales del sector, como la creciente demanda global de alimentos, la presión por reducir el uso de agroquímicos ante regulaciones ambientales más estrictas, y la necesidad de mejorar la rentabilidad en un contexto de volatilidad de precios internacionales y costos internos elevados.

En un campo típico de soja en la Pampa, un productor puede utilizar drones equipados con cámaras multiespectrales para generar índices como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que mide la salud vegetal mediante la reflectancia de la luz, detectando tempranamente problemas como deficiencias de nitrógeno y permitiendo aplicaciones selectivas que ahorran hasta un 30% en fertilizantes, lo que no solo baja costos operativos sino que también previene la eutrofización de ríos y lagos cercanos.

La adopción de la agricultura de precisión en Argentina ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, impulsado por una combinación de factores institucionales, económicos y tecnológicos que han facilitado su integración en el sistema productivo nacional, convirtiendo al país en un modelo de innovación agrícola en América Latina.

Las tecnologías clave en la agricultura de precisión en Argentina abarcan un espectro amplio que va desde sensores proximales y remotos hasta plataformas de análisis de datos, todas integradas para proporcionar una gestión más eficiente y sostenible que responde a la heterogeneidad natural de los suelos y climas del país. Entre las más adoptadas se encuentra el guiado automático por GPS, presente en casi todas las maquinarias nuevas, que evita solapamientos y huecos en operaciones como siembra y fumigación, ahorrando hasta un

15% en combustible y semillas, y reduciendo la compactación del suelo al minimizar pasadas innecesarias. Los monitores de rendimiento en cosechadoras, instalados en el 95% del parque nacional, generan mapas georreferenciados que revelan variaciones en productividad dentro de un lote, permitiendo ajustes en fertilización variable que optimizan el uso de nutrientes como nitrógeno y fósforo, crucial en cultivos como trigo y maíz donde la sobre-aplicación tradicional genera pérdidas económicas y ambientales. Los drones han experimentado un crecimiento explosivo, equipados con cámaras multiespectrales y termográficas que detectan estrés hídrico, plagas o malezas en etapas tempranas, integrando IA para aplicaciones selectivas que ahorran hasta el 70% en agroquímicos y cubren grandes extensiones rápidamente. Las imágenes satelitales de fuentes como Sentinel-2 o Landsat se procesan para generar índices vegetativos que guían decisiones en tiempo real.

Otras innovaciones incluyen sensores de suelo para medir conductividad eléctrica y pH, integrados con GIS (Sistemas de Información Geográfica) para crear zonas de manejo diferenciadas, y aplicaciones móviles que conectan productores con datos climáticos predictivos basados en modelos de machine learning.

En ganadería de precisión, collares GPS en bovinos optimizan el pastoreo rotacional, reduciendo erosión y emisiones de metano, mientras que en horticultura del NOA, sensores de humedad automatizan el riego por goteo.

Usos de los GNSS en la Agricultura de precisión

1. Mapeo y zonificación de parcelas: Los SIG desempeñan un papel fundamental en el mapeo y la zonificación de las parcelas. Permiten la delimitación precisa de las parcelas y la creación de mapas de cobertura vegetal, lo que ayuda en la identificación de áreas con diferentes características y necesidades de manejo. Los datos geoespaciales recopilados mediante GNSS y sensores remotos se utilizan para generar mapas de índices de vegetación, mapas de salud de los cultivos y mapas de estrés hídrico. Estos mapas proporcionan información detallada sobre la variabilidad espacial de los cultivos.

2. Aplicación variable de insumos: Uno de los aspectos clave de la agricultura de precisión es la aplicación variable de insumos agrícolas, como fertilizantes, pesticidas y agua. Los SIG permiten la generación de mapas de prescripción, que indican las áreas de la parcela que requieren diferentes cantidades de insumos. Estos mapas se basan en la información recopilada en los cultivos y las necesidades específicas de cada zona. Mediante el uso de sistemas de posicionamiento global y equipos de aplicación variable, los

agricultores pueden ajustar la cantidad de insumos aplicados en tiempo real, optimizando así el uso de recursos y reduciendo el impacto ambiental.

3. Monitoreo y seguimiento de los cultivos: Los SIG permiten el monitoreo y seguimiento continuo de los cultivos a lo largo de su ciclo de crecimiento. La integración de datos geoespaciales, imágenes satelitales y sensores remotos en los SIG permite obtener información en tiempo real sobre la salud de los cultivos, la disponibilidad de agua, los niveles de nutrientes y otros factores que afectan el rendimiento de los cultivos. Esta información se utiliza para realizar un seguimiento de las condiciones del cultivo, detectar problemas tempranos, como enfermedades o estrés hídrico, y tomar medidas correctivas de manera oportuna. El monitoreo y seguimiento de los cultivos mediante los SIG contribuye a una gestión más eficiente y a la optimización de los recursos.

4. Predicción de rendimiento y estimación de cosechas: Los SIG se utilizan para predecir el rendimiento de los cultivos y estimar las cosechas futuras. Al combinar datos históricos, datos actuales y modelos de crecimiento de cultivos, los agricultores pueden obtener estimaciones precisas del rendimiento y planificar las operaciones de cosecha de manera eficiente. Los SIG permiten generar mapas de rendimiento, que indican las áreas de la parcela con mayor y menor productividad. Estos mapas ayudan a identificar las causas de la variabilidad del rendimiento, como la compactación del suelo, la falta de nutrientes o la presencia de plagas. Esta información es valiosa para tomar decisiones informadas sobre el manejo futuro de los cultivos y la optimización de la producción.

5. Manejo de plagas y enfermedades: Los SIG desempeñan un papel importante en el manejo de plagas y enfermedades en los cultivos. Al combinar datos geoespaciales, registros históricos y modelos predictivos, los SIG pueden ayudar a identificar áreas propensas a infestaciones de plagas o enfermedades. Los agricultores pueden utilizar esta información para implementar medidas preventivas, como la aplicación selectiva de pesticidas o la introducción de enemigos naturales de las plagas. Los SIG también permiten el seguimiento continuo de la propagación de plagas y enfermedades, lo que facilita la toma de decisiones oportunas y la implementación de estrategias de control efectivas.

6. Optimización del riego: El riego es una parte crucial de la agricultura, y los SIG desempeñan un papel fundamental en la optimización del riego. Mediante la integración de datos geoespaciales, datos meteorológicos y sensores de humedad del suelo, los SIG permiten determinar las necesidades hídricas de los cultivos y ajustar el riego de manera precisa. Los mapas de humedad del suelo generados a partir de los datos recopilados mediante GNSS y sensores remotos ayudan a identificar las áreas con exceso o déficit de

agua, lo que permite una distribución eficiente del riego y evita el desperdicio de recursos. El uso de los SIG en la optimización del riego contribuye a la conservación del agua y a la reducción de costos para los agricultores.

7. Optimización del manejo de nutrientes: Los SIG también desempeñan un papel crucial en la optimización del manejo de nutrientes en la agricultura. Mediante el análisis de datos geoespaciales, información sobre los niveles de nutrientes en el suelo y modelos de fertilización, los agricultores pueden determinar las necesidades específicas de nutrientes de diferentes áreas de la parcela. Esto permite una aplicación precisa de fertilizantes, evitando el uso excesivo o insuficiente de nutrientes y optimizando así el rendimiento de los cultivos. Los mapas de variabilidad espacial de nutrientes generados mediante los SIG son herramientas valiosas para la toma de decisiones sobre la fertilización y el manejo de la calidad del suelo.

8. Gestión del tiempo y la mano de obra: Los SIG también pueden ayudar en la gestión eficiente del tiempo y la mano de obra en la agricultura. Mediante la planificación y el mapeo de tareas agrícolas, como la siembra, el riego, la fertilización y la cosecha, los agricultores pueden optimizar la programación y el uso de la mano de obra. Los SIG permiten identificar las áreas de la parcela que requieren atención específica y coordinar las operaciones agrícolas de manera más eficiente. Además, los sistemas de navegación por satélite integrados en los SIG pueden guiar a los operadores de maquinaria agrícola para garantizar una cobertura precisa y evitar la superposición o la falta de cobertura en las áreas de cultivo.

9. Integración con otras tecnologías agrícolas: Los SIG se pueden integrar con otras tecnologías agrícolas, como sistemas de teledetección, drones y sensores remotos. Esto amplía las capacidades de los SIG en términos de recopilación de datos geoespaciales, monitoreo de cultivos y toma de decisiones. Por ejemplo, los drones equipados con cámaras multiespectrales pueden capturar imágenes detalladas de los cultivos, que luego se pueden procesar y analizar utilizando los SIG para generar mapas de salud de los cultivos y mapas de índices de vegetación. La integración de estas tecnologías permite una recopilación de datos más rápida y precisa, así como un monitoreo en tiempo real de los cultivos.

MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO CON GNSS

Para comprender mejor el funcionamiento del posicionamiento GNSS, es importante conocer los diferentes métodos que se utilizan para determinar coordenadas geográficas. Estos métodos se clasifican de acuerdo con distintos criterios, como el número de receptores

utilizados, el tipo de observables empleados y la forma en que se realiza la observación o el procesamiento de los datos. Cada uno de estos métodos presenta características particulares en términos de precisión,

1. Clasificación según el número de receptores
 - Posicionamiento absoluto
 - Posicionamiento relativo o diferencial
2. Clasificación según el tipo de observables
 - Posicionamiento por código
 - Posicionamiento por fase de la portadora
3. Clasificación según el modo de observación
 - Posicionamiento estático
 - Posicionamiento Estático Rápido
 - Posicionamiento cinemático post-procesado
 - Posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK)
4. Según el momento del procesamiento de datos
 - Post-procesado
 - Tiempo Real

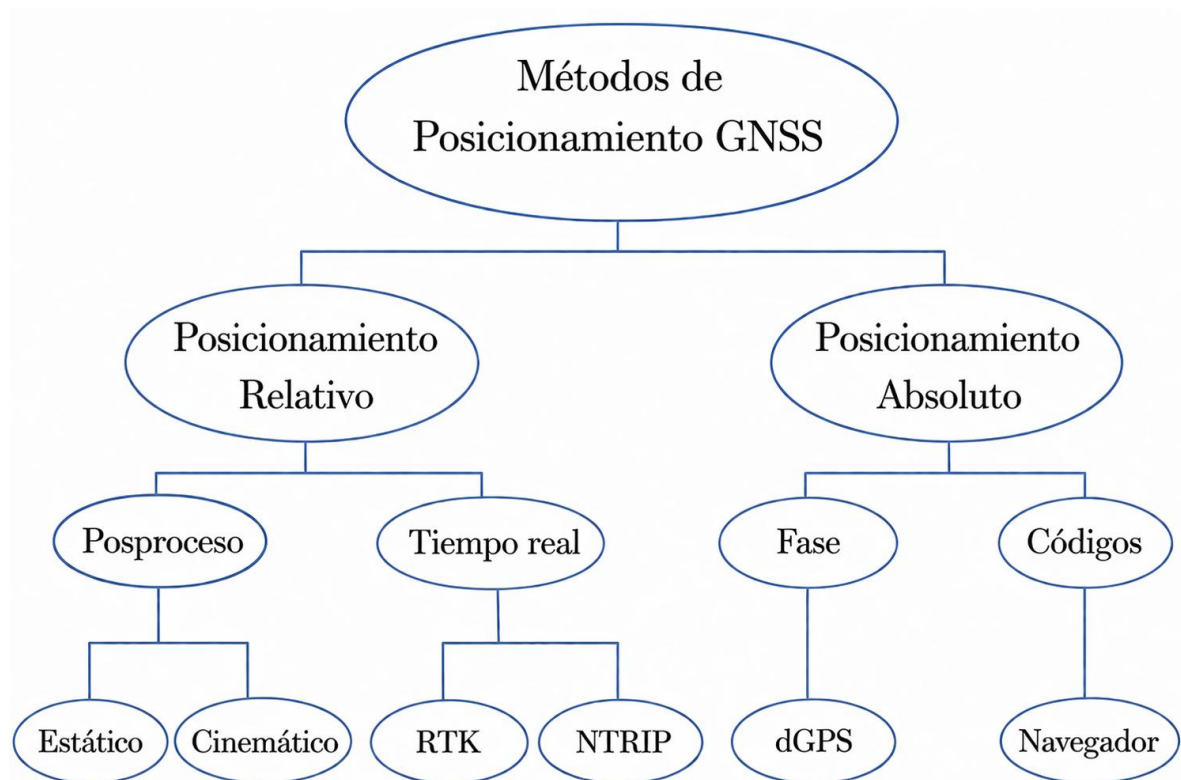


Figura 17. Métodos de posicionamiento. Elaboración Propia

1.- CLASIFICACIÓN SEGÚN EL NÚMERO DE RECEPTORES

Una de las clasificaciones más comunes de los métodos de posicionamiento se basa en la cantidad de receptores utilizados durante el proceso de medición. En este sentido, se distinguen dos grandes categorías: el posicionamiento absoluto y el posicionamiento relativo.

