

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN



Trabajo Fin de Máster

Sistema de bajo coste para la adquisición y
representación de datos GPS aumentados

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Alexander Antonio Mateo Espinal

Tutor: David Anastasio de la Mata Moya

2019

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Trabajo Fin de Máster

Sistema de bajo coste para la adquisición y representación de datos
GPS aumentados

Autor: Alexander Antonio Mateo Espinal

Tutor: David de la Mata Moya

TRIBUNAL:

Presidente: Judith María Redoli Granados

Vocal1º: Bernardo Alarcos Alcázar

Vocal2º: David de la Mata Moya

Suplente: María Pilar Jarabo Amores

FECHA: 17/09/2019

Índice

Índice	3
Resumen	6
Abstract	6
Palabras Claves	6
Lista de Figuras	7
Lista de tablas	9
1. Introducción	10
1.1. Motivación del Trabajo Fin de Máster.....	10
1.2. Objetivos.....	11
1.3. Estructura sobre el desarrollo del Proyecto.....	11
2. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)	12
2.1. Introducción.....	12
2.2. Funcionamiento del GPS.....	12
2.3. Divisiones del GPS.....	14
2.4. Señal GPS.....	16
2.5. GPS DATA.....	18
2.5.1. RAW Navigation messages.....	18
2.5.2. Observables.....	19
2.5.3. NMEA.....	20
2.5.4. RTCM.....	21
2.5.5. UBX.....	22
2.5.6. RINEX.....	22
2.6. Fuentes de errores GPS.....	28
2.6.1. Errores de reloj.....	28
2.6.2. Errores ionosféricos.....	30
2.6.3. Errores troposféricos.....	30
2.6.4. Errores efemérides.....	31
2.6.5. Errores por Multitrayecto.....	34
2.7. Dilución de la precisión - (DOP).....	34
3. SISTEMAS AUMENTADOS GNSS	36
3.1. SBAS.....	36
3.1.1. EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay).....	38
3.1.2. WAAS (Wide Area Augmentation System).....	40

3.2.	GBAS.....	41
3.2.1.	Sistema de aumentación regional basada en Tierra (GRAS).....	41
3.2.2.	Sistemas de Posicionamiento GPS/GNSS en Tiempo Real de España.....	41
3.3.	DGPS.....	44
3.3.1.	Corrección Diferencial.....	45
3.3.2.	Metodologías de corrección.....	46
3.3.3.	DGPS: Métodos de implementación.....	46
3.3.4.	DGPS: Precisión.....	47
3.3.5.	Errores DGPS.....	47
3.3.6.	Receptores GPS de coste bajo coste y DGPS.....	48
4.	Desarrollo, implementación y validación del SISTEMA DGPS de bajo coste	49
4.1.	Descripción del material Hardware.....	49
4.1.1.	Raspberry Pi.....	49
4.1.2.	Módulo GPS.....	50
4.1.3.	Antena GPS 2J431 MP.....	52
4.1.4.	Adaptador Wifi USB Nano TP-Link TL-WN725N.....	52
4.2.	Descripción del material Software.....	53
4.2.1.	U-center.....	53
4.2.2.	RTKLIB.....	55
4.2.3.	Python.....	56
4.2.4.	Beebotte.....	56
4.2.5.	MobaXterm.....	58
4.2.6.	JuiceSSH.....	58
4.2.7.	Matlab.....	58
4.3.	Configuraciones previas del Sistema propuesto.....	58
4.3.1.	Preparar la Raspberry Pi.....	58
4.3.2.	Configuración del módulo GPS.....	63
4.4.	Arquitectura de funcionamiento.....	65
4.4.1.	Adquisición de los datos.....	66
4.4.2.	Adecuación o tratamiento de los datos.....	67
4.4.3.	Almacenamiento de los datos: Local y remoto.....	71
4.4.4.	Visualización de los datos adquiridos.....	72
4.5.	Implementación GPS Diferencial.....	74
4.5.1.	Selección de estación base de referencia a utilizar.....	74
4.5.2.	Ejecución del Postprocesado.....	77
4.6.	Resultados obtenidos.....	81

4.6.1.	Escenario 1: Procesamiento Estático	81
4.6.2.	Escenario 2: Procesamiento Dinámico	92
4.6.3.	Visualización de los resultados obtenidos	93
5.	Conclusiones y líneas futuras	95
6.	Pliego de condiciones	97
7.	Presupuesto	97
8.	Referencias	100

Resumen

En este trabajo de fin de master (TFM) se propone la elaboración de un sistema de bajo coste para la adquisición y representación de datos GPS aumentados de manera simple y eficaz. Para la adquisición de los datos en bruto GPS, se utilizará una antena y un receptor GPS de bajo costo implementados en una Raspberry Pi. Se agrandará la fiabilidad en la precisión de los datos utilizando técnicas de aumentación GPS, como la técnica de GPS diferencial. La técnica de GPS diferencial se implementará gracias al servicio de posicionamiento diferencial GNSS en tiempo real para toda España.

Abstract

This master's thesis consists in the development of a low-cost system for the acquisition and representation of GPS augmentation data, in a simple and efficient way. Our system will be using a Raspberry Pi with a low-cost GPS receiver for the acquisition of GPS raw data. This system will use one of the GPS augmentation techniques called differential GPS, for improve accuracy and precision of GPS acquired data by the low-cost receiver. The differential GPS technique will be implemented using the GNSS differential positioning service in real time throughout Spain.

Palabras Claves

- GPS Diferencial
- Raspberry Pi
- RTKLib
- Receptor GPS de bajo costo
- Red Geodésica Nacional de Referencia de Estaciones Permanentes GNSS (ERGNSS)

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - DISTANCIA MEDIDA DE UN SATÉLITE [6].....	13
FIGURA 2.2 - CORRECCIÓN POR ERROR DE RECEPCIÓN DE LA HORA [6].....	14
FIGURA 2.3 - SEGMENTOS DEL SISTEMA GPS [11]	15
FIGURA 2.4 - BLOCK IIF SIGNAL SPECTRUM [37]	18
FIGURA 2.5 - ESTRUCTURA DE LA TRAMA DEL L1 NAV [38]	19
FIGURA 2.6 - INCREMENTO DE TIEMPO [14].....	19
FIGURA 2.7 - OBTENCIÓN DEL TIEMPO DE PROPAGACIÓN Δt [14]	20
FIGURA 2.8 - CADENA DE MENSAJES NMEA [FUENTE PROPIA].....	20
FIGURA 2.9 - ESTRUCTURA TRAMA UBX [41].....	22
FIGURA 2.10 - NOMENCLATURA ESTÁNDAR DE LOS FICHEROS RINEX [42].....	23
FIGURA 2.11 - NOMENCLATURA ESTÁNDAR DE LOS FICHEROS RINEX: NÚMERO DE SATÉLITES [42].....	23
FIGURA 2.12 - EXTENSIONES DE NOMBRE DE ARCHIVO RECOMENDADAS PARA ARCHIVOS COMPRIMIDOS [42].....	24
FIGURA 2.13 - EJEMPLO DE FICHERO DE OBSERVACIÓN [42].....	25
FIGURA 2.14 - EJEMPLO FICHERO DE NAVEGACIÓN [42].....	26
FIGURA 2.15 - EFECTO DE LA IONOSFERA [15].....	30
FIGURA 2.16 – RELACIÓN DE LA ELEVACIÓN DEL SATÉLITE CON LA VARIACIÓN DE LA DISTANCIA A RECORRER POR LA SEÑAL HASTA EL RECEPTOR GPS [15].....	31
FIGURA 2.17 - EJEMPLO DE PROPAGACIÓN MULTITRAYECTO (MULTIPATH) [15]	34
FIGURA 2.18 - SATÉLITES CON BUENA DISTRIBUCIÓN - POCA INCERTIDUMBRE EN SU POSICIÓN [15]	35
FIGURA 2.19 - SATÉLITES CON MALA DISTRIBUCIÓN - ALTA INCERTIDUMBRE EN SU POSICIÓN [15]	35
FIGURA 3.1 - SATELLITE-BASED AUGMENTATION SYSTEM TRANSMITTING INTEGRITY [20]	37
FIGURA 3.2 – ÁREAS DE SERVICIO DE SISTEMAS DE AUMENTO SATELITAL (SBAS) [19]	38
FIGURA 3.3 - SEGMENTOS EGNOS [21]	40
FIGURA 3.4 - ESTACIONES BASE DE REFERENCIA GPS DE LA COMUNIDAD DE MADRID [22]	42
FIGURA 3.5 - ANTENA Y RECEPTOR LAS ESTACIONES BASE DE REFERENCIA GPS DE LA COMUNIDAD DE MADRID [22].....	42
FIGURA 3.6 - SOLUCIÓN CON EL CONJUNTO DE RED [25]	43
FIGURA 3.7 - SOLUCIÓN CON ESTACIÓN ÚNICA (PUNTO SIMPLE) [25]	44
FIGURA 3.8 - ESTRUCTURA GPS DIFERENCIAL [50]	44
FIGURA 3.9 - ESTRUCTURA GENERAL DEL GPS DIFERENCIAL [26]	45
FIGURA 3.10 - EJEMPLO CORRECCIÓN DIFERENCIAL [28]	45
FIGURA 4.1 - RASPBERRY PI MODELO 1B.....	49
FIGURA 4.2 - MODULO GPS: MAKERHAWK MÓDULO GPS 51 (FUENTE: AMAZON.ES)	50
FIGURA 4.3 - PANTALLA DE INICIO U-CENTER 18.11 [61]	54
FIGURA 4.4 - ARQUITECTURA DEL NÚCLEO U-CENTER [61]	54
FIGURA 4.5 - HERRAMIENTAS DE RTKLIB [63].....	55
FIGURA 4.6 - DATOS REPRESENTADOS EN BEEBOTTE	57
FIGURA 4.7 - DATOS ALMACENADOS EN BEEBOTTE	57
FIGURA 4.8 - ACTIVAR O HABILITAR SSH SIN PANTALLA	59
FIGURA 4.9 - CONFIGURACIÓN CONEXIÓN COMPARTIDA WI-FI EN MÓVIL ANDROID	61
FIGURA 4.10 - INICIO DE SESIÓN A RASPBERRY PI VÍA SSH CON MOBAXTERM	61
FIGURA 4.11 - INICIO DE SESIÓN A RASPBERRY PI VÍA SSH CON JUICESSH	62
FIGURA 4.12 - ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO RTKLIB [70]	63
FIGURA 4.13 - FICHERO DE CONFIGURACIÓN CONFIG.CMD	64
FIGURA 4.14 - ESQUEMA HARDWARE INTERCONECTADO.....	65
FIGURA 4.15 - ESQUEMA GENERAL POSTPROCESADO O PROCESAMIENTO OFFLINE	65
FIGURA 4.16 - ESQUEMA POSTPROCESADO A IMPLEMENTAR.....	66
FIGURA 4.17 - ESQUEMA ETAPA ADQUISICIÓN DE DATOS GPS	66
FIGURA 4.18 - EJECUCIÓN STR2TR PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS GPS CRUDOS	67
FIGURA 4.19 - ESQUEMA ADECUACIÓN DE LOS DATOS ADQUIRIDOS	67
FIGURA 4.20 - VISUALIZACIÓN FICHERO ROVER.UBX EN SUBLIME TEXT	68
FIGURA 4.21 - VISUALIZACIÓN FICHERO ROVER.UBX EN BLOC DE NOTAS	69

FIGURA 4.22 - FICHERO ROVER_NMEA.TXT	69
FIGURA 4.23 - EJECUCIÓN CONVBIN	70
FIGURA 4.24 - FICHERO ROVER.OBS	70
FIGURA 4.25 - FICHERO ROVER.NAV.....	71
FIGURA 4.26 - ESQUEMA ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS.....	71
FIGURA 4.27 - ESQUEMA DE VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS ADQUIRIDOS.....	72
FIGURA 4.28 - REPRESENTACIÓN EN BEEBOTTE DE LOS DATOS ADQUIRIDOS.....	73
FIGURA 4.29 - ALMACENAMIENTO EN BEEBOTTE DE LOS DATOS ADQUIRIDOS	73
FIGURA 4.30 - REPRESENTACIÓN EN GOOGLE MAPS DE LOS DATOS ADQUIRIDOS.....	74
FIGURA 4.31 - DISTRIBUCIÓN DE LAS ESTACIONES BASE DE REFERENCIA GPS	76
FIGURA 4.32 - DESCARGA DE FICHERO RINEX ESTACIONES BASE DE REFERENCIA GPS.....	76
FIGURA 4.33 - ÁREA DE COBERTURA DE LAS ESTACIONES BASE DE REFERENCIA GPS	77
FIGURA 4.34 - POSTPROCESADO CON RTKPOST	77
FIGURA 4.35 - VENTANA PRINCIPAL RTKPOST	78
FIGURA 4.36 - DIÁLOGO DE OPCIONES (CONFIGURACIÓN 1) DE RTKPOST	78
FIGURA 4.37 - EJEMPLO FICHERO SOLUTION.POS	81
FIGURA 4.38 - DISTANCIA POR MUESTRAS	83
FIGURA 4.39 - DISTANCIA POR MUESTRAS [1500 - 1660].....	84
FIGURA 4.40 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE LOS DATOS	85
FIGURA 4.41 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE LOS DATOS CON RANGO DE - 10 A 10 METROS	85
FIGURA 4.42 - DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE LOS DATOS CON RANGO DE - 2.5 A 2.5 METROS	86
FIGURA 4.43 - PRECISIÓN DE POSICIÓN DE LAS MUESTRAS.....	87
FIGURA 4.44 - POSICIONES RELATIVAS EN FORMATO ECEF	87
FIGURA 4.45 - POSICIÓN RELATIVA MÍNIMA EN FORMATO ECEF	88
FIGURA 4.46 - POSICIÓN RELATIVA PROMEDIO EN FORMATO ECEF.....	88
FIGURA 4.47 - POSICIONES RELATIVAS EN FORMATO LLA.....	89
FIGURA 4.48 - POSICIÓN RELATIVA MÍNIMA EN FORMATO LLA	89
FIGURA 4.49 - POSICIÓN RELATIVA PROMEDIO EN FORMATO LLA.....	89
FIGURA 4.50 - DESVIACIÓN ESTÁNDAR NEU	90
FIGURA 4.51 - DESVIACIÓN ESTÁNDAR NEU ESCALADA	91
FIGURA 4.52 - DESVIACIÓN ESTÁNDAR NE.....	91
FIGURA 4.53 - RESULTADOS PROCESAMIENTO DINÁMICO.....	92
FIGURA 4.54 - RESULTADOS PROCESAMIENTO DINÁMICO REFERENCIADOS	93
FIGURA 4.55 - RESULTADOS OBTENIDOS REFERENCIADOS SOBRE LA EPS.....	93
FIGURA 4.56 - RESULTADOS ESCENARIO 2 EN GOOGLE MAPS.....	94
FIGURA 4.57 - RESULTADOS OBTENIDOS GPS(AZUL) VS DGPS(VERDE) EN MOVIMIENTO.....	94
FIGURA 4.58 - RESULTADOS OBTENIDOS GPS(AZUL) VS DGPS(VERDE) EN MOVIMIENTO, AUMENTADO	95

Lista de tablas

TABLA 2.1 - COMPARACIÓN RECEPTORES GPS PT1 [55].....	16
TABLA 2.2 - COMPARACIÓN RECEPTORES GPS PT2 [55].....	16
TABLA 2.3 - COMPARATIVA DE FRECUENCIAS DE LOS SISTEMAS GNSS: GPS, GLONASS Y GALILEO [4]	18
TABLA 2.4 - CÓDIGOS DEL BLOQUE IIF [8]	18
TABLA 2.5 - MENSAJES NMEA Y SU DESCRIPCIÓN [10].....	21
TABLA 2.6 - DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN DE ENCABEZADO DEL FICHERO DE OBSERVACIÓN (PARTE 1) [43]	24
TABLA 2.7 - DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN DE ENCABEZADO DEL FICHERO DE OBSERVACIÓN (PARTE 2) [43]	25
TABLA 2.8 - DESCRIPCIÓN DEL REGISTRO DE DATOS DEL FICHERO DE OBSERVACIÓN [42]	25
TABLA 2.9 - ESTRUCTURA FICHERO DE NAVEGACIÓN [43].....	26
TABLA 2.10 - FICHERO DE NAVEGACIÓN GNSS - DESCRIPCIÓN DEL REGISTRO DE DATOS GPS [42].....	27
TABLA 2.11 - ESTRUCTURA FICHERO METEOROLÓGICO	28
TABLA 2.12 – TIPOS DE EFEMÉRIDES/ALMANAQUE [36].....	32
TABLA 3.1 – DATOS DE PRECISIÓN EN TÉRMINOS DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO PARA GPS Y DGPS [32]	48
TABLA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO GPS U-BLOX 7 [60].....	51
TABLA 4.2 – CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO Y PRECISIÓN DEL MÓDULO U-BLOX 7 [60].....	51
TABLA 4.3 – PROTOCOLOS DE MENSAJES DE NAVEGACIÓN SOPORTADOS POR EL MÓDULO U-BLOX 7 [60]	52
TABLA 4.4 – MENSAJES POR DEFECTO DEL MÓDULO U-BLOX 7 [60].....	52
TABLA 4.5 - ESPECIFICACIONES ANTENA GPS 2J431 MP (FUENTE: AMAZON.ES).....	52
TABLA 4.6 - CARACTERÍSTICAS ADAPTADOR WIFI USB INALÁMBRICO NANO TP-LINK TL-WN725N (FUENTE: AMAZON.ES)	53
TABLA 4.7 - HERRAMIENTAS RTKLIB DISPONIBLES EN CUI Y GUI [63]	56
TABLA 4.8 - ESTACIONES BASE DE REFERENCIA GPS	75
TABLA 4.9 - ESTACIONES DE REFERENCIA RESPECTO AL PUNTO DE OBSERVACIÓN.....	81
TABLA 4.10 - RESULTADOS OBTENIDOS EN BASE A LA DISTANCIA.....	82
TABLA 4.11 - PORCENTAJE DE MEJORAS FRENTE A GPS	83
TABLA 4.12 - PROBABILIDAD DE PRECISIÓN DE LOS RESULTADOS (%).....	84
TABLA 7.1 - PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR MATERIAL (PEM)	98
TABLA 7.2 - HONORARIOS DEL TRABAJADOR.....	98
TABLA 7.3 - PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE CONTRATA (PEC).....	98

1. Introducción

1.1. Motivación del Trabajo Fin de Máster

El Sistema de posicionamiento global (GPS, Global Positioning System) es hoy en día ampliamente utilizado en el sector público para la navegación ordinaria. Algunos sectores, como transporte, agricultura o geodesia, utilizan el GPS como fuente principal de información [1]. El GPS también se utiliza en aplicaciones relacionadas con dispositivos autónomos de reciente desarrollo, como coches autónomos o drones. El aumento de la precisión del GPS es un método para aumentar la precisión de la posición del objeto en términos de eliminar y disminuir los errores causados por los sesgos del reloj y los errores de propagación de la señal.

En el mercado, los receptores de alta precisión del sistema global de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS) operan en múltiples bandas de frecuencias, como las bandas L1/L2/L5, G1/G2, B1/B2/B3, poseen múltiples sistemas como GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, QZSS, y por lo regular el coste de estos varía entre los 3.000 y 30.000 euros, o incluso más. Mientras que los receptores de bajo coste operan en una sola banda de frecuencias, la L1 en 1575,42 MHz (GPS), pero el coste de estos está por debajo de los 300 euros.

No obstante, uno de los inconvenientes de estos sistemas de bajo coste para la adquisición de datos GPS, es la fiabilidad y representación de dichos datos después de ser adquiridos. Esto es debido a que la gran mayoría de estos sistemas devuelven los datos en crudo, como por ejemplo las cadenas de datos que siguen el protocolo NMEA (controlado por National Marine Electronics Association) [2] y que contienen información sobre los datos de navegación GPS, así como datos relativos a los satélites identificados en la cobertura de la antena GPS. Al final, los datos NMEA adquiridos son almacenados en un fichero de texto que requieren de un análisis, filtrado y reestructuración (en una tabla, por ejemplo) que se puede realizar de forma manual, en la gran mayoría de los casos, o por medio de software especializados pero con licencias costosas.

El Sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) es una mejora del GPS. El sistema GPS basado en la tecnología satelital puede tener una precisión nominal de 15 metros, mientras que el DGPS puede brindar una precisión de alrededor de 10 cm. El DGPS utiliza las estaciones de referencia terrestres fijas para transmitir la diferencia entre las coordenadas desde el GPS y desde la posición fija desde la estación base. El receptor GPS que proporciona las correcciones se denomina "estación de referencia" y el receptor GPS que usa las correcciones es el "móvil". Debido a que la estación de referencia sabe su ubicación, puede calcular la cantidad de error en la señal de cada satélite. Los errores se transmiten al móvil que los utiliza para mejorar la precisión de su posición fija [54].

En este trabajo de fin de master (TFM) se propone la elaboración de un sistema de bajo coste para la adquisición y representación de datos GPS aumentados de manera simple y eficaz. El sistema de adquisición de datos brutos GPS se basará en una antena omnidireccional y una Raspberry Pi donde se podrán procesar los datos directamente para hacer un seguimiento localizado en tiempo real o almacenarlos en la nube para un procesamiento off-line que aumente la fiabilidad en la precisión de los datos implementando técnicas de ampliación GPS como la técnica GPS diferencial. La técnica GPS diferencial combinará los datos GPS adquiridos con datos GPS proporcionados por el Servicio de Posicionamiento diferencial GNSS en Tiempo Real para toda España ofrecido conjuntamente por las Comunidades Autónomas y el Instituto Geográfico Nacional [3].

La solución que se presenta considera una implementación basada en una Raspberry Pi debido a su bajo coste y la cantidad de librerías de procesado, en lenguaje Python, disponibles para la lectura de las cadenas de datos NMEA adquiridas, para conectar e intercambiar datos que permitan aplicar técnicas GPS diferencial, para exportar los datos a diferentes sistemas de almacenamiento ya sean locales o remotos y para representar los datos GPS en diferentes Sistemas de Información Geográfica (GIS, Geographic Information System).

Para facilitar la interpretación de los resultados por un usuario no experto, se plantea desarrollar una interfaz gráfica para la gestión de adquisición y representación de los datos almacenados dentro de la base de datos local de la Raspberry Pi. Este sistema contará con la opción de controlar remotamente la Raspberry Pi por medio de una Tablet o Smartphone. Cuando el sistema tenga acceso a Internet, se permitirá la sincronización de la base de datos local con una base de datos almacenada en la nube.

1.2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema barato lo más preciso, fiable y *user friendly* posible capaz de realizar de forma automática las tareas de adquisición, adecuación, análisis, filtrado, almacenamiento y representación de la información sobre los datos de navegación GPS, así como datos relativos a los satélites identificados en la cobertura de la antena GPS. Además, la solución planteada pretende mejorar la automatización de todos los procesos después de su configuración e implementar técnicas GPS diferencial con las estaciones base de referencia GPS del Sistemas de Posicionamiento GPS/GNSS en Tiempo Real de España para aumentar la fiabilidad y precisión de las coordenadas finales. Como resultado final se tiene un receptor GPS con capacidad de almacenamiento, exportación y representación de los datos obtenidos, a diferencia de otras opciones existentes, como EMELID REACH RS+, easyGPS o Navixy, que carecen de alguna de las opciones mencionadas y son más costosas por requerir software con licencia.

1.3. Estructura sobre el desarrollo del Proyecto

Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Este apartado se centra en la teoría y la base histórica de la navegación GPS, así como en su funcionamiento, estructura y los errores que este presenta.

Sistemas Aumentados

Este apartado trata sobre los sistemas aumentados, se abarcará tanto su definición como los diferentes tipos que existen. Comentaremos técnicas aumentadas como el SBAS (Satellite Based Augmentation System) y el GPS diferencial (DGPS, Differential Global Positioning System) en el cual se basa este proyecto.

Herramientas por utilizadas

Tal y como su nombre lo indica, aquí se describirán las herramientas software y hardware empleadas para el desarrollo del proyecto. Detallaremos el hardware utilizado como la Raspberry Pi con el módulo GPS, lenguajes de programación como Python, librerías y software como U-blox center o RTKLIB. También se describirá la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS (ERGNSS), centrándonos en las estaciones base utilizadas para el procesado DGPS detallando tanto sus ubicaciones, sus antenas y receptores GPS, como el acceso a los datos GPS proporcionados por éstas estaciones.

Desarrollo del SISTEMA DGPS propuesto

El fin de este apartado es el tratamiento de los datos GPS, desde su adquisición hasta su correcta adecuación para poder presentarlos en un mapa y aplicar el postprocesado correspondiente. Este apartado trata cinco puntos claves: Adquisición de los datos, Adecuación o tratamiento de los datos, Almacenamiento local y remoto de los datos, representación de los datos adquiridos en diferentes GIS.

Simulaciones por realizar

En este apartado se realizarán las simulaciones, donde implementaremos la técnica de DGPS en tiempo real como en postprocesado

Análisis de los resultados

Aquí mostraremos y compararemos los resultados obtenidos del apartado anterior. Se plantearán y analizarán diferentes casos de estudio como:

- GPS en tiempo real sin aplicar técnicas de aumentación
- Postprocesado DGPS con diferentes estaciones de referencia relacionadas con el escenario definido en la simulación (la estación INGE en Madrid centro y la estación de referencia YEBE1 en Guadalajara).

Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Conclusiones tras el análisis de los resultados obtenidos en diferentes casos de estudio. En base a estos resultados, comentaremos sobre posibles líneas de trabajo en las cuales se puedan mejorar el empleo de dichas técnicas o adaptarlas para un área de uso en específico.

2. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

2.1. Introducción

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un subconjunto del Sistema Global de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS), diseñado para ofrecer un servicio de posicionamiento espacial y temporal de cualquier punto y momento del planeta con una precisión de hasta centímetros [4]. El GPS empezó a operar en 1978 como parte del programa NAVSTAR (Navigation Satellite Time and Ranging) desarrollado por el Departamento de Defensa de los EE.UU. El sistema entró plenamente en operación hasta 1993, cuando un número mínimo de satélites (24) se encontraba en órbita. NAVSTAR posteriormente se convirtió en GPS, que es propiedad del gobierno de EE.UU. y está operado por la Fuerza Aérea de EE.UU.

2.2. Funcionamiento del GPS

En forma breve podemos decir que el funcionamiento del GPS se basa en medir el tiempo que tarda la transmisión de las señales de satélite codificadas que envían varios satélites, de posición conocida, a un receptor GPS capaz de procesar dichas señales permitiéndole calcular su posición, velocidad y tiempo, empleando la técnica de trilateración. Se utilizan al menos cuatro señales para el cálculo de posiciones en tres dimensiones y ajuste de reloj del receptor. Esto último permite que el receptor pueda dar estimaciones precisas de la posición aun utilizando relojes baratos con una precisión significativamente menor que los relojes atómicos a bordo de cada satélite de la constelación GPS [5].

Debido a la información horaria dentro de las señales codificadas que envían los satélites, el receptor puede determinar en cada momento en cuánto tiempo se transmite la señal. Además, esta señal contiene datos que el receptor utiliza para calcular la ubicación de los satélites y realizar los ajustes necesarios para precisar las posiciones. El receptor utiliza la diferencia de

tiempo entre el momento de la recepción de la señal y el tiempo de transmisión para calcular la distancia al satélite, teniendo en cuenta los retrasos en la propagación de la señal debidos a la ionosfera y a la troposfera [6]. Sin embargo, para calcular directamente las distancias, el usuario debe tener un reloj atómico sincronizado con el GPS. Midiendo desde un satélite adicional se evita que el receptor necesite un reloj atómico para calcular la latitud, la longitud, la altitud y el tiempo.

La pseudo-distancia, PR, a cada satélite es determinada haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$PR = c \cdot \Delta t$$

$$c = \text{Velocidad de la luz} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\Delta t = \text{Tiempo de recorrido de la señal desde el satélite al receptor}$$

Δt es la variable que exige mayor precisión. Para determinar la distancia real, R, de cada satélite se debe corregir la pseudo-distancia de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$R = PR - c \cdot (\Delta t_a + \Delta t_u - \Delta t_s)$$

t_a = Retraso en la propagación y otros efectos debidos a la ionosfera.

Δt_u = Corrección de reloj del receptor a partir de tiempo de sistema GPS.

Δt_s = Corrección de reloj de satélite a partir de tiempo de sistema GPS.

Los tres parámetros de corrección se representan en la Figura 2.1. Si sólo se utilizan las pseudo-distancias, la trilateración no da un punto, sino el área formada por los puntos ABC descritos en la Figura 2.2. Si corregimos el Δt_u para cada satélite, se consigue que las líneas de posición se crucen en el punto P (Figura 2.2), que corresponde con la posición del usuario. Δt_u es calculado permanentemente desde el momento que se recibe la señal del satélite [6].

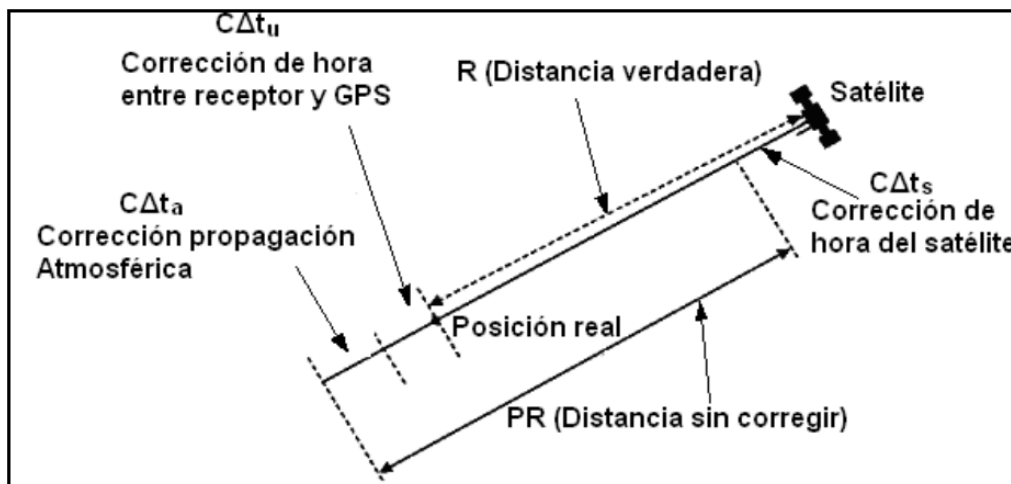


Figura 2.1 - Distancia medida de un satélite [6].

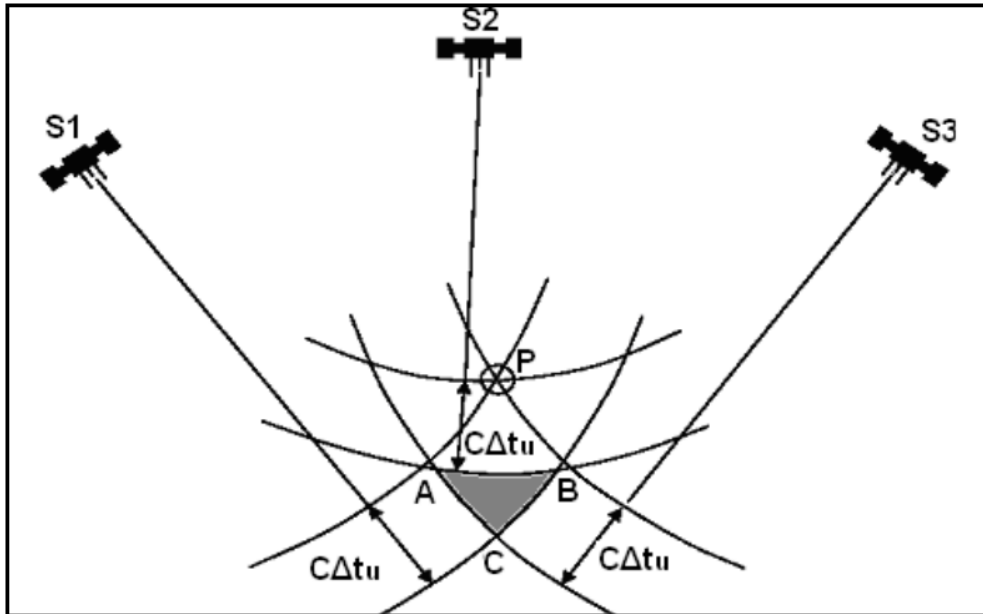


Figura 2.2 - Corrección por error de recepción de la hora [6].

Por lo tanto, un receptor satelital debe estar conectado a la señal de por lo menos cuatro satélites para poder calcular una posición 2D (latitud y longitud) y rastrear movimiento. Con cinco o más satélites a la vista, el receptor puede determinar la posición tridimensional (3D) del usuario (latitud, longitud y altitud). Una vez que la posición del usuario ha sido determinada, la unidad GPS puede calcular otra información, tal como velocidad, dirección, seguimiento, distancia de viaje, distancia a destino, hora de salida y puesta de sol, y mucho más.

2.3. Divisiones del GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un servicio propiedad de los EE.UU. que proporciona a los usuarios información sobre posicionamiento, navegación y cronometría. Este sistema está constituido por tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento del usuario. La Fuerza Aérea de los Estados Unidos desarrolla, mantiene y opera los segmentos de control y espacial [1]. En este documento, nos centraremos solo en el segmento usuario, pero a continuación ofreceremos una breve descripción de los demás segmentos.

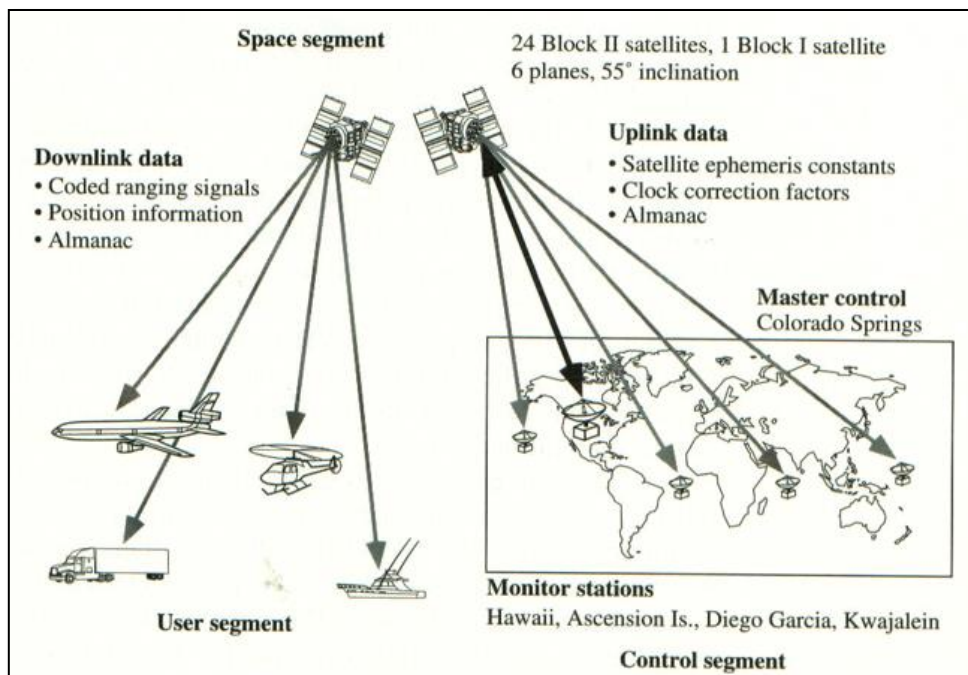


Figura 2.3 - Segmentos del sistema GPS [11]

- Segmento espacial: responsable del desarrollo, fabricación y lanzamiento de satélites. El segmento espacial de GPS consta de una constelación de 24 satélites que se encuentran distribuidos en 6 planos orbitales circulares a 20,200 Km de altura [12].
- Segmento de control: responsable del monitoreo y control continuo del sistema, determinación del tiempo de GPS, predicción de efemérides satelitales y comportamiento del reloj, así como actualización del mensaje de navegación para cada satélite.
- Segmento usuario: consumidor final del GPS que consiste en una variedad de receptores/procesadores civiles y militares específicamente diseñados para recibir o sintonizar la señal emitida por los satélites, y así calcular las soluciones de navegación (posición, altitud, velocidad y tiempo) [6]. El GPS fue diseñado para dos niveles de uso, para uso militar está reservado el Servicio de Posicionamiento Preciso (Precise Positioning Service - PPS) y para uso civil se utiliza el Servicio de Posicionamiento Estándar (Standard Positioning Service - SPS). Según su propósito los receptores del segmento de usuario pueden ser muy variados, y costosos, tal y como se muestran en la Tabla 2.1 y la Tabla 2.2 . La antena de estos receptores está sintonizada para recibir una de las portadoras (L1, L2) o ambas en el caso de un receptor de banda dual. Un receptor avanzado puede tener la opción Safe-of-Live, que requiere la transmisión en L5.








GPS Receiver Comparisons							
							
Post-Processed Accuracy	Submeter	1-4 cm ¹	10-50cm ² + 1ppm ³	10-50cm ² + 1ppm ³	50 cm ² + 1ppm ³	50 cm ² + 1ppm ³	50 cm ² + 1ppm ³
Real-Time DGPS Capable	SBAS ⁴ or External Source ⁵	SBAS ⁴ or External Source ⁵	SBAS ⁴ or External Source ⁵	SBAS ⁴ or External Source ⁵	SBAS ⁴ or External Source ⁵	SBAS ⁴ or External Source ⁵	SBAS ⁴ or External Source ⁵
Real-Time Accuracy	Submeter	1-4 cm ¹	10cm ² -1m	10cm ² -1m	75cm-1m	Submeter	75cm-1m
EVEREST™ Multipath Rejection Technology	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
GLONASS Tracking	Optional	YES	YES	YES	Optional	NO	Optional
Floodlight™ Technology	NO	YES	YES	YES	Optional	NO	Optional
H-Star™ Technology	NO	YES	YES	YES	NO	NO	NO
Channels	45, GPS: L1C/A, SBAS, GLONASS: L1C/A, L1P	220, GPS: L1C/A, L2C,L2E GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P	220, GPS: L1C/A, L2C,L2E GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P	220, GPS: L1C/A, L2C,L2E GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P	220, GPS: L1 code and carrier, SBAS GLONASS: L1C/A, L1P	14, 12 GPS: L1 code and carrier, 2 SBAS	220, GPS: L1 code and carrier, SBAS GLONASS: L1C/A, L1P
External Antenna	Optional	YES, Zephyr Model 2 recommended for highest accuracy	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Internal Antenna	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Supported Data Collection Software	TerraSync, ArcPad™, GPSCorrect, ArcGIS Mobile™, Trimble Positions, Field Inspector, SOLO Forest	TerraSync Centimeter Edition v5.30 or later ¹³	TerraSync, ArcPad™, GPSCorrect, ArcGIS Mobile™, Trimble Positions, Field Inspector, SOLO Forest	TerraSync, ArcPad™, GPSCorrect, ArcGIS Mobile™, Trimble Positions, Field Inspector, SOLO Forest	TerraSync, ArcPad™, GPSCorrect, ArcGIS Mobile™, Trimble Positions, Field Inspector, SOLO Forest	TerraSync, ArcPad™, GPSCorrect, ArcGIS Mobile™, Trimble Positions, Field Inspector, SOLO Forest	TerraSync, ArcPad™, GPSCorrect, ArcGIS Mobile™, Trimble Positions, Field Inspector, SOLO Forest
NMEA Output	YES	YES (10cm accuracy)	Optional Upgrade	Optional Upgrade	Optional Upgrade	YES	Optional Upgrade
Price ⁹	\$3,295-\$3,990	\$17,495-\$17,995 (Bundle Price) ¹²	\$7,695-\$8,500	\$5,400-\$5,895	\$4,995-\$6,500	\$3,995	\$2,700-\$4,495
Receiver Type	Trimble GNSS 5T	Trimble Maxwell™ 6 Custom GPS Chip	Trimble Maxwell™ 6 Custom GPS Chip	Trimble Maxwell™ 6 Custom GPS Chip	Trimble Maxwell™ 6 Custom GPS Chip	Trimble Maxwell™ 5 Chipset	Trimble Maxwell™ 6 Custom GPS Chip

Tabla 2.1 - Comparación receptores GPS pt1 [55]








GPS Receiver Comparisons							
							
Post-Processed Accuracy	2-4m ²	1-3m ² + 1ppm ³	N/A ¹	N/A ¹	N/A ¹	N/A ¹	N/A ¹
Real-Time DGPS Capable	SBAS ⁴	SBAS ⁴	SBAS ⁴	SBAS ⁴	SBAS ⁴	SBAS ⁴	SBAS ⁴
Real-Time Accuracy	2-4m	2-5m	2-4m	2-5m	< 2m ⁵	< 2m ⁵	2-5m
EVEREST™ Multipath Rejection Technology	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
GLONASS Tracking	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Floodlight™ Technology	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
H-Star™ Technology	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Channels	50, GPS: L1 code and carrier, SBAS	12, GPS: L1 code, SBAS	12, GPS: L1 code, SBAS	12, GPS: L1 code, SBAS	50, GPS: L1 code and carrier, SBAS	50, GPS: L1 code and carrier, SBAS	12, GPS: L1 code, SBAS
External Antenna	Optional	Optional on Juno Only	NO	NO	Optional	NO	YES
Internal Antenna	Standard	Standard	Standard	Optional	Optional	Optional	Standard
Supported Data Collection Software	TerraSync, ArcPad, ArcGIS Mobile, Trimble Positions, SOLO Forest	TerraSync, ArcPad™, GPSCorrect, ArcGIS Mobile™, Trimble Positions, Field Inspector, SOLO Forest	SOLO Forest, ArcPad, ArcGIS Mobile	SOLO Forest, ArcPad, ArcGIS Mobile	SOLO Forest, ArcPad, ArcGIS Mobile	SOLO Forest, ArcPad, ArcGIS Mobile	SOLO Forest, ArcPad, ArcGIS Mobile
NMEA Output	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Price ⁹	\$1,499/\$1,899 (5B/5D)	\$799-\$2,849	\$2499-\$2649	\$3495-\$3995	\$2875-\$3175	\$2000-\$3000	\$115 ¹⁰
Receiver Type	u-blox 6	SIRF	SIRF	SIRF	u-blox 6	u-blox 6	SIRF

Tabla 2.2 - Comparación receptores GPS pt2 [55]

2.4. Señal GPS

Las señales de GPS se han transmitido tradicionalmente en dos frecuencias de radio de la banda UHF, más concretamente de la banda que el IEEE denomina L. Estas dos frecuencias se denominan L1 y L2, ambas se derivan de una frecuencia común $f_0 = 10.23MHz$ [58].

$$f_{L1} = 154f_0 = 1575.42MHz$$

$$f_{L2} = 120f_0 = 1227.60\text{MHz}$$

Las señales están compuestas de tres partes:

- Portadora: nos hemos centrado en las dos opciones fundamentales actualmente, la L1 y la L2.
- Datos de navegación: contienen información acerca de las órbitas satelitales; esta información se envía a todos los satélites desde las estaciones del segmento de tierra del GPS. La tasa de bits de los datos de navegación es de 50 bps.
- Secuencia de ensanchado: como ocurre en el caso de las comunicaciones móviles, la señal GPS contiene un código o secuencia que ensancha el espectro más allá de lo que le correspondería de acuerdo a la información que transporta; este código tiene la forma de un pseudoruido, que modula la portadora de tal forma que aumente el ancho de banda de la transmisión y reduzca la densidad de potencia espectral (es decir, el nivel de potencia en cualquier frecuencia dada); la señal resultante tiene un espectro muy parecido al del ruido, de tal forma que a todos los radiorreceptores les parecerá ruido menos al que va dirigida la señal; este tipo de modulación se conoce como DS-SS (acceso múltiple por división de código en secuencia directa); cada satélite utiliza dos de estos códigos:
 - Código de Adquisición Aproximativa o C/A (course acquisition code) que da lugar al servicio estándar civil SPS (standard positioning service): se trata de una secuencia de 1023 chips (un chip es equivalente al concepto de un bit, pero recibe este nombre porque no pertenece a una palabra o byte de información sino a un código de identificación); este código se repite cada milisegundo, lo que da lugar a una tasa de chipping de 1.023 MHz; este código modula únicamente la señal L1 y es diferente para cada satélite [58].
 - Código de Precisión (P(Y)), que se encuentra encriptado y permite el servicio para fines militares y de seguridad PSP (precisión positioning service); es un código de mayor longitud, de unos $2.35 \cdot 10^{14}$ chips, con una tasa de chips de 10.23 MHz (es decir, los chips son diez veces más cortos que para el C/A); este código, en lugar de repetirse cada milisegundo como el C/A, se repetiría, siguiendo una tasa de 10.23 MHz cada 266.4 días pero se realiza un reset a las cero horas del domingo y cada satélite utiliza un fragmento diferente para que se pueda producir la identificación del mismo a través del código (así podemos llegar a tener 38 satélites en funcionamiento simultáneo ($266.4/7 \approx 38.06$); el código P(Y) es militar y está encriptado, como hemos dicho, y modula tanto la L1 como la L2 [58].

