



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

Distanciometría GNSS para metrología y control de deformaciones

Grado en Ingeniería Geomática y Topografía

Autor: Raquel Luján García-Muñoz

Tutor: Luis García-Asenjo Villamayor

Valencia, Julio de 2017

Resumen

La determinación absoluta de distancias al aire libre con una incertidumbre de décimas de milímetro es objeto de creciente interés en campos como la metrología, proyectos de ingeniería singulares o monitorización de deformaciones en sitios críticos. Para ello, se han empleado tradicionalmente distanciómetros electrónicos de alta precisión como el Kern ME5000. Debido a que este tipo de instrumentos ya no se fabrica, es necesario buscar otras vías para la obtención de distancias al aire libre de alta precisión, como el uso de GNSS.

En el presente documento se plantea la posibilidad de utilizar para este fin la tecnología GNSS, junto con software ya existente, realizando un estudio comparativo entre resultados obtenidos mediante el ME500 y observaciones GNSS en la base de calibración de la UPV.

Palabras clave: GNSS, distancimetría submilimétrica, metrología, base de calibración.

Abstract

The absolute determination of open air distances with an uncertainty of a few tenths of a millimeter is an object of increasing interest in fields such as metrology, singular engineering projects or deformation monitoring in critical sites. For this purpose, high precision electronic distance meters such as the Kern ME5000 have been traditionally used. Because this type of instrument is no longer manufactured, it is necessary to look for other ways to obtain high-precision outdoor distances, such as the use of GNSS.

This document explores the possibility of using the GNSS technology for this purpose, using existing software, carrying out a comparative study between results obtained by the ME5000 and GNSS observations in the UPV calibration baseline. The results obtained allow us to corroborate the potential of the GNSS technology for the determination of high precision distances.

Key words: GNSS, submillimetric length determination, metrology, calibration baseline.

Índice

Capítulo 1. Introducción	5
Capítulo 2. Metrología de longitud al aire libre	7
2.1. Justificación.....	8
2.2. Aspectos fundamentales.....	8
2.2.1. Base de calibración de Nummela.....	9
2.2.2. Otras bases de calibración.....	10
2.3. Límites y retos actuales	11
Capítulo 3. Determinación submilimétrica de distancias mediante el empleo de EDMs	13
3.1. Funcionamiento básico de un EDM.....	13
3.1.1. Resolución de fase	14
3.1.2. Modificación de la longitud de onda.....	14
3.1.3. Modificación de la frecuencia	15
3.1.4. Comparativa de métodos de medición.....	16
3.2. Fuentes de error.....	17
3.3. Calibración de un EDM mediante ISO17123-4.....	17
3.3.1. Calibración mediante el procedimiento completo	18
3.4. Mekometer ME5000.....	19
Capítulo 4. Determinación de distancias mediante GNSS	21
4.1. Funcionamiento básico del GNSS.....	21
4.2. Fuentes de error.....	22
4.2.1. Errores en satélites y órbitas	23
4.2.2. Errores en la propagación de la señal	24
4.2.3. Errores en los instrumentos	26
4.3. Métodos de observación y procesamiento GNSS.....	27
4.3.1. Posicionamiento de punto preciso	28
4.3.2. Procesamiento relativo	29
4.4. Antecedentes en distanciametría GNSS	30
4.5. Recomendaciones sobre distanciametría GNSS para metrología.....	30
4.5.1. Preparación y metodología	31
4.5.2. Estrategia de procesamiento.....	32
4.5.3. Incertidumbre en distancias GNSS	32

Capítulo 5. Estudio comparativo en la base de calibración de la UPV	33
5.1. Descripción de la base de calibración de la UPV	33
5.2. Campaña de observación en campo	35
5.3. Determinación de la distancia empleando el Mekometer ME5000	36
5.3.1. Instrumentación y metodología de observación	36
5.3.2. Proceso de cálculo	39
5.3.3. Resultados.....	42
5.4. Determinación de la distancia empleando datos GNSS.....	45
5.4.1. Instrumentación y metodología de observación	45
5.4.2. Proceso de cálculo	47
5.4.3. Resultados.....	49
5.5. Análisis de los resultados.....	51
Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras.....	53
6.1. Conclusiones	53
6.2. Líneas futuras.....	54
Referencias.....	55
Presupuesto.....	59
Cuadro de precios nº1	59
Cuadro de precios nº2.....	60
Presupuesto.....	60
Justificación de precios	61
Planos.....	63
Plano nº1. Situación y emplazamiento.....	65
Plano nº2. Base de calibración de la UPV	67
Anexo I. Resultados intermedios ME5000.....	69
Anexo II. Resultados intermedios GNSS	71

Índice de figuras

Figura 1. Calibres de cuarzo	9
Figura 2. Funcionamiento interferómetro Väisälä.....	10
Figura 3. Cadena de trazabilidad de la base de calibración de Nummela	10
Figura 4. Principio de resolución de fase	14
Figura 5. Principio de modificación de la longitud de ruta	15
Figura 6. Principio de modificación de la frecuencia	15
Figura 7. Configuración de la base para procedimiento completo de calibración	18
Figura 8. Principio de medición por fase GNSS	22
Figura 9. Capas de la atmósfera	25
Figura 10. Efecto multipath	27
Figura 11. Esquema de la base de calibración de la UPV.....	33
Figura 12. Trazabilidad de la base de calibración de la UPV	34
Figura 13. Instrumentación de la campaña con EDM.....	38
Figura 14. Proceso de cálculo distancias geométricas corregidas	40
Figura 15. Esquema de alineación de pilares de la base UPV	41
Figura 16. Reducción a la base	41
Figura 17. Proceso cálculo calibración con ISO 17123-4	42
Figura 18. Instrumentación de la campaña con GNSS.....	46
Figura 19. Montaje de las estaciones GNSS.....	47
Figura 20. Resultado PPP	49

Índice de tablas

Tabla 1. Fuentes de incertidumbre	19
Tabla 3. Características del Mekometer M5000	36
Tabla 4. Características del reflector.....	37
Tabla 5. Características de los termómetros.....	37
Tabla 6. Características de los Barómetros	37
Tabla 7. Distancias geométricas corregidas.....	43
Tabla 8. Resultados del ajuste.....	44
Tabla 9. Distancias en la línea base ajustadas	44
Tabla 10. Días de la campaña de observación GNSS	45



Capítulo 1. Introducción

El interés por la determinación absoluta de distancias al aire libre con una incertidumbre por debajo del milímetro ha aumentado notablemente en los últimos años en campos como la metrología, algunos proyectos de ingeniería singulares o monitorización de deformaciones en lugares críticos.

El problema ha sido abordado tradicionalmente mediante el uso de distanciómetros electrónicos (EDM) de alta precisión como el Kern Mekometer ME5000, el único instrumento de este tipo capaz de alcanzar precisiones submilimétricas en el rango de los 10 a los 5000 metros (siempre que el índice de refracción atmosférica se determine con una exactitud de 0.1 ppm). Para que las distancias obtenidas sean absolutas, es decir, que coincidan en escala con el metro definido por el Sistema Internacional de Unidades, en adelante SI, el equipo debe ser previamente calibrado en una base de calibración dotada de escala absoluta, como la Nummela Standard Baseline, estándar internacional de longitud al aire libre, o en otras bases de calibración de referencia cuya escala haya sido transferida desde Nummela, como la base de calibración del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universitat Politècnica de València (DICGF-UPV).

El Mekometer ME5000, no se comercializa desde hace más de 20 años y existen muy pocas unidades en funcionamiento, de aquí la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de distanciometría submilimétrica, que además superen la limitación que supone la refracción atmosférica en distancias superiores a 1 kilómetro. Algunas de las técnicas que se están desarrollando actualmente para la medición de distancias en este rango son los EDMs basados en peines de frecuencias (Doloca N. *et al.*, 2010) o las técnicas basadas en los sistemas de posicionamiento global por satélite (GNSS) (Baselga S. *et al.*, 2015).

En cuanto al uso de las técnicas GNSS para medir distancias con precisiones por debajo del milímetro, anteriores investigaciones llevadas a cabo en el DICGF-UPV han demostrado su potencial. La metodología de procesamiento desarrollada por este departamento, que está específicamente orientada al problema de la determinación de la distancia, se basa en el empleo de un nuevo modelo funcional y métodos de estimación robusta (Baselga S. y García-Asenjo L., 2008), Baselga S. *et al.*, 2014).

El objetivo del presente trabajo es explorar si es posible conseguir resultados similares utilizando para ello software de producción comercialmente disponible como el programa Leica Geo Office y aplicaciones online (<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca>), realizando para ello una campaña de medición de 4 días en la base de calibración de la UPV.

Durante la campaña se realizaron observaciones GNSS y con mediciones clásicas empleando el distanciómetro submilimétrico Mekometer ME5000 perteneciente a la Universidad Complutense de Madrid, en adelante UCM. El hecho de disponer de medidas realizadas con el distanciómetro submilimétrico calibrado permite realizar un análisis comparativo entre dichas distancias y las obtenidas mediante el empleo de técnicas GNSS, que es la metodología que se pretende poner a prueba.

La estructura básica que sigue este documento es la siguiente. En primer lugar, se introducen los conceptos teóricos y aspectos fundamentales necesarios para la contextualización y comprensión del tema abordado, el estudio de la posibilidad de obtener distancias con precisión submilimétrica con técnicas GNSS empleando software de producción comercialmente disponible. A continuación, se introducen las dos técnicas de obtención de distancias que se han llevado a cabo para este trabajo, el uso de un distanciómetro electrónico de alta precisión Mekometer ME500, en adelante ME5000 y el empleo de GNSS. Tras esto, se describe la instrumentación y metodología empleada en la campaña de medición (tanto con el ME5000 como con GNSS) y se exponen los resultados alcanzados con ambos métodos. Por último, a la vista de los resultados y de un análisis comparativo entre los dos procedimientos, se muestran las conclusiones pertinentes.

Capítulo 2. Metrología de longitud al aire libre

La metrología es la ciencia de la medida. Comprende todos los aspectos, tanto teóricos como prácticos, que se refieren a las mediciones, cualesquiera que sean sus incertidumbres y en cualesquiera de los campos de la ciencia y la tecnología en que tengan lugar (*Vocabulario Internacional de Metrología*, 2000b).

La importancia de la metrología reside en que proporciona estándares para realizar las distintas mediciones y expresar sus resultados. A la hora de expresar el resultado de la medición de una magnitud física es obligatorio dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado (*Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida*, 2000a). Esta indicación sirve para comparar medidas entre sí o con otros valores de referencia y para evaluar y caracterizar la calidad de la medida se utiliza la incertidumbre.

La incertidumbre es un parámetro positivo que caracteriza la dispersión de valores cuantitativos atribuidos a la magnitud sometida a medición basado en la información utilizada (“ISO 17123-1: Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 1: Theory,” 2013), es decir, es un indicador de la exactitud que no solo incluye la desviación típica experimental de la medida sino que, además, tiene en cuenta todos los factores que pueden afectar a dicha exactitud.

Otro aspecto importante para la metrología es la trazabilidad, que se define como la propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas (*Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida*, 2000b). Esto quiere decir que es necesario conocer la cadena de mediciones realizadas para asegurar que las medidas obtenidas estén de acuerdo al SI, conociendo la incertidumbre de cada paso.

Este capítulo se centra en la metrología de longitud al aire libre y en él se resalta la importancia de calibrar los instrumentos de medida en bases especialmente diseñadas para ello, se describe cómo deben ser estas bases y se muestra una visión general del estado actual de la cuestión.

2.1. Justificación

El metro, unidad de medida de longitud en el Sistema Internacional de Unidades (SI), se define como la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ segundos (Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre, 2006).

Para poder medir distancias de manera absoluta, es decir, de acuerdo a esta definición de metro, es necesario contar con algún tipo de patrón con el que comparar las medidas realizadas. Las medidas de longitud más exactas utilizan interferómetros láser con frecuencia estabilizada, en distancias cortas y en laboratorios con unas condiciones muy bien controladas. Este tipo de medidas interiores se utilizan por los Institutos Nacionales de Metrología (como el caso del Centro Español de Metrología) para proporcionar la referencia o estándar primario del metro en sus correspondientes países (Baselga S. *et al.*, 2015).

En la práctica, para realizar mediciones al aire libre, es necesario disponer de una infraestructura que nos sirva de referencia para calibrar los instrumentos con los que realicemos las medidas, cuya escala haya sido transferida desde los laboratorios anteriormente descritos. Estas infraestructuras son las bases de calibración.

Las especificaciones de precisión de los instrumentos proporcionados por los fabricantes pueden ser inalcanzables debido a errores derivados de las condiciones ambientales. Para cuantificar los errores ambientales y garantizar la precisión de nuestros trabajos se deben realizar calibraciones de los instrumentos en bases de calibración bien definidas.

Las precisiones submilimétricas no tienen interés únicamente en el ámbito de la investigación, sino que se requieren en algunas aplicaciones como en proyectos de ingeniería civil singulares, control de deformaciones, repositorios de residuos nucleares, ingeniería de producción y en ciencia fundamental (Pollinger *et al.*, 2012).

2.2. Aspectos fundamentales

Una base geodésica de calibración consiste en una serie de pilares de observación alineados, normalmente desde un par a más de 10, con una longitud que fluctúa entre decenas de metros hasta un kilómetro o más. Las distancias entre los pilares se conocen con una incertidumbre total que puede llegar a los 0,1 milímetros y el diseño de la base suele estar optimizado de acuerdo a los instrumentos a calibrar (Jokela J. *et al.*, 2009).

Se utilizan para calibrar instrumentos geodésicos y topográficos. Los instrumentos de medida se instalan en los pilares de observación con métodos de fijación estándar. Los instrumentos se calibran comparando las distancias medidas con las conocidas entre los pilares de la base.

Para esto es necesario conocer las distancias entre los pilares con la exactitud adecuada (deseable un orden superior o al menos $1/5$ de la precisión del equipo a calibrar), que la base de calibración esté dotada de escala absoluta y que se monitorice regularmente para detectar posibles desplazamientos y comprobar la

estabilidad de los pilares. En el siguiente apartado se describen las principales especificaciones que debería cumplir una base de calibración.

La configuración típica de una base de calibración es la de varios monumentos alineados. Los monumentos suelen tomar sus nombres de su distancia relativa del punto inicial. Por lo tanto, un punto situado a una distancia de 120 metros del punto 0 se denomina punto de 120 metros, un punto situado a una distancia de 390 metros del punto 0 se denomina punto de 390 metros, etc. (Dracup J. *et al.*, 2014).

En cuanto a la elección del emplazamiento donde ubicar la base de calibración es recomendable tener en cuenta los siguientes aspectos. En primer lugar, se debe tratar de un lugar fácilmente accesible, ya que esto facilita la tarea de calibrar los instrumentos. En segundo lugar, las características geológicas del terreno deben ser estables para evitar movimientos de los pilares. Debido a que se realizarán mediciones entre los pilares es necesario que haya intervisibilidad entre los mismos.

2.2.1. Base de calibración de Nummela

La base de calibración de Nummela, situada en Finlandia y mantenida por National Land Survey of Finland (FGI) se considera un estándar en la metrología de longitud ya que es la única que ha demostrado ser estable con una incertidumbre relativa estándar cerca de $u = 10^{-8}$ durante más de 70 años (Baselga S. *et al.*, 2015).

La base cuenta con una longitud de 864 metros y fue originalmente implantada para la calibración de cables de 24 metros de invar para determinar una escala uniforme para la triangulación. Desde 1947, la línea de base se ha medido regularmente con el comparador de interferencia Väisälä (Jokela J. y Häkli P., 2010).

A la línea base se le transfiere la escala desde la longitud de calibres de cuarzo, como los que aparecen en la Figura 1, que son unas barras de cuarzo, también llamadas metro de cuarzo, cuyas longitudes se determinan mediante comparaciones repetidas y calibraciones absolutas en laboratorio, de manera que se conoce su longitud con una incertidumbre de 40 nm (Jokela J. y Häkli P., 2010).



Figura 1. Calibres de cuarzo (Jokela & Häkli, 2010)

A continuación, se utilizan estas barras de cuarzo para calibrar el interferómetro Väisälä con el cual se realizan las mediciones de la base de calibración al aire libre. Este aparato cuenta con un sistema de espejos (Figura 2), entre los cuales se coloca la barra de cuarzo que sirve como referencia y que por tanto nos permite calibrar el interferómetro transfiriéndole así la escala.

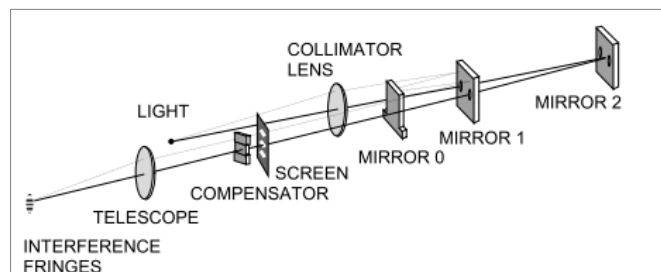


Figura 2. Funcionamiento interferómetro Väisälä (Lassila, Jokela, Poutanen, & Xu, 2003)

Por tanto, a la vista del proceso descrito, la cadena de trazabilidad de la base de calibración de Nummela es la que se muestra en la Figura 3.

