

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R SM.2140-0
(08/2021)

**Evaluación de la calidad de funcionamiento
de unidades móviles de radiogoniometría
en entornos operativos**

Serie SM
Gestión del espectro



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2022

© UIT 2022

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R SM.2140-0

Evaluación de la calidad de funcionamiento de las unidades móviles de radiogoniometría en entornos operativos

(2021)

Cometido

La presente Recomendación ofrece orientación sobre los métodos normalizados de evaluación de la calidad de funcionamiento general de las unidades móviles de radiogoniometría en condiciones operativas reales, preferiblemente en entornos típicos en los que la administración contratante utilizará el sistema. Puede formar parte de una prueba de evaluación en el marco de una licitación o de una prueba de aceptación por parte de los servicios de comprobación técnica tras la adquisición de los equipos.

Palabras clave

Evaluación de la calidad de funcionamiento del radiogoniómetro (DF), medición in situ, entorno realista, equipo móvil/transportable, radiorrecalada, línea de marcación

Lista de acrónimos y abreviaturas

CDF	Función de distribución acumulada (<i>cumulative distribution function</i>)
CW	Onda continua (<i>continuous wave</i>)
DF	Radiogoniómetro (<i>direction finder</i>)
GNSS	Sistema mundial de navegación por satélite (<i>global navigation satellite system</i>)
LoB	Línea de marcación (<i>line of bearing</i>)
LoS	Visibilidad directa (<i>line of sight</i>)
OATS	Emplazamiento de pruebas en espacio abierto (<i>open-air test site</i>)
PDF	Función de densidad de probabilidad (<i>probability density function</i>)
RF	Radiofrecuencia
RMS	Valor eficaz (<i>root mean square</i>)
SNR	Relación señal a ruido (<i>signal to noise ratio</i>)
Tx	Transmisor

Recomendaciones, Informes y Manuales del UIT-R conexos

Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (Edición 2011)

Recomendación UIT-R SM.854

Recomendación UIT-R SM.1723

Recomendación UIT-R SM.2060

Recomendación UIT-R SM.2061

Recomendación UIT-R SM.2096

Recomendación UIT-R SM.2097

Informe UIT-R SM.2125

Informe UIT-R SM.2354

NOTA – En todos los casos se deberá utilizar la última edición en vigor de la Recomendación o Informe.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para obtener una medición precisa de la calidad de funcionamiento de un sistema de radiogoniometría, es necesario realizar pruebas en condiciones operativas reales, similares a aquellas en las que se utilizará en la práctica el sistema, y que dichas mediciones sirvan para determinar la «precisión del sistema»¹;
- b) que la precisión de un radiogoniómetro (DF) puede probarse en un entorno real, en un emplazamiento en espacio abierto (OATS) o en una plataforma de laboratorio²;
- c) que la prueba de la calidad de funcionamiento global de un radiogoniómetro móvil en un entorno real no se aborda en ningún otro documento de la UIT;
- d) que está creciendo el uso de sistemas móviles de radiogoniometría;
- e) que los fabricantes utilizan distintos tipos de tecnologías de antenas de radiogoniometría y métodos radiogoniométricos y que ello da lugar a distintos niveles de calidad de funcionamiento en diferentes entornos operativos³;
- f) que en condiciones urbanas, el análisis de la marcación se basa en métodos probabilísticos, debido a los efectos de la propagación por trayectos múltiples y otros efectos locales. El procesamiento estadístico con marcaciones obtenidas de manera continuada en las estaciones móviles de comprobación técnica simplifica la determinación de la posición de las fuentes de emisiones radioeléctricas utilizando el procedimiento de radiorrecalada⁴;
- g) que los datos de calidad de funcionamiento que figuran en las especificaciones de los equipos de radiogoniometría asumen condiciones de prueba ideales y no incluyen los efectos de las obstrucciones, reflexiones y señales radioeléctricas interferentes en el emplazamiento real de la instalación⁵;
- h) que los procedimientos de prueba para sistemas móviles de radiogoniometría en condiciones ideales (OATS) serán similares a los de los sistemas fijos de radiogoniometría,

recomienda

- 1 que los procedimientos de prueba descritos en el Informe UIT-R SM.2125 se pueden utilizar para evaluar la precisión radiogoniométrica de un sistema de radiogoniometría en su entorno radioeléctrico real;
- 2 que los procedimientos de prueba definidos en la Recomendación UIT-R SM.2096 se pueden utilizar para probar e informar sobre la sensibilidad radiogoniométrica de sistemas móviles de radiogoniometría;
- 3 que los procedimientos de prueba definidos en la Recomendación UIT-R SM.2061 se pueden utilizar para probar e informar sobre la inmunidad de un sistema móvil en entornos con presencia de trayectos múltiples;
- 4 que los procedimientos de prueba que figuran en el Anexo 1 se pueden utilizar a fin de probar la calidad de funcionamiento de sistemas móviles de radiogoniometría en entornos operativos reales e informar de los resultados a la administración usuaria, y adicionalmente como para las pruebas de evaluación en el contexto de una licitación o de pruebas de aceptación de servicios de comprobación técnica realizadas tras la adquisición de equipos.

¹ Informe UIT-R SM.2125.

² Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (véase el § 4.7.2.1.1).

³ Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (véase el § 4.7.2.2).

⁴ Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (véanse los §§ 3.6.2.2.5 y 3.6.2.2.6).

⁵ Recomendación UIT-R SM.2097.

Anexo 1

Procedimientos de prueba para evaluar la calidad de funcionamiento de unidades móviles de radiogoniometría en entornos operativos

ÍNDICE

	<i>Página</i>
1	Introducción..... 3
2	Consideraciones generales..... 5
2.1	Configuración para la medición..... 6
3	Procedimientos de prueba..... 7
3.1	Evaluación del método de radiorrecalada (método recomendado)..... 7
3.1.1	Consideraciones generales 7
3.1.2	Radiorrecalada en una ruta predefinida..... 8
3.1.3	Radiorrecalada en condiciones reales – determinación de la posición del objetivo..... 11
3.2	Evaluación del método de marcaciones separadas (método alternativo) 16
3.2.1	Configuración para la medición 16
3.2.2	Procedimiento de medición..... 18
3.2.3	Análisis de los datos de la prueba 19
4	Informe de resultados 24

1 Introducción

Los radiogoniómetros móviles son probablemente las herramientas más eficaces para determinar la posición de fuentes de interferencia perjudicial y para localizar transmisores no autorizados. Al mismo tiempo, suelen ser una de las herramientas más costosas de un servicio de comprobación técnica del espectro.

Las principales características de ingeniería de un radiogoniómetro son las siguientes:

- precisión;
- sensibilidad;
- inmunidad frente a los frentes de onda distorsionados;
- insensibilidad a la despolarización;
- efectos de la interferencia cocanal;
- resistencia a la desensibilización del receptor;
- duración mínima de la señal.

La mayoría de las características mencionadas pueden probarse en un emplazamiento de pruebas en espacio abierto (OATS) utilizando frecuencias restringidas en las que las reflexiones en obstáculos cercanos, el ruido ambiente y otras señales radioeléctricas no interfieran sobre la medición (Recomendaciones UIT-R SM.2060 y UIT-R SM.2061) o la medición se pueda realizar utilizando un simulador (Informe UIT-R SM.2354). Los métodos del Informe UIT-R SM.2125-1 y de la Recomendación UIT-R SM.2096 pueden utilizarse para determinar la precisión del instrumento y la «sensibilidad del sistema».

En entornos limpios (laboratorio, cámara anecoica, OATS), la mayoría de los sistemas de radiogoniometría tienen un comportamiento excelente, lo cual no permite discriminar entre sistemas. Una administración puede adquirir un sistema de radiogoniometría que funcione correctamente en las pruebas de laboratorio, y descubrir posteriormente un mal funcionamiento cuando el equipo se despliega sobre el terreno⁶. Por lo tanto, la «precisión del sistema» no siempre es una medida de cómo funcionará un sistema de radiogoniometría en condiciones operativas reales. Sin embargo, la «precisión del sistema» suele incluirse en las hojas de datos y puede utilizarse como referencia para comparar con los resultados obtenidos en términos de «precisión operativa» en las pruebas de aceptación en emplazamientos, y con las pruebas de «inmunidad radiogoniométrica» frente a trayectos múltiples en condiciones controladas de trayectos múltiples.

Las pruebas en un entorno real se utilizan principalmente para determinar la «calidad de funcionamiento del sistema operativo» o el «comportamiento global» en condiciones operativas reales, preferiblemente en emplazamientos típicos en los que el sistema será utilizado por la administración que adquiere el equipo. Pueden formar parte de las pruebas de evaluación en el marco de una licitación o como método para facilitar a la administración la selección de la herramienta más adecuada de su inventario para cubrir necesidades específicas.

La presente Recomendación propone procedimientos generales de prueba que pueden utilizarse para evaluar la calidad de funcionamiento radiogoniométrica de un sistema no fijo de radiogoniometría automático, instalado en un vehículo en movimiento, al que se hace referencia con el término general de «sistema móvil de radiogoniometría» en su entorno radioeléctrico real⁷.