Estas frecuencias están moduladas por secuencias de código (BPSK), que proporcionan una lectura de reloj de satélite y parámetros orbitales (mensaje de navegación) al receptor. La señal GPS, así como el resto de los sistemas GNSS, se usa en la banda L debido a que los efectos del retardo ionosférico son menores que en otras bandas, y hay menor cantidad de interferencias [7]. La comparativa entre los sistemas de GNSS: GPS, GLONASS y Galileo se presenta en la Tabla 2.3.

L2CM/CL es una señal innovadora disponible para usuarios civiles. L2C contiene dos PRN distintos a diferencia de L1 C/A: CL civil-long y CM civil-moderate (Tabla 2.4). CM está modulado por el mensaje de navegación mientras que; CL no está modulado (sin código). L2C permite que el receptor de banda dual elimine efectivamente la refracción ionosférica y troposférica en el dominio de rango de código. Sin embargo, esta señal solo es transmitida por el actual Bloque IIF

(Figura 2.4), y la capacidad de recibir estas subportadoras requiere un hardware especial y costoso. En pocas palabras, los receptores de bajo costo no pueden acceder a la banda de frecuencia L2 y mucho menos al código L2CM. La mayoría de los receptores de bajo costo son una sola banda, lo que significa que solo admiten la banda L1 y el rango de código C/A [8].

	GPS	GLONASS	Galileo
Frecuencias (MHz)	L5: 1164 - 1188 L2: 1216 - 1240 L1: 1563 - 1587	L2: 1240 - 1254 L1: 1593 - 1610	E5: 1190 - 1214 E3: 1214 - 1216 E4: 1254 - 1260 E6: 1260 - 1300 E2: 1559 - 1563 E1: 1587 - 1593 C: 5010 - 5030
Servicios	L5: SoL L2: SPS/PPS L1: SPS/PPS	L2: CSA/CHA L1: CSA/CHA	E5a-I, E5a-Q: OS/SoL E5b-I, E5b-Q: OS/SoL/CS E6-A: PRS, E6-A: CS, E6-C: PRS E2-L1-E1-A: PRS E2-L1-E1-B: OS/SoL/CS E2-L1-E1-C: OS/SoL/CS L6 downlink (1544 MHz): SAR

Tabla 2.3 - Comparativa de frecuencias de los sistemas GNSS: GPS, GLONASS y Galileo [4]

Band	Code	Availability	Code frequency
L1	C/A (Coarse/Acquisition)	Civil	1.023 MHz
L1/L2	P(Y) (Precise)	Authorized	10.23MHz
L2	L2CM	Civil	511.5kHz
L2	L2CL	Civil	511.5kHz
L1/L2	M (Military)	Authorized	5.115 MHz

Tabla 2.4 - Códigos del bloque IIF [8]

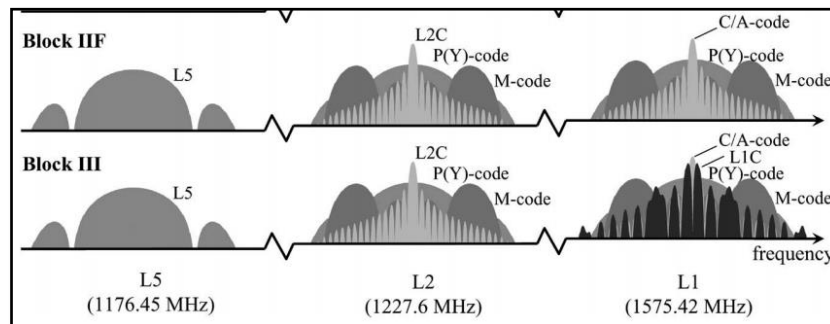


Figura 2.4 - Block IIF Signal Spectrum [37]

2.5. GPS DATA

Dentro de las señales captadas por el receptor GPS, se encuentran los datos GPS sin procesar o datos crudos, estos contienen información sobre el tiempo de viaje de las señales entre el receptor y los satélites. Sin embargo, esto no es suficiente para calcular su posición. Para lograr esto, se necesita más información. Principalmente las posiciones de los satélites, pero también la información adicional del reloj o las condiciones atmosféricas a la hora del intercambio de la señal [9].

2.5.1. RAW Navigation messages

RAW Navigation messages es el protocolo utilizado para la comunicación entre satélites y receptores. Cada satélite transmite en las portadoras definidas (L1 y L2) moduladas por la señal útil. Estos datos útiles se les llaman Mensajes de Navegación (NAV). El NAV se divide y se

transmite en 25 frames o tramas, donde cada trama lleva cinco subtramas. La transmisión de todo el L1 NAV toma 12,5 minutos con una velocidad de 50 bps [35]. En la Figura 2.5 podemos apreciar la estructura de una trama y sus subtramas.

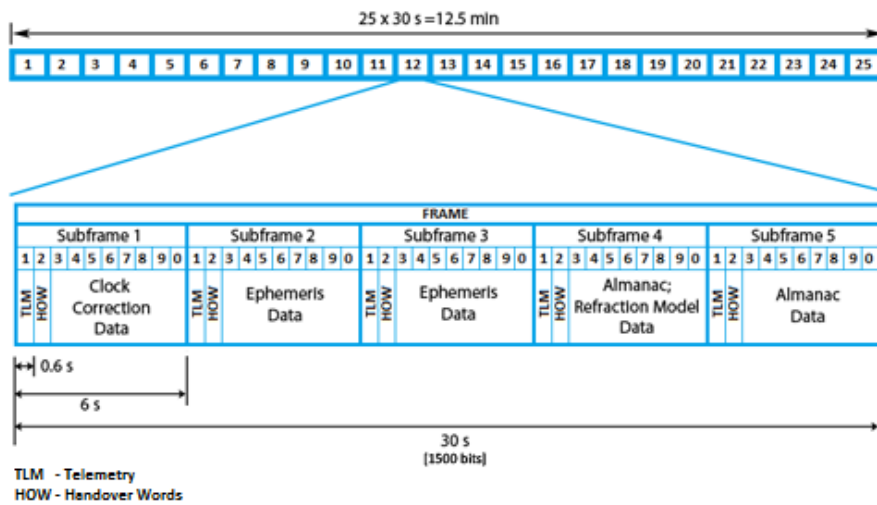


Figura 2.5 - Estructura de la trama del L1 NAV [38]

A continuación, se detallan los campos más relevantes de las subtramas:

- Datos efemérides - Ephemeris Data: se utilizan para estimar la posición del satélite con respecto a los parámetros orbitales y se transmiten en la segunda y tercera subtrama del NAV [8].
- Datos de corrección de reloj - Clock Correction Data: contienen la información requerida para la corrección en la sincronización del reloj del receptor con el reloj de los satélites. Se transmiten en la primera subtrama del NAV.

2.5.2. Observables

El concepto de observable GPS es la medida utilizada para determinar las pseudo-distancias: medidas de tiempo, de diferencias de fase, o basadas en la comparación entre la señal recibida por el receptor procedente del satélite y la réplica de dicha señal generada por el receptor [36].

Desde un punto de vista genérico se puede definir el observable básico GPS como el retardo o tiempo Δt que tarda la señal en viajar desde el centro de fase de la antena del satélite (instante de emisión) hasta el centro de fase de la antena del receptor (instante de recepción), representado en las Figura 2.6 y Figura 2.7 donde se mide el tiempo en función de la búsqueda de máximos entre los códigos C/A de la señal recibida y la señal generada en el receptor.

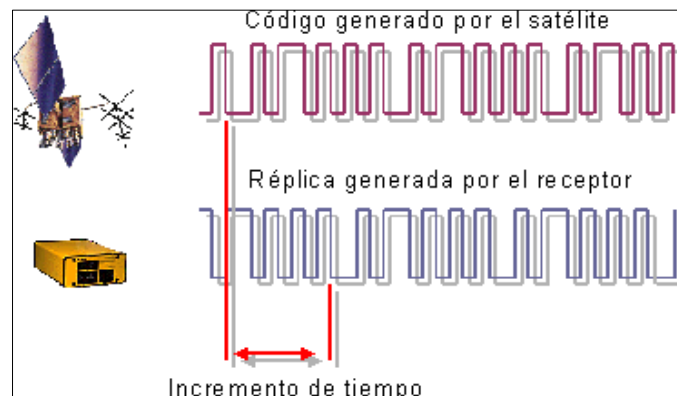


Figura 2.6 - Incremento de tiempo [14]

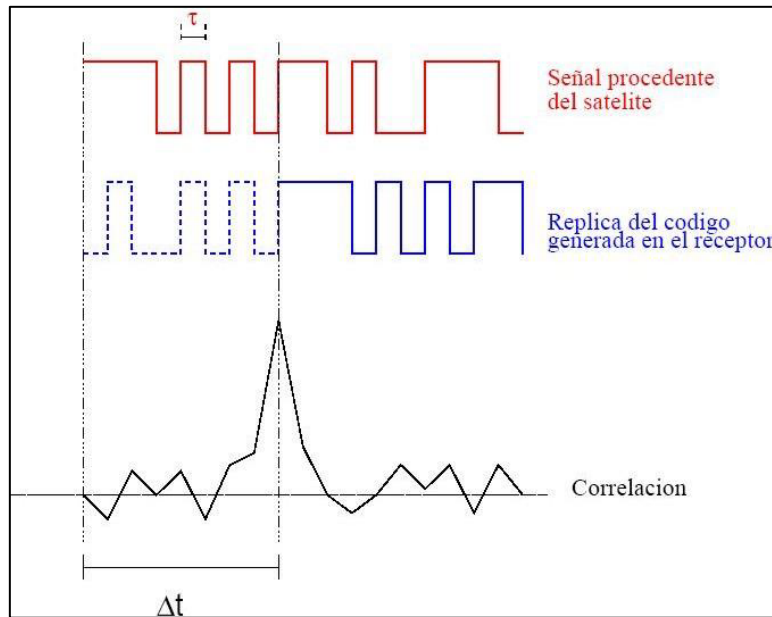


Figura 2.7 - Obtención del tiempo de propagación Δt [14]

2.5.3. NMEA

NMEA es un protocolo unificado, que proporciona información de GPS en formato legible (ASCII). Es el protocolo más común para la conexión con dispositivos GPS y soportado por casi el 100% de los dispositivos del mercado [10]. NMEA permite intercambiar información GPS básica como posición, velocidad, orientación, constelación de satélites, altitud y separación del geode y precisión de la muestra.

Cada sentencia NMEA comienza con "\$", el cual identifica el inicio de cada sentencia. A esto le sigue una palabra clave, que identifica el sistema de navegación y el tipo de oración. La siguiente figura muestra el formato del NMEA0183 [2].

```

16:17:37 0000 24 47 50 52 4D 43 2C 31 36 31 37 33 37 2E 30 30 $GPRMC,161737.00
0010 2C 41 2C 34 30 33 30 2E 34 34 39 36 36 2C 4E 2C ,A,4030.44966,N,
0020 30 30 33 32 30 2E 38 39 37 30 39 2C 57 2C 30 2E 00320.89709,W,0.
0030 30 32 30 2C 2C 32 30 30 36 31 39 2C 2C 2C 41 2A 020,,200619,,A*
0040 36 39 0D 0A 69...

16:17:37 0000 24 47 50 56 54 47 2C 2C 54 2C 2C 4D 2C 30 2E 30 $GPVTG,,T,,M,0.0
0010 32 30 2C 4E 2C 30 2E 30 33 36 2C 4B 2C 41 2A 32 20,N,0.036,K,A*2
0020 34 0D 0A 4...

16:17:37 0000 24 47 50 47 47 41 2C 31 36 31 37 33 37 2E 30 30 $GPGGA,161737.00
0010 2C 34 30 33 30 2E 34 34 39 36 36 2C 4E 2C 30 30 ,4030.44966,N,00
0020 33 32 30 2E 38 39 37 30 39 2C 57 2C 31 2C 31 32 320.89709,W,1,12
0030 2C 30 2E 37 37 2C 36 30 38 2E 35 2C 4D 2C 35 30 ,0.77,608.5,M,50
0040 2E 33 2C 4D 2C 2C 2A 34 35 0D 0A .3,M,*45...

16:17:37 0000 24 47 50 47 53 41 2C 41 2C 33 2C 30 38 2C 32 37 $GPGSA,A,3,08,27
0010 2C 31 38 2C 31 30 2C 31 31 2C 30 31 2C 31 36 2C ,18,10,11,01,16,
0020 32 32 2C 33 32 2C 31 34 2C 32 38 2C 30 33 2C 31 22,32,14,28,03,1
0030 2E 34 31 2C 30 2E 37 37 2C 31 2E 31 38 2A 30 30 .41,0.77,1.18*00
0040 0D 0A ...

16:17:37 0000 24 47 50 47 53 56 2C 34 2C 31 2C 31 33 2C 30 31 $GPGSV,4,1,13,01
0010 2C 34 34 2C 32 38 31 2C 32 37 2C 30 33 2C 31 38 ,44,281,27,03,18
0020 2C 32 31 31 2C 31 34 2C 30 38 2C 38 36 2C 30 37 ,211,14,08,86,07
0030 38 2C 33 36 2C 31 30 2C 32 37 2C 30 34 36 2C 33 8,36,10,27,046,3
0040 32 2A 37 37 0D 0A 2*77...

```

Figura 2.8 - Cadena de mensajes NMEA [fuente propia]

En la Figura 2.8 podemos ver un ejemplo de una cadena de mensajes NMEA. En la última columna, de izquierda a derecha, están los mensajes que empiezan por "\$". Los dos siguientes caracteres identifican el sistema de navegación, las letras "GP" para GPS y, por ejemplo, "GL" para GLONASS. Los siguientes tres caracteres se utilizan para identificar el tipo de mensaje NMEA. En la Tabla 2.5, se describen todos los tipos de mensajes NMEA.

Mensajes NMEA	Descripción
GPDBT	Proporciona datos de la profundidad del receptor bajo el nivel del mar.
GPGGA	Tiempo, latitud, longitud, altitud, separación del geoide, etc.
GPGLL	Tiempo, latitud, longitud.
GPGSA	Satélites activos.
GPGST	Desviación RMS del error de la muestra, en latitud, longitud, altitud.
GPGSV	Satélites a la vista, PRN, elevación, azimut y C/N0 (relación portadora a ruido).
HCHDG	Mensaje propietario Garmin. Orientación, desviación y variación magnética.
GPHDT	Orientación.
GPRMC	Tiempo, latitud, longitud, velocidad y orientación.
PGRME	Mensaje propietario Garmin. Error estimado horizontal (HPE), vertical (VPE) y esférico equivalente (EPE).
GPVTG	Velocidad y orientación.

Tabla 2.5 - Mensajes NMEA y su descripción [10]

2.5.4. RTCM

RTCM (Radio Technical Commission For Maritime Services) es un formato de transmisión de datos de corrección utilizados en DGPS. Este fue creado por la Comisión Técnica de Radio para Servicios Marítimos dedicada a la definición de estándares para la transmisión de datos de corrección utilizados por el DGPS desde 1985 [36]. Sus inicios se remontan al año 1983 cuando el ION (Institute of Navigation) solicitó el desarrollo por parte de RTCM de un conjunto de recomendaciones para la transmisión de correcciones diferenciales a los usuarios del sistema GPS y se creó el Comité Especial Nº 104 (SC104) que terminó desarrollando el estándar RTCM-104 [39].

El estándar RTCM104 ha sido actualizado y la última versión es la 3.3 publicada en Octubre 2016 [40].

La versión 3 del estándar RTCM104 ha sido desarrollado como una alternativa más eficiente a las normas tituladas "Estándares Recomendados RTCM para Estándares Diferenciales Recomendados para el Servicio Diferencial GNSS (Sistemas de Navegación por Satélite Global), Versión 2.x". Partiendo de la versión actual es 2.3, ahora designada como RTCM 10402.3, los proveedores de servicios y suplidores representados en el Comité SC104 querían un nuevo estándar que fuera más eficiente, fácil de usar y más fácilmente adaptable a las nuevas situaciones. La queja principal fue que el esquema de paridad de la versión 2.x, que usa palabras con 24 bits de datos seguidos de 6 bits de paridad, fue un desperdicio de ancho de banda. Otra queja fue que la paridad no era independiente de una palabra a otra. Otra más fue que incluso con tantos bits dedicados a la paridad, la integridad real del mensaje no era tan alta como debería ser. Además, las palabras de 30 bits son difíciles de manejar. El nuevo estándar, Versión 3, está destinado a corregir estas debilidades [56].

A diferencia de la versión 2.x, este estándar no incluye mensajes provisionales. Los mensajes en la Versión 3 han sido sometidos a pruebas de validez e interoperabilidad, y se consideran permanentes. Las correcciones a la norma pueden cambiar el significado de los bits reservados o proporcionar un texto de aclaración adicional, pero no se realizarán cambios en los campos de datos. Los cambios requerirán nuevos mensajes para ser desarrollados. Además de los mensajes

descritos en la norma actual, el Comité continúa desarrollando nuevos mensajes, que se describen en enmiendas publicadas por separado, y se reúnen periódicamente en una nueva edición de la norma. RTCM 10403.x para servicios DGNSS está demostrando ser útil en el soporte de posicionamiento cinemático y diferencial altamente preciso, así como en una amplia gama de aplicaciones de navegación en todo el mundo [56].

Tenga en cuenta que los mensajes de la versión 3 no son compatibles con la versión 2.x. Dado que muchos receptores han sido diseñados y programados para su uso con los mensajes de la versión 2.x, RTCM mantiene los estándares 10402.3 y 10403.3 como estándares "actuales" [56].

2.5.5. UBX

UBX es un protocolo binario desarrollado por la empresa suiza U-blox que produce receptores GPS tanto de bajo coste como de gama alta. Al ser este un protocolo binario los datos se procesan a mayor velocidad que el protocolo NMEA, cuyos mensajes están compuesto por caracteres ASCII, y puede transportar la misma información en menor cantidad de bytes. El protocolo UBX se basa en el estándar NMEA 0183 [2].

Los receptores U-blox utilizan las tramas UBX compuestas por la representación binaria de todos los tipos de datos GPS (posición, tiempo, satélites usados, ...). La estructura de una trama o frame UBX se detalla en la Figura 2.9.

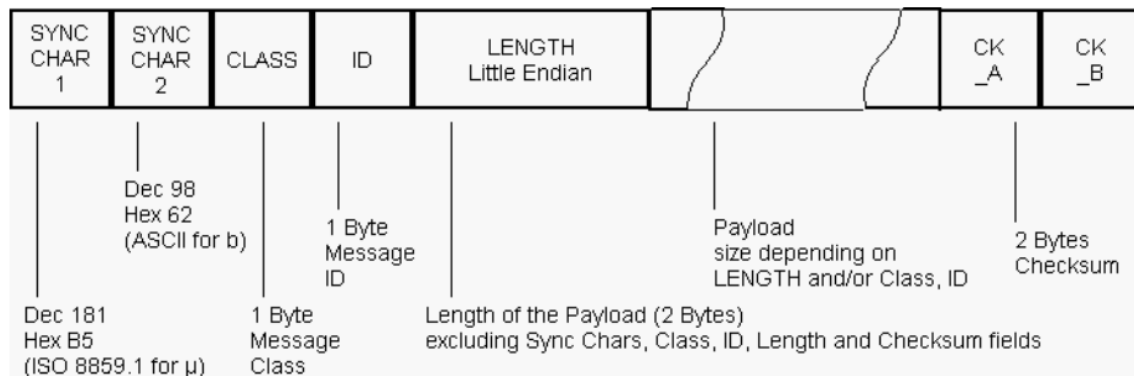


Figura 2.9 - Estructura trama UBX [41]

Cada oración binaria comienza con dos bytes, 0xB5, 0x62 en hexadecimal, que facilita la sincronización. Después, el tercer byte se utiliza para denotar la clase de mensaje (navegación, configuración, monitoreo, ...), el cuarto byte para denotar la identificación del mensaje y el quinto y sexto bytes para indicar la longitud de la carga útil con los datos GPS que se adjuntan en el siguiente campo. Los dos últimos bytes sirven de control de errores a través de una suma de control.

2.5.6. RINEX

RINEX (Receiver INdependent EXchange) es un formato de ficheros de texto orientado a almacenar, de manera estandarizada, medidas proporcionadas por receptores de sistemas de navegación por satélite, como GPS, GLONASS, EGNOS, WAAS o Galileo [13].

Fue desarrollado debido a la existencia de los diferentes de formatos de datos en los receptores GPS, ya que cada fabricante tenía su propio estándar, y así preservar la compatibilidad entre las aplicaciones de software. La salida final de un receptor de navegación suele ser su posición, velocidad u otras magnitudes físicas relacionadas. Sin embargo, el cálculo de todas estas magnitudes se basa en observaciones realizadas sobre una o varias constelaciones de satélites.

File Types	All platforms uncompressed	UNIX	VMS compressed	DOS
Obs Files	.yyO	.yyO.Z	.yyO_Z	.yyY
Obs Files (Hatanaka compressed)	.yyD	.yyD.Z	.yyD_Z	.yyE
GPS Nav Message Files	.yyN	.yyN.Z	.yyN_Z	.yyX
GLONASS Nav Message File	.yyG	.yyG.Z	.yyG_Z	.yyV
Galileo Nav Message File	.yyL	.yyL.Z	.yyL_Z	.yyT
Mixed GNSS Nav Message File	.yyP	.yyP.Z	.yyP_Z	.yyQ
GEO SBAS Nav Message Files	.yyH	.yyH.Z	.yyH_Z	.yyU
GEO SBAS Broadcast Files (sep. doc.)	.yyB	.yyB.Z	.yyB_Z	.yyA
Met Data Files	.yyM	.yyM.Z	.yyM_Z	.yyW
Clock Files (see sep.doc.)	.yyC	.yyC.Z	.yyC_Z	.yyK

Figura 2.12 - Extensiones de nombre de archivo recomendadas para archivos comprimidos [42]

Para reducir adicionalmente el tamaño de los archivos de observación, Yuki Hatanaka desarrolló un esquema de compresión especial que aprovecha la estructura de los datos de observación de RINEX formando diferencias de mayor orden en el tiempo entre observaciones del mismo tipo y satélite. Este archivo comprimido también es un archivo ASCII que luego se comprime nuevamente utilizando los programas de compresión estándar mencionados anteriormente [42].

Cada archivo RINEX con formato ASCII incluye un encabezado que especifica la versión RINEX y la definición global de los datos contenidos, seguida del contenido principal [42]. Hay tres tipos de ficheros:

1. El archivo de observación: contiene observables en bruto como pseudo-distancias (estimada utilizando el código C/A sobre la señal L1, C1, utilizando el código P sobre la señal L1, P1, y utilizando el código P sobre la señal L2, P2), fases (estimada sobre las señales L1 y L2) o tiempos. La estructura de la cabecera de este tipo de archivos se describe en la Tabla 2.6 y Tabla 2.7, también en la Figura 2.13 se muestra un ejemplo de un fichero de observación. En la Tabla 2.8 se detalla la estructura del registro de datos almacenados en el fichero de observación.

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCIÓN
RINEX VERSION / TYPE	- Versión de RINEX - Tipo de fichero ("O" observ.) - Sistema de satélite: * G: GPS, * R: GLONASS, * T: NNSS Transit. * M: Mixto.
PGM / RUN BY / DATE	- Programa de creación del fichero. - Agencia de creación del fichero. - Día de creación del fichero.
COMMENT	- Comentarios.
MARKER NAME	- Nombre del punto de observación
MARKER NUMBER	- Número del punto de observación
OBSERVER / AGENCY	- Nombre del observador y agencia.
REC # / TYPE / VERS	- Número de receptor, tipo y software.
ANT # / TYPE	- Número y tipo de antena.
APPROX POSITION XYZ	- Posición absoluta aproximada del punto en la última época
ANTENNA: DELTA H/E/N	- Altura de antena y excentricidades relativas al este y al norte (m).
WAVELENGTH FACT L1/2	- Factores de λ para L1 y L2: * 1: Ciclo completo. * 2: Medio ciclo (cuadratura). * 0 en L2: Sólo una frecuencia. - Número de satélites con estos factores. - Lista de PRNs satélites.

Tabla 2.6 - Descripción de la sección de encabezado del fichero de observación (parte 1) [43]

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCIÓN
# / TYPES OF OBSERV	- Número de observables grabados. - Tipos de observables grabados. <ul style="list-style-type: none"> * L1,L2: Medidas de fase L1 o L2. * C1: Pseudodist. con C/A en L1. * P1,P2: Idem con P en L1 o L2. * D1,D2: Doppler en L1 o L2. * T1,T2: Transit Integrated Doppler en 150 o 400 MHz.
INTERVAL	- Intervalo de observación (épocas) en s.
TIME OF FIRST OBS	- Tiempo de la primera época de grabación (año, mes, día, hora, minuto y segundo) - Sistema de tiempo: <ul style="list-style-type: none"> * GPS: tiempo GPS. * GLO: tiempo UTC
TIME OF LAST OBS	- Tiempo de la última época de grabación. La estructura es análoga a la anterior
LEAP SECONDS	- Salto de segundos desde el 6-1-1980. Es recomendable su uso con datos mixtos
END OF HEADER	- Final de cabecera

Tabla 2.7 - Descripción de la sección de encabezado del fichero de observación (parte 2) [43]

XXRINEXO V9.9	AIUB	20060324 144333 UTC	PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF A MIXED RINEX FILE VERSIOIN 3.01			COMMENT
The file contains L1 pseudorange and phase data of the geostationary AOR-E satellite (PRN 120 = S20)			COMMENT
A 9080			MARKER NAME
9080.1.34			MARKER NUMBER
BILL SMITH	ABC INSTITUTE		OBSERVER / AGENCY
X1234A123	GEODETIC	1.3.1	REC # / TYPE / VERS
G1234	ROVER		ANT # / TYPE
4375274.	587466.	4589095.	APPROX POSITION XYZ
.9030	.0000	.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N
0			RCV CLOCK OFFS APPL
G 5 C1C L1W L2W C1W S2W			SYS / # / OBS TYPES
R 2 C1C L1C			SYS / # / OBS TYPES
E 2 L1B L5I			SYS / # / OBS TYPES
S 2 C1C L1C			SYS / # / OBS TYPES
18.000			INTERVAL
G APPL_DCB	xyz.uvw.abc//pub/dcb_gps.dat		SYS / DCBS APPLIED
DBHZ			SIGNAL STRENGTH UNIT
2006 03 24 13 10 36.0000000	GPS		TIME OF FIRST OBS
			END OF HEADER
> 2006 03 24 13 10 36.0000000	0 5	-0.123456789012	
G06 23629347.915	.300 8	-.353 4 23629347.158	24.158
G09 20891534.648	-.120 9	-.358 6 20891545.292	38.123
G12 20607600.189	-.430 9	.394 5 20607600.848	35.234
E11 .324 8	.178 7		
S20 38137559.506	335849.135 9		

Figura 2.13 - Ejemplo de fichero de observación [42]

DESCRIPTION	FORMAT
EPOCH record	
- Record identifier : >	A1,
- Epoch :	
- year (4 digits)	1X,I4,
- month,day,hour,min (two digits)	4(1X,I2.2),
- sec	F11.7,
- Epoch flag	2X,I1,
0: OK	
1: power failure between previous and current epoch	
>1: Special event	
- Number of satellites observed in current epoch (reserved)	I3, 6X,
- Receiver clock offset (seconds, optional)	F15.12,

Tabla 2.8 - Descripción del registro de datos del fichero de observación [42]

2. El archivo de navegación: contiene datos relativos a las efemérides y coeficientes de corrección de tiempo del satélite. La estructura de la cabecera se describe en la Tabla 2.9, mientras que en la Tabla 2.10 se detalla descripción del registro de datos GPS almacenados en el fichero de navegación. En la Figura 2.14 se muestra un ejemplo de un fichero de navegación.

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCION
RINEX VERSION / TYPE	- Formato y tipo de fichero ("N" Naveg.)
PGM / RUN BY / DATE	- Nombre, agencia y día de creación
COMMENT	- Comentario
ION ALPHA	- Parámetros ionosféricos A0-A3 del almanaque
ION BETA	- Parámetros ionosféricos B0-B3 del almanaque
DELTA-UTC: A0,A1,T,W	- Parámetros del almanaque para calcular el tiempo en el sistema UTC: * A0,A1: Términos del polinomio. * T: Tiempo de referencia para datos UTC. * W: Número de la semana UTC de referencia
LEAP SECONDS	- Error en el tiempo por el salto de segundo
END OF HEADER	- Final de cabecera
OBS. RECORD	

Tabla 2.9 - Estructura fichero de Navegación [43]

```

----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
      3.01          N: GNSS NAV DATA      G: GPS          RINEX VERSION / TYPE
XXRINEXN V3      AIUB                    19990903 152236 UTC PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF VERSION 3.00 FORMAT          COMMENT
GPSA  .1676D-07  .2235D-07  .1192D-06  .1192D-06  IONOSPHERIC CORR
GPSB  .1208D+06  .1310D+06  -.1310D+06  -.1966D+06  IONOSPHERIC CORR
GPWT  .1331791282D-06  .107469589D-12  552960 1025  TIME SYSTEM CORR
      13                                          LEAP SECONDS
                                          END OF HEADER
G06 1999 09 02 17 51 44  -.839701388031D-03  -.165982783074D-10  .000000000000D+00
      .910000000000D+02  .934062500000D+02  .116040547840D-08  .162092304801D+00
      .484101474285D-05  .626740418375D-02  .652112066746D-05  .515365489006D+04
      .409904000000D+06  -.242143869400D-07  .329237003460D+00  -.596046447754D-07
      .11541663136D+01  .326593750000D+03  .206958726335D+01  -.638312302555D-08
      .307155651409D-09  .000000000000D+00  .102500000000D+04  .000000000000D+00
      .000000000000D+00  .000000000000D+00  .000000000000D+00  .910000000000D+02
      .406800000000D+06  .000000000000D+00
G13 1999 09 02 19 00 00  .490025617182D-03  .204636307899D-11  .000000000000D+00
      .133000000000D+03  -.963125000000D+02  .146970407622D-08  .292961152146D+01
      -.498816370964D-05  .200239347760D-02  .928156077862D-05  .515328476143D+04
      .414000000000D+06  -.279396772385D-07  .243031939942D+01  -.558793544769D-07
      .110192796930D+01  .271187500000D+03  -.232757915425D+01  -.619632953057D-08
      -.785747015231D-11  .000000000000D+00  .102500000000D+04  .000000000000D+00
      .000000000000D+00  .000000000000D+00  .000000000000D+00  .389000000000D+03
      .410400000000D+06  .000000000000D+00
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

```

Figura 2.14 - Ejemplo fichero de navegación [42]

Los datos resaltados en la Figura 2.14, se detallan en la Tabla 2.10. Como ejemplo, analizando los datos seleccionados en color verde, nos indica el sistema satelital (GPS), el número del satélite, la época, entre otros datos relacionados con la información y corrección de reloj de los satélites. En subrayado en rojo, se indican los datos relacionados con la ÓRBITA DE TRANSMISIÓN – 1 o BROADCAST ORBIT – 1, mientras que el subrayado azul indica ÓRBITA DE TRANSMISIÓN – 7.

OBS. RECORD	DESCRIPTION	FORMAT
SV / EPOCH / SV CLK	- Satellite system (G), sat number (PRN) - Epoch: Toc - Time of Clock (GPS) - year (4 digits) - month, day, hour, minute, second - SV clock bias (seconds) - SV clock drift (sec/sec) - SV clock drift rate (sec/sec2)	A1, I2.2, 1X, I4, 5 (1X, I2.2), 3D19.12 *)
BROADCAST ORBIT - 1	- IODE Issue of Data, Ephemeris - Crs (meters) - Delta n (radians/sec) - M0 (radians)	4X, 4D19.12 ***)
BROADCAST ORBIT - 2	- Cuc (radians) - e Eccentricity - Cus (radians) - sqrt(A) (sqrt(m))	4X, 4D19.12
BROADCAST ORBIT - 3	- Toe Time of Ephemeris (sec of GPS week) - Cic (radians) - OMEGA0 (radians) - Cis (radians)	4X, 4D19.12
BROADCAST ORBIT - 4	- i0 (radians) - Crc (meters) - omega (radians) - OMEGA DOT (radians/sec)	4X, 4D19.12
BROADCAST ORBIT - 5	- IDOT (radians/sec) - Codes on L2 channel - GPS Week # (to go with TOE) Continuous number, not mod(1024)! - L2 P data flag	4X, 4D19.12
BROADCAST ORBIT - 6	- SV accuracy (meters) - SV health (bits 17-22 w 3 sf 1) - TGD (seconds) - IODC Issue of Data, Clock	4X, 4D19.12
BROADCAST ORBIT - 7	- Transmission time of message (**) (sec of GPS week, derived e.g. from Z-count in Hand Over Word (HOW)) - Fit interval (hours) (see ICD-GPS-200, 20.3.4.4) Zero if not known - spare - spare	4X, 4D19.12

Tabla 2.10 - Fichero de navegación GNSS - descripción del registro de datos GPS [42]

- El archivo meteorológico: contiene datos de los observatorios y proporciona información meteorológica para el modelado de errores atmosféricos (temperatura, viento, humedad y presión atmosférica). Cada fichero contiene datos de una estación u observatorio según la estructura indicada en la Tabla 2.11.

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCION
RINEX VERSION / TYPE	- Formato y tipo de fichero (" <u>M</u> " met.).
PGM / RUN BY / DATE	- Programa, agencia y día de creación
COMMENT	- Comentario.
MARKER NAME	- Nombre de la estación
MARKER NUMBER	- Número de la estación
# / TYPES OF OBS	- Número y tipos de observación grabados. * PR: presión (mbar). * TD: temperatura seca (<u>celsius</u>). * HR: humedad relativa (%).
SENSOR MOD/TYPE	- Sensor de observación meteorológico: * Modelo. * Tipo. * Precisión. * Observable (PR, TD o HR)
SENSOR POS XYZH	- Posición aproximada del sensor. * XYZ <u>geocent.</u> (ITRF o WGS84). * <u>Elipsoidal</u> . * Tipo de observable (PR,TD,HR).
END OF HEADER	- Final de <u>cabecera</u>
OBS. RECORD	- <u>Época</u> en tiempo GPS (<u>año,mes,día,hora,minuto y segundo</u>). - Datos PR, TD y HR.

Tabla 2.11 - Estructura fichero meteorológico

2.6. Fuentes de errores GPS

Los errores GPS son aquellos que se relacionan con las lecturas de tiempo y trayectoria de los satélites debido a anomalías en el hardware o interferencia de la atmósfera. Varios errores afectan a la medición de pseudo-distancia. Para estimar el pseudo-distancia, es importante saber la hora en que se envió el mensaje desde el satélite. Esta información se encuentra en la sincronización con los códigos C/A o P(Y) dependiendo del usuario final. En el apartado 2.2 se hace mención en como el receptor utiliza la diferencia de tiempo entre el momento de la recepción de la señal y el tiempo de transmisión para calcular la distancia al satélite, teniendo en cuenta los retrasos en la propagación de la señal, debidos a la ionosfera y a la troposfera, y la asincronía entre el reloj de los satélites y el reloj del receptor GPS. En este apartado, se va a explicar el origen de los errores causantes de estos efectos y la manera de mitigarlos.

2.6.1. Errores de reloj

Cuando se habla de errores de reloj nos referimos a las variaciones en el sistema de tiempo del reloj del satélite, producidas por la deriva propia de los osciladores y las originadas por la acción de los efectos relativísticos. Dichos errores conllevan a que exista un diferencial entre el sistema de tiempo del satélite y del sistema GPS, el cual no va a ser constante para todos los satélites, sino que varía de uno a otro, debido a que la frecuencia estándar de los osciladores de los satélites tiene valores definidos para cada satélite [53]. Estos errores afectan tanto al reloj de los satélites como al reloj en los receptores GPS a la hora de determinar el tiempo transcurrido desde la transmisión de la señal por parte del satélite. El error que afecta a estos relojes es diferente para cada uno de estos, debido a que las características que poseen, las cuales describiremos a continuación:

Reloj satelital: los cálculos de posición GPS, como se discutió anteriormente en el apartado 2.2, dependen de la medición del tiempo de transmisión de la señal desde el satélite al receptor; Esto, a su vez, depende de saber el tiempo en ambos extremos. Los satélites GPS usan relojes atómicos, que son muy precisos, pero pueden desplazarse hasta una milésima

de segundo (lo suficiente para hacer una diferencia de precisión). Estos errores se minimizan calculando las correcciones de reloj, (en las estaciones terrenas del segmento control) y transmitiendo las correcciones junto con la señal de GPS a los receptores de GPS apropiadamente equipados.

Reloj receptor: los receptores GPS están equipados con relojes de cristal de cuarzo que son menos estables que los relojes atómicos utilizados en los satélites GPS. Sin embargo, el error del reloj del receptor se puede eliminar al comparar los tiempos de llegada, o marcas de tiempo, de las señales de dos satélites (cuyos tiempos de transmisión se conocen exactamente).

Las estaciones terrenas del segmento control, al igual que los satélites, están equipados de relojes atómicos con una estabilidad extremadamente alta. Varían no más de $2 \cdot 10^{-13}$ Hz/día. El tiempo medido por el segmento de control y los satélites se denomina **tiempo GPS** y coincide básicamente con el tiempo universal coordinado UTC. Actualmente, el tiempo GPS está adelantado 13 segundos respecto al UTC [52]. El receptor GPS debe conocer el error de su reloj respecto al tiempo GPS con una precisión del orden de 0,01 μ s.

Los satélites GPS usan relojes atómicos, que son muy precisos, pero pueden desplazarse hasta una milésima de segundo (lo suficiente para hacer una diferencia de precisión).

Estos errores se minimizan calculando las correcciones de reloj, (en las estaciones terrenas del segmento control) y transmitiendo las correcciones junto con la señal de GPS a los receptores de GPS apropiadamente equipados.

El receptor GPS corregirá el tiempo GPS recibido del satélite con la siguiente ecuación (en segundos).

$$t = t_{sv} - \Delta t_{sv}$$

donde

t = tiempo GPS

t_{sv} = marca de tiempo o instante en que el satélite transmite la señal hacia el receptor GPS.

Δt_{sv} = correcciones del reloj del satélite al instante de la transmisión.

La corrección del reloj del satélite adquirida permite al receptor GPS estimar el desplazamiento del reloj del satélite con referencia a las estaciones terrenas del segmento control con respecto al tiempo del sistema GPS (t) en el momento de la transmisión de datos. Esta corrección viene dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta t_{sv} = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{0c}) + a_{f2}(t - t_{0c})^2 + \Delta t_r$$

a_{f0} (*sesgo del reloj*), a_{f1} (*deriva del reloj*) y a_{f2} (*evolución de la deriva del reloj*) son los coeficientes enviados por los satélites, t_{0c} (también conocido como TOE – time of ephemeris) denota el instante de referencia o momento de cálculo de coordenadas, es la época de referencia para los coeficientes (segundos en la semana GPS).

Esta corrección estimada explica las características deterministas del error de reloj de SV del sesgo, la deriva y el envejecimiento o evolución de la derivada, así como las características de implementación del SV del sesgo de retardo de grupo y el retardo de grupo diferencial medio.

La corrección del reloj del satélite estimada se resta del tiempo de transmisión original (t_{sv}), lo que da la hora actual del GPS. La diferencia entre la hora real del satélite y la hora en el mensaje de navegación puede ser de hasta 10 ns (pocos metros en el rango) [32].

2.6.2. Errores ionosféricos

Los errores causados por la ionosfera se deben a una propagación diferente de la señal, ya que la luz sólo viaja a una velocidad constante sólo en el vacío, es decir, la señal se retrasa al pasar por la ionosfera (Figura 2.20). El tamaño del error, que puede llegar hasta de 100m, depende de la hora del día, ya que las capas ionosféricas inferiores desaparecen durante la noche [32].

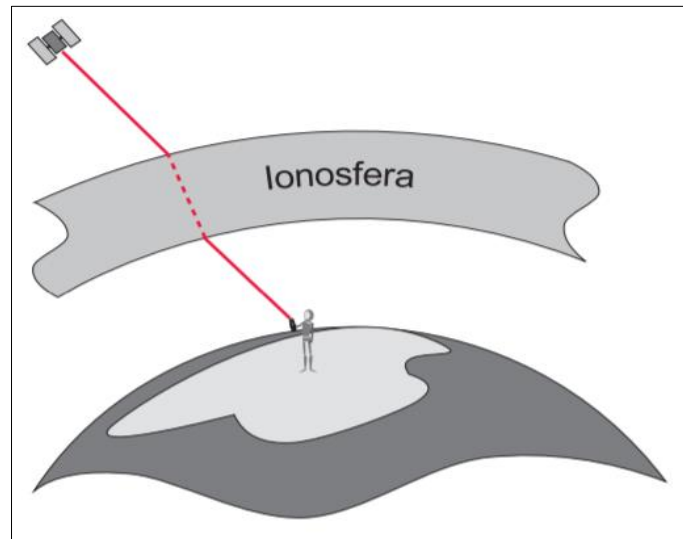


Figura 2.15 - Efecto de la ionosfera [15]

Para un receptor GPS autónomo con banda de frecuencia única (la mayoría de los receptores de GPS de bajo costo), el modelo ionosférico propuesto por J. Klobuchar se usa para reducir el error ionosférico [46]. Se trata de un enfoque empírico, que utiliza los coeficientes polinomiales transmitidos en el mensaje de navegación denominado alfa y beta de Klobuchar. Estos coeficientes se calculan a partir de un modelo global empírico y se actualizan cada diez días para estimar la fluctuación del contenido de electrones en las capas de la ionosfera y estimar el retraso que sufre la señal al atravesar la ionosfera [34]. La eficiencia de la reducción del error ionosférico es aproximadamente 50% [34].

