



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN**

**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS ESPECÍFICAS DE
TELECOMUNICACIÓN. MENCIÓN EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS.**

**GUIADO GNSS DE TRACTORES; ANÁLISIS DE
DIFERENTES OPCIONES EN EL POSICIONAMIENTO.**

SEPTIEMBRE 2023

AUTOR:	ÁNGEL ALONSO GARCÍA
TUTOR:	JAIME GÓMEZ GIL
COTUTOR:	SERGIO ALONSO GARCÍA

TITULO: Guiado GNSS de tractores; análisis de diferentes opciones en el posicionamiento.

AUTOR: Ángel Alonso García

TUTOR: Jaime Gómez Gil, Departamento de Teoría de la Señal, Comunicaciones e Ingeniería Telemática, E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad de Valladolid.

COTUTOR: Sergio Alonso García, Ingeniero de Telecomunicación y Doctor por la Universidad de Valladolid.

DEPARTAMENTO: Departamento de Teoría de la Señal, Comunicaciones e Ingeniería Telemática.

Miembros del Tribunal

PRESIDENTE: Alonso Alonso Alonso.

SECRETARIO: Javier Manuel Aguiar Pérez.

VOCAL: Jaime Gómez Gil.

SUPLENTE: Juan Blas Prieto

FECHA DE LECTURA: 26 de septiembre de 2023

CALIFICACIÓN:

Resumen

En este trabajo se evalúa el rendimiento de sistemas de corrección GNSS gratuitos en el guiado de tractores. Se evaluaron tres tipos de receptores GNSS, un Navilock NL-8022MP, un Novatel Smart2 y un Harxon TS108PRO, tres sistemas de corrección, EGNOS, NRTK y RTK, y una tecnología propia, GLIDE, en pruebas en estático. Los resultados de estas pruebas en estático, sugieren que (i) los receptores GPS de bajo coste de 100 € sin datos de corrección permitirían guiar el tractor con errores típicos a corto plazo entre pasadas de alrededor de 1 metro RMS, precisión que permite un guiado regular en fertilización cuando la referencia es una pasada anterior realizada en la última hora; (ii) EGNOS mejora la precisión de guiado permitiendo alcanzar errores a corto plazo entre pasadas de 0.5 metros RMS, precisión que permitiría un guiado bueno en fertilización, y un guiado regular en aplicación de herbicidas; (iii) GNSS+EGNOS+GLIDE mejora el guiado de precisión hasta alcanzar errores entre pasadas a corto plazo de 10 cm, precisión que permitiría un guiado aceptable en fertilización y pulverización, y un guiado regular en siembra, cosecha y labranza; (iv) NRTK alcanza un guiado de precisión a corto y largo plazo de 2 cm, precisión que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas con una única restricción: al menos una estación de referencia debe estar a menos de 50 km del tractor; y (v) RTK alcanza una precisión de guiado a corto y largo plazo de 1 cm, precisión que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas sin restricciones, pero requiere colocar una costosa estación de referencia cerca del tractor, no estando entonces justificado el uso de RTK si los agricultores disponen de NRTK.

PALABRAS CLAVE: Global Navigation Satellite System (GNSS), Global Positioning System (GPS), Real Time Kinematic (RTK), Network RTK (NRTK), antena, receptor, correcciones, satélites, precisión, agricultura.

Abstract

This paper evaluates the performance of no fee GNSS augmentation systems in tractor guidance. Three GNSS receivers, a Navilock NL-8022MP, a Novatel Smart2 and a Harxon TS108PRO, three augmentation systems, EGNOS, NRTK and RTK, and a proprietary technology, GLIDE, were evaluated in static tests. The results of these static tests suggest that (i) the low-cost 100 €GPS receivers without augmentation data would allow guide tractor guidance with typical short-term pass-to-pass errors of about 1 meter RMS, an accuracy that allows regular guidance in fertilizing when the reference is a previous pass performed in the last hour; (ii) EGNOS improves the guidance accuracy by allowing to reach short-term pass-to-pass errors of 0.5 meters RMS, accuracy that would allow good guidance in fertilizing, and regular guidance in spraying (iii) GNSS+EGNOS+GLIDE improves precision guidance to reach short-term pass-to-pass errors of 10 cm, an accuracy that would allow fair guidance in fertilizing and spraying, and poor guidance in seeding, harvesting and tilling; (iv) NRTK achieves short-term and long-term precision guidance of 2 cm, an accuracy that would allow very accurate guidance in all agricultural tasks with only one restriction: at least one reference station must be closer than 50 km to the tractor; and (v) RTK achieves a short-term and long-term guidance accuracy of 1 cm, an accuracy that would allow very accurate guidance in all agricultural tasks without restrictions, but requires placing an expensive reference station close to the tractor, not being then justified the use of RTK if no fee NRTK is available to farmers.

KEYWORDS: Global Navigation Satellite System (GNSS), Global Positioning System (GPS), Real Time Kinematic (RTK), Network RTK (NRTK), antenna, receiver, augmentation, satellites, accuracy, agriculture.

Agradecimientos

Agradecer a mis padres y hermanos por todo el apoyo durante estos años, por estar siempre a mi lado.

También agradecer al Dr. D. Jaime Gómez Gil por guiarme y enseñarme estos meses de trabajo.

Y de nuevo a Sergio, mi hermano, por la cesión de los materiales necesarios para realizar las pruebas y por la ayuda.

Muchas gracias a todos.

Índice abreviado

Capítulo 1: Introducción.....	15
1.1 Ámbito del proyecto.....	15
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Fases y métodos.....	15
1.4 Organización de la memoria.....	16
Capítulo 2: Análisis de las tecnologías empleadas.....	18
2.1 Sistema GNSS.....	18
2.2 Correcciones GNSS.....	26
2.3 Antenas utilizadas.....	31
2.4 Conclusiones del capítulo.....	33
Capítulo 3: Análisis estático de antenas GNSS; estudio científico del estado del arte.....	36
3.1 Análisis cronológico.....	36
3.2 Análisis detallado.....	42
3.3 Conclusiones del capítulo.....	61
Capítulo 4: Evaluación del rendimiento en estático de sistemas gratuitos de corrección GNSS para el guiado de tractores.....	63
4.1 Introducción.....	64
4.2 Materiales.....	66
4.3 Métodos.....	67
4.4 Resultados.....	69
4.5 Discusión.....	75
4.6 Conclusiones.....	76
Capítulo 5: Conclusiones.....	79
Capítulo 6: Líneas futuras.....	82
Referencias.....	83

Índice general

Capítulo 1: Introducción.....	15
1.1 Ámbito del proyecto	15
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Fases y métodos.....	15
1.4 Organización de la memoria.....	16
Capítulo 2: Análisis de las tecnologías empleadas.....	18
2.1 Sistema GNSS	18
2.1.1 GPS.....	19
2.1.1.1 Segmento espacial.....	19
2.1.1.2 Segmento de control terrestre.....	20
2.1.1.3 Segmento de Usuario.....	20
2.1.1.4 Señal.....	20
2.1.1.5 Cálculo de la posición del receptor.....	21
2.1.2 GLONASS.....	22
2.1.2.1 Segmento espacial	23
2.1.2.2 Segmento de control	23
2.1.2.3 Segmento de usuario.....	23
2.1.3 Galileo	23
2.1.3.1 Segmento espacial	23
2.1.3.2 Segmento terrestre	23
2.1.3.3 Segmento de usuario.....	24
2.1.4 Otros sistemas.....	24
2.1.4.1 Beidou.....	24
2.1.4.2 QZSS	24
2.1.5 Errores GNSS	24
2.1.5.1 Reloj	24
2.1.5.2 Error de efemérides	25
2.1.5.3 Distribución de los satélites.....	25
2.1.5.4 Interferencias atmosféricas	26
2.1.5.5 Trayectos múltiples.....	26
2.1.5.6 Errores en el receptor.....	26
2.2 Correcciones GNSS.....	26
2.2.1 SBAS	27
2.2.1.1 WAAS	27
2.2.1.2 EGNOS.....	28
2.2.1.3 MSAS	29
2.2.1.4 GAGAN.....	29

ÍNDICE GENERAL

2.2.1.5 SDCM.....	29
2.2.1.6 BDSBAS.....	29
2.2.2 DGNSS.....	29
2.2.3 RTK.....	30
2.2.4 Otras tecnologías: GLIDE.....	31
2.3 Antenas utilizadas.....	31
2.3.1 Navilock NL-8022MP.....	31
2.3.2 Novatel Smart2.....	32
2.3.3 Harxon TS108PRO.....	32
2.3.4 Harxon TS103 base.....	33
2.4 Conclusiones del capítulo.....	33
Capítulo 3: Análisis estático de antenas GNSS; estudio científico del estado del arte.....	36
3.1 Análisis cronológico.....	36
3.2 Análisis detallado.....	42
3.2.1 Kabir y colaboradores. 2016. Performance comparison of single and multi-GNSS receivers under agricultural fields in Korea (27).....	42
3.2.1.1 Materiales y métodos.....	42
3.2.1.2 Resultados y discusión.....	44
3.2.1.3 Conclusiones.....	45
3.2.2 Msaewe y colaboradores. 2017. Investigating multi-GNSS performance in the UK and China based on a zero-baseline measurement approach (28).....	45
3.2.2.1 Análisis preliminar.....	45
3.2.2.2 Análisis.....	47
3.2.2.3 Correlación de ruido y constelación de satélites.....	49
3.2.2.4 Análisis espectral.....	50
3.2.2.5 Conclusiones.....	50
3.2.3 Guo y colaboradores. 2018. Multi-GNSS precise point positioning for precision agricultura (29).....	51
3.2.3.1 Materiales y métodos.....	51
3.2.3.2 Resultados y discusión.....	51
3.2.3.3 Conclusiones.....	55
3.2.4 Nguyen y colaboradores. 2021. Performance evaluation of a typical low-cost multi-frequency multi-GNSS device for positioning and navigation in agriculture –Part 1: Static testing (34).....	55
3.2.4.1 Materiales y métodos.....	55
3.2.4.2 Resultados y discusión.....	57
3.2.4.3 Conclusiones.....	60
3.3 Conclusiones del capítulo.....	61
Capítulo 4: Evaluación del rendimiento en estático de sistemas gratuitos de corrección GNSS para el guiado de tractores.....	63
4.1 Introducción.....	64
4.2 Materiales.....	66
4.3 Métodos.....	67
4.4 Resultados.....	69
4.5 Discusión.....	75
4.6 Conclusiones.....	76
Capítulo 5: Conclusiones.....	79
Capítulo 6: Líneas futuras.....	82
Referencias.....	83

Índice de figuras

Figura 2.1. Principio de funcionamiento de los satélites basados en efecto Doppler (3).....	18
Figura 2.2. Estructura de la señal del Sistema GPS (3).....	21
Figura 2.3. Recepción de la señal en el receptor para calcular el tiempo de retraso en la señal (3).....	22
Figura 2.4. Área de cobertura de los satélites de QZSS para la constelación de cuatro y la de siete satélites (11).....	24
Figura 2.5 Efecto DOP en el posicionamiento (3).....	25
Figura 2.6. Localización de las estaciones de EGNOS (15).....	28
Figura 2.7. Proceso de corrección de errores en DGNSS (13).....	30
Figura 2.8. Antena Navilock NL-8022MP (18).	32
Figura 2.9. Antena Novatel Smart2 (19).	32
Figura 2.10. Antena Harxon TS108PRO (20).....	33
Figura 2.11. Antena base TS103 (21).....	33
Figura 3.1. Disposición de las antenas durante la prueba (22).	36
Figura 3.2. Diagrama de dispersión de los datos tomados durante las pruebas de 2005, a la izquierda y en 2011, a la derecha (24).....	37
Figura 3.3. Colocación de las antenas sobre puntos geodésicos para realizar las medidas de las desviaciones verticales (25).	38
Figura 3.4. Desviación estándar de los tres receptores en las pruebas estáticas (26).	38
Figura 3.5. Zonas de pruebas. Campo abierto, huerta con árboles y carretera cerca de una montaña, respectivamente (27).....	39
Figura 3.6. Antena rover a la izquierda y antena base a la derecha (30).	40
Figura 3.7. Localización de los puntos de medida de datos (puntos rojos), bases de referencia RTK (puntos negros) y base única RTK (punto con círculo) (32).	41
Figura 3.8. Punto de medición en un olivar (33).	41
Figura 3.9. Lugar y disposición de las antenas en las pruebas en estático (34).....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.10. Zonas de pruebas. Campo abierto, huerta con árboles y carretera cerca de una montaña, respectivamente.	43
Figura 3.11. Colocación de las antenas (I) y los receptores (II)	43
Figura 3.12. Esquema de conexión de las antenas y receptores durante las pruebas preliminares.....	45
Figura 3.13. Gráficas con los datos recogidos con solo GPS para los seis receptores.	46
Figura 3.14. Valor medio y desviación estándar por receptor y coordenada.....	46
Figura 3.15. Coeficientes de autocorrelación para los seis receptores con solo GPS.....	47
Figura 3.16. Datos obtenidos y DOP en las pruebas con solo GPS, solo GLONASS y GPS + GLONASS durante el primer día.	48
Figura 3.17. Disponibilidad de las combinaciones de constelaciones testadas	48
Figura 3.18. Comparativa de la constelación BeiDou con GPS con los receptores Rec.Ch3 y Rec.Ch5.....	49
Figura 3.19. Dispersión de la correlación entre la desviación estándar y el DOP horizontal, a la izquierda y el DOP vertical, a la derecha en Reino Unido.	49
Figura 3.20. Dispersión de la correlación entre la desviación estándar y el DOP horizontal, a la izquierda y el DOP vertical, a la derecha en China.	49
Figura 3.21. Espectro de las componentes este, norte y vertical para las constelaciones de GPS, GLONASS y GPS + GLONASS en Reino Unido en tres intervalos de una hora.	50
Figura 3.22. Espectro de las componentes este, norte y vertical para las constelaciones de GPS, GLONASS y GPS + GLONASS y GPS, BeiDou y GPS + BeiDou en China durante una hora.....	50
Figura 3.23. Número de satélites y PDOP durante la realización del experimento en estático. GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E) y BeiDou (C).	52
Figura 3.24. Longitud medida entre antenas con la solución PPP usando solo GPS, en azul; GPS y GLONASS, en verde y todas las constelaciones en rojo para el experimento en estático.....	52
Figura 3.25. Coordenadas este (azul), norte (verde) y altura (rojo) de las soluciones PPP (izquierda) y RTK (derecha) del receptor Leica Viva GS15.....	53
Figura 3.26. Número de satélites y PDOP durante la realización del primer experimento en dinámico. GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E) y BeiDou (C).....	53
Figura 3.27. Longitud medida entre antenas con la solución PPP usando solo GPS, y todas las constelaciones en rojo para el primer experimento en dinámico.	54
Figura 3.28. Número de satélites y PDOP durante la realización del experimento en estático. GPS (G), GLONASS (R) y BeiDou (C).	54
Figura 3.29. Longitud medida entre antenas con la solución PPP usando solo GPS, en azul y todas las constelaciones en rojo para el segundo experimento en dinámico.	54
Figura 3.30. Lugar de pruebas y antenas	56
Figura 3.31. Medida de la intensidad de señal para cada grupo de receptor y antena.	58
Figura 3.32. Disponibilidad RTK y precisión en el posicionamiento.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 4.1. Receptores GPS probados en este estudio. a) Navilock NL-8022MP. b) Novatel Smart2. c) Harxon TS108PRO. d) Base Harxon TS108PRO.....67
- Figura 4.2. Imágenes de la adquisición de datos de la prueba estática: (a) receptores adquiriendo datos en un tejado y (b) diagrama de la conexión entre receptores, receptor base y ordenador portátil.....68
- Figura 4.3. Posiciones relativas de los receptores en las pruebas estáticas. La posición de los receptores representada en color gris se obtuvo a partir de la posición verdadera calculada de los receptores en color rojo, y las distancias mostradas en la figura.69
- Figura 4.4. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Navilock NL-8022MP con SBAS desactivado de la Configuración 1: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 5.42% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 26 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico.....70
- Figura 4.5. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Navilock NL-8022MP con SBAS activado de la Configuración 2: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 0.86% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 18 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico. Además, a partir de los 18 minutos, todos los valores son un error de 1 m.70
- Figura 4.6. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS desactivado y GLIDE desactivado de la Configuración 3: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 2.94% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de las 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 19 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico. Además, a partir de los 18 minutos, todos los valores tienen un error de 1 m.70
- Figura 4.7. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS activado y GLIDE desactivado de la Configuración 4: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial. Obsérvese que, en el gráfico c, algunos puntos superan un error de 1 m y quedan fuera del gráfico.....71
- Figura 4.8. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS activado y GLIDE activado de la Configuración 5: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.....71

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 4.9. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con SBAS desactivado de la Configuración 6: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.71
- Figura 4.10. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con SBAS activado de la Configuración 7: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.72
- Figura 4.11. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Girona, a 645km del receptor de la Configuración 8: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.72
- Figura 4.12. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Mérida, a 296 km del receptor de la Configuración 9: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial. Nótese que, para comparar los gráficos de diferentes configuraciones, la escala Y no se ha modificado con los gráficos de configuraciones anteriores, y algunas barras de la Función de Densidad de Probabilidad (Gráfico b) están por encima de los límites del gráfico.72
- Figura 4.13. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Aranda de Duero, a 99 km del receptor de la Configuración 10: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulada calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.73
- Figura 4.14. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Valladolid, a 42 km del receptor de la Configuración 11: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.73
- Figura 4.15. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Olmedo, a 14 km del receptor de la Configuración 12: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.73
- Figura 4.16. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con una Estación de Referencia Virtual en la ubicación del receptor de la Configuración 13: (a) Mapas de puntos

ÍNDICE DE FIGURAS

para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.74

Figura 4.17. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK de la base Harxon TS103 a 5 m de la Configuración 14: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.74

Capítulo 1: Introducción

Capítulo 1: Introducción

La conducción de vehículos agrícolas es una tarea repetitiva y fatigosa que requiere toda la atención del operario para realizar correctamente el trabajo evitando saltos y repeticiones en la labor mientras monitorea el correcto funcionamiento del implemento.

Desde la aparición de los primeros vehículos agrícolas mecanizados se han buscado formas de facilitar su conducción, asistiendo al conductor para hacer su trabajo más cómodo y eficiente.

El desarrollo de los sistemas GNSS ha hecho todo esto posible gracias a la precisión ofrecida para llevar a cabo estas tareas y su fácil instalación en los vehículos. De esta manera, han ido surgiendo nuevas tecnologías para sacar el máximo partido a los sistemas GNSS.

1.1 Ámbito del proyecto

Con esta misma motivación surgió la idea del estudio en el que se analiza la precisión y rendimiento de antenas GNSS para su uso en aplicaciones de agricultura.

En este estudio se busca analizar las precisiones ofrecidas por distintos modelos de antenas y distintas tecnologías de corrección para determinar para qué tipo de aplicaciones son adecuadas cada uno de los casos analizados.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado es la realización de un estudio acerca del rendimiento en estático de antenas GNSS con el objetivo de determinar la viabilidad de las mismas para aplicaciones de agricultura de precisión.

Se estudiará la influencia de distintas tecnologías de corrección para mejorar el posicionamiento absoluto y relativo de las antenas utilizadas.

Se estudiará para qué tipo de tareas agrícolas es más adecuado cada tipo de antena y tecnología.

1.3 Fases y métodos

En este apartado se van a enumerar los pasos seguidos para la elaboración de este Trabajo Final de Grado haciendo una descripción de los mismos:

1. Adquisición de los conocimientos teóricos sobre los sistemas GNSS y las tecnologías asociadas.

2. Búsqueda y análisis de los principales artículos científicos enfocados en el análisis estático de antenas GNSS.
3. Descripción de las principales características de las antenas utilizadas en el estudio
4. Instalación, conexión y configuración de las antenas para cada uno de los modos de prueba.
5. Adquisición de datos en cada una de las configuraciones de las antenas.
6. Análisis de los datos obtenidos. Obtención de parámetros de error y representación de graficas de dispersión y errores.
7. Obtención y discusión de las conclusiones extraídas a partir de los resultados.
8. Redacción del estudio.
9. Presentación de líneas futuras.

1.4 Organización de la memoria

La presente memoria está estructurada en seis capítulos:

El Capítulo 1 es un capítulo introductorio en el que se explica la motivación del Trabajo Final de Grado, los objetivos, las fases y los métodos.

En el Capítulo 2 se realiza un análisis teórico de las tecnologías GNSS, viendo las características básicas de las principales constelaciones, explicando el principio básico de funcionamiento de los sistemas de navegación por satélite actuales. También se explican los principales errores asociados a los sistemas GNSS y se ven algunos sistemas para reducir o eliminar dichos errores. Por último, se explican brevemente las características principales de las antenas utilizadas en las pruebas en estático.

En el capítulo 3 se realiza un recorrido por los principales artículos que analizan el rendimiento en estático de antenas GNSS, ya sea en el ámbito de la agricultura de precisión o en otras aplicaciones.

En el capítulo 4 se presenta el estudio realizado. En él se presentan las antenas utilizadas dando una breve descripción de cada una de ellas, se explica la metodología para llevar a cabo las pruebas, y por último, se presentan los resultados y las conclusiones.

En el capítulo 5 se recogen las principales conclusiones obtenidas a partir de los resultados del estudio.

Por último, en el capítulo 6 se proponen los siguientes pasos que podrían llevarse a cabo como líneas futuras. En él se propone realizar un estudio dinámico de las antenas para analizar su rendimiento para la agricultura de precisión.

Capítulo 2: Análisis de las tecnologías empleadas

Capítulo 2: Análisis de las tecnologías empleadas

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) es una tecnología básica de agricultura de precisión que se utiliza para indicar la posición en tiempo real de un vehículo a medida que se mueve por un campo (1). Es una tecnología fundamental para realizar un mejor aprovechamiento de los recursos, aumentando los rendimientos de producción y reduciendo los costes.

En este capítulo se exponen los conocimientos teóricos básicos para entender el funcionamiento de los sistemas GNSS, se describen los principales errores asociados a esta tecnología y algunas tecnologías para reducir o eliminar dichos errores.

2.1 Sistema GNSS

La navegación por satélite comenzó con el desarrollo del sistema Transit por la Marina estadounidense, en colaboración con la Universidad John Hopkins de Estados Unidos (2). El sistema Transit se puso en funcionamiento a mediados de 1960 para uso militar y unos años más tarde también para uso civil. Contaba con seis satélites en órbitas circulares a 1000 km de altitud. Proporcionaba únicamente servicios bidimensionales y solo estaba disponible durante breves periodos de tiempo debido a la baja altitud de los satélites. Estos satélites utilizaban el efecto Doppler, donde una única señal de satélite era necesaria para obtener la ubicación del receptor. Transmitían en dos frecuencias y ofrecía una precisión de 500 m para los usuarios de una frecuencia y 25 m para los de dos (3).

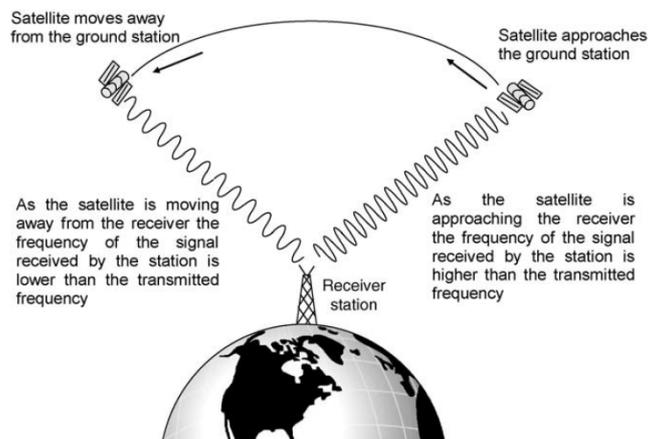


Figura 2.1. Principio de funcionamiento de los satélites basados en efecto Doppler (3).

Los satélites de efecto Doppler se sustituyeron por los satélites basados en el principio de trilateración, en el que la posición del receptor se calcula a partir de la distancia a, como mínimo, tres satélites. La distancia a cada uno de los satélites se calcula a partir de un código de tiempo internamente generado por el receptor que se compara con el código de tiempo idéntico enviado por el satélite para determinar el tiempo de retraso entre los mismos, que sería el tiempo que tardaría la señal en viajar desde el satélite hasta el receptor. La distancia se calcula multiplicando esa diferencia de tiempos, por la velocidad de la luz que es la velocidad a la que viajan las señales de radio. Para calcular estos tiempos se necesitan relojes muy precisos, ya que un error de una milésima de segundo supondría un error de 300 km. El conocer la distancia a un satélite, y conocida la posición de ese satélite, situaría al receptor en algún lugar de la esfera centrada en ese satélite y de radio la distancia calculada. Utilizando un segundo satélite de la misma manera reducirá la posición a la intersección de las dos esferas, que es una circunferencia, y la intersección con una tercera medida situará al receptor en la intersección de esa tercera esfera y la circunferencia que son dos puntos. Por último, se utiliza la información de un cuarto satélite para descartar uno de los dos puntos y para sincronizar los códigos de tiempo generados por los satélites y el receptor. Para optimizar la precisión, la mayoría de los fabricantes utilizan tantas señales de satélite como sea posible (1).

Actualmente existen varios sistemas GNSS basados en trilateración desarrollados por distintos países, algunos para dar un servicio global como el sistema GPS desarrollado por Estados Unidos, el sistema GLONASS desarrollado y mantenido por Rusia, el sistema Galileo de la Unión Europea y el sistema de navegación chino Beidou y otros de cobertura local como el sistema japonés QZSS. En general, todos estos sistemas funcionan con principios muy similares y utilizan frecuencias de transmisión similares.

2.1.1 GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS; en inglés: Global Positioning System) es el sistema de navegación desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos inicialmente para el uso en operaciones militares. Hoy en día está disponible también para uso civil. El sistema GPS comenzó a desarrollarse en la década de 1960 y está plenamente operativo desde 1995. El GPS consta de tres segmentos que trabajan de forma integrada para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

2.1.1.1 Segmento espacial.

Consta de una constelación con 31 satélites, de los cuales 24 son satélites activos y los restantes se utilizan como satélites de repuesto en órbita. Están situados en seis planos orbitales con cuatro o más satélites en cada plano orbital para mantener la cobertura global. Los planos orbitales tienen una inclinación de 55 grados respecto al ecuador y están separados entre sí 60 grados. La órbita es aproximadamente circular con radio de 26560 km y un periodo orbital de casi 12 horas. La constelación fue diseñada para que al menos cuatro satélites fueran visibles desde cualquier punto de la superficie terrestre (4,5).

Cada satélite GPS lleva un reloj atómico de cesio y/o rubidio (es decir, un oscilador de referencia de frecuencias) para proporcionar información de temporización a las señales transmitidas por los satélites. Aunque cada satélite lleva varios relojes internos, todas las señales de navegación se

generan a partir de un solo reloj. Las correcciones del reloj del satélite se proporcionan a los usuarios en las señales emitidas por cada satélite, con la ayuda del Segmento de Control Terrestre GPS (3).

Los satélites funcionan con energía solar. Llevan baterías de reserva a bordo para mantenerlos en funcionamiento en caso de eclipse solar. Los satélites se mantienen en la trayectoria correcta con la ayuda de pequeños cohetes propulsores.

2.1.1.2 Segmento de control terrestre.

Consiste en una red de estaciones distribuidas a lo largo del mundo que supervisa y controla la constelación de satélites. Comprende dieciséis estaciones de control, once estaciones de antena terrestre y una estación de control principal (6).

Las estaciones de control están provistas de receptores GPS de alta fidelidad y un oscilador de cesio para realizar un seguimiento continuo de todos los satélites GPS a la vista. Los datos de estas estaciones se envían a la estación de control principal para su procesamiento. Además, cada estación tiene sensores de humedad, presión y temperatura que se usan para realizar modelos de la troposfera y así poder estimar errores.

La estación de control principal utiliza la información recibida por las estaciones de control para calcular información precisa y actualizada sobre las órbitas de los satélites y el estado de reloj cada 15 minutos.

Las estaciones de antena terrestre envían la información de seguimiento de la estación de control principal a los satélites para mantener el buen funcionamiento y la presión del sistema. Además, se utiliza para enviar comandos a los satélites y recibir datos de telemetría (3,7).

2.1.1.3 Segmento de Usuario.

Incluye a todos los receptores capaces de recibir, descodificar y procesar las señales de los satélites GPS con el fin de proporcionar información de posición a los usuarios. La recepción de estos receptores es pasiva, lo que significa que no hay límite máximo en el número de receptores funcionando al mismo tiempo. Ejemplos de ellos, incluyen receptores GPS en teléfonos móviles, sistemas de navegación portátiles, sistemas de navegación para automóviles, instrumentos topográficos y más.