Las pruebas descritas en esta Recomendación tienen por objeto evaluar el comportamiento radiogoniométrico general en el entorno radioeléctrico en el que se prevé que funcione un sistema «radiogoniométrico móvil» en particular. El entorno real incluye la influencia de los edificios circundantes, los obstáculos, las reflexiones en objetos cercanos y en movimiento, una baja SNR (ya sea por un nivel de señal bajo o por un ruido de fondo elevado), las transmisiones cocanal y en canal adyacente y, en algunos casos, la presencia de señales radioeléctricas intensas. Por lo tanto, en estas condiciones típicas, las administraciones pueden seleccionar el método de prueba a utilizar con arreglo a las necesidades reales y de las características del propio «radiogoniómetro móvil».

Debe tenerse en cuenta que los resultados sobre el comportamiento radiogoniométrico obtenidos con los métodos descritos en esta Recomendación son exclusivos para un determinado sistema de «radiogoniometría móvil» y no pueden aplicarse sin más a otro sistema de «radiogoniometría móvil», incluso del mismo tipo, que funcione en entornos radioeléctricos diferentes.

Si bien los procedimientos pueden ser utilizados por una administración para comparar la calidad de funcionamiento de los sistemas móviles de radiogoniometría de diferentes fabricantes probados en los mismos emplazamientos con los mismos tipos de parámetros de señal, es decir, frecuencia, intensidad y modulación, no pueden ser utilizados para comparar la calidad de funcionamiento de los sistemas de radiogoniometría probados por diferentes administraciones en diferentes emplazamientos.

⁶ Informe UIT-R SM.2125-1.

⁷ Recomendación UIT-R SM.1723-2.

2 Consideraciones generales

Las especificaciones de la precisión, la sensibilidad, la inmunidad a los frentes de onda distorsionados, la insensibilidad a la despolarización, a las interferencias cocanal y de canal adyacente y la resistencia a la desensibilización del receptor se asumen como probadas y evaluadas individualmente en un entorno limpio y sus valores se incluyen en el manual técnico que acompaña al «radiogoniómetro móvil».

Es previsible que un «radiogoniómetro móvil» operativo cumpla con diferentes condiciones y requisitos en diferentes lugares de funcionamiento. Desde esta perspectiva:

- a) Pueden asumirse distintos entornos geográficos típicos, es decir:
 - Espacio abierto: sin edificios, con alguna vegetación de baja altura.
 - Rural: muy baja densidad de edificación, altura reducida de los edificios.
 - Residencial: densidad media de edificación con algunos espacios abiertos y una altura mediana de los edificios.
 - Urbano: densidad elevada de edificación, relación elevada entre la altura de los edificios y la anchura de las calles.
 - Terrenos ligeramente montañoso.
- b) Se pueden investigar diferentes tipos de señales típicas:
 - Portadora no modulada.
 - Modulación de banda estrecha y de banda ancha.
 - Modulación analógica y digital.
- c) Se pueden asumir distintos tipos de condiciones radioeléctricas:
 - Interferencia cocanal.
 - Interferencia de canal adyacente.
 - Ruido de fondo elevado.
 - Transmisiones de alta potencia.
- d) Se pueden seleccionar diferentes bandas de frecuencia para las pruebas.

Todo equipo de radiogoniometría por ángulo de llegada (AoA)⁸ está diseñado, independientemente de la técnica utilizada, del número y tamaño de las antenas o del número de elementos por antena y de su instalación en una torre o en un vehículo, sea de carácter permanente o temporal, para producir una única salida, la línea de marcación (LoB). El sistema de antenas recibe la señal investigada y la unidad de radiogoniometría, utilizando la técnica adecuada de radiorrecalada mediante ángulo de llegada y calcula la dirección más probable (con cierto grado de incertidumbre) de llegada de la señal.

En la práctica, un sistema «radiogoniométrico móvil» se utiliza de dos modos diferentes⁹:

- a) Modo de radiorrecalada: el vehículo sigue una trayectoria en función de los datos radiogoniométricos recopilados con el fin de geolocalizar el transmisor. El análisis de radiorrecalada se basa en métodos probabilísticos, debido a los efectos de la propagación por trayectos múltiples y otros efectos locales. El procesamiento estadístico de marcaciones obtenidas continuamente en estaciones móviles de comprobación técnica simplifica dicho procedimiento. Por consiguiente, el software que se utiliza es parte integral de la unidad «radiogoniométrico móvil» en movimiento.

⁸ AoA, siglas en inglés de Angle of Arrival (ángulo de llegada).

⁹ Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (véase el § 4.7.3.3).

- b) Modo de marcaciones separadas: implica la obtención de varias mediciones discretas de líneas de marcación (LoB)¹⁰ desde emplazamientos fijos, situados a distancias adecuadas del emisor en cuestión. Las mediciones sucesivas pueden realizarse, en diferentes lugares, con tan solo una estación de «radiogoniometría móvil» y combinarse utilizando métodos de triangulación estándar con fines de geolocalización.

En función de los requisitos de la administración contratante, el comportamiento de una unidad «radiogoniométrica móvil» debe evaluarse aplicando ambos o uno de los modos mencionados y en un conjunto seleccionado de entornos típicos de interés.

Por consiguiente, se proponen dos procedimientos de evaluación alternativos para que la administración contratante pueda obtener un conocimiento más completo y exhaustivo de las capacidades y la calidad de funcionamiento de los «radiogoniómetros móviles» en las condiciones radioeléctricas y entornos de interés:

- a) Evaluación con el modo de radorrecalada.
- b) Evaluación con el modo de líneas de marcación separadas.

2.1 Configuración para la medición

El equipo de prueba debe estar preparado para la evaluación/prueba de campo. El conjunto de equipos incluye transmisores de prueba para generar señales de onda continua (CW) y señales moduladas en la gama de frecuencias de interés y con la potencia adecuada para generar la SNR o intensidad de campo recibida deseada.^{11, 12}

La polarización de la antena transmisora de prueba debe coincidir con la polarización del sistema de «radiogoniometría móvil» evaluado. Todos los ángulos de polarización principales soportados por la antena de radiogoniometría deben probarse con antenas transmisoras de polarización única. La polarización utilizada debe mencionarse en el informe de prueba.

Antes de comenzar cualquier medición, el sistema «radiogoniométrico móvil» se debe calibrar y configurar de acuerdo con las instrucciones del fabricante. En un segundo paso, el funcionamiento de la unidad se debe probar/establecer brevemente moviendo un transmisor de prueba (a la frecuencia central de la antena de radiogoniometría) alrededor de la unidad de radiogoniometría y establecer que la línea de marcación (LoB) sigue el movimiento del transmisor, asegurando así la operatividad del sistema.

Las frecuencias seleccionadas deben estar bien distribuidas dentro de los rangos de frecuencia de interés (dados por las especificaciones del fabricante). El número de señales seleccionadas (en combinaciones de frecuencia y modulación) puede ser producido por transmisores de prueba o por objetivos de oportunidad seleccionados que cubran los servicios que interesan a la administración contratante y típicos del entorno de prueba.¹³

¹⁰ LoB, siglas en inglés de línea de marcación (*line of bearing*).

¹¹ Cuando no hay muchas opciones para utilizar objetivos de oportunidad a fin de evaluar el comportamiento de la unidad de «radiogoniometría móvil» con diferentes tipos de modulación, el equipo puede incluir transmisores de prueba y generadores de modulación para generar señales en alguna combinación de tipos de modulación fundamentales (tanto analógicas como digitales) y una gama de anchuras de banda de emisión (por ejemplo, una anchura de banda estrecha, media y amplia en el rango de 10 kHz a 20 MHz).

¹² NOTA: Se recomienda realizar la prueba con una SNR acordada equivalente a la intensidad de señal mínima anunciada por el fabricante con la que se alcanza la precisión especificada.

¹³ De común acuerdo entre administraciones y fabricantes, se pueden especificar las pruebas de determinados tipos de señales moduladas.

Para la selección de las frecuencias de prueba se puede utilizar la metodología descrita en la Recomendación UIT-R SM.2060 (El número de frecuencias de prueba puede estar limitado por las restricciones de la licencia u otros factores).¹⁴

Deben tomarse todas las medidas necesarias para garantizar la precisión de los datos de dirección y posición. Si una brújula de a bordo no proporciona información de marcación suficientemente precisa para garantizar la exactitud de la dirección basada en el GNSS del sistema de radiogoniometría, la unidad móvil deberá conducirse en línea recta con velocidad constante (alrededor de 20 km/h) durante 10 segundos, antes de aparcarla, sin maniobras finales de estacionamiento, en el lugar de medición. Pueden utilizarse referencias externas a la antena de radiogoniometría para garantizar/validar la precisión de los datos de dirección y posición (es decir, puntos de referencia sobre el terreno, mapas digitales, imágenes de satélite, cuentakilómetros, brújulas, equipos de topografía basados en el GNSS, etc.).

Todos los ajustes de la prueba (tipo de señal, ancho de banda del radiogoniómetro, ángulo del punto de prueba, distancia, etc.) deben anotarse en el informe de la prueba.

Por último, todo el equipo de pruebas (incluido el transmisor, las antenas de transmisión, etc.) se debe calibrar periódicamente para garantizar la validez de los datos.