2.6.3. Errores troposféricos

Los errores troposféricos tienen una gran influencia cuando la elevación del satélite es baja. Las señales de satélites que se encuentran en un ángulo de elevación bajo se verán más afectadas que las señales de satélites que se encuentran en un ángulo de elevación mayor. Esto es debido a la mayor distancia que la señal tiene que viajar a través de la atmósfera [15]. El error causado por la troposfera puede tener un alcance de hasta 30 m y depende en gran medida de la situación meteorológica actual (presión, humedad, temperatura y más).

Los retrasos se dividen en dos causas: hidrostática y húmeda. La hidrostática se debe por los gases secos en la troposfera, y el componente húmedo se basa en la presencia de vapor de agua y agua condensada en forma de nubes [47]. Estos valores son bastante fáciles de medir y predecir utilizando la base de los datos meteorológicos para estimar el retraso de la propagación en la troposfera. Este retraso tiene la ventaja de no ser dispersivo, es decir, tiene un valor constante para todas las componentes frecuenciales de la señal GPS L1 y L2 [8]. Las degradaciones

causadas por la troposfera son despreciables en las frecuencias inferiores a 1 GHz y en los ángulos de elevación del trayecto superiores a 10° [57].

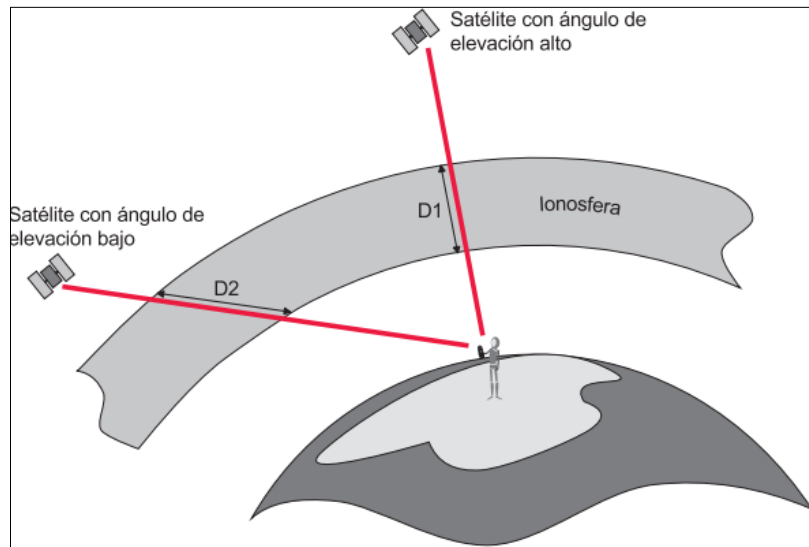


Figura 2.16 – Relación de la elevación del satélite con la variación de la distancia a recorrer por la señal hasta el receptor GPS [15]

2.6.4. Errores efemérides

Representa el error con respecto a la posición real del satélite y la información de posición emitida en los mensajes de navegación. Las efemérides representan los parámetros orbitales, que se utilizan para la estimación de la posición del satélite. Hay tres tipos diferentes de estos datos orbitales, Tabla 2.12:

- Almanaque, Es la información enviada periódicamente por los satélites de la constelación, informando sobre el estado de ellos mismos y el resto de los satélites de la red. Esta información suele variar aproximadamente cada 4 meses. La información del almanaque permite predecir la órbita y la posición de todos los satélites de forma aproximada. Cada satélite envía de forma individual los datos correspondientes al almanaque de todos los demás satélites [45]. El almanaque es transmitido dentro del mensaje de navegación de los satélites, ver Figura 2.5 y esencialmente contiene parámetros de la representación de la órbita, parámetros de corrección de los relojes del satélite, y otras informaciones.
- Las efemérides emitidas son datos enviados por los satélites, a los receptores GPS, para estimar la posición del satélite en tiempo real en los receptores. El receptor GPS utiliza los datos de las efemérides de varios satélites al mismo tiempo para realizar cálculos (triangulaciones) y correcciones que le permiten determinar con una cierta precisión cuál es su posición real en la Tierra. A diferencia del almanaque, cada satélite envía únicamente los datos de sus efemérides. La validez de los datos contenidos en las efemérides depende de cada satélite en particular, pero pueden llegar a ser útiles hasta 4 e incluso 6 horas. Garmin sin embargo considera las efemérides válidas sólo por un periodo máximo de 30 minutos. Este periodo de validez está incluido en la información de las propias efemérides. Las efemérides se envían en bloques de información digital que el receptor GPS tarda 30 segundos en recibir, y son enviados de forma continua (es decir, se reenvían de nuevo cada 30 segundos) [44]. Están referidas al sistema de referencia WGS84. No sirven para determinar la posición del satélite en la órbita.

- Las efemérides precisas son determinaciones orbitales XYZ de alta precisión, que se transmiten ya en coordenadas cartesianas geocéntricas. Se emplean los datos de pseudo-distancia y fase registrados por estaciones permanentes, siendo el proceso de cálculo inverso al del GNSS, se calculan las coordenadas de los satélites a partir de las coordenadas de la Tierra, siendo éstas muy precisas. Estas son proporcionadas por el Naval Surface Warfare Center. Se basan en los algoritmos de observación y predicción futura y están disponibles para el post-procesamiento con un retraso de aproximadamente dos semanas. Los datos pueden obtenerse previa solicitud, y son gratuitos. Representan la órbita real del satélite.

Ephemerides	Uncertainty
Almanac	$\cong 2$ kilometers
Broadcast	$\cong 1$ meter
Precise	$\cong 0.05 - 0.2$ meters

Tabla 2.12 – Tipos de efemérides/almanaque [36]

Para un mejor desglose del tema, citaremos las diferencias entre efemérides emitidas (válidas 30 m), efemérides precisas (válidas dos semanas) y el almanaque (válidas varios meses), así como ejemplos de datos orbitales.

En almanaque, cada satélite envía de forma individual los datos correspondientes al almanaque de todos los demás satélites, mientras que en las efemérides emitidas cada satélite envía únicamente los datos de sus efemérides.

La información del almanaque permite predecir la órbita y la posición de todos los satélites de forma aproximada. Las efemérides emitidas se utilizan con el fin de estimar la posición del satélite en tiempo real en los receptores GPS, pero no determinan la posición del satélite en la órbita, mientras que en las efemérides precisas se realiza un proceso de cálculo inverso al del GNSS, con el cual se calculan las coordenadas de los satélites a partir de las coordenadas de la Tierra, siendo éstas muy precisas, además de que representan la órbita real del satélite.

Los datos del almanaque tienen una validez de aproximadamente 4 meses y permite predecir la órbita y la posición de todos los satélites de forma con cierta exactitud. Las efemérides emitidas permiten estimar la posición del satélite en tiempo real con una buena exactitud, pero la validez de sus datos es de 30 minutos. Mientras que las efemérides precisas emplean los datos de pseudo-distancia y fase registrados por estaciones permanentes, proporcionadas por el Naval Surface Warfare Center o por la IGS (International GPS Service), para calcular las coordenadas de los satélites a partir de las coordenadas de la Tierra, con una precisión mejor que 0.05 metros en cada una de sus tres componentes geocéntricas (X, Y, Z). El tiempo de validez de estos datos depende de la precisión que se quiera obtener. Por una parte, están las efemérides precisas Ultrarrápidas que están disponibles al acabar el día y ofrece una precisión de 0.25 metros, y por otro lado se encuentran las efemérides precisas Finales, estas tienen una precisión de 0.05 metros, pero están disponibles a los 13 días o más [43].

- Efemérides Transmitidas

YEBE10180.19N	Nombre del fichero
YEBE1	4 caracteres que identifican la estación.
018	Día del año (001 a 366).
0	Hora del día. 0 significa que abarca todo el día.
*.19N	Año 2019, Navstar o GPS. (19G Año 2019, GLONASS.)

- **Efemérides Precisas ultrarrápidas**
El IGS las emite en tiempo real y se actualizan a las 03, 09, 15 y 21 h UTC. Las precisiones varían en función de la antelación con la que se publican las efemérides, llegando a alcanzar las órbitas de los satélites 5 cm y los relojes de los satélites 3 nanosegundos.

COD18320.EPH_5D

COD CODE, GPS + GLONASS
1832 Semana GPS que comienza el 01/01/1980
0 Día de la semana (domingo = 0, lunes = 1, martes = 2, ..., y sábado = 6)
***.EPH_5D** Abarca 5 días. Desde las 00.00 h del día 0 de la semana 1832 hasta las 23.45 h de 4 días después.

- **Efemérides ultrarrápidas, observadas**
Publicadas por el IGS entre 3 y 9 horas después del tiempo de estudio, actualizándose a las 03, 09, 15 y 21 h UTC. Las órbitas de los satélites tienen una precisión de 3 cm y la precisión de los relojes del satélite es de 150 picosegundos.
- **Efemérides ultrarrápidas, combinadas**
El IGS publica conjuntamente las previstas y las observadas cada 6 horas (00, 06, 12 y 18 h UTC). Cada una de ellas contiene información de 48 horas, de las cuales 24 son previas a la publicación y las otras 24 son posteriores. Tardan en publicarlas entre 3 y 9 horas.

igu18320_00.sp3

igu Efemérides ultrarrápidas del IGS, sólo GPS.
1832 semana GPS que comienza el 01/01/1980.
0 día de la semana (domingo = 0, lunes = 1, martes = 2, ..., y sábado = 6)
_00 hora de comienzo de las 48 horas. Puede ser _00, _06, _12 o _18.
***.sp3** precisión estándar versión 3.

- **Efemérides rápidas**
Publicadas por el IGS entre 17 y 41 horas después del paso del satélite todos los días a las 17 UTC. La precisión de las órbitas satelitales es de 2.5 cm y la de los relojes de los satélites y las estaciones de control son 75 picosegundos.

igr18320.sp3

igr Efemérides rápidas del IGS, sólo GPS.
1832 semana GPS que comienza el 01/01/1980.
0 día de la semana (domingo = 0, lunes = 1, martes = 2, ..., y sábado = 6)
***.sp3** Precisión estándar versión 3.

- **Efemérides finales**
El IGS las publica entre 12 y 18 días después del día de la observación, todos los jueves.

igs18231.sp3

igs Efemérides finales del IGS, sólo GPS.
1823 semana GPS que comienza el 01/01/1980
1 día de la semana (domingo = 0, lunes = 1, martes = 2, ..., y sábado = 6)
***.sp3** Precisión estándar versión 3

2.6.5. Errores por Multitrayecto

El multitrayecto se refiere a recibir la misma señal por varios caminos. Es causado por la reflexión de los edificios, los planos de agua y así sucesivamente. Si la pared refleja la señal, por ejemplo, el receptor recibirá esta señal con un retardo de tiempo y un desfase específicos. En otras palabras, el receptor se confunde debido a múltiples señales que llevan los mismos datos [48]. Los efectos del multitrayecto son muy difíciles de mitigar porque pueden suceder aleatoriamente y siempre tienen una geometría diferente.

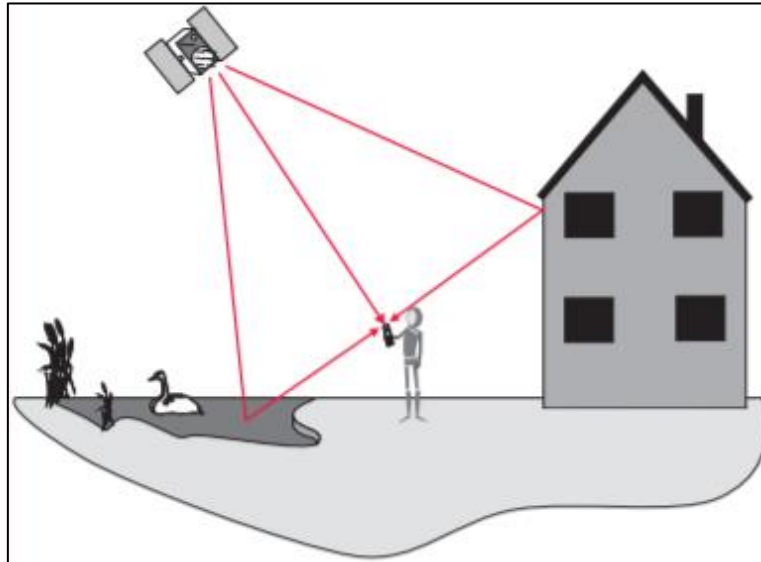


Figura 2.17 - Ejemplo de propagación multitrayecto (Multipath) [15]

Los receptores más avanzados pueden reducir el efecto multitrayecto al aceptar solo la ruta más corta, ya que la ruta directa debe ser la más corta. Sin embargo, esta funcionalidad está lejos de los receptores de bajo costo. Otro enfoque sobre cómo reducir la ruta múltiple es utilizar receptores de múltiples bandas y combinar tanto las señales L1 y L2 como la medición de fase. La solución efectiva para minimizar el efecto de trayectoria múltiple es colocar el receptor lejos de los objetos reflectantes o definir la máscara de elevación más alta, que descuida a los satélites de baja elevación.

2.7. Dilución de la precisión - (DOP)

Los parámetros DOP están relacionados con la constelación de satélites. La geometría de posición de los satélites influye en gran medida en la precisión y precisión de posicionamiento. Cuando los satélites utilizados para la solución de navegación se agregan en un área pequeña (la distancia entre cada satélite es relativamente pequeña) la estimación de la posición resultante da resultados mucho peores que cuando los satélites están más dispersos sobre el área visible.

Los parámetros DOP se utilizan para indicar este tipo de error. Tiene en cuenta la posición de cada nave espacial entre sí. Sobre la base de estos valores DOP, es posible predecir la precisión de la posición. Los valores de DOP pequeños representan la mayor precisión en la solución de navegación.

El DOP puede incrementar el efecto del error en la medición de distancia a los satélites. Este principio puede ser ilustrado mediante la Figura 2.18 y la Figura 2.19.

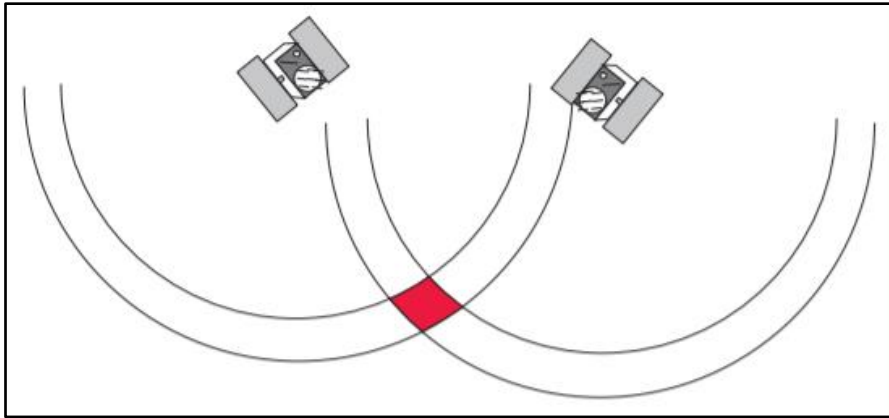


Figura 2.18 - Satélites con buena distribución - poca incertidumbre en su posición [15]

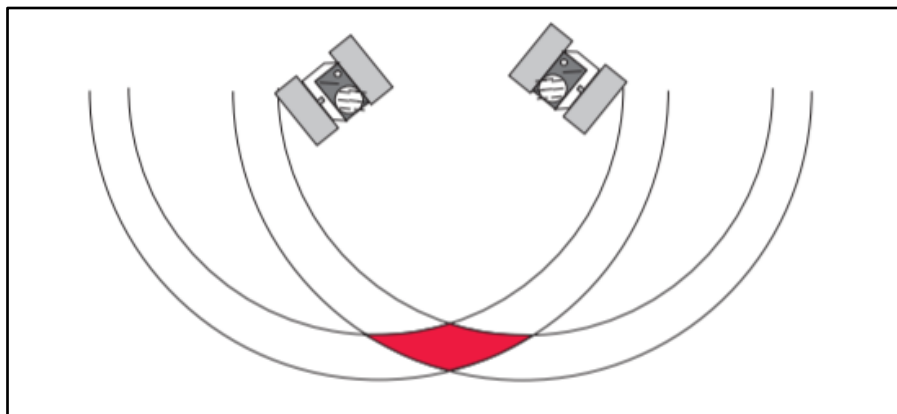


Figura 2.19 - Satélites con mala distribución - alta incertidumbre en su posición [15]

Cuando los satélites están bien distribuidos, la posición se puede determinar dentro del área sombreada del diagrama y el margen de error posible es mínimo. Cuando los satélites están muy cerca unos de otros, el área sombreada aumenta su tamaño, incrementando también la incertidumbre en la posición. Dependiendo de la dimensión, se pueden calcular diferentes tipos de Dilución de la Precisión:

- VDOP – Dilución Vertical de la Precisión. Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección vertical.
- HDOP – Dilución Horizontal de la Precisión. Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección horizontal.
- PDOP – Dilución de la Precisión en Posición. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D. La escala de los valores de PDOP se clasifica en categorías, lo que denota la calidad de la constelación de satélites:
 - <4 - buena geometría satelital
 - 5-7 - geometría más o menos aceptable
 - > 7 - mala geometría satelital
- GDOP – Dilución de la Precisión Geométrica. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D y en tiempo.

El valor DOP más útil a conocer es el GDOP, ya que es una combinación de todos los factores. Sin embargo, algunos receptores calculan el PDOP o HDOP, valores que no toman en consideración al componente de tiempo. La mejor manera de minimizar el efecto del GDOP es observar tantos satélites como sean posibles. Recuerde, sin embargo, que las señales de

satélites con poca elevación generalmente tienen una gran influencia de las fuentes de error. Es posible definir la máscara de limitación, que descartará las peores situaciones [31].

3. SISTEMAS AUMENTADOS GNSS

Como se ha explicado anteriormente, los sistemas de navegación actuales permiten hallar la posición de un receptor con un cierto grado de precisión, permitiendo el empleo de esta tecnología en aplicaciones de diversa índole. No obstante, las constelaciones de GPS y GLONASS no se elaboraron para satisfacer los requisitos estrictos (precisión, integridad, disponibilidad y continuidad) definidos por Instrumental Flight Rules (IFR). Los errores del sistema GNSS limitan la precisión obtenida en tiempo real, los métodos GNSS diferencial o GNSS aumentado, permiten mejorar tanto la precisión como la integridad y la fiabilidad de nuestros resultados. Los sistemas aumentados GNSS o GNSS diferencial, proporcionan un método para integrar información externa en el proceso de cálculo y mejorar así los atributos antes mencionados. Estas técnicas tienen que manejar las fuentes de error típicas de un GNSS convencional (desviaciones del reloj, efemérides o retardo ionosférico), para corregirlo directamente o proporcionar datos que mejoren la resolución y precisión de las ecuaciones [16].

Dependiendo de la fuente de la que se extraiga la información, se pueden clasificar a estos sistemas en tres categorías diferentes: el sistema basado en aeronaves (Aircraft Based Augmentation System, ABAS), basado en estaciones terrenas (Ground Based Augmentation System, GBAS), y el basado en estaciones satelitales geoestacionarias (Satellite Based Augmentation System, SBAS) [17].

3.1. SBAS

Los Sistemas Aumentados Basados en Satélites son sistemas que proporcionan correcciones a las señales de los GNSS para mejorar la estimación en el cálculo de la posición geográfica, además de que ofrecen mayor integridad y disponibilidad de las señales de navegación. Comúnmente, los sistemas SBAS se desarrollan para cubrir una región definida por el conjunto de satélites ubicados en órbita geoestacionaria. Los satélites transmiten datos de aumento al receptor en la misma frecuencia que el GPS L1, por lo que no hay requisitos de hardware especiales. Los satélites SBAS proporcionan correcciones para la posición del satélite GNSS (efemérides), sesgos de tiempo del satélite, errores troposféricos e ionosféricos. También se utilizan por parte del segmento de control para corrección y monitoreo de la integridad de la constelación GPS. Además, el SBAS puede ser utilizado por diferentes sistemas GNSS: GLONASS, GPS o GALILEO. Frente a su principal ventaja del SBAS es la disponibilidad gratuita para todos, se encuentran sus desventajas de falta de intensidad de la señal recibida y la disponibilidad de un número limitado de satélites SBAS (que dan como resultado una cobertura limitada).

SBAS utiliza mediciones GNSS tomadas por estaciones de referencia desplegadas en el área de interés. Todos los errores GNSS medidos se transfieren a un centro de computación central, donde se calculan las correcciones diferenciales y los mensajes de integridad. Estos cálculos luego se transmiten sobre el área cubierta utilizando satélites geoestacionarios que sirven como un aumento, o superposición, al mensaje GNSS original [19]. El sistema SBAS comprende (Figura 3.1):

- Una red de estaciones de referencia terrestres que monitorean las señales satelitales.
- Estaciones maestras que recopilan y procesan datos de estaciones de referencia y generan mensajes SBAS

- Estaciones de enlace ascendente que envían los mensajes a satélites geoestacionarios
- Transpondedores en estos satélites que emiten los mensajes SBAS.

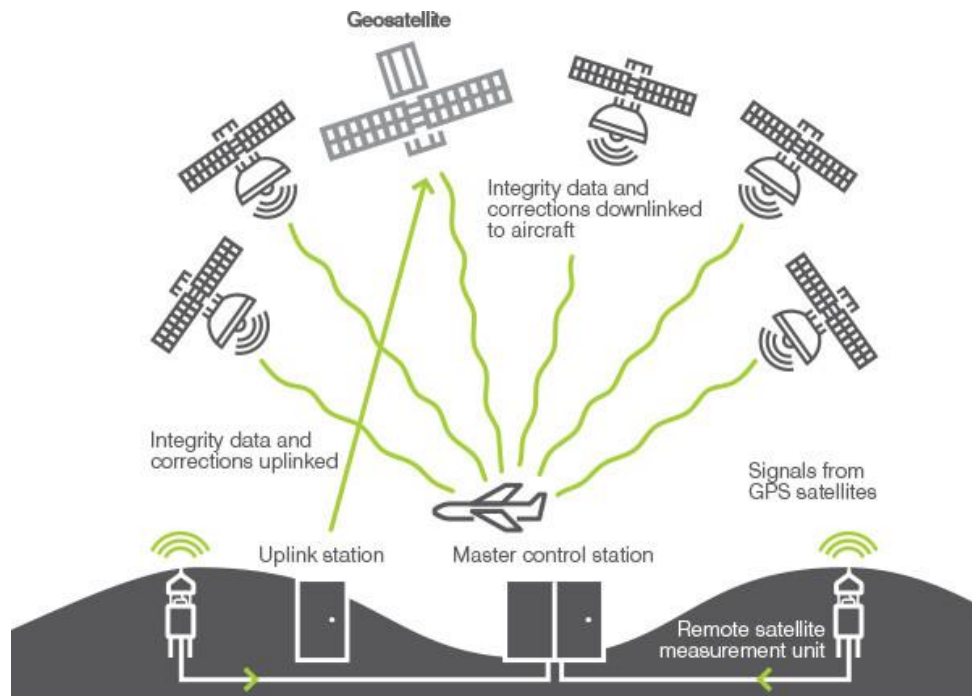


Figura 3.1 - Satellite-based augmentation system transmitting integrity [20]

Varios países han implementado su propio sistema de aumento basado en satélites. Por ejemplo (Figura 3.2):

- USA: Wide Area Augmentation System (WAAS)
- UE: European Geostationary Navigation Overlay (EGNOS).
- Japón: Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS)
- India: GPS and GEO Augmented Navigation (GAGAN)
- China: Satellite Navigation Augmentation System (SNAS)
- Core del sur: Wide Area Differential Global Positioning System (WADGPS)
- Rusia: System for Differential Corrections and Monitoring (SDCM)

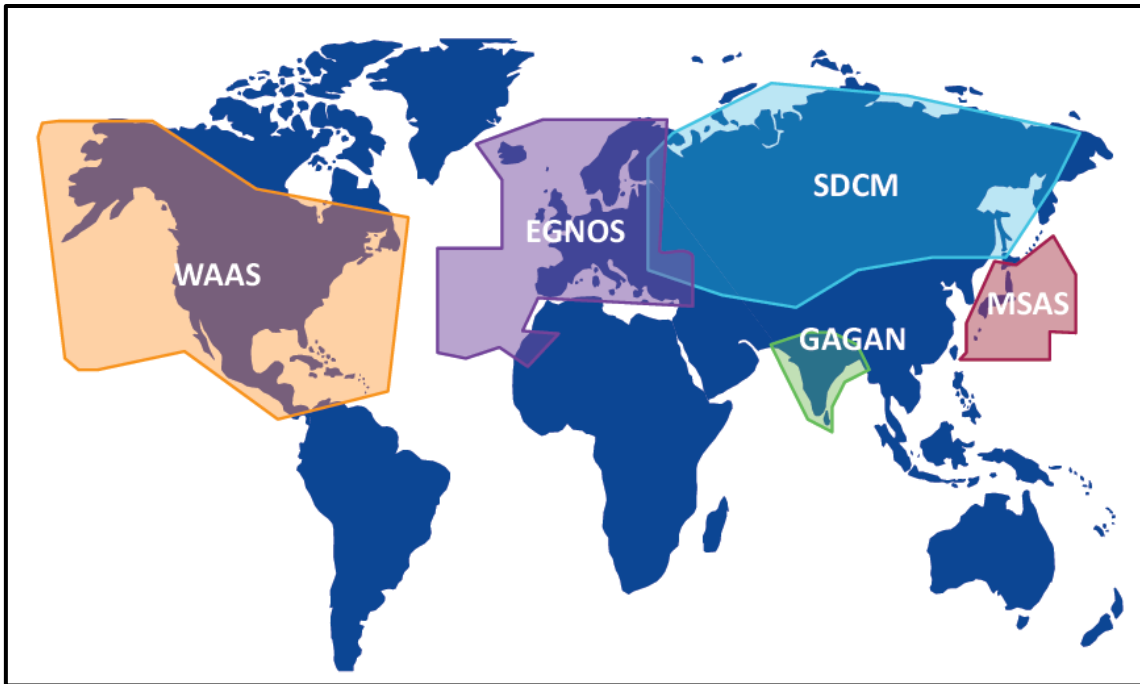


Figura 3.2 – Áreas de servicio de sistemas de aumento satelital (SBAS) [19]

3.1.1. EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay)

EGNOS es el SBAS regional de Europa desarrollado por la Agencia Espacial Europea y puesto en funcionamiento en 2004. Su objetivo principal es mejorar el nivel de precisión del actual sistema de navegación GPS, GLONASS y Galileo en el futuro. EGNOS se implementó para proporcionar servicios de navegación de seguridad de vida a usuarios de la aviación, marítimos y terrestres.

EGNOS utiliza mediciones GNSS tomadas por estaciones de referencia georreferenciadas con precisión desplegadas principalmente en Europa y el norte de África. Todas las mediciones se transfieren a un centro de computación central donde se calculan las correcciones diferenciales y los mensajes de integridad. Estos cálculos luego se transmiten sobre el área cubierta utilizando satélites geoestacionarios que sirven como un aumento, o superposición, al mensaje GNSS original [21].

EGNOS aumenta la señal civil GPS L1 (1575.42 MHz) código (C/A) al proporcionar correcciones e información de integridad para los vehículos espaciales GPS (efemérides y errores de reloj) y lo más importante, información para estimar los retrasos de la ionosfera que afectan al usuario. Los mensajes EGNOS se transmiten a través de dos satélites geoestacionarios en cumplimiento de las normas aplicables. La información proporcionada por EGNOS mejora la precisión y confiabilidad de la información de posicionamiento GNSS al tiempo que proporciona un mensaje de integridad crucial [21]. Además, EGNOS también transmite una señal de tiempo precisa.

El núcleo EGNOS consta de los siguientes segmentos (Figura 3.3):

- Segmento de tierra: comprende una red de 40 estaciones de monitoreo de integridad de rango (RIMS, Ranging Integrity Monitoring Stations), 2 centros de control de misión (MCC, Mission Control Centres), 2 estaciones terrestres de comunicación con los satelitales geoestacionarias (NLES, Navigation Land Earth Stations), y la red inalámbrica de EGNOS (EWAN, EGNOS Wide Area Network) que proporciona la comunicación entre todos los componentes del segmento terreno:

- 40 RIMS: la función principal de RIMS es recopilar mediciones de satélites GPS y transmitir estos datos sin procesar cada segundo a las Instalaciones de Procesamiento Central (CPF, Central Processing Facility) de cada MCC. La configuración utilizada para el sistema operativo inicial de EGNOS incluye 40 sitios RIMS ubicados en un área geográfica amplia.
- 2 MCC: estos reciben la información del RIMS y generan mensajes de corrección para mejorar la precisión de la señal del satélite y los mensajes de información sobre el estado de los satélites. El MCC actúa como el “cerebro” del sistema EGNOS.
- 2 NLES: los NLES transmiten el mensaje EGNOS recibido desde la instalación de procesamiento central a los satélites geoestacionarios para transmitirlos a los usuarios y garantizar la sincronización con la señal GPS.
- Segmento de soporte: Además de las estaciones / centros mencionados anteriormente, el sistema tiene otras instalaciones de soporte en Tierra involucradas en la planificación de las operaciones del sistema y la evaluación del rendimiento, que son el Servicio de evaluación de desempeño y verificación (PACF, Performance Assessment and Checkout Facility) y el Centro de calificación para aplicaciones específicas (ASQF, Application Specific Qualification Facility) operados por el proveedor de servicios EGNOS (ESSP).
 - PACF: brinda asistencia a la administración de EGNOS en forma de análisis de rendimiento, solución de problemas y procedimientos operativos, además de actualizar las especificaciones y validaciones y brindar asistencia de mantenimiento.
 - ASQF: proporciona a las autoridades de certificación de aviación civil y aeronáutica las herramientas para calificar, validar y certificar las diferentes aplicaciones EGNOS.
- Segmento espacial: compuesto por al menos tres satélites geoestacionarios que transmiten correcciones e información de integridad para satélites GPS en la banda de frecuencia L1 (1575.42 MHz). Esta configuración del segmento espacial proporciona un alto nivel de redundancia en toda el área de servicio en caso de una falla en el enlace del satélite geoestacionario. Las operaciones EGNOS se manejan de tal manera que, en cualquier momento, al menos dos GEOs transmiten una señal operativa.
- Segmento de usuario: el segmento de usuario de EGNOS está compuesto por receptores EGNOS que permiten a sus usuarios calcular con precisión sus posiciones con integridad. Para recibir señales de EGNOS, el usuario final debe usar un receptor compatible con EGNOS. Actualmente, los receptores compatibles con EGNOS están disponibles para segmentos de mercado tales como servicios basados en la agricultura, la aviación, el transporte marítimo, el ferrocarril, la cartografía / topografía, la carretera y la ubicación.

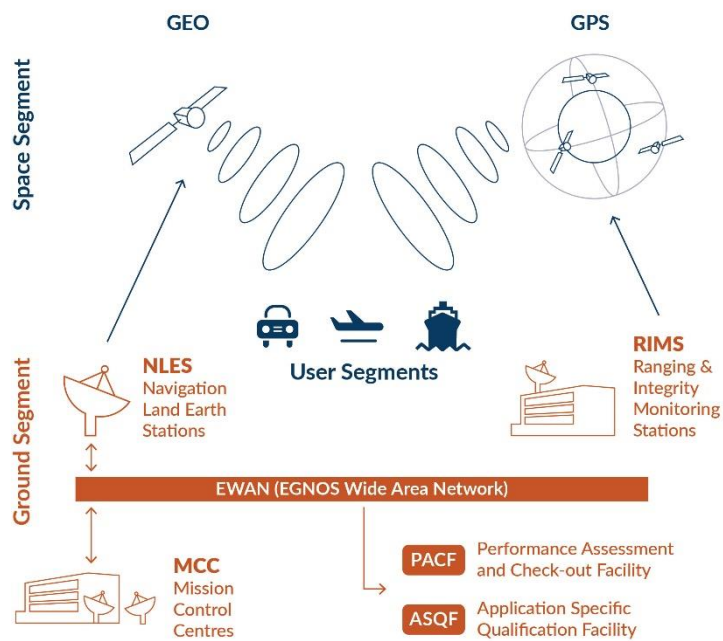


Figura 3.3 - Segmentos EGNOS [21]

Los resultados de la corrección EGNOS tienen una precisión horizontal de 3 m y una vertical de 4 m. Todas estas medidas de precisión corresponden al nivel de confianza del 95% [30].

La comunicación entre los satélites y receptores EGNOS se realiza mediante la transmisión de 16 mensajes diferentes en un ciclo de 6 segundos. Los datos de corrección se proporcionan en forma de correcciones rápidas y lentas. La corrección rápida representa los valores que cambian rápidamente, como los errores de reloj del satélite. La corrección lenta está compuesta por la deriva del reloj del satélite a largo plazo y el error de efemérides o el retraso de la señal ionosférica [30].

Dado que todos los satélites EGNOS están en órbitas GEO, y están girando sobre el ecuador, la señal de los satélites es débil al recorrer aproximadamente 38.000 km, especialmente en latitudes más altas. Debido a estas razones, no se recomienda usar SBAS para dispositivos de desplazamiento de superficie porque pueden perder fácilmente la señal SBAS. El cambio entre SBAS, el modo normal y los datos antiguos de SBAS pueden confundir al receptor, lo que puede resultar en errores más altos en el cálculo de la posición. Además, la señal más débil es más sensible a los rayos solares, lo que puede conducir a una pérdida total de la señal [30].

3.1.2. WAAS (Wide Area Augmentation System)

El Wide Area Augmentation System, WAAS, es un sistema de posicionamiento aumentado basado en satélites, diseñado principalmente para mejorar la precisión y la integridad del tráfico aéreo en los Estados Unidos. Sin embargo, la transmisión de los datos WAAS se realiza en la banda L1 de GPS, por lo que puede ser utilizada en cualquier receptor, que sea compatible con el SBAS.

Al igual que EGNOS, WAAS está compuesto por tres segmentos. El segmento espacial consta de tres satélites de PRN (PseudoRandom Noise) con números 133, 135 y 138. El segmento terreno

cuenta con 38 estaciones de referencia (WRS, Wide Area Reference Station) que capturan los errores del GPS local, tres estaciones maestras (WAMS, Wide Area Master Stations) y 6 estaciones de subida que se comunican con el segmento espacial. Finalmente, el segmento de usuario está compuesto principalmente de receptores avanzados como parte de la aviónica de un avión [49]. Las correcciones se emiten de la misma manera que EGNOS. Proporciona los mensajes de corrección rápida y lenta, que se pueden utilizar para las correcciones de pseudo-distancia.

3.2. GBAS

El Sistema de Aumentación Basado en Tierra, GBAS, es un sistema de corrección y aumento de señales de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) a través de una red de receptores terrestres transmitiendo en las bandas VHF y UHF. Como el resto de los sistemas de aumentación GNSS (SBAS y ABAS) se componen comúnmente de una o varias estaciones terrestres, en las que se conoce su posición precisa, y que reciben los datos de cada GNSS. Una vez corregida la señal transmite la información directamente mediante radio a los usuarios finales.

GBAS se diferencian de los Sistema de Aumentación Basado en Satélites en que no dependen de satélites geoestacionarios debido a que el GBAS no está diseñado para dar servicio sobre amplias regiones geográficas. GBAS también puede proporcionar correcciones a la señal telemétrica de los satélites geoestacionarios del SBAS.

3.2.1. Sistema de aumentación regional basada en Tierra (GRAS)

El GRAS (Ground based Regional Augmentation System) tiene como base al GBAS y consiste en una serie de estaciones GBAS desplegadas en un área extensa (incluso continental) interconectadas entre sí por sistemas de telecomunicaciones, permitiendo contar con una aumentación SBAS de carácter regional. Australia es el país más avanzado en estos momentos en el desarrollo e implementación de este tipo de sistemas.

3.2.2. Sistemas de Posicionamiento GPS/GNSS en Tiempo Real de España

Las Comunidades Autónomas y el IGN proporcionan conjuntamente un servicio de posicionamiento diferencial GNSS en tiempo real para toda España. Para generar este servicio se utilizan las estaciones permanentes de las redes GNSS de las Comunidades Autónomas con las que existe un acuerdo de colaboración y de la Red Geodésica Nacional de Referencia de Estaciones Permanentes GNSS (ERGNSS). Algunas de las estaciones de la ERGNSS son compartidas entre el IGN y otras instituciones como Puertos del Estado y Comunidades Autónomas. La utilización de un mayor número de estaciones distribuidas por el territorio aumenta la fiabilidad del sistema al incrementarse la integridad de este [24].

En nuestro caso para aplicar las correcciones diferenciales utilizaremos la Red de estaciones GNSS de la Comunidad de Madrid o RGM y las estaciones IGN de Madrid y de Yebes (Guadalajara). Esta selección se basa en el escenario elegido para hacer las medidas en el entorno de la Universidad de Alcalá. Los datos proporcionados por estas estaciones de referencia se utilizarán para aplicar un postprocesado de los datos GPS adquiridos previamente como primera aproximación a una esquema que proporcione datos GPS diferenciales de alta precisión basados en un receptor de bajo coste.

La RGM dispone de 5 estaciones de referencia situadas en las coordenadas detalladas en la Figura 3.4 que constan de una antena y un receptor de la marca TOPCON (Figura 3.5). Además,

se dispone de un sistema de distribución de datos vía FTP que permiten al usuario trabajar utilizando un único receptor para posicionarse con precisión sobre el territorio madrileño.

Tres Cantos (3CAN)	40° 36' 48.83159"N	3° 42' 05.90115" W	765.6980
Aranjuez (ARAN)	40° 01' 31.03681"N	3° 36' 45.08080" W	580.9090
El Escorial (ESCO)	40° 34' 42.01141"N	4° 07' 37.00562" W	949.3210
Alcalá de Henares (HENA)	40° 29' 18.76925"N	3° 23' 02.49129" W	663.5230
San Martín de Valdeiglesias (SANM)	40° 21' 29.81273"N	4° 22' 34.62383"W	670.8070

Figura 3.4 - Estaciones base de referencia GPS de la Comunidad de Madrid [22]



Figura 3.5 - Antena y receptor las estaciones base de referencia GPS de la Comunidad de Madrid [22]

Por otro lado están las estaciones permanentes del IGN que forman parte de una red cuyos objetivos son:

- Obtención de coordenadas muy precisas y campo de velocidades en todos los puntos de la red.
- Contribución a la definición de los nuevos Sistemas de Referencia Globales (ITRF, International Terrestrial Reference Frame) en el territorio nacional.
- Ser puntos fundamentales de la Red Europea EUREF de estaciones permanentes (EPN, EUREF Permanent Network) para la densificación de los marcos globales y definición del sistema ETRS89.
- Utilización de los registros de datos continuos para estudios de geodinámica, troposfera, ionosfera, meteorología, etc.
- Definir una red fundamental como apoyo para aplicaciones en tiempo real de correcciones diferenciales (DGNSS) y RTK (Real Time Kinematic).
- Proporcionar a los usuarios de GNSS, públicamente, los datos para trabajos geodésicos, cartográficos, topográficos y de posicionamiento en general.

El modo de acceso a los datos que proporcionan todas estas estaciones depende del servicio requerido:

Servicios postprocesado: los datos están disponibles en plataformas online libres en forma de ficheros RINEX, con diferentes intervalos (cada hora con un refresco de 1, 5, 10 y 30 segundos o cada día con un refresco de 30 segundos)

Servicios en tiempo real: mediante conexión a los diferentes *stream* de datos disponibles en plataformas online abiertas que permiten el posicionamiento preciso instantáneo para un usuario con acceso a Internet.

Para la utilización de este tipo de soluciones es necesario que, por un lado, el receptor del usuario conozca su posición aproximada (posición de navegación) y, por otro, que el usuario envíe esta posición al sistema (comunicación bidireccional). Las correcciones enviadas son generadas a partir de modelos que se alimentan de los datos registrados por todas las estaciones permanentes de la red. El servicio ofrece varias técnicas para la generación de las correcciones, como son MAC, VRS, FKP o CERCANA [25]. Esta es la solución más recomendable dado que su precisión es homogénea en todo el territorio y no exige conocer la estación permanente más próxima a la ubicación del dispositivo GPS/GNSS (Figura 3.6) [25]. Los servicios con el conjunto de red del tipo FKP, MAC y VRS permiten un posicionamiento automatizado con comunicación bidireccional y su precisión es homogénea en todo el territorio, mientras que en los servicios de punto simple la precisión será menor cuanto más lejano esté el usuario respecto a la estación de referencia [23].

Como alternativa simplificada el usuario puede seleccionar la estación de referencia de forma explícita y realizar los cálculos usando únicamente esa estación. En este caso, su precisión es menor a medida que el dispositivo GPS/GNSS se aleje respecto a la estación permanente de referencia. Por ello es recomendable utilizar la más próxima (Figura 3.7).

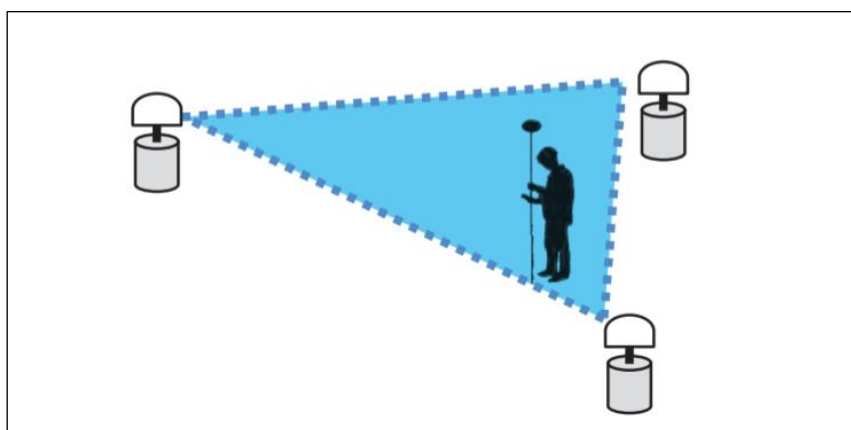


Figura 3.6 - Solución con el conjunto de red [25]

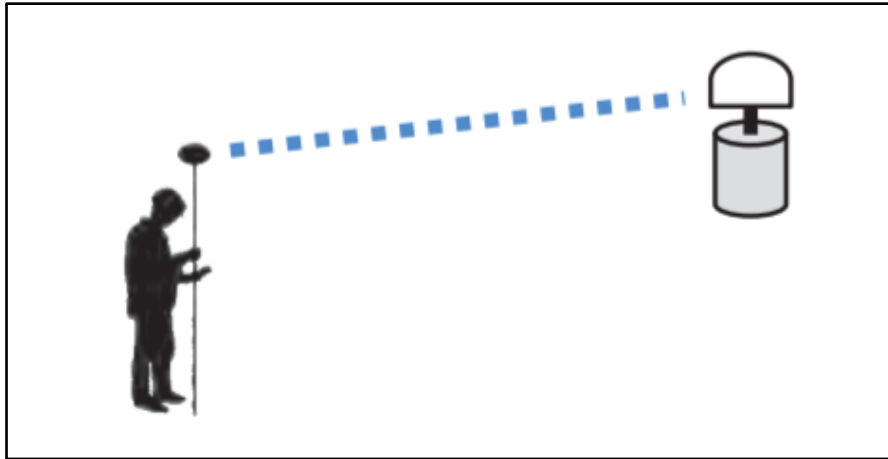


Figura 3.7 - Solución con estación única (punto simple) [25]

3.3. DGPS

El GPS Diferencial o DGPS es una técnica de aumentación GPS que proporciona correcciones de los datos recibidos de los satélites a los receptores GPS, con la finalidad de proporcionar una mayor precisión en la posición calculada. El fundamento radica en el hecho de que los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual (o de forma muy similar) a los receptores situados próximos entre sí [25]. El fundamento del sistema consiste en que la estación de referencia determina su posición a partir de las señales GPS y, comparándola con su posición conocida, calcula las diferencias o correcciones que deben aplicarse a los resultados obtenidos a partir de los satélites para que ambas posiciones coincidan. Estas correcciones son las que se transmiten a los usuarios del sistema, cuyos equipos DGPS las introducen en sus cálculos para determinar la posición [26]. Tanto en la Figura 3.8 como en la Figura 3.9 se puede apreciar un esquema generalizado.