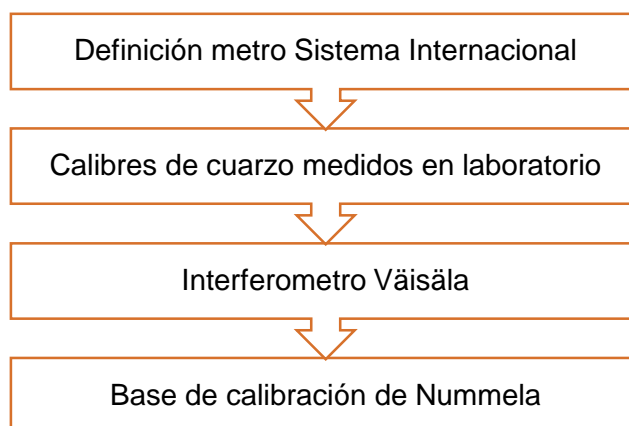


Figura 3. Cadena de trazabilidad de la base de calibración de Nummela (Elaboración propia)

Una vez medida la base de calibración con este procedimiento, la escala de esta base de calibración puede transferirse a otras. Para ello será necesario calibrar en esta base el aparato a utilizar, como por ejemplo el Kern Mekometer ME5000.

2.2.2. Otras bases de calibración

Como se ha explicado en el punto 2.2.1, la base de calibración de Nummela es la que se toma como estándar internacional. No obstante, existen otras bases de calibración, dotadas de escala absoluta, que se utilizan para la calibración de aparatos geodésicos de alta precisión.

Algunos ejemplos de bases de calibración son la base de 600 metros de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt, en Braunschweig, Alemania (Pollinger et al., 2012); la MGI (Serbian Military Geographic Institute) de Kovin, Serbia (Bozic, Fan, & Milosavljevic, 2013) o la base de calibración de Kyviškės, fundada del Institute of Geodesy of the Vilnius Gediminas Technical University, en Lituania (Buga et al., 2016).

En el caso de España, se estableció por parte del Instituto Geográfico Nacional, en 1978, una base de calibración en Valladolid con el sistema Väisälä, adoptado en 1954 como estándar internacional para establecer bases en las que se calibraban los hilos de invar que se utilizaban entonces para medir bases geodésicas (Valbuena G. *et al.* 1990b). Este método se presentó en el año 1923 por parte del profesor Väisälä de la Universidad de Turku (Finlandia) y se trata de un método de medición de distancias por medio de interferencias de luz monocromática. En 1927 se mejoró introduciendo patrones dimensionales de cuarzo y alcanza precisiones del orden de 0,1 ppm.

Esta base de calibración cuenta con siete pilares, tres de ellos principales perfectamente alineados (0, 216 y 432 metros), con distancia entre ellos conocida con una precisión de medio milímetro (Valbuena J. et al., 1990b).

En la actualidad, la base Väisälä de Valladolid no se encuentra operativa a efectos prácticos debido a que no dispone de centrados estándar y a que uno o varios pilares han experimentado desplazamientos significativos por lo que las distancias nominales proporcionadas en los años 1970 ya no serían válidas.

Otro ejemplo de base de calibración, ésta más actual, podemos encontrarlo en la Universitat Politècnica de València. Esta base de calibración, establecida en el año 2007, se monitoriza regularmente y está dotada de escala absoluta transferida desde la base de calibración de Nummela. En el punto 5 del presente documento se profundiza más en las características de esta base, ya que es la utilizada para las observaciones que se tratan en este trabajo.

2.3. Límites y retos actuales

La distanciometría submilimétrica al aire libre ha sido abordada tradicionalmente con el uso de distanciómetros electrónicos (EDMs) de alta precisión como el Kern Mekometer (ME5000). No obstante, estos aparatos no se fabrican actualmente y existen muy pocas unidades operativas.

La propagación de la señal de los distanciómetros electrónicos, como el Mekometer ME5000, se ve afectada por el índice de refracción del aire, que depende de parámetros ambientales como la temperatura, presión y humedad. Estas características son muy cambiantes, tanto en el tiempo como en el espacio, por lo que su determinación es compleja.

El procedimiento normal para determinar el índice de refracción es medir la temperatura, la presión y la humedad en ambos extremos de la distancia a medir. Esto representa bastante bien el valor del índice de refracción en el recorrido de la onda siempre que este recorrido sea paralelo al terreno (Rüeger J., 1992), pero para medidas de más de algunos cientos de metros los parámetros atmosféricos del principio y del final están fuertemente influenciados por la proximidad del suelo.

El hecho de no conocer con mayor precisión el índice de refracción limita la incertidumbre de la medición de distancias al aire libre en distancias mayores a un kilómetro (Pollinger F. *et al.*, 2012).

Debido a estas limitaciones, se están desarrollando distintas técnicas para tratar de conseguir precisiones por debajo del milímetro en distancias al aire libre, como por ejemplo EDMs basados en peines de frecuencias (Schuhler N. *et al.*, 2006) y las técnicas que se basan en los sistemas GNSS (Baselga S. *et al.*, 2015).

En lo que respecta al uso de GNSS, el mayor reto que se presenta actualmente en la obtención de distancias con precisión submilimétrica es, por un lado, el efecto multipath que puede suponer una fuerte limitación en determinados lugares como bases de calibración ya existentes rodeadas de arbolado o edificios y, por otro, la determinación de la incertidumbre asociada a la medición.

Capítulo 3. Determinación submilimétrica de distancias mediante el empleo de EDMs

La distanciametría submilimétrica al aire libre se ha abordado tradicionalmente con el uso de distanciómetros electrónicos (EDM, por sus siglas en inglés, Electronic Distance Measurement).

Este capítulo está dedicado a este tipo de aparatos e incluye aspectos fundamentales como su funcionamiento básico, las fuentes de error de estos instrumentos y su calibración según la norma ISO 17123-4. También se incluye en el punto 3.4 una descripción de las principales características del Mekometer ME5000, tanto por ser uno de los EDMs más importantes por su alta precisión como por ser el que se ha utilizado en la campaña de campo del presente trabajo.

3.1. Funcionamiento básico de un EDM

El principio básico de funcionamiento de los instrumentos de EDM es el siguiente: se envía un haz de frecuencia conocida F a un objetivo (un prisma reflector normalmente) y se refleja de nuevo al instrumento (Bell B., 1992).

La distancia que recorre el haz (que será dos veces la distancia que queremos medir ya que incluye la ida y el retorno) contiene un número entero de longitudes de onda más una parte fraccionaria, de acuerdo a la expresión (1).

$$2D = m\lambda + f\lambda \quad (1)$$

donde

D es la distancia que se quiere obtener;

m es el número entero de longitudes de onda;

λ es la longitud de onda del haz;

f es la parte fraccionaria de longitudes de onda;

Por lo que la distancia que queremos determinar será la que aparece en la ecuación (2).

$$D = m\frac{\lambda}{2} + f\frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Hay tres métodos distintos para determinar la distancia basándose en el principio anteriormente descrito (Bell B., 1992). Estos métodos se describen en los siguientes subapartados.

3.1.1. Resolución de fase

La mayoría de instrumentos EDM con longitudes de onda del infrarrojo utilizan este método para obtener la distancia. Estos aparatos determinan la parte fraccionaria de longitudes de onda midiendo el ángulo de fase entre el haz emitido y el de retorno (Figura 4).

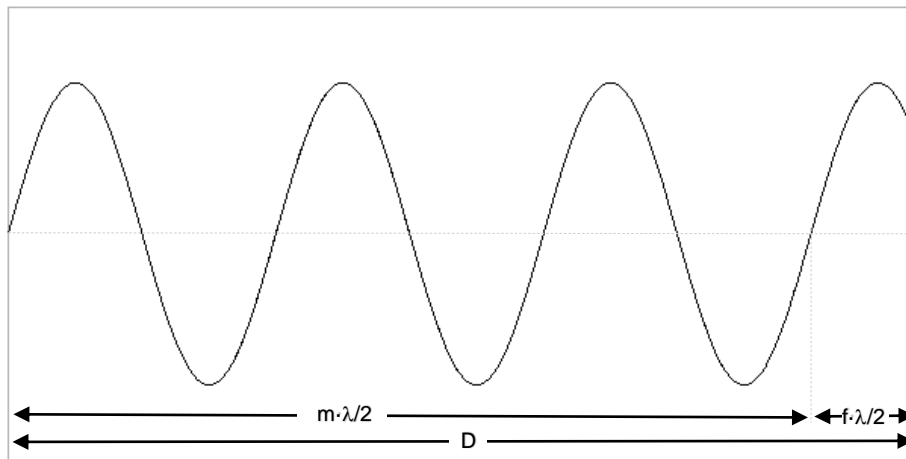


Figura 4. Principio de resolución de fase. (Elaboración propia)

Para encontrar el valor de m , la medición se repite utilizando varias frecuencias predefinidas.

Los distanciómetros de alta precisión no utilizan este principio por ser el que más error introduce, como se comenta más adelante en este documento.

3.1.2. Modificación de la longitud de onda

Algunos EDMs eliminan la parte fraccionaria de la ecuación (2) cambiando la distancia, D , de la ruta hasta conseguir que la diferencia de fase sea cero, obteniendo así un número entero de medias longitudes de onda (Figura 5).

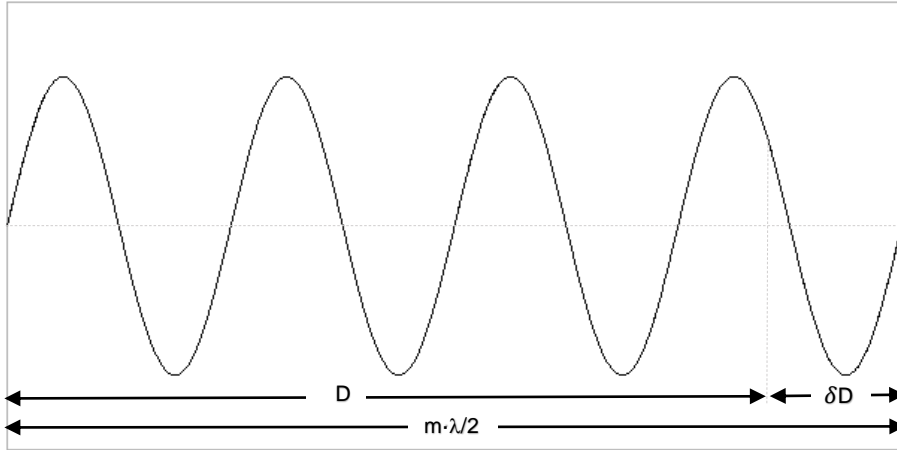


Figura 5. Principio de modificación de la longitud de ruta. (Elaboración propia)

3.1.3. Modificación de la frecuencia

Otros distanciómetros, como el Mekometer ME5000 que es el utilizado en este trabajo, eliminan también la parte fraccional, pero utilizando un método diferente. En este caso la modulación de la frecuencia de la onda transmitida se ajusta (dentro de un cierto rango) (Rüeger J., 1992) hasta que se obtiene una diferencia de fase nula (Figura 6).

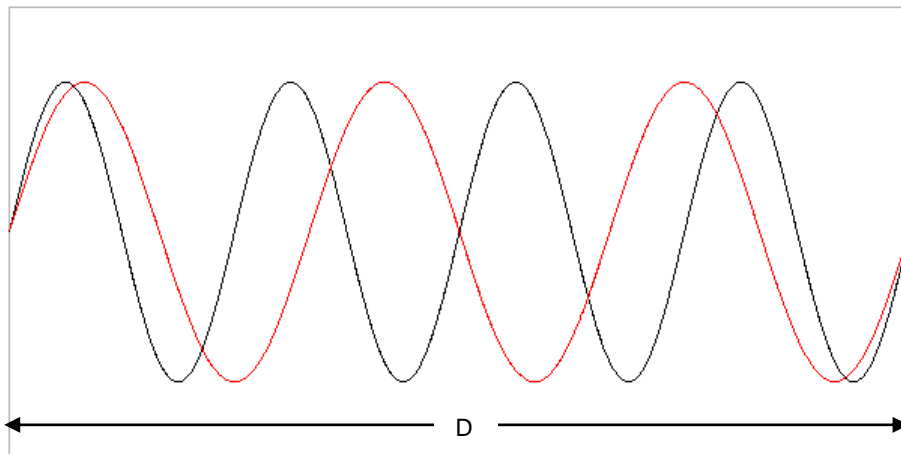


Figura 6. Principio de modificación de la frecuencia. (Elaboración propia)

El valor de m se obtiene en este caso de la siguiente forma: se encuentra una primera frecuencia en la cual haya un número entero de longitudes de onda, por lo que la distancia se obtendría de acuerdo a la ecuación (3), correspondiente a la curva dibujada en rojo en la Figura 6.

$$D = m \frac{\lambda}{2} \tag{3}$$

Posteriormente esta frecuencia se incrementa en pequeños pasos hasta que se vuelve a detectar una diferencia de fase cero, a esa frecuencia (que es conocida), la trayectoria contiene $m+1$ de estas nuevas medias longitudes de onda, de acuerdo a la ecuación (4), que se correspondería en este caso con la onda negra de la Figura 6.

$$D = (m + 1) \frac{\lambda_1}{2} \quad (4)$$

Con estas dos frecuencias ya se podría determinar tanto m como la distancia, por tanto, el problema quedaría resuelto.

Un ajuste de frecuencia en este tipo, conocido como ajuste de frecuencia de EDMs, se hace en dos etapas: en un primer ajuste aproximado, se hace un rastreo buscando un nulo o diferencia de fase cero en el haz de retorno hasta localizarlo. A continuación, se hacen se hacen 1280 mediciones individuales en frecuencias ligeramente mayores y menores que la correspondiente al nulo. El ajuste más riguroso se realiza a partir de la media ponderada de esos valores, que constituyen el ajuste fino, obteniéndose así el valor definitivo del valor de frecuencia ajustada a ese nulo concreto (Valbuena J. *et al.*, 1990a).

3.1.4. Comparativa de métodos de medición

Los tres métodos anteriormente descritos permiten obtener la distancia entre el emisor (distanciómetro) y el receptor (prisma o reflector). La precisión que permiten alcanzar es diferente.

El primer método, el de resolución de fase, es el más económico y el más simple. No obstante, introduce error cíclico en las mediciones.

Los dos últimos métodos, los que se basan en conseguir un número entero de longitudes de onda para determinar la distancia ya sea modificando la distancia o la frecuencia, proporcionan una mayor precisión en las medidas por los siguientes motivos (Bell B., 1992):

- No se introduce el error cíclico, ya que la diferencia de fase es siempre la misma.
- La precisión con la que puede medirse el punto cero en el que la diferencia de fase es nula es mayor que la que puede alcanzarse al medir una diferencia de fase.

Por tanto, los distanciómetros de alta precisión no utilizan el método de resolución de fase, sino que se basan en alguno de los dos últimos métodos, como es el caso del Mekometer ME5000, que utiliza la modificación de la frecuencia.

3.2. Fuentes de error

Los distanciómetros electrónicos se ven sometidos a diversas fuentes de error que afectan a las medidas obtenidas con éste. En este punto se explican las fuentes de error más importantes y cómo afectan a las mediciones.

- Constante del instrumento

Este error se produce porque el origen electro-óptico o cero de un EDM no está localizado en el eje vertical del instrumento por lo que una pequeña corrección se debe añadir a las medidas para referir las distancias al eje vertical del instrumento (Rüeger J., 1992). Este error también se conoce como error cero del instrumento.

Este parámetro cambia ligeramente con el tiempo, por lo que es necesario determinarlo periódicamente. Con la metodología de calibración descrita en el apartado 3.3 de este documento y aplicado en el estudio realizado, podemos obtener esta constante en el mismo ajuste que las distancias.

- Errores de escala

Los errores de escala se producen principalmente debido al oscilador y a los diodos emisores y receptores. Otros errores de escala son causados por efectos externos como por ejemplo el uso de una velocidad de la luz incorrecta o errores en las estimaciones de los parámetros atmosféricos.

- Errores periódicos

Los EDMs basados en el principio de medición de fase pueden tener errores periódicos, que pueden deberse a las conexiones electrónicas o a un error sistemático en el sistema de medición de fase (Rüeger J., 1992).

3.3. Calibración de un EDM mediante ISO17123-4

La ISO (Organización Internacional de Normalización) es una organización que se encarga de crear estándares a nivel internacional de muy diversos ámbitos.

La serie ISO 17123 especifica los procedimientos a adoptar en campo para determinar y evaluar la incertidumbre de medidas obtenidas con aparatos geodésicos y su equipo auxiliar ("ISO 17123-1: Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 1: Theory," 2013).

En la primera parte de esta ISO, la 17123-1, se presentan algunos conceptos teóricos, así como unas reglas generales para evaluar y expresar la incertidumbre en las mediciones para su uso en las especificaciones de ISO 17123-2 a la ISO 17123-8.

La parte 4 de esta serie ISO (ISO 17123-4) se centra en los instrumentos distanciómetros electro-ópticos. Según el contenido de esta norma son dos los posibles procedimientos a seguir para la calibración de estos aparatos: el procedimiento simplificado y el completo.

El procedimiento simplificado proporciona una estimación de si la precisión de un determinado equipo EDM está dentro de la desviación permitida de acuerdo a la ISO 4463-1 (Métodos de medición para construcción, configuración y medición), pero no nos permite obtener una incertidumbre estándar.

El procedimiento completo se debe efectuar para determinar la mejor precisión alcanzable para un determinado instrumento y su equipo auxiliar en condiciones de campo. En este trabajo nos centraremos en el método completo, ya que las mediciones en la base de calibración de la UPV con el distanciómetro Kern Mekometer ME5000 se realizaron acorde a este procedimiento.

3.3.1. Calibración mediante el procedimiento completo

Este procedimiento se basa en medidas de distancias de todas las combinaciones de una línea de testeo o base de calibración.

En la ISO 17123-4, se especifica el tipo de base a establecer para realizar este procedimiento. Se debe tratar de una línea de entre 300 y 600 metros de longitud, con 7 puntos estables de observación (Figura 7).