2.1.1.4 Señal.

La señal GPS contiene tres tipos diferentes de información: el código pseudoaleatorio, los datos de las efemérides y los datos del almanaque. El código de ruido pseudoaleatorio (código PRN, Pseudo-Random Noise) es un código único de identificación que permite identificar qué satélite está transmitiendo información. Los datos de las efemérides contienen información sobre el estado del satélite, la fecha y la hora actuales. Los datos del almanaque indican al receptor GPS dónde debe estar cada satélite en cualquier momento del día. También contienen información sobre correcciones del reloj y parámetros de datos atmosféricos. Toda esta información se transmite en dos frecuencias portadoras, denominadas L1 (1575,42 MHz) y L2 (1227,60 MHz), aunque los satélites más recientes tramiten también en una tercera frecuencia denominada L5 (1176.45 MHz), diseñada para los servicios de seguridad aérea. Todos los satélites transmiten en las mismas frecuencias portadoras, sin embargo, cada satélite transmite códigos diferentes. Esto permite a los receptores GPS identificar qué

satélite está transmitiendo la señal. Las señales se transmiten mediante la técnica de acceso múltiple por división de código (CDMA) (3).

Los códigos pseudoaleatorios (códigos PRN) son códigos digitales largos generados mediante algoritmos especiales de forma que no se repitan dentro del intervalo de tiempo de interés. Los satélites GPS transmiten dos tipos de códigos: el primero se conoce como código de Adquisición Gruesa (código C/A, Coarse-Adquisition code) y el segundo es el código de precisión (código P). El código C/A es un código civil no cifrado, mientras que el código P es un código militar cifrado. Durante las operaciones militares, el código P se encripta aún más, lo que se conoce como código Y, para hacerlo más seguro. Esta característica se denomina "Anti-Spoofing". El código C/A se modula en la frecuencia portadora L1, operando a una frecuencia de 1023 MHz y repitiéndose cada milisegundo y el código P, que se modula en las frecuencias portadoras L1 y L2, opera a una frecuencia de 10.23 MHz con un ciclo de 266 días, aunque se reinicia cada semana. Los códigos se transmiten mediante la técnica de modulación digital BPSK (Binary Phase Shift Keying). Los receptores GPS que utilizan el código C/A forman parte del denominado sistema de posicionamiento estándar (SPS), mientras que los que utilizan el código P forman el sistema de posicionamiento preciso (PPS) (3,5).

El mensaje de navegación se transmite a una velocidad binaria de 50 kbps utilizando la técnica BPSK. Consta de 25 tramas de 1500 bits cada una, lo que equivale a un total de 37,500 bits. En la Figura 2.2 se muestra la estructura de la señal del sistema GPS (3).

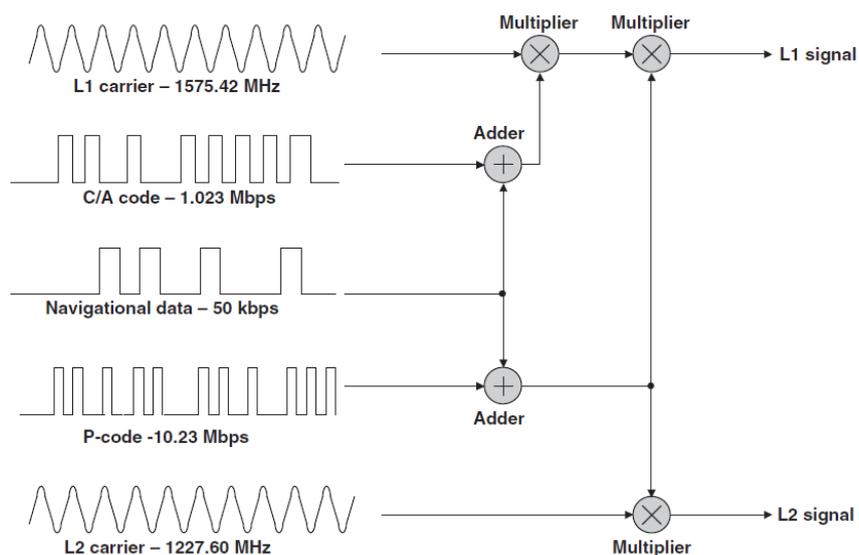


Figura 2.2. Estructura de la señal del Sistema GPS (3).

2.1.1.5 Cálculo de la posición del receptor.

Como se ha mencionado anteriormente, el concepto fundamental del GPS consiste en utilizar mediciones simultáneas de distancia desde tres (o cuatro) satélites para calcular la posición de un receptor. El receptor GPS determina su distancia respecto a los satélites cronometrando el tiempo que lleva la señal desde el satélite hasta el receptor, es decir, midiendo el intervalo de tiempo entre la transmisión de la señal desde el satélite y su recepción por parte del receptor.

Cada satélite GPS emite un patrón digital largo y único conocido como código pseudoaleatorio (código PRN). Este código es ejecutado también por el receptor en sincronía con el satélite. Cuando

la señal del satélite alcanza al receptor, esta se retrasa en relación con el patrón del receptor, dependiendo de la distancia entre el satélite y el receptor (3).

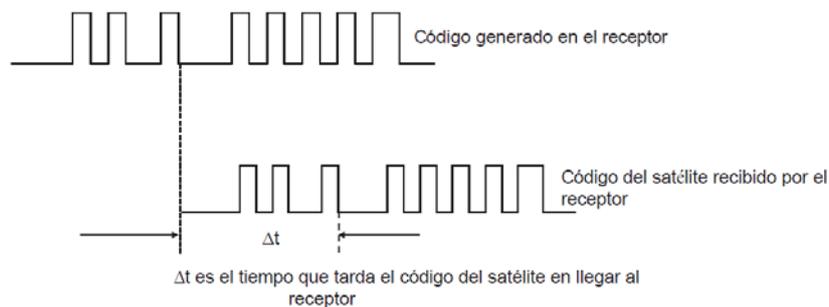


Figura 2.3. Recepción de la señal en el receptor para calcular el tiempo de retraso en la señal (3).

Una vez calculado el retraso mediante la comparación y la correlación de la secuencia de códigos del satélite recibida por el receptor se calcula la pseudodistancia multiplicando este tiempo por la velocidad de la señal que es la velocidad de la luz.

$$\text{Pseudodistancia} = c \cdot \Delta t \quad (\text{Ec. 1})$$

Para que estos cálculos sean eficaces, tanto el receptor como los satélites deben contar con relojes atómicos precisos. Sin embargo, la instalación de relojes precisos en cada receptor no es factible debido a su alto costo. Los receptores están equipados con relojes normales más económicos, que ajustan constantemente utilizando las señales de reloj de los satélites. Este ajuste se realiza partiendo del principio de que cuatro esferas no convergerán en un punto si las mediciones no están sincronizadas. Dado que las distancias se miden desde el mismo receptor, están proporcionalmente sincronizadas. El receptor realiza las correcciones necesarias para que las mediciones de los cuatro satélites converjan y, de esta manera, ajusta su reloj de forma continua basándose en estas correcciones. Este proceso permite que los relojes del receptor sean tan precisos como los relojes atómicos de los satélites (3).

Tras calcular las pseudodistancias a cuatro satélites, el receptor determina su posición a partir de las cuatro ecuaciones que se muestra a continuación.

$$(x_1 - U_x)^2 + (y_1 - U_y)^2 + (z_1 - U_z)^2 = (PD_1 \pm EC)^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$(x_2 - U_x)^2 + (y_2 - U_y)^2 + (z_2 - U_z)^2 = (PD_2 \pm EC)^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

$$(x_3 - U_x)^2 + (y_3 - U_y)^2 + (z_3 - U_z)^2 = (PD_3 \pm EC)^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$(x_4 - U_x)^2 + (y_4 - U_y)^2 + (z_4 - U_z)^2 = (PD_4 \pm EC)^2 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde x_n, y_n, z_n son las coordenadas conocidas del satélite n , U_x, U_y, U_z son las coordenadas del receptor, PD_n es la pseudodistancia del receptor al satélite n . y EC es un error de corrección (3).

Una vez explicado el sistema GPS, se va a explicar el resto de sistemas más importantes de una manera más simple, atendiendo a las características que los diferencian del sistema GPS.

2.1.2 GLONASS

GLONASS es otro sistema de navegación basado en trilateración. Es el sistema desarrollado por la antigua URSS en su rivalidad con los Estados Unidos. Comenzó a ser desplegado en 1982 y fue declarado plenamente operativo en 1995 ya bajo la cobertura de Rusia, al desintegrarse la URSS. A

partir de 2011 comenzó a dar cobertura global, pues antes solo daba servicio en Rusia. El sistema GLONASS también consta de tres segmentos (8).

2.1.2.1 Segmento espacial

La constelación GLONASS consta de 29 satélites distribuidos en tres planos orbitales con una inclinación de 64.8 grados respecto al ecuador y separados entre sí 120 grados. Las órbitas de los satélites tienen radios más pequeños que las órbitas del GPS, de unos 25510 km y un periodo orbital de 11 horas y 15 minutos aproximadamente. Transmiten señales de navegación en las bandas de frecuencia de 1598-1605 MHz (L1) y 1242-1248 MHz (L2). Cada satélite tiene su frecuencia de emisión dentro de esas bandas utilizando la técnica de acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA) (8,9).

2.1.2.2 Segmento de control

Consta de estaciones de control y seguimiento, un centro de control del sistema y varias estaciones de seguimiento óptico cuántico. Las estaciones de control y seguimiento están repartidas por lo que era la antigua Unión Soviética. Controlan los satélites a la vista, calculan los alcances de los satélites y reciben los mensajes de navegación de los satélites. Estos datos son enviados al centro de control del sistema que es la estación principal y se encuentra en Moscú y esta genera las correcciones del reloj, los mensajes de estado de los satélites y los mensajes de navegación. Por último, estas correcciones se envían de vuelta a las estaciones de control y seguimiento para enviarlas a los satélites. Las estaciones de seguimiento óptico cuántico son sistemas de medición láser que se utilizan para calibrar periódicamente las mediciones realizadas en las estaciones de control y seguimiento (3).

2.1.2.3 Segmento de usuario.

Al igual que en el sistema GPS, el segmento de usuario incluye a todos los receptores del sistema GLONASS que proporcionan información de posicionamiento y temporización.

2.1.3 Galileo

Galileo es el sistema de navegación desarrollado por la Unión Europea desde 2016. Se desarrolló con el fin de proporcionar un sistema de posicionamiento independiente del sistema GPS de EE.UU. y del sistema ruso GLONASS. Al igual que estos dos últimos consta de tres segmentos.

2.1.3.1 Segmento espacial

La constelación consta de 30 satélites en tres planos orbitales separados 120° entre sí y con una inclinación respecto al ecuador de 56°. El radio de la órbita es mayor que en los sistemas GPS y GLONASS siendo de 29600km, con un periodo orbital de poco más de 14 horas. Galileo opera en tres rangos de frecuencias conocidas como E1, entre 1559 y 1592 MHz, E5 entre 1164 y 1215 MHz y E6 entre 1260 y 1300 MHz (9).

2.1.3.2 Segmento terrestre

Consta del segmento de control terrestre y el segmento de misión terrestre. El segmento de control terrestre se compone por una red de estaciones repartidas por todo el mundo y se encarga del control

de la constelación. El segmento de misión de tierra es el encargado de enviar las correcciones a los satélites.

2.1.3.3 Segmento de usuario

Al igual que en el resto de sistemas, incluye los receptores capaces de recibir y decodificar la señal para obtener el posicionamiento.

2.1.4 Otros sistemas

2.1.4.1 Beidou

Beidou es el sistema de navegación por satélite chino. El primer prototipo del año 2000 constaba de tres satélites y daba servicio para usuarios en China y áreas vecinas. En el 2011 lanzaron la segunda versión de Beidou, con una constelación de 10 satélites. El rango de cobertura aumentó para la región Asia-Pacífico. En 2015, China lanzó el sistema BeiDou de tercera generación para cobertura global y en 2018 comenzó a brindar servicios globales. Actualmente cuenta con 31 satélites activos.

2.1.4.2 QZSS

El Sistema de Satélites Quasi-Zenith (QZSS), es el sistema de navegación desarrollado por el gobierno japonés. Es un sistema regional complementario al sistema GPS, con el fin de aumentar la precisión de este en el área de Asia y Oceanía. Comenzó a dar señal en 2018. Consta de 4 satélites y se espera ampliarlo a siete en 2024 con el fin de independizarlo del GPS (10,11).

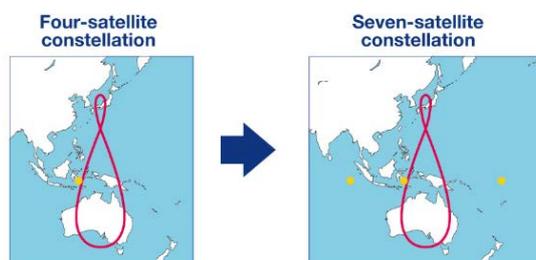


Figura 2.4. Área de cobertura de los satélites de QZSS para la constelación de cuatro y la de siete satélites (11).

2.1.5 Errores GNSS

A la hora de calcular la posición de los receptores, los sistemas GNSS están afectados por varios tipos de errores que hacen que la precisión de posicionamiento no sea total. Las causas principales de los errores de posición del GNSS incluyen el reloj, las efemérides, la mala configuración del satélite, la interferencia atmosférica y los errores de trayectos múltiples. Cada uno de estos se describen a continuación.

2.1.5.1 Reloj

El posicionamiento GNSS depende en gran medida de la determinación precisa del tiempo de viaje de las señales GNSS. Los relojes de los satélites y los receptores están referenciados a un sistema horario común. El desfase respecto a esta referencia de tiempo produce los errores. Existen

dos tipos de errores en función de si el error se produce en los relojes de los satélites o en los relojes de los receptores.

2.1.5.1.1 Error en el reloj del satélite

La desviación de tiempo del reloj del satélite respecto a la hora de referencia se denomina deriva. Esta deriva se monitorea desde el segmento de control terrestre y se envían ajustes cada cierto tiempo al reloj del satélite con el fin de compensarlos. El error suele ser de unos pocos metros y cambia lentamente con el tiempo. Se puede eliminar por completo mediante GPS diferencial (5,7).

2.1.5.1.2 Error del reloj del receptor

Los errores de reloj resultan de la precisión limitada de los relojes físicos contenidos en el receptor y la sincronización exacta entre los relojes del receptor y del satélite. El tiempo del receptor se incluye como cuarta incógnita en las ecuaciones de posicionamiento. Este es el motivo por el que se necesita como mínimo cuatro señales de satélite (1).

2.1.5.2 Error de efemérides

Debido a que los satélites están orbitando en campos gravitatorios, sus posiciones y movimientos pueden conocerse y predecirse con bastante precisión. Cuando la predicción de la posición del satélite no coincide con la posición real se dice que hay un error de efemérides. Estos errores se producen por variaciones en la trayectoria orbital o por posibles errores de cálculo con los datos de almanaque que producen errores en el cálculo de la distancia de desplazamiento del satélite. Las estaciones de control terrestre monitorean el estado de los satélites GNSS y actualizan la información de efemérides. Los errores de efemérides suelen ser de unos pocos metros y pueden eliminarse casi por completo mediante GNSS diferencial. (1).

2.1.5.3 Distribución de los satélites

Las posiciones relativas de los satélites en el cielo afectan a los cálculos de trilateración. Los satélites de las constelaciones se mueven continuamente por las órbitas en relación con la Tierra de tal manera que la disposición de los satélites utilizados en el cálculo de la posición cambia con el tiempo. Si los satélites están dispersos unos de otros en el cielo darán una posición más precisa que los satélites que están cerca unos de otros. Esto se cuantifica a través de la Dilución de Precisión (DOP). Para posiciones tridimensionales la más común de usar es la posición DOP (PDOP). Utilizar varias constelaciones durante el posicionamiento ayuda a mejorar los valores de DOP (1,5).

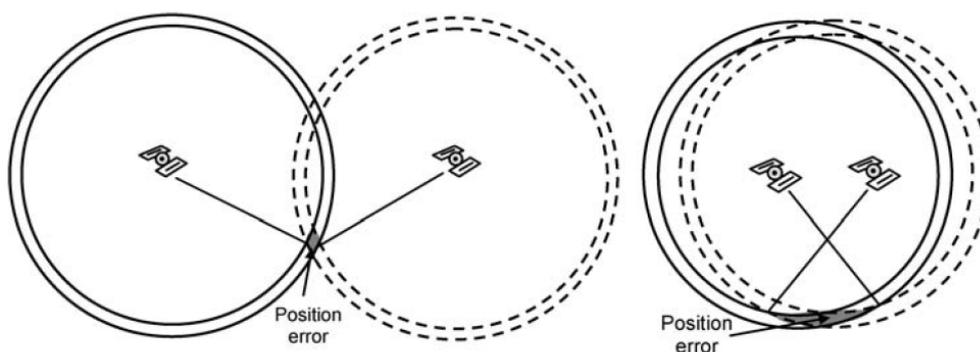


Figura 2.5 Efecto DOP en el posicionamiento (3)

2.1.5.4 Interferencias atmosféricas

Las ondas de radio enviadas por los satélites se ven afectadas por la ionosfera y la troposfera disminuyendo la velocidad con respecto a la velocidad de la luz en el vacío y pudiendo desviarse y refractarse. La ionosfera es la capa de 50 a 1000 km sobre la superficie de la tierra y está compuesta por aire ionizado por la radiación solar. La presencia de electrones libres afecta los índices de refracción de las diversas capas de la ionosfera y, por lo tanto, las señales del GPS no viajan a la velocidad del vacío de la luz. Este efecto varía a las distintas horas del día y de la noche. La troposfera es la capa situada entre la superficie de la tierra y 50km por encima. En esta capa, la señal se ve afectada por la humedad, la presión y la temperatura, produciendo también retrasos en la señal (5,12).

Una forma de compensar los efectos atmosféricos en las señales de GPS es mediante el uso de múltiples frecuencias de transmisión. La mayoría de los sistemas GNSS emiten códigos de navegación similares en más de una frecuencia de manera simultánea. Estas señales de frecuencia múltiple experimentan variaciones predecibles al atravesar la atmósfera, que permiten anticipar y corregir los errores. Los efectos atmosféricos pueden causar errores de algunas decenas de metros si las condiciones son desfavorables y pueden eliminarse por completo mediante GNSS diferencial (1).

2.1.5.5 Trayectos múltiples

Los errores de trayectos múltiples se producen cuando las señales se reflejan en objetos como edificios metálicos, árboles o masas de agua y llegan al receptor repetidas en distintos momentos de tiempo. Este fenómeno es un problema local que depende de la localización del receptor y su entorno y no es corregible mediante GNSS diferencial. Los fabricantes utilizan técnicas de filtrado de hardware y software para minimizar los efectos de los errores de trayectos múltiples(1,5)

2.1.5.6 Errores en el receptor.

Los errores del receptor están causados principalmente por el ruido térmico de los componentes. El ruido térmico es inherente al sistema y no se puede eliminar por completo. No se puede mitigar a través de GPS diferencial. Puede evaluarse mediante una prueba inicial de línea de base cero, en la que se conectan dos receptores a una sola antena utilizando un divisor de señal y mediante un proceso de doble diferenciación se eliminan casi todos los errores significativos, excepto los errores específicos del receptor, que incluyen el ruido y la interferencia de trayectos múltiples. El ruido del receptor generalmente equivale a aproximadamente 0.25 a 0.5 metros para las mediciones de código y solo unos pocos milímetros para las mediciones de fase (5,7,12).

2.2 Correcciones GNSS

Los satélites de navegación transmiten señales electromagnéticas que se utilizan para calcular la distancia entre el satélite y el receptor, que es fundamental para determinar la posición del receptor. Sin embargo, existen errores, vistos en el apartado anterior, que afectan estas mediciones. Estos errores se pueden clasificar básicamente en dos tipos:

Errores que ocurren aleatoriamente: este tipo de errores muestran un bajo nivel de correlación o dependencia estadística. El ruido térmico, es un ejemplo de este tipo de errores. Promediar varias mediciones es una estrategia para combatir estos errores.

Errores sistemáticos: estos errores suelen mostrar una alta correlación en varias dimensiones, por ejemplo, en ubicación y tiempo. Esta correlación puede aprovecharse para combatirlos o al menos reducirlos. Los errores de reloj en los satélites de navegación son errores sistemáticos. Son iguales para todos los receptores de navegación durante un cierto período de tiempo, es decir, existe una fuerte correlación local y temporal. La ionosfera es otra fuente de errores sistemáticos. El retraso ionosférico se suele combatir mediante modelos de predicción adecuados o mediante el uso de receptores multifrecuencia. Sin embargo, persisten errores residuales. Es obvio que estos errores muestran una correlación local ya que las ondas electromagnéticas de un satélite a los receptores en un área determinada viajan a través de la misma parte de la ionosfera.

Los errores sistemáticos pueden medirse mediante una estación de referencia y notificarse a los receptores de navegación. Este es el principio de los sistemas de corrección. A continuación, se presentan brevemente dichos sistemas de corrección, distinguiendo entre sistemas locales como GNSS diferencial (DGNSS), que es un representante de los sistemas de aumentación basados en tierra (GBAS) o sistemas de aumentación basados en satélites (SBAS) como el EGNOS europeo o el sistema WAAS estadounidense. Estos sistemas abastecen áreas mucho más amplias (13).

2.2.1 SBAS

Los sistemas de aumentación basados en satélites, utilizan satélites geoestacionarios para transmitir datos de corrección que serán aprovechados por los receptores GNSS para aumentar la precisión y la integridad.

Los sistemas SBAS dan servicio a zonas extensas. Existen varios sistemas SBAS según la región a la que ofrecen servicio.

2.2.1.1 WAAS

El sistema de aumentación de área amplia de EE. UU. es un sistema de corrección basado en satélites desarrollado en 1994 por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos y la Administración Federal de Aviación (FAA). Se desarrolló principalmente para proporcionar navegación altamente precisa para aeronaves comerciales porque la señal estándar de GPS civil no cumplía con los requisitos de la FAA en cuanto a precisión, integridad y disponibilidad para la aviación. Este sistema se activó en 2003 y proporciona correcciones diferenciales para América, océano Atlántico y Pacífico con precisiones de menos de 3 m el 95% del tiempo.

El sistema WAAS opera con una red de 38 Estaciones de Referencia de Área Amplia (WRS) en tierra distribuidas en América del Norte y Hawái. Estas estaciones reciben las señales de los satélites GPS, detectan errores y obtienen valores de corrección. La información recopilada se envía a Estaciones Maestras WAAS (WMS), que envían los valores a satélites geoestacionarios. Las señales WAAS se transmiten desde dichos satélites en la banda L1 utilizando una modulación similar a GPS, mediante una secuencia C/A modulada por BPSK. Los receptores GPS/WAAS procesan estos mensajes para eliminar errores en la señal GPS, lo que mejora significativamente la precisión de la ubicación.

Otra tarea del sistema es detectar errores en la red GPS/WAAS. Se trata, por ejemplo, de señales erróneas que inducen a error y, por tanto, conllevan riesgos potenciales para la seguridad. WAAS tiene como objetivo advertir a los usuarios sobre problemas de integridad en un tiempo inferior a seis segundos (13–15).

2.2.1.2 EGNOS

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) es el sistema de corrección europeo basado en satélites para los sistemas GPS, GLONASS y Galileo. Es un proyecto conjunto de la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea (ESA) y está operativo desde 2009. EGNOS distribuye datos de corrección a través de satélites geostacionarios y es compatible con los sistemas WAAS estadounidense y MSAS japonés.

Consta de cuatro satélites geostacionarios, 34 estaciones de control terrestre llamadas Estaciones de Monitoreo de Rango e Integridad (RIMS), seis Estaciones Terrestres de Navegación (NLES) que transmiten los datos a los satélites y cuatro Centros de Control de Misión (MCC) (15).

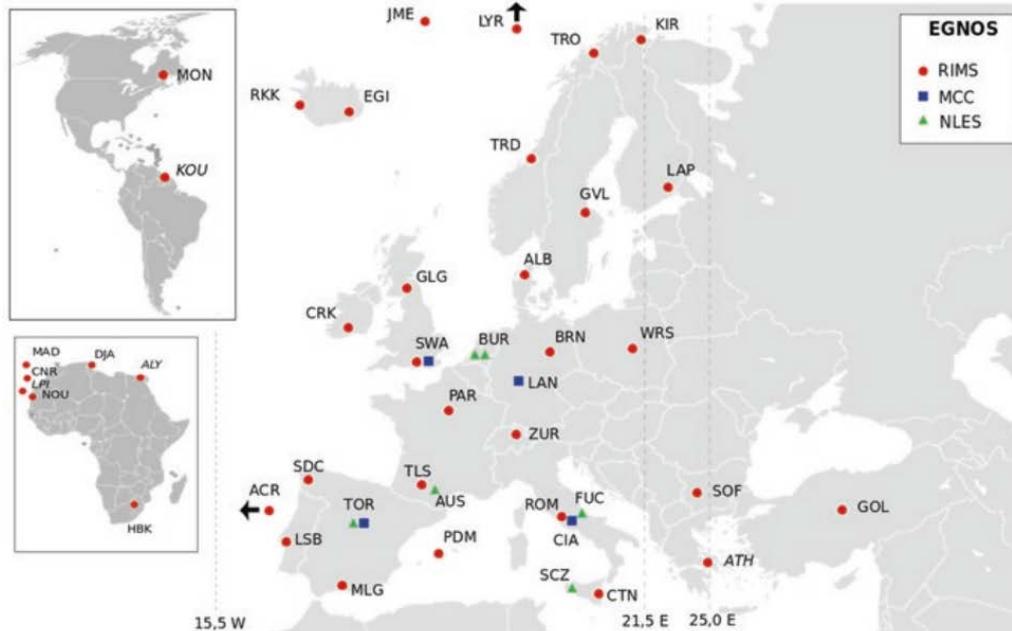


Figura 2.6. Localización de las estaciones de EGNOS (15).

Los RIMS reciben las señales de posicionamiento de los satélites GPS, GLONASS y Galileo. Los RIMS están distribuidos por toda Europa y el norte de África y permiten obtener información completa sobre la ionosfera en toda Europa. A partir de los datos de los RIMS, los MCC calculan datos de corrección para las órbitas de los satélites, así como mapas que contienen información sobre la densidad de electrones en la atmósfera. Las estaciones NLES transmiten esta información a satélites geostacionarios, que la transmiten de forma gratuita. Al igual que WAAS, EGNOS transmite sus datos utilizando la banda L1 y códigos C/A GPS con números de identificación superiores a 32. EGNOS, al igual que WAAS, está diseñado principalmente para usuarios de la aviación que pueden recibir señales de satélites geostacionarios directamente y sin distorsiones. En tierra, sin embargo, el uso de EGNOS es limitado debido a la elevación relativamente baja de los satélites geostacionarios. Para resolver este problema, la ESA lanzó en 2002 un servicio basado en Internet llamado SISNeT (señal en el espacio a través de Internet). Este servicio entrega continuamente datos de EGNOS a los usuarios terrestres. En julio de 2005 comenzó una fase inicial de funcionamiento de EGNOS. En 2011 se obtuvo la certificación para aplicaciones de seguridad humana (ESA 2011). EGNOS especifica una precisión superior a 7 m. En la práctica, la precisión es de aproximadamente 1 m con una disponibilidad del sistema superior al 99 % (13).

2.2.1.3 MSAS

El MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System) es el equivalente japonés de los sistemas EGNOS y WAAS. Está diseñado y es operado por el Ministerio de Tierra, Infraestructura y Transporte y la Oficina de Aviación Civil de Japón. Está operativo desde 2007. Dos satélites geoestacionarios, MTSAT, apoyan los servicios meteorológicos y de comunicaciones. Estos satélites, que actualmente admiten GPS, transmiten datos de corrección e integridad para Japón. La frecuencia portadora y la modulación son similares a WAAS y EGNOS. La señal se transmite en la banda L1 utilizando modulación BPSK con una velocidad de datos de 250 bits/s. Con una precisión de alrededor de 1 a 2 m tanto en dirección horizontal como vertical, el rendimiento de MSAS es comparable al de WAAS y EGNOS. El primer satélite MSAS, el MTSAT-1R, se lanzó con éxito en febrero de 2005, seguido del MTSAT-2 un año después(13,15).

2.2.1.4 GAGAN

El sistema GAGAN proporciona señales de corrección basadas en satélites del sistema GPS para la India. Su intención es proporcionar un servicio de navegación que cumpla con los requisitos para todas las fases del vuelo sobre el espacio aéreo indio. El sistema comprende quince estaciones de referencia, tres estaciones de control, tres estaciones de enlace ascendente y tres satélites geoestacionarios. El gobierno indio tiene la intención de crear su propio sistema de navegación regional, el IRNSS (13,15).

2.2.1.5 SDCM

Rusia está desarrollando el Sistema de Vigilancia y Correcciones Diferenciales (SDCM) como sistema de corrección de su sistema GLONASS. Esto es algo diferente de los demás, ya que proporcionará monitoreo de integridad tanto para el sistema GLONASS como para el GPS de EE. UU., mientras que los otros, actualmente, solo funcionan con GPS. Debido al tamaño de Rusia, hay en total 19 estaciones de referencia en Rusia, así como cinco internacionales y tres satélites geoestacionarios para transmisión. Logró un estado operativo parcial en 2011 (15).