DIFFERENTIAL GPS POSITIONING

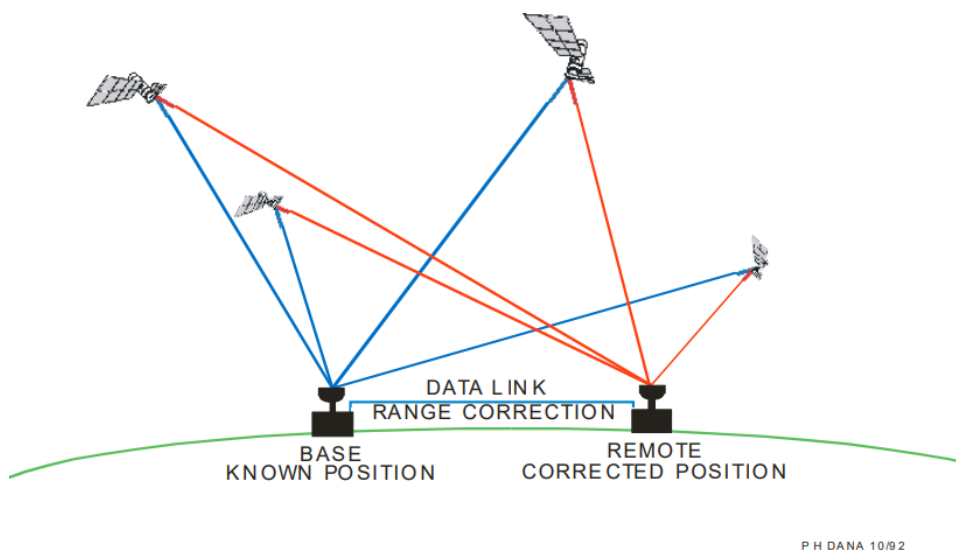


Figura 3.8 - Estructura GPS Diferencial [50]



Figura 3.9 - Estructura general del GPS Diferencial [26]

3.3.1. Corrección Diferencial

Las mediciones de GPS consisten en sesgos y ruidos que afectan la precisión de posicionamiento. Con el fin de mejorar la solución de posicionamiento GPS, implica conocer estos errores y los métodos para eliminarlos. DGPS es una técnica que mejora la precisión de la solución al tiempo que elimina estos errores. Fue desarrollado para satisfacer las necesidades de las aplicaciones de medición de posicionamiento y distancia que requerían mayores precisiones que el Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS) independiente. El DGPS se puede considerar como un método de calibración donde el estándar de calibración se establece en la estación base [27].

Un método común de corrección de errores es la corrección diferencial. La corrección diferencial utiliza las distancias conocidas entre dos o más receptores para mejorar las lecturas de GPS.

Las ubicaciones de dos receptores GPS, uno fijo y otro móvil, se ilustran en la Figura 3.10. El receptor estacionario o estación base registra continuamente su posición fija sobre un punto de control, que tiene una ubicación conocida que se ha medido con alta precisión. La diferencia entre la ubicación real de la estación base y su ubicación calculada es una medida del error de posicionamiento que afecta al receptor en esa ubicación en cada momento dado. En este ejemplo, la estación base está ubicada a unos 25 kilómetros del receptor móvil. El operador del receptor móvil se mueve de un lugar a otro.

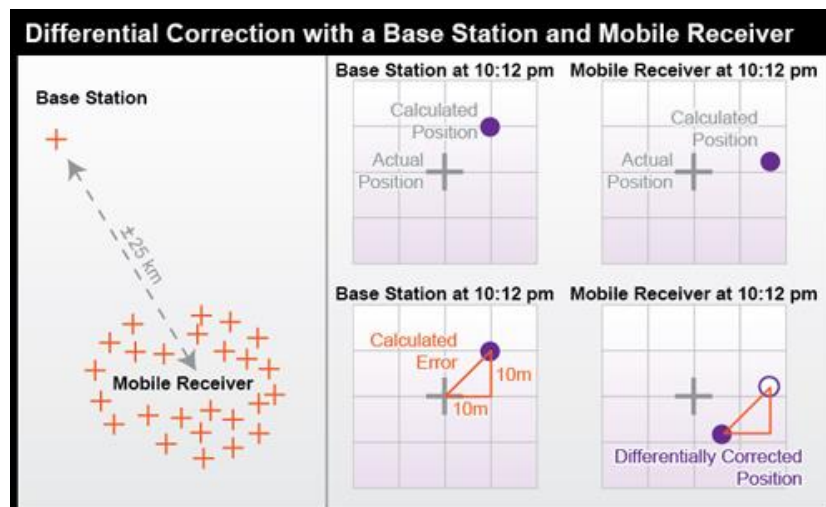


Figura 3.10 - Ejemplo corrección diferencial [28]

La estación base calcula la corrección necesaria para eliminar el error en la posición calculada en ese momento a partir de las señales de GPS. La corrección se aplica posteriormente a la posición calculada por el receptor móvil en el mismo instante. La posición corregida no es perfectamente precisa porque los tipos y magnitudes de errores que afectan a los dos receptores no son idénticos, y debido a la baja frecuencia del código de tiempo del GPS. Para que la corrección diferencial funcione, las correcciones registradas por el receptor móvil deben sincronizarse con las correcciones registradas por la estación base.

3.3.2. Metodologías de corrección

Algunas de las metodologías de corrección incluyen corrección diferencial de posición, de pseudo-distancia, de fase de portadora, ... Cada técnica tiene sus propias ventajas y desventajas.

Para nuestro estudio actual, hemos implementado el método de corrección de pseudo-distancia en modo off-line. Con esta técnica, se configura una estación de referencia para rastrear todos los satélites a la vista, asegurándose de que verá al menos los cuatro satélites que el receptor itinerante está utilizando para calcular las posiciones. Esta estación con una posición exactamente conocida mide el tiempo de viaje de la señal a todos los satélites GPS visibles y utiliza estos valores para calcular las pseudo-distancia. Estos valores medidos típicamente incluirán errores. Dado que se conoce la posición real de la estación de referencia, se puede calcular la distancia real (valor nominal) a cada satélite GPS. La diferencia entre los rangos geométricos y medidos se puede calcular mediante una resta llamada factor de corrección. Estos factores de corrección son diferentes para todos los satélites GPS e incluso son diferentes para el mismo satélite en diferentes épocas. La época es un momento en el que un receptor GPS realiza una medición. Estos factores de corrección se envían al receptor móvil para todas las épocas utilizando medios adecuados, en caso de aplicaciones en tiempo real. El receptor GPS móvil o rover utiliza estos factores para corregir las mediciones de pseudo rango que posteriormente se usan para determinar su posición precisa. El pseudorange corregido en el receptor en movimiento se corrompe por solo dos errores, es decir, el ruido del multitrayecto y del receptor, esto se explicará con más detalle en el apartado 3.3.5.

3.3.3. DGPS: Métodos de implementación

El procesamiento de datos DGPS se puede plantear con dos filosofías:

- **Procesamiento en tiempo real:** Para aplicaciones de navegación, se necesitan correcciones de pseudo-distancia en tiempo real que pueden transmitirse al usuario a través de un enlace de comunicación en el formato estándar SC-104 de la Comisión Técnica de Radio para el Servicio Marítimo (RTCM). Esta es la técnica más común donde se puede atender a un gran número de usuarios en tiempo real. Aunque el nivel de precisión de las aplicaciones en tiempo real es comparativamente bajo, la técnica es bastante útil para confirmar la monitorización de una ruta de navegación. El mayor esfuerzo en estos esquemas es la reducción de los problemas de latencia para cumplir requisitos de tiempo real. Los sistemas SBAS como WAAS, EGNOS y MSAS son aplicaciones DGPS en tiempo real.
- **Postprocesado o procesamiento offline:** Para el procesamiento offline, las observaciones de GPS (pseudo-distancia, fase, frecuencia Doppler o relación señal a ruido) se almacenan en un receptor móvil, normalmente de bajo coste, y luego se procesan en combinación con las observaciones en bruto del receptor de la estación

base almacenadas durante el mismo período de tiempo. La ventaja de esta solución es que resulta más precisa y confiable, ya que el usuario puede detectar errores en los datos y analizar los residuos. También para algunas aplicaciones específicas, como la fotogrametría, donde el coste y el esfuerzo para mantener un enlace de datos en tiempo real pueden ser excesivos.

3.3.4. DGPS: Precisión

Se pueden lograr dos niveles de precisión con DGPS: nivel de medidor y nivel de centímetro. La precisión del nivel del medidor se basa en los datos del código C/A, mientras que el nivel centímetro se basa en los datos de la fase de la portadora. Muchas aplicaciones de DGPS utilizan como único observable la pseudo-distancia estimada a partir del código C/A para alcanzar una precisión de 1 a 5 m en procesados en tiempo real [29]. DGPS no solo aumenta la precisión del posicionamiento del GPS, sino que también mejora la integridad del GPS al compensar las anomalías en las señales de rango del satélite y el mensaje de datos de navegación. Si se requiere una precisión de nivel intermedio, los servicios SBAS pueden ser explotados. Una gran ventaja de utilizar estos servicios es que las señales se transmiten en la frecuencia L1 y no se requiere ningún decodificador, lo que hace que este servicio sea utilizable para receptores de bajo coste. El rendimiento de EGNOS, para aplicaciones en abierto, en términos de precisión es de 3 m laterales y 4 m verticales, mientras que su disponibilidad es del 99% [30]. Las aplicaciones típicas de DGPS incluyen la determinación de coordenadas precisas, línea de base, actitud y navegación relativa del móvil.

En los primeros años, cuando el SA (Selective Availability) estaba activo, el error de posicionamiento sufría una gran variación y la precisión podía saltar de 10 a 200 metros en un minuto. Esta propiedad requería una alta tasa de transmisión. Desde que la SA se apagó en el año 2000, el tamaño del error de posición también se redujo, aunque la frecuencia del envío de datos de corrección permanece en el mismo nivel para aumentar la robustez del sistema DGPS [31].

3.3.5. Errores DGPS

El DGPS puede mitigar o reducir errores mutuamente correlacionados. Esto significa, que los receptores GPS cercanos, dentro de un área determinada, presentarán errores con características iguales o muy similares. Se trata de los efectos atmosféricos (propagación por la ionosfera y troposfera) y los errores en la posición del satélite o efemérides de reloj.

Como se ve en la descripción de los errores por multitrayecto en el apartado 2.6.5, este error no se puede mitigar debido a la geometría aleatoria. Las estaciones de referencia se pueden ubicar en un espacio abierto de forma precisa, por lo que se puede controlar el entorno y mitigar el multitrayecto, pero los receptores móviles se están moviendo posibilitando múltiples rutas de forma aleatoria. Las estaciones de referencia no tienen oportunidad de predecir o reducir este tipo de errores, ni tampoco de corregirlos.

Implementando el DGPS se eliminan los sesgos de reloj de satélite y, en el pasado, los errores de reloj generados por SA. El efecto de estos errores se proyecta en la medición de pseudo-distancia, que es igual para diferentes receptores en diferentes ubicaciones y se pueden restar mutuamente. Las efemérides y los errores atmosféricos pueden reducirse, pero no mitigarse. Se debe a que, en una ubicación diferente, se medirá un error diferente. La varianza del error depende de la distancia entre los receptores. Con mayor distancia, la varianza también será mayor.

Cuando se habla de la distancia entre los receptores, significa la distancia entre la estación de referencia y la estación móvil. El error de posicionamiento no debe exceder los 10 m en el área distante a 100 km de la estación de referencia [51].

La Tabla 3.1 muestra la mejora de precisión utilizando DGPS frente a las diferentes fuentes de error.

	GPS C/A code range (m)	DGPS C/A code range (m)
Satellite clock errors	1-3	0
Ephemeris errors	2.5-7	0-0.1
Ionospheric errors	2-15	0.1-1.5
Tropospheric errors	0.4-2	0.1-1.5
Multipath propagation	2-4	2-5
Resulting range error	4-18	2-6
Resulting position error H	6-27	3-9
Resulting position error V	10-45	5-15

Tabla 3.1 – Datos de precisión en términos de error cuadrático medio para GPS y DGPS [32]

3.3.6. Receptores GPS de bajo coste y DGPS

La implementación de los modelos generales DGPS en los receptores GPS de bajo coste es muy problemático. Se supone que los receptores de bajo coste se definen por su precio, que es inferior a 30 €. Estos receptores GPS son en su mayoría de un solo canal y proporcionan solo servicios básicos de navegación en forma de salida NMEA (mensajes GGA, GSV y GGL) de forma predeterminada. El usuario común está satisfecho con esta salida. Sin embargo, para aplicaciones avanzadas como DGPS, la salida NMEA no es suficiente. Se debe conocer la medición sin procesar de las pseudo-distancias y la posición de cada satélite para estimar las correcciones de pseudo-distancia mediante el modelo general DGPS.

Aunque actualmente existen muchas propuestas para poder implementar DGPS utilizando datos GPS de salida NMEA, utilizando técnicas como Corrección de la proyección al dominio de posición o el Filtro de Kalman. La gran mayoría de soluciones propuestas se basan en utilizar algoritmos desarrollados en Matlab, software con licencia. Para esto también existen software de código abierto como RTKLib para ejecutar dichos algoritmos entre otras cosas.

Para la recepción de datos GPS, en los últimos 9 años han surgidos receptores y módulos GPS de bajo costo, como los de la compañía U-blox, capaces de proporcionar los datos GPS binarios sin procesar, es decir los datos de salida GPS en crudo. Además, la empresa U-blox cuenta con el software U-center, el cual nos ofrece una amplia opción para la configuración del receptor GPS.

En cuanto a los sistemas para la adquisición y manejo de los datos GPS adquiridos, existen varias propuestas desarrolladas sobre los microcontroladores Arduino, ordenadores de una sola placa (SBC). Los Arduinos cumplen con el cometido, pero poseen cierto tipo de complejidad a la hora del desarrollo y uso del sistema, así como para la exportación y representación de los datos a otras plataformas. Eso sin mencionar la complejidad de uso para un usuario normal.

Otra opción existente para desarrollar dicho sistema es la Raspberry Pi. Estas nos ofrecen un abanico de posibilidades a la hora de adquisición de los datos ya que existen receptores GPS de bajo costo con la capacidad de conectarse vía USB a la Raspberry Pi sin necesidad de drivers y configuraciones tediosas, es decir "Plug and Play". Para el manejo y adecuación de los datos GPS

ya adquiridos, existen muchas librerías en el lenguaje de programación Python, que nos permiten filtrar, almacenar, representar y exportar los datos deseados. Para poder realizar el postprocesado, primero necesitamos convertir los datos adquiridos al formato RINEX. Para esto utilizaremos una extensión del programa RTKlib.

4. Desarrollo, implementación y validación del SISTEMA DGPS de bajo coste

4.1. Descripción del material Hardware

4.1.1. Raspberry Pi

Raspberry Pi es un ordenador de placa reducida, ordenador de placa única u ordenador de placa simple (SBC) de bajo coste desarrollado en el Reino Unido por la Raspberry Pi Foundation, con el objetivo de estimular la enseñanza de informática en las escuelas. Utiliza software de código abierto, siendo su sistema operativo oficial una versión adaptada de Debian, denominada Raspbian, aunque permite usar otros sistemas operativos, incluido una versión de Windows 10. En todas sus versiones, incluye un procesador Broadcom, memoria RAM, GPU, puertos USB, HDMI, Ethernet (el primer modelo no lo tenía), 40 pines GPIO (desde la Raspberry Pi 2) y un conector para cámara. Ninguna de sus ediciones incluye memoria, siendo esta en su primera versión una tarjeta SD y en ediciones posteriores una tarjeta MicroSD [59].



Figura 4.1 - Raspberry Pi modelo 1B

En este proyecto se desarrolla sobre el modelo Raspberry Pi 1B disponible en el grupo de investigación de Tecnologías de Alta Frecuencia de la Universidad de Alcalá, lanzada en el año 2012, cuyas especificaciones se mencionan continuación:

- Procesador Broadcom BCM2835, Single-Core a 700MHz
- 512 MB de memoria RAM
- Memoria gráfica Broadcom VideoCore IV
- 26 conectores GPIO
- Salidas de vídeo vía HDMI y Video RCA
- Conector Jack de 3.5 milímetros
- 2x Puertos USB
- 1x puerto MicroUSB (De alimentación)
- 1x Puerto Ethernet (RJ-45)

Aparte de lo mencionado anteriormente, se ha añadido a la Raspberry Pi, una tarjeta SD Samsung Evo Plus 64GB, un hub o extensor de puertos USB (para pasar de 2 a 5 puertos USB), una batería externa POSUGEAR Powerbank 10000mAh, un teclado y un ratón USB. Además, un adaptador wifi USB, el módulo receptor GPS y su antena, estos detallaremos en los siguientes apartados.

No obstante, vale la pena resaltar, que el proyecto a desarrollar cuenta con la flexibilidad de poder ser exportable y ejecutable tanto en la Raspberry Pi modelo 1B (año 2012) como en la Raspberry Pi 4 modelo B (año 2019).

4.1.2. Módulo GPS

Para este proyecto utilizaremos el módulo GPS **“MakerHawk Módulo GPS 51”**. Este módulo viene con un módulo de serie U-Blox NEO 7 integrado en el PCB, una EEPROM con configuración de fábrica, una pila de botón para mantener los datos de configuración en la memoria EEPROM, un indicador LED, una antena cerámica y un conector micro USB. Su principal ventaja es que tiene un conector micro USB en la placa, por lo que no se necesita un módulo aparte para una conexión serie a USB.

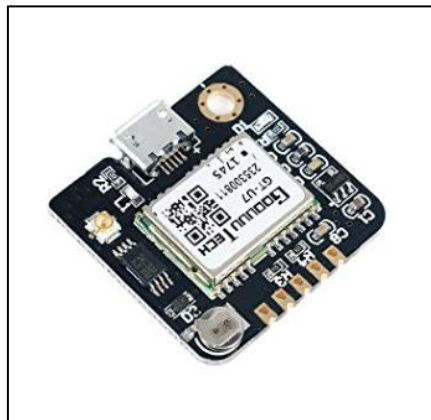


Figura 4.2 - Modulo GPS: MakerHawk Módulo GPS 51 (Fuente: Amazon.es)

La serie NEO-7 de módulos GNSS independientes se beneficia del rendimiento excepcional del núcleo u-blox 7 GNSS (GPS, GLONASS, QZSS y SBAS). La serie NEO-7 ofrece alta sensibilidad y tiempos de adquisición mínimos en el factor de forma NEO probado en la industria.

Los módulos u-blox 7 utilizan chips GNSS calificados según AEC-Q100 y se fabrican en sitios certificados ISO/TS 16949. Las pruebas de calificación se realizan según lo estipulado en la norma ISO16750: “Vehículos de carretera: condiciones ambientales y pruebas para equipos eléctricos y electrónicos” [60].

Model	Type	Supply	Interfaces	Features	Grade
	GPS / QZSS GLONASS Galileo BeiDou Timing Dead Reckoning Precise Point Positioning Raw Data	1.65 V – 3.6 V 2.7 V – 3.6 V Lowest power (DC/DC)	UART USB SPI DDC (PC compliant)	Programmable (Flash) Data logging Additional SAW Additional LNA RTC crystal Internal oscillator Active antenna / LNA supply Active antenna / LNA control Antenna short circuit detection / protection pin Antenna open circuit detection pin Frequency output	Standard Professional Automotive
NEO-7N	• •	• •	• • • •	• • • • • T •	
NEO-7M	• •	• •	• • • •	• C •	

◦ = Optional, not activated per default or requires external components

C = Crystal / T = TCXO

Tabla 4.1 - Características del módulo GPS u-blox 7 [60]

Los módulos de posicionamiento u-blox 7 son receptores GNSS capaces recibir y rastrear señales GPS, GLONASS o Galileo individualmente. Los receptores u-blox 7 están diseñados para recibir y rastrear las señales L1 C/A proporcionadas a 1575.42 MHz por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) [60]. En la Tabla 4.2 se resumen las características de funcionamiento y de precisión del módulo seleccionado y en la Tabla 4.3 podemos conocer los protocolos de comunicación soportados por el módulo para el intercambio de mensajes con los satélites junto con el formato de datos. Así mismo, en la Tabla 4.4 se muestran los mensajes por defecto del módulo.

Parameter	Specification		
Receiver type	56 Channels GPS L1C/A SBAS L1C/A QZSS L1C/A Galileo E1B/C ¹		
Time-To-First-Fix ²		NEO-7N	NEO-7M
	Cold Start	29 s	30 s
	Warm Start	28 s	28 s
	Hot Start	1 s	1 s
	Aided Starts ³	5 s	5 s
Sensitivity ⁴		NEO-7N	NEO-7M
	Tracking & Navigation	-162 dBm	-161 dBm
	Reacquisition	-160 dBm	-160 dBm
	Cold Start	-148 dBm	-147 dBm
	Warm Start	-148 dBm	-148 dBm
	Hot Start	-156 dBm	-155 dBm
Horizontal position accuracy ⁵	Autonomous	2.5 m	
	SBAS	2.0 m	
Accuracy of time pulse signal	RMS	30 ns	
	99%	60 ns	
Frequency of time pulse signal		0.25 Hz ... 10 MHz (configurable)	
Max navigation update rate		10 Hz	
Velocity accuracy ⁶		0.1 m/s	
Heading accuracy ⁶		0.5 degrees	
Operational limits ⁷	Dynamics	≤ 4 g	
	Altitude	50,000 m	
	Velocity	500 m/s	

Tabla 4.2 – Características de funcionamiento y precisión del módulo u-blox 7 [60]

Protocol	Type
NMEA	Input/output, ASCII, 0183, 2.3 (compatible to 3.0)
UBX	Input/output, binary, u-blox proprietary
RTCM	Input, 2.3

Tabla 4.3 – Protocolos de mensajes de navegación soportados por el módulo u-blox 7 [60]

Interface	Settings
UART Output	9600 Baud, 8 bits, no parity bit, 1 stop bit Configured to transmit both NMEA and UBX protocols, but only the following NMEA (and no UBX) messages have been activated at start-up: GGA, GLL, GSA, GSV, RMC, VTG, TXT
USB Output	Configured to transmit both NMEA and UBX protocols, but only the following NMEA (and no UBX) messages have been activated at start-up: GGA, GLL, GSA, GSV, RMC, VTG, TXT USB Power Mode: Bus Powered
UART Input	9600 Baud, 8 bits, no parity bit, 1 stop bit, Autobauding disabled Automatically accepts following protocols without need of explicit configuration: UBX, NMEA The GNSS receiver supports interleaved UBX and NMEA messages.
USB Input	Automatically accepts following protocols without need of explicit configuration: UBX, NMEA The GNSS receiver supports interleaved UBX and NMEA messages. USB Power Mode: Bus Powered
TIMEPULSE (1 Hz Nav)	1 pulse per second, synchronized at rising edge, pulse length 100ms

Tabla 4.4 – Mensajes por defecto del módulo u-blox 7 [60]

4.1.3. Antena GPS 2J431 MP

Las especificaciones de la antena GPS se detallan a continuación:

Antena GPS 2J431 MP			
Frecuencia	1575,42 MHz (GPS)	Corriente	15 mA –25 mA
Impedancia	50 Ω	Potencia (máxima)	125 mW
Polarización	RHCP (Right Hand Circular Polarization)	Voltaje de alimentación	3V –5V
Ganancia	26 dB a 3V, 28 dB a 5V	Tipo de cable (2,5 m)	RG174U
Dimensiones (mm)	41 x 34 x 13,7	Tipo de conector	SMA Macho

Tabla 4.5 - Especificaciones Antena GPS 2J431 MP (Fuente: Amazon.es)

4.1.4. Adaptador Wifi USB Nano TP-Link TL-WN725N

El Adaptador USB Nano Inalámbrico N de 150Mbps de TP-LINK, el TL-WN725N permite conectar a la Raspberry Pi a una red inalámbrica a 150Mbps. Este adaptador en miniatura está diseñado para que sea lo más convenientemente. También posee la característica de encriptación inalámbrica avanzada y fácil instalación. Los modelos Raspberry Pi 3B y superiores, no necesitan de este adaptador ya que estas traen el adaptador wifi integrado.

Adaptador USB Nano Inalámbrico TL-WN725N	
Estándares Inalámbricos	IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n
Frecuencia	2.400-2.4835GHz
Tasa de Señal	11b: Hasta 11Mbps (dinámico) 11g: Hasta 54Mbps (dinámico) 11n: Hasta 150Mbps (dinámico)
Sensibilidad de Recepción	130M: -68dBm@10% PER 108M: -68dBm@10% PER 54M: -68dBm@10% PER 11M: -85dBm@8% PER 6M: -88dBm@10% PER 1M: -90dBm@8% PER
Potencia de Transmisión	<20dBm
Modos Inalámbricos	Ad-Hoc / Modo de infraestructura
Seguridad Inalámbrica	Soporta WEP, WPA/WPA2, WPA-PSK/WPA2-PSK (TKIP/AES) de 64/128, soporta IEEE 802.1X
Tecnología de Modulación	DBPSK, DQPSK, CCK, OFDM, 16-QAM, 64-QAM

Tabla 4.6 - Características Adaptador wifi USB inalámbrico Nano TP-Link TL-WN725N (Fuente: Amazon.es)

4.2. Descripción del material Software

4.2.1. U-center

U-center es un software de evaluación GNSS que proporciona una plataforma poderosa para la evaluación, configuración, prueba y visualización del rendimiento en tiempo real de los productos receptores u-blox GNSS [61]. Los receptores GNSS de u-blox se pueden configurar utilizando el software de evaluación u-center.

Características:

- Altamente interactivo y fácil de usar
- Compatibilidad y soporte completo de todos los receptores GNSS de u-blox
- Amplia configuración de GNSS, funciones de control y mensajes de salida
- Visualización en tiempo real desde un receptor GNSS a través de RS232 y una interfaz USB
- Su flexibilidad única hace de u-center la herramienta ideal en todo el proceso de integración del sistema.
- Permite el análisis comparativo del rendimiento de los receptores GNSS que emiten mensajes NMEA
- De libre disposición

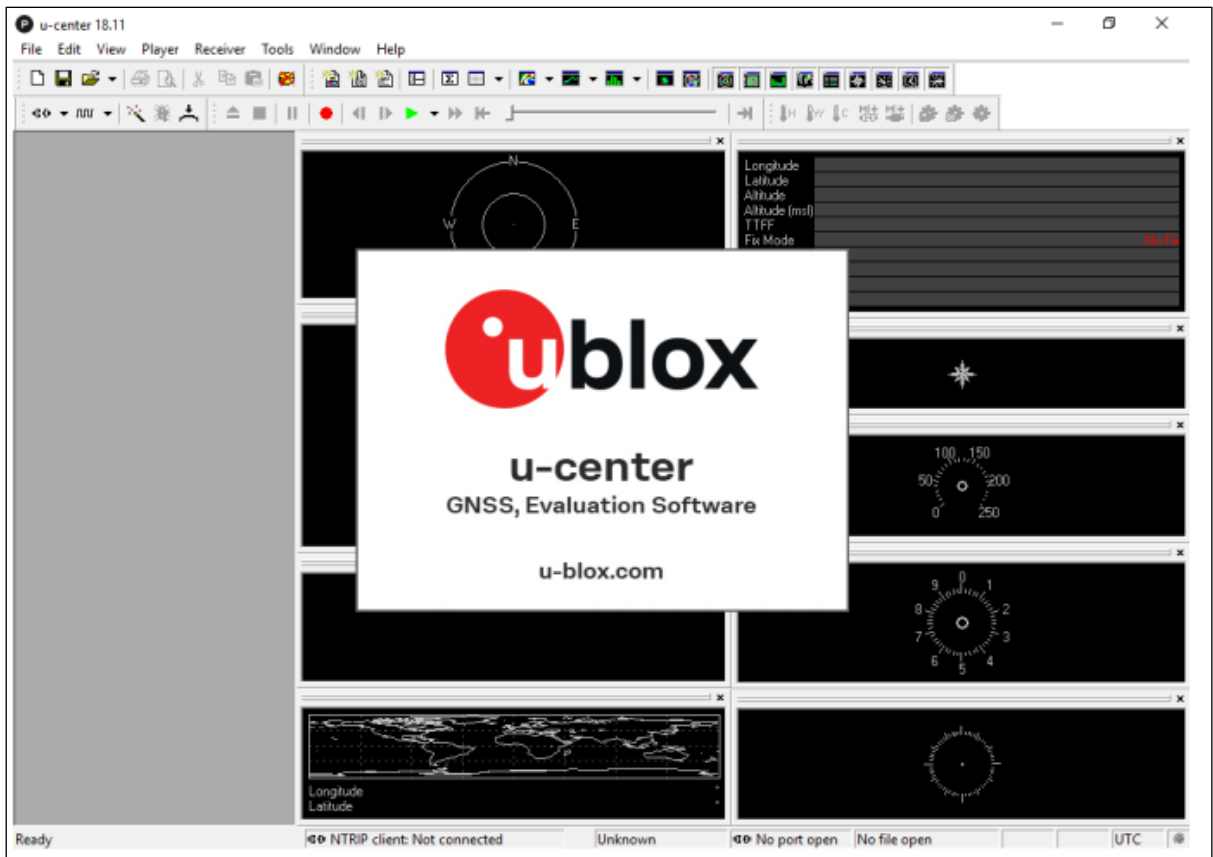


Figura 4.3 - Pantalla de inicio u-center 18.11 [61]

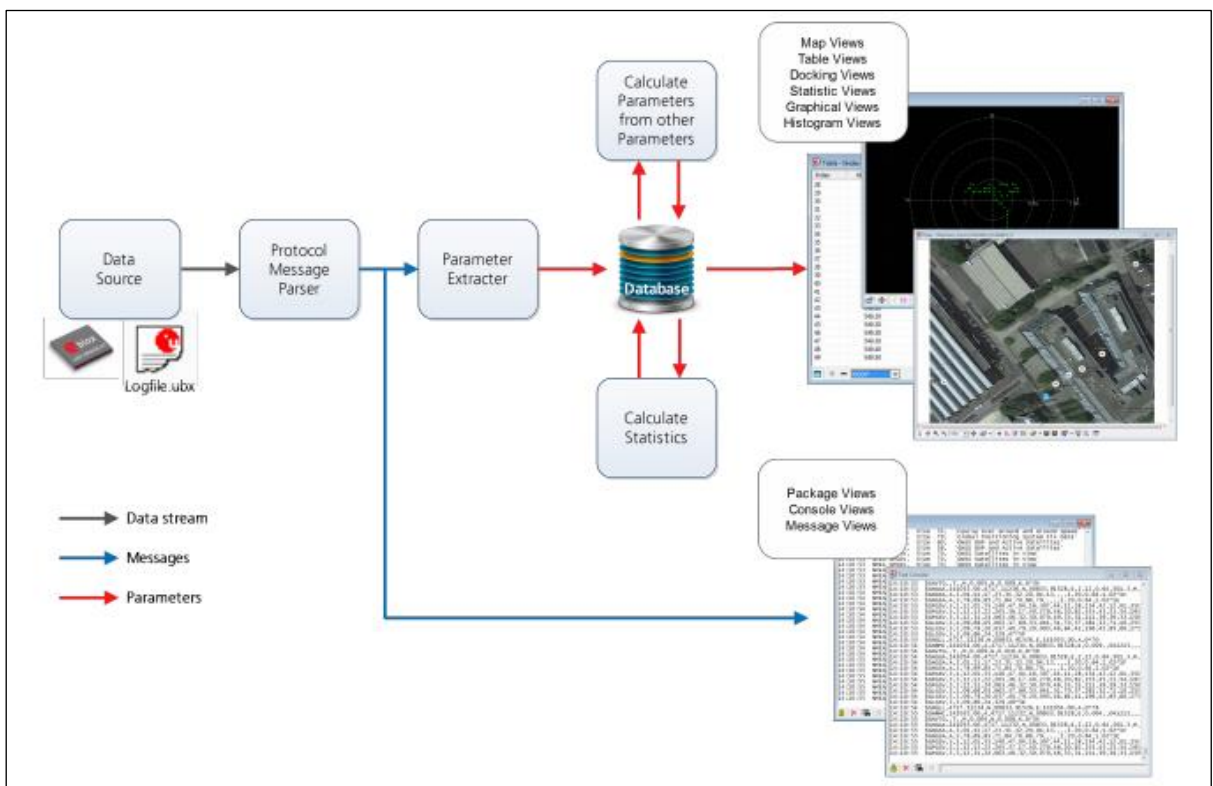


Figura 4.4 - Arquitectura del núcleo u-center [61]

4.2.2. RTKLIB

RTKLIB es un conjunto de herramientas GNSS de código abierto para realizar un posicionamiento estándar y preciso. Al usar datos sin procesar de GNSS, es posible realizar el procesamiento en tiempo real y posterior para determinar con precisión una posición, ya sea utilizando una estación base, un posicionamiento preciso del punto (PPP) o datos precisos de efemérides y reloj. El software es compatible con todas las principales constelaciones de satélites (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, SBAS, QZSS) y los principales formatos de intercambio de archivos. El kit de herramientas se ejecuta con una GUI en Windows y herramientas de línea de comandos en Linux [62].

Dentro de las herramientas incluidas, nos centraremos en las 3 primordiales para este proyecto:

- RTKNAVI: recibe datos sin procesar de un receptor GPS en tiempo real y utiliza un método seleccionable para calcular la posición actual. Son posibles varias fuentes de entrada, por ejemplo, una estación de referencia o un servidor Ntrip además del receptor.
- RTKPOST: A diferencia de RTKNAVI, RTKPOST procesa datos sin procesar solo después del hecho, esto se denomina postproceso. Las funciones y opciones de configuración son similares.
- RTKCONV: puede leer varios formatos y convertirlos al formato estándar RINEX necesario, por ejemplo, para la herramienta RTKPOST.

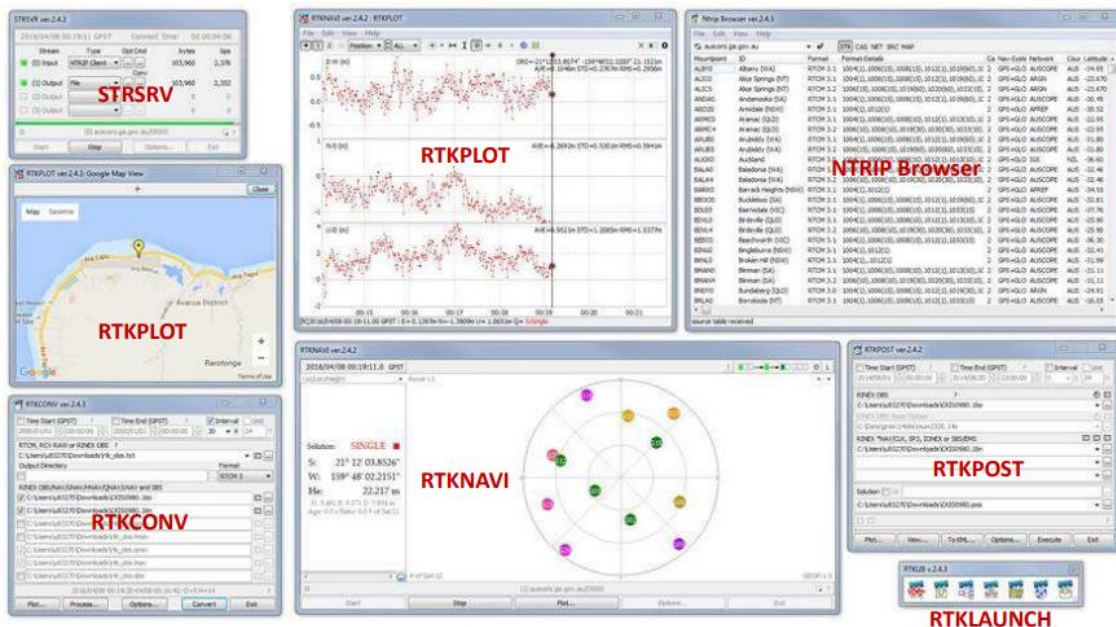


Figura 4.5 - Herramientas de RTKlib [63]

Como mencionamos anteriormente, las herramientas de RTKlib se pueden ejecutar con una interfaz gráfica de usuario (GUI) en Windows, mientras que en Linux solo pueden ejecutarse por medio de una interfaz de línea de comandos (CLI) o interfaz de usuario de caracteres (CUI). Las herramientas disponibles tanto para Windows como para Linux las podemos apreciar en la siguiente tabla:

	Function	GUI AP	CUI AP	Notes
(a)	AP Launcher	RTKLAUNCH	-	
(b)	Real-Time Positioning	RTKNAVI	RTKRCV	
(c)	Communication Server	STRSVR	STR2STR	
(d)	Post-Processing Analysis	RTKPOST	RNX2RTKP	
(e)	RINEX Converter	RTKCONV	CONVBIN	
(f)	Plot Solutions and Observation Data	RTKPLOT	-	
(g)	Downloader of GNSS Data	RTKGET	-	
(h)	NTRIP Browser	SRCTBLBROWS	-	

Tabla 4.7 - Herramientas RTKlib disponibles en CUI y GUI [63]

4.2.3. Python

Python es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, de tipado fuerte, dinámico y multiplataforma. Es administrado por la Python Software Foundation. Posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License que es compatible con la Licencia pública general de GNU a partir de la versión 2.1.1, e incompatible en ciertas versiones anteriores [64].

Dentro de las librerías utilizadas en este proyecto, las más destacadas son las siguientes:

- Pynmea2: Permite filtrar por una cadena de datos NMEA y descomponer la misma.
- Gpsd: Permite detectar el módulo GPS conectado a la Raspberry Pi vía USB.
- Gpxpy: Esta es una librería simple de Python para analizar y manipular archivos GPX. GPX es un formato basado en XML para trazas GPS.
- Gmplot: Permite visualizar en Google Maps las trazas de los datos adquiridos.

4.2.4. Beebotte

Beebotte es una plataforma en la nube para Internet of Things que permite el desarrollo de aplicaciones conectadas en tiempo real. Beebotte simplifica el desarrollo al proporcionar API (Application Programming Interface) y componentes para la recopilación, el almacenamiento y la administración de datos con la capacidad de crear paneles personalizados para su visualización. En este proyecto utilizaremos su capacidad de poder almacenar y representar las coordenadas obtenidas.

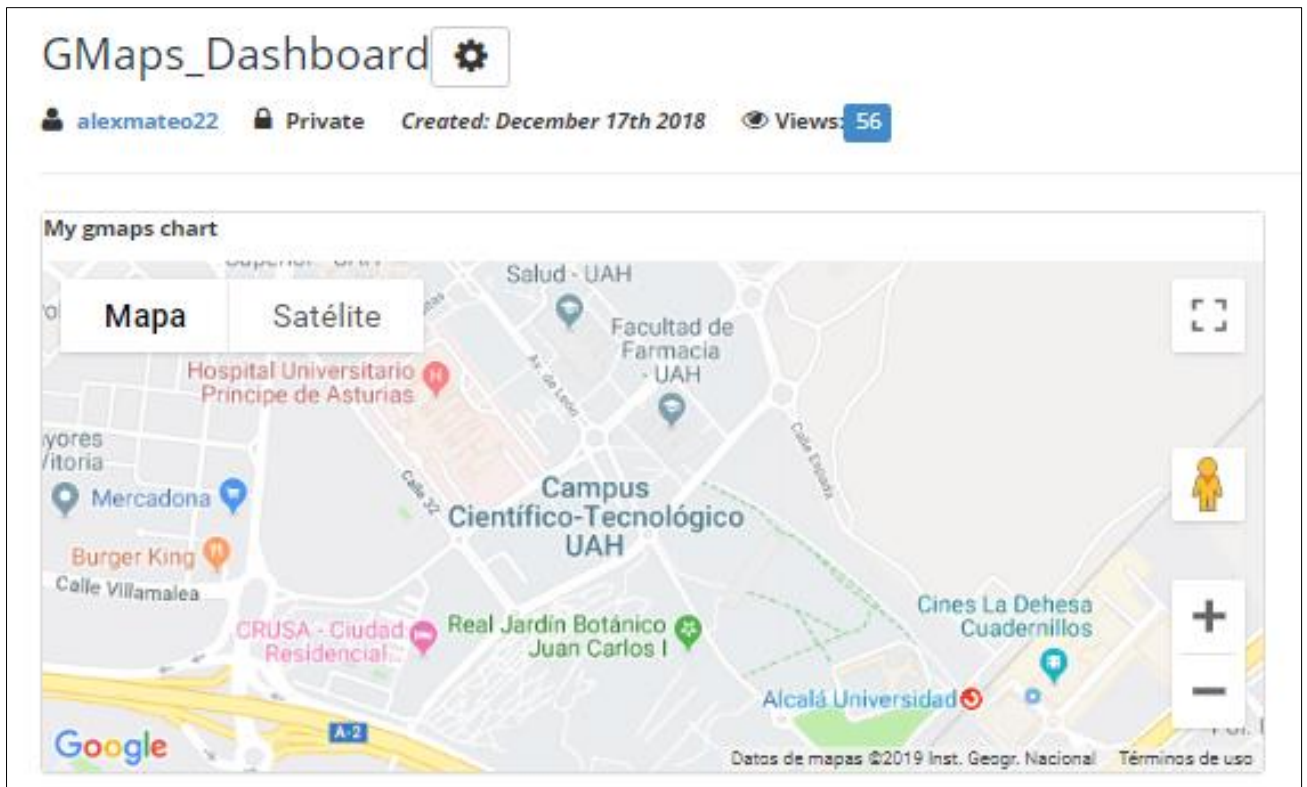


Figura 4.6 - Datos representados en Beebotte

GMaps_Dashboard

alexmateo22 Private Created: December 17th 2018 Views: 57

gps_data.location

RESOURCE	DATA	WHEN
gps_data.location	{"latitude":40.5054011,"longitude":-3.3338889}	3 months ago
gps_data.location	{"latitude":40.5053821,"longitude":-3.3339186}	3 months ago
gps_data.location	{"latitude":40.5053675,"longitude":-3.3339447}	3 months ago
gps_data.location	{"latitude":40.5042265,"longitude":-3.3312704}	3 months ago
gps_data.location	{"latitude":40.5042292,"longitude":-3.3312509}	3 months ago
gps_data.location	{"latitude":40.5042424,"longitude":-3.3312291}	3 months ago
gps_data.location	{"latitude":40.5042478,"longitude":-3.3312214}	3 months ago
gps_data.location	{"latitude":40.504248,"longitude":-3.3312162}	3 months ago
gps_data.location	{"latitude":40.5042508,"longitude":-3.3312069}	3 months ago
gps_data.location	{"latitude":40.5042603,"longitude":-3.3312001}	3 months ago

Showing 1 to 10 of 100 entries

Previous **1** 2 3 4 5 ... 10

Next

Figura 4.7 - Datos almacenados en Beebotte

4.2.5. MobaXterm

MobaXterm es un terminal mejorado para Windows con un servidor X11, un cliente SSH con pestañas y varias otras herramientas de red para computación remota (VNC, RDP, telnet, rlogin). MobaXterm proporciona todas las herramientas de red remotas importantes (SSH, X11, RDP, VNC, FTP, MOSH, ...) y comandos Unix (bash, ls, cat, sed, grep, awk, rsync, ...) al escritorio de Windows, en un único archivo exe portable que funciona de fábrica [66]. Utilizaremos este programa para conectarnos vía wifi a la Raspberry Pi por medio de un cliente SSH con el ordenador.