Posicionamiento absoluto

Cuando hablamos de posicionamiento absoluto nos referimos al caso de un solo receptor operando en modo autónomo, es decir, calculando las coordenadas del receptor sobre la superficie terrestre en base a las mediciones de distancia que realiza a los satélites visibles y mostrando estas coordenadas, sin ningún tipo de corrección, en el display del receptor.

Huerta et al. (2005).

El posicionamiento absoluto, también conocido como posicionamiento autónomo o puntual, se realiza utilizando un único receptor. En este método, el receptor calcula su posición directamente a partir de las señales transmitidas por al menos cuatro satélites.

Esto se debe a que existen cuatro incógnitas que deben resolverse:

1. Coordenada X del receptor
2. Coordenada Y del receptor
3. Coordenada Z del receptor
4. Error del reloj del receptor

Mediante la resolución simultánea de estas ecuaciones se obtienen las coordenadas tridimensionales del receptor,

Cada satélite transmite información sobre su posición y el tiempo en que se envió la señal. El receptor mide el tiempo que tarda la señal en llegar desde el satélite y calcula la distancia correspondiente. Con la información de varios satélites, el receptor puede determinar sus coordenadas tridimensionales (latitud, longitud y altura).

El posicionamiento absoluto consiste en calcular la posición de un receptor utilizando únicamente las señales provenientes de los satélites, sin necesidad de estaciones base o receptores adicionales. En este método, el receptor determina sus coordenadas directamente a partir de la información transmitida por los satélites.

La precisión del posicionamiento absoluto depende de diversos factores, como la calidad del receptor, la geometría de los satélites y los errores asociados a la propagación de la señal. En general, este método proporciona precisiones del orden de algunos metros, que pueden variar entre 5 y 10 metros en condiciones normales. Debido a su simplicidad y bajo costo, el posicionamiento absoluto es ampliamente utilizado en dispositivos de navegación, teléfonos inteligentes, sistemas de seguimiento de vehículos y aplicaciones de orientación general.

El posicionamiento absoluto presenta varias ventajas que explican su amplio uso en diferentes aplicaciones:

- No requiere infraestructura adicional ni estaciones base.
- Permite obtener posiciones de forma rápida.
- Los receptores son relativamente económicos.
- Funciona en cualquier parte del mundo donde exista cobertura GNSS.

Posicionamiento relativo

El posicionamiento relativo es un método que utiliza dos o más receptores para determinar posiciones con mayor precisión. En este caso, uno de los receptores se ubica en un punto cuya posición es conocida con gran exactitud, denominado estación base, mientras que el otro receptor se coloca en el punto cuya posición se desea determinar, conocido como receptor móvil o rover. Ambos receptores observan simultáneamente las señales de los mismos satélites.

Al comparar las observaciones obtenidas por cada receptor, es posible calcular el vector de línea base, que representa la distancia y dirección entre la estación base y el receptor móvil. A partir de este vector y de las coordenadas conocidas de la estación base, se pueden calcular las coordenadas del receptor móvil con gran precisión.

A diferencia del posicionamiento absoluto, que calcula la posición de un receptor de forma independiente, el posicionamiento relativo determina la posición de un punto con respecto a otro punto cuya ubicación es conocida. Este enfoque permite reducir considerablemente los errores presentes en las observaciones de los satélites, logrando precisiones que pueden alcanzar el nivel centimétrico o incluso milimétrico.

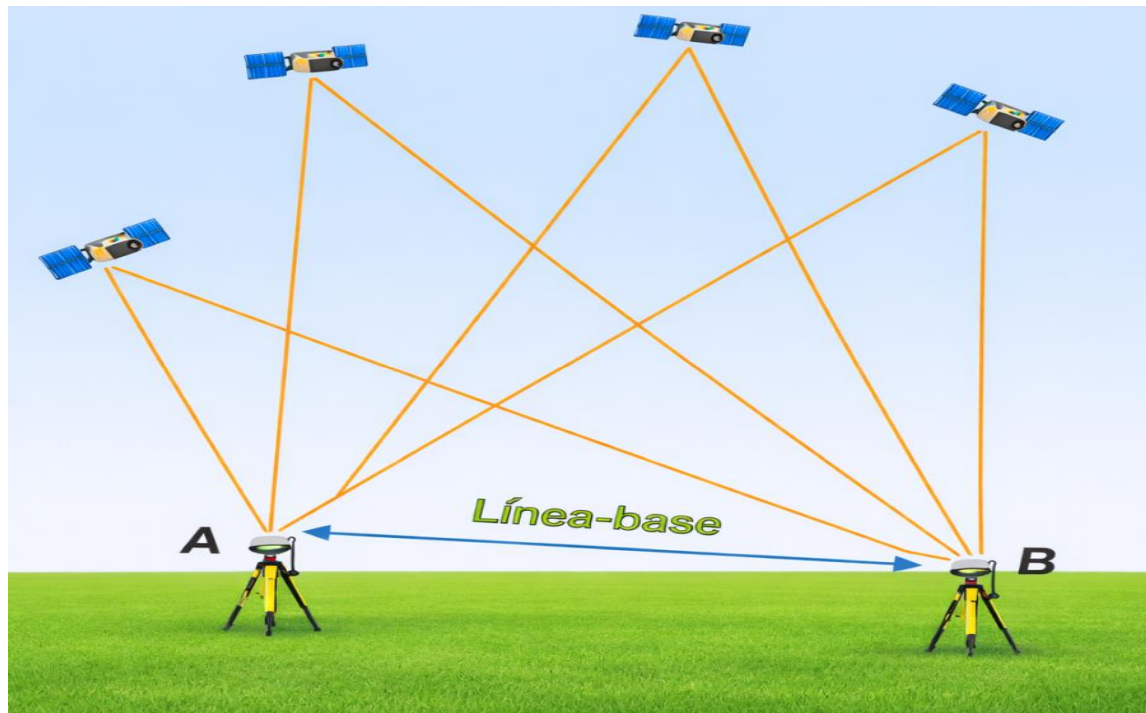


Figura 18. Línea Base. *Elaboración propia*

El principio fundamental del posicionamiento relativo consiste en que muchos de los errores que afectan a las señales de los satélites son prácticamente iguales para los dos receptores si se encuentran relativamente cerca entre sí. Al comparar las observaciones de ambos receptores, es posible eliminar o reducir significativamente estos errores. Como resultado, se obtiene una determinación mucho más precisa de la posición del receptor móvil respecto de la estación base.

El posicionamiento relativo puede utilizar dos tipos principales de observables: Observaciones de código y Observaciones de fase de la portadora

Observaciones de código: Se basan en la medición del tiempo de propagación de los códigos pseudoaleatorios transmitidos por los satélites. Este tipo de medición proporciona precisiones de nivel métrico o submétrico. (dGPS de Código)

Observaciones de fase de la portadora: Se basan en la medición de la fase de la señal portadora transmitida por los satélites. Debido a que la longitud de onda de la portadora es muy pequeña, este tipo de medición permite alcanzar precisiones centimétricas o incluso milimétricas. (DGPS)

Algunos autores hacen una diferenciación entre dGPS y DGPS. DGPS es el término que se usa en general al nombrar el método diferencial. En cambio dGPS se usa específicamente para diferencial de código.

La mayoría de los métodos de alta precisión utilizan observaciones de fase de la portadora. La precisión alcanzada con este método puede ser del orden de centímetros o incluso milímetros, dependiendo del tipo de medición y del tiempo de observación. Por esta razón, el posicionamiento relativo es ampliamente utilizado en topografía, cartografía, geodesia y otras aplicaciones que requieren alta exactitud.

A pesar de sus ventajas, este método presenta algunas limitaciones:

- Requiere al menos dos receptores.
- Necesita mayor planificación y procesamiento de datos.
- Puede requerir comunicación entre la estación base y el receptor móvil.
- La precisión disminuye cuando la distancia entre receptores es muy grande.

dGPS de código

El dGPS de código (Differential GPS basado en pseudodistancias) es una técnica de posicionamiento satelital que tiene como objetivo mejorar la precisión del GPS convencional mediante la aplicación de correcciones diferenciales sobre las mediciones realizadas con códigos. En los sistemas GNSS, los receptores determinan su posición calculando la distancia a varios satélites a partir del tiempo que tarda en llegar la señal. Esta medición se conoce como pseudodistancia, ya que no es una distancia pura sino que está afectada por múltiples fuentes de error. En el caso del dGPS de código, estas pseudodistancias se obtienen a partir de los códigos transmitidos por los satélites, como el código C/A (Coarse Acquisition), que es el más utilizado en aplicaciones civiles.

El principio de funcionamiento del dGPS de código se basa en el uso de al menos una estación de referencia, denominada estación base, cuya posición es conocida con alta precisión. Esta estación recibe las mismas señales satelitales que cualquier receptor GNSS, pero como conoce su ubicación exacta, puede comparar las distancias calculadas a los satélites con las distancias reales. La diferencia entre ambas constituye el error presente en la medición. Una vez determinadas estas correcciones, la estación base las transmite a los receptores móviles, conocidos como rovers. Estos receptores, que se encuentran dentro de

un área relativamente cercana a la base, reciben tanto las señales satelitales como las correcciones diferenciales. Al aplicar estas correcciones a sus propias mediciones de pseudodistancia, los receptores rovers pueden eliminar gran parte de los errores que afectan al posicionamiento.

Una característica fundamental del dGPS de código es que trabaja exclusivamente con observaciones de código y no con la fase de la portadora. Esto implica que la precisión alcanzable está limitada por la propia resolución del código, que es del orden de un metro. A pesar de esta limitación, el dGPS de código representa una mejora significativa respecto al posicionamiento autónomo, que típicamente presenta errores de entre 5 y 10 metros. Con la aplicación de correcciones diferenciales, es posible alcanzar precisiones del orden de 0,5 a 3 metros, dependiendo de las condiciones de observación, la calidad del receptor y la distancia a la estación base.

El dGPS de código puede implementarse tanto en tiempo real como en posproceso.

Desde el punto de vista teórico, la eficacia se fundamenta en la correlación espacial de los errores. Los errores atmosféricos, como los producidos por la ionosfera y la troposfera, así como los errores orbitales, tienden a ser muy similares en un área geográfica limitada. Por ello, la corrección calculada en la estación base es válida para los receptores cercanos. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia entre la base y el rover, esta correlación disminuye y las correcciones pierden efectividad, lo que se traduce en una degradación de la precisión.

A pesar de sus ventajas, presenta algunas limitaciones. La principal es su menor precisión en comparación con técnicas basadas en la fase de la portadora, como el RTK (Real Time Kinematic), que permite alcanzar precisiones centimétricas.

En aplicaciones prácticas, el dGPS de código es ampliamente utilizado en contextos donde se requiere una precisión mejorada respecto al GPS autónomo, pero no necesariamente del orden centimétrico. Esto incluye actividades como la agricultura de precisión, la navegación, el levantamiento cartográfico de escala media y diversos estudios ambientales y forestales. En estos ámbitos, el equilibrio entre precisión, costo y simplicidad operativa hace del dGPS de código una herramienta muy valiosa.

2.- CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE OBSERVABLES

Otra forma importante de clasificar los métodos de posicionamiento se basa en el tipo de señal o observable utilizado para realizar las mediciones. En este contexto, se distinguen

principalmente dos tipos de observables: las mediciones basadas en observaciones de código y las mediciones basadas en observaciones de la fase de la portadora.

Posicionamiento por código

El posicionamiento por código se basa en la transmisión de señales de radio desde los satélites hacia los receptores ubicados en la Tierra. Cada satélite transmite un código digital único conocido como código pseudoaleatorio (PRN). Este código es generado tanto por el satélite como por el receptor.

El receptor compara el código recibido con una copia interna del mismo código que genera localmente. Al desplazar la copia del código hasta que coincida con la señal recibida, el receptor puede determinar el tiempo de viaje de la señal desde el satélite hasta el receptor.

La velocidad de propagación de la señal es aproximadamente la velocidad de la luz (≈ 299.792 Km./s). La distancia calculada mediante este procedimiento se denomina pseudodistancia, ya que incluye ciertos errores que afectan la medición real.