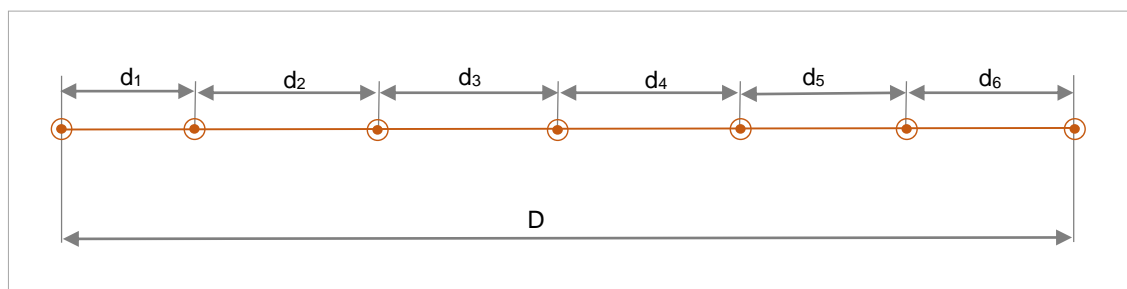


Figura 7. Configuración de la base para procedimiento completo de calibración (Elaboración propia)

Todas las 21 distancias posibles entre los 7 puntos deben medirse en el mismo día y todas deben medirse con un buen retorno de la señal. Además, es necesario medir la temperatura y la presión para asegurar una buena corrección atmosférica.

Una vez realizadas todas las medidas, éstas deben ser corregidas de errores sistemáticos como la corrección atmosférica y una vez corregidas se evalúan en un ajuste por mínimos cuadrados.

Los resultados de este ajuste se realizan una serie de test estadísticos, usando tanto la desviación estándar de una medida obtenida en el ajuste como la corrección cero del instrumento.

Los resultados deben presentarse junto con su incertidumbre total, es decir, tanto la de tipo A (proveniente de las observaciones) como la de tipo B (medidas externas a las observaciones de distancia). Con esto se tienen en cuenta todos los factores que pueden afectar a la calidad de la medida obtenida.

En la Tabla 1 se muestran todos los factores a tener en cuenta en el cálculo de la incertidumbre total de la medida y si estos son de tipo A o B.

Tabla 1. Fuentes de incertidumbre ¹

Fuente de incertidumbre	Tipo
Precisión de la distancia medida (D_m)	Tipo A
Corrección cero (δ)	Tipo A
Temperatura (t)	Tipo B
Presión (p)	Tipo B
Humedad relativa (rh)	Tipo B
Excentricidad base nivelante (e)	Tipo B
Excentricidad reflector (r)	Tipo B

La incertidumbre de cada uno de estos factores se obtiene de una manera diferente. Por ejemplo, la correspondiente a la medida se calcula a partir del anterior ajuste por mínimos cuadrados mientras que la debida a la presión puede obtenerse con pruebas del barómetro en laboratorio.

Por tanto, teniendo en cuenta estos factores y siguiendo la ley de propagación de incertidumbres, la ecuación (6) es la que nos permite obtener la incertidumbre de una distancia medida con el EDM bajo las condiciones dadas ("ISO 17123-4: Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors)," n.d.).

$$u(D) = \sqrt{u^2(D_m) + u^2(\delta) + u^2(t) + u^2(p) + u^2(rh) + u^2(e) + u^2(r)} \quad (5)$$

3.4. Mekometer ME5000

El Mekometer ME5000 fabricado por Kern es un distanciómetro electrónico de alta precisión con portadora láser.

Este instrumento se introdujo en el mercado en 1986 (Bell B., 1992) y generó de inmediato un gran interés en el ámbito de la distanciometría por ofrecer mayor exactitud que cualquier aparato de medida existente anteriormente.

En España, el primer usuario de este aparato de distanciometría de alta precisión fue el Instituto de Astronomía y Geodesia (Centro mixto CSIC-UCM), en el año 1989 (Valbuena J. *et al.*, 1990a).

Su precisión nominal es de $\pm (0,2 \text{ mm} + 0,2 \text{ ppm})$. No obstante, esta alta precisión nominal solo puede conseguirse si, entre otros factores, se controla perfectamente el índice de refracción del medio, lo que solo puede hacerse con ciertas posibilidades de éxito en distancias inferiores a 1000 metros (Valbuena J. *et al.*, 1990a). Para alcanzar un máximo de 5 kilómetros con la precisión nominal se debería establecer una infraestructura de toma de constantes meteorológicas.

Basado en el sistema de medición de distancias de modificación de la frecuencia, descrito en el apartado 3 el instrumento puede medir distancias de dos maneras distintas. El primer método es realizar una medida aislada normal (para lo que invierte de 2 a 2,5 minutos) y mediante un segundo método denominado tracking (cada 20

¹ Todas las tablas de este documento que aparecen sin fuente son elaboración propia.

segundos tras la inicial) que presenta fuertes limitaciones en cuanto a velocidad de desplazamiento.

Dispone, a diferencia de otros aparatos de medición, de únicamente dos tornillos nivelantes en ángulo recto. El aparato bascula sobre una rótula central, siendo constante la altura de estacionamiento.

Capítulo 4. Determinación de distancias mediante GNSS

Un Sistema Global de Navegación por Satélite, conocido como GNSS (Global Navigation Satellite System), se refiere a un conjunto de satélites que proporcionan señales desde el espacio que transmiten para permitir el posicionamiento y sincronización de los receptores GNSS empleados por los usuarios del sistema (“European Global Navigation Satellite Systems Agency,” n.d.).

El primer sistema de este tipo que se puso en funcionamiento fue el GPS (Global Positioning System) desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. En la actualidad coexiste con otros como por ejemplo el GLONASS (ruso), el GALILEO (europeo) o el COMPASS (chino).

En este capítulo se explica el funcionamiento básico de la tecnología GNSS, así como sus principales fuentes de error. Tras esto, a modo de estado del arte de la distanciometría submilimétrica, se habla de algunos antecedentes en este ámbito.

4.1. Funcionamiento básico del GNSS

El posicionamiento mediante tecnologías GNSS se basa en la obtención de la posición a partir de las distancias del receptor a distintos satélites con posición conocida en el espacio.

El principio básico de funcionamiento de la tecnología GNSS es la medición del tiempo que tarda una señal electromagnética en recorrer la distancia entre el emisor (satélite) y un receptor (Priego De Los Santos, 2012). Conocido el tiempo de viaje y la velocidad de la luz se obtiene la distancia entre el emisor y el receptor de acuerdo a la fórmula (6) (Sanz J. *et al.*, 2013).

$$R = \rho + c(dt_{rec} - dt^{sat}) + Tr + \alpha_f STEC + K_{pf,rec} - K_{pf}^{sat} + M_{pf} + \varepsilon_{pf} \quad (6)$$

donde

ρ es la distancia geométrica entre el satélite y el receptor;

c es la velocidad de la luz;

dt_{rec} y dt^{sat} son el offset del reloj del receptor y del satélite respectivamente;

Tr es el retardo troposférico;

$\alpha_f STEC$ es el retardo ionosférico;

$K_{pf,rec}$ y K_{pf}^{sat} son los retardos instrumentales del receptor y del satélite;

M_{pf} es el efecto multipath;

ε_{pf} es el ruido del receptor;

Este método se denomina cálculo por pseudodistancia o código y en él el observable es la distancia entre el satélite y el receptor (Berné-Valero J. *et al.*, 2013). La limitación principal de este procedimiento es que un pequeño error en la determinación del tiempo puede provocar un error importante en la distancia obtenida.

La distancia entre el satélite y el receptor puede obtenerse, de una manera distinta, midiendo el número entero de longitudes de onda (N) y la parte no entera (φ), del modo que muestra en la Figura 8.

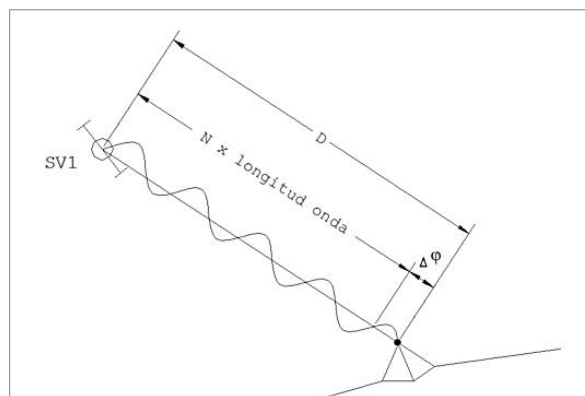


Figura 8. Principio de medición por fase GNSS (Berné-Valero *et al.*, 2013)

La complejidad de este principio reside en determinar el número entero de longitudes de onda (N), lo cual se denomina fijar ambigüedades.

4.2. Fuentes de error

Los observables GNSS se ven afectados por diversas fuentes de error. Estos errores se suelen dividir en tres grupos según la parte a la que afectan. El primer grupo engloba los errores debidos al emisor, es decir, el satélite y la órbita de éste; el segundo incluye los errores que dependen de la propagación de la señal y, por último, el tercer grupo incluye los errores causados por los instrumentos que reciben la señal.

Determinados errores del GNSS no se engloban de una manera clara en uno de las tres partes antes mencionadas (emisor, medio o receptor). Un ejemplo de esto es la pérdida de ciclos, que algunos autores consideran que se trata de un error de propagación mientras que otros consideran que es un error del receptor. Una vez resaltada esta discrepancia entre autores, cabe señalar que la clasificación utilizada en este trabajo se basa en (Berné-Valero J. *et al.*, 2013).

Algunos de los errores que afectan a la tecnología GNSS se pueden modelar, minimizar o incluso eliminar (Priego De Los Santos E., 2012), por tanto es importante conocer y tratar las distintas fuentes de error para conseguir la mayor precisión posible con datos GNSS.

En este apartado se exponen las principales fuentes de error y cómo se pueden eliminar o reducir.

4.2.1. Errores en satélites y órbitas

Los errores más importantes que afectan a los satélites son los generados por los relojes que llevan incorporados y su posicionamiento mediante los parámetros orbitales.

- Errores en los parámetros orbitales

Un error orbital es la diferencia entre las efemérides transmitidas en el mensaje de navegación o calculadas y la posición de dicho satélite (Berné-Valero J. *et al.*, 2013), es decir, la diferencia entre la posición que debería tener un satélite según su órbita teórica y la posición real del satélite en un determinado momento.

Los satélites se desvían de su órbita teórica por distintas razones como la variación del campo gravitatorio terrestre, los efectos de mareas producidos por los astros (especialmente por el Sol y la Luna), las variaciones en la presión de la radiación solar, la fricción del satélite con moléculas libres, etc.

Para eliminar o minimizar este error, se debe trabajar en post proceso con efemérides precisas. La diferencia entre las efemérides transmitidas, que capta el receptor en tiempo real, y las efemérides precisas es que las primeras son una predicción de la órbita, mientras que las segundas son determinaciones orbitales de alta precisión realizadas por diferentes instituciones, en postproceso (Berné-Valero J. *et al.*, 2013), a partir de una combinación de observaciones desde distintos centros y estaciones.

- Errores en los relojes de los satélites

Estos errores se deben al desfase que sufren los relojes, pese a ser relojes atómicos muy precisos, de los satélites respecto al tiempo GNSS. Estos errores provocan un error en la distancia calculada entre el satélite y el receptor.

Este desplazamiento del error se divide en dos términos, de acuerdo a la ecuación (7) (Berné-Valero *et al.*, 2013).

$$\delta t_s = dt + \delta t_r \quad (7)$$

El primer término se debe a la deriva causada por el oscilador y se puede corregir mediante un polinomio de segundo grado (ecuación (8)) cuyos coeficientes ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$) se envían en el mensaje de navegación que capta el receptor y que son calculados para cada satélite por estaciones de seguimiento.

$$dt = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot t + \alpha_2 \cdot t^2 \quad (8)$$

El segundo término de la ecuación (7) es el llamado efecto relativista de funcionamiento del reloj.

Para eliminar este error por completo, ya que con los parámetros del mensaje de navegación solo se corrige el primer término, se utiliza el método conocido como simples diferencias.

- Errores relativistas

De acuerdo a la teoría de la relatividad (general y especial), debido a la diferencia de gravedad entre la superficie terrestre y el satélite y la rotación de éste, los osciladores de los relojes del receptor y el emisor tendrán un comportamiento distinto.

Este error es del orden de pocas partes por billón (Berné-Valero J. *et al.*, 2013), por lo que no se trata de un error muy importante, no obstante se puede corregir tal y como se explica a continuación.

Se puede descomponer en dos. Por un lado, el componente debido a la diferencia en el potencial gravitatorio, puede corregirse disminuyendo la frecuencia del oscilador del satélite, ya que como por efectos de la relatividad general, éste corre más rápido que en Tierra, si se reduce su frecuencia (hacemos que vaya más despacio) conseguiremos que, con el efecto relativista, las oscilaciones estén sincronizadas.

La segunda corrección, debida a la relatividad especial, es una componente periódica que se debe a la excentricidad de la órbita del satélite y a la velocidad relativa entre emisor y receptor y puede corregirse mediante el software del receptor.

4.2.2. Errores en la propagación de la señal

La señal GNSS es una onda electromagnética, por tanto, se ve sometida a las leyes del electromagnetismo lo cual implica que su velocidad varía según el medio que atraviese.

La señal GNSS atraviesa diferentes capas de la atmósfera a lo largo de su trayectoria desde los satélites hasta los receptores, por lo que experimenta distintos cambios en su velocidad y en su dirección de propagación.

En la atmósfera terrestre, se pueden distinguir dos zonas principales según el comportamiento de las ondas GNSS al atravesarlas (Figura 9), la ionosfera y la troposfera, en las cuales la señal GNSS, por las características físicas de estas capas, sufre retrasos que se traducen en errores de posicionamiento: refracción ionosférica y refracción troposférica.

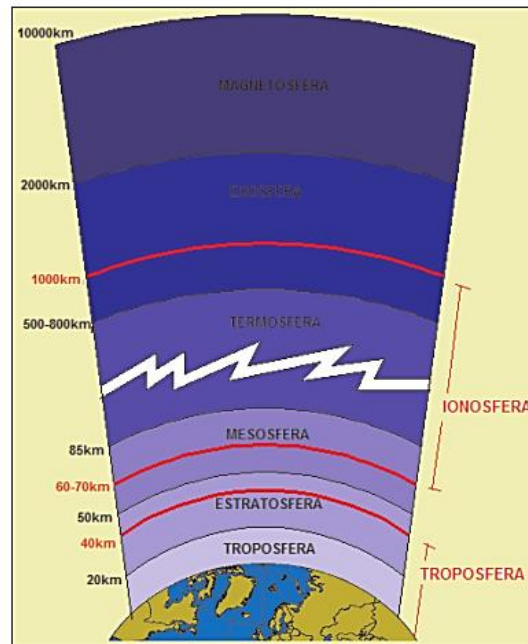


Figura 9. Capas de la atmósfera (Berné-Valero et al., 2013)

Tanto la refracción ionosférica como la troposférica hacen que el comportamiento de la señal GNSS cambie y no sea el mismo que en el vacío. A continuación se explican ambos errores, tanto a qué se deben como la manera de corregirlos.

- Refracción ionosférica

La ionosfera es la capa de la atmósfera que se encuentra aproximadamente entre los 70 y los 1.000 kilómetros de altitud.

Se trata de una capa ionizada, es decir, en ella se encuentran partículas cargadas eléctricamente, a causa de las radiaciones solares u otras radiaciones. Se trata de un medio dispersivo, lo que quiere decir que las ondas de distintas frecuencias se propagan a distintas velocidades, lo que se traduce en un retardo de grupo de la señal GNSS (código) y un avance de fase (onda portadora).

Las propiedades de esta capa atmosférica pueden cambiar rápidamente y, de hecho, sufre notables variaciones a lo largo del día.

El contenido de electrones de la ionosfera, que es el parámetro que afecta directamente a la propagación de la señal en la ionosfera, se mide mediante el número total de electrones (TEC) que la onda atraviesa en su recorrido (Priego De Los Santos E., 2012).

El TEC varía según factores como el cambio de ionización solar, de la actividad magnética, la hora del día, el lugar de observación, estación del año o el ciclo de radiación solar.

Se pueden utilizar modelos ionosféricos, que establecen la distribución del TEC, pero estas concentraciones de electrones son irregulares y poco predecibles, por lo que cualquier modelo ionosférico es sólo una aproximación (Berné-Valero J. *et al.*, 2013).

Debido a la dificultad de encontrar un buen modelo ionosférico, para eliminar la refracción ionosférica se emplea otro método más que es la utilización de dos señales

con diferentes frecuencias. Como el retardo depende de la longitud de onda, para cada frecuencia será distinto, lo cual nos permitirá calcular el retardo ionosférico.

- Refracción troposférica

La troposfera es la capa de la atmósfera que comprende los primeros 40 kilómetros de ésta. Se trata de un medio no dispersivo, por lo que en este caso afecta de igual modo a la fase y al código y no puede eliminarse utilizando doble frecuencia.

El índice de refracción de esta capa atmosférica depende de la temperatura, la presión y el contenido de vapor de agua de la atmósfera. También depende de la altura.

El retardo troposférico puede dividirse en dos componentes: la componente seca o hidrostática y la componente húmeda.

La componente hidrostática, varía con la temperatura y la presión atmosférica de una manera fácil de modelar, y su variación a lo largo del día es muy pequeña (Berné-Valero J. *et al.*, 2013), por lo que pueden utilizarse modelos para su corrección. Esta componente supone alrededor de un 90% del total del retardo troposférico (Farrell J. y Barth M., 1999).