4.2.6. JuiceSSH

JuiceSSH - SSH Client es un terminal para Android que incluye SSH, Local Shell y soporte para Telnet. Gracias a él podremos acceder a cualquier máquina remota que tengamos configurada, directamente desde nuestro dispositivo portátil. Utilizaremos este programa para conectarnos vía wifi a la Raspberry Pi por medio de un cliente SSH con el smartphone o una tablet. Muy útil a la hora de adquirir los datos en campo, ya que podemos ver el estado de la adquisición de los datos en tiempo real en el móvil.

4.2.7. Matlab

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware [67]. Para este proyecto utilizaremos la biblioteca para trabajar con datos GPS "GPS Receiver Position by Meysam Mahooti" [68].

4.3. Configuraciones previas del Sistema propuesto

En este apartado vamos a tratar sobre todo lo necesario para el desarrollo de nuestro sistema

4.3.1. Preparar la Raspberry Pi

En el apartado 4.1.1 detallamos las características técnicas de la Raspberry Pi a utilizar en el proyecto. En este apartado explicaremos la configuración a realizar.

4.3.1.1. Sistema operativo

El sistema operativo utilizado es el "Raspbian Stretch Lite", una distribución ligera del sistema operativo Raspbian. Una versión ligera o lite es un sistema operativo Linux muy básico con solo una interfaz de línea de comandos (CLI). No hay escritorio o GUI de ningún tipo, y no incluye el software educativo o de productividad incluido con la versión de escritorio. Para interactuar con la versión Lite, deberá escribir comandos.

Se puede descargar la imagen de Raspbian Stretch Lite desde la web oficial www.raspberrypi.org/downloads/raspbian y seguir los pasos por defecto para su instalación.

4.3.1.2. Configuración WIFI y conexión remota SSH

Como mencionamos en el apartado anterior, estamos usando una versión Lite, sin interfaz gráfica, del sistema operativo. En este apartado vamos a configurar la conexión WI-FI por adelantado para así poder acceder de forma remota a la Raspberry sin necesidad de conectarla a un monitor vía HDMI.

En versiones recientes de Raspbian han añadido un par de cambios interesantes. El primero de ellos es que ya no está activado por defecto el servicio de terminal remoto por SSH. El segundo es que se puede configurar por adelantado el Wi-Fi [69].

- Activar o habilitar SSH sin pantalla
Desde Windows, después de copiar la imagen de Raspbian Lite en la tarjeta SD, se extrae la tarjeta y la volvemos a poner. Ahora, se verá al menos la partición de arranque o /boot, allí se crea un nuevo fichero vacío y lo renombramos como: ssh en minúsculas sin extensión ni nada. Esto se muestra en la siguiente figura:

The screenshot shows a Windows File Explorer window with the address bar set to 'Este equipo > boot (E:)'. The window displays a list of files and folders. The file 'ssh' is highlighted with a red box. The table below represents the data shown in the screenshot.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
overlays	13/6/2019 18:16	Carpeta de archivos	
bcm2708-rpi-0-w.dtb	13/6/2019 17:49	Archivo DTB	23 KB
bcm2708-rpi-b.dtb	13/6/2019 17:50	Archivo DTB	23 KB
bcm2708-rpi-b-plus.dtb	13/6/2019 17:49	Archivo DTB	23 KB
bcm2708-rpi-cm.dtb	13/6/2019 17:50	Archivo DTB	23 KB
bcm2709-rpi-2-b.dtb	13/6/2019 17:50	Archivo DTB	24 KB
bcm2710-rpi-3-b.dtb	13/6/2019 17:50	Archivo DTB	25 KB
bcm2710-rpi-3-b-plus.dtb	13/6/2019 17:50	Archivo DTB	26 KB
bcm2710-rpi-cm3.dtb	13/6/2019 17:51	Archivo DTB	24 KB
bootcode.bin	13/6/2019 17:48	Archivo BIN	52 KB
cmdline		Documento de tex...	1 KB
config	13/6/2019 18:05	Documento de tex...	2 KB
COPYING.linux	13/6/2019 17:51	Archivo LINUX	19 KB
fixup.dat	13/6/2019 17:47	Archivo DAT	7 KB
fixup_cd.dat	13/6/2019 17:47	Archivo DAT	3 KB
fixup_db.dat	13/6/2019 17:47	Archivo DAT	10 KB
fixup_x.dat	13/6/2019 17:48	Archivo DAT	10 KB
issue	8/4/2019 10:25	Documento de tex...	1 KB
kernel	13/6/2019 17:51	Archivo de image...	4,883 KB
kernel7	13/6/2019 17:51	Archivo de image...	5,158 KB
LICENCE.broadcom	13/6/2019 17:48	Archivo BROADC...	2 KB
LICENSE.oracle	8/4/2019 10:25	Archivo ORACLE	19 KB
start.elf	13/6/2019 17:46	Archivo ELF	2,807 KB
start_cd.elf	13/6/2019 17:46	Archivo ELF	668 KB
start_db.elf	13/6/2019 17:47	Archivo ELF	4,718 KB
start_x.elf	13/6/2019 17:47	Archivo ELF	3,687 KB
<input checked="" type="checkbox"/> ssh	30/7/2019 21:44	Documento de tex...	0 KB

Figura 4.8 - Activar o habilitar SSH sin pantalla

- Configurar Wi-Fi sin pantalla
En el mismo directorio del punto anterior, creamos un fichero de texto con Notepad y lo nombramos **wpa_supplicant.conf**. Dentro de ese fichero escribimos la configuración del Wi-Fi al que queremos que la Raspberry Pi se conecte de forma automática, en mi

caso es el punto de acceso WI-FI de mi smartphone. La configuración por escribir, cambiando el nombre y la contraseña, es la siguiente:

```
# /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf

ctrl_interface=DIR=/var/run/wpa_supplicant GROUP=netdev
update_config=1

network={
ssid="nombre_wifi"
psk="contraseña_wi-fi"
key_mgmt=WPA-PSK }
```

Después de esto ya podemos retirar la microSD y luego al ponerla en la Raspberry Pi por primera vez se activará el servicio SSH, además se configurará y conectará automáticamente el Wi-Fi con la información del otro fichero.

4.3.1.3. Acceso vía conexión remota

Ya con el Wi-Fi y el servicio SSH configurado en la Raspberry, podemos acceder vía remota. Se accederá tanto con el móvil como con el portátil, pero cada uno tiene un motivo el cual será explicado a continuación:

- Conexión SSH Portátil y Raspberry Pi

El motivo de acceder a la Raspberry Pi desde el portátil es para continuar con la configuración del sistema, e instalar librerías y software faltantes. Simultáneamente, se utilizará para realizar la extracción de los ficheros, con los datos adquiridos, evitando la necesidad de conectar elementos como memorias USB. Para esto utilizamos el programa comentado en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** MobaXterm. Los pasos por seguir para establecer la conexión son los siguientes:

1. El portátil y la Raspberry Pi deben de estar conectados en la misma red Wi-Fi. En nuestro caso es el punto de acceso WI-FI del móvil.
2. Conocer la IP de la Raspberry Pi. Como estamos conectados al WI-FI del móvil, podemos conocer la dirección IP de la Raspberry accediendo a la configuración de conexión compartida dentro de los ajustes del móvil. Esto se aprecia mejor en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**
3. Ingresamos la dirección IP, el usuario y la contraseña (asumiremos las que vienen por defecto: pi y raspberry) en MobaXterm para iniciar sesión.
4. Sesión inicia con éxito.

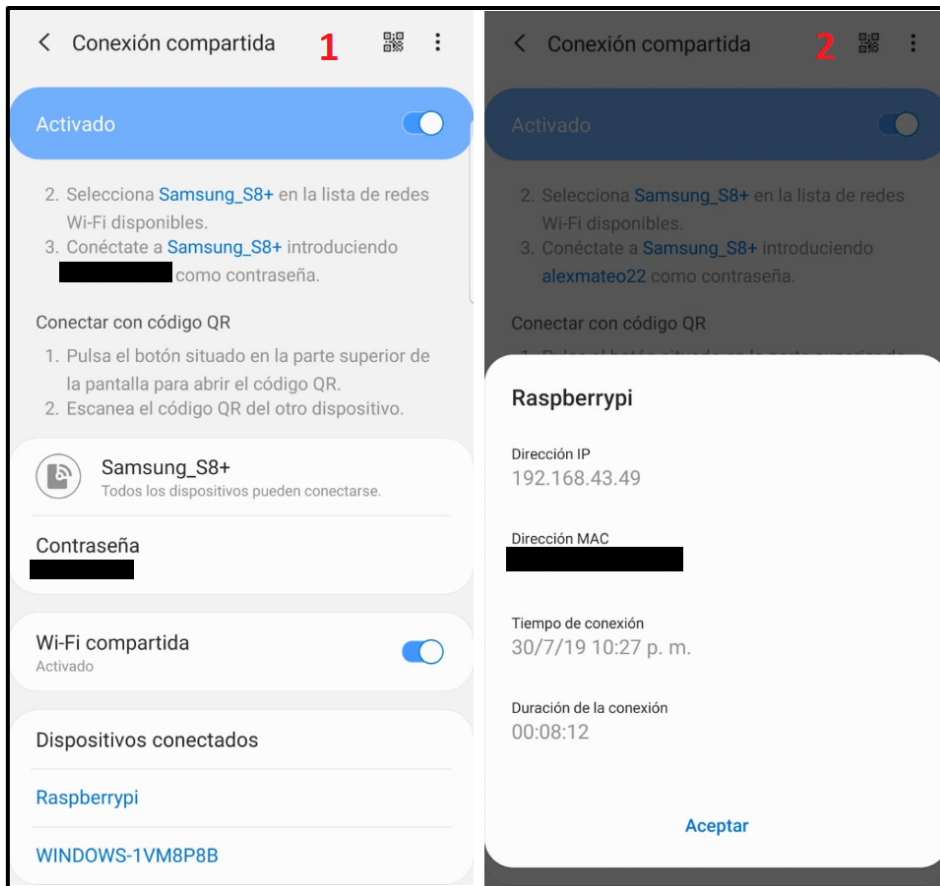


Figura 4.9 - Configuración conexión compartida WI-Fi en móvil Android

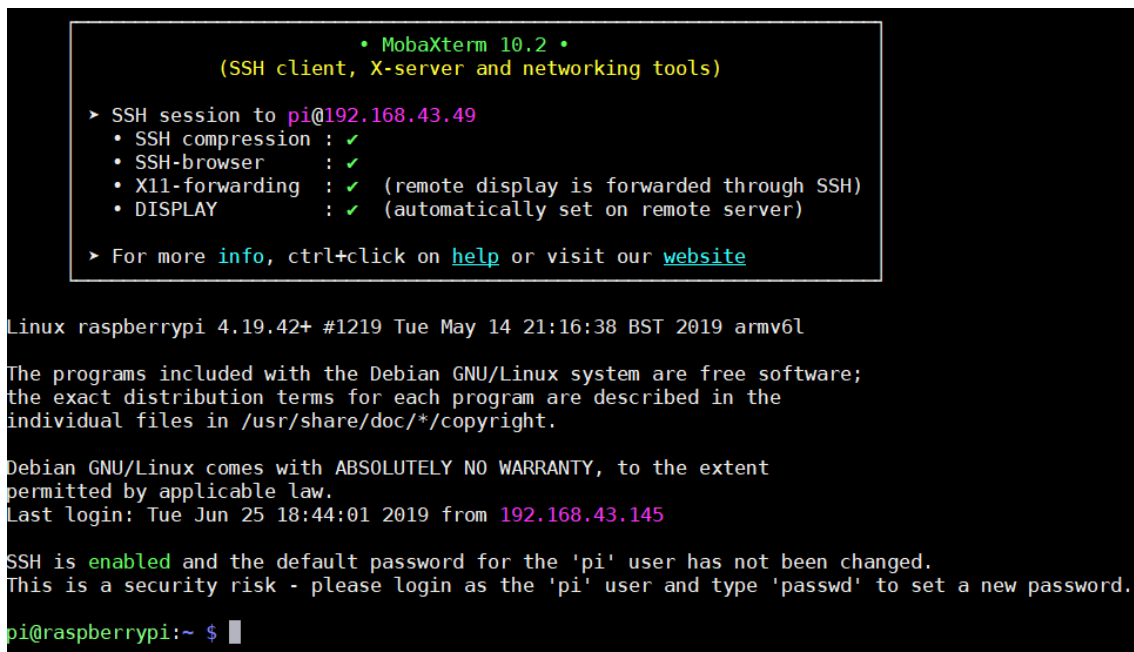


Figura 4.10 - Inicio de sesión a Raspberry Pi vía SSH con MobaXterm

- Conexión SSH Smartphone y Raspberry Pi
El motivo para acceder a la Raspberry desde el Smartphone es el de ejecutar la aplicación , y visualizar en todo momento, de adquisición de los datos. Con esto nos ahorramos la necesidad de conectar periféricos como teclado, pantalla y ratón a la hora

de querer ejecutar la aplicación en campo. Para esto utilizamos la aplicación móvil para Android comentado en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** JuiceSSH. Los pasos por seguir para establecer la conexión son los siguientes:

1. El Móvil y la Raspberry Pi deben de estar conectados en la misma red Wi-Fi. En nuestro caso es el punto de acceso WI-FI es generado por móvil.
2. Conocer la IP de la Raspberry Pi. Esto se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**
3. Ingresamos la dirección IP, el usuario y la contraseña (asumiremos las que vienen por defecto: pi y raspberry) en JuiceSSH para iniciar sesión.
4. Sesión inicia con éxito.

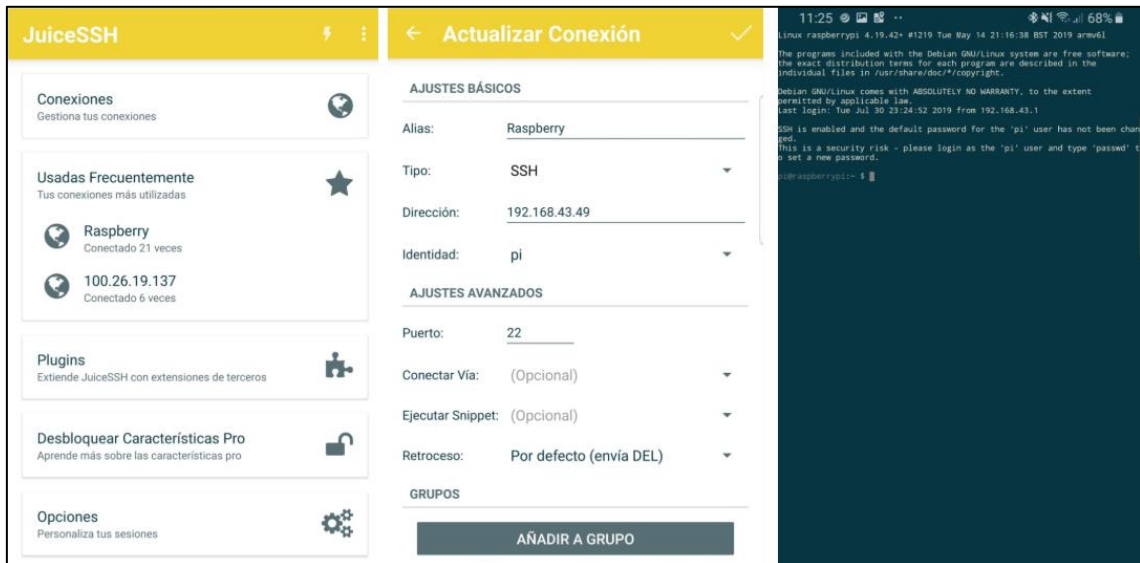


Figura 4.11 - Inicio de sesión a Raspberry Pi vía SSH con JuiceSSH

4.3.1.4. Instalación RTKLib

Para descargar e instalar el paquete completo del software RTKLib seguimos los siguientes pasos:

```
git clone https://github.com/tomojitakasu/RTKLIB.git
cd RTKLIB/app
sudo chmod 77 makeall.sh
sudo ./makeall.sh

cd RTKLIB/app/str2str/gcc
make
sudo cp str2str /usr/local/bin/str2str
sudo chmod +x /usr/local/bin/str2str

cd RTKLIB/app/convbin/gcc
make
sudo cp convbin /usr/local/bin/convbin
sudo chmod +x /usr/local/bin/convbin
```

rtklib_<ver>	
\src	: Source programs of RTKLIB library *
\rcv	: Source programs depending on GPS/GNSS receivers *
\bin	: Executable binary APs and DLLs for Windows
\data	: Sample data for APs
\app	: Build environment for APs *
\rtknavi	: RTKNAVI (GUI) *
\rtknavi_mkl	: RTKNAVI_MKL (GUI) *
\strsvr	: STRSVR (GUI) *
\rtkpost	: RTKPOST (GUI) *
\rtkpost_mkl	: RTKPOST_MKL (GUI) *
\rtkplot	: RTKPLOT (GUI) *
\rtkconv	: RTKCONV (GUI) *
\srctblbrows	: NTRIP Browser (GUI) *
\rtkget	: RTKGET (GUI) *
\rtklaunch	: RTKLAUNCH (GUI) *
\rtkrcv	: RTKRCV (CUI) *
\rnx2rtkp	: RNX2RTKP (CUI) *
\pos2kml	: POS2KML (CUI) *
\convbin	: CONVBIN (CUI) *
\str2str	: STR2STR (CUI) *
\appcmn	: Common routines for GUI APs *
\icon	: Icon data for GUI APs *
\lib	: Libraries generation environment*
\test	: Test program and data *
\util	: Utilities *
\doc	: Document files
	 * Not included in the binary package rtklib_<ver>_bin.zip

Figura 4.12 - Estructura del directorio RTKLIB [70]

4.3.2. Configuración del módulo GPS

En este apartado vamos a configurar el receptor GPS para definir los datos a adquirir. La configuración del módulo GPS de serie U-Blox NEO 7 se realiza mediante mensajes de configuración UBX, los cuales se pueden almacenar en la memoria FLASH del receptor GPS. Estos mensajes están compuestos por un conjunto de comandos cuyo propósito es activar o modificar registros del módulo GPS. La información de los comandos y los registros asociados se encuentran en la hoja de especificaciones del módulo GPS [60].

La configuración del módulo GPS se efectúa vía cable USB, conectándolo en el ordenador o en la Raspberry Pi. Conectado al ordenador, se utiliza programa U-center, comentado en el apartado 4.2.1, el cual nos ofrece una interfaz gráfica para poder visualizar todas las posibilidades que nos ofrece el módulo GPS.

El programa U-center no está disponible para Linux, por lo cual no es posible ejecutarlo en la Raspberry, no obstante, se ha optado por escribir los comandos de configuración en un fichero de texto con extensión **.cmd**, el cual será cargado automáticamente al módulo GPS cada vez que se vaya a utilizar. Estos comandos serán enviados al receptor GPS por medio de la herramienta, del software RTKLIB, **strsvr**. Un ejemplo del fichero de configuración lo tenemos en la siguiente figura:

```

!UBX CFG-GNSS 0 32 32 1 0 10 32 0 1 # set GPS 10-32 channels on
!UBX CFG-MSG 3 10 0 1 0 1 0 0 # turn on UBX TRK-TRKD5 messages on UART and USB
!UBX CFG-MSG 3 15 0 1 0 1 0 0 # turn on UBX TRK-SFRBX messages on UART AND USB
!UBX CFG-MSG 1 32 0 1 0 1 0 0 # turn on UBX NAV-TIMEGPS
!UBX CFG-MSG 1 34 0 0 0 1 0 0 # turn on UBX NAV-CLOCK
!UBX CFG-MSG 1 48 0 0 0 1 0 0 # turn on UBX NAV-SVINFO
@
!UBX CFG-MSG 3 10 0 0 0 0 0 0
!UBX CFG-MSG 3 15 0 0 0 0 0 0
!UBX CFG-MSG 1 32 0 0 0 0 0 0
!UBX CFG-MSG 1 34 0 0 0 0 0 0
!UBX CFG-MSG 1 48 0 0 0 0 0 0

```

Figura 4.13 - fichero de configuración config.cmd

4.3.2.1. Activación de los datos RAW (datos en crudo)

El fichero de configuración contiene los mensajes que activan la recepción y salida de los datos en crudo de la señal GPS. Esta parte es fundamental ya que sin esta forma de obtener los datos no es posible usar RTKLIB con soluciones precisas en el postprocesado. A continuación, una breve descripción de la información que contienen estos mensajes:

- TRK-TRKD5 o RXM-RAW - Raw Measurement Data: Este mensaje contiene toda la información necesaria para poder generar un archivo de observación RINEX. Este mensaje emite mediciones de pseudorange, doppler y fase portadora para satélites GPS una vez que las señales se han sincronizado.
- TRK-SFRB - Subframe Buffer: Este mensaje contiene datos de subtrama para satélites GPS.

Aparte de los mensajes antes mencionados, también se habilitará o se filtrará la recepción de mensajes con los resultados de navegación. Los mensajes en la clase NAV generan datos de navegación como posición, altitud y velocidad en varios formatos. Además, se emiten indicadores de estado y cifras de precisión.

- NAV-CLOCK: Este mensaje contiene datos de la solución del reloj.
- NAV-SVINFO: Este mensaje contiene datos relacionados con la información del SV, como la hora GPS de la semana de la época de navegación, la intensidad de la señal o CNR, elevación y azimut en grados, entre otras cosas.
- NAV-TIMEGPS: Este mensaje informa el tiempo preciso de GPS de la solución de navegación más reciente, incluyendo fallas de validez y una estimación de precisión.

4.4. Arquitectura de funcionamiento

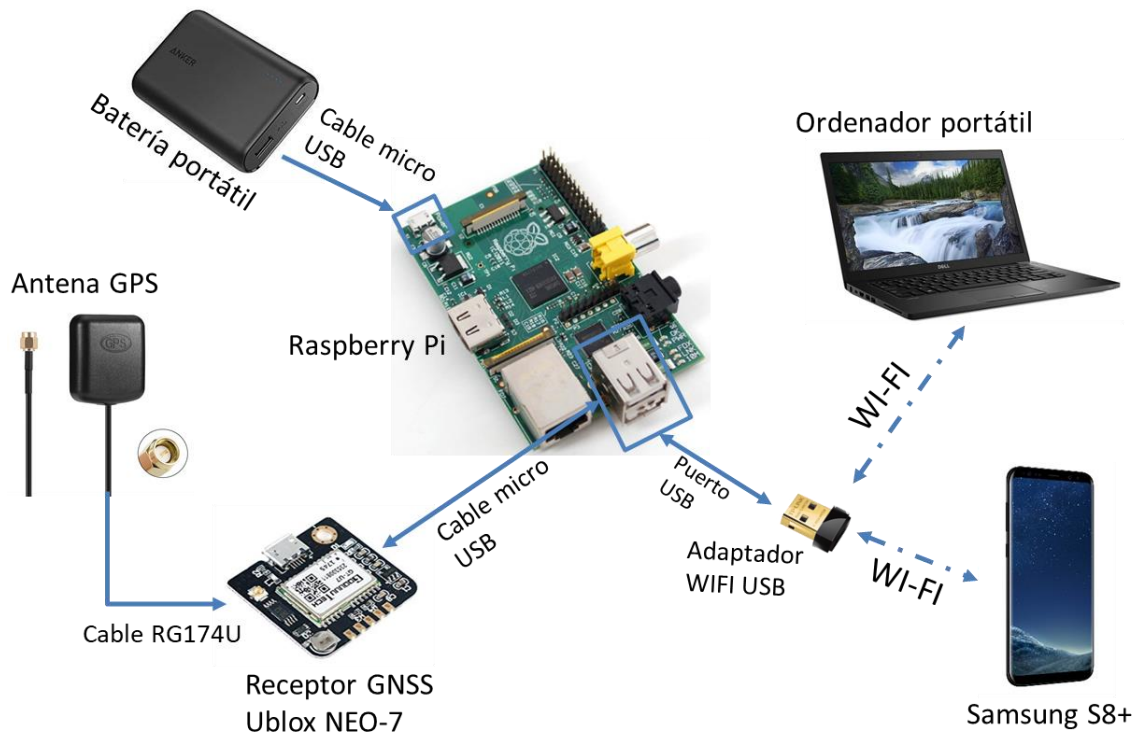


Figura 4.14 - Esquema Hardware interconectado

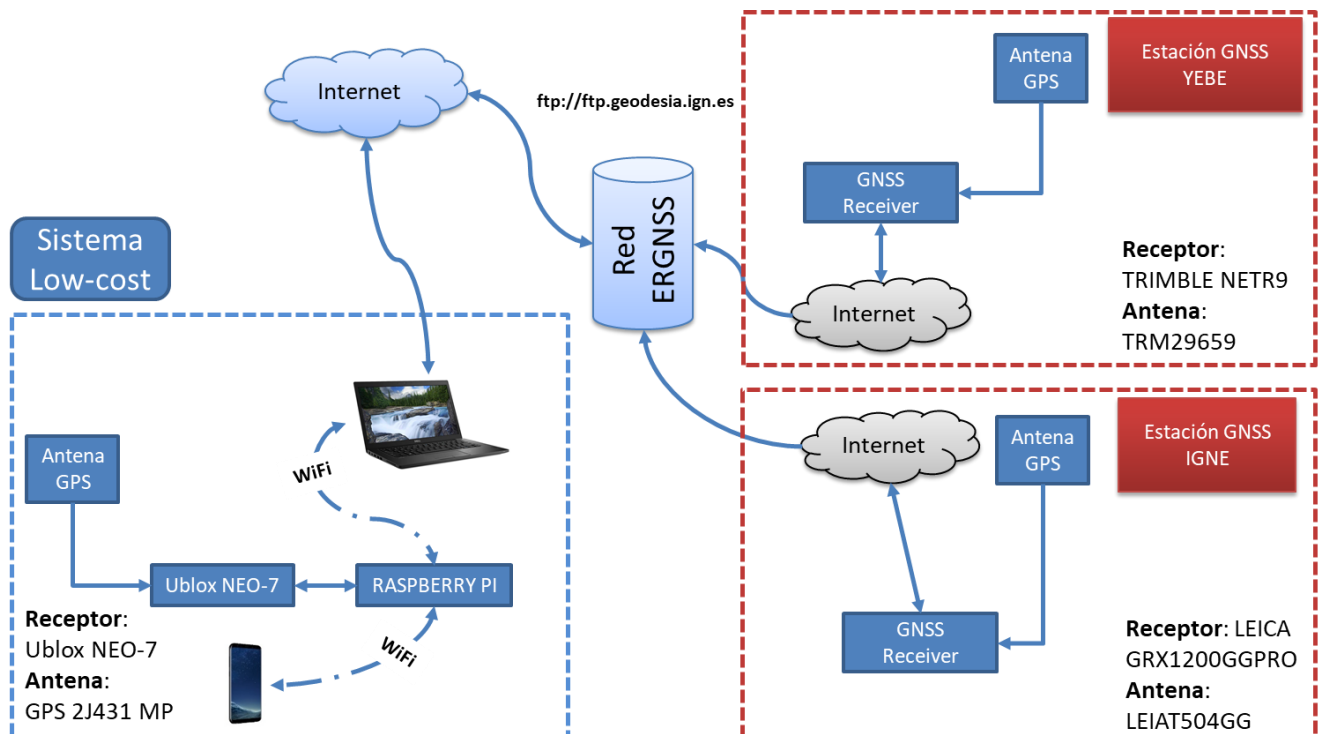


Figura 4.15 - Esquema general Postprocesado o Procesamiento Offline

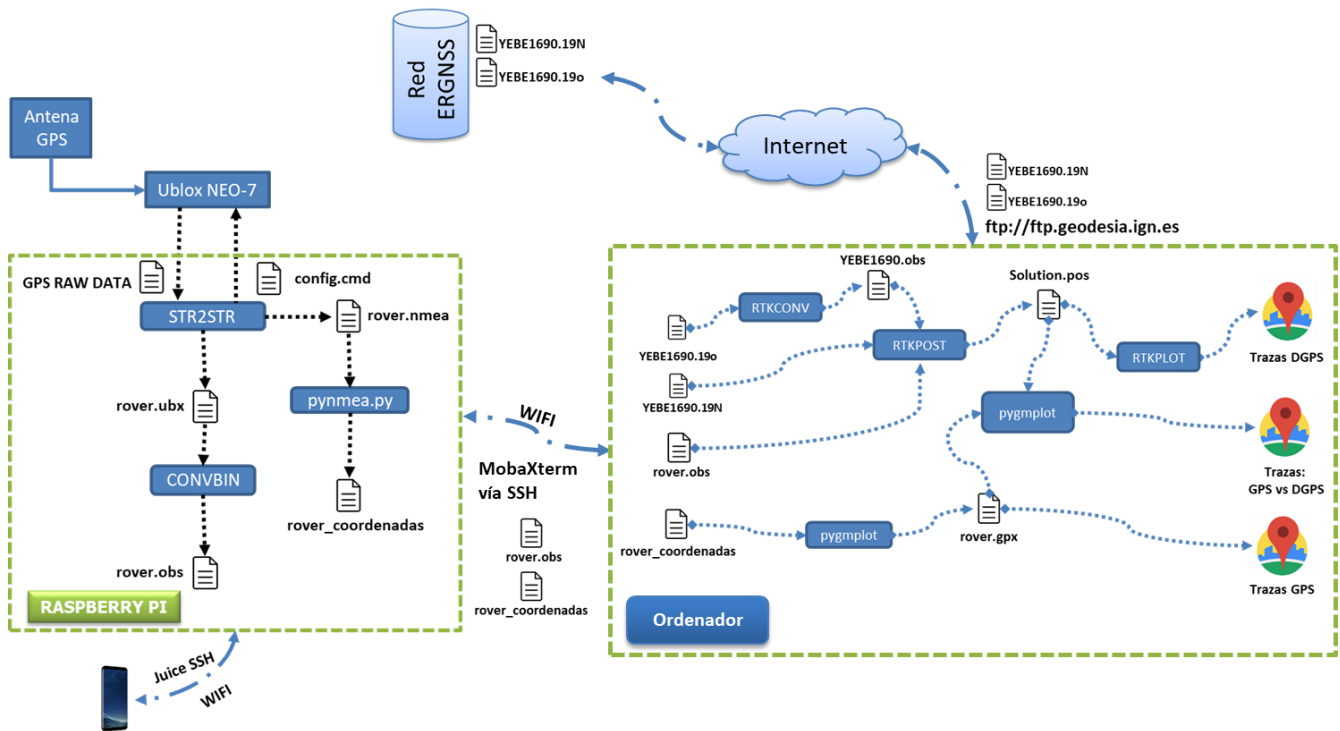


Figura 4.16 - Esquema Postprocesado a implementar

4.4.1. Adquisición de los datos

En el apartado 4.3.2 configuramos el receptor GPS para que funcione de forma prevista a los datos que necesitamos para poder realizar el postprocesado. Ahora utilizaremos la herramienta STR2STR, del software RTKlib, para la adquisición de estos. STR2STR nos permite recibir un flujo de datos por diferentes medios como puerto serie, cliente TCP, servidor TCP, cliente NTRIP o un archivo. Los datos de salida que ofrece esta herramienta pueden ser enviados por diferentes medios como puerto serie, cliente TCP, servidor TCP, cliente NTRIP o ser almacenados localmente en un fichero de texto.

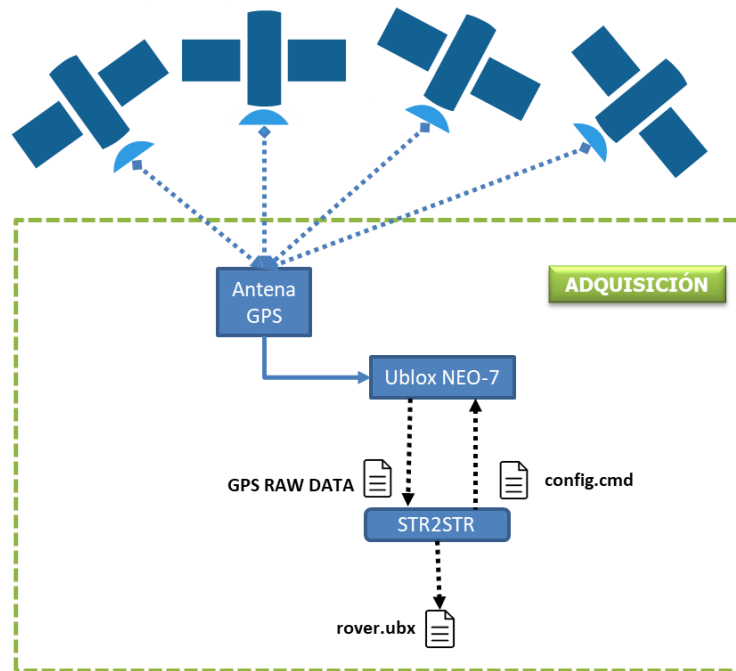


Figura 4.17 - Esquema etapa adquisición de datos GPS

En nuestro caso recibiremos los datos en crudo del receptor GPS por el puerto USB de la Raspberry, mientras que, para la salida de los datos, estos serán almacenados de forma local en un fichero con extensión ubx. A continuación, puntualizaremos en la sinopsis para ejecución de esta herramienta, pasándole los parámetros de entrada necesarios para obtener el resultado deseado.

```

pi@raspberrypi:~ $ str2str -in serial://ttyACM0:9600#ubx -out rover.ubx -c config.cmd
stream server start
2019/08/15 17:57:30 [CC--]      0 B      0 bps (0) /dev/ttyACM0
2019/08/15 17:57:35 [CC--]    10523 B   15202 bps (0) /dev/ttyACM0
2019/08/15 17:57:40 [CC--]    20686 B   15441 bps (0) /dev/ttyACM0
2019/08/15 17:57:45 [CC--]    27280 B    9231 bps (0) /dev/ttyACM0
2019/08/15 17:57:50 [CC--]    32880 B    6582 bps (0) /dev/ttyACM0
2019/08/15 17:57:55 [CC--]    39289 B    8895 bps (0) /dev/ttyACM0
2019/08/15 17:58:00 [CC--]    45680 B   11771 bps (0) /dev/ttyACM0
2019/08/15 17:58:05 [CC--]    51934 B   10388 bps (0) /dev/ttyACM0
2019/08/15 17:58:10 [CC--]    56808 B    4790 bps (0) /dev/ttyACM0
2019/08/15 17:58:15 [CC--]    62655 B   10039 bps (0) /dev/ttyACM0

```

Figura 4.18 - Ejecución str2tr para la adquisición de datos GPS crudos

Donde:

- in serial://ttyACM0:9600#ubx** Puerto de entrada, el bit rate y el formato de los datos a recibir.
- out rover.ubx** Nombre y extensión del fichero que contiene los datos de salida.
- c config.cmd** Carga en el receptor GPS el fichero de configuración , comentado en apartado 4.3.2.

Se puede abundar más sobre los parámetros de esta herramienta en el manual RTKLIB ver. 2.4.2 [70].

4.4.2. Adecuación o tratamiento de los datos

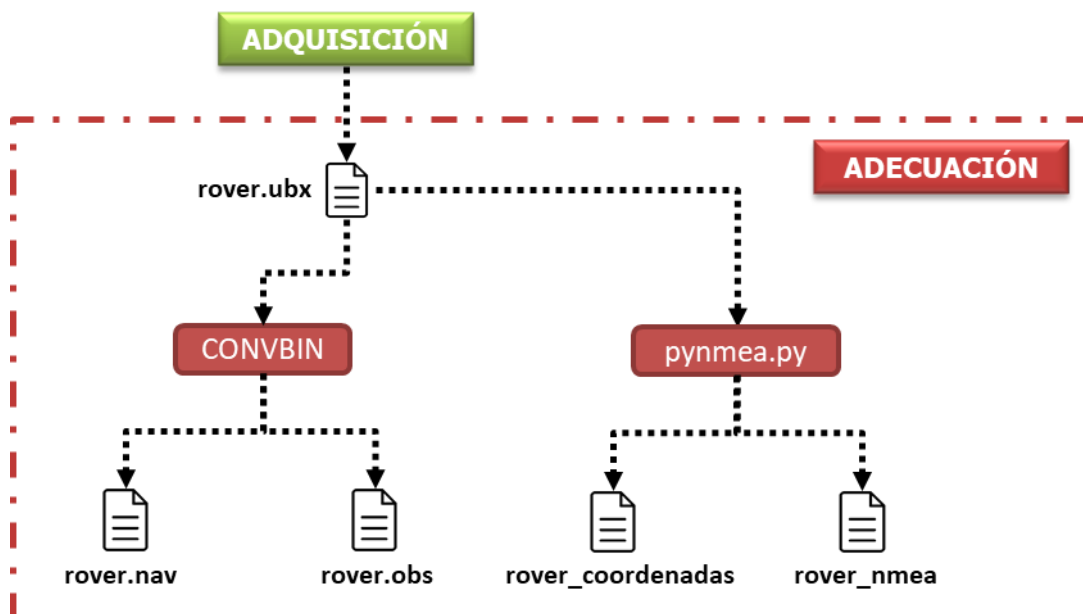


Figura 4.19 - Esquema adecuación de los datos adquiridos

Como resultado del apartado anterior ya disponemos del fichero rover.ubx que contiene los datos GPS en crudo. El objetivo de este apartado es la correcta adecuación o tratamiento de los datos adquiridos anteriormente, siguiendo el esquema de la Figura 4.19. Esto se debe a

que dentro del fichero rover.ubx se encuentran los mensajes UBX y los mensajes NMEA, ambos explicados en los apartados 2.5.3 y 2.5.5. Los mensajes UBX son los que contienen la información necesaria para la generación de los ficheros RINEX de navegación y observación que se utilizarán a la hora de realizar el postprocesado, mientras que los mensajes NMEA contienen información GPS básica como posición, velocidad, orientación, constelación de satélites y altitud. El problema radica en la codificación del fichero rover.ubx, debido a que los mensajes UBX poseen una codificación hexadecimal, mientras que los mensajes NMEA son texto plano o UTF-8. Si visualizamos el fichero rover.ubx en un editor de texto para código, como Sublime Text, veremos un resultado como el de la Figura 4.20, mientras que si lo visualizamos en un editor de texto sencillo, como en Bloc de Notas, el resultado obtenido será como el de la Figura 4.21. Para fines de generar los ficheros RINEX, basta con tener los datos en hexadecimal, pero para la representación de los mensajes NMEA hay que visualizar el fichero rover.ubx como texto plano y realizar técnicas de filtrado para solo conservar los mensajes NMEA involucrados durante la adquisición y así poder extraer las coordenadas para su posterior representación cuando se pinten la trazas en Google Maps.

```

b562 0501 0200 063e 4c75 b562 0501 0200
0601 0f38 b562 0501 0200 0601 0f38 b562
0501 0200 0601 0f38 b562 0501 0200 0601
0f38 b562 0501 0200 0601 0f38 b562 030a
9004 0611 0030 ffff ffff f7bd 4900 1081
a202 a1bd 4900 e803 0080 0140 0000 9584
a202 8cad 7009 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 f800 0000 f800 0000 0000
0000 f800 0000 f800 0000 0000 0000 0000
0023 511c 85e1 c2ea 7318 00f2 de9d 2680
5aff 6694 5bff 8403 6f00 ffff 0500 00fa
0000 1914 0000 2351 0300 0005 0000 0000
1200 c5e5 fbff 2188 1801 0003 0002 0200
0000 edc0 e07c bcea 7318 b87d 33f8 76eb
cbff 6a90 4fff 2a00 0500 c401 0400 00fa
00fa a624 0001 2330 2800 0007 0000 0000
1200 cc96 fbff 8d88 0e01 0016 0015 0200
0000 baf5 719e c7ea 7318 cadc 52ab b33e
a4ff f4a9 7aff 9f00 1200 ffff 0700 00fa
0000 c119 0002 2341 1400 0006 0000 0000
1200 f1aa fcff 1188 1801 0017 0016 0200
0000 f0d5 865e b9ea 7318 e4c1 8c5d 49f1
ffff 0090 13ff 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0003 1200 0000 0004 0000 0000
ffff 0000 0000 0044 6000 0001 0000 0100
0000 fb5d f6cb c1ea 7318 a279 a032 702d

```

Figura 4.20 - Visualización fichero rover.ubx en Sublime Text

```

<0x1d>~<0x18><0x01> <0x06> <0x05><0x02> °ß/L'ēs<0x18> ðüÿ <0x11> <0x05>f ÿÿ € <0x01>|
<0x04><0x01> NĀā<0x90>ēs<0x18> äüÿ
<0x11> <0x03> ŷÿ <0x01>~<0x06><0x01> €šđš<0x10>ēs<0x18>Īpy~Bæÿÿ Đ% <0x0b><0x11> <0x02>
ŷÿ <0x05><0x02> <0x01><0x01> HĪ5<0x1e><0x10>ēs<0x18>Äŷÿvĭÿÿ Īÿ <0x0c><0x11> <0x02> ŷÿ
<0x05><0x03> <0x02><0x01> šē"āĶēs<0x18>z<0x08>ĭĭyS<0x17> S"Ō ...<0x03>o ŷÿ/ ú <0x7f><0x13>
#Q<0x02><0x02> <0x05> <0x12> ,_<0x05> !"<0x08><0x01> <0x1e> <0x1d><0x02> "3ĀĪēs<0x18>æ^~µ<0x17>r Ā<0x04>°, <0x05>
Ū<0x01>7 ūĀ|" <0x0e>#0( <0x06> <0x12> kf<0x04>
~<0x0e><0x01> <0x07> <0x06><0x02> Ó<0x0e>³Āēs<0x18>ĭ@exUŌCÿñ|ġy< <0x07> <0x81><0x02><0x04> ú ūē <0x0f>#0( <0x06>
<0x12> ĭbūÿ
~<0x0c><0x01> <0x13> <0x12><0x02> ³<0x08>
<0x1f>Āēs<0x18>@ĒŌU EŽ Ā<0x06>µ <0x03> W<0x01>; ū ū& <0x12>#0( <0x07> <0x12> †!<0x04>
~<0x0e><0x01> <0x02> <0x01><0x02> ĭ9µb<0x01>00 <0x10>ēs<0x18><0x11><0x03> <0x03><0x01><0x0c><0x01> <0x90> <0x12><0x02>
<0x07>'<0x17>;<0x01>Ūbÿÿ <0x03>
<0x04><0x14><0x1a>X x <0x08><0x06>
<0x04><0x1c>D#<0x01>9<0x02> <0x0e><0x07>
<0x07>"<0x1f><0x09d> ñÿÿÿ<0x05>
<0x07><0x1f>WG<0x01>æ<0x08> <0x04><0x11>
<0x07>.&<0x15>Ū [ <0x0f><0x13>
<0x07>!<0x1c>ē ŷÿÿÿ<0x01><0x16>
<0x07>% a <0x0e> <0x02><0x17>
<0x04><0x1a>12 Ōÿÿÿ
<0x1e>
<0x04><0x13><0x08>µ nūÿÿ<0x06>x<0x10><0x01> *Ā |<0x10><0x01> %<0x90>
~<0x10><0x01> #Ē <0x07>Ā<0x10><0x01> ŷ <0x0b>Ā<0x10><0x01> ŷ <0x0c>Ā<0x10><0x01> ŷ Īfµb<0x01> <0x10>
<0x10>ēs<0x18> ŷ<0x02> <0x12><0x08><0x12><0x07><0x08> !fµb<0x01>"<0x14> <0x10>ēs<0x18><0x12>C<0x0c> > <0x08> Ū<0x01>
A<0x0d> $GPRMC,175712.00,A,4030.39768,N,00320.92054,W,0.037,,150819,,A*6A
$GPVTG,,T,,M,0.037,N,0.069,K,A*28
µb<0x03><0x0f>5 <0x08><0x01><0x14>ŷW.ĪI 6<0x12>Ā"üĭbĭ²<0x04> ä<0x1c>÷<0x0f> € S
<0x0e>+$GPGGA,175712.00,4030.39768,N,00320.92054,W,1,10,0.88,598.4,M,50.3,M,,*41
$GPGSA,A,3,03,22,23,19,02,30,09,17,07,06,,1.57,0.88,1.30*06
µb<0x03><0x0f>5 <0x06> <0x05><0x01> ŷW.ĪI 6<0x12>Ā"üĭbĭĪĀb<0x1c>þ<0x0f> ) €) €) €) €) €€
€<0x15>f$GPGSV,3,1,11,01,00,144,,02,23,315,39,03,26,088,20,06,68,291,28*78
$GPGSV,3,2,11,07,31,157,34,09,87,327,31,17,21,220,38,19,28,234,33*72
$GPGSV,3,3,11,22,09,097,37,23,49,050,26,30,08,181,19*4C
$GPGLL,4030.39768,N,00320.92054,W,175712.00,A,A*73