Pseudodistancia: Es la distancia calculada por el receptor, que no es exactamente la distancia real, porque incluye el efecto de los desfases de reloj, además de otros errores como retrasos atmosféricos.

$$\rho = \Delta t * C$$

ρ Pseudodistancia Receptor-Satélite

C velocidad de la luz

Δt Desfase de tiempo entre códigos

Para determinar una posición tridimensional se requieren observaciones de al menos cuatro satélites. Con estas cuatro mediciones se pueden resolver cuatro incógnitas: las tres coordenadas espaciales del receptor y el error del reloj interno del receptor.

Los satélites transmiten distintos tipos de códigos de navegación. En el caso del sistema GPS, los principales códigos utilizados son el Código C/A (Coarse/Acquisition) y el Código P (Precise).

En otros sistemas GNSS también existen códigos equivalentes que cumplen funciones similares para la identificación del satélite y la medición del tiempo de propagación.

Las mediciones por código son relativamente sencillas de realizar y procesar, lo que hace que este método sea el más utilizado en receptores GNSS de uso general. Sin embargo, la precisión obtenida es limitada debido a diversos errores presentes en las mediciones. En

condiciones normales, el posicionamiento basado en mediciones de código proporciona una precisión aproximada de 3 a 10 metros en posicionamiento autónomo. Esta precisión puede mejorar si se utilizan técnicas diferenciales o si se combinan señales de múltiples constelaciones GNSS.

El posicionamiento basado en código presenta diversas ventajas, en primer lugar, es un método relativamente simple que no requiere procesos matemáticos complejos para determinar la posición. Además, los receptores que utilizan mediciones de código suelen ser más económicos que aquellos diseñados para mediciones de fase.

Otra ventaja importante es que el posicionamiento por código permite obtener posiciones de forma rápida, lo que resulta especialmente útil en aplicaciones de navegación en tiempo real. Este tipo de posicionamiento es adecuado para aplicaciones de navegación, monitoreo de transporte, actividades recreativas y otras tareas donde no se requiere una precisión extremadamente alta.

La principal limitación es su menor precisión en comparación con las mediciones de fase de portadora. Los errores atmosféricos y las incertidumbres en las pseudodistancias pueden afectar significativamente la exactitud del posicionamiento.

Posicionamiento por fase de la portadora (DGPS)

El posicionamiento por fase de la portadora utiliza la fase de la onda portadora de la señal GPS para determinar la distancia entre el satélite y el receptor.

En este método se mide la diferencia de fase entre la señal emitida por el satélite y la señal recibida por el receptor. Sin embargo, existe una incógnita conocida como ambigüedad de fase, que corresponde al número entero de ciclos de la onda que se encuentran entre el satélite y el receptor.

Resolver esta ambigüedad es uno de los principales desafíos del posicionamiento por fase de portadora y determina la precisión final del método.

Una vez resuelta la ambigüedad, el posicionamiento por fase puede proporcionar precisiones del orden de centímetros o incluso milímetros al utilizar valores de distancia muy precisos)

$$\rho = N \cdot \lambda + \phi \cdot \lambda$$

ρ Distancia Receptor-Satélite

N es la ambigüedad entera (número de ciclos completos)

ϕ diferencia de fase (es la fracción de una onda)

λ es la longitud de onda de la portadora

El posicionamiento GNSS basado en la **fase de la portadora** se caracteriza por alcanzar niveles de precisión muy superiores a los obtenidos mediante observaciones de código. Gracias a esta alta exactitud, es ampliamente utilizado en aplicaciones que requieren gran rigor, como trabajos geodésicos, estudios tectónicos, monitoreo de deformaciones estructurales y levantamientos topográficos de alta precisión. La exactitud lograda depende del método y de las condiciones de observación, pudiendo alcanzar valores del orden de 1 a 10 mm en posicionamiento estático para distancias cortas, entre 1 y 2 cm en estático rápido, y aproximadamente 2 a 3 cm en técnicas cinemáticas y RTK en tiempo real.

Entre sus principales ventajas se destaca la posibilidad de obtener precisiones centimétricas e incluso milimétricas, lo que lo convierte en una herramienta fundamental para aplicaciones científicas y profesionales de alta exigencia. Además, es compatible con metodologías modernas de posicionamiento en tiempo real, como RTK y NTRIP, lo que amplía significativamente su campo de aplicación en distintas disciplinas.

Sin embargo, este tipo de posicionamiento también presenta algunas limitaciones. Requiere equipos más complejos y costosos en comparación con los sistemas basados en código, y depende de la correcta resolución de la ambigüedad de fase, un proceso que puede volverse complicado en entornos con obstrucciones o pérdida de señal.

3.- CLASIFICACIÓN SEGÚN LA FORMA DE OBSERVACIÓN

Los métodos de posicionamiento también pueden clasificarse de acuerdo con la forma en que se realiza la observación o el movimiento del receptor durante el proceso de medición. En este caso se distinguen varios métodos, entre los cuales destacan el posicionamiento estático, el Estático Rápido, el cinemático y el posicionamiento en tiempo real.

Posicionamiento estático

El principio fundamental del posicionamiento estático es simple: al mantener el receptor en un punto fijo, las observaciones satelitales se acumulan a lo largo del tiempo. Esta acumulación permite promediar errores aleatorios y aplicar técnicas de diferenciación para eliminar errores sistemáticos, como los relacionados con los relojes de satélites y receptores, la ionosfera o la troposfera.

El posicionamiento estático constituye uno de los métodos más precisos y confiables para determinar coordenadas geográficas, topográficas o geodésicas en la superficie terrestre. Su fundamento radica en mantener el receptor fijo sobre un punto determinado durante un período prolongado de observación, registrando continuamente las señales transmitidas por los satélites de la constelación. A diferencia de métodos cinemáticos o en tiempo real, donde el receptor se desplaza y se procesan observaciones de manera inmediata, el posicionamiento estático permite acumular datos de manera constante, lo que posibilita promediar errores aleatorios, reducir la influencia de fenómenos atmosféricos, eliminar errores sistemáticos y resolver de manera precisa la ambigüedad de fase asociada a las señales de portadora.

El procedimiento de posicionamiento estático inicia con la selección cuidadosa del sitio de observación, ya que la visibilidad del cielo abierto y la ausencia de obstrucciones como edificios, vegetación densa o estructuras metálicas es crucial para evitar fenómenos de multipath o señales reflejadas que puedan afectar la exactitud de las mediciones. Una vez elegido el sitio, el receptor se instala sobre un trípode, bastón o monolito geodésico, asegurando que el punto de medición coincida exactamente con la ubicación planificada.



Figura 19. GPS en Posicionamiento estático sobre mojón. Fotografía tomada por el autor (2010)

La correcta fijación del receptor y la calibración de la antena son esenciales para garantizar que las coordenadas registradas correspondan de manera exacta al punto geodésico o topográfico de interés. Durante la sesión de observación, que puede variar desde unas pocas

horas hasta más de 24 horas, el receptor registra de manera continua los observables, que incluyen tanto pseudodistancias medidas por código como observaciones de fase de portadora.

El posicionamiento estático convencional es la modalidad más precisa, donde las sesiones de observación suelen durar varias horas, permitiendo la resolución completa de la ambigüedad de fase y la reducción de errores atmosféricos mediante modelos de ionosfera y troposfera o mediante técnicas de observación dual-frecuencia. Esta modalidad se emplea ampliamente en geodesia y estudios científicos, donde se requiere máxima exactitud en la determinación de coordenadas

El procesamiento de datos en posicionamiento estático se realiza generalmente en post-proceso utilizando software especializado, El software aplica algoritmos para la resolución de ambigüedad de fase, corrección de errores orbitales, ajustes de retraso ionosférico y troposférico, y cálculo de coordenadas finales.

Las ventajas del posicionamiento estático incluyen su alta precisión, confiabilidad, estabilidad de coordenadas y capacidad de eliminar la mayoría de los errores sistemáticos mediante observaciones prolongadas y técnicas de diferencia. Es ideal para aplicaciones geodésicas, topográficas, de monitoreo estructural y cartografía profesional, así como para estudios científicos de deformaciones terrestres, movimientos tectónicos y modelado de fenómenos geodinámicos. Sus limitaciones son principalmente la necesidad de tiempo prolongado de observación, la dependencia de visibilidad del cielo abierto, la sensibilidad a multipath en entornos urbanos o con vegetación, y la necesidad de equipos especializados y calibrados. Sin embargo, la combinación de precisión milimétrica, confiabilidad de resultados y capacidad de validación mediante estaciones base convierte al posicionamiento estático en la técnica más utilizada cuando la exactitud es prioritaria.

Posicionamiento estático rápido

El posicionamiento estático rápido constituye una modalidad de observación que busca equilibrar la alta precisión del posicionamiento estático convencional con la necesidad de eficiencia y rapidez en la obtención de coordenadas geográficas y geodésicas. A diferencia del posicionamiento estático tradicional, que requiere sesiones de observación prolongadas de varias horas para lograr exactitudes milimétricas o centimétricas, el posicionamiento Estático Rápido reduce significativamente el tiempo de adquisición de datos, manteniendo precisiones generalmente del orden centimétrico. Esta técnica resulta especialmente útil en

levantamientos topográficos profesionales, proyectos de ingeniería civil, replanteo de obras, control de calidad en construcción, cartografía detallada y cualquier aplicación en la que la rapidez de campo sea tan importante como la precisión de las coordenadas obtenidas. La base del posicionamiento Estático Rápido sigue siendo la observación de señales de satélites mediante receptores de alta calidad y antenas calibradas

El concepto central consiste en instalar el receptor en un punto fijo por períodos más cortos que en el posicionamiento estático convencional, típicamente de 10 a 60 minutos, tiempo suficiente para garantizar una resolución confiable de la ambigüedad de fase y obtener posiciones con exactitud centimétrica, mientras se minimiza el tiempo de operación en campo y se optimiza la eficiencia en levantamientos múltiples o en áreas extensas.

Entre las ventajas del posicionamiento Estático Rápido se destacan su eficiencia en campo, que permite reducir el tiempo de observación manteniendo una alta precisión; su compatibilidad con técnicas de fase de portadora, que garantiza resultados centimétricos.

Sin embargo, el posicionamiento Estático Rápido también presenta limitaciones que deben considerarse. La principal es que la reducción del tiempo de observación puede dificultar la resolución completa de la ambigüedad de fase en condiciones de baja visibilidad de satélites o geometría desfavorable, lo que podría afectar la precisión de la posición final.

El procesamiento de datos en posicionamiento Estático Rápido se realiza típicamente en post-proceso mediante software especializado, aunque existen soluciones que permiten procesar los datos en tiempo casi real utilizando técnicas de corrección diferencial.

Posicionamiento cinemático

El posicionamiento cinemático es una técnica avanzada de determinación de posición que permite conocer de forma continua la ubicación de un receptor que se encuentra en movimiento. A diferencia del posicionamiento estático, donde el receptor permanece fijo y se promedian las mediciones de satélites para reducir errores, en el posicionamiento cinemático se requiere medición instantánea y rápida de la señal, lo que permite obtener coordenadas precisas del receptor mientras se desplaza. Esta técnica es especialmente útil en aplicaciones donde la velocidad y la movilidad son factores críticos, como en topografía móvil, agricultura de precisión, seguimiento de vehículos, navegación marítima, aviación, y en general en todos los sistemas que requieren posicionamiento en tiempo real con alta precisión. En este tipo de posicionamiento, se utilizan principalmente observables de fase de

la portadora. El uso de la fase de la portadora permite alcanzar precisiones del orden de centímetros o incluso milímetros.

En comparación con el posicionamiento estático, el cinemático permite movilidad y actualización inmediata, sacrificando ligeramente la robustez frente a interrupciones momentáneas. Frente al posicionamiento absoluto por código, ofrece mayor precisión y confiabilidad,

En posicionamiento cinemático la estación base permanece fija en un punto conocido, mientras que el receptor móvil registra continuamente su posición a medida que se mueve. Este procedimiento permite determinar trayectorias o posiciones sucesivas de un objeto en movimiento. Existen varias modalidades de posicionamiento cinemático, cada una con características, requisitos y aplicaciones específicas que el profesional debe conocer para elegir la más adecuada según el proyecto.

Cinemático Puro o Continuo

Es la modalidad más básica del posicionamiento en movimiento. El receptor registra posiciones de forma ininterrumpida mientras se desplaza, sin detenerse en ningún punto en particular.



Figura 20. Posicionamiento cinemático continuo. Navegación de transectas para realizar cálculos batimétricos. Fotografía tomada por el autor (2020).