Los procedimientos siguientes pueden servir como métodos para que la administración evalúe la calidad de funcionamiento de cualquier unidad «radiogoniométrica móvil» en entornos de interés. No están pensados para publicar una clasificación de los sistemas de «radiogoniometría móvil», sino que su objetivo es evaluar, utilizando medidas cuantitativas y cualitativas, la forma en la que la unidad «radiogoniométrica móvil» se comportará en diferentes entornos típicos, bandas de frecuencias y modulaciones de interés para la administración que desea utilizar el equipo más adecuado para un conjunto específico de necesidades.

3 Procedimientos de prueba

3.1 Evaluación del método de radiorrecalada (método recomendado)

3.1.1 Consideraciones generales

Una unidad «radiogoniométrica móvil» es una herramienta que permite investigar y resolver casos de interferencia y de transmisiones no autorizadas, que son utilizadas por lo general con carácter de urgencia. La capacidad de una unidad «radiogoniométrica móvil» de localizar la fuente investigada siguiendo la línea de marcación (LoB) instantánea o promedio hacia la unidad de medición a medida que esta se desplaza, es su gran ventaja sobre una estación de radiogoniometría fija.

Sin embargo, las condiciones operativas de una unidad «radiogoniométrica móvil» en movimiento son mucho más complicadas que las de una estación fija de radiogoniometría:

- entorno de propagación en constante cambio (desde línea de visibilidad directa a Rayleigh con cola de gran tamaño);
- entornos radioeléctricos diferentes en los distintos emplazamientos (ruido de fondo elevado, señales con intensidad de campo muy alta);

¹⁴ Una consideración importante en la selección de las frecuencias es la disponibilidad de frecuencias para licencias con fines de prueba. No sólo deben evitarse las frecuencias que puedan estar en uso en zonas cercanas (si pueden recibirse en el lugar de prueba), sino que las licencias de frecuencias son obligatorias en muchos países, incluso para un uso temporal. Especialmente en las zonas urbanas puede haber restricciones en cuanto a las frecuencias y bandas de frecuencia que pueden utilizarse para probar el sistema de radiogoniometría.

- SNR disponible con diferentes valores en función de la distancia al objetivo y de las condiciones radioeléctricas locales;
- existencia de transmisiones en la misma frecuencia o en canales adyacentes sin que se cumpla ninguna relación de protección.

El «radiogoniómetro móvil» sometido a prueba deberá localizar un cierto número de objetivos, en un determinado tipo de entorno geográfico y radioeléctrico. La administración contratante puede establecer los objetivos, ya sea instalando algunos transmisores para la prueba o utilizando objetivos de oportunidad. Cada objetivo se ajusta a una combinación diferente de frecuencia y modulación (con y sin interferencia cocanal o de canal adyacente).

La administración contratante seleccionará la combinación de características de medición específicas aplicables de acuerdo con sus necesidades. En el caso de evaluar varios sistemas, se deberán utilizar las mismas características de medición para todos los «sistemas móviles de radiogoniometría».

3.1.2 Radiorrecalada en una ruta predefinida

Esta es una prueba de la calidad de funcionamiento de los «radiogoniómetros móviles» en el modo de radiorrecalada y en condiciones controladas. La administración contratante, siguiendo los procedimientos que se indican a continuación, podrá evaluar cuantitativamente el comportamiento en modo radiorrecalada de una unidad «radiogoniométrica móvil» seleccionando varios parámetros y entornos controlados.

Paso 1

Se debe establecer una ruta predefinida entorno a un área cerrada. Se pueden seleccionar diferentes tipos de escenarios (por ejemplo, espacios abiertos, edificios de baja altura, urbano de alta densidad, etc.). El objetivo se ubica dentro del área cerrada determinada por la ruta predefinida. La Fig. 1 ilustra un ejemplo de ruta alrededor de una zona de edificios de baja altura.

FIGURA 1



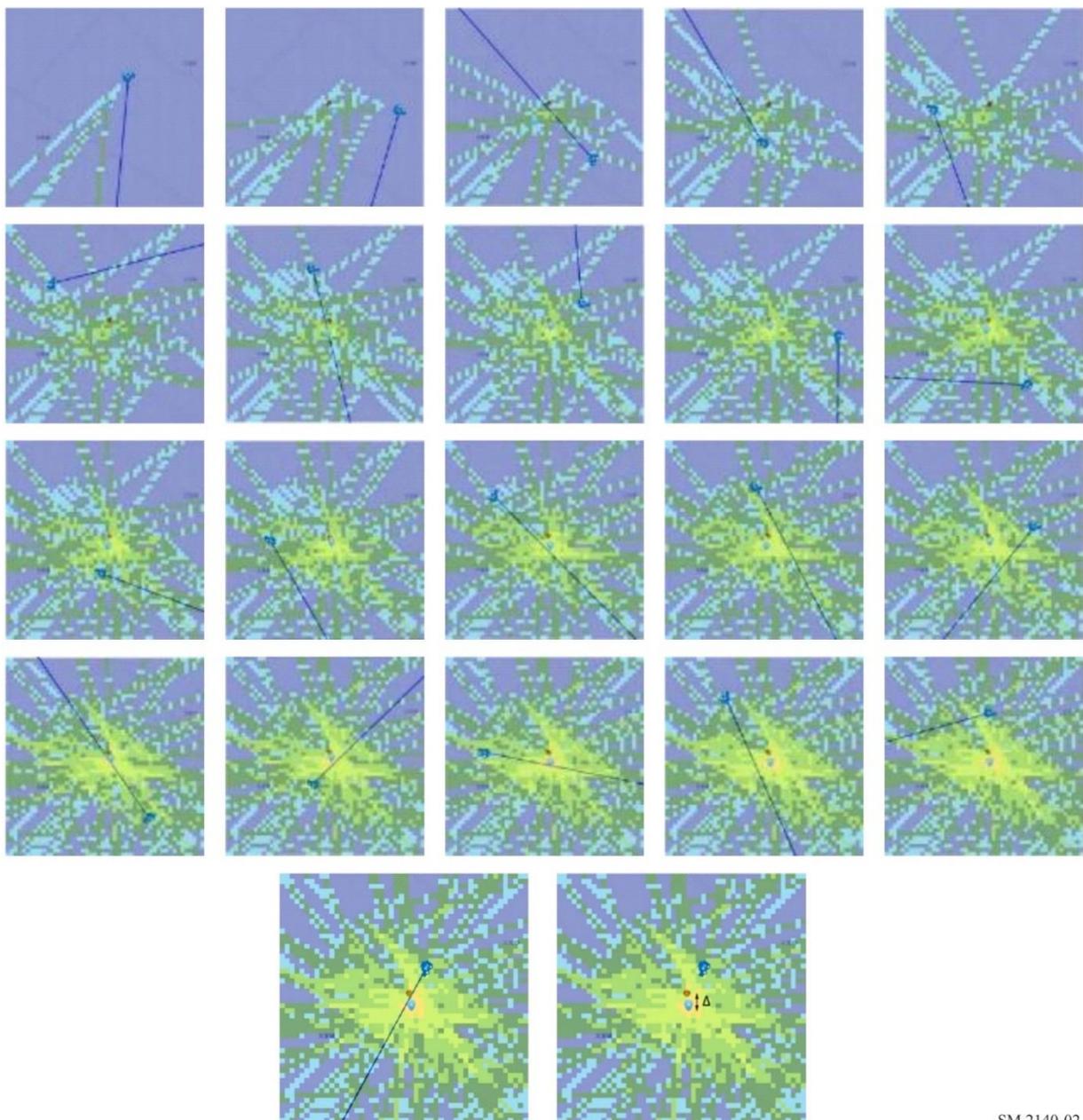
Paso 2

La unidad «radiogoniométrica móvil» sometida a prueba se desplaza por la ruta predefinida. Hay que asegurarse de que la recepción de la unidad alcance una relación señal/ruido suficiente (20 dB) en la mayor parte del recorrido. El software de posicionamiento se ejecuta automáticamente durante la medición (sin intervención manual alguna). El «radiogoniómetro móvil» debe recorrer al menos una vez la ruta predefinida, aunque para eliminar factores aleatorios y que las mediciones de la prueba sea más repetitivas, se recomienda recorrerla tres o más veces. La Fig. 2 muestra un proceso típico de determinación de la posición mediante software.

Paso 3

Una vez completado el recorrido, el software de posicionamiento determina la ubicación del transmisor. A continuación, se debe registrar el error de posicionamiento.

FIGURA 2



Paso 4

Se seleccionan diferentes combinaciones de condiciones de prueba y se realizan varias pruebas (de carácter opcional y seleccionadas entre las combinaciones de condiciones de prueba representativas requeridas por el comprador).

Se pueden seleccionar diferentes combinaciones de parámetros:

- banda de frecuencias;
- modulación;
- condiciones meteorológicas;
- número de vueltas alrededor del objetivo;
- velocidad de conducción durante la prueba.

Los resultados de la prueba de «Radiorecalada en ruta predefinida» pueden presentarse tal como figura en el siguiente Cuadro.