La componente húmeda, en cambio, es muy difícil de modelizar ya que depende el contenido de vapor de agua de la atmósfera, parámetro que varía muy rápidamente y de forma muy aleatoria. Esta componente representa alrededor de un 10% del retardo troposférico total.

Este error se modela de forma aproximada mediante distintos modelos, que posteriormente se aplican a las observaciones para tratar de corregir este retardo. Algunos ejemplos de modelos son el de Hopfield, Saastamoinen o Black.

4.2.3. Errores en los instrumentos

A continuación se exponen los errores causados por el receptor. Algunos de ellos no son errores propios del receptor, pero como se manifiestan en él se incluyen como tal.

- Pérdidas de ciclo

Este error se trata de un salto en el registro de las medidas de fase y puede producirse por la interrupción de la señal enviada por el satélite, que la calidad de la señal sea baja, o por un fallo en el software del receptor. El software de los receptores es capaz de detectar y corregir estas pérdidas de ciclo.

- Efecto multipath

Este error se produce por las múltiples reflexiones de la señal en superficies próximas al receptor (Figura 10). Por tanto, la señal recogida por el receptor tras la reflexión en algún objeto tendrá una distancia mayor a la real.

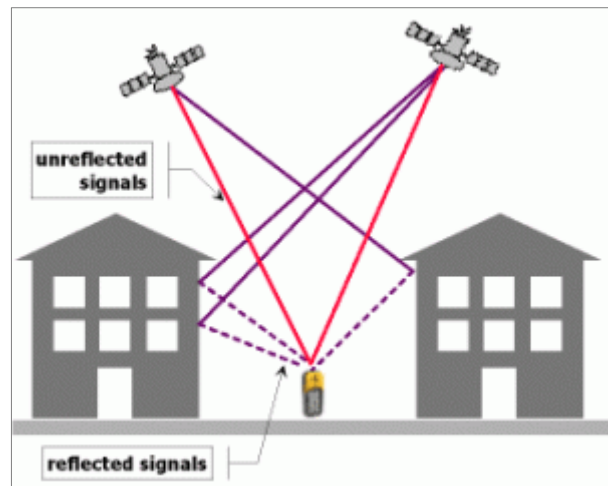


Figura 10. Efecto multipath ("geoawesomeness," 2014)

Para mitigar este efecto se han diseñado diversas antenas, como las denominadas Choke ring, que consisten en un número de conductores concéntricos cilindros alrededor de una antena central (Berné-Valero J. *et al.*, 2013). No obstante, este error sigue suponiendo una limitación en la determinación de distancias con GNSS (Baselga S. y García-Asenjo L., 2008).

- Estado del reloj del receptor

Los relojes de los receptores, menos precisos que los de los satélites, pueden producir un desfase con respecto a la escala de tiempo GNSS. Este desfase se puede determinar conociendo la posición de un mínimo de 4 satélites.

Igual que ocurría con los errores en los relojes de los satélites, este error puede eliminarse completamente utilizando el método de dobles diferencias.

- Variación del centro de fase de la antena

Este error se produce porque el centro mecánico o físico de la antena no coincide con el centro radioeléctrico (que es el punto en el cuál llega realmente la señal).

Para evitar este error cuando se trata de posicionamiento relativo se recomienda orientar todas las antenas en la misma dirección.

Las correcciones de fase de antena para los distintos modelos se publican por el IGS (International GNSS service). Además, cada antena puede calibrarse individualmente en laboratorio, como es el caso de las antenas utilizadas en la observación de campo de este trabajo.

4.3. Métodos de observación y procesamiento GNSS

Existen distintas maneras de realizar las observaciones utilizando la tecnología GNSS. Según la instrumentación utilizada, la precisión requerida, el tiempo necesario para el procesamiento y las condiciones del lugar de observación se utilizará un método u otro.

Hay varias formas de clasificar los métodos de observación, uno de ellas es clasificar los métodos en función de si se trata de posicionamiento absoluto o relativo.

El primero es aquel en el que se obtiene la posición con un único receptor a partir de las distancias satélites-receptor, mientras que el posicionamiento relativo consiste en hallar la posición absoluta de un punto mediante las observaciones realizadas desde ese punto a unos determinados satélites, sumadas a las realizadas en ese mismo instante desde otro punto (referencia) a esos mismos satélites (Olivares J., 2015).

Dentro del posicionamiento relativo, según cuando se realicen los cálculos, tenemos métodos en tiempo real (mediante correcciones diferencias DGNS) o en postproceso (tanto estático si el receptor permanece fijo como dinámico si se mueve).

Para el procesamiento de datos llevado a cabo en este trabajo se ha utilizado la técnica PPP (posicionamiento de punto preciso) y después un procesamiento relativo basado en dobles diferencias de fase. En la parte del capítulo 0 dedicada a la observación y procesamiento de los datos GNSS se detalla y justifica la elección de esta metodología, no obstante sus principios teóricos se exponen en los siguientes apartados.

4.3.1. Posicionamiento de punto preciso

El posicionamiento de punto preciso, conocido como PPP, es una técnica utilizada para determinar la posición con alta precisión utilizando únicamente un receptor GNSS (Krzan G. *et al.*, 2013).

Esta técnica presenta la ventaja de permitirnos calcular la posición sin disponer de una red de estaciones GNSS fijas que sirvan como referencia.

Para obtener precisiones altas es necesario aplicar esta técnica en postproceso, utilizando efemérides precisas, modelos de carga oceánica y atmosférica, correcciones de fase de las antenas y realizando la observación durante un tiempo prolongado.

El fundamento teórico de esta metodología se basa en las ecuaciones de observables, tanto de código (9) como de fase (10), aplicadas a dos frecuencias (Krzan *et al.*, 2013)

$$P = \rho + c \cdot dt_r + c \cdot dt_b + \Delta_{trp} + \Delta_{ion} + \varepsilon \quad (9)$$

$$\Phi = \rho + c \cdot dt_r + c \cdot dt_b + \lambda \cdot N + \Delta_{trp} - \Delta_{ion} + \varepsilon \quad (10)$$

donde

P es la pseudodistancia entre satélite y receptor;

ρ es la distancia geométrica entre satélite y receptor;

c es la velocidad de la luz en el vacío;

dt_r es la diferencia del offset de los relojes del satélite y el receptor;

dt_b es la diferencia de bias;

Δ_{trp} es el retardo troposférico;

Δ_{ion} es el retardo ionosférico;

ε son otros errores;

\emptyset es la diferencia de fase;

λ es la longitud de onda;

N es la ambigüedad de fase;

A partir de las ecuaciones anteriores ((9) y (10)) y utilizando dos frecuencias es posible formar dobles diferencias para eliminar el efecto de la ionosfera. Los parámetros a determinar, por tanto, serán: posición del receptor, offset del reloj del receptor, refracción troposférica y las ambigüedades de fase.

4.3.2. Procesamiento relativo

El objetivo de un procesamiento relativo de datos GNSS es obtener las componentes (ΔX , ΔY , ΔZ) del vector o línea base entre dos puntos, uno de los cuales se considera fijo.

Para que en este cálculo no se introduzcan errores de escala es necesario partir de unas buenas coordenadas aproximadas de los extremos a partir de un posicionamiento absoluto (por ejemplo, mediante PPP).

Este posicionamiento requiere observaciones simultáneas desde dos estaciones a dos satélites en dos épocas muy próximas, a partir de lo cual se pueden crear distintas combinaciones lineales para eliminar distintos errores sistemáticos (Berné-Valero J. *et al.*, 2013).

La ecuación (15) muestra la expresión de diferencia de fases entre los dos receptores (A y B) y dos satélites (k y j) en el mismo instante en unidades lineales.

$${}^k_B\phi_A^j = {}^k_A\phi_B^j - {}^j_A\phi_A^k = \rho_{BA}^k - \rho_{BA}^j + \lambda N_{BA}^{kj} + \Delta_{BA}^{kj\ tropo} - \Delta_{BA}^{kj\ iono} \quad (11)$$

donde

${}^k_B\phi_A^j$ es la diferencia de fase entre los dos receptores y los dos satélites;

ρ_{BA}^k y ρ_{BA}^j es la diferencia de distancia entre los receptores a cada satélite;

λN_{BA}^{kj} son las ambigüedades;

$\Delta_{BA}^{kj\ tropo}$ es el retardo troposférico;

$\Delta_{BA}^{kj\ iono}$ es el retardo ionosférico;

La ecuación (11) se linealiza para cada una de las distancias (de cada receptor a ambos satélites) y se forma un sistema de ecuaciones que se resolverá por mínimos cuadrados, en el que las incógnitas son las correcciones a las coordenadas del punto que se considera móvil.

4.4. Antecedentes en distanciometría GNSS

La tecnología GNSS se utiliza, principalmente, para el posicionamiento y en aplicaciones de navegación, no obstante, en los últimos años han surgido distintas aplicaciones, muchas de ellas aún en desarrollo, como por ejemplo el uso de la señal reflejada (efecto multipath) para estimación de la humedad del suelo (Vey S. *et al.*, 2016).

La determinación de distancias al aire libre con una incertidumbre de algunas décimas de milímetro también es una aplicación de la tecnología GNSS con creciente interés que se está desarrollando en la actualidad.

Anteriores estudios han demostrado el potencial de las técnicas GNSS para la determinación de distancias de alta precisión. El desarrollo de estas técnicas busca tanto obtener distancias con mucha precisión como que éstas sean buenas desde un punto de vista metrológico, es decir, que se expresen con su incertidumbre y sean trazables.

Como se trata de una aplicación aún en desarrollo no existe una normativa (como la ISO 17123-4 en el caso de los distanciómetros) que especifique cómo se deben calibrar los aparatos GNSS (solamente se hace referencia en la ISO 17123-8 al GNSS para el posicionamiento en tiempo real), por tanto, no hay establecida una manera clara de determinar la incertidumbre y una metodología con la que realizar las mediciones.

No obstante, si existen recomendaciones para la medición de distancias para metrología con esta tecnología (JRP SIB60 Surveying, 2016) que pretenden sentar unas bases para el futuro de este tipo de observaciones, como se explica en el punto 4.5.

En el Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universitat Politècnica de València (DICGF-UPV) se han realizado diversos estudios sobre la cuestión, obteniendo resultados que muestran el potencial del GNSS para la distanciometría submilimétrica (Baselga S. *et al.*, 2015).

En dicho departamento se ha desarrollado un nuevo modelo funcional, enfocado específicamente para la determinación de la distancia, que denominan método de estimación robusta (S Baselga *et al.*, 2014) con el que han obtenido valores más estables que con el tratamiento clásico de los datos y permite obtener precisiones por debajo del milímetro.

También se han realizado otros trabajos, fuera de este departamento, en el ámbito del establecimiento y medición de bases de calibración combinando el uso de distanciómetros electrónicos con uso de tecnologías GNSS (Vazquez E. *et al.*, 2015).

4.5. Recomendaciones sobre distanciometría GNSS para metrología

El uso de distanciómetros electrónicos de alta precisión para la determinación de distancias desde un punto de vista metrológico (con su incertidumbre asociada y trazabilidad definida) ha sido ampliamente estudiado e incluso existen normas que

indican cómo se debe llevar a cabo el proceso de calibración, tal y como se ha explicado en el capítulo anterior.

En cambio, el uso de la tecnología GNSS con este fin no cuenta con una normativa ni un proceso definido con el cual podamos calcular la incertidumbre de los resultados obtenidos.

Pese a ello si existen determinadas recomendaciones a tener en cuenta a la hora de realizar las observaciones y procesar los datos para obtener las mejores precisiones posibles y, además, una estimación de la incertidumbre de los resultados obtenidos.

En este apartado se detallan estas recomendaciones, publicadas como parte de los resultados del proyecto europeo (JRP SIB60 Surveying, 2016), financiado dentro del programa H2020 “European Metrology Research Programme EMRP” y EURAMET (Asociación Europea de Institutos Nacionales de Metrología).

4.5.1. Preparación y metodología

En aplicaciones GNSS de alta precisión se utilizan técnicas de procesamiento que eliminan o minimizan los errores sistemáticos como los errores en los relojes o los retardos atmosféricos mediante la formación de dobles diferencias.

Sin embargo, los errores dependientes de la estación como el multipath o los errores de la antena suponen una limitación ya que no pueden eliminarse previamente o mediante estrategias de procesamiento.

Para tratar de reducir estos efectos se recomienda optimizar la configuración de la estación teniendo en cuenta los aspectos que se exponen a continuación.

- Calibración individual de las antenas

La diferencia entre el centro radioeléctrico y el físico de las antenas introduce, tal y como se ha expuesto anteriormente, un error en el observable GNSS. Para mitigar este error es necesario aplicar correcciones de centro de fase para cada una de las antenas.

Existen calibraciones estándar para los distintos modelos de antena, proporcionadas por instituciones como el IGS, que nos permiten realizar una corrección aproximada de la variación de centro de fase de la antena ya que las distintas unidades de un mismo modelo se comportan de manera similar. No obstante, para conseguir un resultado óptimo las antenas deben estar calibradas de manera individual.

- Configuración de las estaciones

Posibles obstáculos en los alrededores de las antenas, como árboles o edificios pueden producir errores, denominados de campo cercano, que influyen en los resultados obtenidos.

Para minimizar estos errores se recomienda utilizar el mismo tipo de antena en ambas estaciones, así como el mismo montaje y la misma orientación de las mismas. Con ello, los efectos de campo cercano pueden considerarse similares en los dos extremos de la observación, lo cual nos permite minimizar el efecto durante el proceso de estimación de coordenadas mediante la formación de dobles diferencias.

4.5.2. Estrategia de procesamiento

En cuanto al procesamiento de los datos, se realizan las siguientes recomendaciones para distancias cortas (hasta 1 o 2 kilómetros).

- Utilizar observables de fase L1

Con esto el ruido de la observación se minimiza y también el error de las coordenadas estimadas.

- Formas dobles diferencias

Como se ha explicado anteriormente, formar dobles diferencias nos permite eliminar la mayoría de errores sistemáticos.

- No estimar los parámetros de retardo troposférico cenital

Se recomienda no calcular estos parámetros ya que, para estaciones cercanas, esto puede empeorar el resultado de las coordenadas obtenidas.

4.5.3. Incertidumbre en distancias GNSS

En la estimación de la incertidumbre se deberían considerar todos los parámetros que puedan influenciar en el resultado final obtenido. En el caso del GNSS esto es prácticamente imposible ya que intervienen muchos parámetros no controlables (como el efecto multipath, por ejemplo).

Esto supone una limitación en la utilización del GNSS para metrología, ya que para que una medida se considere buena desde un punto de vista metrológico, se debe expresar junto con su incertidumbre. Actualmente se están estudiando formas de obtener esta incertidumbre.

Una forma de evaluar la incertidumbre de las distancias GNSS en un sitio dado para la situación local específica y el equipo utilizado es una comparación directa de mediciones de distancia basadas en GNSS con distancias de referencia medidas con un instrumento calibrado con la escala trazable a la definición del metro del Sistema Internacional de Unidades (en el caso de este trabajo las comparaciones se realizan con el distanciómetro electrónico ME5000 en la base de calibración de la UPV).

Esta evaluación de la incertidumbre se realizaría según la ecuación (13).

$$u_{(l_{GNSS})} \approx \sqrt{(\Delta_{l_{GNSS-EDM}})^2 + u_{(l_{EDM})}^2 + \sigma_{(l_{GNSS})}^2} \quad (12)$$

donde

$(\Delta_{l_{GNSS-EDM}})$ es la diferencia longitudes obtenidas entre el EDM y GNSS;

$u_{(l_{EDM})}$ es la incertidumbre estándar de la medida EDM;

$\sigma_{(l_{GNSS})}$ es la desviación estándar de la longitud obtenida con GNSS;

Capítulo 5. Estudio comparativo en la base de calibración de la UPV

Uno de los principales objetivos de este trabajo es realizar una comparación de las distancias e incertidumbres obtenidas, por una parte, con un distanciómetro electrónico de alta precisión (Mekometer ME5000) frente a las alcanzadas con técnicas GNSS.

En este capítulo se detalla la metodología empleada en ambas observaciones, así como el proceso de cálculo que se ha llevado a cabo para obtener los resultados. Por último, se exponen dichos resultados, tanto a nivel individual para cada uno de los métodos de observación como de manera conjunta en un análisis comparativo.

5.1. Descripción de la base de calibración de la UPV

En el año 2007, el Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la UPV, estableció una base de calibración en el Campus de Vera. Al final del documento se adjunta el plano de situación y emplazamiento de esta base (Plano nº1. Situación y emplazamiento).

Esta base de calibración se planteó inicialmente para evaluar la incertidumbre de instrumentos geodésicos acorde con la norma ISO 17123 (García-Asenjo *et al.*, 2016).

La base de calibración de la UPV consta de 6 pilares de observación (del nº1 al nº 6) prácticamente alineados, en los 0, 28, 94, 198, 282 y 330 metros, siguiendo el diseño tipo Heerbrugg, tal y como se muestra en la Figura 11 (al final del documento se adjunta el plano de la base de calibración: Plano nº2. Base de calibración de la UPV).

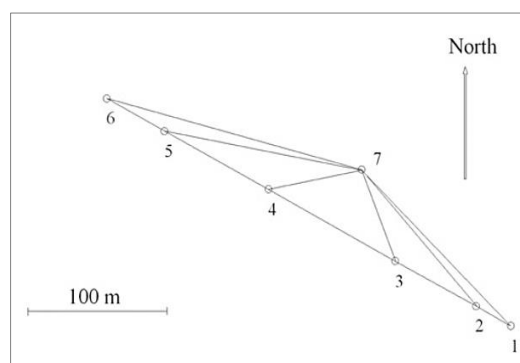


Figura 11. Esquema de la base de calibración de la UPV (García-Asenjo *et al.*, 2016)

Los pilares tienen un diámetro de 22 centímetros y una altura de 1,20 metros sobre el suelo. Constan de dos tubos de acero aislados. El interno cubre una estructura de hormigón con una cimentación de un metro cuadrado que llega a una profundidad de

60 centímetros. El tubo externo evita que el interno sufra dilataciones diferenciales debido a cambios de temperatura por la radiación solar. Los pilares constan de doble sistema para instalar aparatos de medición en la parte superior: el tornillo de fijación estándar 5/8" y el sistema de soporte tipo Kern (García-Asenjo *et al.*, 2016).

En el año 2012, el National Land Survey of Finland (FGI) transfirió la escala desde la base de calibración de Nummela a la base de calibración de la UPV. Utilizaron para ello el Mekometer ME5000 de la Universidad de Aalto que fue calibrado antes y después de la campaña de transferencia en Nummela (esta base de calibración se ha descrito previamente en el punto 2.2.1 de este documento).

La trazabilidad de la base de calibración de la Universitat Politècnica de València es por tanto la que se muestra en la Figura 12.

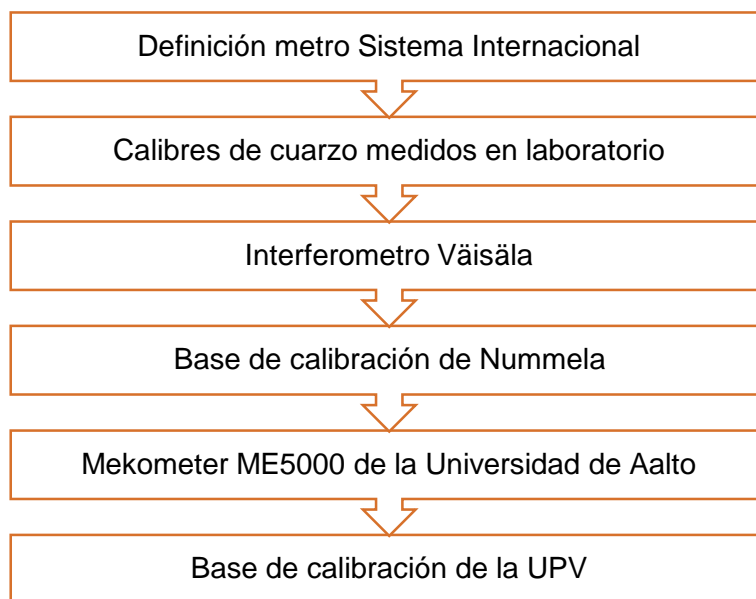


Figura 12. Trazabilidad de la base de calibración de la UPV (Elaboración propia)

5.2. Campaña de observación en campo

La campaña de observación en campo llevada a cabo se compone de dos tipos de observaciones distintas: por un lado, se midió la base de calibración de la UPV con un ME5000 y por otro se realizaron observaciones de un vector de la base mediante técnicas GNSS. En los apartados 5.3 y 5.4 se explican cada una de estas observaciones así como los resultados obtenidos en cada una de ellas.

La observación principal para el trabajo es la realizada con GNSS, ya que lo que se pretende es indagar en la posible utilización de esta tecnología para distanciametría submilimétrica utilizando software de producción disponible.

No obstante, la observación llevada a cabo con el ME5000 también es de gran importancia ya que, por un lado, nos permite contar con un patrón con el que comparar las distancias obtenidas mediante la técnica anterior y, además, contribuye a la monitorización y control de la base de calibración de la UPV.

La campaña se llevó a cabo entre los días 14 y 18 de noviembre de 2016 y se desarrolló de la siguiente manera: durante el día se efectuaron las medidas con el Mekometer ME5000 mientras que, por la noche se realizaron las observaciones GNSS.

El motivo por el cual la campaña se estructuró de esta manera es que, para poder comparar las distancias obtenidas mediante ambas metodologías, es necesario que éstas se realicen en la misma época. Dado que realizar ambas mediciones a la vez no es posible por motivos prácticos, se decidió realizar las observaciones GNSS de noche.

A modo de resumen de todo el proceso que se ha llevado a cabo se presenta la Figura 13. Todos estos procesos se detallan a lo largo de los siguientes puntos.

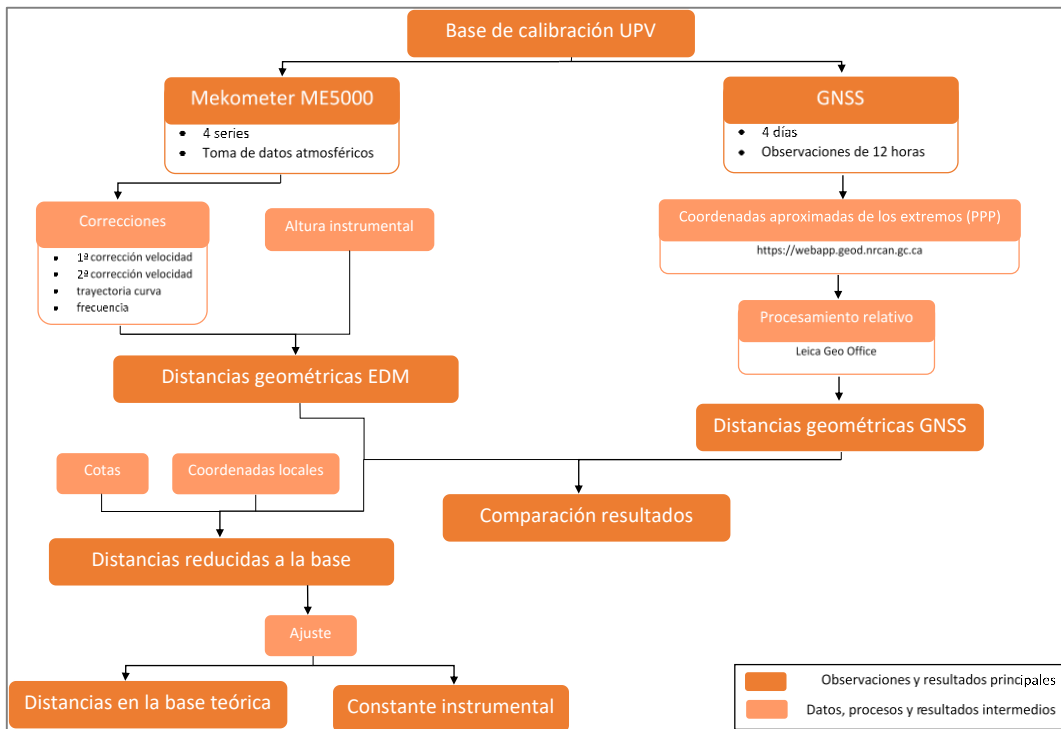


Figura 13. Esquema procedimiento en campo y procesado de datos (Elaboración propia)

5.3. Determinación de la distancia empleando el Mekometer ME5000

La base de calibración de la UPV se mide periódicamente para su monitorización y control de posibles deformaciones. Con este fin se realizó una observación en campo en noviembre del 2016 con el Mekometer ME5000 (UCM-CSIC).

En este punto se detalla la metodología e instrumentación utilizada, el proceso de cálculo llevado a cabo y los resultados obtenidos para la campaña de medición.

Posteriormente, en el punto 5.4, se utilizarán las distancias obtenidas para la comparación con las observaciones realizadas mediante técnicas GNSS.

5.3.1. Instrumentación y metodología de observación

La campaña de observación con el Mekometer ME5000 consistió en la observación de 4 series de todas las distancias posibles entre los pilares de la base de calibración de la UPV, incluyendo parámetros atmosféricos para la posterior determinación de las correcciones pertinentes.

5.3.1.1. Instrumentación

La instrumentación utilizada durante la campaña de campo consiste en un distanciómetro electrónico (Mekometer ME5000), un prisma reflector, sicrómetros modelo Thies 4410 (termómetros que miden tanto de temperatura seca como de temperatura húmeda) para ambos extremos (emisor y prisma) y barómetros de la marca Thommen para medir la presión.

En primer lugar, el distanciómetro electrónico utilizado fue el Kern Mekometer ME5000, cuyas características generales se han descrito en el punto 3.4 del presente documento. En la Tabla 2 se muestran las principales características de este instrumento.

Tabla 2. Características del Mekometer M5000

Característica	Valor
Número de serie	357050 (UCM)
Error nominal (constante)	0.2 mm
Error nominal (proporcional)	0.2 ppm
Longitud de onda nominal	632.600 nm
Factor de escala de la frecuencia	0.8550 ppm
Calibración (constante)	0 mm
Calibración (proporcional)	0 ppm

Como aclaración a los parámetros que aparecen en la Tabla 2, cabe destacar que el factor de escala de la frecuencia se refiere a la corrección que se debe aplicar al valor nominal de longitud de onda (o frecuencia), ya que al cabo del tiempo éste valor varía debido al desgaste que sufre el instrumento. Para ello se midió la frecuencia en el laboratorio de calibración de la UPV y con este valor se aplica la corrección correspondiente.

La constante del instrumento se considera cero ya que, el valor que proporciona el fabricante es cero y además el valor real se obtendrá al realizar la calibración mediante la metodología de la ISO 17123-4.

Por otro lado, el prisma utilizado fue el Kern RM05035. Sus características técnicas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características del reflector

Característica	Valor
Número de serie	374448 (UCM)
Constante del prisma	0 mm

Tanto el distanciómetro como el prisma utilizados pertenecen a la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Se utilizaron también cuatro termómetros, dos de temperatura seca y dos de temperatura húmeda. En cada extremo de la línea medida se colocaron uno de cada tipo. Las características de estos termómetros se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de los termómetros

Termómetro	Modelo	Número de serie
Temperatura seca distanciómetro	Thies 4410	27047/88
Temperatura húmeda distanciómetro	Thies 4410	27141/88
Temperatura seca reflector	Thies 6814	27073/88
Temperatura húmeda reflector	Thies 6814	25163/88

Cada uno de estos termómetros cuenta con una tabla de correcciones, realizada a partir de mediciones en laboratorio, que nos permite corregir las medidas de temperatura.

Por último, los barómetros para medir la presión atmosférica que se utilizaron, que también tienen su tabla de correcciones determinada en laboratorio tienen las características que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de los Barómetros

Barómetro	Modelo	Identificador
Barómetro en el distanciómetro	Thommen	4
Barómetro en el reflector	Thommen	2

En la Figura 14 se muestran los instrumentos utilizados en la campaña de medición de distanciametría electrónica que se han descrito en este apartado del documento.



Figura 14. Instrumentación de la campaña con EDM (Elaboración propia)

5.3.1.2. Metodología

La metodología de observación que se llevó a cabo fue la que se describe a continuación.

Se instaló el Mekometer ME5000 en el primer pilar (nº1) y el reflector en el siguiente (nº2). Ambos pilares se cubrían con un parasol para trabajar en sombra y tener así parámetros atmosféricos no influenciados por la acción directa del sol.

Una vez el distanciómetro y el prisma estaban bien nivelados se procedía a realizar una primera medición. Para ello se enfocaba el prisma con el Mekometer y se buscaba el punto en el que la intensidad de la señal de retorno fuese máxima. Mientras se realizaba la medición (que dura aproximadamente dos minutos) se apuntaba en la libreta de campo (tanto en el extremo del distanciómetro como en el del prisma) la hora de comienzo de la medición (para lo que el equipo de trabajo sincronizamos nuestros relojes), la temperatura en seco, la temperatura en húmedo y la presión atmosférica.

Inmediatamente después de la primera medición se realizaba una segunda, durante la cual se volvían a apuntar los mismos parámetros que en la anterior.

Una vez finalizadas las dos mediciones de una distancia se procedía a mover el prisma al siguiente pilar (nº3 en este caso) y se repetía el proceso.

Tras medir desde el primer pilar a todos los otros, se movía el Mekometer al siguiente pilar y se realizaban mediciones a los otros seis pilares.

De este modo se realizaron cuatro series distintas. Cada serie consiste en la medición desde cada uno de los siete pilares al resto de puntos (a excepción de algunas distancias que no pueden medirse por problemas de visibilidad).

5.3.2. Proceso de cálculo

En este apartado se describe el proceso de cálculo llevado a cabo para obtener las distancias y sus incertidumbres a partir de las observaciones de campo.

5.3.2.1. Obtención de las distancias geométricas corregidas

En primer lugar, a partir de los parámetros meteorológicos se calcula la refractividad N del aire en el momento de la observación². Este parámetro se calcula a partir de las fórmulas de Ciddor (Ciddor, 1996) ya que son las recomendadas por la Organización Internacional de Geodesia para mediciones distanciométricas con una precisión.

A partir de la refractividad promedio entre la refractividad obtenida para el extremo del prisma y para el lado del reflector, se calculan las correcciones meteorológicas: primera corrección de velocidad, segunda corrección de velocidad y corrección por curvatura del rayo (García-Asenjo L., 2013).

- Primera corrección de velocidad

La primera corrección de velocidad se debe aplicar al no coincidir el índice de refracción promedio (n_m) con el índice de refracción al que el EDM está ajustado de fábrica (n_0 , denominado índice residente o característico). Esta corrección se calcula mediante la expresión (13), donde D_0 es la distancia observada.

$$c_1 = D_0 \cdot \left(\frac{n_0}{n_m} - 1 \right) \quad (13)$$

- Segunda corrección de velocidad

La segunda corrección de velocidad se debe al error por defecto que se comete al calcular el índice de refracción a partir de datos meteorológicos de los extremos. Se calcula mediante la expresión

$$c_2 = \frac{K \cdot (1 - K) \cdot D_0^3}{12 \cdot R^2} \quad (14)$$

donde

K es el coeficiente de refracción;

R es el radio terrestre;

Esta corrección es de menos de 1 mm en distancias inferiores a 15 km, en este caso, al tratarse de distancias pequeñas esta corrección es nula.

- Corrección por curvatura del rayo

Cualquier radiación que atraviese la atmósfera experimenta una variación en su trayectoria. Al curvarse la trayectoria seguida por el rayo se produce un error por exceso en la medida de la distancia. Esta corrección se calcula mediante la expresión (15).

$$c_3 = \frac{K^2 \cdot D_0^3}{24 \cdot R^2} \quad (15)$$

² la refractividad se utiliza para manejar de una manera más cómoda el índice de refracción y se obtiene como $(1 - n) \cdot 10^{-6}$, siendo n el índice de refracción

Además de las correcciones meteorológicas se aplica la corrección por frecuencia, que es la corrección que se debe aplicar debido a que la frecuencia real del instrumento no es exactamente la frecuencia nominal (que se corresponde con la que tenía el aparato al salir de fábrica).

Aplicando las correcciones atmosféricas y la de frecuencia obtenemos la distancia geométrica corregida. Esta distancia geométrica corregida es la distancia entre el emisor del distanciómetro y el centro del prisma, por lo que se debe corregir para hallar la distancia entre las cabezas de los pilares. Para ello utilizaremos la altura de los instrumentos que, en este caso, por ser de la misma marca y estar preparados para ello, es la misma en el distanciómetro que en el prisma.

Con estas distancias geométricas corregidas ya referidas a las cabezas de los pilares podemos obtener los promedios de las distancias, tanto de las directas y las recíprocas para detectar posibles errores de verticalidad como de las distancias promediadas para cada eje.

Con esto tendremos las distancias geométricas promedio para cada eje, sin considerar la constante instrumental (que hemos considerado cero).

A modo de resumen se muestra en la Figura 15 un esquema del proceso de cálculo descrito anteriormente.

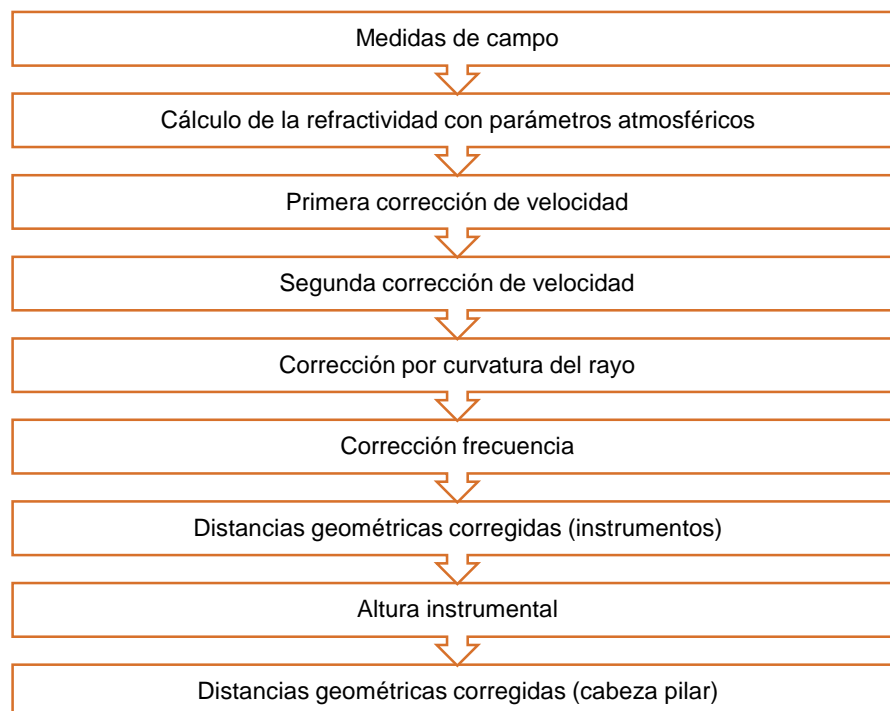


Figura 15. Proceso de cálculo distancias geométricas corregidas (Elaboración propia)

5.3.2.2. Cálculo de la constante según la ISO 17123-4

Con el proceso de cálculo explicado en el apartado anterior obtenemos las distancias geométricas corregidas entre las cabezas de los pilares.

En esta segunda fase del cálculo se aplica la metodología establecida en la norma ISO 17123-4 para calibración de distanciómetros electrónicos. Con esto conseguimos obtener en un mismo ajuste las coordenadas ajustadas llevadas a la línea de calibración y la constante instrumental del conjunto distanciómetro-prisma.

Los pilares de la base de calibración no están perfectamente alineados (Figura 16), por tanto, las medidas realizadas deben llevarse a la línea teórica de la base de calibración.



Figura 16. Esquema de alineación de pilares de la base UPV (elaboración propia)

Para ello se trabaja con un sistema de coordenadas local, en el que el eje X tiene coincide con la alineación de los pilares 1 y 6 (línea teórica de la base), el eje Y perpendicular al anterior en el pilar 1 y cuyo origen de coordenadas está en el pilar 1.

En primer lugar, debemos obtener la distancia horizontal, ya que hasta el momento estábamos trabajando con la distancia geométrica. Para ello aplicamos la reducción horizontal. Esta distancia reducida horizontal se obtiene a partir de la distancia geométrica y la diferencia de cota entre los pilares de acuerdo a la expresión (16).

$$D_H = \sqrt{D_g^2 - \Delta z^2} \quad (16)$$

donde

D_g es la distancia geométrica;

Δz es la diferencia de cota entre los pilares;

Posteriormente se debe reducir esta distancia a la línea de la base de calibración, para ello es necesario conocer la distancia entre el pilar y la línea teórica de la base de calibración, tal y como se muestra en la Figura 17. Esta distancia, tal y como hemos definido el sistema de coordenadas local, será el valor absoluto del incremento de la coordenada Y.

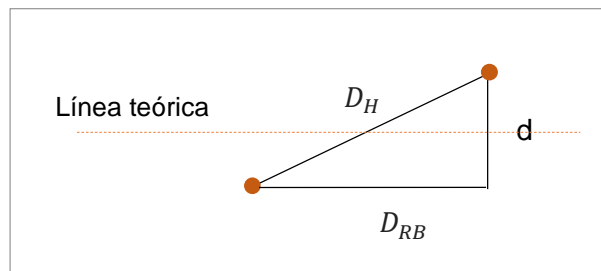


Figura 17. Reducción a la base (Elaboración propia)

Por tanto, la distancia reducida a la base se calcula de acuerdo a la expresión (17).

$$D_{RB} = \sqrt{D_H^2 - d^2} = \sqrt{D_g^2 - \Delta Z^2 - d^2} \quad (17)$$

Estas distancias reducidas a la base nos permiten montar un sistema de ecuaciones, de acuerdo a la norma ISO 17123-4, en el que las incógnitas son las distancias ajustadas y la constante instrumental. El sistema de ecuaciones lineales sobredeterminado se resuelve por mínimos cuadrados.

Este proceso se muestra de manera esquemática en la Figura 18.

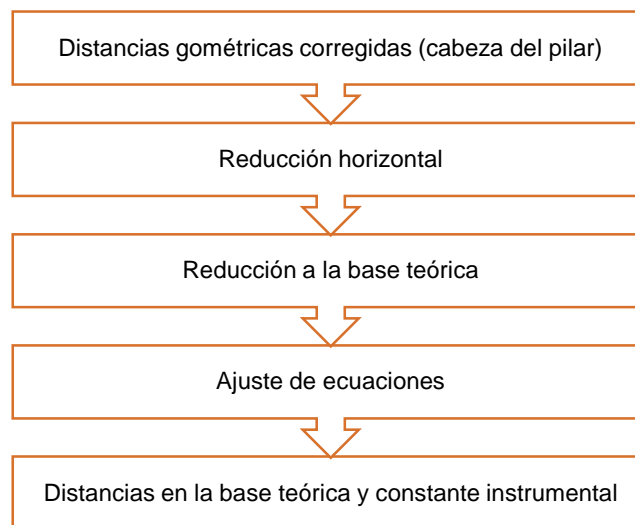


Figura 18. Proceso cálculo calibración con ISO 17123-4 (Elaboración propia)

5.3.3. Resultados

Tras el proceso de cálculo expuesto en el punto 5.3.2 se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

5.3.3.1. Distancias geométricas corregidas

El cálculo de las distancias geométricas corregidas se realizó tanto para las distancias directas como para las recíprocas, como los resultados entre las primeras y las segundas apenas difiere (están en torno a 0.1 milímetros en los casos de las diferencias mayores) se presentan únicamente los resultados finales, correspondientes a las distancias geométricas corregidas promediadas.

Los resultados obtenidos para las distancias geométricas corregidas promediadas se muestran en la Tabla 6. Las distancias directas y recíprocas a partir de las cuales se han obtenido éstas aparecen en el Anexo I.

Tabla 6. Distancias geométricas corregidas

Estación	Visado	Distancia corregida (m)	Desviación típica (mm)	Incertidumbre (mm)
1	2	28.38446	0.09	0.22
1	3	94.40080	0.07	0.22
1	4	198.00830	0.15	0.30
1	5	282.78855	0.14	0.33
1	6	330.01227	0.12	0.35
1	7	151.17286	0.13	0.27
2	3	66.01717	0.08	0.22
2	4	169.62423	0.10	0.26
2	5	254.40451	0.15	0.33
2	6	301.62819	0.09	0.32
3	4	103.60793	0.09	0.24
3	5	188.38773	0.08	0.26
3	6	235.61156	0.10	0.30
3	7	66.59561	0.11	0.23
4	5	84.78044	0.08	0.23
4	6	132.00385	0.06	0.24
4	7	68.58238	0.06	0.20
5	6	47.22402	0.06	0.21
6	7	190.22612	0.09	0.26

La desviación típica es la obtenida en el ajuste de manera estadística a partir de los observables y es lo que en metrología se conoce como desviación típica experimental. La incertidumbre, en cambio, ha sido calculada teniendo en cuenta todos los factores que pueden intervenir en el resultado final, tal y como se explicó en el apartado 3.3.1.

Para el estudio comparativo entre los resultados del Mekometer y los obtenidos mediante técnicas GNSS, la distancia que se utilizará es la distancia geométrica entre los pilares 1 y 3 (marcada en negrita en la Tabla 6), una vez se aplique la constante instrumental.

5.3.3.2. Cálculo de la constante según la ISO 17123-4

El resultado del ajuste por mínimos cuadrados al incorporar los datos de todas las series realizadas con el ME5000 se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados del ajuste

Resultados del ajuste	
Estimador de la varianza	0.74403
Estimador de la desviación típica	0.86257
Grados de libertad	234
Estadístico χ^2	174.102
Valor mínimo	169.293
Valor máximo	311.793
Se acepta H_0	Sí

Del estimador de la varianza de peso unidad a posteriori obtenida en el ajuste podemos deducir que los residuos son ligeramente mejor de lo esperado (en error a priori considerado era de 0.1 mm y 1 ppm).

Las distancias obtenidas en dicho ajuste se muestran, junto con su desviación típica con una fiabilidad del 95% y su incertidumbre en la Tabla 8. Estas distancias son las distancias de la base teórica y ya contienen la constante instrumental, por lo que no es necesario aplicar más correcciones.

Tabla 8. Distancias en la línea base ajustadas

Eje	Distancia calculada (m)	Desviación típica 95 % (mm)	Incertidumbre (mm)
1-2	28.38413	0.015	0.175
2-3	66.01649	0.015	0.182
3-4	103.60775	0.015	0.192
4-5	84.77995	0.015	0.187
5-6	47.22392	0.015	0.178

Por último, la constante instrumental que también entraba como incógnita en el ajuste obtenida es:

$$k = 0.1224 \text{ mm} \pm 0.0133 \text{ mm}$$

Esta constante obtenida es del ajuste de todas las series conjuntamente. No obstante, también se obtuvo para cada una de las cuatro series de manera independiente. Los resultados para cada una de las series son:

$$k_1 = 0.0947 \text{ mm} \pm 0.0226 \text{ mm}$$

$$k_2 = 0.1451 \text{ mm} \pm 0.0209 \text{ mm}$$

$$k_3 = 0.1063 \text{ mm} \pm 0.0223 \text{ mm}$$

$$k_4 = 0.1434 \text{ mm} \pm 0.0306 \text{ mm}$$

5.4. Determinación de la distancia empleando datos GNSS

Con el objetivo de estudiar la precisión que se puede alcanzar en la determinación de distancias mediante técnicas GNSS, y poder comparar estas distancias obtenidas con las medidas realizadas con el Mekometer ME5000, se realizaron observaciones GNSS los mismos días.

Los días de observación fueron 14, 15, 16 y 17 de noviembre de 2016, como la observación se realizó de noche, pasando media noche, se trabaja también con el día 18. En la Tabla 9 se muestran los días de la observación.

Tabla 9. Días de la campaña de observación GNSS

Fecha	Día de la semana	Semana GPS	Día del año
14/11/2016	Lunes (1)	1923	319
15/11/2016	Martes (2)	1923	320
16/11/2016	Miércoles (3)	1923	321
17/11/2106	Jueves (4)	1923	322
18/11/2016	Viernes (5)	1923	323

En este apartado se expone todo el proceso de observación GNSS, tanto de la metodología e instrumentación utilizados como del procesamiento de datos seguido y los resultados obtenidos.

5.4.1. Instrumentación y metodología de observación

El objetivo de determinar distancias utilizando técnicas GNSS es, como se ha explicado antes, estudiar la máxima precisión que se puede alcanzar mediante esta tecnología utilizando software de producción comercialmente disponible. Por tanto, únicamente se realizó la observación para determinar una distancia.

Los pilares en los cuales se instaló el equipo GNSS para obtener la distancia entre ellos fueron el pilar 1 y el 3 ya que se ha observado a lo largo de las distintas campañas de medición que son los más estables (García-Asenjo et al., 2016).

En este apartado se detalla la instrumentación y metodología empleada en la observación de campo con GNSS.

5.4.1.1. Instrumentación y software

Para la observación de campo mediante GNSS se utilizaron dos antenas, cuatro receptores y las baterías y cableado necesarios para la puesta en estación.

En primer lugar, las antenas utilizadas fueron del modelo LEICA AR25. Estas antenas son del tipo Choke Ring, es decir, su diseño está realizado para proporcionar mayor protección contra los efectos de la propagación por trayectos múltiples en comparación con otros tipos de antenas geodésicas ("Leica AR25 - Leica AR25 4 Constellation GNSS Antenna - Leica Geosystems - España," n.d.). Además, ambas antenas cuentan con calibraciones individuales en la universidad de Bonn (Alemania).

Este tipo de antenas geodésicas se utiliza para trabajos de alta precisión, como es el caso del presente estudio.

En segundo lugar, los receptores utilizados son del modelo LEICA GS10.

En la Figura 19 se muestra la apariencia tanto de las antenas como se los receptores utilizados.



Figura 19. Instrumentación de la campaña con GNSS (Imagen receptor: www.sccsurvey.co.uk)

Para el procesamiento se han utilizado dos softwares distintos.

En primer lugar, para la obtención de coordenadas aproximadas se ha utilizado la página web del Natural Resources de Canadá ("Precise Point Positioning," n.d.). Las razones por las que decidió utilizar esta herramienta online son las siguientes:

- Se trata de una herramienta online y gratuita, lo que facilita el acceso a todos los usuarios
- Existen estudios realizados con esta herramienta que analizan y corroboran los resultados que ofrece (Krzan et al., 2013)
- Proporciona, además de las coordenadas de los puntos, otro tipo de información que puede resultar interesante como diagramas de visibilidad de los satélites o estimaciones del retardo troposférico
- Utiliza órbitas del IGS, que son las mismas que utilizamos en el ajuste posterior

En cuanto al procesamiento relativo, se ha escogido el programa Leica Geo Office 8.3. Se trata de un software propietario, por lo que es necesario disponer de una licencia para trabajar. No obstante, se ha decidido utilizarlo por las siguientes razones:

- Se trata de un software intuitivo y fácil de utilizar
- En departamento se dispone de licencia
- Es de la misma casa que los instrumentos utilizados, lo que garantiza la compatibilidad en cuanto al formato de los datos (Rinex 3.02, ANTEX, órbitas, etc.)

5.4.1.2. Metodología de observación

Se realizaron observaciones durante 4 noches de unas 12 horas, desde las 19:30 de la tarde hasta las 7:30 del día siguiente aproximadamente.

Para el montaje de las estaciones se tuvieron en cuenta las recomendaciones para obtener unos resultados óptimos (JRP SIB60 Surveying, 2016), por lo que se utilizaron instrumentos iguales en ambas estaciones. Además, las antenas se orientaron al Norte.

A cada una de las antenas se conectaron dos receptores distintos (Figura 20). Con esto se puede estudiar el ruido del receptor analizando el tamaño y distribución de los residuos de las dobles diferencias. Por otro lado, disponer de dos receptores por antena nos permite tener la observación aún si una de las baterías o de los receptores fallase.



Figura 20. Montaje de las estaciones GNSS

Debido a que la zona donde se encuentra es un lugar ajardinado que se riega de noche, los receptores y las baterías se protegieron con bolsas de plástico.

El fichero de observación se generó con una frecuencia de 1 Hz, es decir, se almacenan datos cada segundo.

5.4.2. Proceso de cálculo

Para procesar los datos de la observación GNSS en primer lugar se necesitan unas buenas coordenadas aproximadas para posteriormente realizar el cálculo relativo de los vectores.

Para la obtención de coordenadas aproximadas de los pilares se ha optado por realizar un procesado de tipo PPP, para lo cual basta con utilizar los observables de nuestros receptores.

Los motivos principales para la elección de este tipo de procesamiento fueron los siguientes:

- Se necesitan únicamente datos de un receptor, lo cual permite extrapolar el estudio a zonas donde no se dispone de una red de estaciones permanentes.
- Existen aplicaciones online que realizan este tipo de procesamiento, facilitando así al usuario el proceso.

Por tanto, el primer paso en el proceso de cálculo fue el procesamiento de cada uno de los ficheros de observación mediante PPP.

Para realizar el PPP se utilizó, como se ha dicho anteriormente, la página web del Natural Resources de Canadá. Este servicio trabaja actualmente con RINEX 2.

Este servicio es gratuito, pero es necesario registrarte. Para su utilización basta con subir el fichero RINEX, escoger el sistema de referencia y si se trata de una observación estática o dinámica. Posteriormente recibimos los resultados por correo electrónico. Se realizó este proceso para cada uno de los ficheros de observaciones.

Tras realizar el PPP para cada uno de los archivos, procedemos a procesar los vectores con el programa Leica Geo Office 8.3.

Para ello, en primer lugar, debemos introducir el fichero de antenas, que contiene las correcciones de fase de las antenas. Se ha utilizado el fichero obtenido del IGS (igs08.atx) incluyéndole las calibraciones individuales de nuestras antenas.

Tras esto escogemos el modo de procesamiento (manual o automático). En este caso, elegiremos manual para seleccionar todas las líneas base posibles.

Los parámetros de procesamiento escogidos son:

- Modelo troposférico de Hopfield
- Efemérides precisas (finales del IGS)
- Elevación mínima de 15 °

Con esto, se procesan las líneas base y obtenemos los incrementos de coordenadas entre los puntos, junto con sus desviaciones típicas, lo cual nos permite obtener las distancias (18) con sus respectivas desviaciones típicas (19).

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (18)$$

$$\sigma D = \sqrt{\sigma_{\Delta X}^2 + \sigma_{\Delta Y}^2 + \sigma_{\Delta Z}^2} \quad (19)$$

Tras esto obtendremos para toda la campaña (los 4 días) las distancias promedio junto con su desviación típica. Tras obtener las 4 distancias promediadas (PL1A-PL3A, PL1A-PL3B, PL1B-PL3A, PL1B-PL3B) calculamos una distancia media entre estas 4 líneas base, obteniendo así la distancia final que es la que compararemos con la obtenida mediante el Mekometer ME5000.

Finalmente obtendremos la incertidumbre estimada para la distancia geométrica GNSS (aplicando la ecuación (9) del apartado 4.5.3).

5.4.3. Resultados

En primer lugar, se muestra, a modo de ejemplo, el resultado resumido obtenido para la obtención de coordenadas aproximadas con PPP obtenidas con aplicación web para el día 319 en el pilar 1, receptor B (Figura 21).

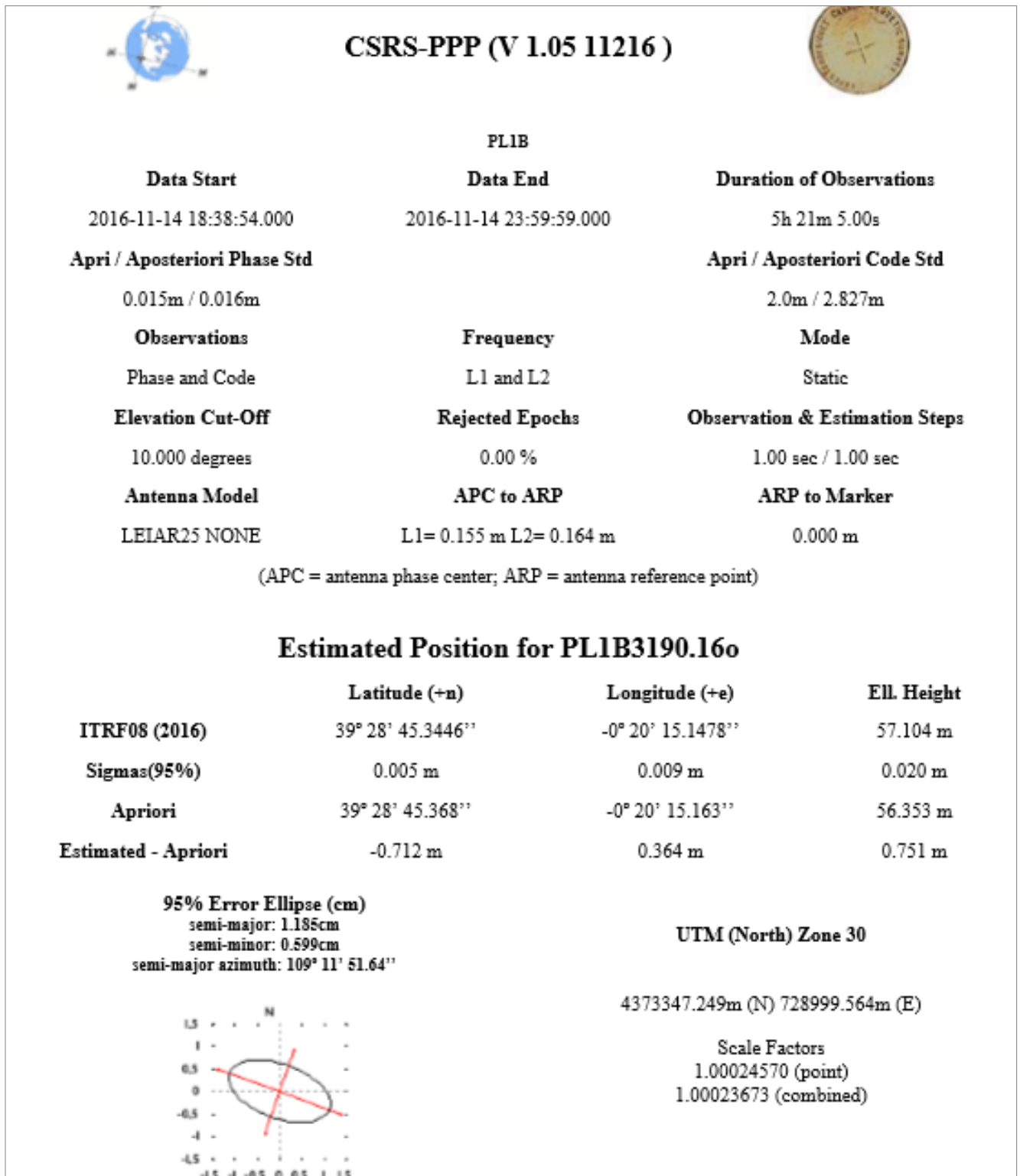


Figura 21. Resultado PPP (webapp.geod.nrcan.gc.ca)

Como estamos trabajando con datos cada segundo, con estaciones en un entorno bastante despejado, antenas geodésicas orientadas y observaciones largas, los resultados que obtenemos son aceptables.

Los resultados del posicionamiento puntual preciso (PPP) indican que las coordenadas obtenidas tienen una precisión (al 95% de probabilidad) mejor que 1 cm en horizontal y mejor que 3 cm en vertical, por lo que son claramente aceptables para iniciar el procesamiento relativo, ya que el error introducido en la escala sería de tan solo de 0.001 ppm.

Posteriormente, al realizar el procesamiento relativo con Leica Geo Office a partir de las coordenadas aproximadas obtenidas con PPP, se obtienen distancias geométricas para cada día. Estos resultados se muestran en el Anexo II. Resultados intermedios GNSS

Estas distancias por día se promedian para obtener un único valor de la distancia que buscamos.

Tras promediar estas distancias obtenemos los resultados que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Distancias GNSS medias

		Distancia geométrica (m)	σ distancia (m)
Distancias medias	PL1A-PL3A	94,40156	0,00007
	PL1A-PL3B	94,40140	0,00006
	PL1B-PL3A	94,40134	0,00008
	PL1B-PL3B	94,40143	0,00007
	PL1A-PL1B	0,00002	0,00001
	PL3A-PL3B	0,00001	0,00000

La distancia media obtenida entre los pilares PL1 y PL3, junto con su desviación típica es:

$$D_{1-3} = 94,40143 \pm 0,00007 \text{ m}$$

De acuerdo a (JRP SIB60 Surveying, 2016), La incertidumbre de esta distancia será:

$$u_{(IGNSS)} \approx \sqrt{(94,40143 - 94,40080)^2 + 0,00022^2 + 0,00007^2} = 0,00067 \text{ m}$$

Por tanto, la distancia geométrica obtenida con GNSS, junto con su incertidumbre asociada es:

$$D_{1-3} = 94,40143 \pm 0,00067 \text{ m}$$

5.5. Análisis de los resultados

Tras realizar todo el proceso de cálculo, tanto de las distancias obtenidas con el EDM Mekometer ME5000 como las obtenidas mediante el empleo de la tecnología GNSS podemos proceder a analizar los resultados obtenidos.

En primer lugar, los resultados obtenidos con el ME5000, que sirven, además de para realizar la comparación con los resultados GNSS, para la monitorización de la base de calibración de la UPV, entran dentro de lo esperado.

Las incertidumbres de las distancias obtenidas con el EDM están en torno a 0,2-0,3 milímetros, resultados prácticamente idénticos a los que se obtuvieron en el año 2012 cuando a la base de calibración se le transfirió la escala desde la base de calibración de Nummela.

Centrándonos en la distancia obtenida con GNSS, desde un punto de vista metrológico cabe destacar algunos aspectos.

En primer lugar, las mediciones realizadas con GNSS no son trazables, es decir, no puede establecerse la cadena seguida desde la definición del metro hasta la medición obtenida.

Por otro lado, la determinación de la incertidumbre es todavía un aspecto que se encuentra en fase de desarrollo, ya que son múltiples los parámetros que intervienen y pueden afectar al resultado de la medición. No obstante, la fórmula empleada para la determinación de ésta nos permite tener una aproximación a la incertidumbre asociada.

Para poder tomar como buena la distancia obtenida con GNSS es necesario compararla con la obtenida mediante el uso del ME5000, ya que, entre otras cosas, esto nos permite obtener una estimación de la incertidumbre GNSS.

Para ello debemos, en primer lugar, sumar la constante instrumental obtenida en el ajuste para la distancia geométrica corregida obtenida mediante el EDM (20).

$$D_{EDM} = 94,40080 + 0,00012 = 94,40092 \text{ m} \quad (20)$$

Los resultados de las distancias geométricas obtenidas tanto con el ME5000 como con GNSS se muestran, junto con su incertidumbre asociada en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados distancias geométricas con EDM y GNSS

	Distancia geométrica (m)	Desviación típica (mm)	Incertidumbre (mm)
EDM	94,40092	0,07	0,22
GNSS	94,40143	0,07	0,67

Como se puede apreciar en la Tabla 11, la diferencia, en valor absoluto, de ambas distancias es de 0,51 milímetros, lo cual entra en el orden de magnitud que se buscaba con la observación (distancias con precisiones por debajo del milímetro).

Para realizar un análisis de la repetibilidad del método, es decir, cómo varían los resultados de un día a otro, vamos a comparar las distancias obtenidas para cada día. Para ello aplicamos la constante instrumental del ajuste de cada una de las series del EDM, a diferencia del resultado anterior en el que empleábamos la constante instrumental obtenida del ajuste común de todas las series. En la Tabla 12 se

muestran las distancias obtenidas por día con ambos métodos y la diferencia de distancia entre ellas.

Tabla 12. Distancias geométricas por día (EDM y GNSS)

		Distancia geométrica (m)	Incertidumbre (mm)	Diferencia distancias (m)
Día 1	EDM	94,40093	0,22	0,00077
	GNSS	94,40170	0,80	
Día 2	EDM	94,40099	0,22	0,00032
	GNSS	94,40132	0,40	
Día 3	EDM	94,40087	0,22	0,00038
	GNSS	94,40125	0,44	
Día 4	EDM	94,40088	0,22	0,00060
	GNSS	94,40148	0,64	

Como se puede apreciar, la diferencia de distancias obtenida para cada uno de los días difiere ligeramente, no obstante, se encuentra en todos los casos por debajo del milímetro, por lo que podemos afirmar que la repetibilidad del método es buena.

Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras

El objetivo principal del presente proyecto era el estudio del potencial de las técnicas GNSS para la obtención de distancias con precisiones submilimétricas, para ámbitos como la metrología o el control de deformaciones.

Tras la realización de la observación correspondiente en la base de calibración de la UPV en la que se realizaron medidas tanto con el distanciómetro submilimétrico Mekometer ME5000 (perteneciente a la UCM) como con tecnología GNSS y a la vista de los resultados obtenidos puede procederse a exponer las conclusiones pertinentes.

En este capítulo se exponen las distintas conclusiones del trabajo, tanto a nivel de resultados obtenidos como de limitaciones y de líneas futuras del tema abordado.

6.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio corroboran el potencial de la tecnología GNSS para la obtención de distancias con precisión submilimétrica.

La distancia obtenida a partir de la observación en campo, tiene una desviación típica experimental asociada de 0,07 milímetros. No obstante, desde un punto de vista metroológico es necesario expresar también su incertidumbre asociada, ya que es la que nos proporciona una visión más real de la precisión alcanzada. Se ha obtenido una incertidumbre de 0,67 milímetros (empleando una ecuación aproximada). Por tanto, se ha obtenido una distancia con una incertidumbre por debajo del milímetro.

A modo de comparación y de apoyo para confirmar la bondad de los resultados obtenidos, comparamos esta distancia con la obtenida mediante el ME5000, un distanciómetro de alta precisión utilizado tradicionalmente para este fin. La diferencia obtenida es de 0,51 milímetros, lo cual nos permite también reafirmar la validez de los resultados obtenidos.

Podemos concluir, por tanto, que tecnología GNSS es una herramienta que presenta un gran potencial para la determinación de distancias al aire libre de alta precisión.

Además, cabe destacar que las bases de calibración son un aspecto fundamental tanto para la calibración de instrumental geodésico o topográfico como para la realización de estudios de nuevas técnicas para la distanciometría al aire libre de alta precisión.

6.2. Líneas futuras

Tras la realización de este trabajo, con el cual se ha podido comprobar el potencial de las técnicas GNSS para la obtención de distancias al aire libre de alta precisión, se plantean algunos aspectos que consideramos de interés para futuros trabajos relacionados con el presente.

En primer lugar, el procesamiento de datos que hemos realizado se ha llevado a cabo con RINEX 2, es decir, se han utilizado observables GPS y GLONAS en el PPP y solamente GPS en el posicionamiento relativo.

El siguiente paso sería la realización de un procesamiento multiconstelación, incluyendo datos de GALILEO y COMPASS. Esto nos permitiría, en teoría, una influencia menor del efecto multipath.

Una de las principales limitaciones actuales del procesamiento multiconstelación es que se necesita un software que permita trabajar con todas las constelaciones GNSS, como es el caso del software científico Bernese 5.2. Esto supone una limitación ya que no se trata de un software intuitivo que cualquier usuario pueda manejar, sino que requiere un conocimiento de la tecnología GNSS y el procesamiento a realizar bastante más elevado.

Por otro lado, en la actualidad no es sencillo encontrar los distintos archivos necesarios para un procesamiento multiconstelación riguroso. No obstante, existen proyectos, como el MGEX del IGS que pretende desarrollar y utilizar productos multiconstelación por lo que es algo en lo que se está trabajando.

Referencias

- Baselga, S., & García-Asenjo, L. (2008). Global robust estimation and its application to GPS positioning. *Computers & Mathematics with Applications*, *56*(3), 709–714.
- Baselga, S., García-Asenjo, L., & Garrigues, P. (2014). Submillimetric GPS distance measurement over short baselines: noise mitigation by global robust estimation. *Measurement Science and Technology*, *25*(10), 105004.
- Baselga, S., Garrigues, P., & García-Asenjo, L. (2015). Submillimetric GNSS distance determination for metrological purposes.
- Bell, B. (1992). Proc. Workshop on The Use and Calibration of the Kern ME5000 Mekometer, 1–80.
- Berné-Valero, J. L., Anquela-Julián, A. B., & Garrido-Villén, N. (2013). *GPS: fundamentos y aplicaciones en Geodesia y Topografía* (Editorial).
- Bozic, B., Fan, H., & Milosavljevic, Z. (2013). Establishment of the MGI EDM calibration baseline. *Survey Review*, *45*(331), 263–268.
- Buga, A., Birvydiene, R., Kolosovskis, R., Krikstaponis, B., Obuchovski, R., Parseliunas, E., ... Slikas, D. (2016). Analysis of the calibration quality of the Kyviskes Calibration Baseline. *ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA*, *51*(3), 505–514.
- Ciddor, P. E. (1996). Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Applied Optics*, *35*(9), 1566.
- Doloca, N. R., Meiners-Hagen, K., Wedde, M., Pollinger, F., & Abou-Zeid, A. (2010). Absolute distance measurement system using a femtosecond laser as a modulator. *Measurement Science and Technology*, *21*(11), 115302–115309.
- Dracup, J. F., Fronczek, C. J., Tomlinson, R. W., & Fancher, K. L. (2014). Establishment of Calibration Base Lines, (March).
- Esteban Vazquez Becerra, G., Bennett, R. A., Chávez, M. C., Trejo Soto, M. E., & Gaxiola-Camacho, J. R. (2015). Short baseline calibration using GPS and EDM observations. *Geofísica Internacional*, *54*(3), 255–266.
- European Global Navigation Satellite Systems Agency. (n.d.). Retrieved June 1, 2017, from <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>
- Farrell, J. A., & Barth, M. (1999). *The Global Positioning System & Inertial Navigation*. USA: McGraw-Hill.
- García-Asenjo, L., Baselga, S., & Garrigues, P. (2016). Deformation Monitoring of the Submillimetric UPV Calibration Baseline. *Journal of Applied Geodesy*, *0*(0), 1–8.
- geoawesomeness. (2014). Retrieved May 25, 2017, from <http://geoawesomeness.com/gnss-reflectometry-making-use-multipath-altimeter->

measurements/

- ISO 17123-1: Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 1: Theory. (2013).
- ISO 17123-4: Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors). (n.d.).
- Jokela, J., & Häkli, P. (2010). *Interference measurements of the Nummela Standard Baseline in 2005 and 2007*.
- Jokela, J., Häkli, P., Ahola, J., Buga, A., & Putrimas, R. (2009). on Traceability of Long Distances, 1882–1887.
- JRP SIB60 Surveying. (2016). Good practice guide for high accuracy global navigation satellite system based distance metrology, 1–19.
- Krzan, G., Dawidowicz, K., & Management, L. (2013). ANALYSIS OF CURRENT POSITION DETERMINATION ACCURACY IN NATURAL RESOURCES CANADA PRECISE POINT POSITIONING, 48(3).
- Lassila, A., Jokela, J., Poutanen, M., & Xu, J. (2003). Absolute calibration of quartz bars of Vaisala interferometer by white light gauge block interferometer. *IMEKO World Congress XVII*, (May), 1886–1890.
- Leica AR25 - Leica AR25 4 Constellation GNSS Antenna - Leica Geosystems - España. (n.d.). Retrieved June 30, 2017, from http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-AR25_70988.htm
- Ministerio de Formento. Centro Español de Metrología. (2000a). *Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (2ª)*.
- Ministerio de Formento. Centro Español de Metrología. (2000b). *Vocabulario Internacional de Metrología (2ª)*.
- Olivares Belinchón, J. L. (2015). Análisis del sistema de navegación por satélite europeo EGNOS para su integración con VRS.
- Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre. (2006). SI Brochure: The International System of Units (SI) - 8th edition.
- Pollinger, F., Meyer, T., Beyer, J., Doloca, N. R., Schellin, W., Niemeier, W., ... Meiners-Hagen, K. (2012). The upgraded PTB 600 m baseline: a high-accuracy reference for the calibration and the development of long distance measurement devices. *Measurement Science and Technology*, 23(9), 94018.
- Precise Point Positioning. (n.d.). Retrieved June 30, 2017, from <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca>
- Priego De Los Santos, J. E. (2012). *Análisis y predicción de lluvias intensas en la Comunidad Valenciana basados en la estimación del contenido de vapor de agua atmosférico obtenido con técnicas GNSS*. Universitat Politècnica de València.
- Rüeger, J. M. (1992). *Electronic distance measurement: an introduction*. Springer-Verlag (3ª). Kensington.
- Sanz Subirona, J., Juan Zornoza, J.M., Hernández-Pajares, M. (2013). *GNSS data processing. Volume I: Fundamentals and Algorithms*. European Space Agency.

- Schuhler, N., Salvadé, Y., Lévêque, S., Dändliker, R., & Holzwarth, R. (2006). Frequency-comb-referenced two-wavelength source. *Optics Letters*, 31(21), 3101–3103.
- Valbuena Durán, J. L., Nuñez G. del Pozo, A., Soriano, M. L., & Cortés, V. (1990a). Calibración de un distanciómetro electrónico submilimétrico (I). *Revista Del lustre Colegio de Ingenieros Técnicos En Topografía*, 13–25.
- Valbuena Durán, J. L., Nuñez G. del Pozo, A., Soriano, M. L., & Cortés, V. (1990b). Calibración de un distanciómetro electrónico submilimétrico (II). *Revista Del lustre Colegio de Ingenieros Técnicos En Topografía*.
- Vey, S., Güntner, A., Wickert, J., Blume, T., & Ramatschi, M. (2016). Long-term soil moisture dynamics derived from GNSS interferometric reflectometry: a case study for Sutherland, South Africa. *GPS Solutions*, 20(4), 641–654.

Presupuesto

A continuación, se presenta el presupuesto de la observación GNSS, que es el objeto principal de este trabajo. La observación con EDM no se ha presupuestado ya que el Mekometer ME5000 no se comercializa y, además, se utiliza a modo de comparación, pero no es la finalidad prioritaria de este proyecto.

Cuadro de precios nº1

Actividad	Recursos humanos	Coste unitario	Medios materiales	Coste unitario	Duración	Total actividad
Observación de campo	1 Ingeniero	13,81 €/h	2 Antenas Leica AR25	10,48 €/día	13 horas durante 4 días	1.646,60 €
	1 ayudante	8,86 €/h	4 receptores Leica GS10	181,5 €/día		
	1 vigilante	16,25 €/h	cableado y baterías	2 €/día		
Procesamiento datos	1 Ingeniero	13,81 €/h	Leica Geo Office	2,17 €/día	14 horas	195,51 €

total 1.842,11 €

Mil ochocientos cuarenta y dos con once euros

Cuadro de precios nº2

Detalle de la actividad	Recursos humanos	Coste unitario	Medios materiales	Coste unitario	Duración	Total actividad
Instalación y recogida de estaciones	1 Ingeniero	13,81 €/h	-	-	1 h/día durante 4 días	90,68 €
	1 ayudante	8,86 €/h	-	-		
Observación GNSS	1 vigilante	16,25 €/h	2 Antenas Leica AR25	10,48 €/día	12 horas/día durante 4 días	1.555,92 €
			4 receptores Leica GS10	181,5 €/día		
			cableado y baterías	2 €/día		
Bajar ficheros (atx, efemérides, etc.)	1 Ingeniero	13,81 €/h	-	-	1 hora	13,81 €
Preparación de archivos RINEX	1 Ingeniero	13,81 €/h	-	-	2 horas	27,62 €
Obtención coordenadas aproximadas (PPP)	1 Ingeniero	13,81 €/h	-	-	6 horas	82,86 €
Procesamiento relativo	1 Ingeniero	13,81 €/h	Leica Geo Office	2,17 €/día	3 horas	43,60 €
Obtención de distancias geométricas promedio	1 Ingeniero	13,81 €/h	-	-	2 horas	27,62 €

Presupuesto

Basándonos en los cuadros de precios anteriores, calculamos el presupuesto total.

Para ello se considerarán unos gastos generales del 13% del total que hemos obtenido anteriormente y un beneficio industrial del 6% (Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas). Por tanto, obtenemos:

$$total \text{ (sin IVA)} = precio + GG + BI$$

$$total \text{ (sin IVA)} = 1.842,11 + 239,47 + 110,52 = 2.192,11 \text{ €}$$

Aplicando el 21% del impuesto sobre el valor añadido (IVA):

$$total \text{ (con IVA)} = total \text{ (sin IVA)} + 21\%$$

$$total \text{ (con IVA)} = 2.192,11 + 460,34 = 2.652,45 \text{ €}$$

Por tanto, el presupuesto total es de **dos mil seiscientos cincuenta y dos euros con cuarenta y cinco céntimos**.

Justificación de precios

Para el cálculo del precio unitario de los recursos humanos se ha utilizado la tabla salarial de la resolución de 30 de diciembre de 2016, de la Dirección General de Empleo, por la que se registra y publica el Convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos. La tabla salarial consultada es la siguiente:

	Mes x 14	Anual
Nivel 1. Licenciados y titulados 2.º y 3.º ciclo universitario y Analista	1.687,02	23.618,28
Nivel 2. Diplomados y titulados 1.º ciclo universitario. Jefe Superior	1.253,16	17.544,24
Nivel 3. Técnico de cálculo o diseño, Jefe de 1.ª y Programador de ordenador	1.208,40	16.917,60
Nivel 4. Delineante-Proyectista, Jefe de 2.ª y Programador de maq. Auxiliares	1.107,87	15.510,18
Nivel 5. Delineante, Técnico de 1.ª, Oficial 1.ª Admtvo. y Operador de ordenador	968,23	13.555,22
Nivel 6. Dibujante, Técnico de 2.ª, Oficial 2.ª Admtvo., Perforista, Grabador y Conserje ...	834,17	11.678,38
Nivel 7. Telefonista-Recepcionista, Oficial 1.ª oficios varios, y Vigilante	806,20	11.286,80
Nivel 8. Auxiliar Técnico, Auxiliar Admtvo., Telefonista, Ordenanza, Personal de limpieza y Oficial 2.ª oficios varios	750,38	10.505,32
Nivel 9. Ayudante oficios varios	698,24	9.775,36

Los salarios y remuneraciones de todas clases establecidos en este Convenio, tienen el carácter de mínimos, pudiendo ser mejorados por concesión de las empresas o contratos individuales de trabajo, por tanto, para nuestro presupuesto asumiremos que el salario será el mínimo más un plus de 2.109,69 euros anuales, ya que así se especifica en la misma resolución del BOE.

Así tendremos, para el caso del ingeniero técnico (nivel 2):

- Sueldo bruto anual:

$$(\text{salario base} \cdot 14 \text{ pagas}) + \text{plus anual}$$

$$(1.253,16 \cdot 14) + 2.109,69 = 19.656,93 \text{ €}$$

- Coste para la empresa anual:

$$\text{salario bruto} + 40\% \text{ seguridad social}$$

$$19.656,93 + 7.862,77 = 27.519,70 \text{ €}$$

- Coste diario:

$$\frac{\text{coste anual}}{\text{días laborables 2017}} = \frac{27.519,70}{249} = 110,52 \text{ €/día}$$

- Coste por hora:

$$\frac{\text{coste diario}}{8} = \frac{110,52}{8} = 13,81 \text{ €/hora}$$

De manera análoga para el ayudante (nivel 8) obtendríamos un coste diario de 70,92 € y un precio por hora de 8,86 €.

Para el cálculo de las licencias de software se ha tomado el precio de la licencia anual y se ha dividido entre los días laborables, para obtener el precio del software por día. Obtenemos:

- Leica Geo Office:

$$\frac{\text{licencia anual}}{\text{días laborables}} = \frac{541}{249} = 2,17 \text{ €/día}$$

Para la elaboración del presupuesto se considerará el precio por día íntegro.

Los receptores GNSS se alquilaron, y su precio por los 4 días fue de 600 € (más IVA), por lo que se obtiene un precio de 181,5 € al día.

Como estos aparatos no pueden alquilarse por un tiempo inferior a un día se incluyen en el presupuesto los precios de días enteros.

Las antenas son propias del departamento, sus precios fueron de 4.645 y 4.771 euros (más IVA) más 1.200 euros de las calibraciones individuales, lo que supone un total de 12.593,36 euros. El cálculo por día de las antenas se basa en apuntes de Uriel Padilla Carreño (Ingeniería Industrial) y se exponen a continuación.

- Depreciación, cantidad que se rebaja del valor de los bienes para compensar su desgaste. Suponiendo una vida útil de 5 años (2000 horas al año) obtenemos:

$$D = \frac{\text{Coste inicial}}{\text{Vida útil}} = \frac{12.593,36}{5 \text{ años}} = 2.518,672 \text{ €/año}$$

- Costo de inversión. Suponiendo que para adquirir las antenas se solicitó un préstamo con un 6% de intereses, el coste que esto implica sobre el coste total es:

$$C_i = \frac{\frac{\text{vida util (años)} + 1}{2 \cdot \text{vida util (años)}} \cdot \text{precio inicial} \cdot \frac{\text{interés}}{100}}{\text{vida util (años)}} =$$

$$= \frac{\frac{5 + 1}{2 \cdot 5} \cdot 12.593,36 \cdot \frac{6}{100}}{5} = 90,67 \text{ €/año}$$

Si consideramos que no existe cote de funcionamiento obtenemos que el coste total es:

$$C = D + C_i = 2.518,672 + 90,67 = 2609,34 \text{ €/año}$$

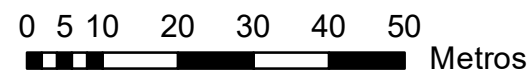
Con los días laborables de un año (tomamos los de 2017 como referencia) obtenemos el coste por día:

$$C = 10,48 \text{ €/día}$$

El coste del cableado y baterías auxiliares se estima en 2 €/día.

Planos

PLANO DE LA BASE DE CALIBRACIÓN DE LA UPV



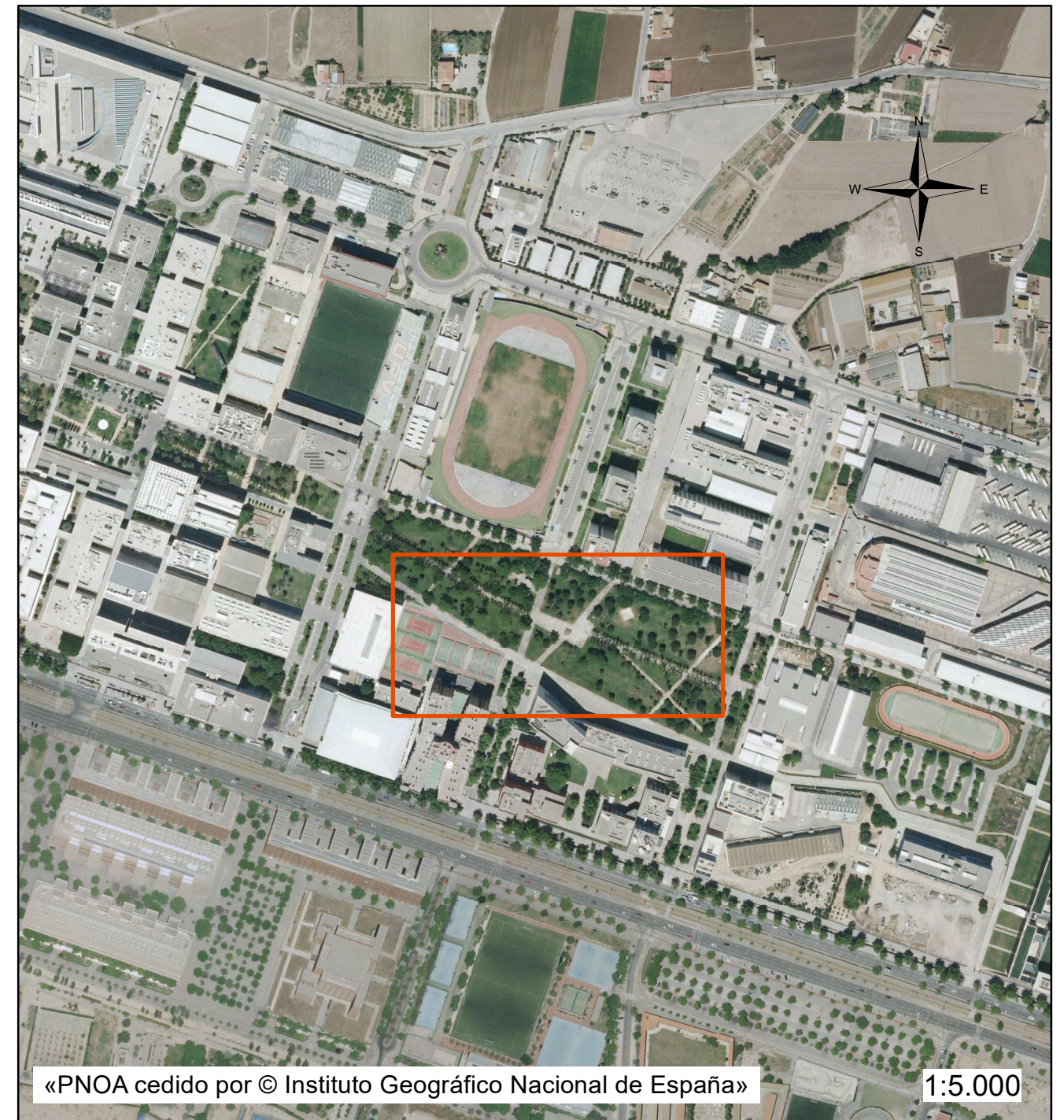
Sistema de referencia: ETRS 89 UTM Zona 30

Leyenda	
	Pilares
	Base teórica

PLANO BASE DE CALIBRACIÓN DE LA UPV		Nº 2
Autor:	Raquel Luján García-Muñoz	
Firma:		
Julio de 2017	Distanciometría GNSS para metrología y control de deformaciones	



PLANO DE SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO BASE CALIBRACIÓN UPV



Sistema de referencia: ETRS 89 UTM Zona 30

PLANO DE SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO		Nº 1
Autor:	Raquel Luján García-Muñoz	
Firma:		
Julio de 2017	Distanciometría GNSS para metrología y control de deformaciones	



Anexo I. Resultados intermedios ME5000

En las siguientes tablas se muestran los resultados intermedios de la observación con el ME5000.

Las distancias directas junto con sus desviaciones típicas e incertidumbres son:

Estación	Visado	Distancia corregida (m)	Desviación típica (mm)	Incertidumbre (mm)
1	2	28.38443	0.10	0.22
1	3	94.40078	0.05	0.22
1	4	198.00840	0.16	0.30
1	5	282.78857	0.12	0.32
1	6	330.01229	0.17	0.37
1	7	151.17286	0.13	0.27
2	3	66.01719	0.09	0.23
2	4	169.62428	0.10	0.26
2	5	254.40460	0.14	0.32
2	6	301.62815	0.09	0.31
3	4	103.60798	0.04	0.22
3	5	188.38778	0.06	0.26
3	6	235.61163	0.08	0.29
3	7	66.59562	0.12	0.23
4	5	84.78045	0.08	0.23
4	6	132.00380	0.04	0.23
4	7	68.58239	0.03	0.19
5	6	47.22397	0.05	0.21
6	7	190.22608	0.05	0.25

Las distancias recíprocas junto con sus desviaciones típicas e incertidumbres son:

Estación	Visado	Distancia corregida (m)	Desviación típica (mm)	Incertidumbre (mm)
2	1	28.38448	0.09	0.22
3	1	94.40082	0.09	0.23
3	2	66.01716	0.07	0.22
4	1	198.00836	0.15	0.30
4	2	169.62418	0.06	0.25
4	3	103.60789	0.11	0.25
5	1	282.78854	0.16	0.34
5	2	254.40443	0.12	0.31
5	3	188.38767	0.07	0.26
5	4	84.78043	0.09	0.23
6	1	330.01226	0.06	0.33
6	2	301.62823	0.07	0.32
6	3	235.61150	0.07	0.29
6	4	132.00390	0.03	0.23
6	5	47.22406	0.04	0.20
7	3	66.59560	0.10	0.22
7	4	68.58236	0.08	0.21
7	6	190.22616	0.11	0.26

Anexo II. Resultados intermedios GNSS

A continuación, se muestran las distancias GNSS obtenidas para todas las líneas base para cada uno de los días.

		DX	DY	DZ	σX	σY	σZ	Distancia geométrica	σ distancia
Día 1	PL1A-PL3A	29,92485	81,94697	-36,06846	0,00006	0,00003	0,00005	94,40199	0,00008
	PL1A-PL3B	29,92552	81,94662	-36,06821	0,00006	0,00003	0,00005	94,40181	0,00008
	PL1B-PL3A	29,92565	81,94607	-36,06811	0,00005	0,00004	0,00006	94,40133	0,00009
	PL1B-PL3B	29,92548	81,94633	-36,06849	0,00006	0,00003	0,00005	94,40165	0,00008
	PL1A-PL1B	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001	0,00000	0,00001	0,00001	0,00001
	PL3A-PL3B	0,00001	0,00000	0,00002	0,00001	0,00000	0,00000	0,00002	0,00001
Día 2	PL1A-PL3A	29,92571	81,94641	-36,06757	0,00007	0,00003	0,00005	94,40144	0,00009
	PL1A-PL3B	29,92587	81,94618	-36,06738	0,00006	0,00003	0,00004	94,40122	0,00008
	PL1B-PL3A	29,92607	81,94626	-36,06735	0,00007	0,00003	0,00006	94,40134	0,00010
	PL1B-PL3B	29,92607	81,94607	-36,06758	0,00006	0,00003	0,00005	94,40126	0,00008
	PL1A-PL1B	0,00001	-0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00000	0,00002	0,00001
	PL3A-PL3B	0,00001	0,00000	0,00002	0,00000	0,00000	0,00000	0,00002	0,00000
Día 3	PL1A-PL3A	29,92737	81,94597	-36,06672	0,00006	0,00004	0,00006	94,40126	0,00009
	PL1A-PL3B	29,92756	81,94572	-36,06689	0,00007	0,00003	0,00005	94,40117	0,00009
	PL1B-PL3A	29,92716	81,94595	-36,06673	0,00007	0,00003	0,00006	94,40118	0,00010
	PL1B-PL3B	29,92799	81,94577	-36,06698	0,00005	0,00003	0,00005	94,40138	0,00008
	PL1A-PL1B	-0,00001	0,00000	-0,00002	0,00001	0,00000	0,00001	0,00002	0,00001
	PL3A-PL3B	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001
Día 4	PL1A-PL3A	-	-	-	-	-	-	-	-
	PL1A-PL3B	-	-	-	-	-	-	-	-
	PL1B-PL3A	29,92619	81,94650	-36,06715	0,00007	0,00003	0,00006	94,40151	0,00010
	PL1B-PL3B	29,92618	81,94638	-36,06725	0,00007	0,00003	0,00005	94,40144	0,00009
	PL1A-PL1B	-	-	-	-	-	-	-	-
	PL3A-PL3B	0,00000	-0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00000

Los datos que no aparecen se deben a un problema en el RINEX de la estación PL1A para el cuarto día.