Se utiliza principalmente para el relevamiento de elementos lineales como caminos, ríos, tendidos eléctricos, oleoductos o costas. La precisión varía según la cantidad de satélites

visibles, la geometría satelital y las condiciones del entorno en cada instante del recorrido. Es una modalidad de alta productividad pero de menor exactitud relativa comparada con otras técnicas cinemáticas.

Stop and Go

Esta modalidad combina el desplazamiento libre con detenciones breves en los puntos de interés. El principio fundamental de este método consiste en combinar las ventajas del posicionamiento estático con la velocidad del trabajo cinemático.

El receptor se traslada entre puntos pero se detiene entre dos y cinco segundos en cada vértice para registrar la observación. Ofrece precisión centimétrica y resulta ideal para relevar grandes cantidades de puntos discretos como mojones, postes de alumbrado, árboles o vértices de parcelas. Requiere una inicialización correcta antes de comenzar el trabajo y exige que la señal satelital no se interrumpa durante todo el recorrido, ya que cualquier pérdida de señal obliga a reinicializar el equipo desde cero.



Figura 21. Posicionamiento cinemático, Stop and Go, **A.** para el relevamiento de líneas de costa. **B.** para la determinación de pendientes en acequias. Fotografía tomada por el autor (2001 y 2026 respectivamente).

El procedimiento de trabajo comienza con una inicialización, que es la etapa más crítica del método. Antes de comenzar a levantar puntos, el receptor móvil debe resolver las

ambigüedades de fase de la señal satelital, proceso que generalmente se realiza sobre un punto conocido o mediante técnicas como el OTF (On The Fly). Una vez inicializado correctamente, el equipo está listo para comenzar el levantamiento. Es fundamental que durante todo el recorrido el receptor no pierda la señal de los satélites, ya que una interrupción obliga a reinicializar el equipo desde cero, lo que representa una pérdida de tiempo considerable en campo.

Posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK).

El posicionamiento cinemático en tiempo real, más conocido por sus siglas RTK (Real Time Kinematic), constituye una de las técnicas más avanzadas de navegación y georreferenciación, destinada a obtener posiciones precisas y continuas de receptores en movimiento. A diferencia de otros métodos, como el posicionamiento estático o diferencial convencional, el RTK permite alcanzar precisiones del orden de centímetros o incluso milímetros en tiempo real, lo que lo hace indispensable en aplicaciones profesionales de topografía, construcción, agricultura de precisión, monitoreo de infraestructura y navegación avanzada. Esta técnica se basa en la combinación de observaciones de fase de la portadora y correcciones diferenciales transmitidas desde un receptor base a un receptor móvil, permitiendo corregir errores comunes y superar limitaciones de otros métodos de posicionamiento.



Figura 22. Equipo de Relevamiento Cinemático con RTK. Fotografías tomadas por el autor (2022 y 2025).

Correcciones Diferenciales

Son ajustes aplicados a las mediciones de un receptor móvil para reducir o eliminar errores comunes de las señales satelitales, aumentando así la precisión del posicionamiento. Se

generan a partir de un receptor base fijo, cuya posición es conocida con exactitud. Este receptor compara su posición calculada mediante GNSS con su posición real y determina las diferencias, que reflejan errores debidos a factores como relojes satelitales, retrasos ionosféricos y troposféricos, y pequeñas desviaciones orbitales.

Estas diferencias se transmiten al receptor móvil mediante radio, Internet o redes NTRIP. El receptor móvil aplica las correcciones a sus propias observaciones, obteniendo posiciones mucho más precisas que si utilizara únicamente las señales sin ajustar.

Ejemplo práctico, Si un receptor base se encuentra exactamente en el punto conocido ($X=100$, $Y=200$), pero con la señal GNSS calcula ($X=100.5$, $Y=199.3$), las correcciones diferenciales serían $\Delta X = -0.5$ y $\Delta Y = +0.7$. Al aplicar estas correcciones al receptor móvil, este ajusta su posición y obtiene una medida más cercana a la posición real.

En un sistema RTK clásico intervienen principalmente dos receptores: uno llamado receptor base, que se encuentra en una posición conocida y fija, y otro llamado receptor móvil, que puede desplazarse por el terreno. El receptor base calcula continuamente sus observaciones y las compara con su posición conocida para generar correcciones diferenciales, que incluyen ajustes por errores de reloj, ionosfera, troposfera y pequeñas desviaciones orbitales de los satélites. Estas correcciones se transmiten al receptor móvil mediante enlaces de comunicación en tiempo real, como radio UHF, Internet móvil o protocolos NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), permitiendo que el receptor móvil aplique las correcciones y determine su posición con precisión centimétrica instantánea.

La precisión del RTK depende de varios factores interrelacionados. Primero, la geometría de los satélites, que se mide mediante el DOP (Dilution of Precision), influye directamente en la exactitud de la posición; cuanto mejor distribuida esté la constelación sobre el cielo, menor será el error posicional. Segundo, la distancia entre el receptor base y el receptor móvil, conocida como línea base, afecta la fiabilidad de las correcciones: mientras más corta sea, menor será el efecto de errores ionosféricos y troposféricos no corregidos. Por esta razón, en aplicaciones de alta precisión se recomienda que la base esté situada a menos de 10–20 Km. del receptor móvil,

El RTK ofrece ventajas significativas sobre otros métodos de posicionamiento, especialmente en aplicaciones donde la movilidad y la precisión son críticas. En topografía, permite realizar levantamientos de terreno con desplazamiento continuo, evitando la necesidad de establecer puntos estáticos prolongados, lo que reduce tiempos y costos. En agricultura de precisión, se utiliza para guiar maquinaria como tractores, sembradoras o pulverizadoras, asegurando que las líneas de trabajo sean exactas y superpuestas

correctamente, lo que optimiza el uso de insumos y maximiza la productividad. En ingeniería civil, facilita el control de maquinaria pesada y la ejecución de obras lineales como carreteras, puentes y redes de tuberías con tolerancias milimétricas, mientras que, en navegación marítima y aérea, permite la orientación de embarcaciones o aeronaves en rutas precisas, incluso en condiciones de baja visibilidad.

No obstante, el RTK también enfrenta limitaciones y desafíos técnicos. La principal es la dependencia de enlaces de comunicación confiables entre la estación base y el receptor móvil; si el enlace falla, la precisión se degrada rápidamente.

Tabla 2. Comparación entre métodos de posicionamiento. Elaboración propia.

Forma de observación	Movilidad del receptor	Tiempo de observación	Precisión típica	Aplicaciones principales
Estático	Fijo	Horas	Milimétrica	Geodesia, monitoreo, cartografía
Estático Rápido	Fijo	Minutos a 1 hora	Centimétrica	Topografía profesional
Cinemático	Móvil	Continuo	Centimétrica	Levantamientos de carreteras, agricultura de precisión
RTK	Móvil	Tiempo real	Centimétrica	Navegación precisa, construcción

4.- SEGÚN EL MOMENTO DEL PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de datos en GNSS constituye una etapa fundamental dentro de la determinación de posiciones, ya que define cómo se transforman las observaciones crudas registradas por los receptores en coordenadas georreferenciadas precisas. Este procesamiento puede clasificarse en dos grandes modalidades: el procesamiento en tiempo real y el post-procesamiento, cada uno con características, ventajas y limitaciones específicas que condicionan su uso según el tipo de aplicación.

Procesamiento en Tiempo Real

Se caracteriza por proporcionar coordenadas prácticamente instantáneas, es decir, en el mismo momento en que el receptor está captando las señales satelitales. Este enfoque es esencial en aplicaciones donde la inmediatez es un requisito crítico, como en la topografía operativa, la agricultura de precisión o la navegación. Técnicas como el RTK (Real Time Kinematic) o el NRTK (Network RTK) se apoyan en este tipo de procesamiento, donde un receptor base transmite correcciones diferenciales al receptor móvil mediante enlaces de comunicación (radio, Internet o redes celulares). Estas correcciones permiten compensar

errores comunes, como los derivados de la atmósfera, las órbitas satelitales o los relojes, alcanzando precisiones centimétricas.

Sin embargo, el procesamiento en tiempo real presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, depende fuertemente de la disponibilidad de comunicación continua entre la base y el rover, lo cual puede ser problemático en zonas rurales o áreas con bosques densos. Además, la distancia entre los receptores influye directamente en la calidad de las correcciones: a mayor distancia, menor correlación de errores y, por lo tanto, menor precisión. También puede verse afectado por interrupciones en la señal GNSS o por condiciones adversas del entorno, como multipath o cobertura vegetal densa.

Post-procesado

El post-procesamiento implica el almacenamiento de las observaciones GNSS para ser procesadas posteriormente mediante software especializado. Este método permite un análisis más riguroso de los datos, ya que se pueden aplicar modelos más sofisticados de corrección, utilizar efemérides precisas y realizar controles de calidad detallados. Como resultado, el post-procesamiento suele ofrecer una mayor precisión que el procesamiento en tiempo real, especialmente en aplicaciones geodésicas o científicas.

Una de las principales ventajas del post-procesamiento es su independencia de la comunicación en campo. Esto lo hace especialmente útil en zonas remotas o de difícil acceso, donde no es posible establecer enlaces de datos confiables. Además, permite reprocesar la información en caso de detectar errores o inconsistencias, lo cual es clave en trabajos de alta precisión. No obstante, su principal desventaja es la falta de inmediatez: los resultados no están disponibles en el momento, lo que puede ser una limitación en trabajos operativos.

En la actualidad, existen también soluciones híbridas que combinan ambos enfoques. Por ejemplo, algunos sistemas permiten obtener soluciones en tiempo real y luego refinarlas mediante post-procesamiento, mejorando así la precisión final.

Caso de Estudio: Red RAMSAC



Figura 23. Logotipo de la red RAMSAC. Instituto Geográfico Nacional, (2026)

El posicionamiento mediante sistemas globales de navegación por satélite ha transformado de manera radical la práctica de la geodesia, la cartografía, la ingeniería y prácticamente cualquier disciplina que requiera conocer la posición de un punto sobre la superficie terrestre. Sin embargo, la calidad de un posicionamiento no depende únicamente del receptor utilizado ni de la cantidad de satélites disponibles en el cielo: depende, de manera crítica, de la existencia de una infraestructura terrestre de referencia que permita corregir los errores sistemáticos inherentes a la técnica y vincular los resultados a un marco de referencia geodésico preciso y legalmente reconocido. En Argentina, esa infraestructura es la Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo, conocida como RAMSAC, administrada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Mackern, M. V. (2022), en su publicación “Las estaciones permanentes GNSS un gran paradigma en la Geodesia. Una mirada desde Argentina y América Latina, en los últimos 30 años”, realiza un análisis de los distintos sistemas de referencia utilizados en Argentina hasta llegar a la situación actual, en donde la red nacional RAMSAC forma parte de la red Continental SIRGAS, (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas), de esta forma se introduce a la red nacional el marco de referencia internacional y se mantiene su monitoreo en el tiempo.

RAMSAC es una red de estaciones GNSS permanentes distribuidas en todo el territorio nacional, incluyendo la Antártida, que operan de forma continua e ininterrumpida capturando señales de las distintas constelaciones de satélites disponibles. Sus datos alimentan el marco de referencia geodésico nacional POSGAR 2007, habilitan el servicio de correcciones diferenciales en tiempo real RAMSAC-NTRIP y sostienen un conjunto

creciente de aplicaciones científicas y prácticas. Comprender cómo funciona RAMSAC, por qué existe y qué beneficios concretos aporta al posicionamiento es un requisito fundamental para cualquier profesional en Argentina.

Anteriormente analizamos las técnicas de posicionamiento relativo o diferencial, que explotan el hecho de que dos receptores situados en zonas geográficamente próximas experimentan errores muy similares. Si se coloca un receptor sobre un punto de coordenadas conocidas (la estación base o de referencia) y se calcula la diferencia entre las pseudodistancias observadas y las pseudodistancias teóricas correspondientes a esa posición conocida, se obtienen correcciones diferenciales que, transmitidas al segundo receptor (el receptor móvil o rover), permiten cancelar en gran medida los errores comunes. Con esta técnica, conocida como DGPS o, en su versión de mayor precisión usando portadora de fase, como RTK (Real Time Kinematic), es posible alcanzar precisiones centimétricas o incluso milimétricas. El factor limitante es que esta corrección solo es válida en la vecindad de la estación base: a medida que aumenta la distancia entre base y rover, los errores dejan de ser correlacionados y la corrección pierde eficacia.