2.2.1.6 BDSBAS

BDSBAS es el servicio de corrección para China. Transmite señales de corrección para los sistemas GPS y BeiDou en las frecuencias L1 y L5. Está compuesto por un Centro de Operación y Control, Centros de Datos, Estaciones de Uplink, Estaciones de Monitoreo y consta de tres satélites geoestacionarios. La transmisión de la señal BDSBAS comenzó en noviembre de 2018, iniciando la fase de integración y prueba que se mantiene hasta hoy día (16).

2.2.2 DGNSS

La tecnología GNSS diferencial utiliza estaciones de referencia en tierra para calcular y corregir los errores. Ofrece precisiones del orden de unos pocos metros y es necesario que la distancia entre el receptor DGNSS y la base de la que obtiene las correcciones no estén demasiado lejos entre sí. Esto es así, porque el enfoque DGNSS aprovecha de la correlación local y temporal para reducir o incluso eliminar los errores sistemáticos del sistema. Esta correlación local y temporal se utiliza en un receptor DGNSS para obtener un valor de error sistemático estimado proporcionado por una estación

de referencia DGNSS. En la Figura 2.7 se muestra el principio DGNSS. Los errores aleatorios, como el ruido térmico, que tienen un valor promedio de cero, pueden reducirse mediante el promedio de mediciones. Las estaciones de referencia DGNSS son estaciones fijas que permiten realizar promedios de los errores aleatorios durante largos periodos de tiempo reduciendo significativamente este tipo de errores. En la Figura 2.7 no se consideran estos errores. Suponemos que se conoce exactamente la posición real en el terreno de la estación de referencia DGNSS. Un receptor GNSS en esta estación de referencia estima además la posición de esa estación. Lo más probable es que haya una desviación de la posición estimada en comparación con la posición real del terreno. Esta diferencia se debe principalmente a errores sistemáticos, que son los mismos en los receptores GNSS cercanos a la estación de referencia DGNSS. Restando la posición real en tierra de la estimada en la estación de referencia DGNSS se obtiene el vector de error sistemático e_{RS} en la estación de referencia. Este vector de error se transmite a través de enlaces de datos apropiados a receptores con capacidad DGNSS que rodean la estación de referencia. Debido a correlaciones espaciales y temporales $e_{RX} \approx e_{RS}$. El error sistemático restante después de restar e_{RS} de la estimación de la posición inicial en el receptor DGNSS, $e = e_{RX} - e_{RS} \approx 0$, se reduce significativamente. Debido a las diferencias de construcción, los errores en la estimación de e_{RS} se propagan directamente a la precisión de la estimación de la posición final. Por tanto, los términos de error aleatorios en e_{RS} deberían reducirse tanto como sea posible en la estación de referencia (13).

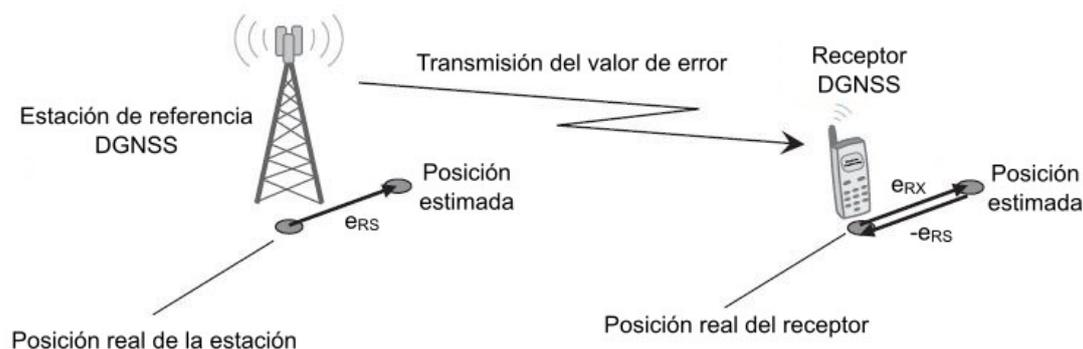


Figura 2.7. Proceso de corrección de errores en DGNSS (13).

2.2.3 RTK

Toda la discusión anterior sobre cómo funciona el GPS se relaciona con el GPS basado en códigos. Existe otra técnica, llamada fase portadora o GPS cinemático, que funciona de forma fundamentalmente diferente y que además proporciona la máxima precisión. Esto no utiliza el proceso basado en códigos descrito anteriormente, sino que funciona como un sistema electrónico de medición de distancias que registra el número exacto de ciclos de portadora de 17 cm entre el satélite y el receptor en tierra después de que se elimina la modulación de la portadora. Esto proporciona una ubicación dentro de un milímetro más una parte por millón de la longitud de la base y proporciona a una estación base fija y a múltiples unidades móviles una posición con una precisión de milímetros en el suelo. La mayoría de los sistemas comienzan con la señal basada en código y luego miden la onda portadora, que se transmite a 1575,42 MHz, en una longitud de onda de 17 cm.

Se utilizan al menos dos receptores, situados a una distancia inferior a 50 km entre sí, ambos rastrean la fase de la portadora y se mide la diferencia de fase. Poder medir la fase exacta de este con

precisión nos da un posicionamiento de 3 a 5 cm en tiempo real y de 1 a 3 cm con postprocesamiento. Estos sistemas son más caros que los receptores GPS basados en códigos. Los sistemas cinemáticos en tiempo real proporcionan posicionamiento relativo centimétrico para aplicaciones de precisión como ingeniería civil, construcción y agricultura. A las correcciones RTK también se las conoce como corrección de fase de portadora, o CPGPS (Carrier-Phase GPS), y utiliza una estación base fija y múltiples receptores móviles. La estación base transmite la fase de la portadora y las unidades móviles comparan su medición de fase con la de la estación base. Es posible una precisión de 1 a 2 cm (15).

2.2.4 Otras tecnologías: GLIDE

GLIDE es una tecnología desarrollada por la empresa Novatel con el propósito de ofrecer una mejora en el rendimiento del posicionamiento relativo, particularmente para aplicaciones como la agricultura de precisión, donde la precisión del posicionamiento entre pasadas es esencial. Su finalidad es proporcionar una transición suave en la posición, con una diferencia de menos de 1 cm entre posiciones consecutivas y una reducción en los saltos de posición.

GLIDE, puede funcionar con soluciones de frecuencia única y doble frecuencia. La variante de doble frecuencia mejora la precisión absoluta de la posición y ofrece una solución que es afectada por la actividad ionosférica en menor medida.

Cuenta con un modo de detección automática que conmuta entre los modos de posicionamiento dinámico y estático según sea necesario. Puede funcionar sólo con GPS o con GPS/GLONASS.

La tecnología GLIDE ofrece una precisión de posicionamiento paso a paso superior a 50 cm en áreas sin acceso a servicios de corrección de área amplia como SBAS. Es compatible con todos los modos de posicionamiento de código como DGNSS y SBAS, lo que la hace adecuada para diversas aplicaciones (17).

2.3 Antenas utilizadas.

Una vez vistos los fundamentos teóricos de la tecnología GNSS, se va a realizar una breve descripción de las antenas GNSS utilizadas para llevar a cabo las pruebas estáticas para el estudio.

Para las pruebas se han utilizado tres modelos de antena y un receptor base RTK. Los modelos de antenas son: Navilock NL-8022MP, Novatel Smart2 y Harxon TS108PRO. El receptor base es un Harxon TS103.

2.3.1 Navilock NL-8022MP

Navilock NL-8022MP es una antena de bajo costo multi constelación y de una sola frecuencia que procesa las señales L1 de GPS, L1 de GLONASS, B1 de BeiDou, E1 de Galileo y L1 de QZSS. Puede funcionar con sistemas de aumentación SBAS como WAAS, EGNOS, QZSS y MSAS. Puede funcionar a una frecuencia de hasta 115200 baudios y ofrece datos de posicionamiento con una frecuencia de hasta 10 Hz en el modo multiconstelación y de hasta 18 Hz funcionando solo con una constelación. Puede recibir señales con una sensibilidad de -167 dBm.

Respecto a las precisiones ofrecidas por la antena, el fabricante indica que tiene una precisión de 2.5 metros CEP (Probabilidad de Error Circular) y de 2 metros CEP trabajando con los sistemas de

corrección SBAS. Estas precisiones podrían ser adecuadas para aplicaciones agrícolas que no requieran una precisión submétrica, como la aplicación de herbicidas o fertilizantes (18).



Figura 2.8. Antena Navilock NL-8022MP (18).

2.3.2 Novatel Smart2

Novatel Smart2 es una antena de medio costo multiconstelación y multifrecuencia que puede procesar las señales L1, L2 y L2C de GPS, E1 y E5b de Galileo, L1 y L2 de GLONASS, B1I, B2I y B2b de BeiDou, y L1 y L2 de QZSS. Puede funcionar con los servicios de aumentación SBAS y ofrece correcciones TerraStar que son correcciones vía satélite de pago. Ofrece precisiones de 1.5 m RMS trabajando en una frecuencia y 1.2 m RMS con doble frecuencia. Con correcciones SBAS ofrece precisiones de 60 cm RMS y con las correcciones TerraStar ofrece precisiones de hasta 2 cm. La antena Smart 2 tiene disponible la tecnología GLIDE explicada en el capítulo 2.2.4. para proporcionar un posicionamiento relativo suave para aplicaciones de agricultura de precisión u otras aplicaciones.

Puede incluir un sistema de compensación del terreno para mejorar el rendimiento de guía y dirección automática para terrenos irregulares y con pendientes para proporcionar automáticamente posiciones corregidas para el cabeceo y el balanceo del vehículo.

Puede funcionar a una frecuencia de 115200 baudios y ofrece datos de posicionamiento con una frecuencia de hasta 20 Hz.

Dispone de varios tipos de conexiones como RS232, Bus CAN y bluetooth (19).



Figura 2.9. Antena Novatel Smart2 (19).

2.3.3 Harxon TS108PRO

Harxon TS108PRO es una antena multiconstelación y multifrecuencia de medio costo capaz de procesar las señales L1, L2 y L5 de GPS, L1 y L2 de GLONASS, B1, B2 y B3 de BeiDou y E1, E5a y E5b de Galileo. Admite correcciones SBAS y puede trabajar con RTK. Ofrece precisiones, según el fabricante, de 1.5 m RMS trabajando en autónomo y de 1 cm + 1 ppm con RTK. Las correcciones

RTK se pueden obtener a través de internet (NRTK) a partir de la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia (ERGNSS) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) mediante Bluetooth o mediante 3G/4G o a través de la base TS103 por radio.

Ofrece un servicio similar a GLIDE llamado TDIF para un posicionamiento suave entre pasadas.

Puede funcionar a una frecuencia de 115200 baudios y ofrece datos de posicionamiento con una frecuencia de hasta 10 Hz.

Puede proporcionar información en tiempo real sobre la inclinación para máquinas en terrenos accidentados, lo que facilita a los usuarios mejorar la precisión de posicionamiento mediante un algoritmo de compensación de inclinación (20).



Figura 2.10. Antena Harxon TS108PRO (20).

2.3.4 Harxon TS103 base

Harxon TS103 es un receptor base multiconstelación y multifrecuencia que puede procesar las señales L1, L2 y L5 de GPS; L1, L2 de GLONASS; B1, B2 y B3 de BeiDou y E1, E5a y E5b de Galileo. Puede ofrecer datos de posicionamiento con una frecuencia de hasta 10 Hz.

Ofrece correcciones RTK a una tasa de 1 Hz a través de un enlace de radio (21).



Figura 2.11. Antena base TS103 (21).

2.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se han explicado las tecnologías GNSS, abordando las principales constelaciones y sistemas de navegación por satélite. Se ha detallado el principio de funcionamiento básico de los sistemas de navegación actuales, que se basa en la trilateración, y se ha analizado la estructura de la señal del sistema GPS. Después de examinar las constelaciones, se han abordado los principales errores asociados a las tecnologías de navegación por satélite. En la siguiente sección, se han explorado algunos sistemas o tecnologías para corregir o reducir estos errores.

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS EMPLEADAS

Una vez explicados los fundamentos teóricos de la tecnología GNSS, se han examinado las antenas utilizadas en las pruebas realizadas para el estudio, junto con la explicación de sus características principales.

Capítulo 3:
**Análisis estático de antenas GNSS; estudio científico
del estado del arte**

Capítulo 3: Análisis estático de antenas GNSS; estudio científico del estado del arte

En este capítulo se realiza un estudio cronológico de algunos artículos que realizan un análisis en estático de antenas GNSS. Este estudio estará centrado en el análisis de antenas utilizadas en agricultura de precisión, aunque también se estudiará en otros ámbitos debido a que la literatura de antenas dedicadas a la agricultura se centra más en el rendimiento en dinámico y el análisis en estático es escaso. Este análisis se centra en los métodos que se llevan a cabo para realizar las pruebas, las tecnologías empleadas y en algunos de los resultados reseñables obtenidos por los autores.

Posteriormente se realiza un análisis más detallado de algunos de los artículos anteriores que se consideren más relevantes por los métodos utilizados para llevar a cabo las pruebas, explicando más detalladamente las pruebas y los resultados obtenidos.

3.1 Análisis cronológico

En 1998, Jayanta y colaboradores, investigaron la influencia de los trayectos múltiples en antenas GPS en estático y propusieron un sistema para mitigar su influencia (22). Colocaron seis antenas sobre una plancha de aluminio con la disposición mostrada en la Figura 3.1 y conociendo la geometría de la configuración, propusieron un modelo matemático para estimar y mitigar los trayectos múltiples. Recogieron datos durante varias sesiones en días sucesivos en la azotea de un edificio en la que había dos paredes de hormigón de tres metros de altura, que junto a la plancha de aluminio sobre la que estaban colocadas las antenas, aumentarían los trayectos múltiples. Con el modelo utilizado consiguieron reducir el efecto de los trayectos múltiples en un 70 %.



Figura 3.1. Disposición de las antenas durante la prueba (22).

En 2002, Gao y colaboradores, estudiaron el uso de Internet como enlace de comunicación entre las estaciones base y móvil para el desarrollo de un sistema cinemático en tiempo real (RTK) basado en Internet (23). Para ello realizaron pruebas en estático y en dinámico. En las pruebas en estático situaron dos antenas sobre unos pilares en el tejado de la universidad de Calgary cuyas coordenadas eran conocidas. Utilizaron dos receptores, uno como base y otro como móvil. El receptor base que generaba los datos diferenciales se conectó a través de un cable RS232 a un ordenador que ponía los datos en línea a través de internet. El receptor móvil se conectó a internet recibiendo así las correcciones. Durante la prueba, el número de satélites visibles varió entre 7 y 8 y el valor DOP estuvo entre 1.6 y 2.4. Los datos de la Tabla 1 demuestran una precisión centimétrica durante la prueba, no superando los 5 cm de error máximo horizontal. En la prueba en dinámico se configuró todo de manera similar al caso estático, pero el receptor móvil se situó en un vehículo que trazó una trayectoria de referencia. En el análisis en dinámico también se alcanzó una precisión centimétrica.

	<i>Maximum Error</i>	<i>Mean Error</i>	<i>Standard Deviation</i>	<i>RMS</i>
Latitude	-0.023	-0.007	0.004	0.008
Longitude	0.041	0.004	0.006	0.007
Height	-0.186	-0.006	0.011	0.012

Tabla 1. Valor máximo, medio, RMSE y desviación estándar de las pruebas en estático (en metros) (23).

En 2011, Specht y colaboradores, realizaron una evaluación del sistema DGPS marítimo de Polonia tras la modernización del mismo en el año 2009 (24). Utilizaron un artículo anterior publicado por ellos mismos en 2005 como referencia del rendimiento anterior a la modernización. En el estudio realizaron pruebas en estático durante 26 días para determinar la cobertura y la precisión absoluta y relativa. Las correcciones se transmitieron desde una base de referencia situada a 40 km de distancia. Las precisiones relativas y absolutas fueron casi las mismas. Obtuvieron un error RMSE horizontal de 0.21 m frente a los 1.02 m de 2005. El error se redujo aproximadamente cinco veces. El error RMSE 3D, incluyendo la altura, fue de 0.402 m frente los 1,76 m de 2005. El rango en la cobertura máximo aumentó desde los 150 km en 2005 hasta los 200 km.

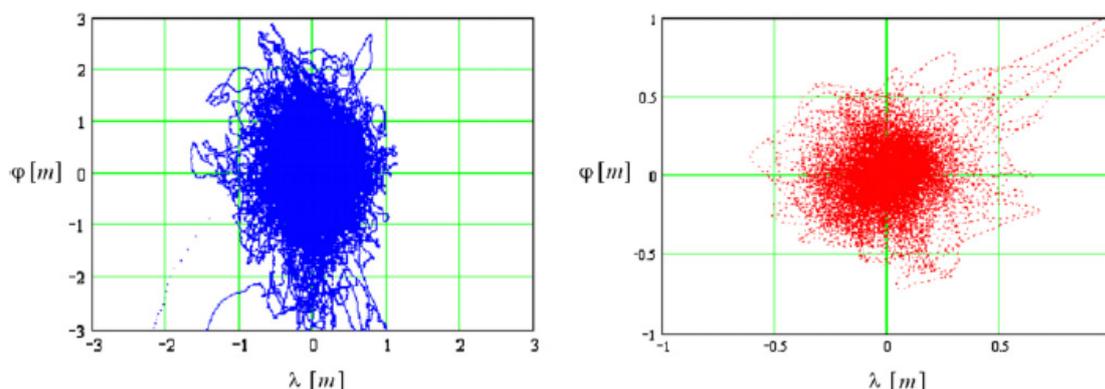


Figura 3.2. Diagrama de dispersión de los datos tomados durante las pruebas de 2005, a la izquierda y en 2011, a la derecha (24).

En 2015, Ming y colaboradores, realizaron un estudio de las desviaciones verticales en antenas GNSS geodésicas (25). Realizaron pruebas durante 24 horas con antenas geodésicas comparando la diferencia de altura tal como muestra la configuración de la Figura 3.3 y calcularon la diferencia

entre la altura medida y la altura real. Obtuvieron desviaciones verticales que iban entre 1mm a 8 mm para las distintas antenas utilizadas.

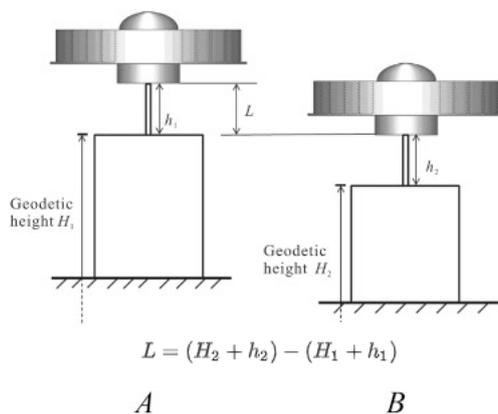


Figura 3.3. Colocación de las antenas sobre puntos geodésicos para realizar las medidas de las desviaciones verticales (25).

En 2016 Skoglund y colaboradores realizaron una comparativa de receptores GPS-RTK de bajo costo mediante pruebas en estático y en dinámico (26). Para las pruebas en estático colocaron una antena en la azotea de un edificio a cielo abierto y la conectaron a tres receptores de bajo costo. El RTK se obtuvo a través de una base a través de radio situada en el mismo edificio. Durante los primeros 10 minutos de la prueba la posición fue bastante inexacta, luego las precisiones mejoraron. Los tres receptores ofrecieron un rendimiento similar en condiciones estáticas. Las pruebas dinámicas se realizaron con un coche autónomo en un campo de pruebas. Obtuvieron desviaciones del orden de metro en los tres conjuntos de mediciones.

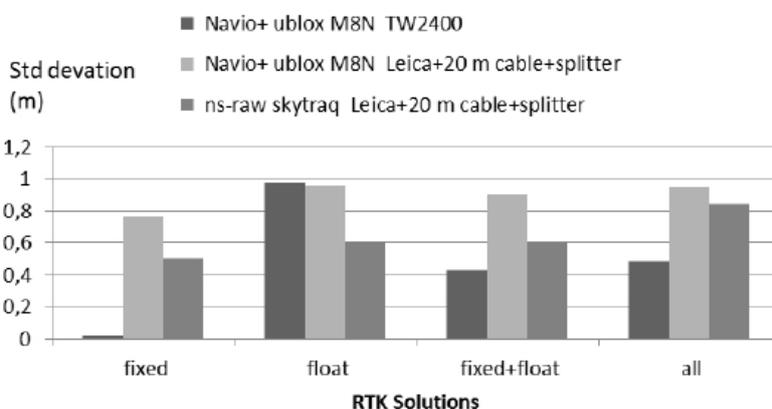


Figura 3.4. Desviación estándar de los tres receptores en las pruebas estáticas (26).

En 2016, Kabir y colaboradores, evaluaron la precisión en el posicionamiento de un receptor de una frecuencia y de una constelación (Single-GNSS) y de un receptor multifrecuencia y multiconstelación (27). Realizaron pruebas en estático y en dinámico en tres entornos: en un campo con cielo abierto, en una huerta con zonas arboladas y en una carretera que pasaba al lado de una montaña y con árboles a los dos lados. Para las pruebas en estático montaron las antenas en trípodes a una altura de 1.8 m sobre el suelo y tomaron datos durante 15 minutos en varias pruebas y realizaron el promedio de los resultados. La antena Single GNSS se configuró en modo GPS y DGPS y la antena multi-GNSS se configuró en Single Point Positioning (SPP) y Precise Point Positioning

(PPP). El CEP para la Single-GNSS en GPS fue de 0.141 m, 0.111 m y 1.14 m para campo abierto, huerta y montaña respectivamente. El CEP para la Single-GNSS en DGPS fue de 0.063 m, 0.082 m y 0.583 m para campo abierto, huerta y montaña respectivamente. El CEP para la multi-GNSS en SPP fue de 0.217 m, 0.77 m y 2.82 m para campo abierto, huerta y montaña respectivamente. El CEP para la multi-GNSS en PPP fue de 0.048 m, 0.116 m y 0.53 m para campo abierto, huerta y montaña respectivamente. Para las pruebas en dinámico se montaron las antenas en la cabina de un tractor y se condujo manualmente por una trayectoria recta en los tres entornos descritos anteriormente. El RMSE obtenido para la Single-GNSS en GPS fue de 0.2 m, 0.233 m y 1.56 m para campo abierto, huerta y montaña respectivamente. El RMSE para la Single-GNSS en DGPS fue de 0.168 m, 0.221 m y 1.37 m para campo abierto, huerta y montaña respectivamente. El RMSE para la multi-GNSS en SPP fue de 0.767 m, 1.93 m y 8.84 m para campo abierto, huerta y montaña respectivamente. El RMSE para la multi-GNSS en PPP fue de 0.664 m, 0.26 m y 5.63 m para campo abierto, huerta y montaña respectivamente.



Figura 3.5. Zonas de pruebas. Campo abierto, huerta con árboles y carretera cerca de una montaña, respectivamente (27).

En 2017, Msaewe y colaboradores, realizaron un estudio en el que analizaron la contribución de otros sistemas GNSS para mejorar la calidad en el posicionamiento respecto a usar únicamente GPS (28). Realizaron pruebas en estático, simultáneamente en Reino Unido y China estudiando la disponibilidad, la precisión y el ruido de GPS, GLONASS y BeiDou funcionando de manera individual y de manera conjunta. Evaluaron GPS, GLONASS en Reino Unido y GPS, GLONASS y BeiDou. en China. En Reino Unido, la solución con solo GPS mostraba brechas temporales, mientras que añadiendo GLONASS se alcanzaba una disponibilidad del 100%. En el caso de China, las opciones individuales de GPS y BeiDou tenían una disponibilidad del 100%, pero la opción de GLONASS era ligeramente inferior. Respecto a la precisión, GPS obtuvo una precisión similar en China y Reino Unido. En Reino Unido, GPS fue más preciso que GLONASS y más preciso que GLONASS y BeiDou en China. La opción multi-GNSS fue más precisa que con una sola constelación al mejorar la geometría satelital y ayudando también a reducir el ruido.

En 2018, Guo y colaboradores, publicaron un artículo con el objetivo de evaluar la viabilidad de multi-GNSS PPP para aplicaciones de Agricultura de Precisión, remarcando las diferencias entre usar las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou individualmente o conjuntamente en multi-GNSS (29). Realizaron tres experimentos, uno en estático y dos en dinámico para analizar el número de satélites visibles, el DOP y la precisión de cada prueba. En el experimento en estático obtuvieron una desviación estándar de 1.9 cm para solo GPS, 0.12 cm para GPS y GLONASS y de 0.6 cm para todas las constelaciones juntas. El número de satélites visibles fue mayor en el modo multi-GNSS que con cada una de las constelaciones individuales, lo que permitía un PDOP mejor. En consecuencia, el PPP multi-GNSS mostró mejor precisión y repetibilidad que con un solo sistema GNSS, especialmente con obstrucciones de señal.

En 2018, Manzino y colaboradores, realizaron un estudio comparativo del rendimiento de la combinación de las constelaciones GPS-GLONASS y GPS-BeiDou en Europa (30). Utilizaron dos receptores GNSS de bajo costo uno como base y otro como rover y analizaron las precisiones obtenidas a través de RTK y posicionamiento postprocesado. Realizaron pruebas en estático y en dinámico con el fin de analizar el rendimiento en términos de precisión en solución RTK fija, porcentaje de soluciones falsas, tiempo hasta la primera solución RTK y precisión de la solución flotante para mediciones postprocesadas. Para las pruebas en estático se colocaron dos antenas multiconstelación y multifrecuencia en el tejado de un edificio a 1 m de la base y se recogieron datos con RTK en pruebas de 5 minutos, 1 hora y 24 horas. En los periodos cortos de tiempo hubo mayor dificultad de alcanzar la solución fija. Las precisiones con RTK y la solución postprocesada fueron similares con precisión milimétrica. El desempeño de ambos grupos de constelaciones fue similar, aunque las precisiones de GPS-GLONASS eran mejores para los períodos de observación más largos. GPS-BeiDou funcionó mejor durante el período de 1 hora cuando la geometría satelital de GPS-BDS y GPS-GLONASS fue comparable. Respecto al tiempo de obtención de la primera corrección fue bastante menor en el caso de GPS-Beidou que en GPS-GLONASS.



Figura 3.6. Antena rover a la izquierda y antena base a la derecha (30).

En 2019, Zhang y colaboradores, evaluaron el rendimiento RTK de un módulo de bajo costo (31). Realizaron un experimento de línea de base cero, un experimento estático y varios experimentos en dinámico en distintos entornos. El experimento de línea de base cero sirvió como referencia de los errores del posicionamiento RTK. Se obtuvieron errores RMSE de 0.12 cm en la coordenada este, 0.29 cm en el norte y 0.94 cm en la componente vertical. En el experimento estático se obtuvo el RTK a través de una estación de referencia virtual VRS. Se tomaron datos durante 12 h con la antena a cielo abierto sobre el tejado de un edificio. Obtuvieron errores RMSE de 0.8 cm en la coordenada este, 0.9 cm en la coordenada norte y 1.4 cm en la coordenada vertical.

En 2019, Ilci y colaboradores publicaron un artículo en el que evaluaron el rendimiento de la tecnología RTX de Trimble y la compararon con RTK en red (32). Analizaron el rendimiento de posicionamiento de la tecnología RTX con un receptor de doble frecuencia. Tomaron datos en 14 puntos de prueba separadas 20 km entre sí en sesiones en estático a lo largo de 280 km en la región del norte de Anatolia como se muestra en la Figura 3.7. En cada punto tomaron datos RTX, datos RTK obtenidos a partir de una única base (SBRS) y datos RTK obtenidos de cada una de las bases de referencia marcadas con un punto negro más cercanas. La precisión horizontal obtenida de estas

últimas tiene errores medios entre 1 y 3 cm. En el caso de la base única, los puntos más cercanos de 20 y 40 km tuvieron una precisión centimétrica similar al caso anterior. Conforme la distancia iba aumentando, los errores también aumentaban, hasta en algunos puntos de 20 cm de error medio. Para RTX, el error de posición medio fue de 3 cm o menos.

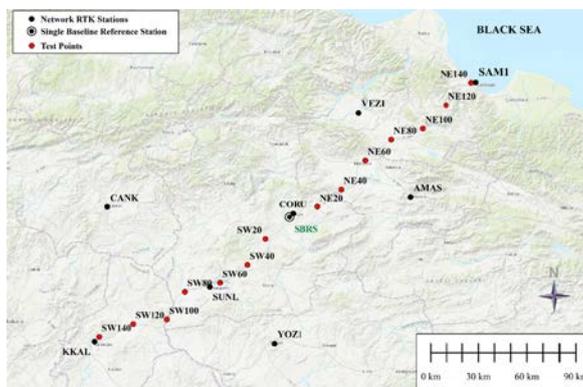


Figura 3.7. Localización de los puntos de medida de datos (puntos rojos), bases de referencia RTK (puntos negros) y base única RTK (punto con círculo) (32).