```

Figura 4.21 - Visualización fichero rover.ubx en Bloc de notas

Adecuación NMEA

Se creó un script en Python, filtro_nmea.py, utilizando la librería pynmea2, con la finalidad de extraer y adecuar los mensajes NMEA del fichero rover.ubx, para luego almacenar estos valores en un fichero de texto de nombre rover.txt. Aparte de lo mencionado anteriormente, el script desarrollado filtra y almacena las posiciones de latitud y longitud en un fichero de texto nombrado rover_coordenadas.txt, del cual posteriormente se extraerán dichas coordenadas para pintar las trazas en Google Maps. El resultado obtenido luego de filtrar los mensajes NMEA se puede apreciar en la Figura 4.22.

```

$GPVTG,,T,,M,0.011,N,0.020,K,A*21
$GPGGA,182023.00,4030.39866,N,00320.92163,W,1,09,0.97,608.8,M,50.3,M,,*48
$GPGSA,A,3,03,23,19,02,30,09,17,07,06,,1.76,0.97,1.47*0B
$GPGSV,3,1,11,02,31,312,38,03,19,095,43,05,03,289,,06,72,261,36*76
$GPGSV,3,2,11,07,41,151,31,09,78,027,37,17,12,214,29,19,20,226,34*78
$GPGSV,3,3,11,22,02,104,,23,40,052,36,30,17,179,34*44
$GPGLL,4030.39866,N,00320.92163,W,182023.00,A,A*7A
$GPTXT,01,01,02,u-blox ag - www.u-blox.com*50
$GPTXT,01,01,02,HW UBX-G70xx 00070000 *77
$GPTXT,01,01,02,ROM CORE 1.00 (59842) Jun 27 2012 17:43:52*59
$GPTXT,01,01,02,PROTVER 14.00*1E
$GPTXT,01,01,02,ANTSUPERV=AC SD PDoS SR*20
$GPTXT,01,01,02,ANTSTATUS=OK*3B
$GPTXT,01,01,02,LLC FFFFFFFF-FFFFFFFD-FFFFFFF-FFFFFFF-FFFFFFFD*2E
$GPVTG,,T,,M,0.044,N,0.081,K,A*2A
$GPGGA,182024.00,4030.39865,N,00320.92158,W,1,09,0.97,609.0,M,50.3,M,,*4D
$GPGSA,A,3,03,23,19,02,30,09,17,07,06,,1.76,0.97,1.47*0B
$GPGSV,3,1,11,02,31,312,38,03,19,095,43,05,03,289,,06,72,261,36*76
$GPGSV,3,2,11,07,41,151,30,09,78,027,37,17,12,214,30,19,20,226,33*76
$GPGSV,3,3,11,22,02,104,,23,40,052,36,30,17,179,34*44
$GPGLL,4030.39865,N,00320.92158,W,182024.00,A,A*76
$GPVTG,,T,,M,0.045,N,0.084,K,A*2E
$GPGGA,182025.00,4030.39863,N,00320.92154,W,1,09,0.97,609.2,M,50.3,M,,*44
$GPGSA,A,3,03,23,19,02,30,09,17,07,06,,1.76,0.97,1.47*0B
$GPGSV,3,1,11,02,31,312,37,03,19,095,43,05,03,289,,06,72,261,36*79
$GPGSV,3,2,11,07,41,151,30,09,78,027,37,17,12,214,30,19,20,226,33*76
$GPGSV,3,3,11,22,02,104,,23,40,052,36,30,17,179,34*44
$GPGLL,4030.39863,N,00320.92154,W,182025.00,A,A*7D

```

Figura 4.22 - Fichero rover_nmea.txt

Generación de ficheros RINEX de observación y navegación

Utilizaremos la herramienta CONVBIN, del software RTKlib, para convertir los datos adquiridos a observables con formato RINEX. Solo basta con pasarle el fichero rover.ubx como parámetro de entrada y este genera como salida 2 ficheros con el mismo nombre, pero con extensiones .obs y .nav. Se puede abundar más sobre esta herramienta en el manual RTKLIB ver. 2.4.2 [70].

```
pi@raspberrypi:~ $ convbin rover.ubx
input file : rover.ubx (u-blox)
->rinex obs : rover.obs
->rinex nav : rover.nav
->rinex gnav: rover.gnav
->rinex hnav: rover.hnav
->rinex qnav: rover.qnav
->rinex lnav: rover.lnav
->rinex cnav: rover.cnav
->rinex inav: rover.inav
->sbas log : rover.sbs

scanning: 2019/08/15 18:28:00 G
2019/08/15 18:24:32-08/15 18:28:15: 0=142 N=8
```

Figura 4.23 - Ejecución convbin

```
GNU nano 2.7.4                                Fichero: rover.obs
2.11      OBSERVATION DATA      M (MIXED)      RINEX VERSION / TYPE
CONVBIN demo5      20190817 174045 UTC  PGM / RUN BY / DATE
log: rover.ubx      COMMENT
format: u-blox      COMMENT
MARKER NAME
MARKER NUMBER
OBSERVER / AGENCY
REC # / TYPE / VERS
ANT # / TYPE
APPROX POSITION XYZ
ANTENNA: DELTA H/E/N
WAVELENGTH FACT L1/2
# / TYPES OF OBSERV
TIME OF FIRST OBS
TIME OF LAST OBS
END OF HEADER

4848572.3520  -283700.3973  4121367.3377
0.0000        0.0000        0.0000
1 1
2 C1 L1
2019 8 15 18 24 32.0000000 GPS
2019 8 15 18 28 15.0000000 GPS
19 8 15 18 24 32.0000000 0 10G 3G23G17G 9G 6G 5G30G 7G19G 2
23967741.566  15302494.111
22417106.109  2365676.960
24409058.375  336370.131
20283518.329  912306.484
20444600.225  21212.144
25085149.454
23852180.535  -7137866.171
22129530.237  -11657599.652
23953406.387  8833195.072
23112452.630  -13709524.780
19 8 15 18 24 33.0000000 0 10G 3G23G17G 9G 6G 5G30G 7G19G 2
23968284.355  15305342.547
22417576.584  2368161.096
24409662.135  339542.450
20283691.977  913222.227
20444633.974  21392.179
25084583.701
23851525.437  -7141311.808
22129091.469  -11659905.718
23954042.028  8836531.494
23111980.253  -13712007.334
[ 1521 líneas leídas ]
```

Figura 4.24 - fichero rover.obs


```

GNU nano 2.7.4                               Fichero: rover.nav
2.11      N: GPS NAV DATA                    RINEX VERSION / TYPE
CONVBIN demo5                                PGM / RUN BY / DATE
log: rover.ubx                                COMMENT
format: u-blox                               COMMENT
END OF HEADER
9 19 8 15 20 0 0.0 -.734440982342E-05 -.898126018001E-11 .000000000000E+00
.300000000000E+02 .272187500000E+02 .473591155544E-08 .337228696712E+00
.140070915222E-05 .128235772718E-02 .917911529541E-05 .515361939049E+04
.417600000000E+06 .558793544769E-08 -.228472992090E+01 .409781932831E-07
.952546313080E+00 .197593750000E+03 .170461072356E+01 -.807819363205E-08
.481805783431E-09 .100000000000E+01 .206600000000E+04 .000000000000E+00
.200000000000E+01 .000000000000E+00 .139698386192E-08 .300000000000E+02
.411876000000E+06 .400000000000E+01
7 19 8 15 19 59 44.0 -.858781859279E-04 -.784439180279E-11 .000000000000E+00
.260000000000E+02 -.195625000000E+02 .494342019901E-08 -.288499336707E+01
-.110268592834E-05 .131195669520E-01 .474788248539E-05 .515372824478E+04
.417584000000E+06 .372529029846E-08 -.120871260949E+01 -.175088644028E-06
.954492513462E+00 .283500000000E+03 -.243819570939E+01 -.807890794752E-08
-.219652006531E-09 .100000000000E+01 .206600000000E+04 .000000000000E+00
.200000000000E+01 .000000000000E+00 -.111758708954E-07 .260000000000E+02
.411876000000E+06 .400000000000E+01
6 19 8 15 20 0 0.0 -.259838998318E-04 -.118234311230E-10 .000000000000E+00
.870000000000E+02 -.361562500000E+02 .462519265784E-08 -.197119539881E+01
-.176578760147E-05 .137101765722E-02 .158324837685E-05 .515363568878E+04
.417600000000E+06 -.316649675369E-07 .191664502252E+01 .763684511185E-07
.975989303198E+00 .358468750000E+03 -.110817498206E+01 -.832248952224E-08
-.571452374714E-10 .100000000000E+01 .206600000000E+04 .000000000000E+00
.200000000000E+01 .000000000000E+00 .419095158577E-08 .870000000000E+02
.411906000000E+06 .400000000000E+01
2 19 8 15 20 0 0.0 -.283625442535E-03 -.841282599140E-11 .000000000000E+00
.830000000000E+02 -.244375000000E+02 .492770525870E-08 -.199866339590E+01
-.901520252228E-06 .189814287005E-01 .527128577232E-06 .515376569748E+04
.417600000000E+06 .316649675369E-06 .185450839487E+01 .156462192535E-06
.955432349090E+00 .360750000000E+03 -.172305656107E+01 -.826784438891E-08
.892894335490E-10 .100000000000E+01 .206600000000E+04 .000000000000E+00
.200000000000E+01 .000000000000E+00 -.204890966415E-07 .830000000000E+02
.411876000000E+06 .400000000000E+01
30 19 8 15 20 0 0.0 -.203098170459E-04 -.773070496507E-11 .000000000000E+00

```

Figura 4.25 - fichero rover.nav

4.4.3. Almacenamiento de los datos: Local y remoto

En esta parte ya contamos con casi todos los ficheros necesarios para realizar el postprocesado, pero estos están almacenados de forma local en la Raspberry Pi. Además, tanto el postprocesado como la visualización de los datos adquiridos en Google Maps, se realizan desde el ordenador. Para transferir los datos desde la Raspberry Pi al ordenador contamos con varios métodos dependiendo de la herramienta que utilicemos, esto siguiendo el esquema de la Figura 4.26.

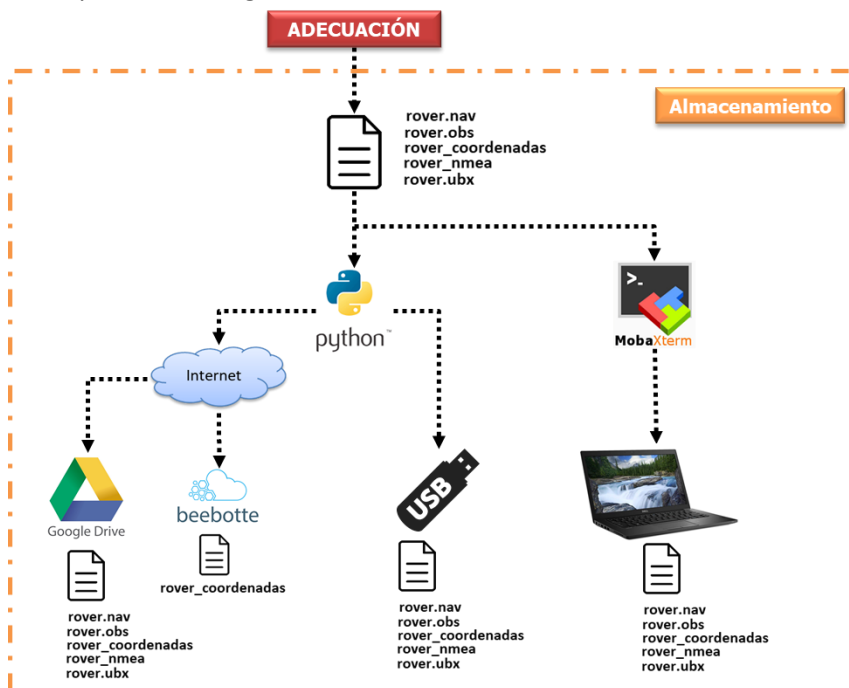


Figura 4.26 - Esquema almacenamiento de los datos

Se ha creado un script en Python para que todos los ficheros involucrados sean trasladados automáticamente a una memoria USB conectada a la Raspberry Pi. Dependiendo de, si Raspberry Pi posee conexión a internet, el script antes mencionado puede subir una carpeta con todos los ficheros obtenidos en Google drive, en una cuenta previamente configurada. Además de lo antes mencionado, también se cargan las coordenadas obtenidas, contenidas en el fichero `rover_coordenadas`, a la base de datos remota, comentada en el apartado 4.2.4, Beebotte.

No obstante, si el ordenador y la Raspberry Pi están conectadas en la misma red WI-FI, se pueden transferir los ficheros utilizando la aplicación MobaXterm, explicada en el apartado 4.2.5, la cual utiliza el protocolo de transferencia de archivos FTP para estos fines. Con esta opción, basta solo con seleccionar los ficheros a transferir para después realizar un “arrastrar y soltar” en la ubicación deseada dentro del ordenador.

4.4.4. Visualización de los datos adquiridos

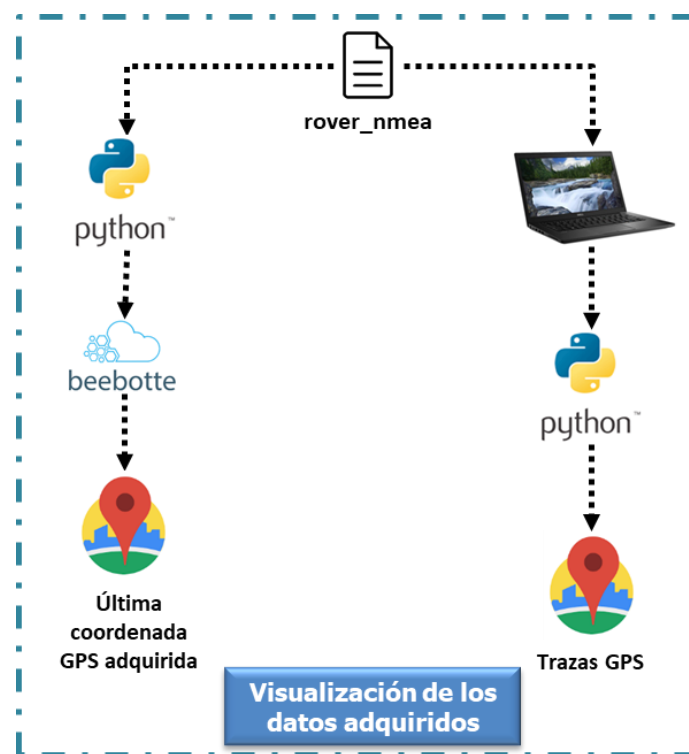


Figura 4.27 - Esquema de visualización de los datos adquiridos

Datos almacenados en Beebotte

Las coordenadas GPS que contienen los mensajes NMEA, deben de seguir un formato predefinido para poder ser almacenados en Beebotte. De esto se encarga un script en Python, cuya función es darles el formato necesario a estos datos para luego subirlos a la nube. Esta plataforma en la nube ofrece varias opciones a la hora de representar datos GPS, además de solo almacenarlos. Dentro de estas se encuentran la herramienta Beta Google Maps, el cual permite pintar un punto en un mapa haciendo referencia a una coordenada almacenada que en nuestro caso serán 2 puntos, inicio y fin de la adquisición. Una herramienta GPS que han habilitado recientemente es la llamada Tracker, la cual es un widget rastreador diseñado para

rastrear una gran cantidad de recursos de ubicación desde un canal (el canal de ubicación). Los datos de ubicación deben ser del tipo de valor GPS.



Figura 4.28 - Representación en Beebotte de los datos adquiridos

Coordenadas NMEA

RESOURCE	DATA	WHEN
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508585333333336,"longitude":-3.3469136666666666}	an hour ago
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508593666666667,"longitude":-3.3469041666666666}	an hour ago
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508601333333333,"longitude":-3.3468936666666664}	an hour ago
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508608166666667,"longitude":-3.3468798333333334}	an hour ago
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508615666666664,"longitude":-3.3468675}	an hour ago
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508621833333336,"longitude":-3.3468525}	an hour ago
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508628333333334,"longitude":-3.3468375}	an hour ago
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508635333333333,"longitude":-3.3468256666666667}	an hour ago
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508641166666666,"longitude":-3.3468155}	an hour ago
gps_test.test_nmea	{"latitude":40.508650833333334,"longitude":-3.3468123333333333}	an hour ago

Showing 1 to 10 of 276 entries

Previous 1 2 3 4 5 ... 28 Next

Figura 4.29 - Almacenamiento en Beebotte de los datos adquiridos

Representación datos adquiridos en Google Maps

Para esto contamos con un script en Python, en el cual utilizamos la librería gmplot para representar en gmaps las trazas de los datos adquiridos, además de puntos en específicos como el inicio y fin de la adquisición realizada.

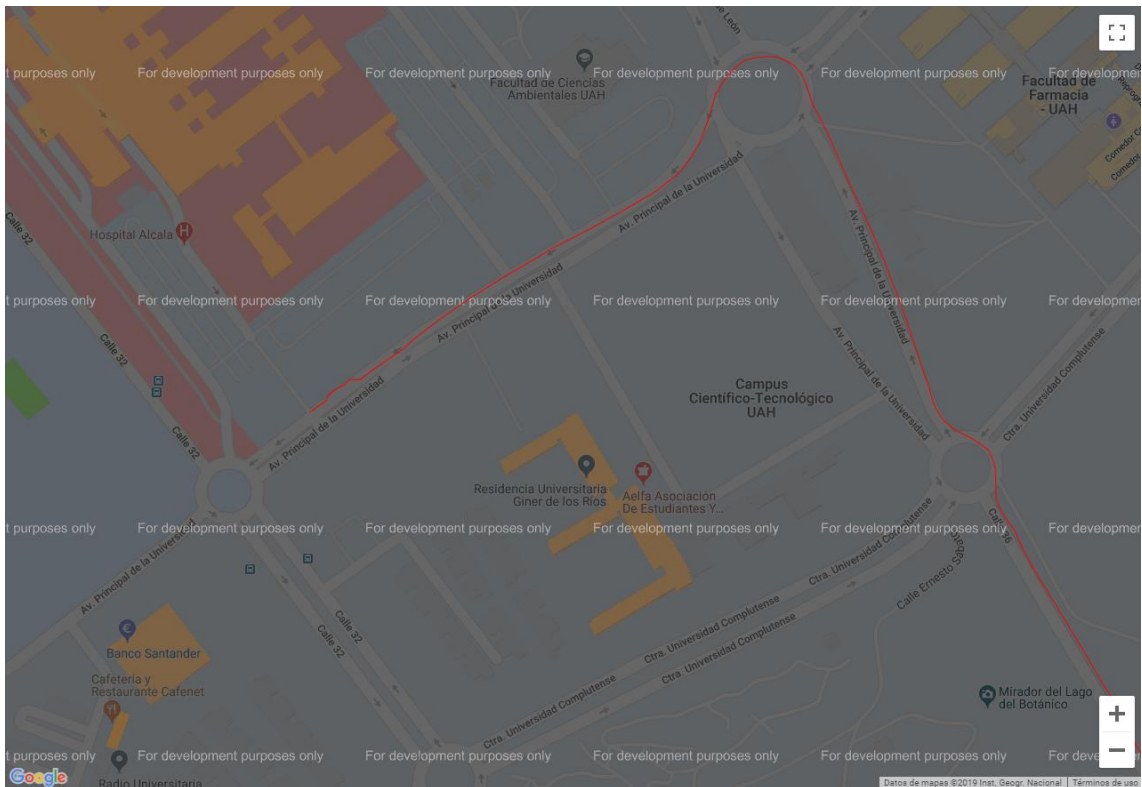


Figura 4.30 - Representación en Google Maps de los datos adquiridos

4.5. Implementación GPS Diferencial

La finalidad de este apartado es implementar el postprocesado con los datos adquiridos anteriormente, pero antes de, vamos a prestar atención a las estaciones base de referencia GPS de la comunidad de Madrid para seleccionar la estación con la cual conseguir posicionamiento terrestre de alta precisión con ayuda de correcciones de GPS diferencial en postproceso.

4.5.1. Selección de estación base de referencia a utilizar

La Comunidad de Madrid dispone de 5 estaciones base de referencia GPS, más 3 estaciones que pertenecen a la red ERGNSS, las cuales podemos observar en la Tabla 4.8. Vale aclarar que la estación Yebes ubicada en Guadalajara, Castilla La Mancha, se encuentra en la tabla antes mencionada, debido a que las pruebas se realizaran en el Campus Científico-Tecnológico UAH a menos de 30 km en línea recta de la misma. Por lo cual, se pueden utilizar los datos de navegación y observación de dicha estación para el postprocesado. La localización de las estaciones base de referencia, se pueden apreciar en la Figura 4.31.









Ref.	Código	Estación	Coordenadas geodésicas (lat/long)	Antena	Receptor	Correcciones
	IGNE	IGNE Madrid	40.445836, -3.709523	LEIAT504GG LEIS	LEICA GRX1200GGPRO	<ul style="list-style-type: none"> • Pertenece a la red ERGNSS. • Emite correcciones diferenciales a través del Caster http://ergnss-ip.ign.es
	YEBE	Yebes, Guadalajara, Castilla La Mancha	40.524758, -3.086794	TRM29659.00 NONE	TRIMBLE NETR9	<ul style="list-style-type: none"> • Pertenece a la red ERGNSS. • Emite correcciones diferenciales a través del Caster http://ergnss-ip.ign.es
	SMDV	San Martín de Valdeiglesias	40.358161, -4.376408	TPSCR.G3 TPSH	TOPCON NET-G5	<ul style="list-style-type: none"> • Pertenece a la red ERGNSS. • Emite correcciones diferenciales a través del Caster http://ergnss-ip.ign.es
	BUIT	Buitrago del Lozoya	41.000870, -3.639240	TRM57971.00 TZGD	TRIMBLE NETR9	<ul style="list-style-type: none"> • Pertenece a la red ERGNSS. • Emite correcciones diferenciales a través del Caster http://ergnss-ip.ign.es
	3CAN	Tres Cantos	40.613564, -3.701639	TOPCON CR-G3	TOPCON NET-G3	<ul style="list-style-type: none"> • Pertenece a la Red de estaciones GNSS de la Comunidad de Madrid (RGM)
	ARAN	Aranjuez	40.025224, -3.612031	TOPCON CR-G3	TOPCON NET-G3	<ul style="list-style-type: none"> • Pertenece a la Red de estaciones GNSS de la Comunidad de Madrid (RGM)
	HENA	Alcalá de Henares	40.488467, -3.384250	TOPCON CR-G3	TOPCON NET-G3	<ul style="list-style-type: none"> • Pertenece a la Red de estaciones GNSS de la Comunidad de Madrid (RGM)
	ESCO	El Escorial	40.578351, -4.127102	TOPCON CR-G3	TOPCON NET-G3	<ul style="list-style-type: none"> • Pertenece a la Red de estaciones GNSS de la Comunidad de Madrid (RGM)

Tabla 4.8 - Estaciones base de referencia GPS

Como señalamos anteriormente, las pruebas se realizarán en el Campus Científico-Tecnológico UAH por lo cual la estación base de referencia a utilizar debería ser HENA, pero esta se encuentra fuera de servicio, hoy 21 de agosto de 2019, por fallo técnico. Para emplear la técnica del postprocesado de manera eficiente, se recomienda que la distancia entre la estación base de referencia y la estación móvil, en nuestro caso el sistema de adquisición de datos no debe ser mayor de 30 km, por lo que se dibujado en un mapa, las estaciones de referencia representando un área de cobertura de 30 km. Esto lo podemos apreciar en la Figura 4.33. Mientras más corta sea la distancia entre la estación de referencia y el rover, los errores causados por la ionósfera y tropósfera serán comunes o estarán correlacionados espacialmente. Debido a esto, las estaciones base de referencia a utilizar serán Yebes y IGNE, ya que estas son las más cercanas al área donde se realizarán las pruebas.

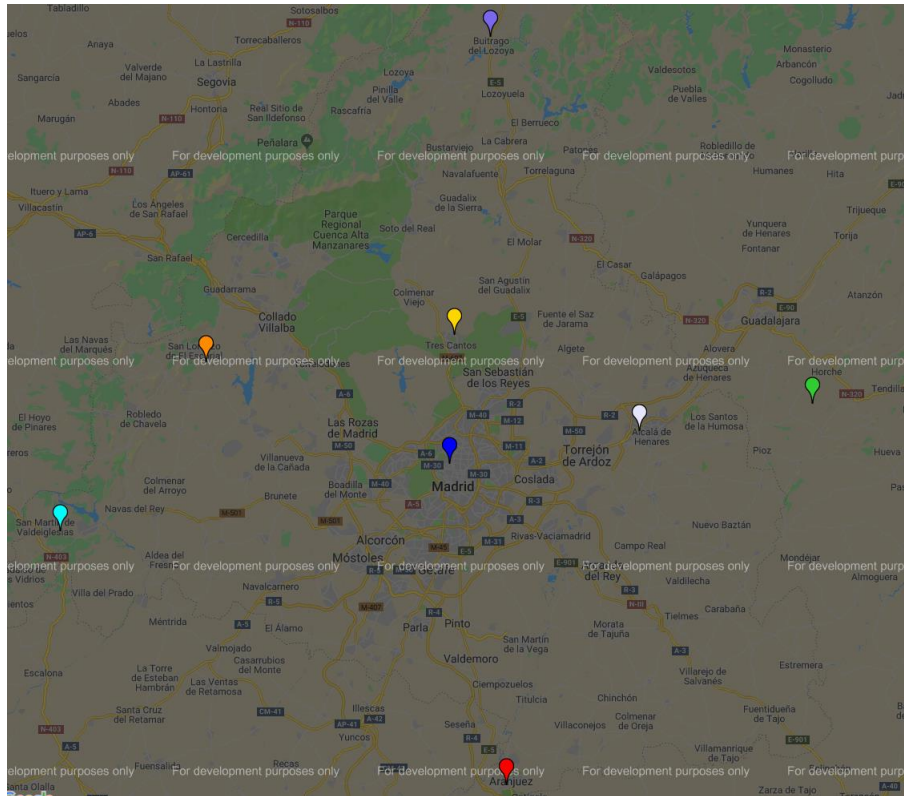


Figura 4.31 - Distribución de las estaciones base de referencia GPS

Ya con las estaciones seleccionadas, accederemos a los Servicios de postprocesado de la red ERGNSS, los cuales ofrecen datos de navegación y observación en forma de ficheros RINEX de todas las estaciones, con diferentes intervalos (horarios a 1, 5, 10 y 30 segundos o diarios a 30 segundos), accesibles directamente a través de un servidor FTP.

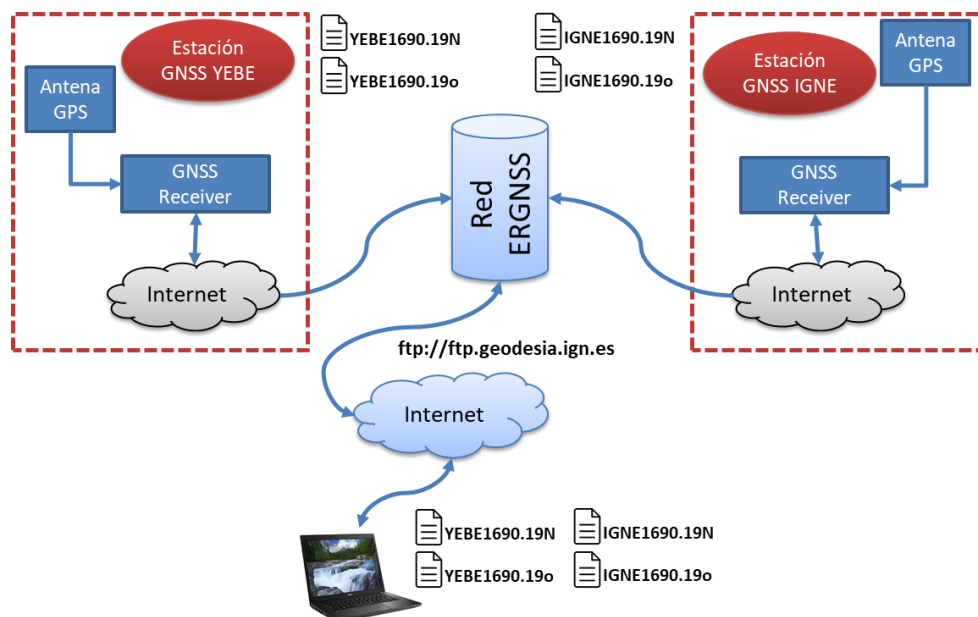


Figura 4.32 - Descarga de fichero RINEX estaciones base de referencia GPS

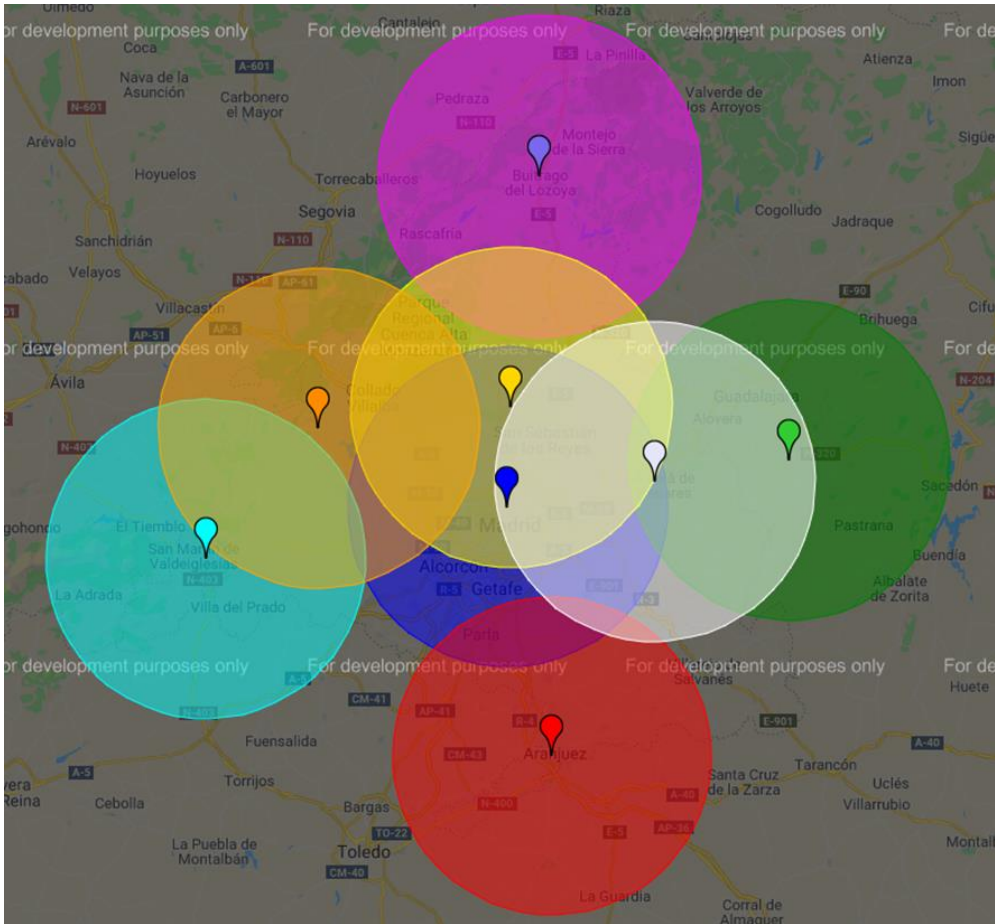


Figura 4.33 - Área de cobertura de las estaciones base de referencia GPS

4.5.2. Ejecución del Postprocesado

Ahora que contamos con los datos de navegación y observables de las estaciones base de referencia, ya poseemos los datos necesarios para poder realizar el postprocesado. Para esto utilizaremos la herramienta RTKPOST, del software RTKlib. RTKPOST ingresa el estándar RINEX 2.10, 2.11, 2.12, 3.00, 3.01, de datos de observación y archivos de mensajes de navegación (GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou y SBAS) y puede calcular las soluciones de posicionamiento mediante varios modos de posicionamiento, incluido Single -Point, DGPS / DGNSS, cinemático, estático, PPP - cinemático y PPP - estático [70].

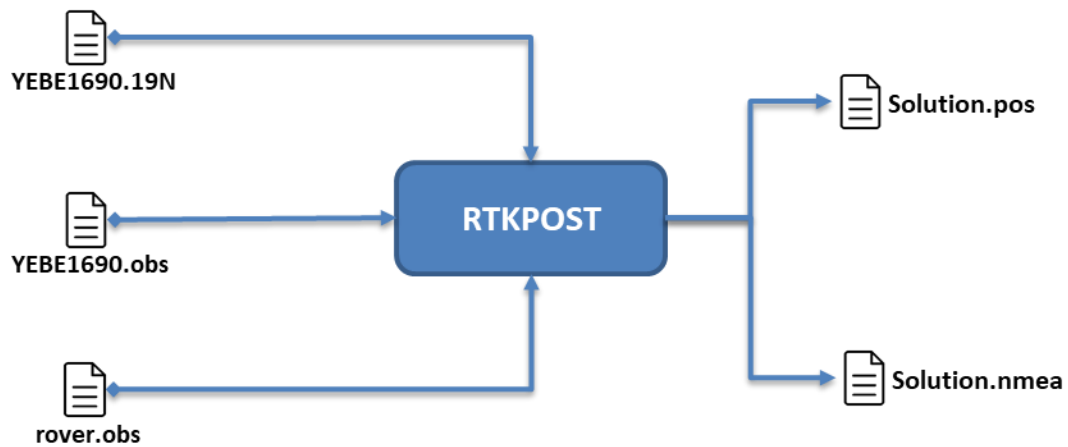


Figura 4.34 - Postprocesado con RTKPOST

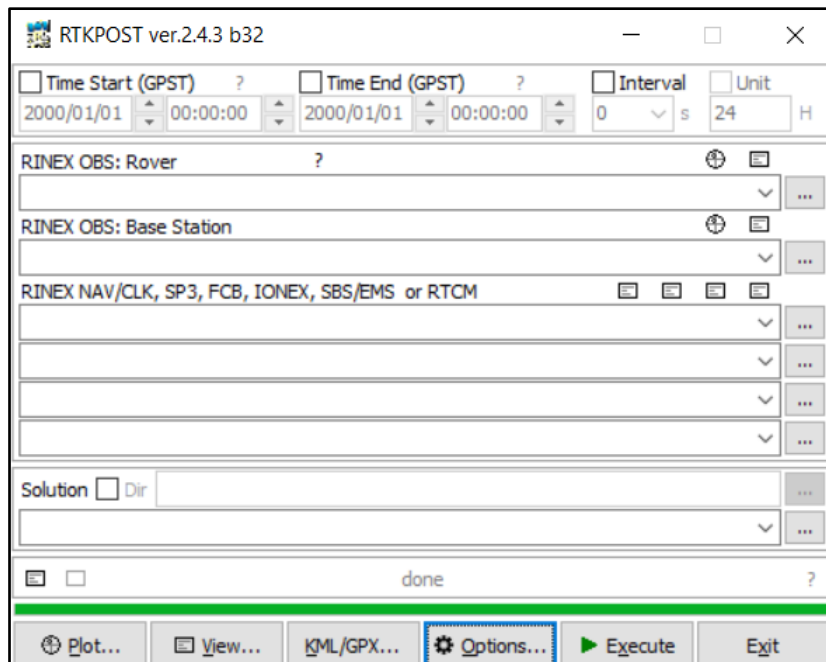


Figura 4.35 - Ventana principal RTKPOST

En la Figura 4.34 podemos observar los parámetros de entrada y los ficheros de salida de la herramienta RTKPOST. Tal como se ha mencionado en anteriores ocasiones, los parámetros de entrada son el fichero que contiene la información de los observables de la adquisición realizada en etapas anteriores y los ficheros de observación y navegación de la estación base de referencia GPS. RTKLIB emplea EKF (filtro Kalman extendido [71]) para obtener las soluciones finales en modos de línea base DGPS / DGNSS, estático, cinemático y móvil junto con los modelos de medición de señal GNSS y los modelos de troposfera e ionosfera, detallados en los apéndices E.3, E.5 y E.7 del manual RTKLIB VER. 2.4.2 [70].

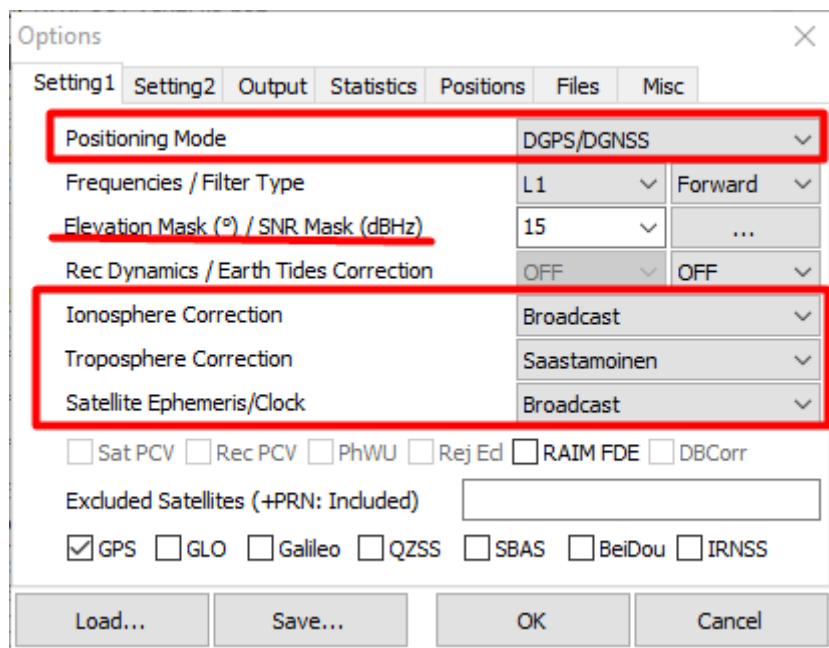


Figura 4.36 - Diálogo de opciones (Configuración 1) de RTKPOST

La Figura 4.36 nos muestra algunos de los parámetros de configuración disponibles en esta herramienta. De estos parámetros podemos resaltar los siguientes:

- **Positioning Mode.**
Establece el modo de posicionamiento, dentro de los cuales tenemos:
 - Single: Single point positioning or SBAS DGPS
 - DGPS/DGNSS: Code-based differential GPS
 - Static: Carrier-based Static positioning
 - Kinematic: Carrier-based Kinematic positioning
 - Moving-Base: Moving baseline
 - Fixed: Rover receiver position is fixed
- **Frequencies.**
Establecer frecuencias portadoras usadas:
 - L1: L1 Single frequency
 - L1+2: L1 and L2 Dual-frequency
 - L1+2+5: L1, L2 and L5 Triple-frequency
- **Elevation Mask**
Establecer el ángulo de la máscara de elevación en grados.
- **Ionosphere Correction**
Establecer opciones de corrección ionosférica. Se estima el retraso ionosférico vertical para cada satélite. Para el análisis de línea de base largo, la estimación de la ionosfera es efectiva para suprimir los efectos del retraso de la ionosfera. Dentro de las opciones disponibles tenemos:
 - OFF: Not apply ionospheric correction
 - Broadcast: Apply broadcast ionospheric model
 - SBAS: Apply SBAS ionospheric model
- **Troposphere Correction**
Establezca si los parámetros troposféricos (retraso total cenital en el rover y las posiciones de la estación base) se estiman o no. Dentro de las opciones disponibles tenemos:
 - OFF: Not apply troposphere correction
 - Saastamoinen: Apply Saastamoinen model
 - SBAS: Apply SBAS tropospheric model (MOPS)
- **Satellite Ephemeris/ Clock**
Establece el tipo de efemérides satelitales. Dentro de las opciones disponibles tenemos:
 - Broadcast: Use broadcast ephemeris
 - Precise: Use precise ephemeris *
 - Broadcast+SBAS: Broadcast ephemeris with SBAS long-term and fast correction
- **Excluded Satellites (+PRN: Included)**
Establecer los satélites excluidos para el posicionamiento. Si se agrega " + " al encabezado de la ID del satélite, el satélite se incluye para posicionamiento incluso si el satélite no es saludable.

Tal y como se aprecia en la Figura 4.34, podemos obtener el mismo fichero de salida en 2 formatos diferentes, el primero en formato NMEA0183 : NMEA GPRMC, GPGGA, GPGSA, GLGSA, GAGSA, GPGSV, GLGSV and GAGSV y el otro en coordenadas geodésicas: latitud, longitud y altura. A estos ficheros se les conoce como “Archivos de solución de posicionamiento”, los cuales se deciden de la siguiente manera:

Un archivo de solución de posicionamiento es solo un archivo de texto como salida de RTKNAVI o RTKPOST. El archivo está separado en registros o líneas por CR (retorno de carro) / LF (salto de línea) [70]. Cada registro consta de campos, los cuales se encuentran detallados en el manual RTKLIB VER. 2.4.2 [70].

De estos campos podemos resaltar los siguientes:

- **Time**
El tiempo de época de la solución que indica el verdadero tiempo de recepción de la señal del receptor (no indica el tiempo por reloj del receptor). El formato varía según las opciones.
yyyy/mm/dd HH:MM:ss.sss: Hora del calendario en GPST, UTC o JST, el sistema de hora se indica en el indicador de campo.
- **Receiver Position**
Hace referencia a la ubicación del rover o estación móvil utilizada para el postprocesado.
+ddd.dddddddd +ddd.dddddddd hhhh.hhhh: Latitud, longitud en grados y altura en m. Valor menos significa latitud sur o longitud oeste. La altura indica elipsoidal o geodésica según las opciones de posicionamiento.
- **Flag, Bandera o factor de calidad (Q)**
Este campo indica la calidad de la solución obtenida. La calidad se clasifica según los siguientes valores:
1: Fixed o Solución fija, solución por posicionamiento relativo basado en el operador y la ambigüedad entera se resuelve correctamente.
2: Float o flotante , solución por posicionamiento relativo basado en el operador, pero la ambigüedad entera no se resuelve.
3: Reservado
4: DGPS, solución mediante soluciones DGPS basadas en código o posicionamiento de punto único con correcciones SBAS
5: Single, solución por posicionamiento de punto único.
- **Number of valid satellites (ns)**
El número de satélites válidos para la estimación de la solución.
- **Desviaciones estandar (sdn, sde, sdu, sdne, sdeu, sdun)**
Las desviaciones estándar estimadas de la solución suponiendo un modelo de error a priori y parámetros de error por las opciones de posicionamiento.
Los valores sdn, sde o sdu significan componente N (north - norte), E (east - este) o U (up - arriba) de las desviaciones estándar en m. El valor absoluto de sdne, sdeu o sdun significa la raíz cuadrada del valor absoluto del las componente NE, EU o UN de la matriz de covarianza estimada. El signo representa el signo de la covarianza. Con todos los valores, el usuario puede reconstruir la matriz de covarianza completa.