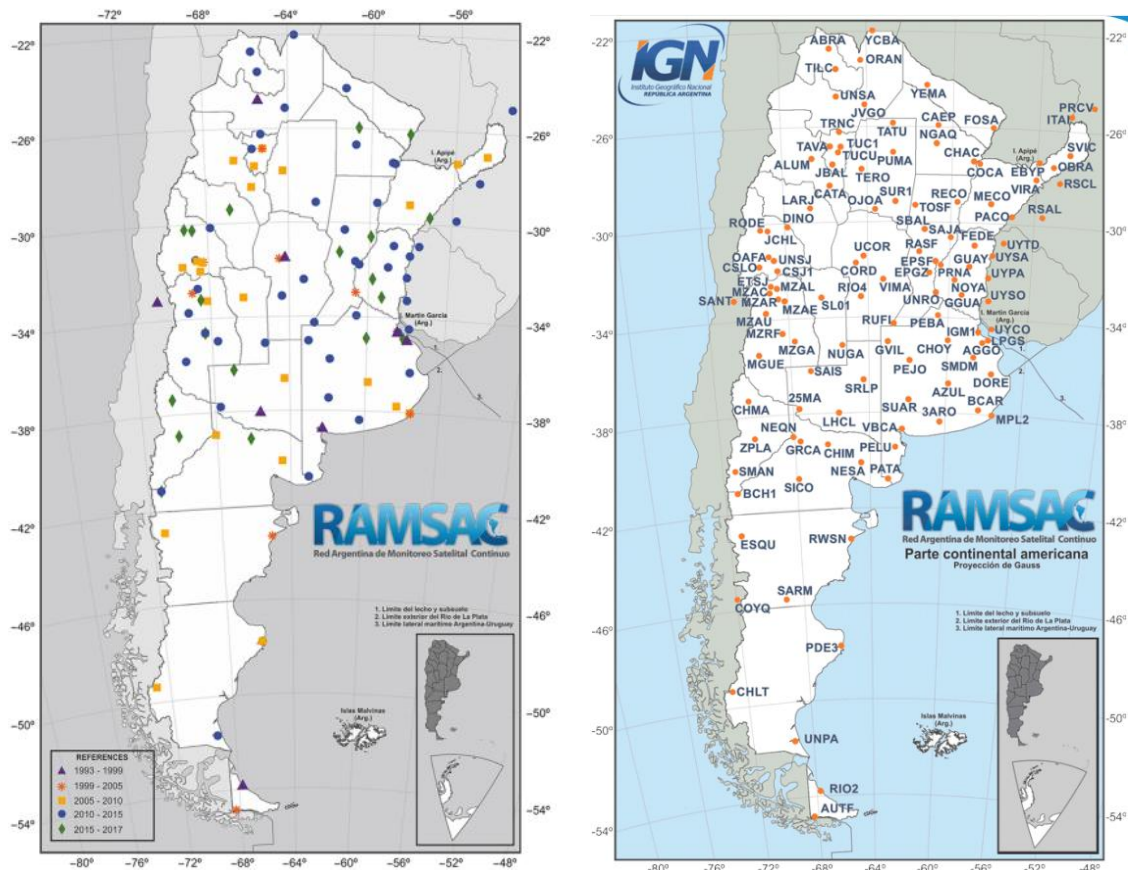


Figura 24. Evolución temporal de la red RAMSAC. Piñón. (2018 & 2021).

Aquí es donde RAMSAC adquiere su relevancia central para el posicionamiento en Argentina, al distribuir estaciones permanentes por todo el territorio, la red hace posible que cualquier usuario acceda a una estación de referencia relativamente cercana, obteniendo correcciones diferenciales de alta calidad sin necesidad de instalar su propio equipo base.

RAMSAC: estaciones, datos y procesamiento

Cada estación permanente de RAMSAC está compuesta por un receptor geodésico de doble o triple frecuencia, una antena calibrada con precisión milimétrica instalada sobre un monumento estable, un sistema de almacenamiento de datos, una conexión a Internet y una fuente de alimentación ininterrumpida. Los datos capturados por cada estación se registran en formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format), el estándar internacional para el intercambio de observaciones GNSS en bruto. Este formato garantiza la interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes y permite que los datos sean procesados por cualquier software científico o comercial. Los archivos RINEX contienen, para cada instante de observación, las pseudodistancias de código y las mediciones de fase de portadora de todos los satélites visibles.

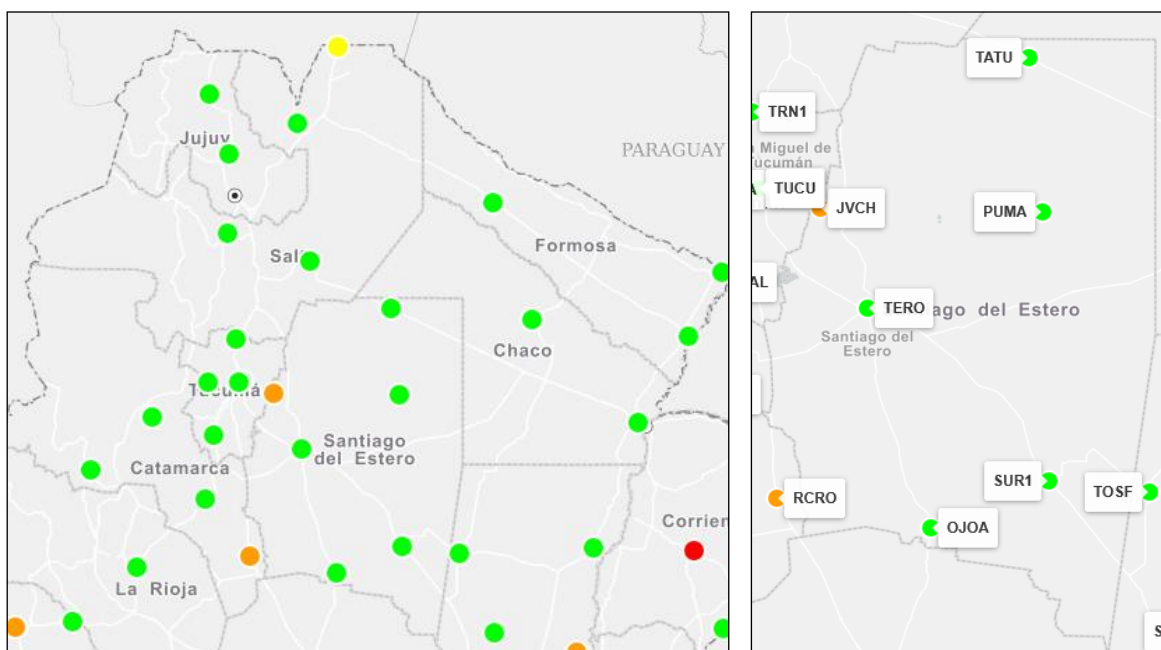


Figura 25. Estaciones Ramsac en el Norte Argentino y en Santiago del Estero. Instituto Geográfico Nacional. (2026)

La integración de RAMSAC en la red continental SIRGAS añade un nivel adicional de rigor al sistema. Esta participación vincula las coordenadas de RAMSAC directamente al Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), que es la realización más precisa del sistema

de referencia global. En términos prácticos, esto significa que las coordenadas que un usuario obtiene al trabajar con RAMSAC están directamente referidas al mismo sistema que utilizan los datos satelitales, los modelos globales de geoides y los sistemas de información geográfica de todo el mundo, garantizando la coherencia y la interoperabilidad a escala global.

RAMSAC-NTRIP: Posicionamiento de precisión en tiempo real

El servicio RAMSAC-NTRIP es, desde la perspectiva del usuario de campo, la contribución más directamente útil de la red al posicionamiento GNSS cotidiano. NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) es un protocolo que permite transmitir correcciones en tiempo real a través de Internet.

El servicio RAMSAC-NTRIP del IGN actúa como un servidor que recibe las observaciones de todas las estaciones permanentes de la red, calcula correcciones diferenciales y las distribuye a los usuarios registrados que se conectan desde sus receptores mediante una conexión de datos móviles.

Raffo, Agutin (2014), dice que la diferencia fundamental entre RAMSAC-NTRIP y RAMSAC. Es que NTRIP permite obtener coordenadas precisas en tiempo real, no hace falta realizar un procesamiento en la oficina y que NTRIP resulta un método expeditivo y preciso para el relevamiento ya que posibilita el uso de GPS para replantear en forma eficiente y de menor costo (no hay necesidad de tener dos equipos con radio UHF).

Por su parte Piñón, D. A. (2021), confirma que si se compara NTRIP con el método Cinemático Tradicional, el tiempo mínimo para lograr Soluciones Fijas se reduce notablemente.

Las implicancias prácticas de RAMSAC-NTRIP para los usuarios de campo son enormes. Antes de la existencia del servicio, obtener un posicionamiento RTK requería disponer de un segundo receptor geodésico (el equipo base), instalarlo sobre un punto de coordenadas conocidas, configurar una radio de transmisión de datos y operar ambos receptores de forma simultánea. Este procedimiento era costoso, logísticamente complejo y limitaba el alcance de la sesión de trabajo al radio de transmisión de la radio, típicamente inferior a los 5 o 10 kilómetros. Con RAMSAC-NTRIP, el usuario necesita un único receptor con conectividad de datos, se registra gratuitamente en el portal del IGN, obtiene sus credenciales de acceso y comienza a recibir correcciones en tiempo real.

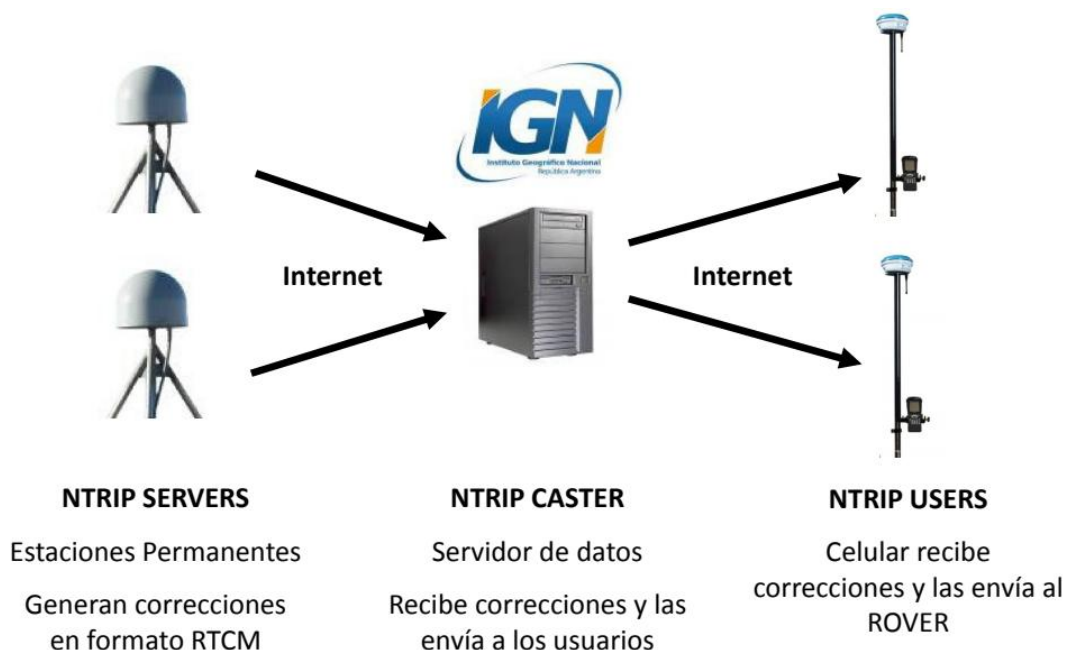


Figura 26. RAMSAC – NTRIP, Raffo, Agustin. (2014).

Cómo acceder a RAMSAC: recursos y herramientas

El portal Web del IGN ofrece acceso completamente gratuito a los recursos de RAMSAC. (<https://www.ign.gov.ar/nuestrasactividades/geodesia/ramsac/descargarinex>).

Los archivos RINEX de todas las estaciones de la red están disponibles para descarga mediante un formulario que permite seleccionar la estación, el período temporal y el intervalo de muestreo deseado. Esta disponibilidad gratuita de datos geodésicos de alta calidad es un insumo pedagógico de gran valor: cualquier estudiante puede descargar datos reales de RAMSAC y procesarlos.