CUADRO 1

Resultados de «Radiorecalada en ruta predefinida»

Condiciones del terreno	Frecuencia	Modulación	Meteorología	Vueltas	Velocidad (km/h)	Error de posicionamiento (metros)

Condiciones del terreno: espacio abierto, edificios de escasa altura, zonas urbanas densas, etc.

Frecuencia: frecuencia central y anchura de banda.

Modulación: modulación de la señal.

Meteorología: el tiempo y la temperatura en el momento de la prueba (por ejemplo, soleado 31°C).

Vueltas: número de vueltas alrededor del objetivo.

Velocidad: velocidad de conducción.

Error de posicionamiento: la distancia entre la mejor posición dada por el software y la posición real.

Procesamiento de los datos de la prueba

Se puede calcular el valor medio del error de posicionamiento (en metros), la desviación típica y el valor eficaz o valor cuadrático medio del error de posicionamiento.

$$\hat{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1a)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \hat{x})^2}{n-1}} \quad (1b)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \quad (1c)$$

donde:

\hat{x} valor medio

$\hat{\sigma}$ desviación típica

RMS valor eficaz

x_i muestra de datos i -ésima del error de posicionamiento

n número de muestras.

Reglas de evaluación de referencia

- cuanto más bajos sean el valor medio y el valor eficaz del error de posicionamiento, mejor será la calidad de funcionamiento;
- cuanto menor sea la desviación típica del error de posicionamiento, mejor será la consistencia del «radiogoniómetro móvil» en diferentes condiciones de prueba.

Es fundamental que la administración contratante juzgue si la desviación de posicionamiento medida es aceptable. Por lo general, la desviación de posicionamiento debe ser lo suficientemente pequeña como para permitir la búsqueda con un dispositivo portátil o de forma visual, por ejemplo, a una distancia de 200 a 300 metros.

3.1.3 Radiorrecalada en condiciones reales – determinación de la posición del objetivo

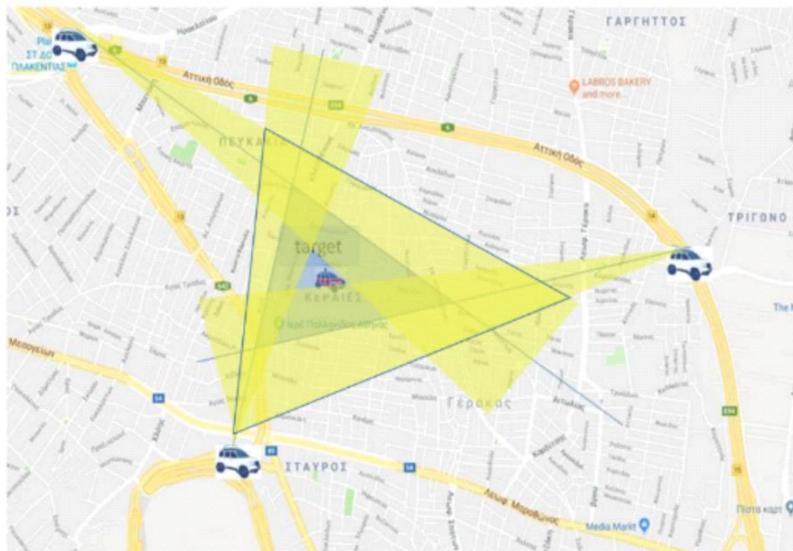
Se trata de una prueba del comportamiento de la radiorrecalada del «radiogoniómetro móvil» en condiciones operativas reales.

Se requerirá que el «radiogoniómetro móvil» en prueba localice un cierto número de objetivos, en un determinado tipo de entorno geográfico y radioeléctrico y en combinaciones definidas de frecuencia y modulación.

La administración puede establecer los siguientes escenarios:

- A) **Triangulación mediante tres puntos:** Se pueden seleccionar tres ubicaciones que tengan visibilidad directa con el objetivo. La unidad de «radiogoniometría móvil» se estacionará en los tres emplazamientos y realizará mediciones de línea de marcación (LoB) por el método de marcaciones separadas. Los resultados de estas tres mediciones se utilizarán para la triangulación con el fin de identificar el área del polígono donde posiblemente se encuentre el objetivo. El nivel de la señal del objetivo en los emplazamientos de medición debe estar suficientemente por encima del ruido de fondo para tener una medición de buena calidad de la línea de marcación¹⁵.

FIGURA 3



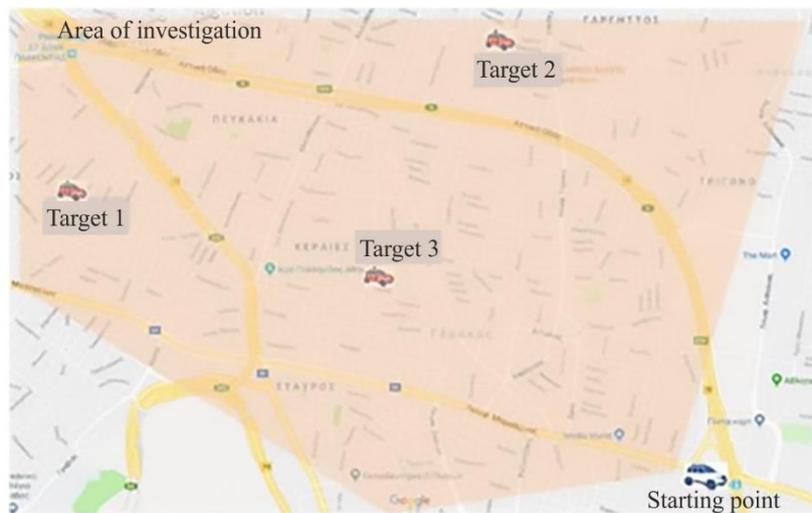
SM.2140-03

¹⁵ SNR = 20 dB (normalmente se reduce cuando un radiogoniómetro móvil intenta encontrar una fuente de interferencia o de una transmisión no autorizada).

El triángulo resultante por objetivo debe representarse en un mapa e incluirse en el informe final. El área del polígono, en (m²) puede ser otra medida de la calidad de funcionamiento del «radiogoniómetro móvil» siempre que incluya el objetivo (véase la Fig. 3).

- B) Radiorrecalada a ciegas:** La administración proporciona en un mapa los polígonos que contienen las ubicaciones de los objetivos y establece el punto de partida en una esquina del área investigada (véase la Fig. 4).

FIGURA 4



SM.2140-04

Las unidades «radiogoniométricas móviles» pueden entonces iniciar el procedimiento de radiorrecalada. Como se ha descrito anteriormente, una unidad «radiogoniométrica móvil» obtiene continuamente marcaciones a medida que se desplaza con el fin de localizar el objetivo. El análisis de las marcaciones se basa en métodos probabilísticos debido a los efectos de la propagación por trayectos múltiples y otros efectos locales, de forma que la utilización del software apropiado simplifica el procedimiento de radiorrecalada y el «radiogoniómetro móvil» es así dirigido hacia la zona más probable de ubicación del objetivo.

El software de análisis de la marcación suele ser propiedad del fabricante del radiogoniómetro y forma parte integral de la unidad, al igual que la antena, el receptor y la metodología de radiogoniometría aplicada. El conductor de la unidad de «radiogoniometría móvil» sólo debe seguir las direcciones indicadas por el software (respetando las señales de tráfico) y no utilizar en absoluto la experiencia del personal técnico que le acompañe. En todo caso se debe respetar el código de circulación y conducir el vehículo a una velocidad entre 20 y 40 km/h.

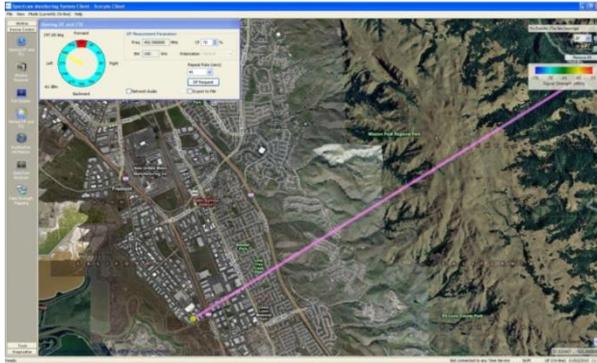
La potencia transmitida se fija lo suficientemente elevada a fin de tener una SNR = 20 dB en el punto de partida de cada procedimiento de radiorrecalada.

Las direcciones indicadas por el software de análisis de marcación y la ruta seguida por el vehículo deben ser registradas para su posterior procesamiento y evaluación.

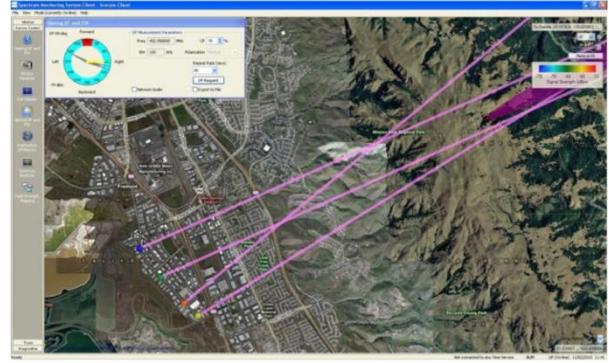
El software de geolocalización mostrará en la pantalla la estimación de la dirección hacia la que debe dirigirse el «radiogoniómetro móvil» y, finalmente, una estimación de la ubicación del objetivo con imágenes similares a las mostradas en la Fig. 5 o en la Fig. 6.

FIGURA 6

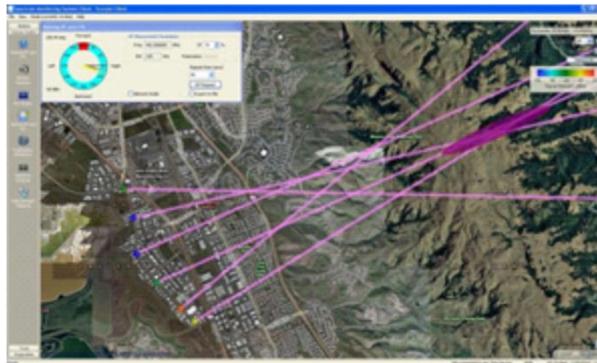
Uso de la visualización de la elipse de incertidumbre para indicar la ubicación más probable del objetivo durante una radiorreclada



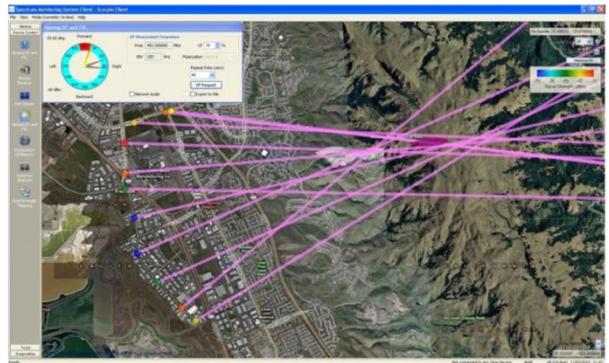
i) Intercepción inicial del objetivo cuya posición se desea determinar



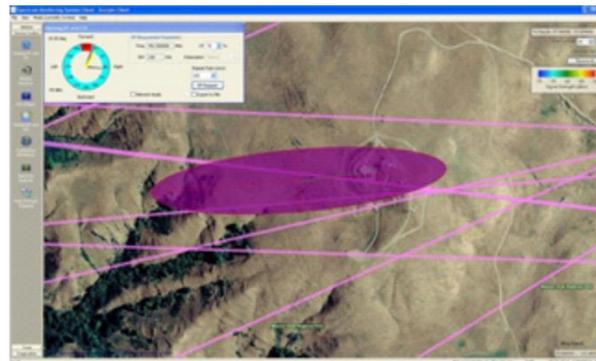
ii) Después de moverse un poco y recopilar datos



iii) Después de moverse más y recopilar más datos



iv) Después de acercarse un poco más al objetivo



v) Acercamiento óptico sobre la elipse de incertidumbre; el objetivo está en el edificio dentro de la elipse o cerca de él

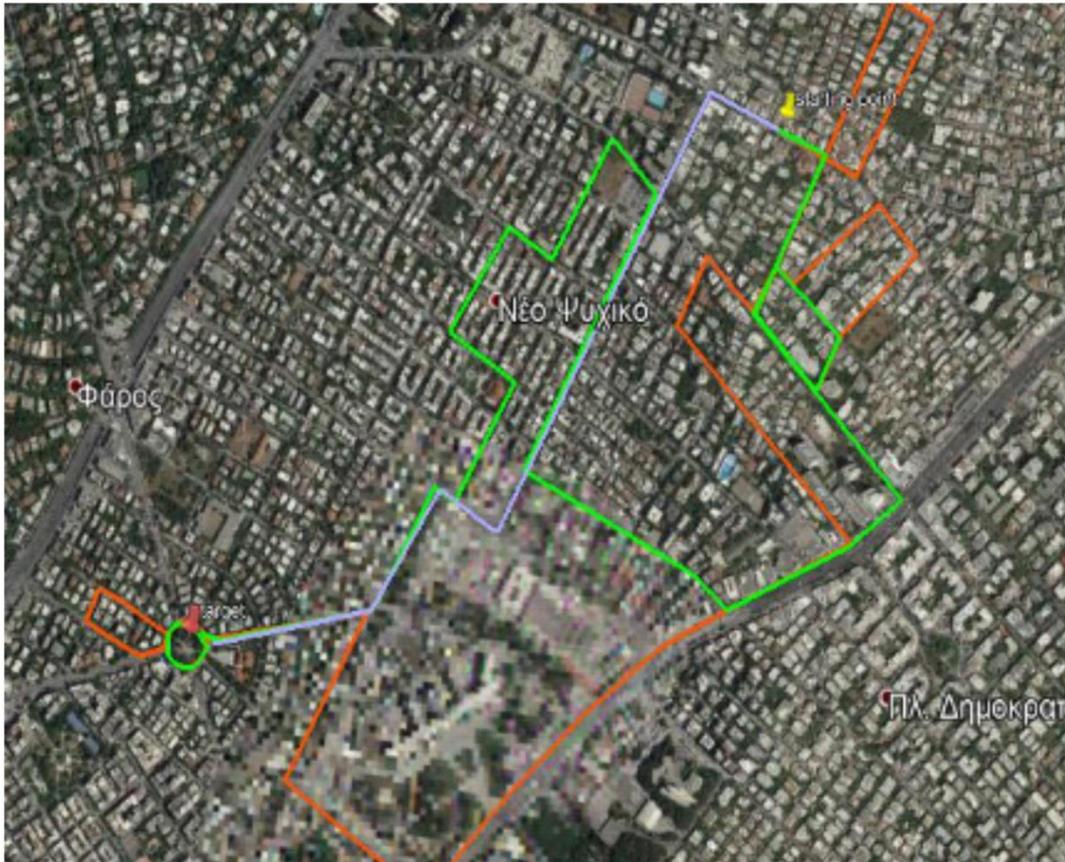
SM.2140-06

Se considera que se ha localizado un transmisor cuando los usuarios del sistema de radiogoniometría pueden determinar el edificio en el que está ubicado el transmisor o han localizado el vehículo que transporta la antena transmisora. Esto suele ocurrir cuando la ubicación sugerida se encuentra en el color más cálido de la paleta de colores utilizada en el mapa de incertidumbre y está rodeada completamente por colores más fríos (cuando el software utiliza un mapa de aciertos basado en colores para representar la posible dirección del objetivo y la estimación de su ubicación) y/o está dentro de la elipse de incertidumbre (cuando el software utiliza una elipse de error para representar la estimación de la ubicación del objetivo).

Tras cada vuelta al circuito planificado se registra la distancia recorrida por el «radiogoniómetro móvil».

Los resultados de la prueba de «radiorrecalada» pueden presentarse tal como figura en el Cuadro 2. En la Fig. 7 se puede ver el comportamiento de dos unidades «radiogoniométricas móviles» diferentes en un entorno urbano denso (rutas rojas y verdes). La ruta más corta calculada entre el punto de partida y el objetivo se representa en color azul.

FIGURA 7



SM.2140-06

CUADRO 2

Resultados de la «radiorrecalada a ciegas»

Ubicación	Frecuencia (MHz)	Modulación	Tipo de entorno	Información sobre la posición del objetivo	Distancia más corta (m)		Distancia recorrida (m)		Resultado	
					Eq 1	Eq 2	Eq 1	Eq 2	Eq 1	Eq 2

Ubicación: nombre del lugar donde se realizó la radiorrecalada (por ejemplo, Atenas).

Tipo de entorno: depende de la densidad de los obstáculos (por ejemplo, urbano, rural, residencial, etc.).

Frecuencia: la frecuencia de la señal transmitida por el objetivo.

Modulación: el tipo de modulación de la señal transmitida (es decir, CW, FM, etc.).

Información sobre la ubicación del objetivo: conocida o desconocida.

Distancia más corta al objetivo en el mapa: la distancia más corta en el mapa siguiendo las carreteras desde el punto de partida de la radiorrecalada hasta el objetivo.

Distancia recorrida: la distancia real que el «radiogoniómetro móvil» recorrió desde el punto de partida de la radiorrecalada hasta la localización del objetivo, siguiendo las carreteras y respetando las normas de tráfico.

Resultado: objetivo encontrado o no.

3.2 Evaluación del método de marcaciones separadas (método alternativo)

El objetivo de la prueba basada en el método de marcaciones separadas es caracterizar la respuesta típica de una unidad «radiogoniométrica móvil» en diferentes tipos de entornos reales, tal como la «radiogoniometría móvil» se describe en la documentación de la UIT¹⁶. En muchos casos se pedirá a una unidad «radiogoniométrica móvil» que investigue la posible causa de una interferencia en una región que no está cubierta por una red fija de comprobación técnica. Un conjunto inicial de al menos tres mediciones de marcaciones separadas, en emplazamientos debidamente seleccionados (a una distancia adecuada del emisor en cuestión) puede ayudar en el proceso de geolocalización de la interferencia¹⁷ (véase la Fig. 3).

Los parámetros técnicos de la unidad «radiogoniométrica móvil» sometida a prueba se deben determinar de acuerdo con el Informe UIT-R SM.2125. Las pruebas descritas en los párrafos siguientes también se basan en los principios del Informe UIT-R SM.2125 sobre pruebas en entornos reales.

3.2.1 Configuración para la medición

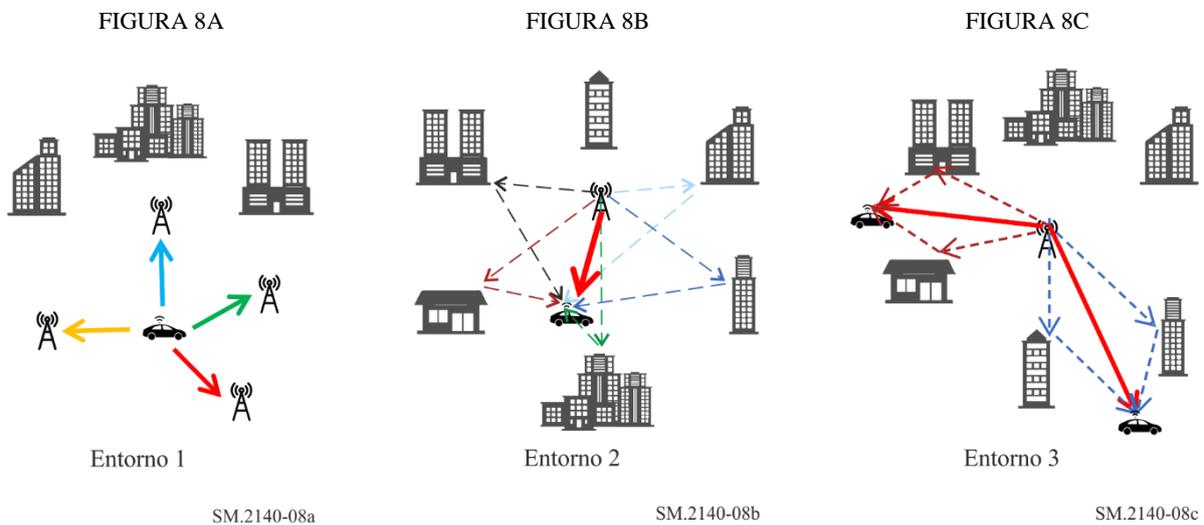
Se proponen tres entornos de prueba típicos:

- 1) El primer entorno de prueba debe estar libre de obstáculos entre la unidad «radiogoniométrica móvil» y el transmisor (por lo tanto, sólo existen unas pocas fuentes de reflexiones alejadas del transmisor). Predomina el trayecto directo sin obstáculos entre el transmisor y la antena receptora del radiogoniómetro (Fig. 8A). El comportamiento en este entorno puede utilizarse como referencia y representa un entorno típico en el que no hay obstrucciones entre el transmisor y el «radiogoniómetro móvil».

¹⁶ Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (véase el § 4.7.3.3).

¹⁷ Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT (véase el § 4.7.3.1).

- 2) El segundo entorno de prueba debe tener un trayecto directo libre de obstáculos entre el transmisor y el «radiogoniómetro móvil» así como algunas reflexiones, principalmente debidas a obstáculos detrás de la unidad de radiogoniometría, como se muestra en la Fig. 8B.
- 3) El tercer entorno de prueba debe tener fuentes de reflexión alrededor de la unidad «radiogoniométrica móvil», existiendo también un trayecto directo sin obstáculos entre el transmisor y el «radiogoniómetro móvil». Las reflexiones procedentes de los obstáculos situados entre el transmisor y el «radiogoniómetro móvil» son predominantes (Fig. 8C).



El equipo de radiogoniometría sometido a prueba debe colocarse en un vehículo con un sistema de posicionamiento global y una fuente de alimentación adecuada, que recorrerá los tres tipos de entornos. Cada emplazamiento de prueba debe estar dentro del área de cobertura calculada del transmisor de prueba. En general, la unidad «radiogoniométrica móvil» deberá realizar mediciones de la línea de marcación en al menos ocho (8) emplazamientos diferentes alrededor del objetivo, para cada banda de frecuencia de interés y cada entorno típico. La distribución acimutal de los emplazamientos de prueba carece de importancia si se cumplen las especificidades de cada entorno.

Para el primer entorno de prueba es requisito que el trayecto entre el transmisor y el «radiogoniómetro móvil», esté en su mayor parte libre de obstáculos, sin que tampoco existan obstáculos cercanos a fin de evitar cualquier recepción por trayectos múltiples de elevada intensidad.

En el segundo entorno de prueba debe existir visibilidad directa entre el transmisor y la unidad «radiogoniométrica móvil», además de reflexiones creadas exclusivamente por obstáculos y fuentes de reflexión situadas en torno al transmisor y al radiogoniómetro. Los emplazamientos de prueba deben estar situados preferentemente a diferentes distancias del transmisor, si ello es posible. El emplazamiento de prueba a mayor distancia debe estar en el límite de la cobertura a fin de mantener una SNR de 20 dB para la intensidad de campo mínima especificada. En el caso de un emplazamiento de prueba situado a corta distancia, basta que se encuentre en situación de campo lejano.

El principal requisito del tercer entorno es que exista visibilidad directa entre el transmisor y la unidad de «radiogoniometría móvil», así como reflexiones generadas por obstáculos situados entre el transmisor y el «radiogoniómetro móvil». En este caso, se considera que las reflexiones pueden ser el elemento predominante. Los emplazamientos de prueba deben estar preferentemente a diferentes distancias del transmisor, si ello es posible. El emplazamiento de prueba a mayor distancia puede estar en el límite de la cobertura a fin de mantener una SNR de 20 dB o el valor de intensidad de campo mínima acordada. En el caso de un emplazamiento de prueba situado a corta distancia, basta con que se encuentre en situación de campo lejano.

La prueba puede realizarse con señales no moduladas (CW) o moduladas, utilizando el transmisor de prueba u «objetivos de oportunidad», incluyendo señales analógicas y digitales con tipos de modulación típicos de las señales que recibirá el sistema de radiogoniometría instalado y en entornos operativos típicos.

Si la prueba se realiza con portadoras no moduladas, el ancho de banda del radiogoniómetro debe ajustarse a un valor que esté en consonancia con la Recomendación UIT-R SM.2060. Si la prueba se realiza con una señal con modulación analógica o digital, la anchura de banda del radiogoniómetro se debe ajustar en función de la anchura de banda de la señal.

La administración evaluadora deberá seleccionar las bandas de frecuencias y la modulación de las señales de prueba que cubran sus necesidades particulares.

Todos los ajustes de las pruebas (nivel de la señal en $\mu\text{V/m}$, SNR, tipo de señal, tipo de emplazamiento, anchura de banda del radiogoniómetro, ángulo del punto de prueba, distancia, tipos de antenas, etc.) deben anotarse en el informe de evaluación de la calidad de funcionamiento.

3.2.2 Procedimiento de medición

a) Entorno de espacio abierto

a1) La prueba inicial tiene por objeto evaluar la calidad de funcionamiento de una unidad radiogoniométrica instalada en un determinado tipo de vehículo.

Esta medición se puede obviar en caso de que la instalación de la unidad móvil (fijada permanentemente en un vehículo) se pruebe conforme a la Recomendación UIT-R SM.2097 (pruebas de funcionamiento en fábrica) para el conjunto de frecuencias y modulaciones requeridas y se disponga de las hojas de datos pertinentes.

Si las unidades de radiogoniometría son portátiles, y por lo tanto pueden instalarse temporalmente en diferentes tipos de vehículos, o si la instalación permanente no se ha probado de acuerdo con la Recomendación UIT-R SM.2097, se puede utilizar el procedimiento descrito en esta sección.

a2) El «radiogoniómetro móvil» se estaciona en el centro de la zona de espacio abierto y el transmisor se desplaza a su alrededor. Se registran las coordenadas instantáneas de la línea de marcación y de la posición. Las mediciones se repiten para cada conjunto de parámetros (frecuencia y modulación).

b) Otros entornos

En este procedimiento, el transmisor se coloca en un emplazamiento fijo en el centro de la zona de pruebas. También se puede utilizar un «objetivo de oportunidad», si está disponible.

El «radiogoniómetro móvil» debe recorrer la zona en torno al transmisor y a distancias variables al mismo, asegurando la precisión de los datos de dirección y posición, tal como se ha descrito anteriormente, a fin de registrar lecturas continuas de líneas de marcación. Deben registrarse con precisión las coordenadas de cada ubicación de medición de líneas de marcación.

En cada ubicación de prueba, la señal recibida debe estar (ajustando adecuadamente la parte transmisora) 20 dB por encima del ruido ($\text{SNR} = 20$).

En cada entorno se mide y registra la línea de marcación (LoB) durante un período de tiempo definido (por ejemplo, 10 minutos). Los valores instantáneos de la línea de marcación y las coordenadas de posición se incluyen en el cuadro de resultados (véase el Cuadro 1) y se calcula la desviación con respecto a la dirección real hacia el objetivo ($\Delta\text{DF} = \text{LoB} - \text{A}$).

El Cuadro 1 es un ejemplo de cuadro de resultados; se utiliza un cuadro para cada combinación de entorno/ubicación de prueba/modulación/frecuencia.

CUADRO 3

Cuadro con ejemplos de datos de prueba

Índice	Coordenadas	Azimut verdadero calculado hacia el objetivo (grados)	Línea de marcación (LoB) (grados)	ΔDF calculado = LoB-A (grados)	ΔDF calculado = LoB-A (grados)
1	C ₁	TAz ₁	LoB ₁	ΔDF_1	
2	C ₂	TAz ₂	LoB ₂	ΔDF_2	
3	C ₃	TAz ₃	LoB ₃	ΔDF_3	
...	
x	C _x	TAz _x	LoB _x	ΔDF_x	

- El acimut verdadero (A) se calcula conociendo la ubicación exacta del transmisor en el mapa y las coordenadas exactas del «radiogoniómetro móvil».
- LoB (marcación), medida por el radiogoniómetro móvil.
- $\Delta DF = LoB - A$.

3.2.3 Análisis de los datos de la prueba

El procedimiento descrito puede servir de punto de partida para que la administración evalúe el comportamiento de la unidad móvil de radiogoniometría.

La evaluación de los datos calculados (ΔDF) a partir de los datos recogidos (línea de marcación, LoB), puede analizarse en dos pasos a fin de obtener una medida cuantitativa de la calidad de funcionamiento de la unidad móvil de radiogoniometría mediante el método de marcaciones separadas en entornos reales.

Paso 1

Todos los fabricantes indican en la hoja de especificaciones el valor de la precisión de su radiogoniómetro móvil. Se suele indicar el valor eficaz (RMS) de la precisión para toda la banda de funcionamiento o para diferentes subbandas de frecuencias con independencia de la modulación de la señal. El valor corresponde a la prueba en un entorno sin reflexiones (normalmente en emplazamientos de pruebas en espacio abierto, OATS) sin que se disponga de información sobre el tamaño del conjunto de datos de medición, su valor medio y su desviación típica. A menudo, la precisión se caracteriza como típica sin más información adicional.

Para cualquier conjunto de mediciones, pueden descartarse las mediciones radiogoniométricas individuales estadísticamente atípicas (denominadas «datos salvajes») aplicando la ecuación de la regla intercuartílica (IQR) (3):

$$\Delta DF_{descartado} = \begin{matrix} \Delta DF > (Q_{75} + 1,5IQR) \\ \Delta DF < (Q_{25} - 1,5IQR) \end{matrix} \quad (3)$$

donde:

- Q_{75} : es el valor más bajo de ΔDF que es mayor o igual al 75% de los valores medidos
- $IQR = Q_{75} - Q_{25}$
- Q_{25} : es el valor más bajo de ΔDF que es mayor o igual al 25% de los valores medidos.

El ΔDF_{rms} esperado será diferente en distintos entornos. Para el primer entorno, debe ser el mínimo posible (aproximadamente igual a lo especificado por el fabricante). Para el segundo entorno, se espera un valor mayor que para el primero, ya que es una medida de la inmunidad in situ a los trayectos múltiples. Para el tercer entorno, se espera que el valor de ΔDF_{rms} sea aún mayor debido al predominio de las reflexiones recibidas en el radiogoniómetro.

El valor de ΔDF_{rms} de cada entorno se calcula para las subbandas de frecuencias definidas por el fabricante y considerando todas las mediciones de todos los tipos de modulaciones, frecuencias y emplazamientos (tras excluir los valores atípicos de cada conjunto de mediciones) según la ecuación (2):

$$\Delta DF_{rms_{envzbandj}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta DF_{i_{envz}}^2} \quad \text{grados} \quad (2)$$

donde:

- env_z : tipo de entorno: $z = 1, 2$, o 3
- $Band_j$: subbanda de frecuencia individual de prueba tal como se describe en la hoja de especificaciones
- j : número de subbanda de frecuencia en la hoja de la especificación (1 a J)
- N : número de la medición (número de acimuts * L * M * número de modulaciones)
- $N.^\circ$ de acimutes: típicamente 8 (posiciones)
- L : número de líneas de marcación (LoB) recopiladas en cada acimut por frecuencia y por modulación
- M : número de frecuencias individuales en cada una de las J subbandas
- $N.^\circ$ de modulaciones: onda continua (CW) más los tipos individuales de modulación.

Al final del proceso de evaluación se obtendrá un conjunto de J valores de $\Delta DF_{rms_{envzbandj}}$, para cada entorno, igual al número de valores de la precisión del radiogoniómetro (por subbanda) facilitados por el fabricante. Por lo tanto, suponiendo que el primer entorno y el emplazamiento de pruebas en espacio abierto (OATS) son similares, se obtiene una indicación directa de la calidad de funcionamiento del «radiogoniómetro móvil» al comparar los valores eficaces (RMS) calculados con los respectivos valores de la hoja de especificaciones.

Paso 2

Se puede considerar que todos los «radiogoniómetros móviles» en evaluación han sido probados por el fabricante para detectar cualquier error sistemático en la estimación de las líneas de marcación. Los ΔDF se pueden considerar errores aleatorios y pueden ser tratados conforme a la teoría estadística. Estas incertidumbres pueden surgir de la imprecisión de los instrumentos, y/o, de la naturaleza estadística inherente de los fenómenos que se observan (es decir, los efectos ambientales). Desde el punto de vista estadístico, ambos casos se tratan de la misma manera, a saber, como incertidumbres que surgen del muestreo finito de una población infinita de eventos. El proceso de medición, tal y como se ha descrito, es un proceso de muestreo de una distribución demasiado grande para ser medida en su totalidad.

El usuario intentará determinar el comportamiento de una unidad «radiogoniométrica móvil» en determinados tipos de entornos tomando una muestra aleatoria de tamaño finito y utilizando los parámetros de la muestra como una estimación de los valores verdaderos.

Por lo tanto, la medición de una cantidad fija implica tomar una muestra de una distribución abstracta y teórica, determinada por la imprecisión del instrumento. Puede afirmarse que casi todos los casos de errores debidos a instrumentos presentan una distribución gaussiana (normal). Suponiendo que no haya errores sistemáticos, la media de la gaussiana debería ser igual al valor verdadero de la cantidad medida y la desviación típica proporcional a la precisión del instrumento.¹⁸

Se pueden calcular la media experimental y la desviación típica experimental.

$$\hat{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (4a)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \hat{x})^2}{n-1}} \quad (4b)$$

donde:

\hat{x} media experimental

$\hat{\sigma}$ desviación típica experimental

x_i dato de la muestra i -ésima de la radiogoniometría (DF)

n número de datos recopilados.

El valor de ΔDF tiene signo positivo cuando la dirección estimada hacia el objetivo (LoB) está a la derecha de la dirección real (A), mientras que tiene signo negativo cuando la dirección estimada hacia el objetivo (LoB) está a la izquierda de la dirección real (A).

La distribución de los datos recopilados (tras excluir los «datos salvajes» según la ecuación (3)) puede representarse en forma de histograma (véase la Fig. 9).

Una disposición circular perfecta de antenas, con elementos idénticos, colocados simétricamente y que recoja los valores de LoB hacia objetivos distribuidos aleatoriamente alrededor de su perímetro, no debe presentar valores sesgados hacia una u otra dirección, de forma que los valores de ΔDF medidos en espacio abierto, deben presentar una distribución uniforme a derecha e izquierda del ΔDF correspondiente a cero grados.

Teóricamente, un conjunto infinito de datos de valores de ΔDF , recogidos mediante una unidad de radiogoniometría que funciones perfectamente, en situación de espacio abierto, debería tener una media experimental cero ($\hat{x} = 0$).

En la práctica, y siempre que el escenario de espacio abierto (entorno 1 en la Fig. 8a) esté libre de reflexiones y la antena de radiogoniometría esté correctamente colocada en el vehículo, los valores radiogoniométricos tendrán un valor medio experimental que tiende a cero.

El conjunto de datos de ΔDF , una vez excluidos los valores estadísticos atípicos utilizando la ecuación (3), puede aproximarse a una distribución normal con media $\mu = \hat{x}$ y desviación típica $\sigma = \hat{\sigma}$, como puede verse en el gráfico de la Fig. 9.

Los datos de la Fig. 9 se obtuvieron de la evaluación de una unidad «radiogoniométrica móvil» en espacio abierto en frecuencias separadas 20 MHz en el rango de 150 a 1 300 MHz, en intervalos de 15 grados alrededor del objetivo. El conjunto de datos inicial consistía en 1 416 valores de marcación (LoB). Después de excluir los «datos salvajes» utilizando la ecuación (3), el conjunto de datos consistió en 1 285 valores de LoB. Con este conjunto de datos se construye el histograma. La media experimental es $\hat{x} = -0,27$ grados y la mediana experimental $\bar{x} = -0,4$ grados. La desviación típica experimental es $\hat{\sigma} = 1,73$ grados. El valor eficaz es $\Delta DF_{rms} = 1,775$.

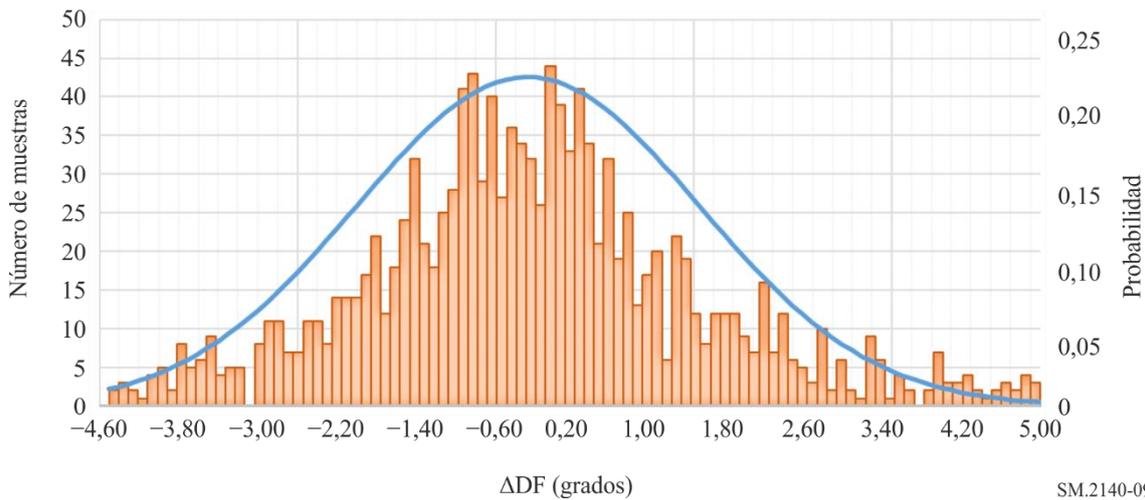
¹⁸ Statistics and the treatment of experimental data. W. R. Leo (adaptación del Capítulo 4, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, by W. R. Leo, Springer-Verlag 1992).

Si el valor medio experimental es superior a la mitad de la desviación típica, significa que el funcionamiento de la antena de radiogoniometría está sesgado de forma significativa hacia una dirección, lo que indica un funcionamiento defectuoso, que está mal colocada en el vehículo o que hay un sesgo significativo y probablemente innecesario en la configuración o el escenario de medición. En cualquier caso, debe investigarse la razón del sesgo y solucionar el problema antes de continuar las mediciones.

Cuando la disposición circular de antenas de radiogoniometría funciona bien y su instalación en el vehículo es correcta, la «radiogoniometría móvil» no ofrecerá resultados sesgados en ninguna dirección. En este caso el usuario sólo está interesado en la magnitud de la desviación angular con respecto a la posición real del objetivo, es decir, sólo los valores de $|\Delta DF| = |\text{LoB-A}|$.

FIGURA 9

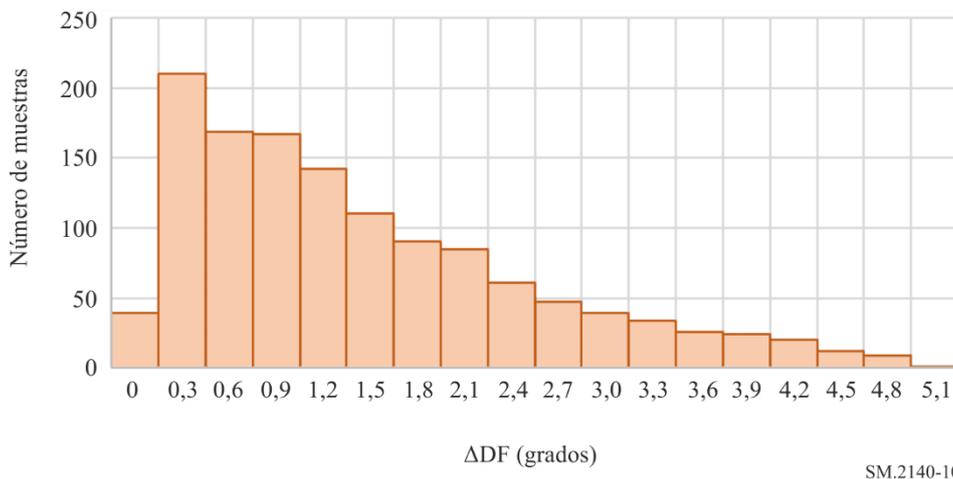
Conjunto de datos de $\Delta DF = \text{LoB-A}$



El histograma pertinente del conjunto de datos $|\text{LoB-A}|$ (después de excluir los «datos salvajes» de $\Delta DF = \text{LoB-A}$ conforme a la ecuación (2)) y utilizando el método de Sturges (ecuación (5)), ofrecerá una presentación más completa visualmente del comportamiento del «radiogoniómetro móvil».

FIGURA 10

Conjunto de datos de $\Delta DF = |\text{LoB-A}|$ Data



Los datos de la Fig. 10 representan el histograma de la magnitud del conjunto de datos de la Fig. 9. La media experimental es $\hat{x} = 1,35$ grados y la mediana experimental $\bar{x} = 1,0$ grados. La desviación típica experimental es $\hat{\sigma} = 1,106$ grados. El valor eficaz se mantiene sin cambios: $\Delta DF_{rms} = 1,775$.

Los datos recogidos en los entornos de tipo 2 y 3 pueden analizarse de forma similar.

Una vez excluidos los datos atípicos utilizando la ecuación (3), puede elaborarse el histograma de la magnitud de ΔDF , aplicando el método de Sturges (ecuación (5)).

$$\text{Número de sectores} = 1 + 3,322 \text{ Log}(k) \tag{5}$$

donde k es el tamaño del conjunto de datos.

Los valores experimentales de la media, la mediana y la desviación típica para cada combinación de entorno/frecuencia/modulación/SNR/condiciones meteorológicas (véase el Cuadro 4), pueden utilizarse para describir mediante un método cuantitativo la calidad de funcionamiento del «radiogoniómetro móvil» para esa combinación de parámetros operativos.

CUADRO 4

Cuadro de análisis del conjunto de datos

Radio-goniómetro	Condiciones operativas					Resultados			
	Entorno	Frecuencia	Modulación	SNR máxima	Meteorología	\hat{x}	\bar{x}	$\hat{\sigma}$	Valor eficaz

La mejor calidad de funcionamiento sería la que tuviera la media ΔDF más baja y la menor desviación típica (el error aleatorio muestra una dispersión estrecha).

Al trazar en el mismo eje X-Y los histogramas de diferentes conjuntos de datos $|\Delta DF|$ correspondientes al comportamiento de un «radiogoniómetro móvil» en diferentes entornos y para variaciones de los parámetros operativos (frecuencia, modulación, SNR, etc.) el usuario puede tener una visualización más completa de la calidad de funcionamiento global de un «radiogoniómetro móvil» en condiciones operativas reales.

Una vez finalizado el procedimiento de prueba mediante marcaciones separadas, la administración contratante puede tener la seguridad de que el sistema es operativo, y tener una indicación de la bondad del comportamiento previsible de la configuración a bordo del vehículo en entornos reales.

Adicionalmente, las administraciones pueden evaluar los conjuntos de datos recopilados utilizando herramientas y métodos de análisis estadístico más avanzados a fin de identificar relaciones más complejas entre la calidad de funcionamiento y las diferentes variables (el entorno, las bandas de frecuencia, etc.) y en la intensidad con la que estas variables influyen en la calidad de funcionamiento.

4 Informe de resultados

El informe de evaluación final debe incluir:

- 1) Todos los valores de las condiciones y parámetros de las pruebas de cada medición, tal como se describe en la sección correspondiente, es decir:
 - tipo de entorno
 - condiciones meteorológicas
 - ubicación del objetivo
 - emplazamiento de la medición
 - frecuencia/modulación/SNR.
 - 2) Los resultados de cada tipo de medición:
 - I) Evaluación del modo de radiorrecalada
 - a) Radiorrecalada en una ruta predefinida:
 - Cuadro 1 – Resultados de «Radiorrecalada en ruta predefinida»
 - Valor eficaz (RMS) del error de posicionamiento
 - Capturas de pantalla del software de determinación de la posición
 - Imágenes de satélite de la zona de la prueba.
 - b) Determinación de la posición del objetivo
 - b1) Triangulación basada en tres puntos:
 - Polígono de triangulación creado a partir de estimaciones individuales del ángulo de llegada en un mapa
 - El área del polígono, en (m²), siempre que incluya el objetivo (véase la Fig. 3).
 - b2) Radiorrecalada a ciegas:
 - Capturas de pantalla del software o del video de determinación de la posición del proceso de radiorrecalada a ciegas
 - Representación sobre un mapa de la ruta seguida por el «radiogoniómetro móvil»
 - Cuadro 2 – Resultados de la «radiorrecalada a ciegas».
 - II) Evaluación del modo de marcaciones separadas
 - Cuadro 3 – Cuadro con ejemplos de datos de prueba, para cada conjunto de parámetros operativos
 - Evaluación estadística del comportamiento en espacio abierto
 - Imágenes de satélite de la zona de la prueba
 - Cuadro 4 – Cuadro de análisis del conjunto de datos
 - Histograma de los valores de ΔDF y $|\Delta DF|$ para cada conjunto de parámetros operativos.
-