- Age of Differential (age)
La diferencia de tiempo entre las épocas de datos de observación del receptor móvil y la estación base en segundos.
- Ratio factor (ratio)
El factor de relación de "ratio - test" para la estrategia estándar de validación de ambigüedad de enteros. El valor significa la relación de la suma al cuadrado de los residuos con el segundo mejor vector entero con el mejor vector entero.

```
% program : RTKPOST ver.2.4.3 b32
% inp file : C:\Users\Alex Mateo\Desktop\UAH\SEMESTRE 5\TFM\pruebas\Malaga\test_malaga.obs
% inp file : C:\Users\Alex Mateo\Desktop\UAH\SEMESTRE 5\TFM\pruebas\Malaga\test_malaga.nav
% obs start : 2019/07/19 10:50:39.1 GPST (week2062 471039.1s)
% obs end : 2019/07/20 22:51:45.4 GPST (week2062 600705.4s)
% pos mode : single
% elev mask : 15.0 deg
% ionos opt : broadcast
% tropo opt : saastamoinen
% ephemeris : broadcast
%
% (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
% GPST latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdne(m) sdeu(m) sdun(m) age(s) ratio
2019/07/19 19:31:59.000 36.728279483 -4.421862421 103.5731 5 6 2.6195 3.5439 5.1538 2.0053 -2.4463 -2.0442 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:08.000 36.728270255 -4.421797437 98.5017 5 6 2.6187 3.5432 5.1586 2.0042 -2.4558 -2.0501 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:09.000 36.728265560 -4.421815056 99.2132 5 6 2.6186 3.5431 5.1591 2.0041 -2.4569 -2.0508 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:10.000 36.728258357 -4.421761712 95.6426 5 6 2.6185 3.5431 5.1597 2.0040 -2.4580 -2.0515 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:16.000 36.728252013 -4.421759927 96.5175 5 6 2.6180 3.5426 5.1629 2.0032 -2.4643 -2.0554 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:17.000 36.728253257 -4.421780019 98.1632 5 6 2.6179 3.5425 5.1634 2.0031 -2.4654 -2.0561 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:18.000 36.728253371 -4.421768691 98.0573 5 6 2.6179 3.5425 5.1640 2.0030 -2.4664 -2.0567 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:19.000 36.728252717 -4.421752731 96.7644 5 6 2.6178 3.5424 5.1645 2.0029 -2.4675 -2.0574 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:21.000 36.728256611 -4.421809394 100.3728 5 6 2.6176 3.5423 5.1656 2.0026 -2.4696 -2.0587 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:27.000 36.728253177 -4.421820619 102.4250 5 6 2.6171 3.5418 5.1689 2.0019 -2.4759 -2.0627 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:28.000 36.728255140 -4.421813900 102.2682 5 6 2.6170 3.5418 5.1694 2.0018 -2.4770 -2.0633 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:31.000 36.728252565 -4.421827298 102.5499 5 6 2.6168 3.5416 5.1710 2.0015 -2.4802 -2.0653 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:34.000 36.728252827 -4.421837423 103.7712 5 6 2.6166 3.5414 5.1727 2.0011 -2.4833 -2.0673 0.00 0.0
2019/07/19 19:32:35.000 36.728251909 -4.421841104 104.2427 5 6 2.6165 3.5413 5.1732 2.0010 -2.4844 -2.0680 0.00 0.0
```

4.6. Resultados obtenidos

En este apartado se van a comentar los datos obtenidos. Nos basaremos en 2 casos o escenarios de estudio:

4.6.1. Escenario 1: Procesamiento Estático

Se ha realizado una adquisición durante 1 hora en un punto fijo, del cual se conocen a priori sus coordenadas exactas. Este punto es el parámetro de referencia para medir la exactitud y la precisión de los resultados obtenidos al aplicar la técnica DGPS a los datos adquiridos por el sistema desarrollado. Para esto se ha empleado el DGPS en tiempo real, y posteriormente el DGPS en postprocesado, utilizando las estaciones base de referencia diferentes Yebes (Guadalajara) e IGNE (Madrid). Tal como se mencionó en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, estas estancaciones son las más cercanas al punto de observación. Tanto los ficheros RINEX de navegación como de observación de dichas estaciones se han descargado del portal "Descarga de ficheros RINEX" del Instituto Geográfico Nacional [72].

Punto de observación	Estación de referencia	Ubicación	Distancia [Km]	Tiempo de observación
Campus Científico-Tecnológico UAH	Yebes	Centro Astronómico de Yebes, Guadalajara	22.25	1H
	IGNE	Instituto Geográfico Nacional, Madrid	31.31	1H

Tabla 4.9 - Estaciones de referencia respecto al punto de observación

La solución DGPS en tiempo real se ha realizado a través del Sistema de Posicionamiento GPS/GNSS en Tiempo Real de España explicado en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Este sistema permite conseguir un posicionamiento preciso en el mismo instante en que se realiza la medición.

El acceso a los datos en tiempo real se realiza a través del Caster NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) de la Red Geodésica Nacional de Estaciones de referencia GNSS del Instituto Geográfico Nacional. NTRIP es un protocolo estándar diseñado para difundir en tiempo real los datos procedentes de receptores GNSS en Internet.

Dentro de los tipos de soluciones que se ofrecen se ha utilizado la solución con el conjunto de red con la técnica para generar correcciones DGPS en tiempo real MAC3. Esta es una solución basada en Master Auxiliary Concept (MAC), GPS + GLONASS, RTCM3. Esta es la solución más recomendable dado que su precisión es homogénea en todo el territorio y no exige conocer la estación permanente más próxima a la ubicación del dispositivo GPS/GNSS [24].

Las muestras estudiadas son:

- GPS_SINGLE: Datos GPS adquiridos, sin técnicas de mejoras ni nada.
- DGPS MAC3 o MDGPS : Datos obtenidos al implementar DGPS en tiempo real.
- DGPS_YEBE o YDGPS: Datos obtenidos al implementar DGPS en postprocesado utilizando la estación de referencia GNSS de Yebes.
- DGPS_IGNE o IDGPS: Datos obtenidos al implementar DGPS en postprocesado utilizando la estación de referencia GNSS de IGNE en Madrid.

Se han obtenido 1848 muestras durante un periodo de adquisición de una hora. Para poder apreciar la exactitud de los datos adquiridos, se ha calculado la distancia euclídea de desde el punto de referencia ya conocido hacia cada una de las muestras. Los resultados se aprecian en las siguientes tablas:

	GPS	IDGPS	YDGPS	MDGPS	Mejora IDGPS	Mejora YDGPS	Mejora MDGPS
RMSE	6.3769	5.6833	5.5117	0.3894	0.6936	0.8652	5.9876
Desviación estándar	6.7293	9.4675	4.9782	0.3708	-2.7382	1.7511	6.3585
Distancia Máxima	53.6059	110.5214	25.7283	1.5309	-56.9155	27.8776	52.0750
Distancia mínima	0.2728	0.2578	0.0687	0.1106	0.0150	0.2042	0.1623
Distancia promedio	9.2308	10.7242	6.9005	0.7889	-1.4934	2.3304	8.4419
Rango	53.3331	110.2636	25.6596	1.4203	-56.9305	27.6734	51.9127

Tabla 4.10 - Resultados obtenidos en base a la distancia

En la Tabla 4.10 podemos apreciar los errores de posicionamiento de los datos adquiridos junto con los resultados obtenidos al aplicar las diferentes técnicas del DGPS a dichos datos. El primer error en el que nos vamos a centrar es en el GPS, este presenta un error de 6.3769 metros con relación a la posición original. Al aplicar el postprocesado utilizando la estación IGNE el error pasa a ser 5.6833 metros, mientras que la realizar el mismo postprocesado, pero con la estación

de Yebes se reduce todavía más el error a 5.5117 metros. La opción del procesado en tiempo real es la que presenta mejores datos con errores por debajo del metro. En las últimas 3 columnas se encuentran los valores de las mejoras que representan las técnicas DGPS aplicadas sobre los datos GPS. En la Tabla 4.11, se refleja el porcentaje de las mejoras obtenidas al aplicar las diferentes técnicas sobre los datos GPS adquiridos.

	DGPS - IGNE	DGPS - YEBE	DGPS - MAC3
RMSE	10.88%	13.57%	93.89%
Desviación estándar	-40.69%	26.02%	94.49%
Distancia Máxima	-106.17%	52.00%	97.14%
Distancia mínima	5.51%	74.83%	59.48%
Distancia promedio	-16.18%	25.25%	91.45%
Rango	-106.75%	51.89%	97.34%

Tabla 4.11 - Porcentaje de mejoras frente a GPS

De la Tabla 4.11, podemos distinguir que no todos los resultados obtenidos son mejoras utilizando la estación de IGNE, para ser más exactos nos referimos a la desviación estándar, distancia máxima, promedio y el rango. Esto se debe a varios factores, uno de estos es que la estación IGNE se encuentra a más de 20 km desde el punto en el que se ha realizado la adquisición. Si nos fijamos en la Figura 4.38 vemos como entre las muestras 900 y 1200, los datos GPS e IDGPS presentan unos picos de más de 30 metros siendo los datos IDGPS los de mayor valor. A diferencia de estos los datos de YDGPS minimizan estos picos a menos de 20 metros.

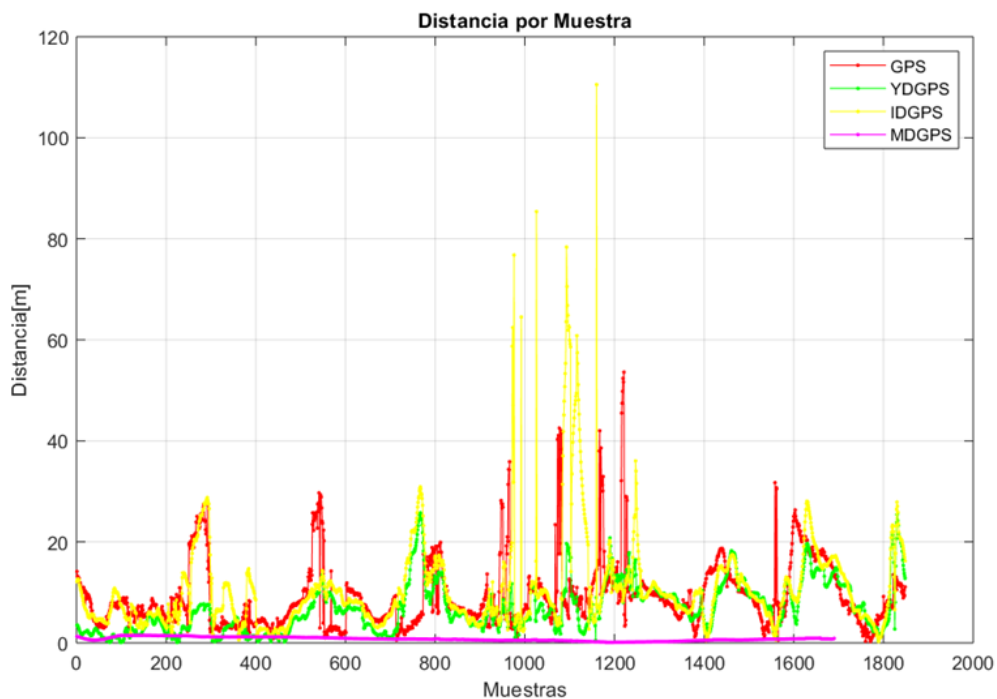


Figura 4.38 - Distancia por muestras

En la Figura 4.39, se puede apreciar como las diferentes técnicas DGPS implementadas disminuyen el error de posición en instantes determinados.

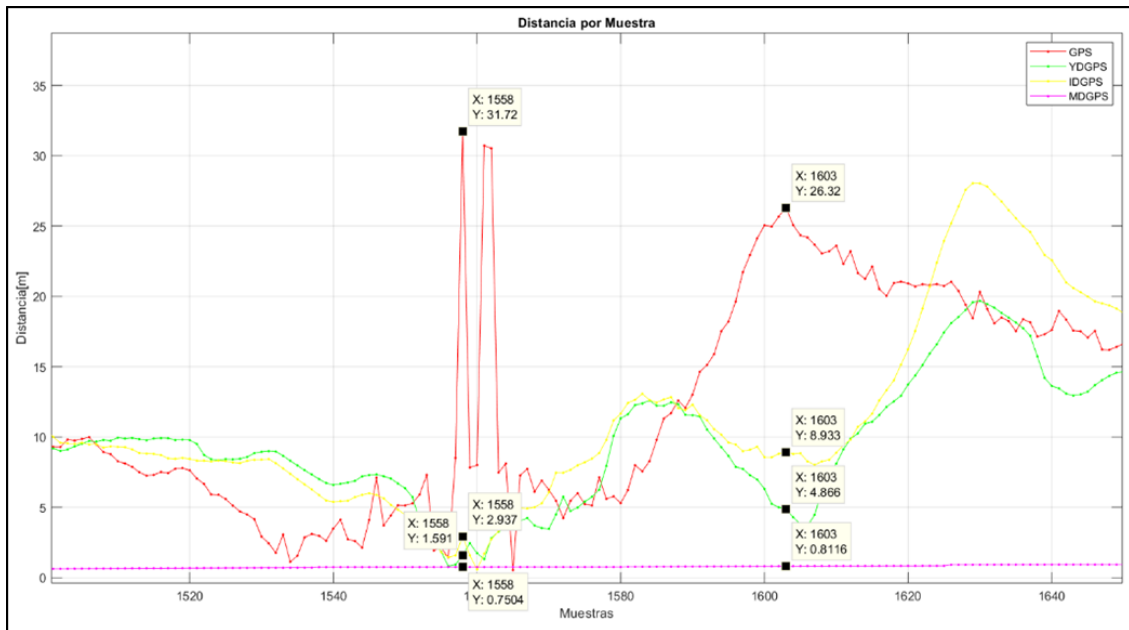


Figura 4.39 - Distancia por muestras [1500 - 1660]

El caso de la estación Yebes es totalmente lo contrario, ya que podemos apreciar como mejora el RMSE en un 13.57%, la desviación estándar mejora un 26%, la distancia promedio pasa de 9 metros a casi 2 metros. Uno de los mejores resultados que se reflejan es como la distancia mínima ha mejorado en un 74%, es decir de 0.27 metros a casi 6 centímetros, siendo incluso mejor que el resultado en tiempo real. Esta técnica es la que presenta mejores resultados en casi todos los campos, esto debido a que la técnica MAC aparte de utilizar la estación Yebes como referencia, se auxilia de otras estaciones, llamadas estaciones auxiliares, que se encuentran a 70 km a la redonda de la estación de referencia.

Por otro lado, cuando las posiciones de GPS se registran a lo largo del tiempo, las posiciones se encuentran dispersas en un área debido a errores de medición. Esta dispersión de puntos se denomina diagrama de dispersión, el cual utilizan los fabricantes de GPS para caracterizar la precisión de sus equipos. El área dentro de la cual es probable que se encuentren las mediciones o los parámetros estimados se denomina región de confianza [74]. Esta región es la que analizaremos para cuantificar el rendimiento del GPS estadísticamente. La región de confianza con un radio describe la probabilidad de que la solución esté dentro de la precisión especificada.

Región de confianza [m]	GPS	DGPS - IGNE	DGPS - YEBE	DGPS - MAC3
R < 2	3.25	3.14	17.86	100
R < 1	0.7	0.6	5.9	70.36
R < 0.5	0.11	0.11	1.68	19.76

Tabla 4.12 - Probabilidad de precisión de los resultados (%)

Al aplicar las diferentes técnicas DGPS en modo estático sobre un único punto, se obtuvieron diferentes datos alrededor del punto de referencia. Se valora la precisión que presenta cada una de las técnicas DGPS implementadas, aplicando una comparación de estos valores con relación al punto fijo de referencia conocido a priori. La representación de los resultados obtenidos en el sistema de coordenadas Norte y Este (NE), permite la visualización de latitud y longitud de los puntos obtenidos sobre el punto real.

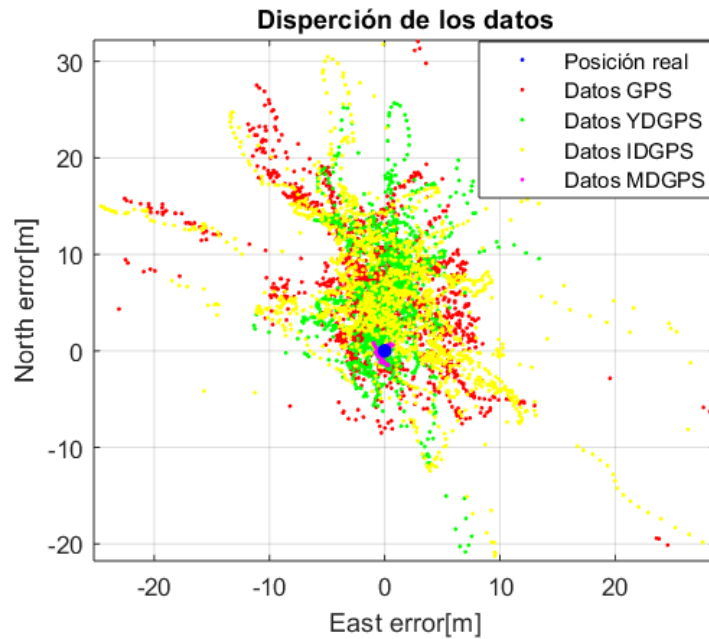


Figura 4.40 - Diagrama de dispersión de los datos

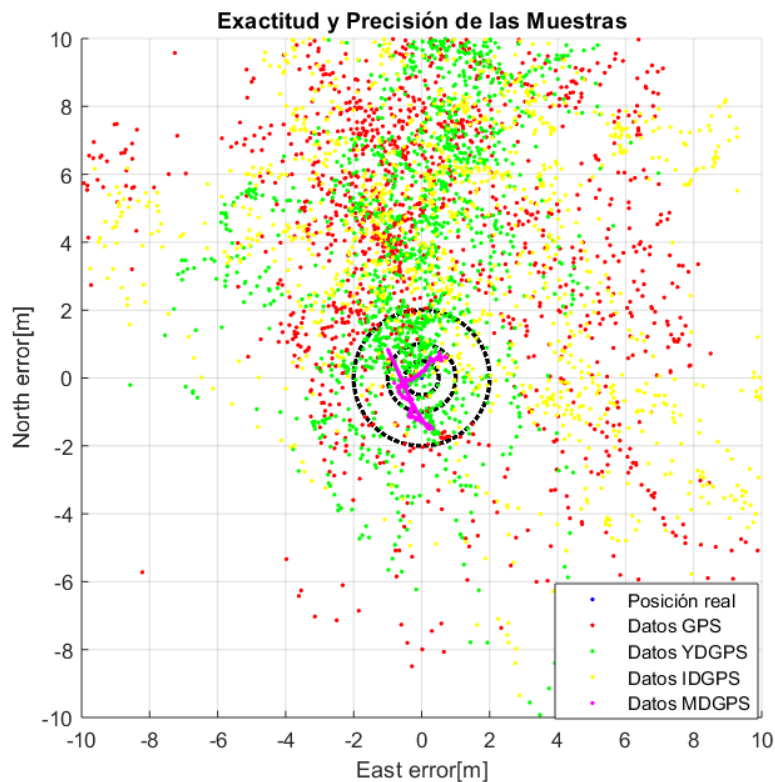


Figura 4.41 - Diagrama de dispersión de los datos con rango de - 10 a 10 metros

En las figuras anteriores podemos visualizar de una manera más clara los resultados arrojados en la Tabla 4.12. Los 3 círculos alrededor del punto de origen de la Figura 4.42, representan la región de confianza con 3 radios diferentes de 2, 1 y 0.5 metros respectivamente.

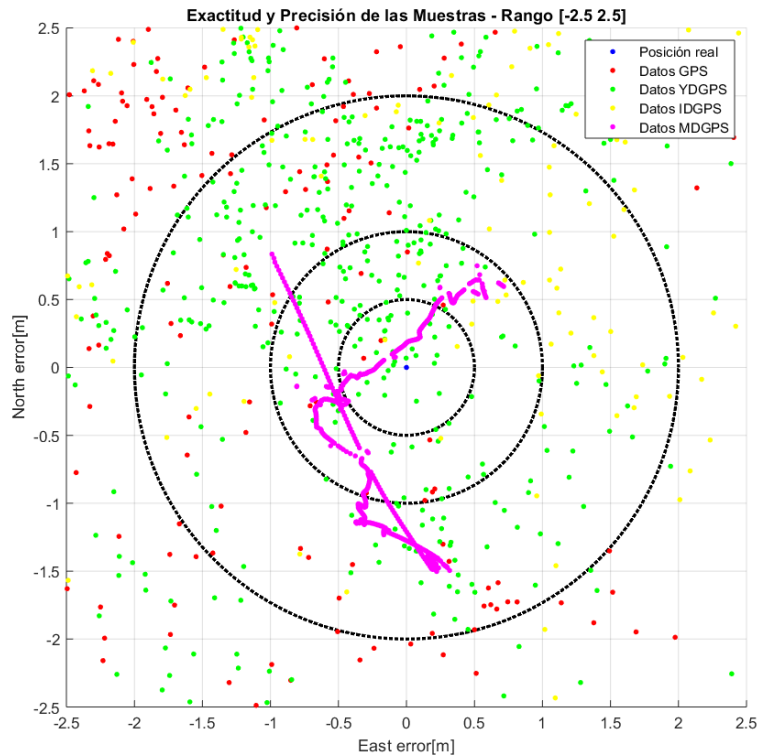


Figura 4.42 - Diagrama de dispersión de los datos con rango de - 2.5 a 2.5 metros

En la Figura 4.43, podemos observar la evolución de la precisión de las muestras obtenidas, con relación al punto de referencia, o también conocido como el error de posición de las muestras. Es decir, se simbolizan los errores de latitud, longitud y altitud en el formato de Coordenadas locales del plano tangente (LTP) o también conocido como cartesiano local NEU (North, East, Up) [75]. Se puede apreciar como las técnicas YDGPS y MDGPS son los que ofrece mejores resultados tal y como era de esperar, no obstante, si los valores de IDGPS no presentaran unos picos tan altos entre las muestras 900 y 1300, los resultados obtenidos presentarían una mejoría casi al nivel de YDGPS.

Hasta ahora solo hemos representado los resultados en un plano de 2 dimensiones, obviando la altitud. Se ha procedido a representar los resultados obtenidos en un plano de 3 dimensiones y utilizando 2 sistemas de coordenadas diferentes, el ECEF (earth-centered, earth-fixed o centrado en la tierra, fijo en la tierra) y el LLA (latitud, longitud y altitud). Desde la Figura 4.44 hasta la Figura 4.46 en formato ECEF, y desde la Figura 4.47 hasta la Figura 4.49 en formato LLA.

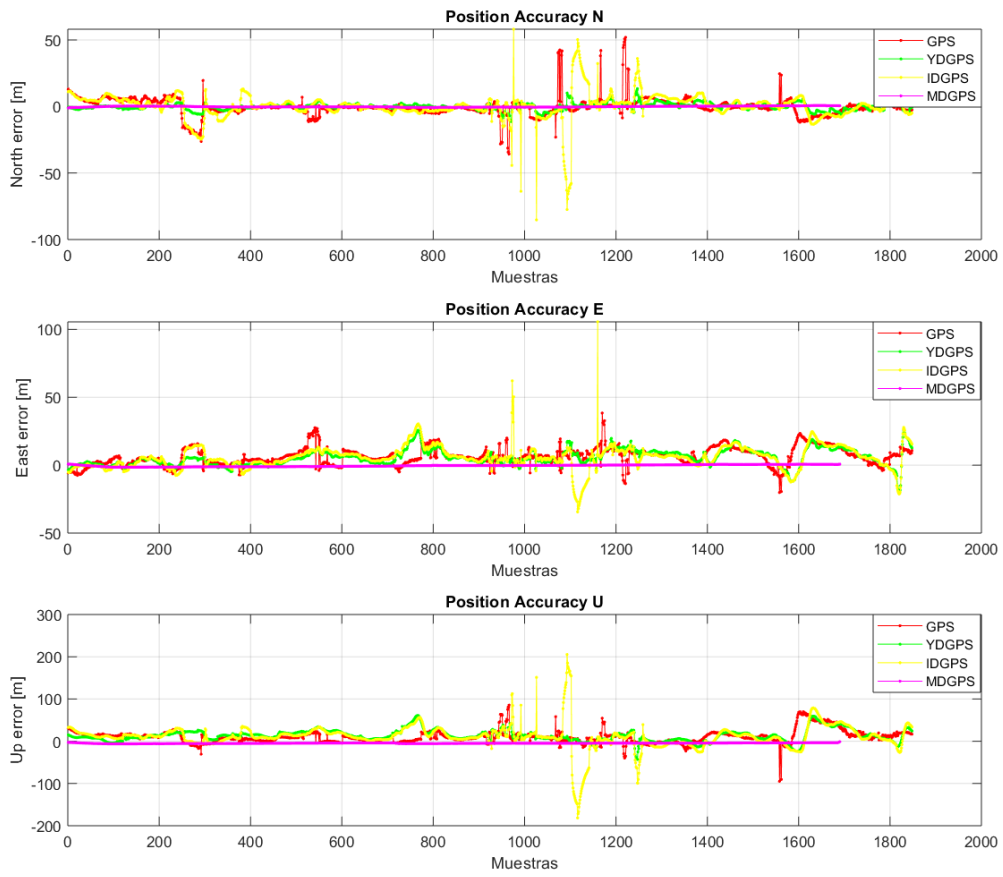


Figura 4.43 - Precisión de posición de las muestras

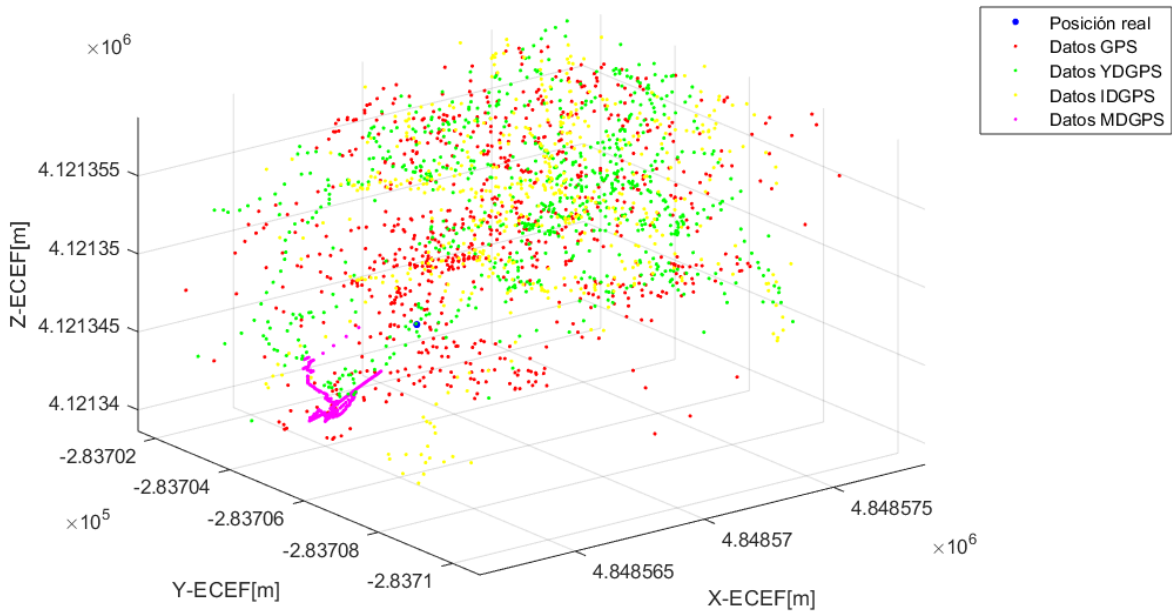


Figura 4.44 - Posiciones relativas en formato ECEF

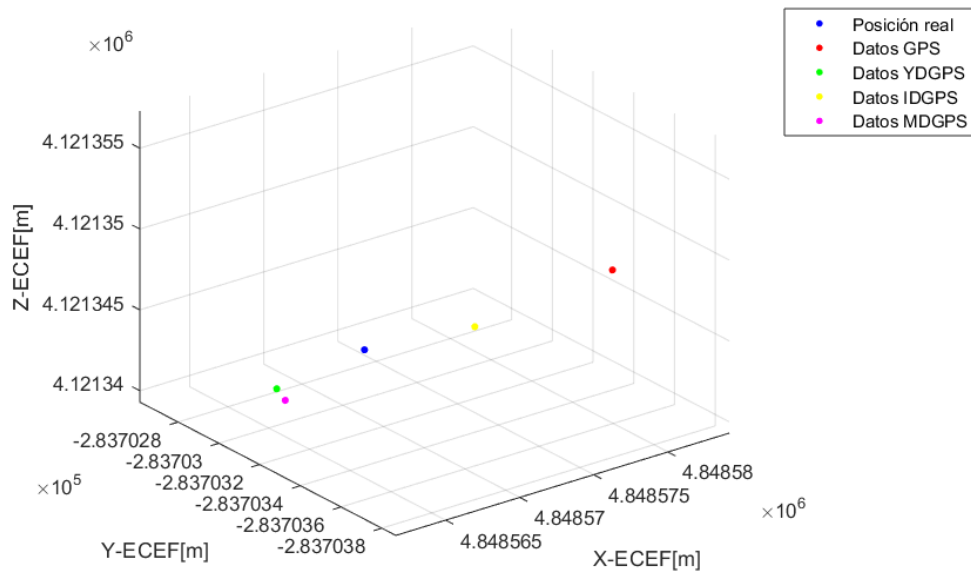


Figura 4.45 - Posición relativa mínima en formato ECEF

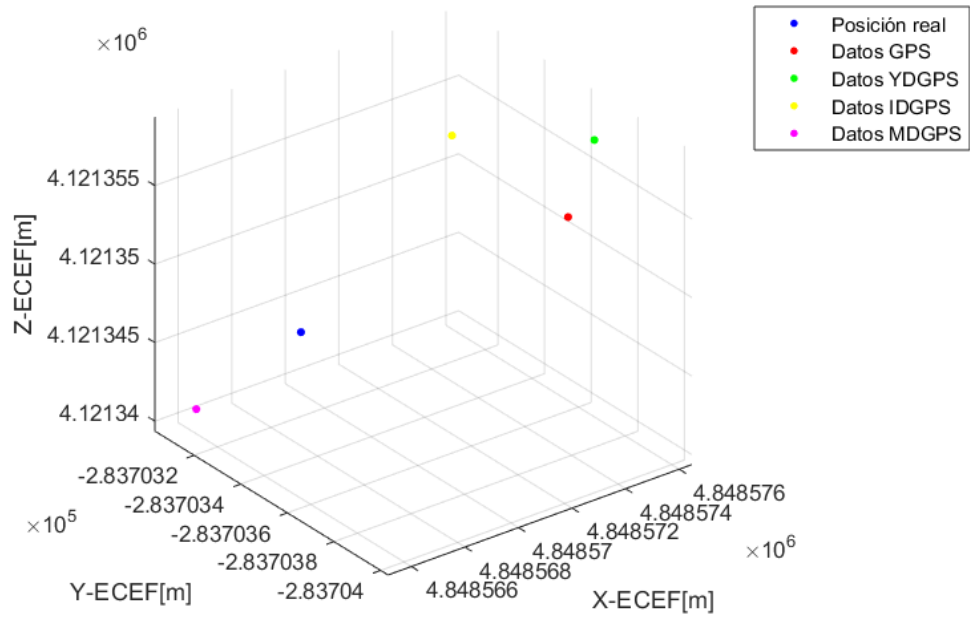


Figura 4.46 - Posición relativa promedio en formato ECEF

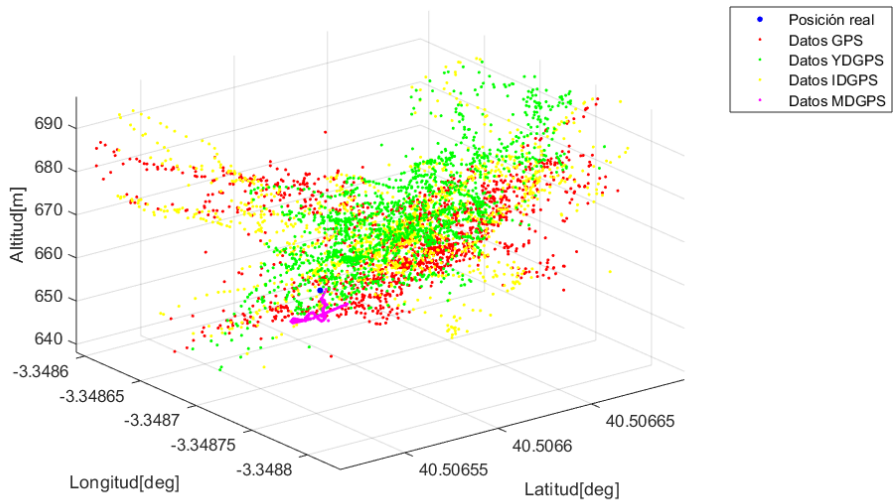


Figura 4.47 - Posiciones relativas en formato LLA

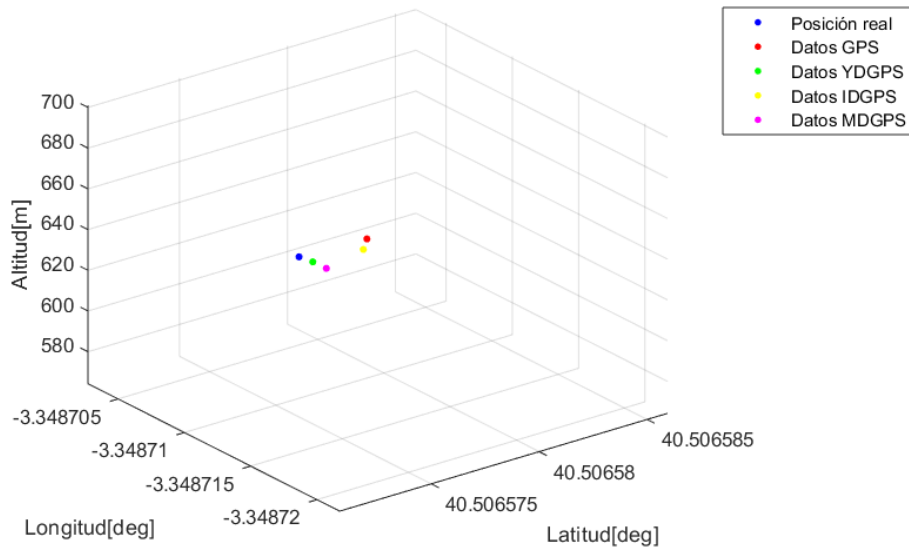


Figura 4.48 - Posición relativa mínima en formato LLA

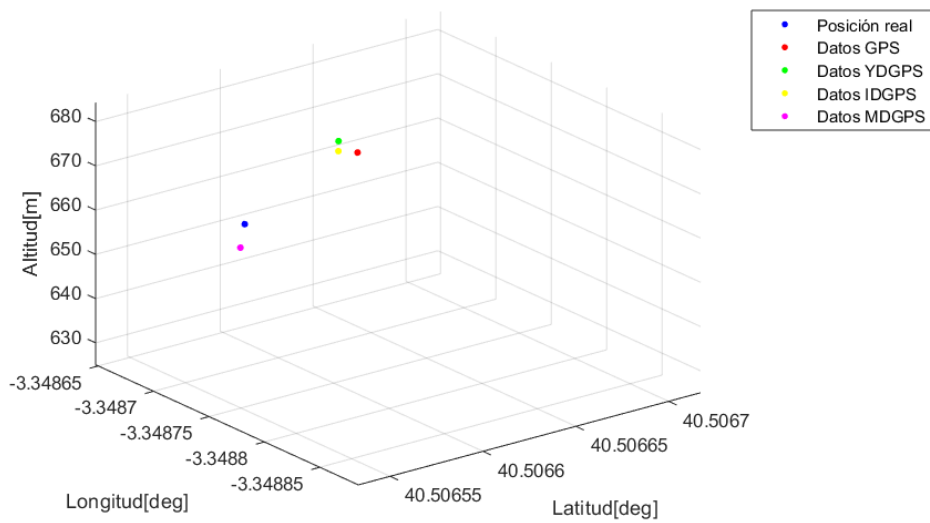


Figura 4.49 - Posición relativa promedio en formato LLA

Por último, tenemos las desviaciones estándar de cada uno de los resultados obtenidos. En la Figura 4.50, podemos evaluar las desviaciones estándar de las componentes NEU, pero los picos que presentan los resultados de IDGPS hacen que los valores del eje “y” sean lo suficientemente grandes como para que no se puedan apreciar correctamente la diferencia entre los resultados obtenidos. Es por esto por lo que en la Figura 4.51, podemos observar con mejor claridad los resultados obtenidos y sus diferencias.

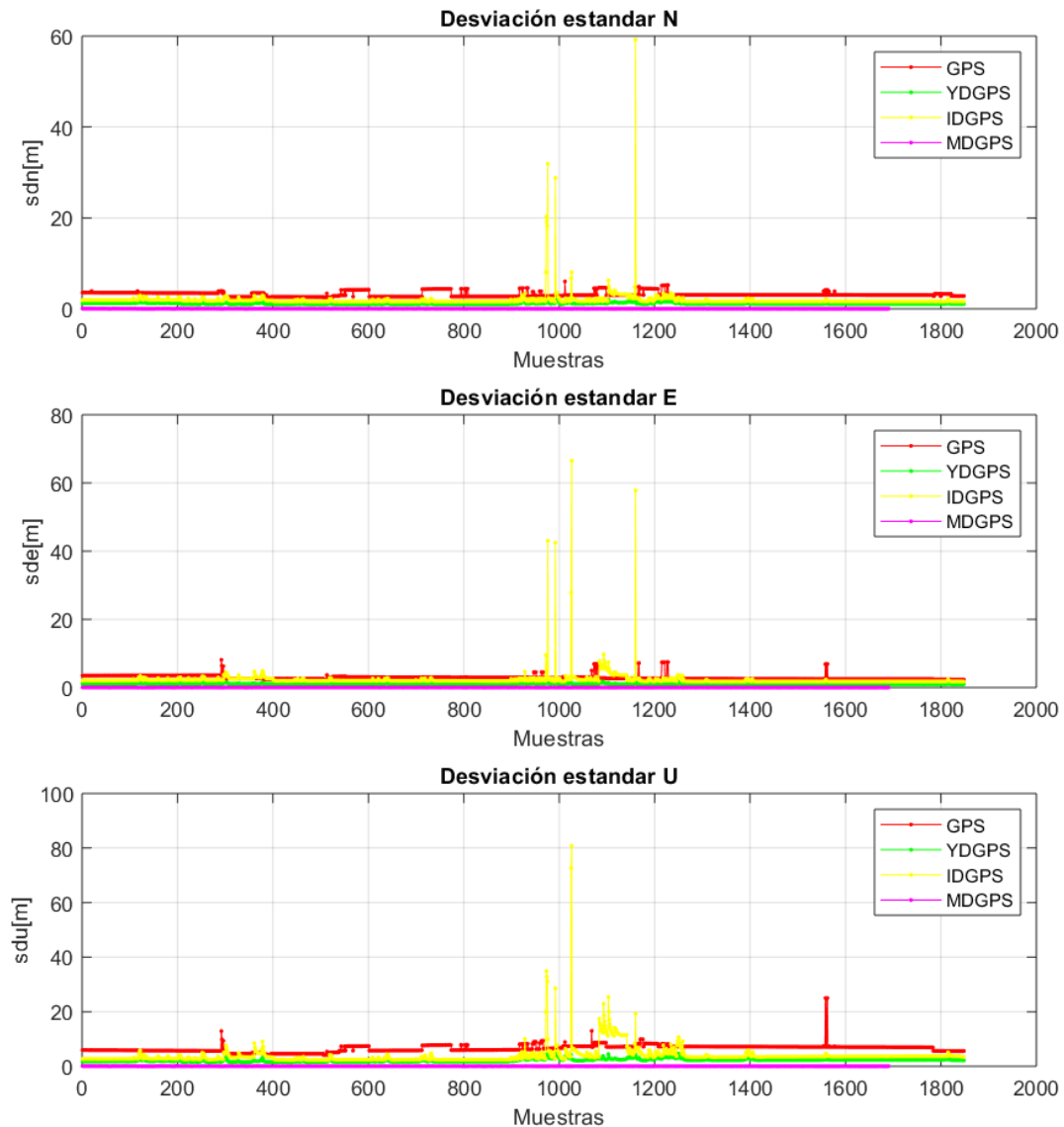


Figura 4.50 - Desviación estándar NEU

En la Figura 4.51, se puede sustentar lo que se comentó, anteriormente sobre la similitud que podrían presentar los resultados de IDGPS con los de YDGPS de no ser por los picos que presenta IDGPS. Esto teniendo en cuenta de que la estación IGNE se encuentra 10 Km más distante del punto de observación que la estación YEBES.