DESCARGA DE ARCHIVOS RINEX

Para descargar los archivos de las estaciones seleccione las mismas de acuerdo al nombre y luego indique el formato de fecha o día GPS que desea bajar. Ante la ausencia de algún archivo envíe un mail a ramsac@ign.gov.ar

Descargue el programa y el instructivo de descompactación clickeando en los siguientes links: [PROGRAMAS - INSTRUCTIVO](#)

Filtros de búsqueda ▲

Estación: TERO Intervalo: 5 segundos

Buscar por: Fecha Desde: 03 / 02 / 2026 Hasta: 03 / 02 / 2026

Incluir archivos de navegación en la búsqueda

Buscar

Archivos de Observación TERO

- tero0610.26d.Z | Fecha: 02/03/2026

Figura 27. Interfase de descarga de archivos RINEX.

Caso de Estudio. Análisis de especificaciones de Receptores GNSS Bifrecuencia.

El análisis de un folleto (datasheet) de un receptor GNSS bifrecuencia moderno constituye un paso fundamental para comprender sus capacidades reales de posicionamiento, su precisión potencial y las limitaciones operativas del equipo. Los fabricantes de receptores como Trimble, Leica Geosystems, Topcon, etc. suelen presentar en sus hojas técnicas una serie de parámetros que describen el rendimiento del receptor en distintos modos de posicionamiento, las características del hardware, la compatibilidad con constelaciones satelitales y las tolerancias de error esperadas en condiciones ideales. Sin embargo, interpretar correctamente estos datos requiere un análisis, ya que muchas especificaciones corresponden a condiciones óptimas de laboratorio y no necesariamente reflejan el comportamiento en entornos reales de medición.



Figura 28. GPS Trimble R12i

ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO		
MEDICIÓN GNSS		
	<p>Rastreo de señales flexible independiente de la constelación, posicionamiento mejorado en entornos difíciles¹ e integración de mediciones inerciales con tecnología Trimble ProPoint GNSS.</p> <p>Mayor productividad de replanteo y mediciones y rastreabilidad con compensación de la inclinación basada en el IMU mediante tecnología Trimble TIP™</p> <p>Chips GNSS topográficos personalizados Trimble avanzados con 672 canales</p> <p>Reducción del tiempo de inactividad causado por la pérdida de señales de radio o de la conectividad móvil con la tecnología Trimble xFill</p> <p>Las siguientes señales se rastrean simultáneamente:</p> <p>GPS: L1C, L1C/A, L2C, L2E, L5 GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3 SBAS (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS): L1C/A, L5 Galileo: E1, E5A, E5B, E5 AltBOC, E6² BeiDou: B1, B1C, B2, B2A, B2B, B3 QZSS: L1C/A, L1S, L1C, L2C, L5, L6 NavIC (IRNSS): L5 Banda L: Correcciones Trimble RTX™</p> <p>El filtro de iridio de más de 1616 MHz permite usar la antena a una distancia de 20 m del transmisor de iridio</p> <p>El filtro japonés LTE por debajo de los 1510 MHz permite usar la antena a una distancia de 100 m de la torre de telefonía celular LTE japonesa</p> <p>Técnicas de procesador de señales digitales (DSP) para detectar y recuperar señales GNSS falsas</p> <p>Algoritmo de control autónomo de la integridad del receptor (RAIM) avanzado para detectar y rechazar medidas de satélite problemáticas y mejorar la calidad de posición</p> <p>Protección mejorada contra datos de efemérides incorrectos</p> <p>Velocidad de posicionamiento: 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, y 20 Hz</p>	
RENDIMIENTO DE POSICIONAMIENTO³		
LEVANTAMIENTO ESTÁTICO GNSS		
Estático de alta precisión		
	Horizontal	3 mm + 0,1 ppm RMS
	Vertical	3,5 mm + 0,4 ppm RMS
Estático y Estático Rápido		
	Horizontal	3 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertical	5 mm + 0,5 ppm RMS
LEVANTAMIENTO CINEMÁTICO EN TIEMPO REAL		
Línea base simple de menos de 30 km		
	Horizontal	8 mm + 1 ppm RMS
	Vertical	15 mm + 1 ppm RMS
RTK de red⁴		
	Horizontal	8 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertical	15 mm + 0,5 ppm RMS
	Tiempo de inicio RTK para precisiones especificadas ⁵	2 a 8 segundos
TECNOLOGÍA TRIMBLE INERTIAL PLATFORM (TIP)		
Topografía compensada mediante tecnología TIP⁶		
	Horizontal	RTK + 5 mm + 0,4 mm/° de inclinación (hasta 30°) RMS
Monitor de integridad IMU	Control de desviación	Temperatura, antigüedad y golpes
SERVICIOS DE CORRECCIÓN TRIMBLE RTX		
CenterPoint RTX⁷		
	Horizontal	2 cm RMS
	Vertical	5 cm RMS
	Tiempo de convergencia RTX para precisiones especificadas en regiones con Trimble RTX Fast	< 1 min
	Tiempo de convergencia RTX para precisiones especificadas en regiones sin RTX Fast	< 15 min
	Tiempo de convergencia RTX QuickStart para precisiones especificadas	< 1 min
TRIMBLE xFILL⁸		
	Horizontal	RTK ⁹ + 10 mm/minuto RMS
	Vertical	RTK ⁹ + 20 mm/minuto RMS
TRIMBLE xFILL PREMIUM⁸		
	Horizontal	3 cm RMS
	Vertical	7 cm RMS
POSICIONAMIENTO GNSS DIFERENCIAL DE CÓDIGO		
	Horizontal	0,25 m + 1 ppm RMS
	Vertical	0,50 m + 1 ppm RMS
	SBAS ¹⁰	Típico <5 m 3DRMS

Figura 29. Hoja de especificaciones del Trimble R12i

ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO	
MEDICIÓN GNSS	
Rastreo de señales flexible independiente de la constelación, posicionamiento mejorado en entornos difíciles e integración de mediciones inerciales con tecnología Trimble ProPoint GNSS.	
Mayor productividad de replanteo y mediciones y rastreadibilidad con compensación de la inclinación basada en el IMU mediante tecnología Trimble TIP™	
Chips GNSS topográficos personalizados Trimble avanzados con 672 canales	
Reducción del tiempo de inactividad causado por la pérdida de señales de radio o de la conectividad móvil con la tecnología Trimble xFill	
Las siguientes señales se rastrean simultáneamente:	GPS: L1C, L1C/A, L2C, L2E, L5 GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3 SBAS (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS): L1C/A, L5 Galileo: E1, E5A, E5B, E5 AltBOC, E6 ² BeiDou: B1, B1C, B2, B2A, B2B, B3 QZSS: L1C/A, L1S, L1C, L2C, L5, L6 NavIC (IRNSS): L5 Banda L: Correcciones Trimble RTX™
El filtro de iridio de más de 1616 MHz permite usar la antena a una distancia de 20 m del transmisor de iridio	
El filtro japonés LTE por debajo de los 1510 MHz permite usar la antena a una distancia de 100 m de la torre de telefonía celular LTE japonesa	
Técnicas de procesador de señales digitales (DSP) para detectar y recuperar señales GNSS falsas	
Algoritmo de control autónomo de la integridad del receptor (RAIM) avanzado para detectar y rechazar medidas de satélite problemáticas y mejorar la calidad de posición	
Protección mejorada contra datos de efemérides incorrectas	
Velocidad de posicionamiento	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, y 20 Hz

Figura 30. Detalle de hoja de especificaciones del Trimble R12i

En primer lugar, una hoja de datos o folleto de un receptor GNSS bifrecuencia moderno describe las constelaciones satelitales soportadas. Los equipos actuales suelen ser multiconstelación, lo que significa que pueden recibir simultáneamente señales provenientes de sistemas como GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou. En algunos casos también incluyen señales de sistemas regionales como QZSS o NavIC. La capacidad de trabajar con múltiples constelaciones aumenta significativamente la disponibilidad de satélites visibles y mejora la geometría de observación, lo que reduce el error asociado al Dilution of Precision (DOP). En términos prácticos, esto significa que el receptor puede mantener soluciones precisas incluso en entornos parcialmente obstruidos, como zonas urbanas o áreas con vegetación.

Otro elemento importante en el análisis de la hoja de datos es el número de canales del receptor. En generaciones anteriores de receptores GNSS, el número de canales determinaba cuántos satélites podían rastrearse simultáneamente. Los receptores modernos suelen disponer de cientos o incluso más de mil canales, lo que permite rastrear múltiples señales por satélite y múltiples constelaciones al mismo tiempo. Este aumento en la capacidad de rastreo mejora la redundancia de observaciones y contribuye a la estabilidad de la solución de posicionamiento.

Otro parámetro importante que aparece en las hojas técnicas es la tasa de actualización de posición, generalmente expresada en Hertz. Los receptores modernos pueden proporcionar soluciones de posicionamiento a frecuencias de 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz o incluso superiores. Una tasa de actualización más alta es particularmente útil en aplicaciones dinámicas, como

levantamientos cinemáticos, navegación autónoma o control de maquinaria. Sin embargo, el aumento de la frecuencia de actualización también implica mayores requerimientos de procesamiento y consumo energético.

RMS en GNSS

El término RMS proviene del inglés Root Mean Square, que en español se traduce como raíz cuadrática media o error cuadrático medio. En el contexto de la medición y el posicionamiento, especialmente en sistemas GNSS, el RMS es una medida estadística utilizada para cuantificar la magnitud promedio de los errores de medición.

Desde el punto de vista matemático, el RMS representa la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de un conjunto de errores o desviaciones respecto a un valor verdadero o esperado.

$$RMS = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_n^2}{n}}$$

El procedimiento implica tres pasos fundamentales:

- Elevar al cuadrado cada error, lo que elimina los signos negativos.
- Calcular el promedio de esos cuadrados.
- Extraer la raíz cuadrada del promedio obtenido.

El resultado es un valor que expresa la magnitud típica del error presente en un conjunto de mediciones.

En el campo del posicionamiento, el RMS se utiliza frecuentemente para describir la precisión de coordenadas. Cuando un receptor calcula repetidamente la posición de un mismo punto, las soluciones obtenidas no coinciden exactamente debido a errores de medición, efectos atmosféricos, multipath o limitaciones instrumentales. El RMS resume la dispersión de esas posiciones alrededor de la posición verdadera o de la posición promedio. Por ejemplo, si se mide repetidamente un punto con un receptor y se obtienen pequeñas variaciones en las coordenadas, el RMS horizontal puede indicar cuán dispersos están esos puntos en el plano. Un RMS horizontal de 1 cm significa que la dispersión típica de las observaciones respecto al valor medio es aproximadamente de un centímetro.

RENDIMIENTO DE POSICIONAMIENTO ³		
LEVANTAMIENTO ESTÁTICO GNSS		
Estático de alta precisión		
	Horizontal	3 mm + 0,1 ppm RMS
	Vertical	3,5 mm + 0,4 ppm RMS
Estático y Estático Rápido		
	Horizontal	3 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertical	5 mm + 0,5 ppm RMS
LEVANTAMIENTO CINEMÁTICO EN TIEMPO REAL		
Línea base simple de menos de 30 km		
	Horizontal	8 mm + 1 ppm RMS
	Vertical	15 mm + 1 ppm RMS
RTK de red ⁴		
	Horizontal	8 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertical	15 mm + 0,5 ppm RMS
Tiempo de inicio RTK para precisiones especificadas ⁵		2 a 8 segundos
POSICIONAMIENTO GNSS DIFERENCIAL DE CÓDIGO		
	Horizontal	0,25 m + 1 ppm RMS
	Vertical	0,50 m + 1 ppm RMS
	SBAS ¹⁰	Típico <5 m 3DRMS

Figura 31. Errores esperables según métodos de posicionamiento del Trimble R12i

En las hojas técnicas de receptores GNSS se suele expresar la precisión con fórmulas del tipo: XX mm + YY ppm RMS

Esto significa que el error esperado tiene dos componentes:

- Un error constante, en este caso XX mm.
- Un error proporcional a la distancia Línea Base, expresado en partes por millón (ppm).

La expresión ppm (partes por millón), representa un error proporcional a la distancia entre el receptor móvil y la estación base. Por ejemplo, a una distancia de 10 Km., el término 1 ppm, introduce 1 mm por cada Km. que aumenta la línea base. Por lo tanto con una línea base de 10 Km. el error será de 10 mm.

Para nuestro caso, en un posicionamiento Estático de Alta Precisión el RMS es:

Horizontal 3 mm + 0.1 ppm y en Vertical 3.5 mm + 0.4 ppm

si un Receptor rover se encuentra a 100 Km. de la estación base.

Horizontal $3 \text{ mm} + 0.1 * 100 = 13 \text{ mm}$ y Vertical $3.5 \text{ mm} + 0.4 \text{ ppm} * 100 = 43.5 \text{ mm}$

Por lo tanto, el error en Horizontal será 1.3 cm y en vertical de 4.35 cm

Es importante destacar que el RMS no representa el error máximo, sino una medida estadística promedio.

GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS EN EL TEXTO

TÉRMINO	DEFINICIÓN
ADQUISICIÓN	Etapa inicial en que el receptor GNSS busca e identifica las señales satelitales para comenzar a rastrearlas.
AJUSTE	Proceso matemático que minimiza errores residuales en observaciones geodésicas para obtener coordenadas más confiables.
ALGORITMO	Instrucciones matemáticas que el receptor GNSS aplica para calcular posición, velocidad y tiempo desde las señales recibidas.
ALMANAQUE	Datos aproximados de posición y estado de todos los satélites de una constelación, almacenados para agilizar la adquisición.
ALTITUD	Altura de un punto respecto al nivel medio del mar o a un datum vertical de referencia.
ALTURA ELIPSOIDAL	Distancia vertical desde la superficie del elipsoide de referencia (WGS84) hasta el punto, en metros.
ALTURA ORTOMÉTRICA	Distancia desde el geoide hasta el punto medida por la línea de gravedad; es la 'cota' usada en topografía.
AMBIGÜEDAD DE FASE	Número entero desconocido de ciclos completos de la onda portadora entre satélite y receptor al iniciar la observación.
ANTENA GNSS	Componente que capta las señales satelitales; su diseño y calibración inciden directamente en la precisión de las mediciones.
APLICACIONES GNSS	Usos prácticos de la navegación satelital: topografía, cartografía, agricultura de precisión, navegación y monitoreo ambiental.
ATMÓSFERA	Sus capas ionosférica y troposférica introducen retardos en la señal GNSS que afectan la precisión del posicionamiento.
AZIMUT	Ángulo horizontal medido desde el norte geográfico en sentido horario hasta la dirección de un satélite u objeto.
BASE (ESTACIÓN BASE)	Receptor GNSS sobre un punto de coordenadas conocidas que genera correcciones diferenciales para el receptor móvil.
BASELINE (LÍNEA BASE)	Vector tridimensional entre la estación base y el receptor móvil; su longitud limita la correlación de errores atmosféricos.
BIFRECUENCIA	Receptor que capta señales en dos frecuencias (L1 y L2), permitiendo modelar y corregir el retardo ionosférico.
BLOQUE DE SATÉLITES	Generación tecnológica de satélites dentro de una constelación GNSS (p. ej., Bloque IIR, IIF o III en GPS).
CANAL	Circuito del receptor dedicado al seguimiento de la señal de un satélite específico; los modernos tienen cientos de canales.
CARTESIANO (SISTEMA)	Sistema de coordenadas con ejes ortogonales X, Y, Z; en GNSS se usa en forma geocéntrica o en proyecciones planas.

CICLO	Unidad de fase de portadora equivalente a una longitud de onda completa (~19 cm en L1 del GPS).
CINEMÁTICO	Método donde el receptor se desplaza continuamente durante la observación, registrando coordenadas sucesivas.
CÓDIGO C/A	Señal pseudoaleatoria de baja precisión en L1, disponible libremente para uso civil en todos los receptores GPS.
CÓDIGO P	Señal pseudoaleatoria de alta precisión en L1 y L2, reservada originalmente para uso militar en GPS.
CÓDIGO PSEUDOALEATORIO (PRN)	Secuencia digital única por satélite que permite identificarlo y medir el tiempo de viaje de la señal.
CÓDIGO Y	Versión cifrada del Código P, inaccesible para receptores civiles sin módulo especial de descifrado.
CONSTELACIÓN	Conjunto total de satélites de un sistema GNSS en órbita; GPS opera con más de 30 en 6 planos orbitales.
COORDENADAS GEODÉSICAS	Latitud, longitud y altura elipsoidal que ubican un punto sobre el elipsoide de referencia terrestre.
CORRECCIÓN DIFERENCIAL	Ajuste calculado en la estación base y aplicado al receptor móvil para eliminar errores comunes (reloj, ionosfera, troposfera).
DELAY (RETARDO)	Tiempo adicional que tarda la señal GNSS por la ionosfera o troposfera, que reducen su velocidad de propagación.
DEFASE	Diferencia temporal entre el reloj del satélite y el del receptor; fuente de error en el cálculo de pseudodistancias.
dGPS	Differential GPS. Posicionamiento diferencial por código con estación base, que logra precisiones métricas o submétricas.
DIFERENCIAL (POSICIONAMIENTO)	Técnica con dos receptores simultáneos para reducir errores comunes, alcanzando precisiones centimétricas o decimétricas.
DILUTION OF PRECISION (DOP)	Parámetro que cuantifica cómo la geometría satelital amplifica los errores; valores bajos indican mayor precisión.
DISPONIBILIDAD	Capacidad del sistema GNSS de proveer señales útiles en un lugar y momento dados, afectada por obstrucciones y cobertura.
DISTANCIA	Longitud receptor-satélite calculada multiplicando el tiempo de viaje de la señal por la velocidad de propagación.
EFEMÉRIDES	Datos precisos de posición y órbita de cada satélite, transmitidos en el mensaje de navegación para calcular coordenadas.
EJES MEO	Medium Earth Orbit. Órbita a ~20.000 Km. usada por GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou.
ELIPSOIDE	Modelo matemático de la Tierra definido por sus semiejes; el más usado en GNSS es el WGS84.
ERROR	Diferencia entre el valor medido y el verdadero; en GNSS proviene de relojes, atmósfera, órbitas, multipath y ruido.

ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMS)	Medida estadística del error típico en un conjunto de mediciones; forma estándar de expresar precisión en GNSS.
ESTACIÓN PERMANENTE	Receptor GNSS fijo sobre un monumento estable que opera continuamente; componente básico de redes como RAMSAC.
FASE DE PORTADORA	Observable de alta precisión basado en la fase de la onda portadora; permite precisión centimétrica al resolver la ambigüedad entera.
FRECUENCIA	Ciclos por segundo de una señal electromagnética (Hz); las principales en GNSS son L1 (1575.42 MHz.) y L2 (1227.60 MHz.).
FRECUENCIA DUAL	Capacidad de captar L1 y L2 simultáneamente, lo que permite corregir el retardo ionosférico de primer orden.
GEODESIA	Ciencia que estudia la forma, dimensiones y campo gravitacional de la Tierra, y establece sistemas de referencia.
GEODÉSICO	Relativo a la geodesia o al elipsoide; una magnitud geodésica se expresa sobre la superficie del elipsoide de referencia.
GEOIDE	Superficie equipotencial del campo gravitacional terrestre que coincide con el nivel medio del mar; referencia para alturas ortométricas.
GEORREFERENCIACIÓN	Asignación de coordenadas geográficas a un objeto, imagen o dato para ubicarlo en un sistema de referencia.
IGN	Instituto Geográfico Nacional de Argentina. Organismo oficial de geodesia y cartografía; administra RAMSAC y POSGAR 2007.
INTERFERENCIA	Señal electromagnética no deseada que perturba la recepción GNSS, degradando o imposibilitando el posicionamiento.
INTEROPERABILIDAD	Capacidad de distintos sistemas o equipos para funcionar conjuntamente; en GNSS se garantiza con RINEX y RTCM.
IONOSFERA	Capa atmosférica (60–1000 Km.) ionizada por el sol que retarda la señal GNSS según su contenido de electrones (TEC).
ITRF	International Terrestrial Reference Frame. Marco global de máxima precisión al que se vinculan sistemas nacionales como POSGAR 2007.
LATENCIA	Retardo entre la generación y la disponibilidad de una corrección GNSS; crítico en aplicaciones en tiempo real como RTK.
LATITUD	Coordenada angular norte-sur de un punto respecto al ecuador, definida sobre el elipsoide de referencia.
LÍNEA BASE	Vector entre receptor base y receptor móvil en posicionamiento relativo; su longitud afecta la precisión obtenida.
LONGITUD	Coordenada angular este-oeste de un punto respecto al meridiano de Greenwich, sobre el elipsoide de referencia.
LONGITUD DE ONDA	Distancia entre crestas consecutivas de una onda; en L1 GPS es ~19 cm, determinando la resolución de mediciones de fase.
MARCO DE REFERENCIA	Sistema de coordenadas materializado con puntos físicos de alta precisión que sirve de base para las mediciones geodésicas.

MÁSCARA DE ELEVACIÓN	Ángulo mínimo sobre el horizonte por debajo del cual el receptor ignora señales satelitales de baja calidad o con multipath.
MONUMENTO GEODÉSICO	Estructura física estable (pilar o placa) sobre la que se instala una antena GNSS permanente, garantizando invariabilidad posicional.
MULTI-CONSTELACIÓN	Capacidad de rastrear simultáneamente satélites de GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou, mejorando geometría y disponibilidad.
MULTIPATH	Error por reflexión de la señal en edificios o suelo, que llega al receptor por caminos múltiples y distorsiona la distancia medida.
NAVEGACIÓN	Proceso de determinar y controlar la posición y trayectoria de un vehículo usando información de posición y velocidad GNSS.
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol. Transmite correcciones GNSS en tiempo real a través de Internet.
OBSERVABLE	Magnitud medida por el receptor GNSS: pseudodistancia (código) o fase de portadora, cada una con distinta precisión.
OBSERVACIÓN	Medición de pseudodistancia o fase realizada por el receptor GNSS para un satélite en un instante determinado.
ÓRBITA	Trayectoria del satélite alrededor de la Tierra; los satélites GNSS operan principalmente en MEO a ~20.000 Km.
PDOP	Position DOP. Indica el efecto combinado de la geometría satelital sobre la precisión tridimensional de la posición.
PORTADORA	Onda de radiofrecuencia sobre la que se modulan códigos y datos de navegación; sus frecuencias principales son L1, L2 y L5.
POSGAR 2007	Marco de referencia geodésico nacional de Argentina, vinculado a SIRGAS e ITRF, obligatorio por Ley 26.209.
POSICIONAMIENTO	Determinación de la ubicación de un punto en un sistema de referencia mediante señales satelitales u otras técnicas.
POSICIONAMIENTO ABSOLUTO	Coordenadas con un único receptor GNSS sin referencia externa; precisión típica de 3–10 m en condiciones normales.
POSICIONAMIENTO CINEMÁTICO	Receptor en movimiento que registra posiciones sucesivas con alta frecuencia usando observables de fase de portadora.
POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL	Combina receptor base y móvil para corregir errores comunes y mejorar significativamente la precisión del posicionamiento.
POSICIONAMIENTO ESTÁTICO	Receptor fijo durante horas sobre un punto; permite promediar errores y resolver ambigüedades con precisión milimétrica.
POSICIONAMIENTO RELATIVO	Dos receptores simultáneos calculan el vector entre ellos, logrando precisiones centimétricas o milimétricas.
PPP (POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO)	Técnica con efemérides y correcciones ultra-precisas del IGS que logra precisión centimétrica con un solo receptor.
PRECISIÓN	Grado de concordancia entre mediciones repetidas; indica consistencia de resultados, independiente de su exactitud.

PSEUDODISTANCIA	Distancia receptor–satélite calculada del retardo temporal de la señal, que incluye errores de reloj y atmosféricos.
RAMSAC	Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo. Red de estaciones permanentes del IGN que materializa POSGAR 2007 y brinda correcciones en tiempo real.
RECEPTOR GNSS	Dispositivo que captura y procesa señales satelitales para determinar posición, velocidad y tiempo del usuario.
RED DE REFERENCIA	Conjunto de estaciones GNSS permanentes coordinadas que proveen correcciones, mantienen el marco de referencia y dan servicios de posicionamiento.
RELOJ ATÓMICO	Oscilador de alta estabilidad (cesio o rubidio) en los satélites GNSS que garantiza la precisión temporal del sistema.
RESOLUCIÓN	Mínimo cambio de posición detectable por el receptor, relacionado con la precisión del observable utilizado.
RESOLUCIÓN DE AMBIGÜIDADES	Determinación del número entero de ciclos de portadora entre satélite y receptor, necesaria para precisión centimétrica.
RINEX	Receiver Independent Exchange Format. Formato estándar para almacenar e intercambiar observaciones GNSS en bruto, independiente del fabricante.
ROVER	Receptor GNSS móvil que recibe correcciones de la estación base para determinar posiciones precisas en el terreno.
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services. Estándar de mensajes para transmitir correcciones GNSS diferenciales en tiempo real.
RTK (REAL TIME KINEMATIC)	Posicionamiento diferencial en tiempo real con correcciones de fase de portadora, logrando precisión centimétrica instantánea.
SATÉLITE GNSS	Vehículo espacial en órbita que transmite señales de tiempo y posición para que los receptores determinen su ubicación.
SEGMENTO DE CONTROL	Estaciones terrestres que monitorean satélites, actualizan efemérides y corrigen relojes para garantizar el funcionamiento del sistema.
SEGMENTO DE USUARIO	Receptores GNSS civiles y militares que obtienen posición, velocidad y tiempo a partir de las señales satelitales.
SEGMENTO ESPACIAL	Constelación de satélites en órbita que forman el componente visible del sistema GNSS y emiten señales de navegación.
SEÑAL DE CÓDIGO	Señal GNSS basada en códigos pseudoaleatorios que permite medir pseudodistancias con precisión métrica o submétrica.
SEÑAL DE PORTADORA	Onda de radiofrecuencia continua, portadora de códigos y datos de navegación; su fase es el observable de mayor precisión.
SEÑAL GNSS	Onda de radiofrecuencia satelital con información de tiempo, posición e identificación utilizada para calcular posición.
SEÑAL L1	Frecuencia principal (1575.42 MHz.) de todos los sistemas GNSS; transporta los códigos C/A y P para posicionamiento civil.
SEÑAL L2	Segunda frecuencia GPS (1227.60 MHz.); combinada con L1 permite corregir el retardo ionosférico de primer orden.

SEÑAL L5	Tercera frecuencia GPS (1176.45 MHz.) para aplicaciones de seguridad crítica; mejora precisión y resistencia a interferencias.
SINCRONIZACIÓN	Alineación temporal entre los relojes de satélites y receptores GNSS, determinante para la exactitud del posicionamiento.
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. Marco geodésico continental vinculado al ITRF, referencia oficial en América Latina.
STOP AND GO	Modalidad cinemática donde el receptor se detiene brevemente en cada punto de interés antes de continuar el desplazamiento.
TRAYECTORIA	Conjunto de posiciones sucesivas de un receptor GNSS en movimiento que define su recorrido georreferenciado.
TRIANGULACIÓN	Método clásico que ubica un punto desconocido midiendo ángulos desde puntos conocidos con teodolitos o alidadas.
TRILATERACIÓN	Método geométrico que ubica un punto midiendo distancias desde referencias conocidas; principio fundamental de los sistemas GNSS.
TROPOSFERA	Capa atmosférica baja (0–12 Km.) que introduce retardos en la señal GNSS por temperatura, presión y humedad.
VECTOR	En posicionamiento relativo, magnitud tridimensional entre la base y el receptor móvil (también llamado línea base o baseline).
VELOCIDAD	En GNSS, tasa de cambio de posición calculada por el efecto Doppler de las señales satelitales; se expresa en m/s o Km./h.
VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN	Velocidad de la señal GNSS en el vacío, igual a la velocidad de la luz (~299.792 Km./s); convierte tiempo en distancia.
WGS84	World Geodetic System 1984. Elipsoide y sistema de referencia geocéntrico global base del GPS y la mayoría de sistemas GNSS.

Fuente: elaborado a partir del contenido de la Serie Didáctica GPS v4 (sin glosario)

BIBLIOGRAFIA

- Brinker, R. C., & Wolf, P. R. (2007). *Topografía moderna*. Alfaomega.
- Campbell, J., & Wynne, R. (2014). *Introducción a la teledetección*. Guilford Press.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel.
- El Destape. (2026). El Destape Web. <https://cdn.eldestapeweb.com/eldestape/012026/1768002940517.webp>
- García Álvarez, D. A. (2008). *Sistema GNSS*. [Editorial no especificada].
- Ghilani, C., & Wolf, P. (2012). *Topografía primaria*. Pearson Education.
- Gobierno de la Provincia de Córdoba. (2026). *Faros de conservación* [Fotografía]. Portal de Noticias del Gobierno de Córdoba. <https://prensa.cba.gov.ar/wp-content/uploads/2026/01/Faros-de-Conservacion-1024x698.jpeg>
- Gracia, A. L. M. (2017). *Aplicaciones forestales de los datos LiDAR-PNOA en ambiente mediterráneo: Su filtrado e interpolación y el modelado de parámetros estructurales con apoyo en trabajo de campo*. Servicio de Publicaciones Universidad de Zaragoza.
- Henrico VA. (2020). *Fire tower at Old Williamsburg and Meadow Roads* [Fotografía]. Facebook. <https://www.facebook.com/photo/?fbid=1369879516537103>
- Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G. (2005). *GPS, posicionamiento satelital*. Universidad Nacional de Rosario.
- Instituto Geográfico Nacional de Argentina. (2024). *RAMSAC – Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo*. <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac>.
- Instituto Geográfico Nacional. (2026). *Logo RAMSAC* [Logotipo]. <https://www.ign.gov.ar/archivos/geodesia/logos/RAMSAC.png>
- Instituto Geográfico Nacional. (2026b). *Mapa de estaciones RAMSAC* [Imagen]. <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/Mapa>
- Mackern, M. V. (2022). Las estaciones permanentes GNSS, un gran paradigma en la Geodesia: Una mirada desde Argentina y América Latina, en los últimos 30 años. *Geoacta*, 43, 80–90. <https://revistas.unlp.edu.ar/geoacta/article/view/14312>

- Mettatec. (2023). *4 GNSS constellations* [Ilustración]. Mettatec Blog. <https://en.mettatec.com/how-many-channels-does-a-gnss-receiver-need/>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de información geográfica*. Universidad de Extremadura.
- Ortiz Reyes, A. D., Valdez Lazalde, J. R., Ángeles Pérez, G., Birdsey, R., & Peduzzi, A. (2015). *Avances y perspectivas de geomática con aplicaciones ambientales, agrícolas y urbanas: Lidar aerotransportado para el manejo de recursos forestales*. Editorial del Colegio de Postgraduados.
- Piñón, D. A. (2021). *Establecimiento de la Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (RAMSAC)* [Presentación de diapositivas]. Taller "Hacia el establecimiento de la Red GNSS Continua de República Dominicana", Instituto Geográfico Nacional.
- Piñón, D. A., Gómez, D. D., Smalley, R., Jr., Cimbaro, S. R., Lauría, E. A., & Bevis, M. G. (2018). The history, state, and future of the Argentine Continuous Satellite Monitoring Network and its contributions to geodesy in Latin America. *Seismological Research Letters*, 89(4), 1379–1389. <https://doi.org/10.1785/0220170162>
- PROCISUR. (2014). *Manual de agricultura de precisión*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Raffo, A., Piñón, D., & Cimbaro, S. (2014). *Servicios RAMSAC y RAMSAC-NTRIP*. Instituto Geográfico Nacional de Argentina. <https://www.ign.gob.ar/content/servicios-ramsac-y-ramsac-ntrip>
- RUNCO. (2026). *Estación total Trimble C5* [Fotografía de producto]. Tiendanube. <https://dcdn-us.mitiendanube.com/stores/002/202/092/products/trimble-c5-011-8b611c10d3caeb2a3016613624112535-640-0.webp>
- Sanjuán Fernández, C. (2016). *Instrumentación aplicada a la edificación* [Imagen]. Patologías de la Construcción. <https://www.patologiasconstruccion.net/wp-content/uploads/2016/05/instrumentacion-aplicada-edificacion.jpg>
- Scaramuzza, F., Accoroni, C., Méndez, A., Villarroel, D., & Vélez, J. (2016). El potencial de la agricultura de precisión actual y futuro. *Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario*.

Vayreda, J., Batlles, C., Lerner, M., Vila, B., Pescador, D. S., Chacón-Labela, J., & Lloret, F. (2019). *Desarrollo de un procedimiento estandarizado para generar datos de las variables ecológicas estructurales que permitan estimar el estado de conservación de los tipos de bosque y matorral utilizando como fuente de datos la tecnología LiDAR*. Ministerio para la Transición Ecológica.

Vilchez Benigno, S., & Seco Granados, G. (2019). *Descripción y representación de las señales GPS* [Trabajo Fin de Máster]. [Universidad no especificada].

DECLARACIÓN

Esta Serie Didáctica surge en un momento de transformación tecnológica, en el que las herramientas de inteligencia artificial han pasado de ser instrumentos experimentales a integrarse de manera cotidiana en los procesos de escritura, investigación y producción del conocimiento. Esta realidad no puede ser ignorada ni ocultada por quienes participan del ámbito académico, razón por la cual resulta imprescindible declarar con total transparencia en qué medida se han utilizado estas tecnologías en la elaboración del presente documento

A lo largo del proceso de elaboración de este trabajo, se recurrió a herramientas de inteligencia artificial como apoyo en distintas etapas de la redacción, organización del contenido, e incluso para la generación de algunas imágenes. No obstante, en ningún momento se concibió la inteligencia artificial como un agente autónomo de escritura ni como un reemplazo de la capacidad crítica y analítica del autor.

Su función fue siempre la de un asistente de apoyo, cuyas propuestas fueron evaluadas, filtradas, corregidas e integradas según el criterio intelectual de quien firma el trabajo. Esta distinción es fundamental, porque define una postura clara respecto del lugar que ocupan estas tecnologías en el proceso académico, ya que pueden ser herramientas valiosas, pero nunca pueden sustituir el pensamiento, la formación ni la responsabilidad del autor, en este caso un docente que elabora un trabajo para ser usado como apuntes de clase.

La participación activa y central del autor en todas las etapas del desarrollo del documento fue constante e indelegable. Desde la definición del enfoque conceptual y la selección de los temas a desarrollar hasta la revisión final del texto, cada decisión relevante fue tomada por el autor, quien evaluó críticamente la pertinencia de los contenidos generados, corrigió los errores o imprecisiones detectados, adaptó los fragmentos propuestos al estilo del trabajo, e integró las distintas partes en un escrito coherente y articulado, incorporando conocimientos previos y criterios propios derivados de la formación académica.

Un aspecto que merece atención particular es el proceso de validación de la información generada ya que estas plataformas, si bien son capaces de producir textos fluidos y aparentemente bien fundamentados, no garantizan la exactitud científica, ni la coherencia con los marcos teóricos específicos de cada disciplina.

Un texto puede sonar convincente y estar equivocado, y eso representa uno de los mayores riesgos del uso de estas tecnologías en el ámbito académico. Para contrarrestar este riesgo, el autor realizó un proceso sistemático de revisión que incluyó contrastar la información con sus

conocimientos previos, y también consultando referencias bibliográficas para identificar posibles errores y/o ambigüedades conceptuales

Este trabajo de validación no fue una etapa accesoria del proceso, sino una condición necesaria para que el documento pudiera aspirar a los niveles de rigor y confiabilidad exigidos en la producción académica.

Desde el punto de vista ético, el uso de inteligencia artificial en la escritura académica abre interrogantes que la comunidad universitaria todavía está comenzando a debatir con la profundidad que el tema merece. La posibilidad de generar contenido puede convertirse, si no se opera con responsabilidad, en una vía para prácticas que erosionan la integridad académica. Frente a estos riesgos, el autor de este trabajo ha actuado guiado por principios que considera irrenunciables: la transparencia en el reconocimiento del uso de estas herramientas, la honestidad en la atribución de las ideas y las fuentes y el rigor en el cuidado de la calidad y la coherencia del contenido.

El presente trabajo, con su declaración incluida, aspira a ser un ejemplo de ese uso responsable. Es por ello que se aclara que las imágenes, figuras e ilustraciones reproducidas en este trabajo que no son de elaboración propia han sido referenciadas con la debida cita al pie o en el apartado de referencias bibliográficas, indicando: autor/a o institución, título de la obra o publicación de origen, año de publicación y fuente o enlace de acceso.

Para las imágenes, cuando no fue posible identificar con certeza la titularidad de los derechos o confirmar la existencia de una licencia de libre uso, se optó por la elaboración de diagramas y figuras propias, a fin de evitar cualquier vulneración de derechos de autor.

Los fragmentos de texto reproducidos de obras de otros autores han sido identificados con la correspondiente cita bibliográfica.

La reproducción de dichos fragmentos se realiza al amparo que permite la reproducción de breves extractos con fines científicos, didácticos o académicos, siempre que se cite la fuente.

El autor asume plena responsabilidad por el cumplimiento de las obligaciones derivadas del uso de materiales y declara que, en la medida de sus posibilidades, ha verificado la disponibilidad del material para su uso académico antes de su incorporación en este trabajo.

Si algún titular de derechos considerara que la inclusión de su material no se ajusta a las condiciones aquí expresadas, podrá comunicarlo al autor a fin de proceder a la corrección, eliminación o adecuada atribución del contenido en cuestión.