En 2019, Garrido y colaboradores, analizaron en un estudio la calidad del posicionamiento altimétrico NRTK y su aplicación en un olivar para el modelado de la erosión del suelo (33). Realizaron mediciones GNSS para determinar la precisión vertical en 7 puntos geodésicos de la provincia de Jaén y en un pilar de hormigón construido en un olivar para las pruebas. Obtuvieron precisiones con un valor medio de 20 mm y una desviación estándar de 13 mm.



Figura 3.8. Punto de medición en un olivar (33).

En 2021, Nguyen y colaboradores, publicaron un artículo en el que evaluaron y compararon distintos dispositivos de posicionamiento de bajo costo tomando como referencia otros de gama media y alta en términos de intensidad de la señal GNSS, disponibilidad RTK, tiempo para recuperar la señal RTK después de una pérdida de señal forzada por los autores de 3 segundos y precisión de posicionamiento en pruebas en estático (34). Los dispositivos de posicionamiento de bajo costo fueron capaces de obtener señales de diferentes constelaciones GNSS con una intensidad de señal que variaba de 47 a 52 dB-Hz casi al mismo nivel que el de los de gama media y alta. Todos los dispositivos de posicionamiento, de gama baja, media y alta pasaron casi el 100 % del tiempo de observación en modo de RTK FIX independientemente del tipo de antena y receptor. El tiempo medio de readquisición de la señal RTK en los dispositivos de posicionamiento de bajo costo era de 4 segundos y de 10 y 14 segundos para los de media y alta gama respectivamente. Los dispositivos de posicionamiento de bajo costo proporcionaron una precisión horizontal de 1.8 cm, mientras que

los de gama media ofrecieron una precisión horizontal de 1.2 cm y los de gama alta de 0.3 cm de nivel del posicionamiento RTK estático. Además, podían adquirir el modo fijo RTK en menos de 12 segundos.



Figura 3.9. Lugar y disposición de las antenas en las pruebas en estático (34).

3.2 Análisis detallado

Una vez vistos de manera general algunos de los artículos de los últimos años, se procederá a analizar de manera más detallada algunos de los artículos anteriores que se han considerado más importantes. El objetivo principal de este apartado es ver las distintas formas de proceder de los autores a la hora de realizar las pruebas en estático de manera más detallada, teniendo en cuenta las antenas empleadas, los métodos utilizados a la hora de realizar las pruebas, las tecnologías empleadas y el análisis de los datos obtenidos con las precisiones resultantes.

3.2.1 Kabir y colaboradores. 2016. Performance comparison of single and multi-GNSS receivers under agricultural fields in Korea (27).

En este artículo publicado en 2016 por Kabir y colaboradores, los autores, además de realizar un análisis estático también realizaron un análisis dinámico con el fin de evaluar el rendimiento y la capacidad de posicionamiento de receptores GNSS single y multiconstelación en distintos modos de funcionamiento en lugares típicos de la agricultura coreana como zonas de campo abierto, zonas de huerto arboladas y zonas montañosas.

3.2.1.1 Materiales y métodos.

3.2.1.1.1 Receptores GNSS

Para las pruebas utilizaron el receptor single GNSS R100 de Hemisphere y el receptor multi-GNSS Sigma-G3T. Sigma G3T es un receptor de 216 canales con una precisión de postprocesamiento DGPS inferior a 25 cm y puede procesar las señales de las constelaciones GPS, GLONASS; Galileo y QZSS. EL receptor R100 solo funciona con GPS y permite una corrección diferencial DGPS con una precisión de 60 cm.

GNSS receivers	Item							
	GPS	GLONASS	Galileo	SBAS	QZSS	DGPS accuracy	Channels	Update
Single	L1, C/A	—	—	Yes	—	<0.6 m	12	Up to 20 Hz
Multi	C/A, P1, P2, 2C, L5	C/A, L2C, P1, P2, L3	E1, E5A, E5B	Yes	Yes	<0.25 m	216	Up to 100 Hz

Tabla 2. Especificaciones de los receptores utilizados.

El receptor multi-GNSS se utilizó en los modos de punto único (SP), diferencial de código (CP), y el modo RTK con ambigüedades fijas (PD). Para el procesamiento de datos se utilizó el paquete de software RTKLIB 2.4.2.

GNSS receivers	Modes of operation during stationary and moving tests					
Single-GNSS	DGPS	—	—	—	—	—
Multi-GNSS	SP	SP + QZSS	CD	CD + QZSS	PD	PD + QZSS

Tabla 3. Modos de configuración de los receptores.

3.2.1.1.2 Lugar de pruebas

Se realizaron pruebas en tres entornos diferentes. En campo abierto sin edificios ni árboles, en zona de huertos con árboles de 3 metros de altura de media distribuidos de manera uniforme y separados de media 8 metros y en zonas montañosas, sobre una carretera que atravesaba una montaña cerca de la Universidad de Chungnam en Corea del Norte.



Figura 3.10. Zonas de pruebas. Campo abierto, huerta con árboles y carretera cerca de una montaña, respectivamente.

3.2.1.1.3 Pruebas en estático.

Para realizar las pruebas en estático se montaron las antenas sobre trípodes de 1.8 metros de altura en los tres lugares de pruebas y se tomaron datos durante 15 minutos para cada uno de los modos de la Tabla 3. Se realizaron tres pruebas y se tomó la media de los valores.

3.2.1.1.4 Pruebas en dinámico.

Las pruebas en dinámico se realizaron en carreteras de 40 m de longitud para cada entorno. En campo abierto y zona montañosa, se montaron dos antenas en el techo de un tractor que circulaba a velocidad constante. En el huerto, tanto los receptores GNSS como las unidades de medición se montaron en un vehículo tipo carro que se condujo manualmente lo más recto posible. Al igual que en las pruebas en estático se realizaron tres pruebas para cada modo de funcionamiento y se tomó la media de los valores.



Figura 3.11. Colocación de las antenas (I) y los receptores (II)

3.2.1.2 Resultados y discusión

3.2.1.2.1 Pruebas en estático.

Todos los resultados de las pruebas en estático se muestran en la Tabla 4.

En general, los modos DGPS mostraron mayor precisión que con el modo GPS. En las pruebas en las que se añadió la opción QZSS mejoró la precisión. Respecto a la precisión en los distintos entornos, el entorno en el que las pruebas fueron más precisas, como era de prever, fue a cielo abierto, ya que no existían bloqueos visuales, seguido del huerto y por último de las zonas montañosas.

El receptor multi-GNSS obtuvo mayor precisión que el receptor single GNSS en todas las condiciones experimentadas, sobre todo en las pruebas en huerto y zonas montañosas donde las condiciones de obstrucción de señal eran mayores.

GNSS receivers	Measuring mode	Stationery conditions			Moving conditions	
		CEP (m)	2DRMS (m)	No. of satellites	RMSE (m)	No. of satellites
Open field						
Single GNSS	GPS	0.141	0.337	7.0	0.204	7.6
	DGPS	0.063	0.162	9.5	0.168	7.9
Multi-GNSS (SPP)	SP	0.217	0.528	16.0	0.767	14.0
	SP + QZSS	0.192	0.462	16.0	0.701	14.0
	CD	0.233	0.563	15.6	0.777	14.6
	CD + QZSS	0.209	0.503	18.3	0.665	15.5
	PD	0.245	0.608	17.1	0.627	15.6
	PD + QZSS	0.204	0.493	18.7	0.503	16.0
Multi-GNSS (PPP)	SP	0.048	0.130	16.0	0.664	14.0
	SP + QZSS	0.034	0.094	16.1	0.451	14.0
	CD	0.049	0.119	18.3	0.447	14.2
	CD + QZSS	0.040	0.104	16.8	0.423	15.3
	PD	0.057	0.152	18.0	0.545	15.1
	PD + QZSS	0.031	0.077	18.7	0.152	15.6
Orchard						
Single GNSS	GPS	0.111	0.321	7.2	0.233	6.5
	DGPS	0.082	0.196	7.8	0.221	6.8
Multi-GNSS (SPP)	SP	0.770	1.970	14.3	1.929	14.4
	SP + QZSS	0.368	0.885	13.0	1.867	15.5
	CD	0.440	1.050	14.0	2.170	13.2
	CD + QZSS	0.402	0.964	14.0	1.806	14.3
	PD	0.701	1.770	14.4	1.810	12.1
	PD + QZSS	0.365	0.876	14.5	1.790	12.8
Multi-GNSS (PPP)	SP	0.116	0.311	13.0	0.264	14.4
	SP + QZSS	0.101	0.244	13.0	0.201	15.0
	CD	0.068	0.165	14.0	0.307	11.2
	CD + QZSS	0.078	0.198	14.0	0.269	11.7
	PD	0.074	0.189	14.3	0.202	11.0
	PD + QZSS	0.056	0.162	14.8	0.182	11.2
Mountainous area						
Single GNSS	GPS	1.14	3.058	5.1	1.557	5.0
	DGPS	0.583	1.720	5.2	1.372	5.1
Multi-GNSS (SPP)	SP	2.822	6.766	10.9	8.842	15.0
	SP + QZSS	2.694	6.462	12.0	6.384	15.1
	CD	2.163	5.258	10.9	8.546	8.6
	CD + QZSS	2.162	5.193	11.0	4.715	13.1
	PD	2.858	6.852	9.9	6.102	11.0
	PD + QZSS	1.813	4.441	11.6	4.267	11.3
Multi-GNSS (PPP)	SP	0.533	1.360	9.8	5.633	9.1
	SP + QZSS	0.456	1.090	10.2	4.198	12.1
	CD	0.456	1.120	9.8	6.406	8.9
	CD + QZSS	0.379	0.975	10.3	2.488	13.2
	PD	0.717	1.773	9.6	4.871	9.9
	PD + QZSS	0.386	0.929	10.6	1.130	10.1

Tabla 4. Resultados de las pruebas en estático y en dinámico para todos los modos y en todos los entornos.

3.2.1.2.2 Pruebas en dinámico.

Para calcular los valores RMSE del recorrido se creó una línea de regresión de referencia a lo largo de la trayectoria recorrida. En la Tabla 4 se muestran los resultados de las pruebas en dinámico.

En las zonas de montaña se dio un menor número de satélites visibles que en los otros entornos, lo que provocó unas precisiones menores.

Al igual que en las pruebas en estático, las precisiones aumentaron cuando se añadió la constelación QZSS.

El receptor multi-GNSS ofreció mayor precisión en movimiento que el receptor single GNSS en todas las condiciones experimentadas.

3.2.1.3 Conclusiones

El receptor multi-GNSS ofreció mejores precisiones en las pruebas en estático y en dinámico que el receptor single GNSS.

La precisión mejoró al añadir la opción de QZSS. El número de satélites visibles fue mayor para el receptor multi-GNSS para todas las pruebas sobre todo en condiciones de difícil visibilidad como la huerta y la montaña.

3.2.2 Msaewe y colaboradores. 2017. Investigating multi-GNSS performance in the UK and China based on a zero-baseline measurement approach (28).

Msaewe y colaboradores estudiaron la contribución de otros sistemas GNSS para mejorar la calidad en el posicionamiento respecto a usar únicamente GPS. Estudiaron la precisión en el posicionamiento, la disponibilidad, el ruido en el posicionamiento y otros factores de los sistemas GLONASS, BeiDou y GPS, tanto individualmente como combinados. Realizaron pruebas en estático durante 12 días consecutivos en Reino Unido y en China simultáneamente.

3.2.2.1 Análisis preliminar.

Los autores realizaron un análisis preliminar para determinar que receptores usarían para las pruebas definitivas entre varios receptores disponibles. En este análisis tomaron datos durante una hora para seleccionar los receptores con mejores prestaciones y que tuvieran un comportamiento equiparable en China y en Reino Unido. Para dichas pruebas montaron una antena Leica AR10 en el tejado de un edificio de la Universidad del Nottingham en Reino Unido y la conectaron a dos pares de receptores multi-GNSS Leica-GS10 y Trimble-NET9. Simultáneamente, en China, en el tejado de un edificio de la Universidad de Nottingham Ningbo, montaron una antena LEIAR25R4 conectada a través de un divisor a cuatro pares de receptores multi-GNSS: Javad-TRIUMPH, ComNav K508, Unicore UR240 y Septentrio ASTERX2EL.

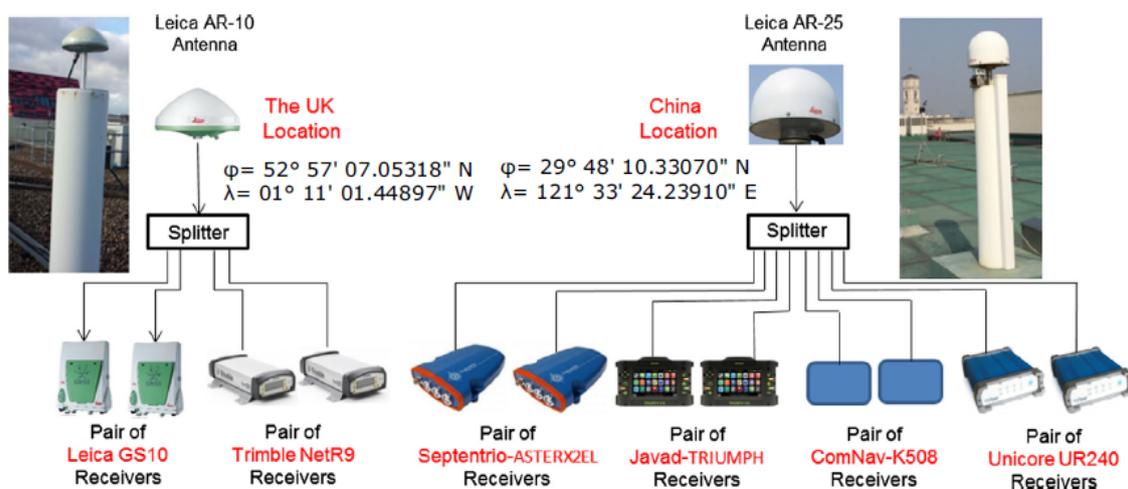


Figura 3.12. Esquema de conexión de las antenas y receptores durante las pruebas preliminares.

De cada par de receptores utilizaron uno como base y otro como rover. Los datos GNSS fueron procesados usando RTKLIB v2.4.2. De cada receptor calcularon el valor medio y la desviación estándar de las coordenadas este, norte y vertical.

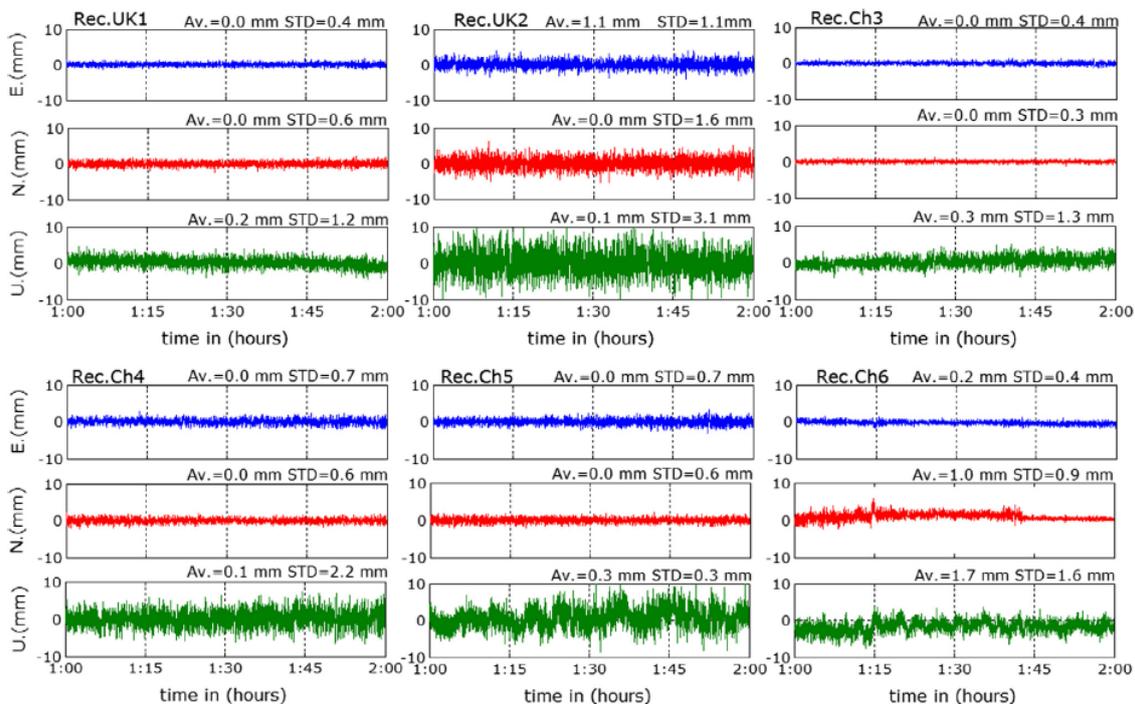


Figura 3.13. Gráficas con los datos recogidos con solo GPS para los seis receptores.

Const.	Site	Receivers type	Mean (mm)			STD (mm)		
			E	N	U	E	N	U
GPS	UK	Rec.UK1	0.0	0.0	0.2	0.4	0.6	1.2
		Rec.UK2	0.0	0.0	0.1	1.1	1.6	3.1
	China	Rec.Ch3	0.0	0.0	0.3	0.4	0.3	1.3
		Rec.Ch4	0.0	0.0	0.1	0.7	0.6	2.2
		Rec.Ch5	0.0	0.0	0.6	0.7	0.6	2.7
		Rec.Ch6	0.2	1.0	-1.7	0.4	0.9	1.6
GLO	UK	Rec.UK1	0.2	0.3	4.1	0.4	0.9	2.4
		Rec.UK2	0.2	0.3	6.0	0.8	1.4	3.5
	China	Rec.Ch3	-0.1	0.0	2.3	0.4	0.5	2.6
		Rec.Ch4	0.0	0.1	1.1	0.3	0.3	2.2
BDS	China	Rec.Ch3	0.0	-0.1	5.0	0.4	1.7	3.2
		Rec.Ch4	0.0	-0.2	5.6	1.1	1.0	4.3
		Rec.Ch5	0.0	-0.1	5.0	0.5	0.5	2.4
		Rec.Ch6	0.0	-0.1	4.7	0.2	0.2	1.4

Figura 3.14. Valor medio y desviación estándar por receptor y coordenada.

De los dos pares de receptores del Reino Unido, la desviación estándar del Rec.UK2 era mayor que la del Rec.UK1, especialmente en la componente vertical. La constelación BeiDou en el Reino Unido no se evaluó en el análisis preliminar debido a la presencia limitada de satélites BeiDou.

En la comparación de los receptores en China, el Rec.Ch3 era el que mostraba una desviación estándar menor para todas las constelaciones en general.

Además, para evaluar la calidad de los datos GNSS, aplicaron un análisis de autocorrelación a los datos para ver si estaban contaminados con ruido blanco.

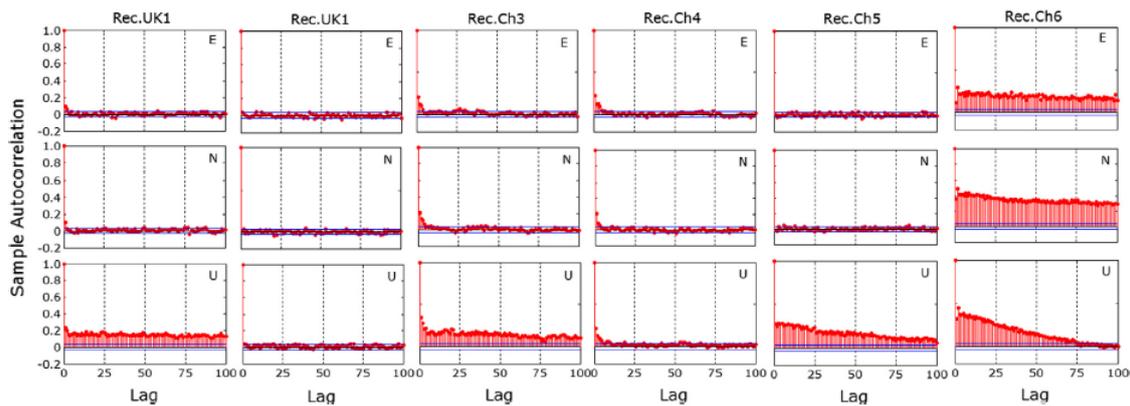


Figura 3.15. Coeficientes de autocorrelación para los seis receptores con solo GPS.

Observaron que los datos del GPS no estaban correlacionados y aparecía ruido blanco para la mayoría de los receptores. También observaron que la mayoría de las componentes horizontales no estaban correlacionadas mientras que las componentes verticales tenían un ligero sesgo.

Finalmente, para las pruebas definitivas en Reino Unido escogieron el receptor Rec.UK1. En las pruebas de China escogieron el Rec.Ch3 por ser el de mayor precisión para las constelaciones de GLONASS y GPS, y el receptor Rec.Ch5 por mostrar menos ruido en las pruebas con la constelación BeiDou y tener buena precisión.

3.2.2.2 Análisis

Para las pruebas definitivas utilizaron los receptores seleccionados en las pruebas preliminares en pruebas simultaneas en Reino unido y China durante 12 días consecutivos con el fin de ver el desempeño de las diferentes constelaciones a través de la precisión posicional y la disponibilidad de solución fija.

3.2.2.2.1 Disponibilidad y precisión en Reino Unido.

En Reino unido probaron las constelaciones de GPS, GLONASS y la combinación de ambas. GPS y GLONASS, funcionando individualmente, tuvieron algunos fallos de disponibilidad, pero funcionando en conjunto, ofrecieron una disponibilidad del 100%. GPS tuvo una disponibilidad menor que GLONASS, debido a una geometría de los satélites fue peor durante algunos momentos, cuando la solución correspondía a valores de DOP extremadamente altos y el software excluía de la solución final, o no había solución debido al número limitado de satélites en esos intervalos.

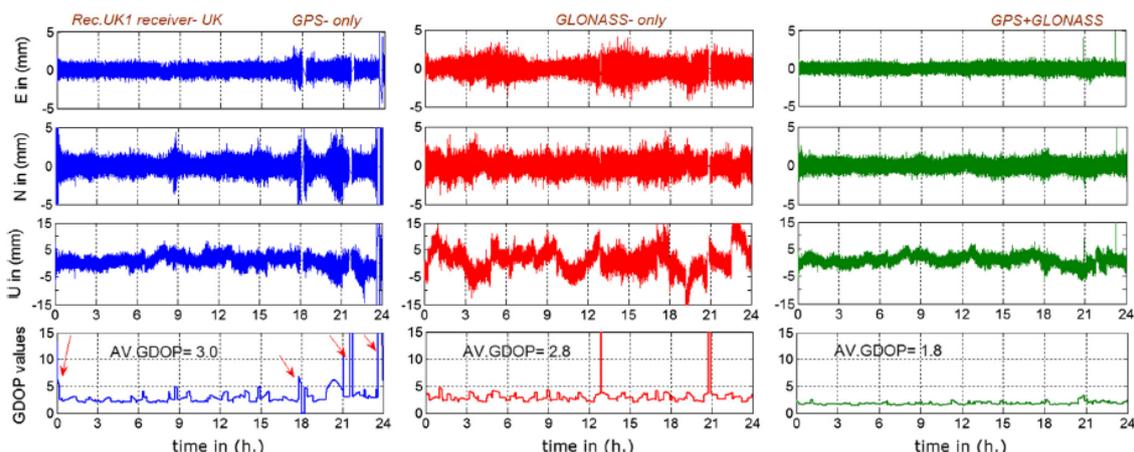


Figura 3.16. Datos obtenidos y DOP en las pruebas con solo GPS, solo GLONASS y GPS + GLONASS durante el primer día.

Solution	No. of total epochs	No. of solved epochs	No. of unsolved epochs "gaps"	Percentage of solved fixed solution "availability" (%)	STD of positional precision in mm		
					E	N	U
GPS-only	86,400	84,129	2,282	97.4	0.5	0.9	2.0
GLONASS-only	86,400	85,610	790	99.1	0.7	0.8	4.2
GPS/GLONASS	86,400	86,400	0	100.0	0.4	0.5	1.7

Tabla 5. Disponibilidad y desviación estándar para solo GPS, solo GLONASS y GPS + GLONASS.

Respecto a la precisión del posicionamiento, la solución con solo GPS fue más precisa que la solución con solo GLONASS en las componentes este y vertical, mientras que la solución solo GLONASS fue más precisa para la componente norte. La combinación de ambas ofreció la solución más precisa en todas las componentes. La suma de GPS y GLONASS favorecía una geometría satelital mejorada que reducía los valores del DOP y resultaba en una precisión superior.

3.2.2.2.2 Disponibilidad y precisión en China.

En las pruebas en China, también se añadió al análisis la constelación BeiDou y las combinaciones de esta con GPS.

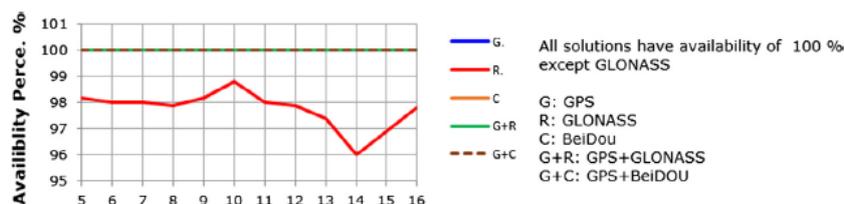


Figura 3.17. Disponibilidad de las combinaciones de constelaciones testadas

Tanto GPS como BeiDou ofrecieron una disponibilidad del 100%, lo que indicaba una cobertura óptima debido al número adecuado de satélites. Con respecto a solo GLONASS, la disponibilidad fue ligeramente inferior, lo que indicaba que no había suficientes satélites GLONASS disponibles y que la geometría era débil.

Respecto a la precisión, GPS obtuvo valores similares en China que en Reino Unido en las coordenadas este y vertical y un poco peor en la coordenada norte. En el caso de GLONASS, obtuvo precisiones significativamente peores en China que en Reino Unido debido a la peor disponibilidad

de los satélites GLONASS en China. La constelación BeiDou se analizó con los receptores Rec.Ch3 y Rec.Ch5 y los resultados se muestran en la Figura 3.18.

Receivers type	Const.	Mean (mm)			STD (mm)		
		E	N	U	E	N	U
Rec.Ch3	G	0.0	0.0	1.1	0.3	0.4	2.1
	C	0.0	0.1	0.4	0.7	2.0	4.4
	G+C	0.0	0.0	0.2	0.4	1.0	2.6
Rec.Ch5	G	0.0	0.0	1.1	0.5	0.7	4.0
	C	0.0	0.0	0.4	0.4	0.6	3.4
	G+C	0.0	0.0	0.6	0.3	0.4	2.3

Figura 3.18. Comparativa de la constelación BeiDou con GPS con los receptores Rec.Ch3 y Rec.Ch5.

El receptor Rec.Ch3 mostró mejor comportamiento con GPS y el Rec.Ch5 mejor con BeiDou y con BeiDou+GPS.

3.2.2.3 Correlación de ruido y constelación de satélites

Realizaron un análisis de correlación lineal entre los valores DOP y la desviación estándar de las soluciones GNSS para cuantificar el impacto de la geometría de la constelación de satélites en la precisión. El objetivo principal de estos estudios era examinar si una constelación de satélites adicional podía mejorar el nivel de ruido centrándose en la constelación general y no en satélites específicos.

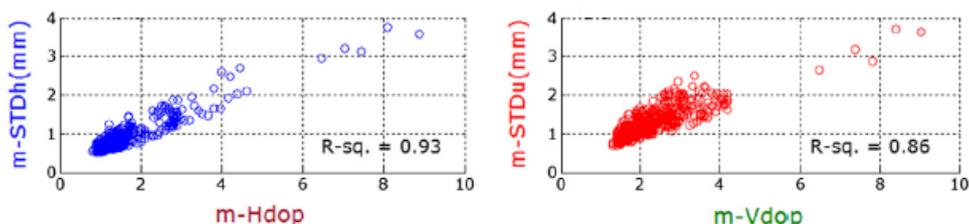


Figura 3.19. Dispersión de la correlación entre la desviación estándar y el DOP horizontal, a la izquierda y el DOP vertical, a la derecha en Reino Unido.

La correlación entre los valores DOP con la desviación estándar de los datos obtenidos en Reino Unido dio como resultado 0,93 y 0,86 para las componentes horizontal y vertical, respectivamente. La correlación revelaba que las mediciones de GPS correspondientes a valores de DOP superiores a 5 eran extremadamente ruidosas y podían considerarse como valores atípicos. Al rechazar estas medidas el coeficiente de correlación disminuyó a 0,81 y 0,68 para las componentes horizontal y vertical, respectivamente.

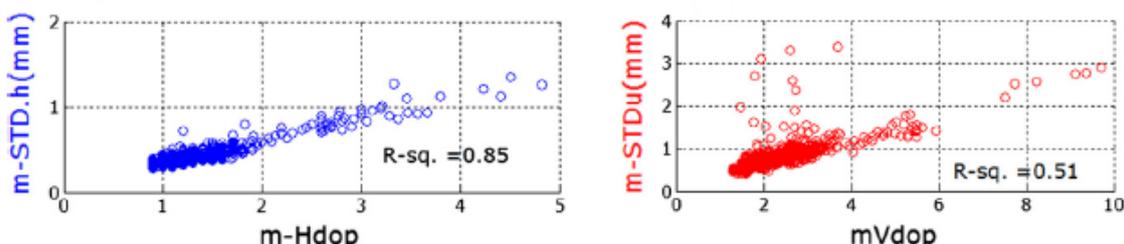


Figura 3.20. Dispersión de la correlación entre la desviación estándar y el DOP horizontal, a la izquierda y el DOP vertical, a la derecha en China.

Con respecto a los datos obtenidos en China, la correlación entre la desviación estándar de las componentes horizontal y vertical y los valores DOP fue de 0,85 y 0,51, respectivamente. Las

diferencias entre los dos conjuntos en el Reino Unido y China se debían al diferente nivel de ruido y la diferente disposición de satélites para las dos ubicaciones.

3.2.2.4 Análisis espectral.

Para analizar los resultados anteriores en el dominio de la frecuencia analizaron los datos recogidos en intervalos de una hora utilizando la técnica espectral llamada Periodograma de Lomb.

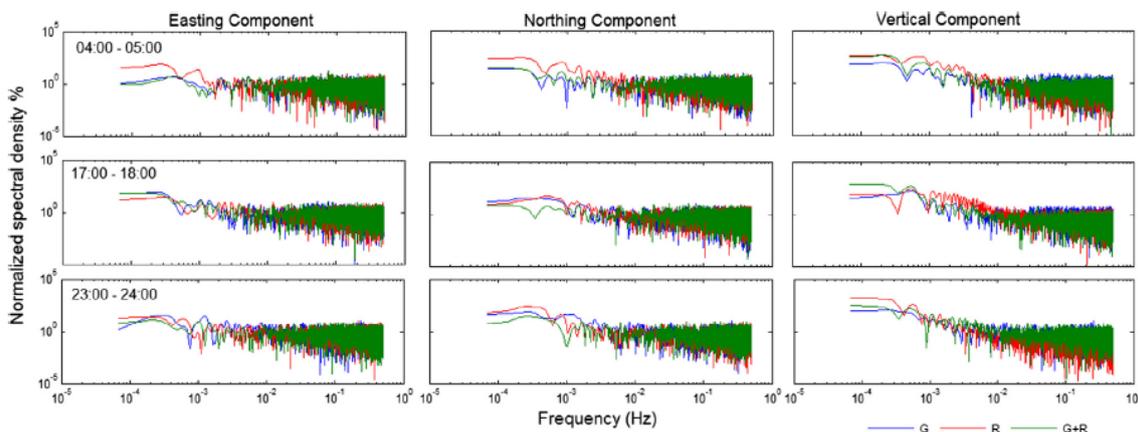


Figura 3.21. Espectro de las componentes este, norte y vertical para las constelaciones de GPS, GLONASS y GPS + GLONASS en Reino Unido en tres intervalos de una hora.

En el espectro de los datos recogidos en Reino Unido de la Figura 3.21 se observa que para los casos en los que los datos de GPS se caracterizaban principalmente por ruido blanco, la contribución de GLONASS apenas se notaba. Sin embargo, cuando existían lagunas en los datos del GPS, el espectro correspondiente se caracterizaba por picos significativos en bandas de frecuencia específicas e introducía más ruido de color en la banda de frecuencias menores a 0.05 Hz. Para esos casos, la contribución de GLONASS podía mejorar el espectro, ya que la amplitud de los picos se volvía más pequeña.

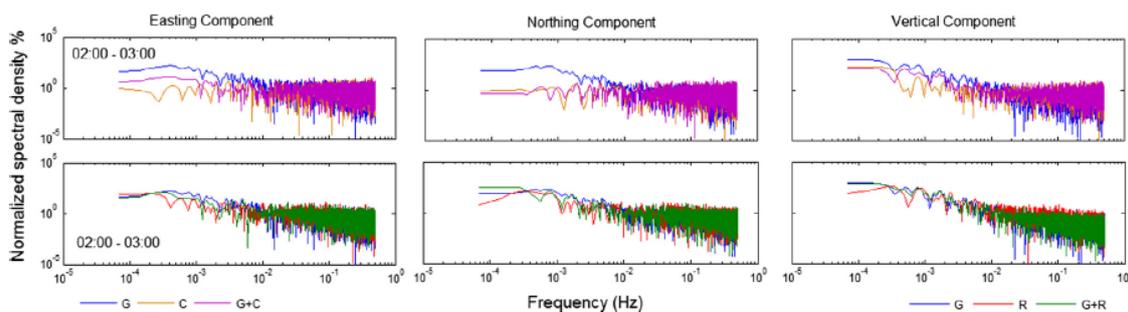


Figura 3.22. Espectro de las componentes este, norte y vertical para las constelaciones de GPS, GLONASS y GPS + GLONASS y GPS, BeiDou y GPS + BeiDou en China durante una hora.

De manera parecida a Reino Unido, la contribución de BeiDou en China era beneficiosa para los casos en los que los datos del GPS presentaban un fuerte ruido de color para frecuencias menores a 0.05 Hz.

3.2.2.5 Conclusiones

Tras las pruebas y análisis realizados, los autores concluyeron que con la solución multi-GNSS se aumenta la disponibilidad respecto a las soluciones individuales, reduciendo las brechas temporales y

ayudando a obtener una geometría satelital más favorable. La solución combinada contribuye a eliminar la mayoría de los valores atípicos, limita el impacto de los satélites problemáticos y mejora la precisión posicional lograda al reducir los valores de DOP. Además, la solución combinada puede reducir el ruido en comparación con la solución individual.

3.2.3 Guo y colaboradores. 2018. Multi-GNSS precise point positioning for precision agricultura (29).

En 2018, Guo y colaboradores, realizaron un estudio con el fin de determinar la viabilidad del posicionamiento de punto preciso (PPP) multi-GNSS en agricultura de precisión. Realizaron una prueba en estacionario y dos pruebas en dinámico para determinar las diferencias al utilizar solo el GPS o utilizar el multi-GNSS PPP.

3.2.3.1 Materiales y métodos.

3.2.3.1.1 Lugar de pruebas

Realizaron tres experimentos, dos en dinámico y uno en estático.

El experimento en estático se realizó en la azotea de un edificio de la Universidad de Newcastle en Reino Unido a cielo abierto situando dos antenas Leica AS10 conectadas a los receptores Leica Viva GS10 sobre una barra de acero separadas medio metro entre sí y se instaló una antena Leica GS15 en el medio para proporcionar la solución PPP.

En el primero de los experimentos en dinámico se condujo un camión durante 2 horas en un campo cerca de la Universidad de Newcastle. Los mismos receptores que en el caso estático se colocaron en el camión sobre una barra de acero de la misma manera, pero las antenas estaban separadas 763mm.

El segundo experimento en dinámico se llevó a cabo situando los receptores en un tractor que daba vueltas alrededor de una granja del Centro Nacional de Investigación de Ingeniería para Tecnologías de la Información en Agricultura de Pekín, en China. Montaron dos antenas Trimble R8-4 conectadas a receptores Trimble NetR9 separadas 432mm sobre la cabina del tractor.

3.2.3.1.2 Receptores Multi-GNSS y configuración.

Para el experimento en estático y para el primer experimento en dinámico utilizaron los receptores multi-GNSS Leica Viva GS10 y GS15. Y para el último experimento en dinámico utilizaron el receptor de Trimble NetR9. Todos estos receptores podían obtener señales GNSS de las constelaciones GPS, GLONASS, BeiDou y Galileo en varias frecuencias, y disponían de 555, 150 y 440 canales para obtener las señales respectivamente para GS10, GS15 y NetR9. Además, todos admitían correcciones RTK.

3.2.3.2 Resultados y discusión.

3.2.3.2.1 Experimento estacionario

En la Figura 3.23 se muestra el número de satélite visibles y PDOP para cada sistema GNSS y para la suma de todas las constelaciones. Los satélites visibles de GLONASS se mantuvieron estables en torno a 5 satélites. Durante los primeros diez minutos, solamente se observó un satélite del sistema GPS, y luego subió a nueve y se mantuvieron entre ocho y diez durante el resto de la

prueba. Galileo y Beidou fueron los sistemas en los que menos satélites fueron visibles con uno o dos satélites durante casi toda la prueba. El multi-GNSS comenzó con nueve satélites visibles, cinco de ellos de GLONASS, mientras en GPS era solamente un satélite visible durante los primeros diez minutos. Cuando los satélites de GPS aumentaron después de los diez primeros minutos, los satélites del multi-GNSS se mantuvieron entre dieciséis y diecinueve. El PDOP solamente se tuvo en cuenta de los sistemas GLONASS y GPS debido a los pocos satélites visibles de los otros dos sistemas. Para GLONASS, el PDOP osciló entre 4 y 6 m. En GPS no hubo valores PDOP durante los primeros diez minutos debido al bajo número de satélites, después el PDOP se situó entre 1.5 y 4 m. En el sistema multi-GNSS debido al mayor número de satélites, el PDOP se mantuvo por debajo de los 1.5m durante la prueba. Esto sugiere una ventaja del multi-GNSS sobre un solo sistema.

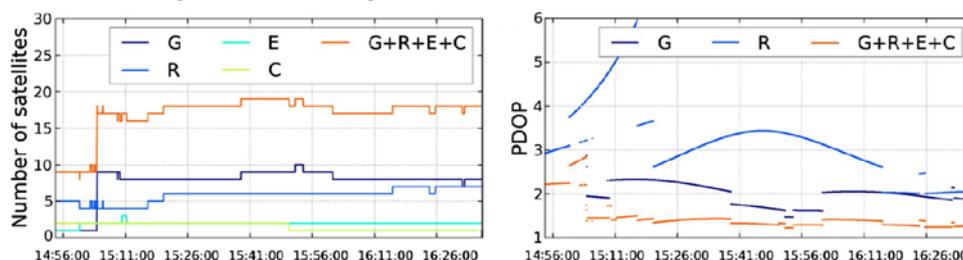


Figura 3.23. Número de satélites y PDOP durante la realización del experimento en estático. GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E) y BeiDou (C).

En la Figura 3.24 se muestran la longitud entre antenas sobre la barra de acero de las soluciones PPP utilizando todas las constelaciones, GPS/GLONASS y solo GPS. Durante los diez primeros minutos utilizando solo GPS no hubo PPP, debido a que solo había un satélite visible. La solución solo GPS mostró menor repetibilidad y precisión que las otras soluciones, ya que la desviación estándar mostrada en la Tabla 6 es la mayor. La longitud media medida de la solución GPS (491,0 mm) fue la más cercana a la realidad (500,0 mm), pero fue la menos precisa, pues su valor RMSE fue el mayor. Con las cuatro constelaciones se obtuvo una media similar a solo GPS pero el valor RMSE fue menor.

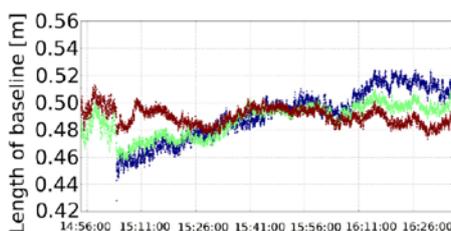


Figura 3.24. Longitud medida entre antenas con la solución PPP usando solo GPS, en azul; GPS y GLONASS, en verde y todas las constelaciones en rojo para el experimento en estático.

Solution	GPS			GPS + GLONASS			ALL		
	Mean	Stdev	RMSE	Mean	Stdev	RMSE	Mean	Stdev	RMSE
EPs1	0.491	0.019	0.062	0.487	0.012	0.041	0.490	0.006	0.034

Tabla 6. Media, desviación estándar y valor RMSE para la solución PPP mediante solo GPS, GPS/GLONASS y todas las constelaciones. Medidas en metros.

En la Figura 3.25 se muestran las posiciones calculadas por RTK y PPP del receptor Leica Viva GS15 situado entre los dos receptores Leica Viva GS10. La solución PPP se calculó promediando las

soluciones de las otras dos antenas, ya que estaba entre ellas. La solución RTK se obtuvo a partir de la opción SmartNet RTK.

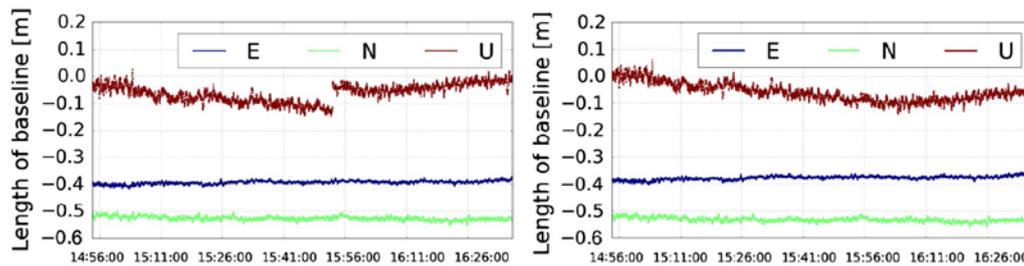


Figura 3.25. Coordenadas este (azul), norte (verde) y altura (rojo) de las soluciones PPP (izquierda) y RTK (derecha) del receptor Leica Viva GS15

Este experimento estacionario sugiere que se puede lograr una precisión de nivel centimétrico mediante el enfoque PPP. Además, multi-GNSS no solo puede mejorar la repetibilidad de PPP, sino también hacer posible el posicionamiento cuando se ha rastreado una cantidad limitada de satélites de un solo sistema GNSS.

3.2.3.2.2 Experimento dinámico

En la Figura 3.26 se muestra el número de satélites para cada configuración y el PDOP. Galileo fue la constelación en la que menos satélites fueron visibles durante la prueba, comenzando con uno, a las dos horas aumentó a dos y terminó con tres. Beidou fue la siguiente con menos satélites visibles con cuatro durante gran parte de la prueba. Los satélites visibles de GLONASS oscilaron en torno a siete durante toda la prueba y, por último, GPS fue en la que más satélites fueron visibles, comenzando con seis y terminando con diez. Con todas las constelaciones, los satélites visibles siempre estuvieron por encima de 15 satélites y por debajo de 25. Al igual que en el caso estático existe gran correlación entre el número de satélites visibles y el PDOP.

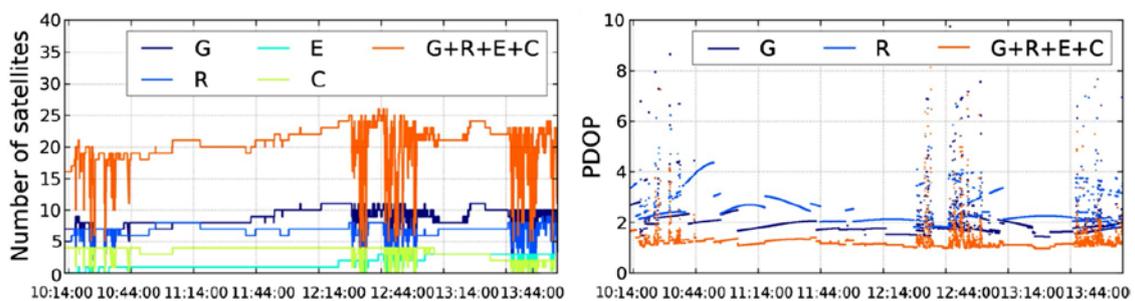


Figura 3.26. Número de satélites y PDOP durante la realización del primer experimento en dinámico. GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E) y BeiDou (C).

En la Figura 3.27 se muestran las soluciones PPP usando todas las constelaciones y usando únicamente GPS. Existen rendimientos similares en ambos casos con una desviación estándar igual y una media y valor RMSE muy similares.

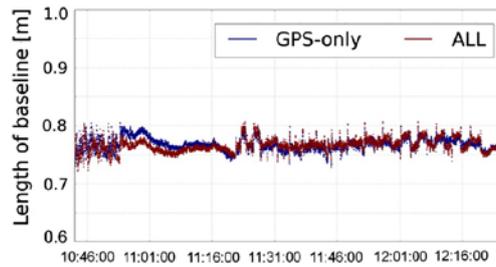


Figura 3.27. Longitud medida entre antenas con la solución PPP usando solo GPS, y todas las constelaciones en rojo para el primer experimento en dinámico.

Solution	GPS			ALL		
	Mean	Stdev	RMSE	Mean	Stdev	RMSE
EPm1	0.768	0.011	0.013	0.767	0.011	0.012

Tabla 7. Media, desviación estándar y valor RMSE para la solución PPP mediante GPS, y mediante todas las constelaciones. Medidas en metros

Mientras que los experimentos anteriores se llevaron a cabo en el Reino Unido, el segundo experimento en dinámico se llevó a cabo en China y se rastrearon hasta 10 satélites BeiDou. Los satélites GPS y GLONASS tuvieron buena visibilidad, cada uno con 7 o más satélites. El número total de satélites visibles de la suma de todas las constelaciones fue de hasta 26 con variaciones periódicas debido a que el tractor repetía la misma ruta en la que había edificios y zonas arboladas salvo en un periodo de descanso del operario.

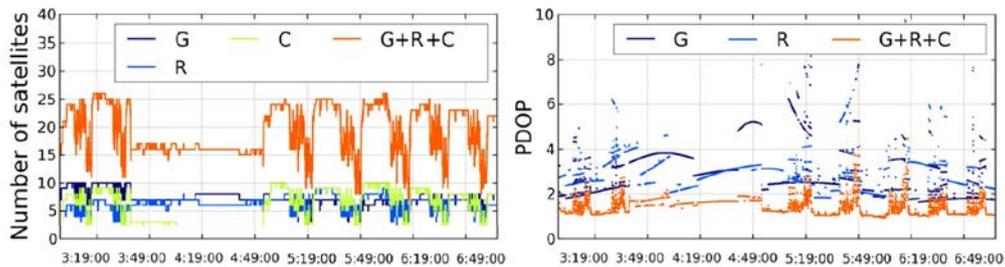


Figura 3.28. Número de satélites y PDOP durante la realización del experimento en estático. GPS (G), GLONASS (R) y BeiDou (C).

En la Figura 3.29 se muestra la distancia entre antenas obtenidas a partir de las soluciones PPP. Con solo GPS se observan discontinuidades debido a las interferencias con los edificios y los árboles. Con la solución multi-GNSS se obtuvo resultados más estables y los saltos se redujeron con la disminución de la desviación estándar. Además, la longitud media medida fue la más precisa (435mm) a la realidad (432 mm).

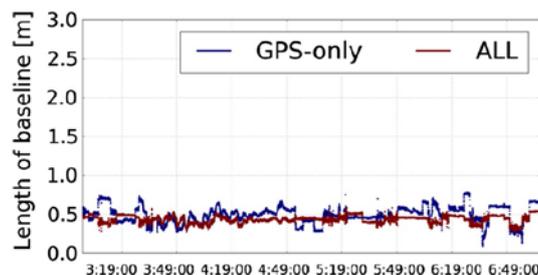


Figura 3.29. Longitud medida entre antenas con la solución PPP usando solo GPS, en azul y todas las constelaciones en rojo para el segundo experimento en dinámico.

Solution	GPS			ALL		
	Mean	Stdev	RMSE	Mean	Stdev	RMSE
EPm2	0.494	0.110	0.126	0.435	0.048	0.035

Tabla 8. Media, desviación estándar y valor RMSE para la solución PPP mediante GPS, y mediante todas las constelaciones. Medidas en metros.

Multi-GNSS mejoró la disponibilidad de los satélites y mejoró la precisión y la estabilidad del posicionamiento, especialmente donde había obstrucciones para los satélites GNSS. Además, la precisión estaba a nivel de centímetros, que es comparable al RTK. Por lo tanto, multi-GNSS puede ser una opción para usuarios agrícolas para aplicaciones de requisitos de alta precisión en agricultura de precisión.

3.2.3.3 Conclusiones

El número de satélites visibles fue mayor en el modo multi-GNSS que con cada una de las constelaciones individuales en las tres pruebas, lo que permite un PDOP mejor.

El PPP multi-GNSS mostró mejor precisión que con un solo sistema GNSS, especialmente con obstrucciones de señal.

El PPP multi-GNSS mostró mejor repetibilidad, lo que permite trabajar en condiciones de poca visibilidad.

Se puede lograr una precisión comparable a la de RTK sin necesidad de una red amplia de estaciones base. PPP tiene mayor flexibilidad y menor capital y costos de funcionamiento.

3.2.4 Nguyen y colaboradores. 2021. Performance evaluation of a typical low-cost multi-frequency multi-GNSS device for positioning and navigation in agriculture –Part 1: Static testing (34)

Los autores buscaron comparar el rendimiento de receptores y antenas GNSS de distintos precios en términos de intensidad de la señal GNSS, disponibilidad RTK, precisión de posicionamiento, y tiempo para la primera corrección con el fin de comprobar si los receptores de bajo costo se podían equiparar a receptores superiores y ser adoptados en sistemas de autoguiado para máquinas agrícolas.

3.2.4.1 Materiales y métodos.

3.2.4.1.1 Dispositivos de prueba

Para la evaluación en estático utilizaron el receptor de bajo costo u-blox ZED-F9P, el receptor de gama media Hemisphere P326 y el receptor de gama alta Hemisphere A325 de la Tabla 9. El Trimble SPS855 se usó como base. Todos ellos son de múltiples frecuencias, multiconstelación y con capacidad RTK. Las antenas utilizadas son las de la Tabla 10. Cuatro de bajo costo y tres antenas geodésicas. El receptor de bajo costo se evaluó con todas las antenas, mientras que los otros receptores se tomaron como referencia. Se conectó el receptor Hemisphere P326 con la antena Hemisphere A52 y el receptor Trimble SPS855 con la antena Trimble ZEPHYR2. La antena Hemisphere lleva incorporado su propio receptor.

Item	Receiver classification			
	Low-cost	Comparison	Ground truth	Fixed base station
Receiver name	u-blox ZED-F9P	Hemisphere P326	Hemisphere A325	Trimble SPS855
Firmware	HPG 1.12	v5.9Aa08	v5.9Aa08	v5.30
Outline image	Fx1	Fx2	Fx3	Fx4
Reception capability*	GREC	GRC	GR	GREC
Max. update rate	20Hz	50Hz	50Hz	20Hz
Communication protocol	NMEA0183 UBX binary	NMEA 0183	NMEA 0183	RTCM3.0 RTCM3.2
Price	US\$300	US\$6,320	US\$6,800	US\$17,000
Connected antenna	Low-cost and geodetic	A52	Built-in	ZEPHYR2

* G:GPS, J:QZSS, R:GLONASS, C:BEIDOU, E:GALILEO

Tabla 9. Especificaciones principales de los receptores utilizados en las pruebas.

Classification	Item			
	Antenna name	Image (size, mm)	Reception capability	Price
Low-cost	u-blox ANN-MB-00	FX5 (60.0 × 82.0 × 22.5)	GREC	US\$85
	STOTON TOP107	FX6 (58.0xφ27.5)	GREC	US\$142
	ZHEJIANG JC JCA225S	FX7 (76.3xφ66.5)	GREC	US\$142
	ZHEJIANG JC JCA228	FX8 (62.5xφ146.5)	GREC	US\$170
	Geodetic Hemisphere A325	FX9 (104.0xφ145.0)	GR	-
	Hemisphere A52	FX10 (76.0xφ185.0)	GREC	US\$1,500
Geodetic	Trimble ZEPHYR2	FX11 (76.0xφ165.0)	GREC	US\$2,000

Tabla 10. Especificaciones principales de las antenas utilizadas en las pruebas.

3.2.4.1.2 Lugar de prueba

Las pruebas se realizaron en la azotea de un edificio a cielo abierto rodeada de vallas metálicas. Las antenas se situaron en mástiles sobre las vallas.



Figura 3.30. Lugar de pruebas y antenas

3.2.4.1.3 **Medición de intensidad de señal**

En la Tabla 11 se muestra la configuración de todos los dispositivos. Los datos de las antenas se capturaron con la aplicación TeraTerm con una frecuencia de muestreo de 1 Hz y una tasa de transmisión de 38400 bps durante 24h.

Item		Receiver		
		ZED-F9P	P326	A325
Antenna		ANN-MB-00, TOP107, JCA225S, JCA228, A52, ZEPHYR 2	A52	Built-in
Output data	C/No measurement RTK positioning	GPGSV, GLGSV, GAGSV, GBGSV GNGGA	GPGSV, GLGSV, GBGSV GPGGA	GPGSV, GLGSV GPGGA
Output rate		1Hz	1Hz	1Hz
Baud rate		38,400 bps	38,400 bps	38,400 bps
Observation signal		GPS L1/L2, GLONASS L1/L2, GALILEO E1/E5b, BEIDOU B1/B2	GPS L1/L2, GLONASS L1/L2, BEIDOU	GPS L1/L2, GLONASS L1/L2
RTCM version of RTK correction	FBS RRS VRS	RTCM3.2 RTCM3.2 RTCM3.0	RTCM3.2 RTCM3.2 RTCM3.0	RTCM3.0 RTCM3.0 RTCM3.0
Observation time		24 hours	24 hours	24 hours

Tabla 11. Configuración de los dispositivos

3.2.4.1.4 **Medición de disponibilidad de RTK fijo y precisión de posicionamiento estático.**

Las correcciones de RTK a los rovers se realizaron usando el software de código abierto de Lebefure NTRIP client de RTKLIB a una base situada a 9 km de distancia (Medum baseline, MBL) y mediante la antena SPS855 situada a pocos metros (Short Baseline, SBL). La medición del posicionamiento RTK se realizó utilizando una aplicación C# desarrollada por los autores. Se registró el porcentaje de tiempo total de la observación que los receptores pasaron en RTK FIX.

3.2.4.1.5 **Medida de tiempo de arranque para obtener la primera posición RTK FIX.**

Para medir el tiempo de arranque se utilizó una configuración similar a la del posicionamiento salvo una tasa de muestreo de 10 Hz y una tasa de transmisión de 230400 bps y se utilizó FBS para transmitir datos de corrección para medir el tiempo de arranque. Para la prueba se borraron las estructuras de datos de copia de seguridad, la hora, la posición, el almanaque y las efemérides. Se hicieron diferentes modos de reinicio del receptor en frio, medio y caliente durante el posicionamiento.

3.2.4.1.6 **Medida de tiempo de readquisición de señal RTK.**

El tiempo de readquisición se midió bloqueando las señales GNSS mientras estaban en funcionamiento. El bloqueo de la señal GNSS se realizó encendiendo y apagando un relé de radiofrecuencia controlado por una placa de Arduino que recibía comandos de la aplicación de medida para apagar repetidamente el relé 3 segundos después de que se confirmara la primera posición con RTK válida adquirida. La medición se realizó continuamente 120 veces en aproximadamente 2 horas.

3.2.4.2 **Resultados y discusión**

3.2.4.2.1 **Resultados de las mediciones de la señal GNSS.**

En la Figura 3.31 se muestra la intensidad de señal máxima y promedio para cada grupo de receptor y antena. Respecto a los valores promedio totales, las antenas de bajo costo ANN-MB-00, JCA225S y JCA228 recibieron mayor intensidad de señal que las antenas geodésicas ZEPHYR2 y

A52 cuando se combinaron con el receptor ZED-F9P y valores similares a las combinaciones de gama media y alta P326/A2 y A325.

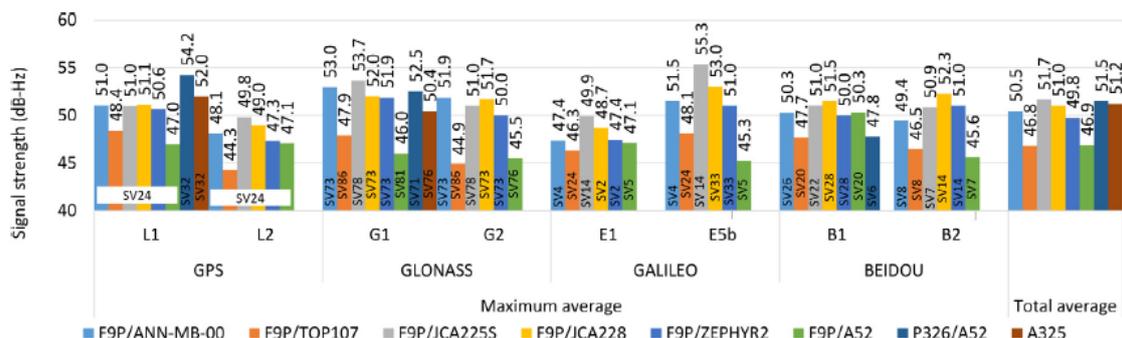


Figura 3.31. Medida de la intensidad de señal para cada grupo de receptor y antena.

3.2.4.2.2 Resultados de medición de precisión de posicionamiento y disponibilidad fija RTK

Todos los dispositivos pasaron casi el 100% del tiempo en RTK fijo durante la prueba lo que indica que los dispositivos de bajo costo pueden ofrecer un posicionamiento estable. Respecto a la precisión los dispositivos de bajo costo obtuvieron precisiones horizontales entre 0.3 y 1.8 cm y verticales de 0.7 a 2.2 cm, que fueron casi similares a las de P326/A52 de 1,2 cm y 3,4 cm, respectivamente. La combinación de bajo costo ZED-F9P/TOP107 proporcionó la mayor precisión horizontal cercana al rendimiento de posicionamiento del A325, que obtuvo una precisión horizontal de 0,3 cm. La precisión de ZED-F9P/ANN-MB-00 fue la más baja de las de bajo costo con 2 cm. Las combinaciones de antenas geodésicas ZEPHYR2 y A52 con el receptor de bajo costo ZED-F9P obtuvieron una alta precisión horizontal de 0,4 cm y una precisión vertical de 0,7 cm, lo que muestra un claro efecto de la calidad de la antena en el rendimiento de posicionamiento de SBL RTK.

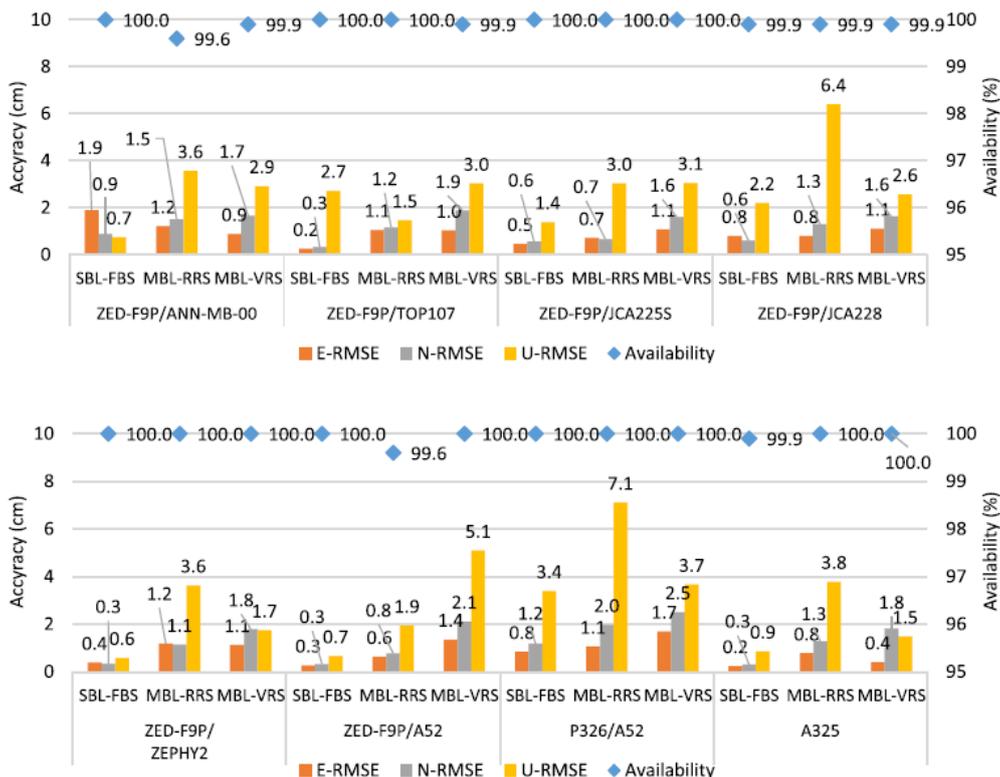


Figura 3.32. Disponibilidad RTK y precisión en el posicionamiento.

3.2.4.2.3 Resultados del tiempo de arranque para obtener la primera posición RTK FIX

Aunque durante la prueba de posicionamiento de 24h el RTK FIX se mantuvo estable durante toda la prueba, durante la prueba de arranque se produjeron periodos, desde varios segundos hasta varias horas, en el modo RTK FLOAT antes de obtener la solución RTK FIX.

Los datos generales indicaron que las antenas de bajo costo TOP107, JCA225S y JCA228 tuvieron un buen rendimiento en comparación con las antenas A52 y ZEPHYR2 con el receptor ZED-F9P, y mucho más rápido que los receptores de gama media y alta.

Receiver	Antenna	Start mode	Number of starts	Number of timeouts	Maximum timeout (s)	RTK-TIFF (s) 5 th percentile	95 th percentile
ZED-F9P	ANN-MB-00	Cold	1,211	4	1,502	30.3	39.2
		Warm	4,071	4	3,692	8.9	13.9
		Hot	2,467	421	15,856	5.8	12.8
ZED-F9P	TOP107	Cold	437	29	431	30.7	47.9
		Warm	4,612	1	79	9.0	13.2
		Hot	6,010	20	1,113	4.6	7.8
ZED-F9P	JCA225S	Cold	1,874	9	5,445	25.2	37.6
		Warm	4,668	2	1,590	8.9	12.9
		Hot	4,383	14	1,140	4.4	7.5
ZED-F9P	JCA228	Cold	2,119	2	444	23.9	36.8
		Warm	4,593	2	1,531	8.2	13.3
		Hot	5,821	12	1,045	5.0	8.9
ZED-F9P	A52	Cold	2,141	6	421	27.6	36.7
		Warm	2,218	58	7,861	9.2	35.2
		Hot	5,953	16	33	4.5	7.9
ZED-F9P	ZEPHYR2	Cold	2,179	7	1,964	22.4	36.1
		Warm	4,781	0	-	11.4	13.2
		Hot	5,953	16	33	4.5	7.9
P326	A52	Hot	240	0	-	26.0	33.0
A325	A52	Hot	219	19	169	40.0	73.0

Tabla 12. Resultados de tiempo de arranque en distintos modos.

3.2.4.2.4 **Resultados de las mediciones del tiempo de readquisición de señal RTK.**

El bloqueo de la señal durante 3 segundos redujo el número de satélites visibles a cero e hizo perder el RTK FIX.

El tiempo de readquisición varió de 1.4 a 6.1 segundos para los dispositivos de bajo costo, y de 6.8 a 13.2 s y de 11.0 a 17.8 s para los receptores de gama media y alta, respectivamente, lo que indica un excelente rendimiento del tiempo de readquisición del receptor ZED -F9P. Entre las antenas de bajo costo, JCA228 fue la que obtuvo el mejor rendimiento de readquisición de señal.

El tiempo de readquisición del posicionamiento SBL fue aproximadamente 1 segundo más rápido que en el caso del MBL.

Receiver	Antenna	Correction source	Number of RTK-fixes	Number of timeouts	Maximum timeout (s)	RTK-TTRF (s) 5 th percentile	95 th percentile
ZED-F9P	ANN-MB-00	FBS	5,874	1	40	1.4	4.2
		RRS	5,225	49	2,540	1.8	5.2
ZED-F9P	TOP107	FBS	5,934	10	610	1.6	4.2
		RRS	4,953	24	16,341	1.7	4.9
ZED-F9P	JCA225S	FBS	6,081	2	64	1.5	4.2
		RRS	5,409	57	2,436	1.9	6.1
ZED-F9P	JCA228	FBS	5,627	0	-	1.9	3.9
		RRS	5,702	8	227	1.8	4.9
ZED-F9P	A52	FBS	5,114	13	4,292	1.9	4.7
		RRS	5,716	10	1,028	2.4	5.8
ZED-F9P	ZEPHYR2	FBS	5,859	44	511	1.5	3.6
		RRS	6,078	2	439	1.8	4.2
P326	A52	FBS	4,235	65	61	6.8	12.9
		RRS	4,279	33	2,436	7.2	13.2
A325		FBS	120	0	-	11.0	17.8
		RRS	120	0	-	11.2	17.0

Tabla 13. Datos del tiempo de readquisición de señal RTK FIX

3.2.4.3 **Conclusiones**

Los dispositivos de posicionamiento de bajo costo fueron capaces de rastrear satélites de diferentes constelaciones GNSS con una intensidad de señal que variaba de 47 a 52 dB-Hz casi al mismo nivel que el de los PD de gama media y alta.

Los dispositivos de posicionamiento de bajo costo proporcionaron una precisión horizontal de 1 cm y 2 cm de nivel del posicionamiento RTK estático en 24 h para la base a corta distancia SBL a 2 m y para media distancia MBL a 9 km, respectivamente. Esta precisión es lo suficientemente buena para las aplicaciones estáticas en la agricultura, como las recopilaciones de datos georreferenciados para muestreo de suelo o planificación de rutas de máquinas.

Los dispositivos de posicionamiento de bajo costo también proporcionaron un excelente rendimiento en el tiempo de adquisición y readquisición de señales RTK FIX. Fueron significativamente más rápidos que los de los de gama media y alta con tiempos de 12 y 4 segundos de tiempo de arranque y readquisición respectivamente.

Con respecto a la información de corrección de posición GNSS transmitida desde la estación base, los dispositivos de posicionamiento de bajo costo también podían proporcionar un alto rendimiento de posicionamiento RTK con una precisión de posicionamiento de nivel centimétrico cuando se reciben mensajes de corrección RTK desde una estación de referencia local, una estación de referencia real o una referencia virtual estación.

3.3 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se han visto algunos de los principales artículos sobre la evaluación de antenas GNSS en estático, tanto para aplicaciones de agricultura como para otro tipo de aplicaciones, principalmente geodésicas. Las pruebas en estático, independientemente de la aplicación futura de las antenas, consisten principalmente en dejar las antenas y los receptores GNSS durante un determinado periodo de tiempo al aire libre tomando datos. Posteriormente, los autores analizan la disponibilidad de los satélites, la disposición de los satélites en el cielo, la calidad e intensidad de la señal y la precisión en el posicionamiento.

Aunque los análisis en estático no son definitivos a la hora de evaluar la precisión de una antena para su posterior uso en la agricultura, ya que el comportamiento estático no tiene por qué ser el mismo que en dinámico, debido a que las antenas tienen otros sistemas internos para trabajar en dinámico, puede dar una primera aproximación de su posterior uso en dinámico.

Respecto a las conclusiones obtenidas por los autores, estos indican que es recomendable utilizar el modo multiconstelación, ya que se aumenta el número de satélites, y en consecuencia aumenta la disponibilidad de los satélites lo que hace que mejore la señal y se produzcan menos pérdidas de señal.

En términos de precisión, entre las distintas tecnologías usadas por los autores, la tecnología RTK es la más precisa de todas ellas, con una precisión del orden de unos pocos centímetros. Pero se pueden usar otras tecnologías según la precisión que requiera la labor que se vaya a realizar. RTK, que ofrece precisión centimétrica en el tiempo, sería adecuada para sembrar y realizar tareas en regadío que necesitan más precisión. Tecnologías o antenas que ofrezcan precisiones de decímetros serían suficientes para arar o para labores en secano, mientras que otras que ofrezcan precisiones del orden del metro serán suficientes para aplicaciones como las de abonar o echar herbicidas.

Capítulo 4: Evaluación del rendimiento en estático de sistemas gratuitos de corrección GNSS para el guiado

Capítulo 4: Evaluación del rendimiento en estático de sistemas gratuitos de corrección GNSS para el guiado de tractores¹

En este capítulo se evalúa el rendimiento de sistemas de corrección GNSS gratuitos para el guiado de tractores. Se evaluaron tres tipos de receptores GNSS, un Navilock NL-8022MP, un Novatel Smart2 y un Harxon TS108PRO, tres sistemas de corrección, EGNOS, NRTK y RTK, y una tecnología propia, GLIDE, en pruebas en estático. Los resultados en estático sugieren que (i) los receptores GNSS de bajo coste de 100 € sin datos de corrección permitirían guiar el tractor con errores típicos entre pasadas a corto plazo de aproximadamente 1 metro RMS, precisión que permitiría un guiado regular en la fertilización cuando la referencia es una pasada anterior realizada en la última hora, (ii) EGNOS mejoraría la precisión de guiado permitiendo alcanzar errores de pasada a pasada a corto plazo de 0.5 metros RMS, precisión que sugeriría un buen guiado para fertilización y un guiado regular en pulverización (iii) GLIDE mejoraría el guiado de precisión entre pasadas a corto plazo. La precisión de nivel submétrico de GNSS+SBAS+GLIDE alcanzaría precisiones de 10 cm y permitiría un guiado aceptable en fertilización y pulverización, y un guiado regular en siembra, cosecha y labranza, (iv) NRTK alcanzaría un guiado de precisión a corto y largo plazo de 2 cm, precisión que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas con una única restricción: al menos una estación de referencia debe estar a menos de 50 km del tractor, y (v) RTK alcanzaría una precisión de guiado a corto y largo plazo de 1 cm, que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas sin restricciones, pero requiere colocar una costosa estación de referencia cerca del tractor, no estando entonces justificado el uso de RKT si los agricultores disponen de NRTK.

¹ Este capítulo es la traducción al español de una versión *draft* en inglés de un artículo científico que va a ser enviado a una revista científica con factor de impacto JCR. Este artículo, se realizó por un grupo de tres investigadores: **Ángel Alonso García**, alumno de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad de Valladolid y autor de este TFG, realizó las pruebas con las antenas, utilizó el programa TeraTerm para adquirir los datos de las antenas, realizó un programa en *Matlab* para procesarlos y generó todas las gráficas y figuras del artículo. **Jaime Gómez Gil**, profesor en la ETSI de Telecomunicación de la Universidad de Valladolid, propuso el estudio, definió la estructura de la información a presentar en el artículo y redactó en inglés el mismo. **Sergio Alonso García**, ingeniero y doctor por la Universidad de Valladolid, proporcionó *know-how* para la conexión y configuración de las antenas y proporcionó todo el material necesario.

4.1 Introducción

La Agricultura de Precisión (AP) es una estrategia de gestión agrícola que hace uso de las tecnologías de la información en la agricultura (35–37). La AP se asocia con tecnologías como GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), aplicación de tasa variable (VRA) y sistemas de autoguiado (38,39). Algunas tecnologías de AP como la guía GNSS han sido adoptadas rápidamente por los agricultores, mientras que la adopción es lenta en otras tecnologías como la VRA. Por ejemplo, según datos estadounidenses de 2016, el 59 % de las explotaciones de maíz utilizaban el guiado por GNSS, mientras que solo el 29 % utilizaban VRA en la fertilización. El guiado por GNSS se ha adoptado en todo el mundo tan rápido como cualquier otra tecnología agrícola importante de la historia (40).

El posicionamiento GNSS comenzó en 1973 en Estados Unidos con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) estadounidense. Posteriormente, se desarrollaron el sistema ruso GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System), el sistema europeo Galileo y el sistema chino BeiDou (41). La precisión del posicionamiento GNSS depende principalmente de dos factores: el tipo de receptor y el sistema de corrección empleado.

En las tareas agrícolas se utilizan principalmente dos tipos de receptores: (i) receptores de código, que permiten el Posicionamiento de Punto Único (SPP; en inglés: Single Point Positioning), su precio está alrededor de 100 € y dan una precisión con algunos metros de error (42,43) y (ii) receptores de fase, que permiten el Posicionamiento de Punto Preciso (PPP) y/o el posicionamiento RTK (Cinemático en Tiempo Real), que cuestan por encima de los 1000 € y permiten un posicionamiento con centímetros de error (43,44).

En el posicionamiento GNSS pueden considerarse dos tipos de errores: (i) el posicionamiento de error absoluto, que mide el error desde el punto medido hasta el punto real, y (ii) el posicionamiento de error relativo, que mide la diferencia de errores entre dos puntos medidos GNSS. Precisión absoluta, y precisión año a año son términos que se refieren al posicionamiento absoluto. Precisión relativa, precisión repetible, precisión a corto plazo y precisión entre pasadas son términos relacionados con el posicionamiento relativo. (1,45–47). Para los sistemas de guiado, cuando el tiempo entre pasadas es corto, inferior a 1 hora, y las trayectorias no deben guardarse de un año a otro, la precisión entre pasadas es la magnitud a considerar, en caso contrario, es la precisión de año a año la magnitud que hay que considerar.

Los sistemas de corrección, tecnología que proporciona a los receptores cierta información de errores de posicionamiento desde estaciones de referencia situadas no muy lejos del receptor, pueden clasificarse en cuatro tipos principales según el método de transmisión de las correcciones (48).

GNSS autónomo. Los receptores de código de frecuencia única proporcionan posicionamiento con metros de error (42,43). Este tipo de receptores se utilizan a veces en el guiado asistido de tractores en aplicaciones de fertilización.

Las correcciones vía satélite, o los Sistemas de Aumentación Basados en Satélites (SBAS; en inglés: Satellite Based Augmentation System), donde los satélites transmiten a los receptores la información de corrección. El sistema WAAS (Wide Area Augmentation Systems) es un SBAS de GPS que presta servicios en Norteamérica, el sistema SDCM (System of Differential Corrections and Monitoring) es un SBAS de GLONAS que presta servicios en Rusia, el sistema EGNOS (European

Geostationary Navigation Overlay Service) es un SBAS de Galileo que presta servicios en Europa, y el sistema BDSBAS (BeiDou Satellite-Based Augmentation System) es un SBAS de Beidou que ofrece servicios en China. WAAS, SDCM, EGNOS y BDSBAS son servicios gratuitos que suelen utilizarse en receptores de código de una frecuencia y reducen ligeramente el error de posicionamiento. Otros sistemas SBAS, como John Deere StarFire (49) y Trimble RTX (50), son servicios de suscripción que ofrecen una precisión de unos 30 cm utilizando receptores de fase de doble frecuencia.

Las correcciones vía Internet, utilizan Internet para transmitir a los receptores la información de corrección. Este sistema se utiliza principalmente para transmitir correcciones desde una estación de referencia situada normalmente a menos de 50 km, o desde una red de estaciones de referencia virtuales (VRS; en inglés: Virtual Reference Station), cuyas estaciones están situadas a menos de 50 km entre ellas. Este sistema proporciona normalmente una precisión de centímetros (51). El posicionamiento que utiliza este método de corrección se suele denominar posicionamiento GPS NRTK (Network Real-Time Kinematic). El Gobierno de España proporciona este sistema de corrección de forma gratuita.

Las correcciones por radio, utilizan un enlace de radio para transmitir a los receptores la información de corrección proporcionada por una estación base situada normalmente a no más de 1 km. Se trata del sistema de corrección más preciso, con una precisión de unos 2 cm.(52). El posicionamiento que utiliza este método suele denominarse posicionamiento GPS RTK o posicionamiento GPS diferencial en fase portadora (CPDGPS; en inglés: Carrier-Phase Differential GPS). Se trata de un sistema de corrección gratuito, pero requiere un receptor base.

También existen tecnologías para aumentar la precisión de posicionamiento sin utilizar estaciones de referencia. GLIDE, de la empresa Novatel (53) y e-Dif, de la empresa Hemisphere (54), son dos de estas tecnologías. GLIDE y e-Dif son tecnologías centradas en la mejora de la precisión del posicionamiento relativo, mientras que los sistemas de corrección anteriores son tecnologías centradas en la mejora de la precisión del posicionamiento absoluto.

El guiado GNSS asistido de tractores ayuda a los conductores de tractores a conducir con luces o mediante una pantalla. El equipamiento GNSS asistido es más barato que el guiado GNSS automático, pero ofrece menores precisiones de guiado y menos comodidad para el conductor. El guiado GNSS asistido suele ofrecer errores de 20 cm RMS independientemente de la precisión del posicionamiento GNSS. Aunque el posicionamiento sea muy preciso, por ejemplo, un posicionamiento RTK con pocos cm de error RMS, las tareas agrícolas que requieren precisiones superiores a 20 cm no pueden realizarse con sistemas de guiado asistido (55). El guiado GNSS es más preciso que el guiado manual, pero menos que el guiado automático (56). De esta manera, el guiado asistido ahorra fertilizante y herbicida, pero en menor medida que el automático (57).

El guiado automático GNSS de tractores es la evolución del guiado asistido GNSS de tractores y, a principios de siglo, ya alcanzaba precisiones de cm (58–60). Además de un sistema de posicionamiento absoluto GNSS, los sistemas de guiado automático GNSS precisos requieren un sistema de posicionamiento relativo, como una unidad de medición inercial (IMU), para hacer frente al terreno accidentado en el que trabajan los tractores, para trabajar bien en zonas inclinadas y para disponer de un guiado más estable (61–63). A principios de siglo, la única tecnología de posicionamiento que conseguía una precisión de centímetros en el guiado era el posicionamiento

RTK, mientras que últimamente, el posicionamiento NRTK consigue casi esta precisión reduciendo costes, ya que NRTK, a diferencia de RTK, no requiere que los agricultores coloquen un receptor base cerca del tractor (64,65). Los últimos avances en el guiado de tractores incluyen sistemas para compensar las desviaciones laterales del implemento del tractor (66,67).

Este artículo evalúa receptores GNSS representativos, y sistemas de corrección GNSS que, siempre, o al menos en muchos países, no requieren el pago de tasas por parte de los agricultores.

4.2 Materiales

Este estudio utilizó los siguientes receptores de posicionamiento:

- Navilock NL-8022MP. Se trata de un receptor GNSS de código de bajo coste capaz de procesar señales L1 del sistema GPS, señales E1 del sistema Galileo, señales L1 del sistema GLONASS, señales B1 del sistema BeiDou y señales L1 del sistema QZSS. Utiliza un chipset U-blox y ofrece velocidades de posicionamiento de salida de hasta 10 Hz. Es compatible con sistemas gratuitos de aumentación basados en satélites (SBAS). Según su ficha técnica, ofrece precisiones horizontales de 2,5 m de Error Circular Probable (CEP), y de 2 m CEP con SBAS. El precio de venta al público de este receptor en España en 2023 es de unos 140 € En la Figura 4.1.a se muestra este receptor.
- Novatel Smart2. Se trata de un receptor GNSS de código de coste medio capaz de procesar señales L1, L2 y L2C del sistema GPS, señales E1 y E5b del sistema Galileo, señales L1 y L2 del sistema GLONASS, señales B1I, B2I y B2b del sistema BeiDou, y señales L1 y L2 del sistema QZSS. Utiliza un chipset OEM Hexagon/Novatel y ofrece velocidades de posicionamiento de salida de hasta 20 Hz. Es compatible con SBAS, con la tecnología GLIDE de Novatel y con la técnica PPP (Precise Point Positioning) de la empresa TerraStar. Según su ficha técnica, ofrece precisiones horizontales de 1,5 m (Root Mean Square) RMS en posicionamiento L1, 1.2 m RMS en posicionamiento L1/L2, 60 cm RMS en posicionamiento L1/L2 con SBAS, 40 cm con la suscripción al servicio TerraStar-L PPP y 2 cm con la suscripción al servicio TerraStar-C PRO PPP. Además, este receptor dispone de una tecnología especial, denominada GLIDE, que reduce el error relativo entre pasadas en tareas agrícolas. El precio de venta al público de este receptor en España en 2023 es de unos 1100 € En la Figura 4.1.b se muestra este receptor.
- Harxon TS108PRO. Se trata de un receptor GNSS RTK de altas prestaciones capaz de procesar señales L1, L2 y L5 del sistema GPS, señales E1, E5a y E5b del sistema Galileo, señales L1 y L2 del sistema GLONASS, y señales B1, B2 y B3 del sistema BeiDou. Utiliza un chipset Unicore UM4B0 y ofrece velocidades de posicionamiento de salida de hasta 10 Hz. Según su ficha técnica, ofrece precisiones horizontales de 1,5 m RMS en posicionamiento de punto único, y de 1 cm en posicionamiento RKT. El precio de venta al público de este receptor en España en 2023 es de unos 1900 € En la Figura 4.1.c se muestra este receptor.
- Base Harxon TS103. Se trata de una base GNSS RTK de alto rendimiento capaz de procesar señales L1, L2 y L5 del sistema GPS, señales E1, E5a y E5b del sistema Galileo, señales L1 y L2 del sistema GLONASS, y señales B1, B2 y B3 del sistema BeiDou. Utiliza un chipset Unicore UM4B0 y ofrece velocidades de posicionamiento de salida de hasta 10 Hz. Según su

ficha técnica, ofrece una precisión de medida de código de 10 cm, y de fase portadora de 1 mm. El precio de venta al público de este receptor en España en 2023 es de unos 1.500 €. En la Figura 4.1.d se muestra este receptor.



Figura 4.1. Receptores GPS probados en este estudio. a) Navilock NL-8022MP. b) Novatel Smart2. c) Harxon TS108PRO. d) Base Harxon TS108PRO.

4.3 Métodos

Los receptores GNSS de la sección Materiales coinciden se configuraron en las siguientes configuraciones:

- Configuración 1: El receptor Navilock NL-8022MP se configuró sin SBAS.
- Configuración 2: El receptor Navilock NL-8022MP se configuró con SBAS.
- Configuración 3: El receptor Novatel Smart2 se configuró sin SBAS y sin GLIDE.
- Configuración 4: El receptor Novatel Smart2 se configuró con SBAS y sin GLIDE.
- Configuración 5: El receptor Novatel Smart2 se configuró con SBAS y con GLIDE.
- Configuración 6: El receptor Harxon TS108PRO se configuró sin SBAS.
- Configuración 7: El receptor Harxon TS108PRO se configuró con SBAS.
- Configuración 8: El receptor Harxon TS108PRO se configuró con RTK. La estación de referencia estaba en Bolvir, Girona, España, a 645 km del receptor. Las correcciones diferenciales GNSS se obtuvieron en tiempo real de ERGNSS (Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS), una red de proveedora de RTCM por Internet (NTRIP) propiedad del Instituto Geográfico Nacional (IGN), un organismo público español.
- Configuración 9: Equivalente a la configuración 8, pero la estación de referencia utilizada estaba en Mérida, Badajoz, España, a 296 km del receptor.
- Configuración 10: Equivalente a la configuración 8, pero la estación de referencia utilizada estaba en Aranda de Duero, Burgos, España, a 99 km del receptor.
- Configuración 11: Equivalente a la configuración 8, pero la estación de referencia utilizada estaba en Valladolid, España, a 42 km del receptor.
- Configuración 12: Equivalente a la configuración 8, pero la estación de referencia utilizada estaba en Olmedo, Valladolid, España, a 14 km del receptor.
- Configuración 13: Equivalente a la Configuración 8, pero la referencia era una Estación de Referencia Virtual (VRS; en inglés: Virtual Reference Station) en la ubicación del receptor.
- Configuración 14: El receptor Harxon TS108PRO se configuró con RTK. Las correcciones diferenciales GNSS se obtuvieron de un receptor base Harxon TS103 conectado por radio al TS108PRO. El receptor base estaba a 5 m.

La velocidad de posicionamiento de todas las configuraciones anteriores se fijó en 5 Hz. Los demás parámetros de configuración de los receptores se dejaron por defecto.

Las pruebas estáticas se realizaron colocando dos receptores Navilock NL-8022MP, tres receptores Novatel Smart2, nueve receptores Harxon TS108PRO y una base Harxon TS103, en un tejado con buena visibilidad a cielo abierto (ver Figura 4.2.a). Se conectó un ordenador portátil a los catorce receptores a través de un hub USB (ver la Figura 4.2.b). El ordenador portátil, que ejecutaba la aplicación Tera Term en Windows, adquirió las tramas NMEA de los catorce receptores durante veinticuatro horas, el día 22 de marzo de 2023.

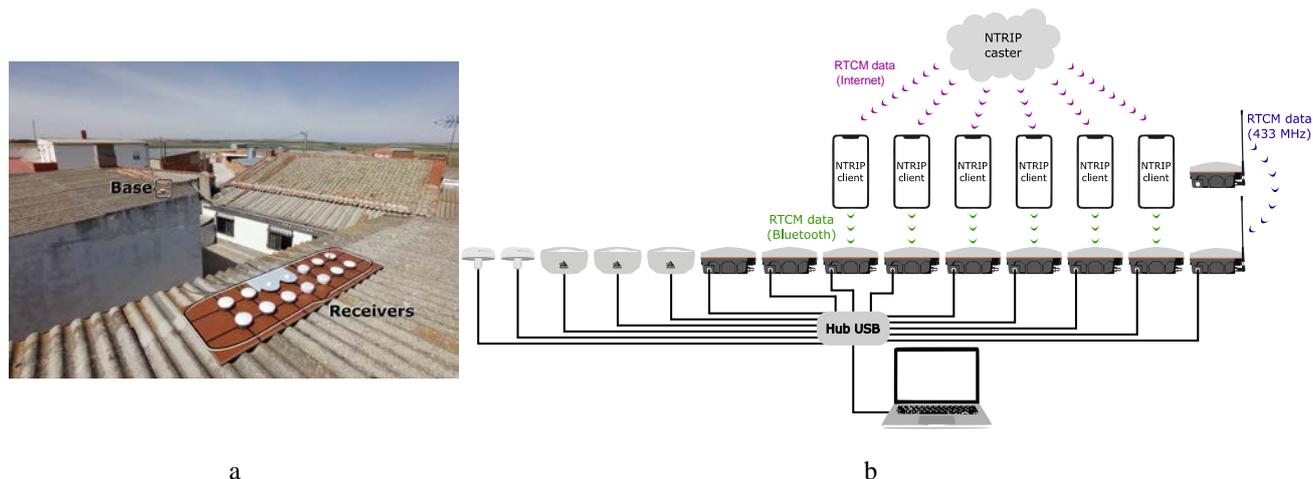


Figura 4.2. Imágenes de la adquisición de datos de la prueba estática: (a) receptores adquiriendo datos en un tejado y (b) diagrama de la conexión entre receptores, receptor base y ordenador portátil.

Para cada configuración, se obtuvieron cinco posiciones de latitud y longitud por segundo a partir de las tramas NMEA de tipo RMC, obteniéndose un total de $24 \times 60 \times 60 \times 5 = 432.000$ posiciones de latitud y longitud. Cada posición de latitud y longitud se convirtió a coordenadas cartesianas Norte, Este, Abajo (NED; en inglés: North, East, Down) (68). Se representaron mapas de puntos, histogramas de distancias respecto al punto de referencia con su respectiva función de distribución acumulativa, gráficos de error respecto la posición inicial durante los primeros 30 minutos y se calcularon algunos parámetros estadísticos.

Para calcular la posición de cada uno de los catorce receptores, se calculó la media de los 432.000 puntos obtenidos por las dos configuraciones más precisas, la 13 y la 14, representadas en color rojo en la Figura 4.3, y colocadas durante las pruebas en los extremos para facilitar los cálculos y se utilizaron estos puntos como referencia para calcular la posición verdadera del resto de receptores.

En el resto de configuraciones de la 1 a la 12, se consideraron dos posiciones: la posición denominada en el artículo como posición verdadera del receptor, calculada a partir de las dos posiciones de los receptores RTK de las configuraciones 13 y 14 y a partir de las distancias mostradas en la misma figura y la posición denominada en el artículo como posición media del receptor calculada a partir de la media de los 432.000 puntos obtenidos por cada receptor.

De esta manera la posición verdadera y media de los receptores de las configuraciones 13 y 14 coincide.

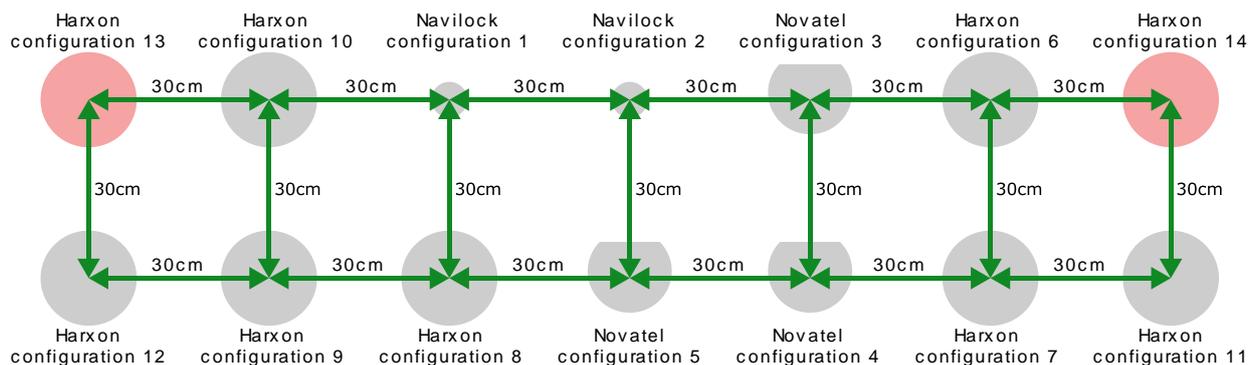


Figura 4.3. Posiciones relativas de los receptores en las pruebas estáticas. La posición de los receptores representada en color gris se obtuvo a partir de la posición verdadera calculada de los receptores en color rojo, y las distancias mostradas en la figura.

4.4 Resultados

Las figuras de la Figura 4.4.a a la Figura 4.17.a muestran un gráfico de las posiciones adquiridas en cada configuración durante 24 horas. Los puntos azules corresponden a las 6 primeras horas, los verdes al tiempo entre la hora 6 y la 12, los rojos al tiempo entre la hora 12 y la 18, y los amarillos a las 6 últimas horas. Las figuras de la Figura 4.4.a a la Figura 4.17.a se presentan con rangos de abscisas $[-6.43, 6.43]$ y de ordenadas $[-5, 5]$. Estos rangos son un compromiso entre presentar la mayoría de los puntos en configuraciones de baja precisión y no presentar los puntos demasiado juntos en las configuraciones de alta precisión. Para presentar un número de puntos visible, sólo se ha representado en la figura uno de cada 100 puntos.

Las figuras de la Figura 4.4.b a Figura 4.17.b muestran dos gráficos. El primero es un histograma de las distancias euclidianas de los puntos a la posición media del receptor. Este histograma puede considerarse una función de densidad de probabilidad (PDF; en inglés: Probability Density Function) de las distancias de los puntos a la posición media. El segundo gráfico de las figuras de la Figura 4.4.b a la Figura 4.17.b es la Función de Distribución Acumulativa (CDF; en inglés: Cumulative Distribution Function) asociada a la función PDF anterior.

Las figuras de la Figura 4.4.c a la Figura 4.17.c se generaron a partir de los puntos obtenidos en los primeros 30 minutos. Para cada punto se calculó y presentó la distancia al primero. Esta distancia puede considerarse un error con respecto al punto inicial, ya que los receptores se encontraban en la misma posición. Con el fin de presentar un número visible de puntos, sólo se presentó uno de cada 8 puntos.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ES ESTÁTICO DE SISTEMAS GRATUITOS DE CORRECCIÓN GNSS PARA EL GUIADO DE TRACTORES

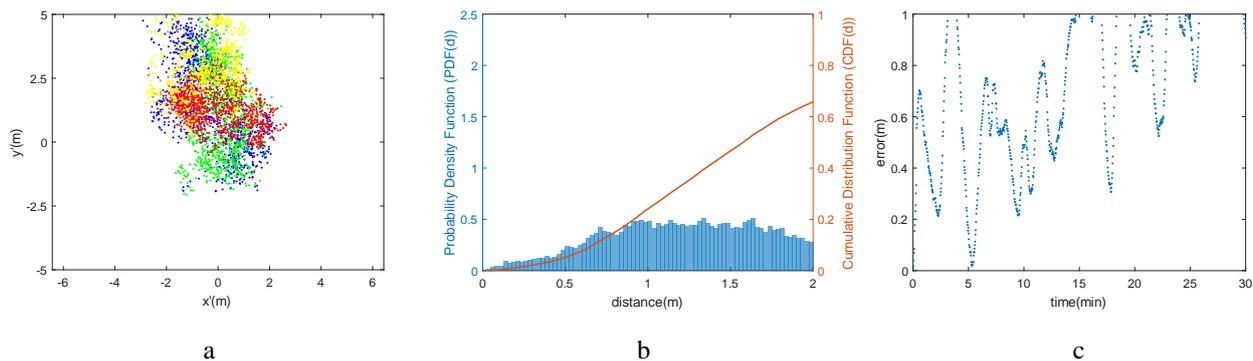


Figura 4.4. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Navilock NL-8022MP con SBAS desactivado de la Configuración 1: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 5.42% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 26 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico.

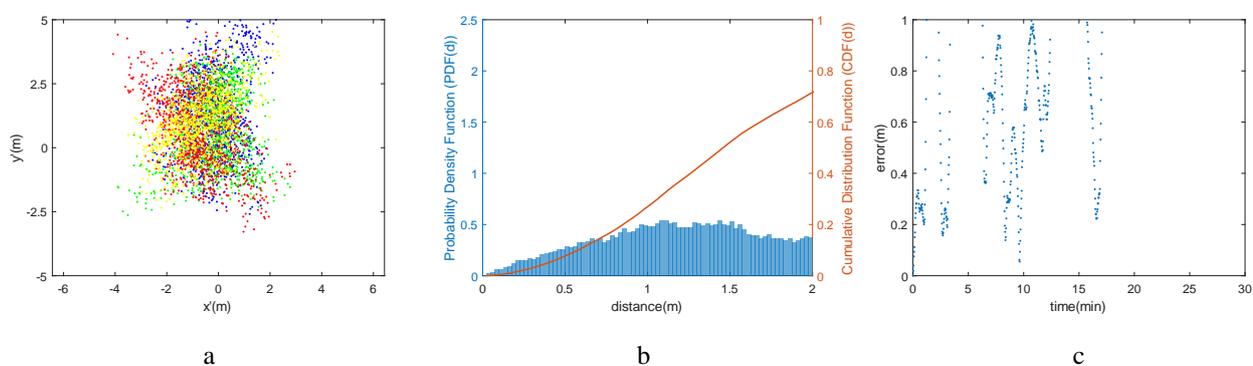


Figura 4.5. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Navilock NL-8022MP con SBAS activado de la Configuración 2: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 0.86% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 18 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico. Además, a partir de los 18 minutos, todos los valores son un error de 1 m.

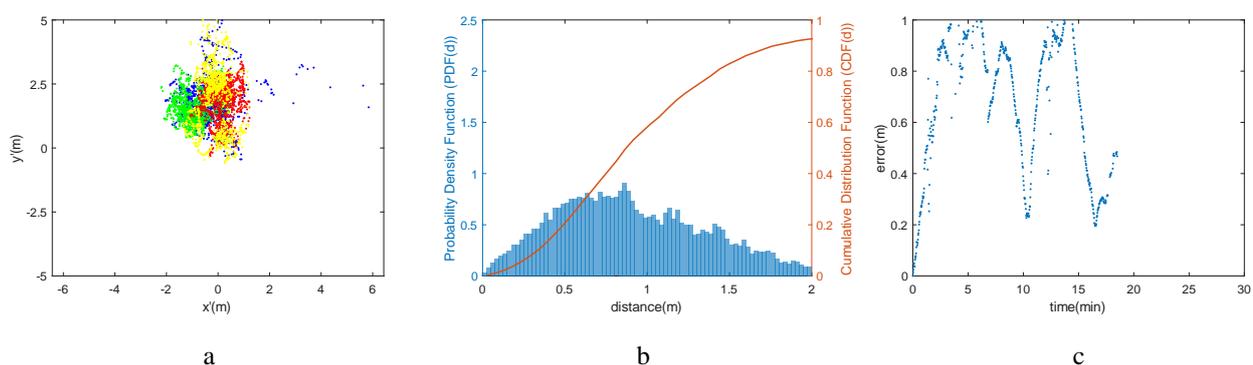


Figura 4.6. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS desactivado y GLIDE desactivado de la Configuración 3: (a) Mapas de puntos para 24 horas, en los que el 2.94% de los puntos están fuera de los límites de este mapa, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de las 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial, en el que a partir de los 19 minutos, los errores son superiores a 1 m. Nótese que, en el Gráfico c, algunos puntos están por encima de un error de 1 m, y están fuera del gráfico. Además, a partir de los 18 minutos, todos los valores tienen un error de 1 m.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ESTÁTICO DE SISTEMAS GRATUITOS DE CORRECCIÓN GNSS PARA EL GUIADO DE TRACTORES

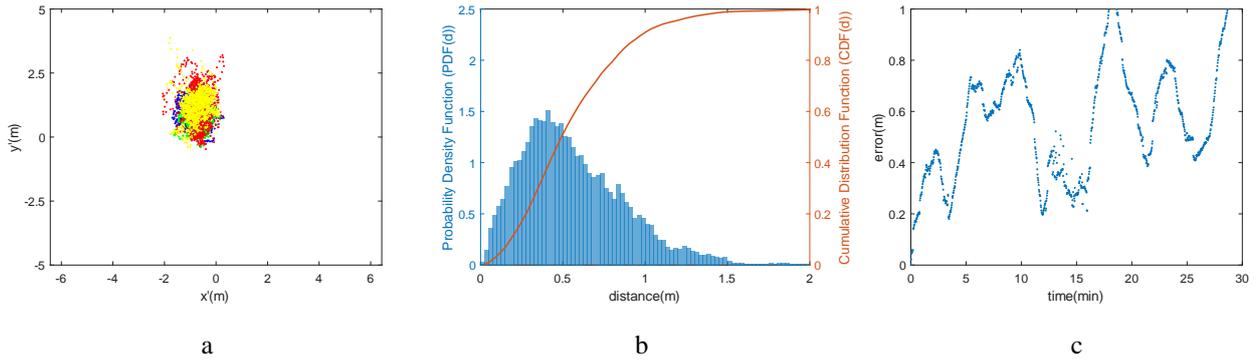


Figura 4.7. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS activado y GLIDE desactivado de la Configuración 4: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial. Obsérvese que, en el gráfico c, algunos puntos superan un error de 1 m y quedan fuera del gráfico.

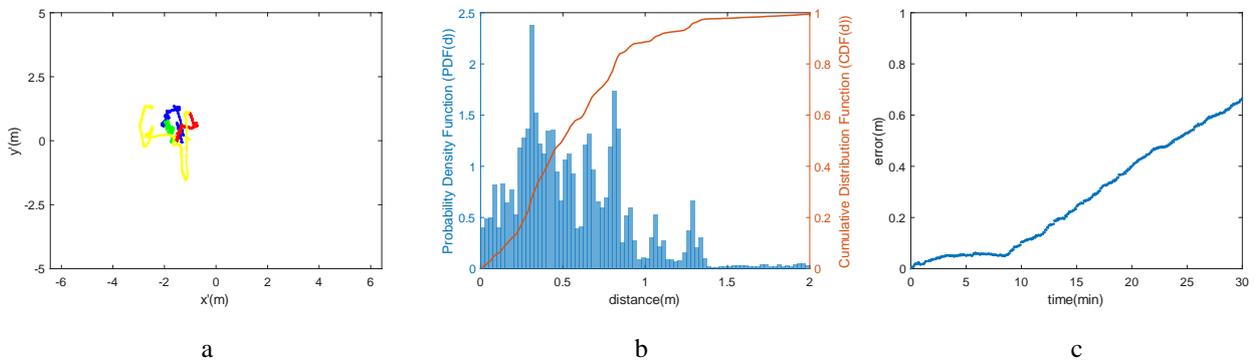


Figura 4.8. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Novatel Smart2 con SBAS activado y GLIDE activado de la Configuración 5: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

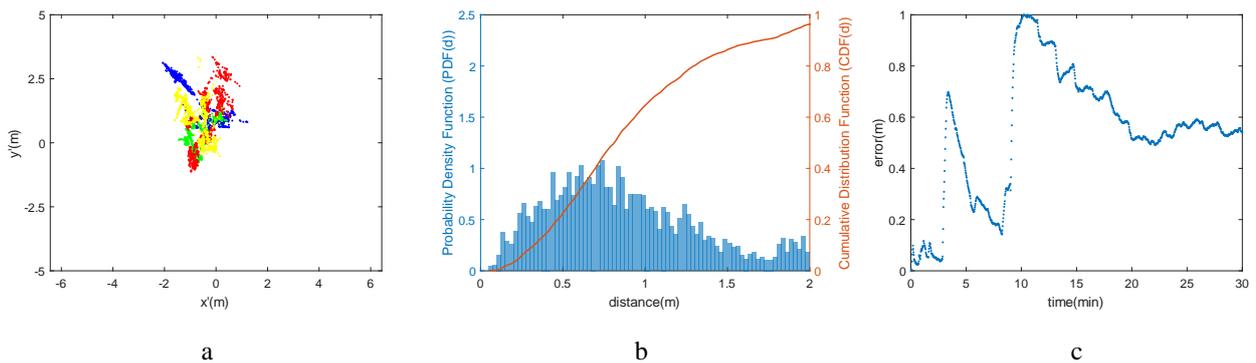


Figura 4.9. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con SBAS desactivado de la Configuración 6: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ESTÁTICO DE SISTEMAS GRATUITOS DE CORRECCIÓN GNSS PARA EL GUIADO DE TRACTORES

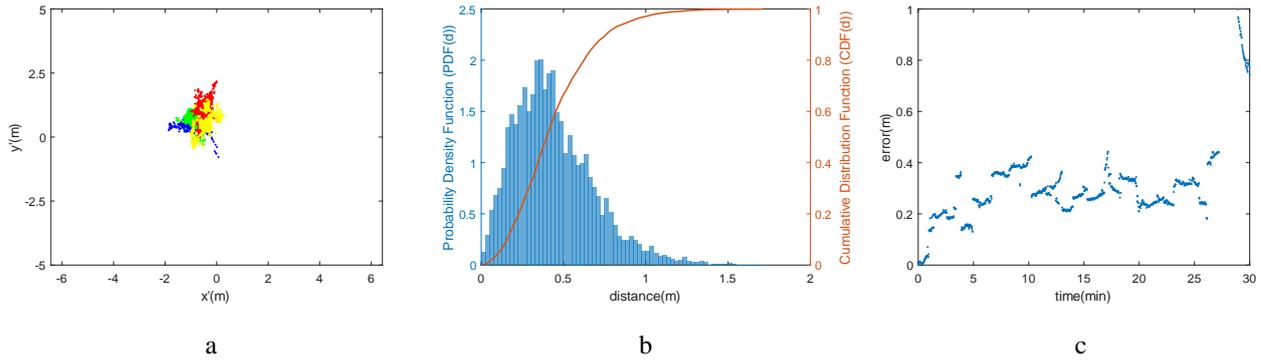


Figura 4.10. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con SBAS activado de la Configuración 7: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

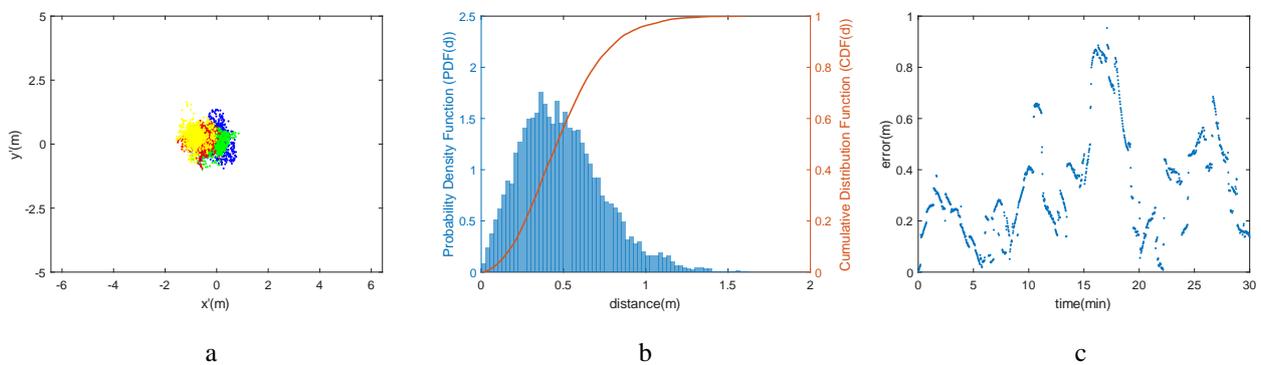


Figura 4.11. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Girona, a 645km del receptor de la Configuración 8: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

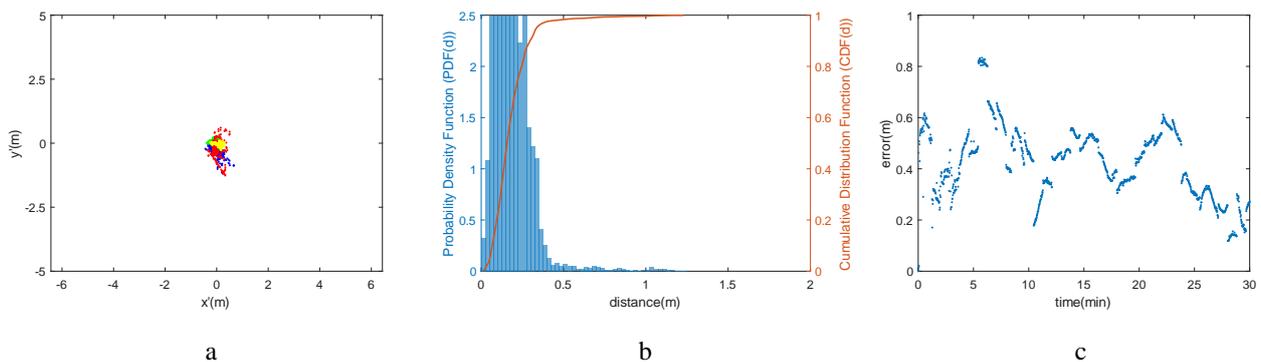


Figura 4.12. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Mérida, a 296 km del receptor de la Configuración 9: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial. Nótese que, para comparar los gráficos de diferentes configuraciones, la escala Y no se ha modificado con los gráficos de configuraciones anteriores, y algunas barras de la Función de Densidad de Probabilidad (Gráfico b) están por encima de los límites del gráfico.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ESTÁTICO DE SISTEMAS GRATUITOS DE CORRECCIÓN GNSS PARA EL GUIADO DE TRACTORES

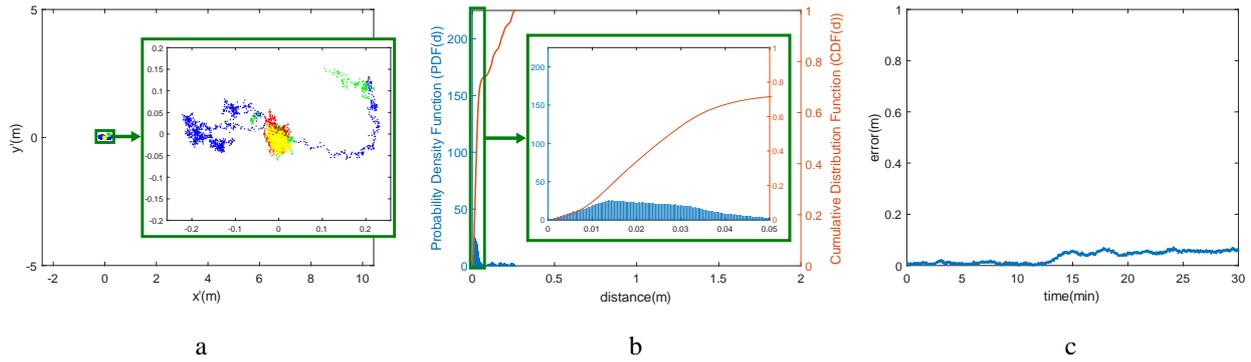


Figura 4.13. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Aranda de Duero, a 99 km del receptor de la Configuración 10: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulada calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

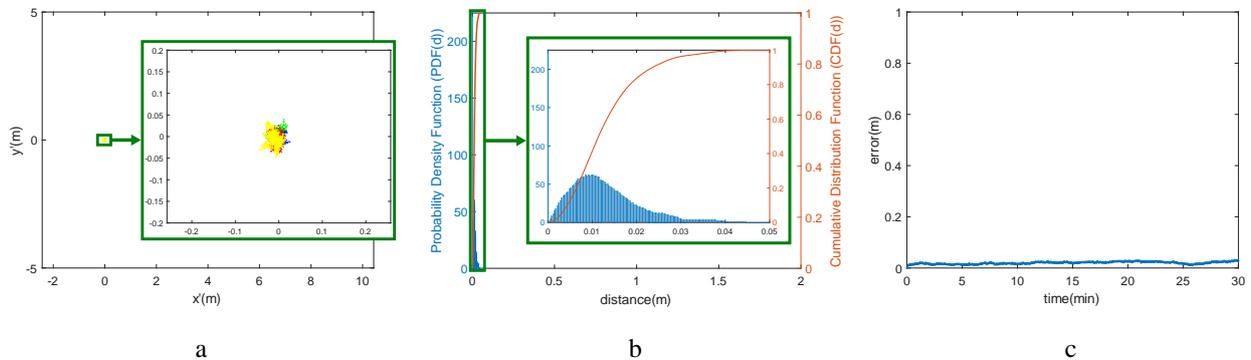


Figura 4.14. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Valladolid, a 42 km del receptor de la Configuración 11: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulada calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

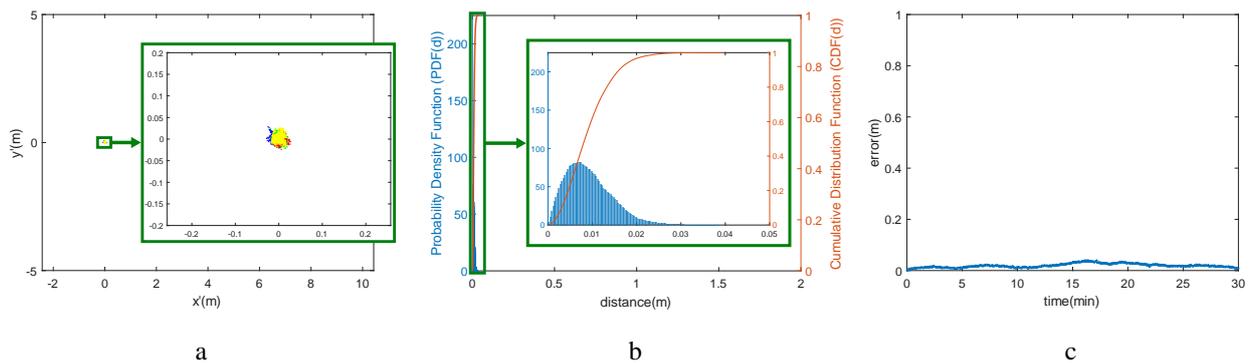


Figura 4.15. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con la estación de referencia en Olmedo, a 14 km del receptor de la Configuración 12: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulada calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

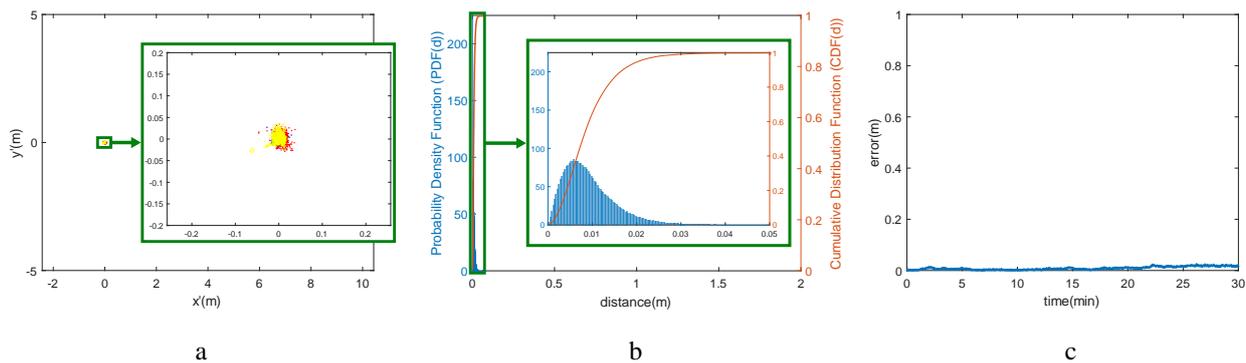


Figura 4.16. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK con una Estación de Referencia Virtual en la ubicación del receptor de la Configuración 13: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

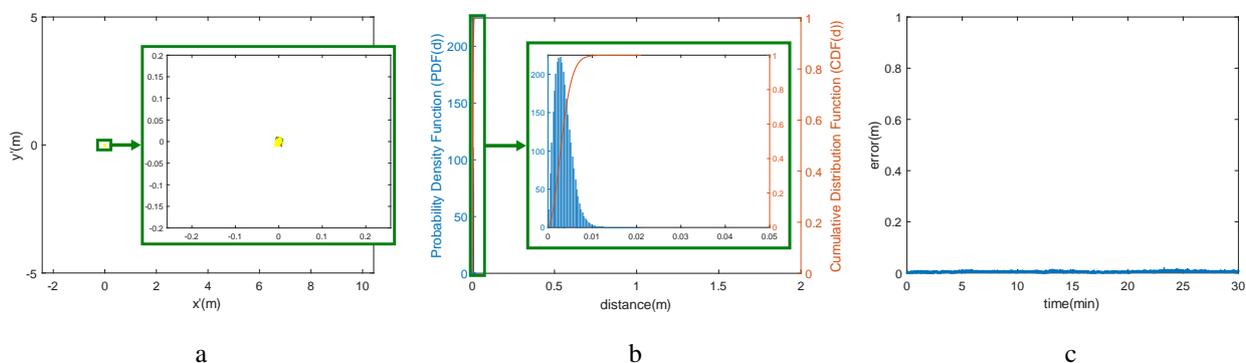


Figura 4.17. Gráficos obtenidos en las pruebas estáticas del receptor Harxon TS108PRO con RTK de la base Harxon TS103 a 5 m de la Configuración 14: (a) Mapas de puntos para 24 horas, (b) Función de Densidad de Probabilidad y Función de Distribución Acumulativa calculadas con las distancias de los puntos de 24 horas al punto medio, y (c) evolución del error respecto al punto inicial.

La Tabla 14 presenta seis parámetros estadísticos calculados a partir de los datos de las pruebas en estático para cada configuración: (i) el error CEP, que es el radio del círculo centrado en el punto de referencia que cubre el 50% de los puntos de la prueba estática, (ii) el error R95, que es el radio del círculo centrado en el punto de referencia que cubre el 95% de los puntos de la prueba estática, y (iii) el error R99.7, que es el radio del círculo centrado en el punto de referencia que cubre el 99,7% de los puntos de la prueba estática, (iv) el error medio, que es la distancia media al punto de referencia, (v) el error cuadrático medio (RMS), que es la raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado, y da gran peso a los errores grandes, y (vi) la desviación estándar (SD), que mide la cantidad de variación de los errores. Estos seis parámetros se muestran respecto a dos puntos de referencia: la posición media del receptor y la posición verdadera del receptor, calculados como se describe en la sección Métodos de la prueba estática.

Punto de referencia	Error CEP		Error R95		Error R99.7		Error medio		Error RMS		SD	
	PM	PV	PM	PV	PM	PV	PM	PV	PM	PV	PM	PV
Configuración 1: Receptor Navilock NL-8022MP con SBAS desactivado	1.61	2.17	3.84	5.55	7.15	9.06	1.84	2.49	2.16	2.93	1.14	1.55
Configuración 2: Receptor Navilock NL-8022MP con SBAS activado	1.48	1.74	3.30	3.73	4.74	5.60	1.62	1.88	1.84	2.14	0.89	1.02
Configuración 3: Receptor Novatel Smart2 con SBAS desactivado y GLIDE desactivado	0.90	1.99	2.31	3.97	5.08	6.87	1.07	2.07	1.33	2.33	0.78	1.06
Configuración 4: Receptor Novatel Smart2 con SBAS activado y GLIDE desactivado	0.51	1.35	1.18	2.12	1.99	3.12	0.57	1.36	0.66	1.44	0.33	0.47
Configuración 5: Receptor Novatel Smart2 con SBAS activado y GLIDE activado	0.50	1.78	1.28	2.72	2.06	3.04	0.57	1.81	0.68	1.87	0.37	0.45
Configuración 6: Receptor Harxon TS108PRO con SBAS desactivado	0.81	1.13	1.94	2.88	2.52	3.55	0.91	1.29	1.04	1.47	0.51	0.69
Configuración 7: Receptor Harxon TS108PRO con SBAS activado	0.40	1.06	0.90	1.51	1.35	1.99	0.44	1.05	0.50	1.09	0.24	0.30
Configuración 8: receptor Harxon TS108PRO con NRTK. La estación de referencia estaba a 645 km del receptor.	0.46	0.65	0.95	1.18	1.35	1.59	0.49	0.66	0.55	0.73	0.25	0.32
Configuración 9: Receptor Harxon TS108PRO con NRTK. La estación de referencia estaba a 296 km del receptor.	0.16	0.17	0.34	0.43	1.03	1.11	0.18	0.20	0.22	0.24	0.12	0.13
Configuración 10: receptor Harxon TS108PRO con NRTK. La estación de referencia estaba a 99 km del receptor.	0.029	0.025	0.226	0.215	0.256	0.241	0.061	0.061	0.092	0.094	0.069	0.071
Configuración 11: receptor Harxon TS108PRO con NRTK. La estación de referencia estaba a 42 km del receptor.	0.012	0.012	0.028	0.031	0.041	0.044	0.013	0.014	0.015	0.016	0.008	0.009
Configuración 12: receptor Harxon TS108PRO con NRTK. La estación de referencia estaba a 14 km del receptor.	0.008	0.008	0.019	0.019	0.028	0.028	0.009	0.009	0.011	0.011	0.005	0.005
Configuración 13: Receptor Harxon TS108PRO con NRTK. La referencia era una Estación de Referencia Virtual en la ubicación del receptor.	0.008	0.008	0.021	0.021	0.041	0.041	0.009	0.009	0.012	0.012	0.007	0.007
Configuración 14: Receptor Harxon TS108PRO con RTK activado mediante estación base.	0.003	0.003	0.007	0.007	0.010	0.010	0.003	0.003	0.004	0.004	0.002	0.002

Tabla 14: Error CEP, error R95, error R99.7, error medio, error RMS y desviación típica, calculados para cada configuración en base a dos puntos de referencia: la posición media (PM) y la posición verdadera (PV). Los valores se expresan en metros.

4.5 Discusión

El error RMS que el GNSS autónomo produjo en el Navilock NL-8022MP, el Novatel Smart2, y el Harxon TS108PRO, fue, respectivamente, de 2,93, 2,33 y 1,47 metros para la referencia de posición verdadera en pruebas estáticas (ver Tabla 14). Estos datos sugerirían un guiado con una precisión de unos 2 metros para el guiado a largo plazo. En la Figura 4.4.c, Figura 4.6.c y Figura 4.9.c se muestran errores en el corto plazo, inferior a 30 minutos, de nivel submétrico. Estos resultados coinciden con la afirmación de Stombauth en la que indica que el error a largo plazo es tres veces mayor aproximadamente que el error entre pasadas a corto plazo (1). La precisión submétrica a corto plazo entre pasadas obtenida con el posicionamiento GNSS autónomo cuando la referencia es una pasada anterior realizada en la última hora permitiría un guiado GNSS regular en la fertilización (69,70). El guiado con este posicionamiento es mucho más preciso que el guiado manual con implementos de tractor de gran anchura de trabajo (71). La Figura 4.4.b proporciona información visual de la precisión alcanzada a largo plazo con el receptor más barato, el Navilock NL-8022MP trabajando sin correcciones.

El error RMS que el GNSS+EGNOS produjo en el Navilock NL-8022MP, el Novatel Smart2, y el Harxon TS108PRO, fue, respectivamente, de 2,14, 1,44 y 1,09 metros para la referencia de posición verdadera en pruebas estáticas (ver Tabla 14) Aparentemente, EGNOS disminuye moderadamente el error estático a largo plazo, lo que resulta en una precisión de aproximadamente 1,5 metros para el guiado a largo plazo. La precisión en estático en el corto plazo (ver Figura 4.5.c, Figura 4.7.c y Figura 4.10.c) alcanzada con GNSS+EGNOS sugeriría precisiones entre pasadas de 0,5 metros que permitirían una precisión suficiente para la fertilización y una precisión regular en la aplicación de herbicidas (69,70). Nuestras mejoras de precisión de EGNOS con respecto al GNSS autónomo coinciden con las detectadas por otros autores. Por ejemplo: Krasuski y Wierzbicki obtuvieron un

aumento de precisión de alrededor del 29% para la latitud y del 46% para la longitud (72); Yoon et al. obtuvieron un aumento de precisión del 40% (73); Grunwald et al. apenas notaron mejoras (74); Ciecko afirmó que en algunos casos EGNOS puede ser inestable (75); Tabti et al. notaron ligeras mejoras utilizando EGNOS (76); y Vázquez et al. encontraron una precisión un poco mayor que la que encontró nuestro estudio, afirmando que el GNSS aumentado con EGNOS puede soportar precisiones de paso a paso a corto plazo de 25 cm para el 95% del tiempo (47).

El error RMS que produjo GNSS+EGNOS+GLIDE en el Novatel Smart 2 fue de 1,87 metros para la referencia de posición verdadera de la prueba estática (ver Tabla 14). Claramente, GLIDE no influyó en el error estático a largo plazo. La no reducción del error RMS en los ensayos estáticos de 24 horas es normal porque la tecnología GLIDE se centra en reducir el error entre pasadas a corto plazo, pero no el error a largo plazo. El fabricante proporciona en su ficha técnica un gráfico claramente similar al de la Figura 4.8.c que hemos obtenido (53). Neumann et al. explicaron la base de la tecnología GLIDE (77). Ford y Hamilton propusieron y probaron un filtro aparentemente similar al utilizado en GLIDE (78). En la Figura 4.8.c se muestra la variabilidad de la distancia de error respecto al punto inicial de aproximadamente 20 cm por cada 15 minutos. Esta precisión a corto plazo obtenida con el posicionamiento GNSS+EGNOS+GLIDE permitiría un buen guiado en la fertilización y la pulverización, y un guiado regular en la siembra, la cosecha y el laboreo (69,70).

El error RMS que NRTK produjo en el Harxon TS108PRO fue de 0,012 metros para la referencia de posición verdadera de la prueba estática (ver Tabla 14). Evidentemente, el NRKT redujo el error a largo plazo a unos cm. La precisión centimétrica alcanzada con NRTK coincide con otros autores (29,32), llegando incluso a obtener precisiones de milímetros (30). El error RMS del NRTK para la referencia de posición verdadera en la prueba estática, para una estación de referencia situada a 42 km del tractor, fue de 0,016 metros, mientras que, para la estación de referencia situada a 99 km del tractor, fue de 0,094 metros (ver Tabla 14). Esto sugiere que el NRTK proporciona 2 cm RMS cuando el receptor está conectado a una estación de referencia a menos de 50 km, o cuando el receptor está conectado a una VRS con estaciones de referencia a menos de 50 km. NRTK permite un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas, sin la restricción temporal en el guiado de GNSS, GNSS+EGNOS, y GNSS+EGNOS+GLIDE, en los que la referencia debe calcularse a partir de una pasada anterior realizada en la última hora; con NRTK, la referencia puede calcularse por ejemplo un año antes (69,70).

El error RMS que RTK produjo en el Harxon TS108PRO fue de 0,004 metros para la referencia de posición verdadera de la prueba estática (ver Tabla 14), mejorando la precisión respecto a NRTK. RTK permite un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas sin restricciones, sin embargo, RTK requiere que los agricultores coloquen una costosa estación de referencia cerca del tractor, lo cual es tedioso, y entonces, no se justifica el uso de RKT si hay NRTK disponible para los agricultores.

4.6 Conclusiones

Este estudio sugiere que (i) los receptores GNSS de bajo coste de 100 € sin datos de corrección permitirían guiar el tractor con errores típicos entre pasadas a corto plazo de aproximadamente 1 metro RMS, precisión que permitiría un guiado regular en la fertilización cuando la referencia es una

pasada anterior realizada en la última hora, (ii) EGNOS mejoraría la precisión de guiado permitiendo alcanzar errores de pasada a pasada a corto plazo de 0.5 metros RMS, precisión que sugeriría un buen guiado para fertilización y un guiado regular en pulverización (iii) GLIDE mejoraría el guiado de precisión entre pasadas a corto plazo. La precisión de nivel submétrico de GNSS+SBAS+GLIDE alcanzaría precisiones de 10 cm y permitiría un guiado aceptable en fertilización y pulverización, y un guiado regular en siembra, cosecha y labranza, (iv) NRTK alcanzaría un guiado de precisión a corto y largo plazo de 2 cm, precisión que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas con una única restricción: al menos una estación de referencia debe estar a menos de 50 km del tractor, y (v) RTK alcanzaría una precisión de guiado a corto y largo plazo de 1 cm, que permitiría un guiado muy preciso en todas las tareas agrícolas sin restricciones, pero requiere colocar una costosa estación de referencia cerca del tractor, no estando entonces justificado el uso de RKT si los agricultores disponen de NRTK.

Capítulo 5: Conclusiones

Capítulo 5: Conclusiones

Tras realizar el estudio del estado del arte en el que se han mostrado algunos artículos importantes sobre el análisis en estático de antenas GNSS y una vez obtenidos los resultados del estudio realizado, se pueden extraer algunas conclusiones del rendimiento de las antenas en estático y de las tecnologías de corrección empleadas.

Importancia de la Multiconstelación: En todas las configuraciones y modos de prueba llevados a cabo en los experimentos realizado se ha elegido el modo multiconstelación, ya que como indican algunos autores estudiados en el Capítulo 3:, aumenta la disponibilidad de los satélites y mejora la intensidad de la señal.

Evitar trayectos múltiples: Otro factor a tener en cuenta por parte de los autores analizados en el Capítulo 3: es la influencia de los trayectos múltiples en el posicionamiento. Por ello las pruebas de estudio se llevaron a cabo en condiciones de cielo abierto, evitando obstáculos para evitar problemas significativos de trayectos múltiples. Los obstáculos que los agricultores pueden encontrarse en los campos, pueden ser montañas, masas forestales o masa del agua, que empeoren los efectos de los trayectos múltiples.

Diferencias de Precisión entre Antenas: Los resultados de precisión en modo autónomo de los tres modelos de antenas muestran precisiones en torno a los 2 m RMS en el largo plazo y precisiones submétricas en el corto plazo. Las precisiones obtenidas en este modo permitirían guiados regulares para aplicaciones de gran ancho de trabajo, superiores a los 10 metros, como aplicación de fertilizantes y herbicidas.

Mejora limitada con SBAS: Los sistemas de aumentación SBAS, han aumentado ligeramente la precisión, inferior al 50 %, pudiendo ofrecer precisiones en el corto plazo de medio metro en las antenas Harxon y Novatel y un poco peor con la Navilock. Estas precisiones serían adecuadas para, de nuevo, aplicaciones con gran ancho de trabajo, como fertilización y pulverización de herbicidas. Pero serían insuficientes para otras aplicaciones como la labranza o la cosecha. Esto sugiere que SBAS es útil pero no produce una mejora definitiva en el posicionamiento.

Evolución del error con la tecnología GLIDE: La tecnología GLIDE ha ofrecido una variación controlada del error evitando saltos de posición grandes, siendo esto favorable para aplicaciones donde el posicionamiento entre pasadas sea importante. La combinación de GNSS, SBAS y GLIDE mejora la precisión aún más en el corto plazo, llegando incluso a ser aprovechable para tareas de

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

anchos de trabajo inferiores a 10 m, como la siembra, la labranza u otras aplicaciones de secano, en las que se pueden llegar a permitir 10 cm de error.

Precisión RTK: El posicionamiento RTK ha demostrado un posicionamiento altamente preciso, del orden de centímetros. Este nivel de precisión lo hace adecuado para prácticamente todo tipo de aplicaciones agrícolas. La precisión centimétrica RTK permite el posicionamiento año a año

Impacto de la distancia a la base en RTK: Coincidiendo con las indicaciones de los fabricantes y de otros autores analizados en el Capítulo 3:, la precisión RTK tiende a empeorar a medida que aumenta la distancia con respecto a la estación base. Según los resultados obtenidos, se recomendaría tener una base RTK a una distancia inferior a los 50 km para tener precisiones del orden de los 2 cm.

En resumen, el estudio presenta enfoque sobre el rendimiento en estático de diferentes tecnologías GNSS para aplicaciones de agricultura de precisión. Se resalta la eficacia del posicionamiento RTK para lograr una alta precisión, aunque es esencial considerar la distancia a la estación base. Además, las tecnologías SBAS y GLIDE pueden complementar el rendimiento de las antenas GNSS en situaciones donde la precisión relativa es importante. Todos estos resultados han sido obtenidos a partir de las pruebas en estático, y no son definitivos, pues sería necesario realizar el análisis en dinámico.

Capítulo 6: Líneas futuras

Capítulo 6: Líneas futuras

Las líneas futuras de investigación de este artículo se centran en la evaluación del comportamiento dinámico de las antenas GNSS utilizadas en aplicaciones de agricultura de precisión, viendo cómo se comportan en condiciones de movimiento, como las que se experimentan en un entorno agrícola real.

El siguiente paso del estudio sería instalar las antenas en un vehículo agrícola real y evaluar la capacidad de posicionamiento y estabilidad de las antenas GNSS mientras el vehículo se desplaza a través del campo.

Sería de interés conectar las antenas a un sistema de autoguiado y que sea la propia antena a través de las posiciones ofrecidas al autoguiado la que guíe el tractor a través de unas trayectorias predefinidas. Podría ser de interés analizar además como estas antenas se combinan con otro tipo de sensores como pueden ser inclinómetros, acelerómetros o sensores de giro en la rueda del vehículo para realizar un guiado preciso.

Para analizar las trayectorias seguidas por el tractor se podría colocar otra antena sobre el propio tractor para tomar la trayectoria seguida y para posteriormente analizar de una manera más sencilla los errores. La antena de referencia debe ser una antena muy precisa en relación a las antenas evaluadas.

También sería interesante realizar varias pruebas con cada configuración espaciadas entre sí un determinado periodo de tiempo para analizar cómo afecta el tiempo a las precisiones de las antenas y ver cómo evolucionan los errores con el tiempo.

Una vez realizado el estudio inicial sobre el comportamiento estático de las antenas GNSS, se ha abierto camino hacia futuras investigaciones sobre su comportamiento dinámico en agricultura.

Todas estas líneas futuras se pretenden realizar más adelante por el autor como Trabajo Final de Máster.

Referencias

1. Stombaugh T. Satellite-based Positioning Systems for Precision Agriculture. In 2018. p. 25–35.
2. [https://en.wikipedia.org/wiki/Transit_\(satellite\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Transit_(satellite)). 2023.
3. Navigation Satellites. In: Satellite Technology. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd; 2014. p. 614–57.
4. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>. 2023.
5. Ebbesen Schultz C. INS and GPS integration. [Lyngby, Denmark]: University of Denmark; 2006.
6. <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>. 2023.
7. Kindervatter TH, Teixeira FL. Tropospheric and Ionospheric Effects on Global Navigation Satellite Systems. Wiley; 2022.
8. https://glonass-iac.ru/en/about_glonass/. 2023.
9. Grewal MS, Andrews AP, Bartone CG. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley; 2020.
10. https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Zenith_Satellite_System. 2023.
11. <https://qzss.go.jp/en/overview/services/seven-satellite.html>. 2023.
12. SAURABH GODHA. PERFORMANCE EVALUATION OF LOW COST MEMS-BASED IMU INTEGRATED WITH GPS FOR LAND VEHICLE NAVIGATION APPLICATION . [Calgary, Alberta]: UNIVERSITY OF CALGARY; 2006.
13. Introduction. In: Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley; 2014. p. 1–20.
14. https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks. 2023.
15. Madry S. Aided and Augmentation Systems and Differential GPS. In 2015. p. 57–70.
16. <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SNAS>. 2023.

17. <https://novatel.com/products/firmware-options-pc-software/gnss-receiver-firmware-options/glide>. 2023.
18. <https://www.navilock.com/produkt/62529/merkmale.html?setLanguage=es>. 2023.
19. <https://novatel.com/products/gps-gnss-smart-antennas/smart2>. 2023.
20. <https://en.harxon.com/product/detail/156>. 2023.
21. <https://en.harxon.com/product/detail/90>. 2023.
22. RAY JK, CANNON ME, FENTON PC. Mitigation of Static Carrier-Phase Multipath Effects Using Multiple Closely Spaced Antennas. *Navigation*. 1999 Sep;46(3):193–201.
23. Gao Y, Liu Z, Liu ZZ. Internet-Based Real-Time Kinematic Positioning. *GPS Solutions*. 2002 Jan 29;5(3):61–9.
24. Specht C. Accuracy and coverage of the modernized Polish Maritime differential GPS system. *Advances in Space Research*. 2011 Jan;47(2):221–8.
25. Hao M, Qin S, Wang Q, Wang J, Zhou L. Tests of relative vertical offsets for several types of GPS receiver antenna phase centers. *Geod Geodyn*. 2015 Sep;6(5):392–5.
26. Skoglund M, Petig T, Vedder B, Eriksson H, Schiller EM. Static and dynamic performance evaluation of low-cost RTK GPS receivers. In: 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE; 2016. p. 16–9.
27. Kabir MdSN, Song MZ, Sung NS, Chung SO, Kim YJ, Noguchi N, et al. Performance comparison of single and multi-GNSS receivers under agricultural fields in Korea. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2016 Jan;9(1):27–35.
28. Msaewe HA, Hancock CM, Psimoulis PA, Roberts GW, Bonenberg L, de Ligt H. Investigating multi-GNSS performance in the UK and China based on a zero-baseline measurement approach. *Measurement*. 2017 May;102:186–99.
29. Guo J, Li X, Li Z, Hu L, Yang G, Zhao C, et al. Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precis Agric*. 2018 Oct 14;19(5):895–911.
30. Manzano AM, Dabove P, Gogoi N. Assessment of positioning performances in Italy from GPS, BDS and GLONASS constellations. *Geod Geodyn*. 2018 Nov;9(6):439–48.
31. Zhang Y, Yu W, Han Y, Hong Z, Shen S, Yang S, et al. Static and kinematic positioning performance of a low-cost real-time kinematic navigation system module. *Advances in Space Research*. 2019 May;63(9):3029–42.
32. İlçi V. Accuracy comparison of real-time GNSS positioning solutions: Case study of Mid-North Anatolia. *Measurement*. 2019 Aug;142:40–7.

33. Garrido MS, de Lacy MC, Ramos MI, Borque MJ, Susi M. Assessing the accuracy of NRTK altimetric positioning for precision agriculture: test results in an olive grove environment in Southeast Spain. *Precis Agric.* 2019 Jun 24;20(3):461–76.
34. Nguyen N Van, Cho W, Hayashi K. Performance evaluation of a typical low-cost multi-frequency multi-GNSS device for positioning and navigation in agriculture – Part 1: Static testing. *Smart Agricultural Technology.* 2021 Dec;1:100004.
35. Auernhammer H. Precision farming-the environmental challenge [Internet]. Vol. 30, *Computers and Electronics in Agriculture.* 2001. Available from: www.elsevier.com/locate/compag
36. Shannon DK, Clay DE, Kitchen NR. *Precision Agriculture Basics.* Kent Shannon D, Clay DE, Kitchen NR, editors. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America; 2018.
37. Zhang N, Wang M, Wang N. Precision agriculture—a worldwide overview. *Comput Electron Agric.* 2002 Nov;36(2–3):113–32.
38. Kent Shannon D, Clay DE, Sudduth KA. An Introduction to Precision Agriculture. In 2018. p. 1–12.
39. Cisternas I, Velásquez I, Caro A, Rodríguez A. Systematic literature review of implementations of precision agriculture. Vol. 176, *Computers and Electronics in Agriculture.* Elsevier B.V.; 2020.
40. Lowenberg-DeBoer J, Erickson B. Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption. *Agron J.* 2019 Jul;111(4):1552–69.
41. Perez-Ruiz M, Martínez-Guanter J, Upadhyaya SK. High-precision GNSS for agricultural operations. In: *GPS and GNSS Technology in Geosciences.* Elsevier; 2021. p. 299–335.
42. Magiera W, Vārna I, Mitrofanovs I, Silabrieds G, Krawczyk A, Skorupa B, et al. Accuracy of Code GNSS Receivers under Various Conditions. *Remote Sens (Basel).* 2022 Jun 1;14(11).
43. S. C. Borgelt, J. D. Harrison, K. A. Sudduth, S. J. Birrell. Evaluation of GPS for Applications in Precision Agriculture. *Appl Eng Agric.* 1996;12(6):633–8.
44. Alkan RM, Erol S, İlçi V, Ozulu M. Comparative analysis of real-time kinematic and PPP techniques in dynamic environment. *Measurement (Lond).* 2020 Oct 15;163.
45. Schaefer M, Pearson A. Accuracy and precision of GNSS in the field. In: *GPS and GNSS Technology in Geosciences.* Elsevier; 2021. p. 393–414.
46. Steigenberger P, Seitz M, Böckmann S, Tesmer V, Hugentobler U. Precision and accuracy of GPS-derived station displacements. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.* 2012;53–54:72–9.

47. Vázquez J, Lacarra E, Morán J, Sánchez MA, González A, Bruzual J. EDAS (EGNOS Data Access Service) Differential GNSS Corrections: A Reliable Free-of-Charge Alternative for Precision Farming in Europe. *Annual of Navigation*. 2019 Dec 1;26(1):46–58.
48. Pérez-Ruiz M, Carballido J, Agüera J, Gil JA. Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles. *Precis Agric*. 2011 Oct;12(5):639–52.
49. Lipiński AJ, Markowski P, Lipiński S, Pyra P. Precision of tractor operations with soil cultivation implements using manual and automatic steering modes. *Biosyst Eng*. 2016 May;145:22–8.
50. İlçi V. Accuracy comparison of real-time GNSS positioning solutions: Case study of Mid-North Anatolia. *Measurement (Lond)*. 2019 Aug 1;142:40–7.
51. Garrido MS, de Lacy MC, Ramos MI, Borque MJ, Susi M. Assessing the accuracy of NRTK altimetric positioning for precision agriculture: test results in an olive grove environment in Southeast Spain. *Precis Agric*. 2019 Jun 15;20(3):461–76.
52. El-Rabbany A. *Introduction to GPS: The Global Positioning System, Second Edition* [Internet]. Artech; 2006. 1 p. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/9100988>
53. Firmware GLIDE [Internet]. 2015 [cited 2023 Aug 6]. p. 1–2. Available from: <https://novatel.com/products/firmware-options-pc-software/gnss-receiver-firmware-options/glide>
54. Hemisphere GNSS Technical Reference Guide v1.07.1 [Internet]. 2017 [cited 2023 Aug 7]. Available from: https://www.subseatechnologies.com/media/files/files/31889a85/Hemisphere_GNSS_Technical_Reference_Guide_v1.07.1_STI.pdf
55. Pérez-Ruiz M, Carballido J, Agüera J, Gil JA. Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles. *Precis Agric*. 2011 Oct 26;12(5):639–52.
56. Radicioni F, Stoppini A, Brigante R, Brozzi A, Tosi G. GNSS Network RTK for Automatic Guidance in Agriculture: Testing and Performance Evaluation. In 2020. p. 19–35.
57. Marucci A, Colantoni A, Zambon I, Egidi G. Precision Farming in Hilly Areas: The Use of Network RTK in GNSS Technology. *Agriculture*. 2017 Jul 20;7(7):60.
58. Bell T. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. *Comput Electron Agric*. 2000 Jan;25(1–2):53–66.
59. Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Comput Electron Agric*. 2000 Jan;25(1–2):169–94.
60. Reid JF, Zhang Q, Noguchi N, Dickson M. Agricultural automatic guidance research in North America. *Comput Electron Agric*. 2000 Jan;25(1–2):155–67.

61. Li S, Zhang M, Ji Y, Zhang Z, Cao R, Chen B, et al. Agricultural machinery GNSS/IMU-integrated navigation based on fuzzy adaptive finite impulse response Kalman filtering algorithm. *Comput Electron Agric.* 2021 Dec;191:106524.
62. Khot LR, Tang L, Steward BL, Han S. Sensor fusion for improving the estimation of roll and pitch for an agricultural sprayer. *Biosyst Eng.* 2008 Sep;101(1):13–20.
63. Zhang Q, Chen Q, Xu Z, Zhang T, Niu X. Evaluating the navigation performance of multi-information integration based on low-end inertial sensors for precision agriculture. *Precis Agric.* 2021 Jun 14;22(3):627–46.
64. Nagasaka Y, Saito H, Tamaki K, Seki M, Kobayashi K, Taniwaki K. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit. *J Field Robot.* 2009 Jun;26(6–7):537–48.
65. Radicioni F, Stoppini A, Brigante R, Brozzi A, Tosi G. GNSS Network RTK for Automatic Guidance in Agriculture: Testing and Performance Evaluation. In 2020. p. 19–35.
66. Gan-Mor S, Clark RL, Upchurch BL. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Comput Electron Agric.* 2007 Nov;59(1–2):31–8.
67. Sun H, Slaughter DC, Ruiz MP, Gliever C, Upadhyaya SK, Smith RF. RTK GPS mapping of transplanted row crops. *Comput Electron Agric.* 2010 Apr;71(1):32–7.
68. Grewal MS, Andrews AP, Bartone CG. *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration.* Wiley; 2020.
69. Lange AF, Peake J. Precision Agriculture. In: *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century [Internet].* Wiley; 2020. p. 1735–47. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119458555.ch56>
70. Barna R, Tóth K, Nagy MZ, Solymosi K. Technical characteristics of global navigation satellite systems and their role in precision agriculture. *Journal of Agricultural Informatics.* 2020 Jul 17;11(1).
71. Balsari P, Tamagnone M. An Automatic Tractor Guidance. *IFAC Proceedings Volumes.* 2000 Jul;33(19):21–6.
72. Krasuski K, Wierzbicki D. Application the SBAS/EGNOS Corrections in UAV Positioning. *Energies (Basel).* 2021 Jan 31;14(3):739.
73. Yoon H, Seok H, Lim C, Park B. An Online SBAS Service to Improve Drone Navigation Performance in High-Elevation Masked Areas. *Sensors.* 2020 May 27;20(11):3047.
74. Grunwald G, Bakula M, Ciećko A, Kaźmierczak R. Examination of GPS/EGNOS integrity in north-eastern Poland. *IET Radar, Sonar & Navigation.* 2016 Jan;10(1):114–21.

75. Ciećko A. Analysis of the EGNOS quality parameters during high ionosphere activity. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2019 Jul 8;13(7):1131–9.
76. Tabti L, Kahlouche S, Benadda B, Beldjilali B. Improvement of Single-Frequency GPS Positioning Performance Based on EGNOS Corrections in Algeria. *The Journal of Navigation* [Internet]. 2020/01/17. 2020;73(4):846–60. Available from: <https://www.cambridge.org/core/article/improvement-of-singlefrequency-gps-positioning-performance-based-on-egnos-corrections-in-algeria/7DC38DB809932684DB7EFC7F0B652170>
77. Neumann J, Ellum C, Salycheva A, Culling B. Technologies for Optimized Pass-to-Pass Positioning Performance. In 2016. p. 3579–87.
78. Ford TJ, Hamilton J. A New Positioning Filter: Phase Smoothing in the Position Domain. *Navigation*. 2003 Jun;50(2):65–78.