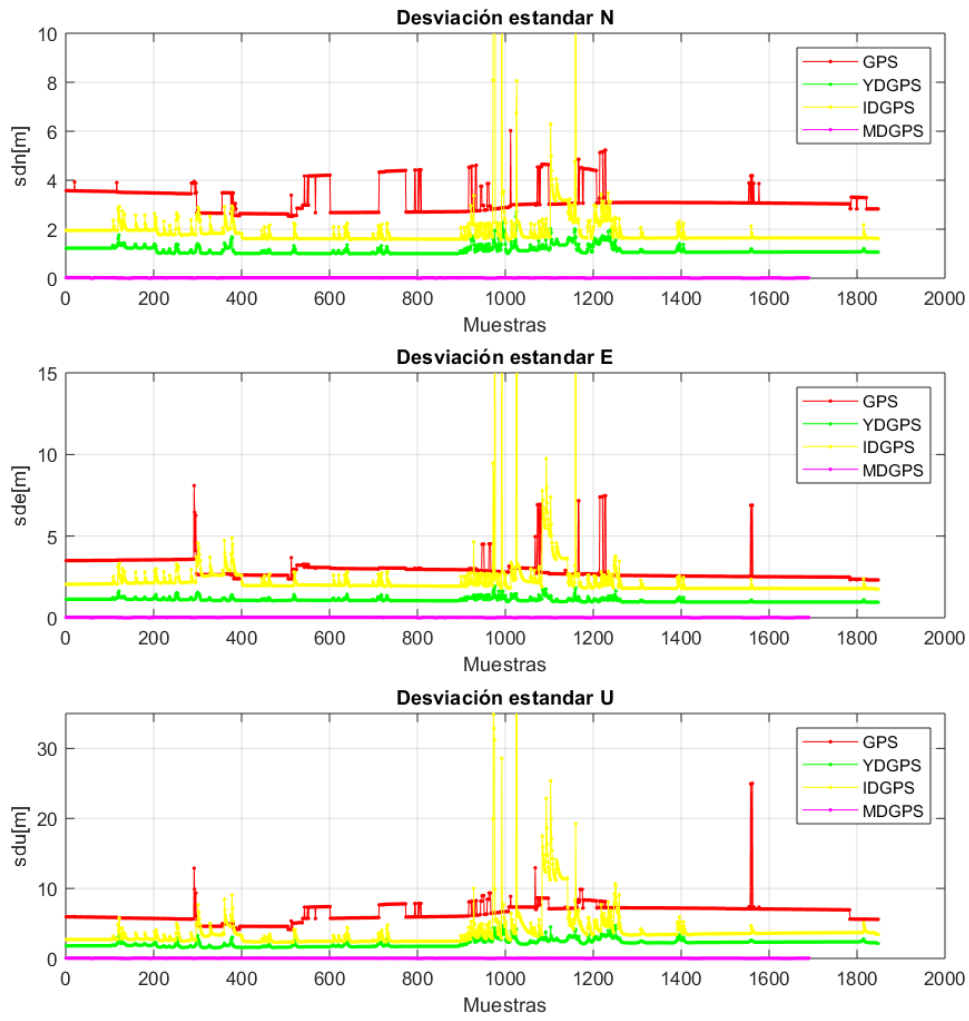


Figura 4.51 - Desviación estándar NEU escalada

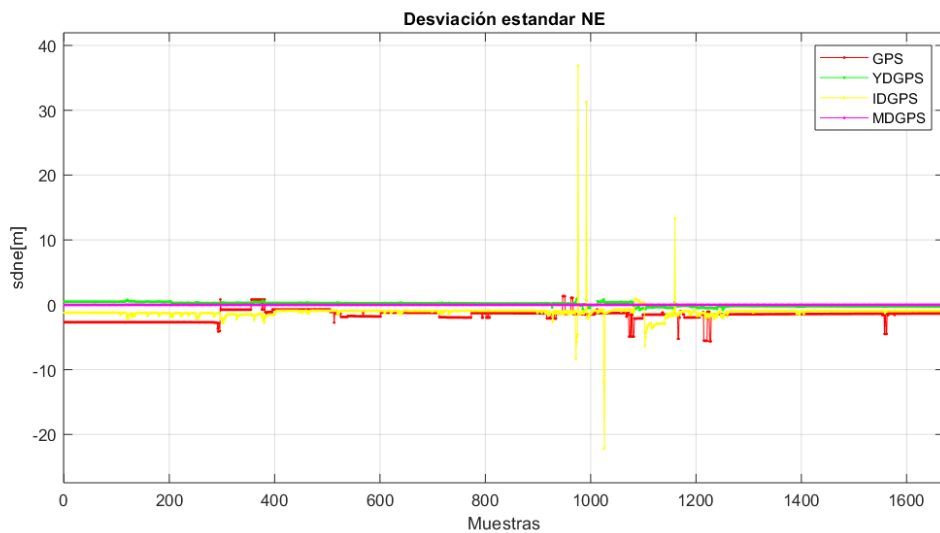


Figura 4.52 - Desviación estándar NE

4.6.2. Escenario 2: Procesamiento Dinámico

Se ha realizado una adquisición en movimiento alrededor de la escuela politécnica superior. Para esto se ha empleado el DGPS en tiempo real, y posteriormente el DGPS en postprocesado, utilizando la estación base de referencia Yebes (Guadalajara). Tanto los ficheros RINEX de navegación como de observación de dicha estación se ha descargado del portal “Descarga de ficheros RINEX” del Instituto Geográfico Nacional [72].

Las muestras estudiadas son:

- GPS_SINGLE: Datos GPS adquiridos, sin técnicas de mejoras ni nada.
- DGPS MAC3 o MDGPS : Datos obtenidos al implementar DGPS en tiempo real.
- DGPS_YEBE o YDGPS: Datos obtenidos al implementar DGPS en postprocesado utilizando la estación de referencia GNSS de Yebes.

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en las siguientes figuras:

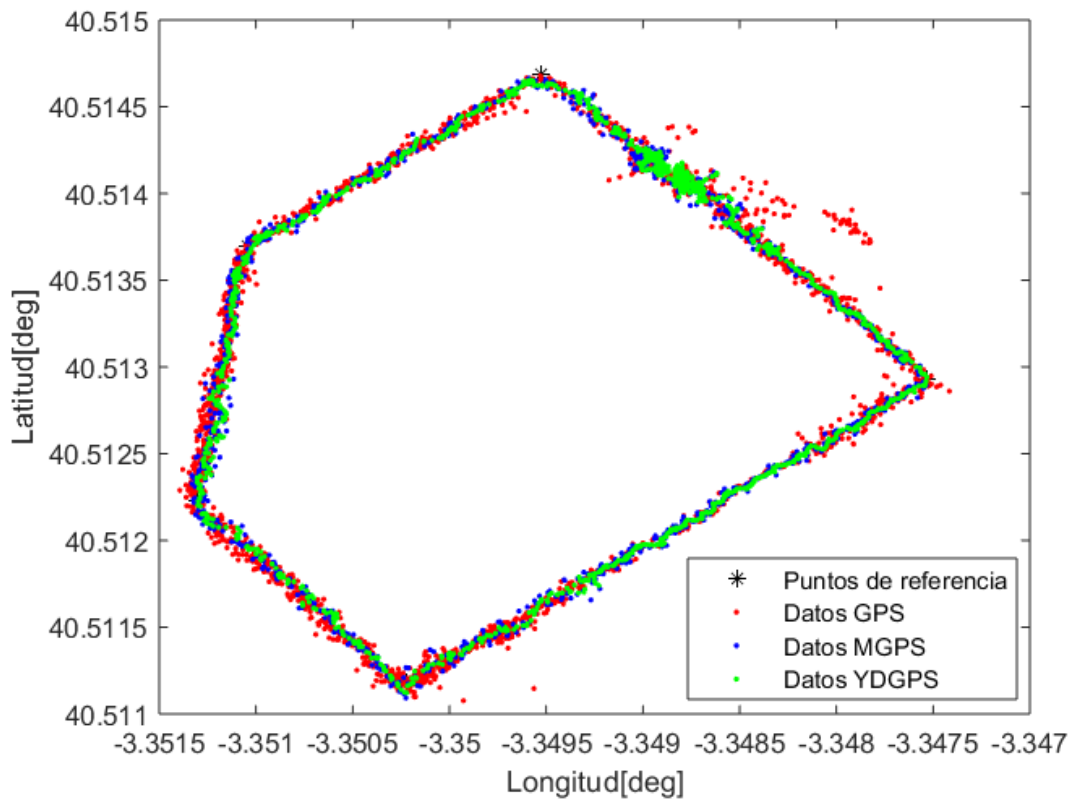


Figura 4.53 - Resultados procesamiento dinámico

En la Figura 4.53, se puede apreciar como en este escenario las correcciones en postprocesado ofrecen una mejora en sus resultados frente a las correcciones en tiempo real, a diferencia del escenario anterior. Esto se puede deducir al notar como las trazas de YDGPS son las que presentan mayor concentración de puntos alrededor de las de referencia, tal como lo muestra la Figura 4.54.

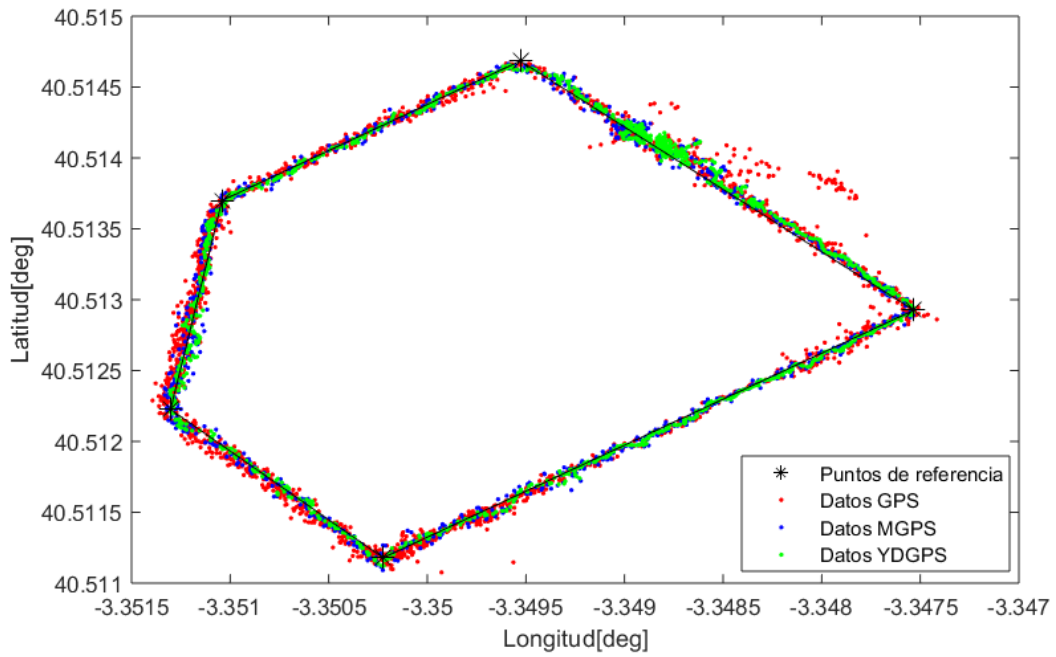


Figura 4.54 - Resultados procesamiento dinámico referenciados

En la Figura 4.55, podemos observar la traza de los resultados obtenidos alrededor de la EPS utilizando Matlab.



Figura 4.55 - Resultados obtenidos referenciados sobre la EPS

4.6.3. Visualización de los resultados obtenidos

Uno de los atractivos de este proyecto, es el poder visualizar los resultados obtenidos en un mapa. Se tiene la funcionalidad de poder convertir los datos a un fichero .gpx el cual puede ser exportado tanto en Google Maps como en Google Earth. O en un fichero HTML el cual contiene las trazas adquiridas pintadas en Google Maps. Un ejemplo esto se refleja en la Figura 4.56 , en la cual se pintan en Google Maps, las trazas de los resultados del escenario 2.



Figura 4.56 - Resultados escenario 2 en Google Maps

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos al realizar una adquisición y luego implementar DGPS en postprocesado, en un coche en movimiento alrededor del campus externo. Estos resultados fueron almacenados en un fichero .gpx para después ser representados en Google Maps al crear un mapa personalizado [76].

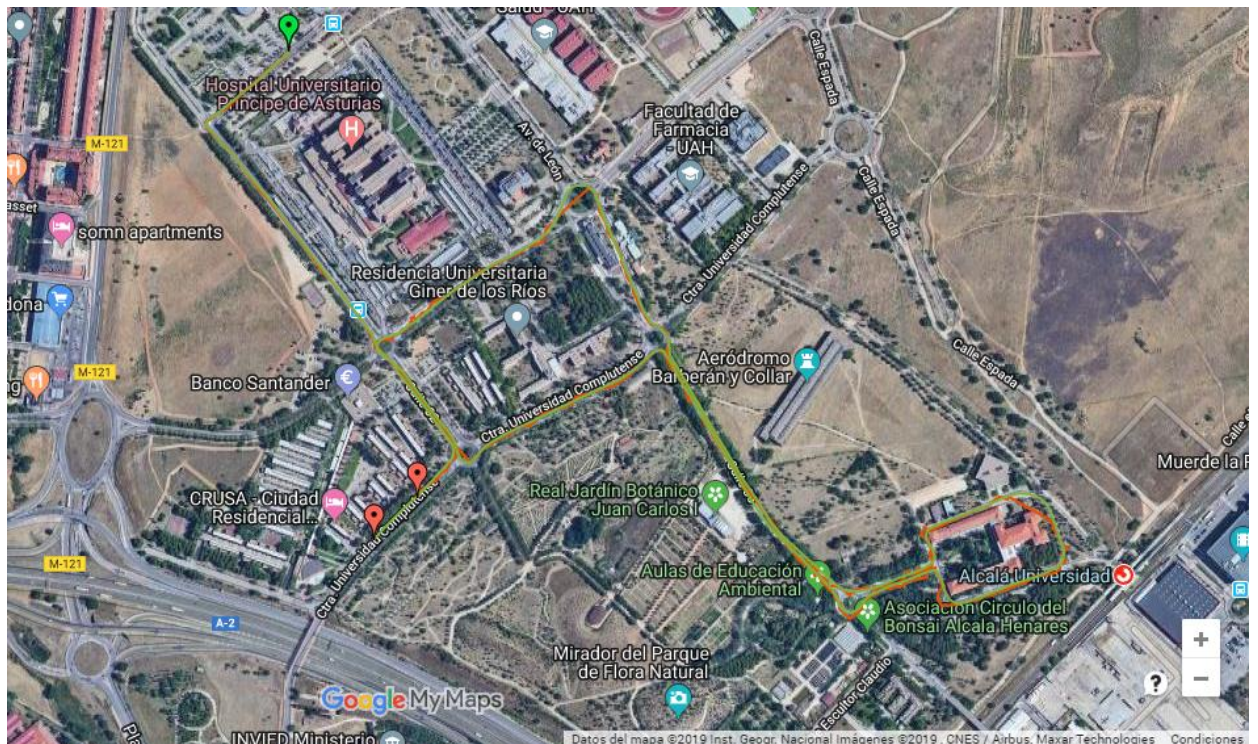


Figura 4.57 - Resultados obtenidos GPS(azul) vs DGPS(verde) en movimiento

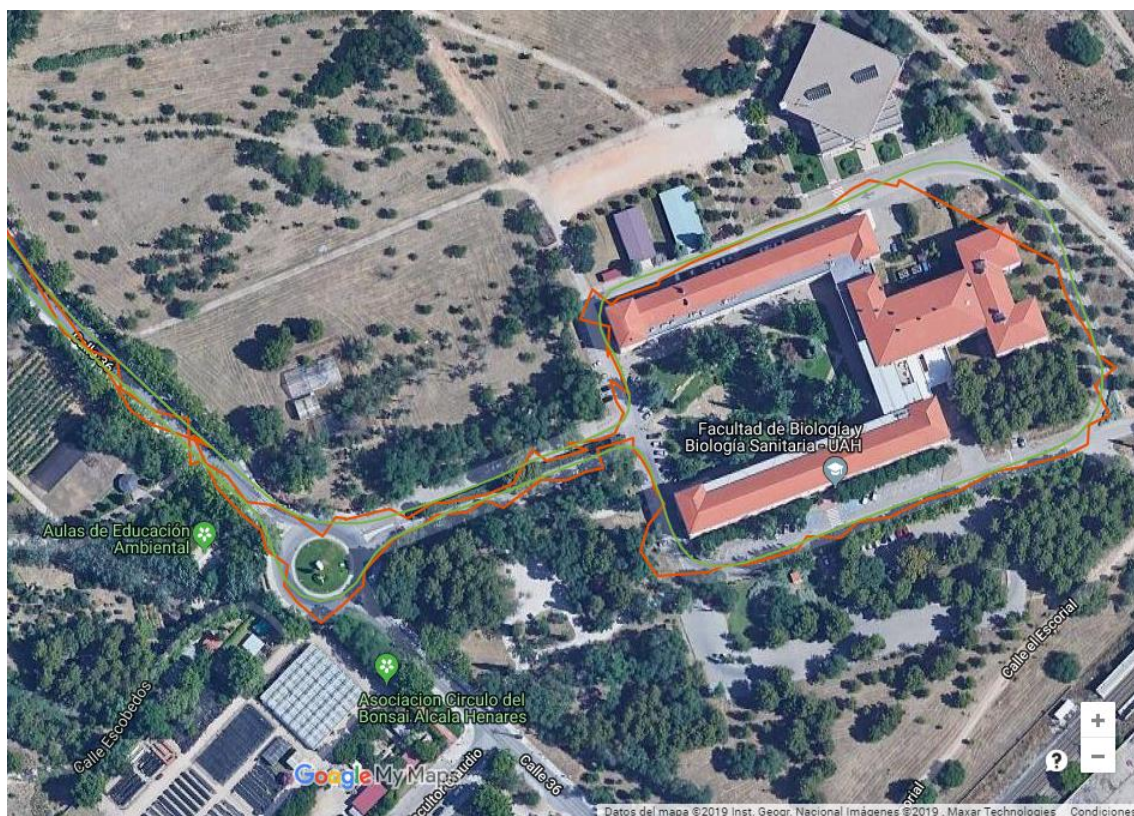


Figura 4.58 - Resultados obtenidos GPS(azul) vs DGPS(verde) en movimiento, aumentado

5. Conclusiones y líneas futuras

El objetivo principal de este TFM era desarrollar e implementar un sistema de bajo coste para la adquisición y representación de datos GPS aumentados. Para lograr estos objetivos se implementaron técnicas de aumentación GPS en sus vertientes de DGPS o GPS diferencial en postprocesado y en tiempo real para así mejorar los resultados obtenidos al realizar una adquisición con un GPS de bajo costo. Se implementó el DGPS en postprocesado utilizando diferentes estaciones base de referencias, además de técnicas de DGPS en tiempo real como el MAC3. A parte de mejorar la precisión, también se buscaba una adquisición, adecuación, representación y exportación de los datos, de manera más automática y simple. Esto fue posible utilizando librerías y software libres como Python, Ublox center y RTKlib.

En el apartado 4.6, se puede valorar como el sistema desarrollado ha mejorado los datos adquiridos por un módulo de GPS de bajo costo, en varios escenarios, al implementar las diferentes técnicas DGPS. Obteniendo mejoras de hasta 6 metros con relación a la posición original. También se puede apreciar el cómo influyen la distancia entre los puntos a medir o adquirir con relación a la estación base de referencia a utilizar, como fue el caso de las estaciones Yebes e IGNE. Donde al utilizar la estación de Yebes se obtuvieron resultados por debajo de los 2 metros, cosa que al utilizar la estación IGNE, solo el 3.14% de sus muestras presentaban esos resultados.

Aparte de, se pudo evaluar como el procesado en tiempo real obtiene buenos frente al postprocesado en el escenario estático. No obstante, en el escenario dinámico, el postprocesado ganó la batalla. Al tratarse de un sistema de bajo costo o “low-cost” el procesado en tiempo

real es una desventaja ya que necesita conexión internet lo cual conlleva costos adicionales al sistema.

Líneas futuras

Por cuestiones de tiempo, no se pudo explotar todo el potencial de las herramientas de software libre RTKlib, Ublox center y un sin número de librerías en Python. Estas permiten un sin número de configuraciones avanzadas para analizar y mejorar la representación de los datos adquiridos, tal como es el caso de la implementación del filtro de Kalman en sus diferentes tipos.

Otro caso muy interesante consistiría en poder implementar el SBAS en conjunto con el DGPS utilizado. Esto nos ofrecería grandes resultados al momento de realizar el postprocesado ya que aumenta la fiabilidad de los datos adquiridos, además, de que con SBAS existe la posibilidad de obtener resultados similares a al DGPS en tiempo real, pero sin la necesidad de conexión a internet ya que las correcciones son enviadas por los satélites de EGNOS, los cuales equivalen al SBAS europeo. Aparte de SBAS, también se podría implementar el sistema Galileo ya que estos receptores de bajo costo poseen esta opción disponible pero no del todo.

El Futuro de los sistemas receptores GNSS de bajo costo

IoT, GPS-ITS (GPS Indoor Testing Solution), UAV y muchos otros mercados relacionados con datos de ubicación están impulsando a los fabricantes de receptores a producir sistemas de receptores de bajo costo, alta precisión y mejor rendimiento, incluso en entornos difíciles [77].

Los fabricantes también están avanzando hacia sistemas de receptores de bajo costo, alta precisión y mejor rendimiento para satisfacer la demanda del negocio de la localización.

Debido a esto los fabricantes están optando por sistemas doble frecuencia de bajo costo implementando la banda L5, la cual presenta los siguientes beneficios:

- Todos los GNSS tienen al menos una señal en la banda L1 o L5.
- Las señales L5 son más fuertes que las señales L1 en unos pocos dB
- Las señales L5 funcionan mejor que las señales L1 en entornos difíciles como áreas urbanas, bosques o semiinteriores.
- El espectro de frecuencia L5 está reservado y protegido para el Servicio de radionavegación por satélite RNSS.

Todo esto puede llevar a los diseñadores de receptores a centrarse en el receptor de doble frecuencia L1 / L5 en lugar del receptor L1 / L2.

La empresa u-Blox ya ha lanzado el Multi-Band GNSS Receiver ZED-F9P. Este receptor GNSS multibanda ofrece una precisión de nivel de centímetros en segundos y solo tiene un costo de 176 euros [78].

Teléfonos inteligentes GNSS para una posición de alta precisión

Los teléfonos inteligentes con Android OS Nougat (7.0), pueden ofrecer datos GNSS sin procesar de mayor rendimiento. Cosa que antes no era posible. Con estos datos ya es posible aplicar correcciones en tiempo real o en postprocesado. El único inconveniente es la antena, pero se podría obtener una precisión de un metro [77].

Actualmente existen pocos teléfonos que soporten la banda L5, dentro de los cuales se encuentran los Xiaomi Mi 8 / Mi 9 y los Huawei Mate 20 / 20 X / 20 RS / 20 Pro.

6. Pliego de condiciones

Las condiciones para el desarrollo de este proyecto se concentran en los dispositivos y las herramientas, tanto hardware como software, necesarios para la realización de este.

- Raspberry Pi: Con sistema operativo Raspbian Stretch Lite, batería portátil, memoria microSD de 32 Gb y un adaptador WIFI USB.
- Modulo GPS MakerHawk GPS 51
- Antena GPS
- Librerías Python
- Google Maps
- Microsoft Office 2016
- Acceso a la base de datos de la Red Geodésica Nacional de Referencia de Estaciones Permanentes GNSS (ERGNSS)
- RTKLIB VER. 2.4.2
- Ordenador personal: Inter Core i5 o superior, velocidad 2.50GHz y memoria RAM de 8 Gb o superior
- Smartphone o Tablet: con sistema operativo Android 7 o superior.
- MobaXterm
- JuiceSSH
- U-Center
- Matlab R2018b

7. Presupuesto

Para valuar el coste del desarrollo de este proyecto se valoran económicamente los materiales, tanto software como hardware, utilizados y los honorarios de los trabajadores. Inicialmente vamos a calcular el PEM o Presupuesto de ejecución por material, el cual se basa en los elementos horadare y software empleados. Pero antes de todo, se tienen que mencionar los elementos software de código abierto, licencia de libre uso o de acceso gratuito. Estos son

- Sistema operativo Raspbian Stretch Lite
- Librerías Python
- Google Maps
- El acceso a la base de datos de la Red Geodésica Nacional de Referencia de Estaciones Permanentes GNSS (ERGNSS)
- RTKLIB VER. 2.4.2
- MobaXterm
- JuiceSSH
- U-Center

Presupuesto de ejecución por material (PEM)				
Concepto		Cantidad	Precio unitario	Coste total
Material Hardware	Ordenador	1	600.00 €	600.00 €
	Smartphone o Tablet Android	1	200.00 €	600.00 €
	Material de oficina	1	100.00 €	100.00 €
	Raspberry Pi 1 B	1	25.00 €	25.00 €
	Tarjeta SD Samsung Evo Plus 64GB	1	16.00 €	16.00 €
	Adaptador wifi USB inalámbrico Nano TP-Link TL-WN725N	1	7.50 €	7.50 €
	Batería Portátil POSUGEAR Powerbank 10000mAh	1	20.00 €	20.00 €
	MakerHawk Módulo GPS 51	1	13.00 €	13.00 €
	Antena GPS 2J431 MP	1	10.00 €	10.00 €
Software	Microsoft Windows 10 Pro-64	1	259.00 €	259.00 €
	Microsoft Office 2016	1	149.00 €	149.00 €
	Matlab R2018b	1	119.00 €	119.00 €
Total				1,918.50 €

Tabla 7.1 - Presupuesto de ejecución por material (PEM)

Para el desarrollo del proyecto, se ha contratado a un ingeniero de telecomunicación durante un periodo de 6 meses a jornada parcial, 4 horas. Según recoge el boletín oficial del estado del día 18 de enero de 2017, la base mínima para un ingeniero es de 1,466.40 euros.

Honorarios				
Concepto	Nº de personal	Tiempo (mes)	Precio unitario	Coste total
Ingeniería	1	6	626.58 €	4,399.20 €
Total				4,399.20 €

Tabla 7.2 - Honorarios del trabajador

En la siguiente table vamos a calcular el PEC o presupuesto de ejecución contrata, importe que añade al valor de materiales y mano de obra el parte proporcional de sus gastos generales y del beneficio económico o beneficio industrial a obtener. Los porcentajes aplicados para cada uno de estos conceptos, al no estar fijados por ninguna normativa, se pueden determinar a partir de los valores habituales empleados en la contratación de obras oficiales, que son el 13% en concepto de gastos generales, y el 6% en concepto de beneficio industrial.

Presupuesto de ejecución de contrata (PEC)		
Concepto	% sobre PEM	Coste total
PEM		1,918.50 €
Gastos generales	13	249.41 €
Beneficio industrial	6	115.11 €
Total		2,283.02 €

Tabla 7.3 - Presupuesto de ejecución de contrata (PEC)

El presupuesto total para el desarrollo del proyecto es la sumatoria del Presupuesto de ejecución de contrata (PEC), los honorarios del ingeniero contratado y el material fungible.

Presupuesto		
Concepto		Coste total
Presupuesto de ejecución de contrata (PEC)		2,283.02 €
Honorarios		4,399.20 €
Material fungible	Impresión	90.00 €
	Encuadernación	30.00 €
Subtotal		6,802.22 €
IVA(21%)		1,428.47 €
Total		8,230.68 €

El presupuesto total del proyecto a desarrollar, de carácter interino, asciende a **OCHO MIL DOSCIENTOS TRENTA EUROS CON SESENTA Y OCHO CENTIMOS.**

8. Referencias

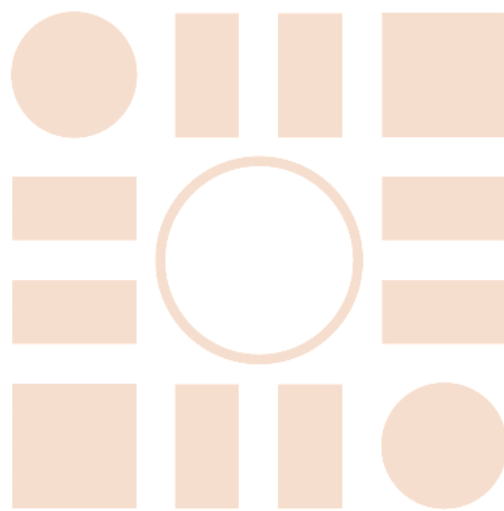
- [1]. ¿QUÉ ES EL GPS?. <https://www.gps.gov/systems/gps/spanish.php>
- [2]. NMEA DATA. <https://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>
- [3]. INFORMACIÓN SOBRE LA RED DE ESTACIONES GNSS. <http://www.ign.es/web/ign/portal/mas-informacion-gnss>
- [4]. D. A. GARCÍA ÁLVAREZ, "SISTEMA GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)," ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR, UAM, MADRID, PROYECTO DE FIN DE CARRERA, 2008.
- [5]. ESTRUCTURA DE LAS SEÑALES GPS.
[HTTPS://HACIAESPACIO.AEM.GOB.MX/REVISTADIGITAL/ARTICUL.PHP?INTERIOR=350](https://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=350).
- [6]. UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.
[HTTP://CYBERTESIS.UACH.CL/TESIS/UACH/2008/BMFICIA473I/DOC/CAPITULOS/CAPITULO_II.PDF](http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmficia473i/doc/capitulos/capitulo_ii.pdf)
- [7]. M. V. PÉREZ DE VARGAS. LA SEÑAL GNSS.
- [8]. LOW-COST IMPLEMENTATION OF DIFFERENTIAL GPS USING ARDUINO
- [9]. PERMASENSE GPS POSTPROCESSING, ETH ZURICH
- [10]. GNSS DIFERENCIAL. GPS DIFERENCIAL. CORRECCIONES GNSS (GPS) EN TIEMPO REAL. (15)
- [11]. GPS SIGNALS AND BASIC OBSERVABLE REFERENCE SYSTEMS AND GPS TIME SYSTEM, THE OHIO STATE UNIVERSITY
- [12]. [HTTPS://HACIAESPACIO.AEM.GOB.MX/REVISTADIGITAL/ARTICUL.PHP?INTERIOR=350](https://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=350)
- [13]. RINEX. FROM [HTTPS://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/RINEX](https://es.wikipedia.org/wiki/RINEX)
- [14]. OBSERVABLES. [HTTP://FILES.ESPECIALIZACION-TIG.WEBNODE.COM/200000064-A966FAA5E7/TEMA7-OBSERVABLES.PDF](http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000064-A966FAA5E7/TEMA7-OBSERVABLES.PDF)
- [15]. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA GPS (SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL) LEICA, <http://dicyg.fi-c.unam.mx/~inggeomatica/documentos/Apuntes/GPS/GPS%20basico.pdf>
- [16]. NAVIPEDIA. GNSS AUGMENTATION. RECUPERADO DE [HTTPS://GSSC.ESA.INT/NAVIPEDIA/INDEX.PHP/GNSS_AUGMENTATION](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_AUGMENTATION). 2018 (VID. PÁG. 22).
- [17]. [HTTPS://RIUNET.UPV.ES/BITSTREAM/HANDLE/10251/110552/S%C3%A1nchez%20-%20AN%C3%81LISIS%20PARA%20LA%20IMPLEMENTACI%C3%93N%20DEL%20SISTEMA%20EGNOS%20EN%20AERONAVES%20NO%20TRIPULADAS%20PARA%20APLIC....PDF?SEQUENCE=3&ISALLOWED=Y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/110552/S%C3%A1nchez%20-%20AN%C3%81LISIS%20PARA%20LA%20IMPLEMENTACI%C3%93N%20DEL%20SISTEMA%20EGNOS%20EN%20AERONAVES%20NO%20TRIPULADAS%20PARA%20APLIC....PDF?SEQUENCE=3&ISALLOWED=Y)
- [18]. HACIA EL ESPACIO.
[HTTPS://HACIAESPACIO.AEM.GOB.MX/REVISTADIGITAL/ARTICUL.PHP?INTERIOR=422](https://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=422)
- [19]. WHAT IS SBAS?. [HTTPS://WWW.GSA.EUROPA.EU/EUROPEAN-GNSS/WHAT-GNSS/WHAT-SBAS](https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas)
- [20]. GNSS. [HTTPS://WWW.CASA.GOV.AU/BOOK-PAGE/CHAPTER-3-GLOBAL-NAVIGATION-SATELLITE-SYSTEMS-GNSS](https://www.casa.gov.au/book-page/chapter-3-global-navigation-satellite-systems-gnss)
- [21]. ABOUT EGNOS. [HTTPS://EGNOS-USER-SUPPORT.ESSP-SAS.EU/NEW_EGNOS_OPS/EGNOS-SYSTEM/ABOUT-EGNOS](https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/egnos-system/about-egnos)
- [22]. ESTACIONES BASE GPS MADRID. [HTTP://WWW.COMUNIDAD.MADRID/SERVICIOS/URBANISMO-MEDIO-AMBIENTE/ESTACIONES-BASE-GPS](http://www.comunidad.madrid/servicios/urbanismo-medio-ambiente/estaciones-base-gps)
- [23]. ESTACIONES PERMANENTES GNSS. [HTTP://WWW.IGN.ES/WEB/IGN/PORTAL/GDS-GNSS-ESTACIONES-PERMANENTES](http://www.ign.es/web/ign/portal/gds-gnss-estaciones-permanentes)
- [24]. GNSS EN TIEMPO REAL. [HTTP://WWW.IGN.ES/WEB/IGN/PORTAL/GDS-GNSS-TIEMPO-REAL](http://www.ign.es/web/ign/portal/gds-gnss-tiempo-real)
- [25]. [HTTPS://RIUNET.UPV.ES/BITSTREAM/HANDLE/10251/110552/S%C3%A1nchez%20-%20AN%C3%81LISIS%20PARA%20LA%20IMPLEMENTACI%C3%93N%20DEL%20SISTEMA%20EGNOS%20EN%20AERONAVES%20NO%20TRIPULADAS%20PARA%20APLIC....PDF?SEQUENCE=3&ISALLOWED=Y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/110552/S%C3%A1nchez%20-%20AN%C3%81LISIS%20PARA%20LA%20IMPLEMENTACI%C3%93N%20DEL%20SISTEMA%20EGNOS%20EN%20AERONAVES%20NO%20TRIPULADAS%20PARA%20APLIC....PDF?SEQUENCE=3&ISALLOWED=Y)

- [26]. SISTEMA DGPS. [HTTP://WWW.PUERTOS.ES/ES-ES/CONCEPTOSGENERALES/PAGINAS/SISTEMA-GPSDGPS.ASPX](http://www.puertoes.es/es-es/conceptosgenerales/paginas/sistema-gpsdgps.aspx)
- [27]. [HTTPS://WWW.E-EDUCATION.PSU.EDU/GEOG160/NODE/1925](https://www.e-education.psu.edu/geog160/node/1925)
- [28]. FIGURE 5.9: A GPS BASE STATION IS FIXED OVER A CONTROL POINT, WHILE ABOUT 25 KM AWAY, A MOBILE GPS RECEIVER IS USED TO MEASURE A SERIES OF POSITIONS. ERROR CORRECTION CALCULATED AT THE BASE STATION IS APPLIED TO THE POSITION CALCULATED BY THE MOBILE RECEIVER. CREDIT: DEPARTMENT OF GEOGRAPHY, THE PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY. ADAPTED FROM DAVID DIBIASE'S ORIGINAL TEXT (1997)
- [29]. B HOFMANN, H LICHTENEGGER, AND J COLLINS. GPS THEORY AND PRACTICE. SPRINGER VERLAG. WIEN, NEW YORK, 2001.
- [30]. EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). EGNOS, FEBRUARY 2012, [HTTP://WWW.NAVIPEDIA.NET/INDEX.PHP/EGNOS PERFORMANCES](http://www.navipedia.net/index.php/EGNOS_PERFORMANCES).
- [31]. RAPANT, P. (2002). DRUŽICOVÉ POLOHOVÉ SYSTÉMY. RETRIEVED JANUARY 21, 2016, FROM [HTTP://GIS.VSB.CZ/VOJTEK/CONTENT/GNPS/FILES/_SOURCE/RAPO2.PDF](http://gis.vsb.cz/vojtek/content/gnps/files/_source/RAPO2.pdf)
- [32]. FORSELL, B. (2008). RADIONAVIGATION SYSTEMS. NORWOOD MA: ARTECH HOUSE.
- [33]. DUNN, M. J. (2013, SEPTEMBER 24). GPS SPACE SEGMENT/NAVIGATION USER INTERFACES. RETRIEVED MARCH 24, 2016, FROM [HTTP://WWW.GPS.GOV/TECHNICAL/ICWG/IS-GPS-200H.PDF](http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200H.pdf)
- [34]. SUBIRANA, J. S. (N.D.). KLOBUCHAR IONOSPHERIC MODEL. RETRIEVED FEBRUARY 29, 2016, FROM [WWW.NAVIPEDIA.NET](http://www.navipedia.net): [HTTP://WWW.NAVIPEDIA.NET/INDEX.PHP/KLOBUCHAR_IONOSPHERIC_MODEL](http://www.navipedia.net/index.php/Klobuchar_Ionospheric_Model) THE DEPARTMENT OF ENERGY, M. A. (1995). GPS POSITIONING GUIDE. OTAWA: NATURAL RESOURCES CANADA. RETRIEVED FEBRUARY 6, 2016, FROM [HTTP://WWW.UTDALLAS.EDU/~AIKEN/GPSCCLASS/GPS_GUIDE_E.PDF](http://www.utdallas.edu/~aikengpsclass/gpsclass/gps_guide_e.pdf)
- [35]. SUBIRANA, J. S. (2011). GPS NAVIGATION MESSAGE. RETRIEVED MAY 23, 2016, FROM NAVIPEDIA: [HTTP://WWW.NAVIPEDIA.NET/INDEX.PHP/GPS_NAVIGATION_MESSAGE](http://www.navipedia.net/index.php/GPS_NAVIGATION_MESSAGE)
- [36]. HOFMANN-WELLENHOF, B. (2001). GPS - THEORY AND PRACTICE. WIEN: SPRINGER WIEN NEW YORK.
- [37]. HEGARTY, C. J. (2008). EVOLUTION OF THE GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GNSS). IEEE. DOI:10.1109/JPROC.2008.2006090
- [38]. INSTRUMENTS, N. (2016). GPS RECEIVER TESTING. NATIONAL INSTRUMENTS. RETRIEVED MAY 23, 2016, FROM <http://www.ni.com/white-paper/7189/en/>
- [39]. EL-RABBANY, AHMED. (2012). INTRODUCTION TO GPS : THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM / A. EL-RABBANY
- [40]. <http://www.rtcn.org/>
- [41]. UBLOX. (2016, MAYO 22). UBLOX 7 RECEIVER DESCRIPTION AND PROTOCOL SPECIFICATION V14. https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox7-V14_ReceiverDescriptionProtocolSpec_%28GPS.G7-SW-12001%29_Public.pdf
- [42]. GURTNER, W. (2009). THE RECEIVER INDEPENDENT EXCHANGE FORMAT. UNVACO. <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex301.pdf>
- [43]. GARRIDO-VILLÉN, N. (2014). RINEX Y EFEMÉRIDES GPS. <https://es.slideshare.net/nataliagarrido2012/rinex-y-efemrides-gps>
- [44]. <http://www.elgps.com/documentos/barras/barras.htm>
- [45]. EL GPS – SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL. <http://www.blogelectronica.com/el-gps-sistema-de-posicionamiento-global/>
- [46]. KLOBUCHAR IONOSPHERIC MODEL. RETRIEVED JULY, 2019, FROM [WWW.NAVIPEDIA.NET: http://www.navipedia.net/index.php/Klobuchar_Ionospheric_Model](http://www.navipedia.net/index.php/Klobuchar_Ionospheric_Model)

- [47]. ZORNOZA, J. J. (N.D.). TROPOSPHERIC DELAY. RETRIEVED JULY, 2019, FROM WWW.NAVIPEDIA.NET:
http://www.navipedia.net/index.php/Tropospheric_Delay
- [48]. NOVATEL. (2000). DISCUSSIONS ON RF SIGNAL. NOVTEL. RETRIEVED JULY, 2019, FROM
<http://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/apn008.pdf>
- [49]. FAA. (2008). WIDE AREA AUGMENTATION SYSTEM (WAAS) PERFORMANCE STANDARD. RETRIEVED MAY 25, 2016, FROM
<http://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf>
- [50]. RICHARD SNAY (MARCH 17, 2009). NOAA'S NATIONAL GEODETIC SURVEY FROM
https://www.ngs.noaa.gov/CORS/Presentations/GLHM_Forum2009/Overviewgl.pdf
- [51]. MADRON, T. (2009). DIFFERENTIAL GPS. RETRIEVED MARCH 4, 2016, FROM
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14866
- [52]. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE: SISTEMA NAVSTAR GPS, DE
<https://www.unioviedo.es/ate/alberto/Sistema%20GPS.ppt>
- [53]. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL. FROM <https://es.wikipedia.org/wiki/GPS>
- [54]. DIFFERENCE BETWEEN GPS AND DGPS. FROM <https://grindgis.com/blog/difference-between-gps-and-dgps>
- [55]. GPS RECEIVER COMPARISONS. FROM
<http://www.elecddata.com/gps/technote/GPSreceivers.pdf>
- [56]. RTCM 10403.3, DIFFERENTIAL GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS) SERVICES - VERSION 3. OCTOBER 7, 2016. FROM
<http://nebula.wsimg.com/ecbe92a98cdf14530601acdd65ee95f9?AccessKeyId=2D3610E97C8E55B553AE&disposition=0&alloworigin=1>
- [57]. CAPÍTULO 2: RECOMENDACIÓN ITU. FROM
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11930/fichero/04+-+Cap%C3%ADtulo+02+-+Recomendaci%C3%B3n+ITU.pdf>
- [58]. LA SEÑAL GPS. FROM
<http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/it/rd/apuntes/tutorialgps.pdf>
- [59]. RASPBERRY PI. FROM https://es.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi
- [60]. NEO-7, U-BLOX 7 GNSS MODULES. FROM https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-7_DataSheet_%28UBX-13003830%29.pdf
- [61]. U-CENTER: GNSS EVALUATION SOFTWARE FOR WINDOWS, USER GUIDE. FROM https://www.u-blox.com/sites/default/files/u-center_UserGuide_%28UBX-13005250%29.pdf
- [62]. RTKLIB. FROM <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/RTKLIB>
- [63]. RTKLIB: AN OPEN SOURCE PROGRAM PACKAGE FOR GNSS POSITIONING. FROM
<http://www.rtklib.com/>
- [64]. PYTHON. FROM <https://es.wikipedia.org/wiki/Python>
- [65]. BEEBOTTE. FROM <https://support.elsist.biz/es/bienes/Enviar-datos-a-la-plataforma-en-la-nube-de-Beebotte-como-servicio/>
- [66]. MOBAXTERM X SERVER AND SSH CLIENT. FROM <https://mobaxterm.mobatek.net/>
- [67]. MATLAB. FROM <https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [68]. GPS RECEIVER POSITION. FROM
<https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/56730-gps-receiver-position?focused=6227610&tab=function>
- [69]. CÓMO CONFIGURAR EL WI-FI ANTES DE INICIAR LA RASPBERRY PI POR PRIMERA VEZ. FROM
<https://rasberryparatorpes.net/comandos/como-configurar-el-wi-fi-antes-de-iniciar-la-raspberry-pi-por-primera-vez/>
- [70]. RTKLIB VER. 2.4.2 MANUAL. FROM [HTTP://WWW.RTKLIB.COM/PROG/MANUAL_2.4.2.PDF](http://WWW.RTKLIB.COM/PROG/MANUAL_2.4.2.PDF)

- [71]. FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO. FROM <http://bionanouni.wdfiles.com/local--files/teaching-mt227-horario-2010i/Clase13-01.pdf>
- [72]. DESCARGA DE FICHEROS RINEX. INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. <https://www.ign.es/web/ign/portal/gds-gnss-datos-rinex>
- [73]. RTN METHODOLOGIES & BEST PRACTICES NEIL D. WESTON NATIONAL GEODETIC SURVEY, NOS, NOAA SILVER SPRING, MD MARCH 20, 2014. FROM <https://slideplayer.com/slide/4714537/>
- [74]. GPS POSITION ACCURACY MEASURES BY NOVATEL. FROM <https://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/apn029.pdf>
- [75]. LOCAL TANGENT PLANE COORDINATES (LTP). FROM https://en.wikipedia.org/wiki/Local_tangent_plane_coordinates
- [76]. MY MAPS EN GOOGLE MAPS. FROM <https://support.google.com/maps/answer/3045850?co=GENIE.Platform%3DDesktop&hl=es>
- [77]. DINESH MANANDHAR, CSIS, THE UNIVERSITY OF TOKYO (25 MAYO 2018). MGA WEBINAR SERIES : VERY CHEAP RTK RECEIVERS. FROM https://home.csis.u-tokyo.ac.jp/~dinesh/WEBINAR_files/MGA_W01.pdf
- [78]. U-BLOX ZED-F9P HIGH PRECISION GNSS MODULE. FROM <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module>

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá