

Universidad de Málaga

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación



TESIS DOCTORAL

Técnicas Avanzadas de Geolocalización en
Redes UMTS

Autor:

Juan Antonio García Fernández

Directores:

Mariano Fernández Navarro

Antonio Jurado Navas

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Reunido el tribunal examinador en el día de la fecha, constituido por:

Presidente: Dr D. _____

Secretario: Dr D. _____

Vocal: Dr D. _____

para juzgar la Tesis Doctoral titulada **Técnicas avanzadas de geolocalización en redes UMTS** realizada por D. Juan Antonio García Fernández y dirigida por el Dr. D. Mariano Fernández Navarro y el Dr. D. Antonio Jurado Navas, acordó por

otorgar la calificación de

y, para que conste, se extiende firmada por los componentes del tribunal la presente diligencia

Málaga, a _____ de _____ de _____

El/La Presidente/a

El/La Vocal

El/La Secretario/a

Fdo.: _____ Fdo.: _____ Fdo.: _____

No he fracasado. He encontrado diez mil formas que no funcionan.

Thomas Edison

El cerebro no es un vaso por llenar, sino una lámpara por encender.

Albert Einstein

La creatividad es inteligencia divirtiéndose.

Albert Einstein

Agradecimientos

Había un filósofo griego llamado Sócrates que decía: "Solo sé que no sé nada". Probablemente sea cierto. Vivimos en un mundo, una sociedad, en el que se puede mejorar lo poco que se sabe y, por supuesto, se intenta aprender lo mucho que queda por conocer. Sin embargo, y a riesgo de parecer engreído, hay una cosa que yo sé a ciencia cierta. Esta tesis. Este trabajo de años de duración. Esta travesía, en ocasiones tan ardua, en ocasiones tan atractiva. En definitiva, este pellizco de conocimiento, y siendo un poco atrevido, innovación, ha sido sola y exclusivamente posible gracias a la ayuda y el apoyo de muchas personas.

Me gustaría empezar por mis directores, Mariano y Antonio. Ellos han sido la referencia y el faro que siempre han alumbrado el camino. Ya no solo en la parte técnica, donde son fueros de serie, sino también en la parte personal, donde me han demostrado que trabajar bien acompañado es un factor clave para el éxito. Por tanto, no puedo más que agradecerles todo lo que han hecho por mí a lo largo de estos años. Muchas gracias a los dos.

En segundo lugar, quiero agradecer a Ericsson y a los compañeros que trabajan allí toda el ayuda que me han prestado. Consejos, datos, opiniones, críticas constructivas, todo ha sido una fuente de información fundamental para sacar el trabajo adelante. En especial, tengo que destacar a Carlos Úbeda. Carlos puso los cimientos de la geolocalización, pero no solo eso, sino que además ha sido un pilar básico en gran parte del desarrollo de esta tesis. Tampoco puedo dejar de nombrar a Rafa García, José Carvajal, Gonzalo Jiménez, José Molina, María José, Nikola o Rosa Chavez. Todos ellos han aportado su grano de arena, enriqueciendo el resultado final de la investigación.

Si ahora giro la cabeza y echo la vista atrás, es de justicia dar también las gracias a todos aquellos maestros, profesores y amigos que, ya sea en el pasado lejano, o sea en el pasado reciente, han contribuido a forjar el tipo de persona en el que me he convertido. Ese conocimiento, esas inquietudes y esas experiencias, enseñadas o compartidas, han hecho de mí una persona con ganas de seguir aprendiendo, y han sentado las bases para que pueda ser capaz de realizar una tesis doctoral.

Otra piedra angular, pero esta vez en el terreno personal, mi familia. Mis padres, M^a Carmen y Juan Antonio, mi hermano Álvaro, mis abuelos y el resto de mis seres más allegados han girado en torno a mí todo este tiempo. Ese movimiento giroscópico ha generado el sostén y el ánimo que han consolidado las alegrías y barrido las decepciones. Ellos me han librado de cargas, me han allanado el camino y han permitido que la meta siempre se viera en el horizonte. Principalmente, dar las gracias a mi padre por ser, por decirlo de alguna manera, insistente hasta la saciedad. Su persistencia ha sido el empuje para salir del pantanoso barro en más de una ocasión.

Por último, pero por todo. Por ser la motivación detrás de cada letra, de cada número y de cada figura. Por ser mi investigación con mejor resultado. Muchas gracias Elena.

Índice

Resumen	vii
Abstract	ix
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xiii
Índice de algoritmos	xv
Acrónimos	xvii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.1.1. Comunicaciones Móviles	2
1.1.2. Terminales Móviles	4
1.1.3. Localización	6
1.1.3.1. Servicios	6
1.1.3.2. Gestión, planificación y optimización de la red móvil . . .	8
1.2. Principales objetivos de la tesis	10
1.3. Estructura de la tesis	10
1.4. Publicaciones	11
2. Geolocalización Híbrida	13
2.1. Introducción	13
2.1.1. Técnicas basadas en la red	13
2.1.1.1. Cell ID	14
2.1.1.2. Ángulo de llegada (AOA)	14
2.1.1.3. Tiempo de llegada (TOA)	15
2.1.1.4. Diferencia de tiempos de llegada (TDOA)	16
2.1.1.5. TDOA en el enlace ascendente (U-TDOA)	17
2.1.1.6. Huella multitrayecto (MF)	18
2.1.2. Técnicas basadas en el terminal móvil	18
2.1.2.1. Sistema de posicionamiento global (GPS)	18
2.1.2.2. GPS Asistido (A-GPS)	19
2.1.3. Técnicas asistidas por el terminal móvil	19
2.1.3.1. Intensidad de señal recibida (RSS)	20

2.1.3.2.	Correlación de la señal piloto (PCM)	20
2.1.3.3.	TDOA en el enlace descendente (OTDOA)	21
2.1.4.	Tabla comparativa	22
2.1.5.	Métodos híbridos en la bibliografía	22
2.2.	Datos de entrada	23
2.2.1.	Trazas	23
2.2.1.1.	NBAP Radio Link Setup Request - Propagation Delay	24
2.2.1.2.	RRC Measurement Report	27
2.2.1.3.	Otros parámetros de interés	28
2.2.2.	Clutter	29
2.2.3.	Datos físicos de las estaciones base	29
2.3.	Descripción e implementación del método híbrido	31
2.3.1.	Esquema general	31
2.3.1.1.	Implementación	32
2.3.2.	Procesos para los Datos de Entrada	32
2.3.2.1.	Sectores físicos	32
2.3.2.2.	Eventos MR y PD	33
2.3.2.3.	Mapa y clutter	34
2.3.2.4.	Predicciones de señal generadas en ECO	35
2.3.3.	Preprocesos	36
2.3.3.1.	Estimación analítica del nivel de señal	36
2.3.3.2.	Distancia inter-site	39
2.3.3.3.	Área de cobertura por sector	40
2.3.4.	Geolocalización	41
2.3.4.1.	Measurement Report (MR)	41
2.3.4.2.	Filtro de suavizado (Smoother)	48
2.3.4.3.	Ajuste de eventos MR mediante los valores de PD	49
2.3.4.4.	Posicionamiento de los eventos Propagation Delay (PD)	51
2.3.5.	Postprocesos	51
2.3.5.1.	Discretización	51
2.3.5.2.	Ajuste por clutter	52
2.3.5.3.	Generación de mapas	53
2.3.5.4.	Interpolación de píxeles	54
2.4.	Resultados	55
2.4.1.	Métrica fuzzy	56
2.4.2.	Drive test	56
2.4.3.	Norte de Europa	57
2.4.4.	Drive test realizado en Málaga	58
2.4.5.	Sudamérica	62
2.4.6.	Asia occidental	66
2.5.	Conclusiones	69

3. Geolocalización Hiperbólica	73
3.1. Introducción	74
3.1.1. Estado de la técnica	74
3.2. Multilateración hiperbólica basada en OTDOA	77
3.2.1. Procedimiento OTDOA básico	77
3.2.2. RRC Measurement Report - Parámetro T_m	77
3.2.3. Multilateración en redes asíncronas	79
3.2.4. Sistema de ecuaciones no lineal	81
3.3. Métodos numéricos	84
3.3.1. Linealización	84
3.3.2. Gauss-Newton	86
3.3.3. Levenberg-Marquardt	87
3.3.4. Levenberg-Marquardt modificado	88
3.4. Configuración en estrella	91
3.4.1. Definición de estrella	93
3.4.2. Características de la geometría en estrella	95
3.4.2.1. Impacto de la proporción entre la distancia mínima y máxima	95
3.4.2.2. Robustez frente a las semillas iniciales	96
3.4.2.3. Efecto de la resolución del parámetro T_M	96
3.4.3. Rango de las diferencias de pendientes	98
3.4.3.1. Definición analítica	99
3.4.3.2. Evaluación general sobre diversas distribuciones espaciales de sites	100
3.4.3.3. Análisis de zonas con un rango alto	102
3.4.3.4. Análisis de zonas con un rango bajo	106
3.4.4. Resultados	112
3.5. Herramienta de geolocalización hiperbólica	113
3.5.1. Concepto de banda	113
3.5.2. División de escenarios	114
3.5.3. Funciones de filtrado	116
3.5.3.1. Filtrado de eventos	116
3.5.3.2. Filtrado de escenarios	116
3.5.4. Cálculo de las semillas iniciales	117
3.5.5. Redundancia con combinaciones de 3 sites	118
3.5.6. Sincronización de los Nodos B	119
3.5.7. Implementación	119
3.6. Resultados	120
3.6.1. Escenarios sintéticos	120
3.6.2. Región de Europa	123
3.6.2.1. Primer ROP: 09:45 - 10:00	123
3.6.2.2. Segundo ROP: 10:00 - 10:15	126
3.6.2.3. Tercer ROP: 10:15 - 10:30	127
3.6.2.4. Cuarto ROP: 10:30 - 10:45	128

3.6.3. Región de Norteamérica	129
3.7. Conclusiones	131
4. Corrección de la Geolocalización mediante Intervalos de Confianza	135
4.1. Introducción	135
4.1.1. Estado de la técnica	136
4.2. Intervalos de confianza	137
4.2.1. Conceptos básicos	138
4.2.2. Centroide	138
4.2.3. Medidas temporales	141
4.2.4. Multilateración	144
4.2.5. Ángulo de llegada	149
4.3. Compresor	151
4.3.1. Ancla Virtual	152
4.3.2. Comprimir eventos	153
4.4. Resultados	155
4.5. Conclusiones	161
5. Conclusiones	163
5.1. Principales contribuciones	163
5.2. Líneas futuras	166
Bibliografía	167

Resumen

Las redes de comunicaciones móviles han evolucionado a un ritmo exponencial a lo largo de los últimos años. Este crecimiento ha acentuado la necesidad de disponer de herramientas que ayuden a la detección de problemas (*troubleshooting*), a la optimización y a la monitorización de estas redes. En este contexto es donde entran en juego los mapas geolocalizados, ya que ofrecen una manera sencilla, eficaz y visual de llevar a cabo estas tareas, además de proporcionar una alternativa de bajo coste a los *drive tests*. De este modo, y a partir de las trazas de las llamadas de los usuarios (*call traces*), surge la posibilidad de emplear diversas técnicas de geolocalización para estimar la posición de los eventos reportados por el dispositivo móvil. Naturalmente, las dos cuestiones más críticas para este enfoque son la precisión punto a punto y la calidad visual de los mapas.

En esta tesis se analizan y desarrollan varios algoritmos avanzados de geolocalización para redes UMTS, aunque gran parte de los mismos pueden ser fácilmente extrapolados a redes LTE. Estos algoritmos se implementan dentro de herramientas autónomas para ser, posteriormente, evaluados y verificados mediante datos reales provenientes de redes móviles actualmente en servicio. La utilización de datos reales es un aspecto clave, puesto que proporciona una alta fiabilidad y robustez a los resultados y conclusiones extraídos.

En primer lugar, se desarrolla una herramienta híbrida de geolocalización que combina diversos algoritmos y fuentes de información con el objetivo de establecer un compromiso entre mapas geolocalizados poblados y realistas, y una buena precisión punto a punto. Se definen un conjunto de procesos secuenciales que van introduciendo y combinando medidas de nivel de señal, medidas temporales, parámetros del Nodo B servidor y de los Nodos B vecinos, predicciones de señal, e incluso datos geográficos del terreno y el entorno. El resultado final es la posibilidad de generar mapas, por ejemplo de señal o de mejor celda servidora, que ofrecen gran cohesión y coherencia visual, además de una mejora de precisión gracias a la combinación de diferentes estrategias.

En segunda instancia, se presenta una herramienta basada en la multilateración hiperbólica u OTDOA (*Observed Time Difference of Arrival*) para estimar, conjuntamente, tanto la posición de los usuarios como la diferencia de sincronización entre los Nodos B. Para ello, y a partir de los eventos *Measurement Report* que reportan el parámetro T_M , esta técnica resuelve un problema de estimación de mínimos cuadrados no lineal a través de un método numérico iterativo. En particular, se analizan y comparan los métodos de Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt y un nuevo Levenberg-Marquardt modificado surgido de este trabajo. Asimismo, se plantea una geometría espacial de cuatro sites, la configuración en estrella, que evita la aparición de mínimos locales. Como resultado, las modificaciones propuestas incrementan la precisión implícita en OTDOA, proporcionan rápida convergencia y alta ro-

bustez, y reducen el coste monetario general del método al no requerir de sistemas externos, tales como los LMUs, que recuperen previamente la sincronización.

Finalmente, se detalla una técnica de compresión para ajustar de manera inteligente las posiciones estimadas de cualquier usuario dadas por diferentes estrategias de geolocalización, por ejemplo basadas en OTDOA, ángulo de llegada (AOA) o retardo de propagación (PD). La idea se centra en subir un nivel de abstracción, pasando de los eventos como entes independientes a los eventos que conforman una llamada, distinguiendo también si éstas son estáticas o dinámicas. En concreto, el método propuesto desplaza las posiciones hacia un ancla virtual calculada previamente según las áreas de confianza al 95 % de cada evento geolocalizado. A su vez, estas regiones de confianza son computadas con simuladores en función de diversos parámetros de la red móvil y del propio evento. De este modo, se logra una notable mejora de precisión y mitigar los efectos adversos de distintas fuente de error, como puede ser el multitrayecto.

Abstract

Mobile communication networks have evolved exponentially over recent years. This growing has highlighted the need of having tools that help us to do troubleshooting, optimization and monitoring of the performance of these networks. In such a context, geolocated maps play a fundamental role as they provide a simple, efficient and visual manner to fulfill these tasks as well as offering a low cost alternative to drive tests. Under these circumstances, and from call traces, comes the possibility of utilizing different geolocation techniques to estimate the positions of the events reported by the User Equipments (UEs). Naturally, the two most important issues for this approach are the accuracy point-to-point and the visual quality of the maps.

The goal of this PhD is to analyze and develop several advanced geolocation algorithms for UMTS networks, but most of them can be easily extrapolate to LTE networks. These algorithms are implemented into stand-alone tools with the aim of further testing through real data coming from real networks currently in operation. The use of real data is a key factor, since provides high robustness and reliability to results and conclusions drawn in this work.

First of all, a hybrid geolocation tool which combines various algorithms and source of information is developed. Its main objective is to establish a trade-off between populated and realistic geolocated maps, and a proper point-to-point accuracy. A set of sequential processes are defined in order to gradually introduce and combine signal level measurements, time measurements, parameters of the server and neighbors Node Bs, signal propagation predictions, and even geographical data known as clutters. The final outcome is the capability of generating maps, for instance, RSCP or best server maps, providing great visual coherence and cohesion, in addition to an accuracy improvement due to the combination of different strategies.

In the second instance, a new tool based on Observed Time Difference of Arrival (OT-DOA) technique is presented in order to jointly estimate both the position of the different UEs and the Relative Time Differences (RTDs) between Node Bs in real UMTS networks. For this purpose, and employing the parameter T_M provided by the events Measurement Report, this method results in a non-linear least squares estimation problem which is solved by employing an iterative method. In particular, a comparative between the well-known Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt and a proposed modified version of Levenverg-Marquardt algorithms is carried out. In addition, an optimal spatial geometry, the star-topology, for the Node B stations involved in such an iterative method is analyzed for avoiding the appearance of local minima. As a result, all modifications proposed increase the inherent accuracy

while maintaining a fast convergence and a high robustness, apart from preventing the cost of deploying external system to recover the synchronization, such as LMUs.

Finally, a technique for compressing and adjusting in a smart manner the position estimates of any UE given by different geolocation/positioning methods in a mobile communication network based on different strategies (OTDOA, Angle of Arrivals - AoA, Propagation Delay - PD ...) is detailed. Accordingly, the basic idea is to move from at event level geolocation to at call level geolocation, and distinguishing whether they are static or dynamic. Concretely, the proposed method forces each position estimate towards a virtual anchor previously calculated from the 95% confidence intervals of every located event. In turn, these confidence regions or error estimates are obtained with simulators which depend on several parameters of the mobile network and the events themselves. The main advantage of this proposal is to improve the accuracy in a remarkable way, and to mitigate the adverse effect of multipath and other sources of errors that induce to inaccuracy in the terminals position estimates.

Índice de figuras

1.1. Pronóstico de la evolución de las suscripciones móviles hasta 2020	2
1.2. Pronóstico de la evolución de las suscripciones móviles clasificadas según las diferentes tecnologías de las comunicaciones móviles	4
1.3. Previsión del mercado de dispositivos que usan la red de comunicaciones móviles divididos por categoría de productos	5
1.4. Evolución del tráfico en las redes de comunicaciones móviles	6
1.5. Ejemplo de mapa de potencia generado por geolocalización mediante la herramienta de Ericsson.	9
2.1. Mejoras sobre el método de posicionamiento Cell ID.	15
2.2. Técnica de posicionamiento por ángulo de llegada.	15
2.3. Técnica de posicionamiento TOA usando la trilateración.	16
2.4. Técnica de posicionamiento TDOA.	17
2.5. Técnica de posicionamiento MF.	18
2.6. Técnica de posicionamiento GPS.	19
2.7. Técnica de posicionamiento A-GPS.	20
2.8. Técnica de posicionamiento RSS usando huellas de potencia.	21
2.9. Establecimiento de un Enlace Radio	25
2.10. Fragmento ASN.1 extraído del <i>NBAP Radio Link Setup Request</i>	26
2.11. Fragmento ASN.1 extraído del <i>RRC Measurement Report</i>	28
2.12. Ejemplo de Clutter	29
2.13. Impacto de la precisión en las coordenadas de los sites.	30
2.14. Diagrama de flujo del método híbrido	31
2.15. Archivo CSV con sectores físicos.	32
2.16. Archivo CSV con eventos MR.	33
2.17. Archivo CSV con información del clutter.	34
2.18. RSCP estimado en una red real.	39
2.19. Zona de cobertura de un sector.	40
2.20. Situación adversa para el centroide.	43
2.21. Procedimiento de geolocalización basado en azimut.	44
2.22. Geolocalización basada en el nivel de señal	45
2.23. Ventana temporal adaptativa del smoother.	48
2.24. Uso del PD para refinar la posición del MR.	50
2.25. Corrección de la posición de MRs sin PD asignado.	50
2.26. Geolocalización de eventos PD.	51
2.27. Ajuste por tipo de clutter.	53

2.28. Interpolación de píxeles.	55
2.29. CDFs del error de distancia para el escenario del norte de Europa.	58
2.30. Comparación de las posiciones reales y geolocalizadas sobre el clutter de la zona del norte de Europa.	59
2.31. Acercamiento del clutter de la zona del norte de Europa.	59
2.32. G-Net Track	60
2.33. Recorrido del <i>drive test</i> de Málaga.	61
2.34. Ráster <i>best server</i> en Málaga.	62
2.35. CDFs del error de distancia para el escenario de Málaga.	63
2.36. Métrica <i>fuzzy</i> para el escenario de Málaga.	63
2.37. Clutter del escenario de Sudamérica.	65
2.38. Métrica <i>fuzzy</i> para el escenario de Sudamérica.	65
2.39. Rásters <i>best server</i> y de nivel de señal en Sudamérica.	67
2.40. Rásters <i>best server</i> y de nivel de señal en Asia.	68
2.41. Clutter del escenario de Asia.	69
2.42. Métrica <i>fuzzy</i> para el escenario de Asia.	70
3.1. Periodos inactivos en OTDOA.	75
3.2. Parámetro T_M reportado en ASN.1 dentro del <i>Measurement Report</i>	78
3.3. Multilateración hiperbólica en una red asíncrona - Hipérbolas.	80
3.4. Multilateración hiperbólica en una red asíncrona - RTDs.	80
3.5. Interpretación de la diferencia de parámetros T_m	82
3.6. Mejora lograda en LM mediante el parámetro α	90
3.7. Ejemplos de malas geometrías que forman mínimos locales.	91
3.8. Configuraciones en estrella en escenarios reales.	92
3.9. Configuración en estrella genérica.	93
3.10. Efecto de las distancias entre sites en un escenario con geometría en estrella.	94
3.11. Robustez contra mínimos locales cambiando la semilla inicial.	97
3.12. Efecto del redondeo del parámetro T_M en la geometría en estrella.	98
3.13. Rotación de los ejes de coordenadas x e y	99
3.14. Ejemplo de las diferencias de pendientes de tres hipérbolas.	101
3.15. Evaluación del rango de diferencias de pendientes en distintas distribuciones espaciales de sites.	102
3.16. Escenario de 1000 eventos reportando cuatro sites dispuestos en cuadrado.	103
3.17. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en línea.	104
3.18. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en cuadrado para un rango alto de diferencias de pendientes.	104
3.19. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en estrella para un rango alto de diferencias de pendientes.	105
3.20. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en T para un rango alto de diferencias de pendientes.	106
3.21. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en cuadrado para un rango bajo de diferencias de pendientes (Caso 1).	107

3.22. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en cuadrado para un rango bajo de diferencias de pendientes (Caso 2).	108
3.23. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en T para un rango bajo de diferencias de pendientes (Caso 1).	109
3.24. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en T para un rango bajo de diferencias de pendientes (Caso 2).	110
3.25. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en estrella para un rango bajo de diferencias de pendientes (Caso 1).	111
3.26. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en estrella para un rango bajo de diferencias de pendientes (Caso 2).	111
3.27. Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en estrella para un rango bajo de diferencias de pendientes (Caso 3).	112
3.28. CDFs del error cometido en escenarios simulados con diferentes topologías.	113
3.29. Definición de banda.	114
3.30. Selección de sites vecinos.	116
3.31. Problema de estimación de la RTD inicial.	118
3.32. Escenario OTDOA sintético resuelto mediante Gauss-Newton.	121
3.33. Escenario OTDOA sintético resuelto mediante Levenberg-Marquardt.	122
3.34. CDF del error de distancia correspondiente al primer ROP del set de datos de Europa.	124
3.35. CDF del error de distancia correspondiente al primer ROP del set de datos de Europa en el caso de eventos que reportan solamente 3 sites.	125
3.36. Geolocalización representada sobre Google Earth para un escenario real suburbano de Europa.	126
3.37. CDF del error de distancia correspondiente al tercer ROP del set de datos de Europa.	127
3.38. CDF del error de distancia correspondiente al cuarto ROP del set de datos de Europa.	128
3.39. CDF del error de distancia correspondiente al set de datos de Norteamérica.	129
3.40. CDF del error de distancia correspondiente al set de datos de Norteamérica en el caso de eventos que reportan solamente 3 sites.	130
3.41. Geolocalización representada sobre Google Earth para un escenario real suburbano de Norteamérica.	131
4.1. Intervalo de confianza al 95 % para la distribución Normal.	139
4.2. Ejemplo del intervalo de confianza para el centroide.	141
4.3. Distribuciones de probabilidad para posicionar un evento con medidas temporales.	142
4.4. Simulación de eventos PD virtuales.	143
4.5. Polígono formado por los sites reportados.	145
4.6. Escenario hexagonal de referencia para hallar el IC de la multilateración.	145
4.7. Escenario sintético para aplicar la multilateración.	146
4.8. Método AOA cuando se emplean medidas de sectores del mismo site.	150
4.9. Ajuste de la posición si el ancla virtual está en el IC.	154

4.10. Ajuste de la posición si el ancla virtual está fuera del IC.	154
4.11. Funcionamiento teórico del compresor.	154
4.12. Funcionamiento del compresor en una simulación de MATLAB.	155
4.13. Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método del centroide.	157
4.14. Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método del propagation delay.	157
4.15. Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método del timing advance.	158
4.16. Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método del ángulo de llegada.	158
4.17. Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método hiperbólico en una red síncrona.	159
4.18. Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método hiperbólico en una red asíncrona.	159
4.19. CDFs del error cometido al geolocalizar antes y después de aplicar el compresor en una red 3G.	160
4.20. CDFs del error cometido al geolocalizar antes y después de aplicar el compresor sobre llamadas estáticas en una red LTE.	161

Índice de tablas

1.1. Actividades realizadas con un teléfono móvil.	7
2.1. Comparativa entre los métodos de posicionamiento.	22
2.2. Relación entre las magnitudes del Propagation Delay	26
2.3. Relación entre el CPICH RSCP reportado y el medido	27
2.4. Constante A en la variante de Okumura-Hata propuesta por Ericsson.	37
2.5. Propiedades del clutter del escenario de Sudamérica	64
3.1. Comparativa de los métodos numéricos en escenarios sintéticos.	122
4.1. Valores de probabilidad asociados a la distribución T de Student unilateral. .	140
4.2. Extracto de la tabla de búsqueda que asocia valores de PD, BW y tiempo transcurrido con su correspondiente intervalo de confianza al 95 %.	144
4.3. Extracto de la tabla de búsqueda del intervalo de confianza para la multila- teración hiperbólica en redes asíncronas.	147
4.4. Extracto de la tabla de búsqueda del intervalo de confianza para la multila- teración hiperbólica en redes síncronas.	148
4.5. Extracto de la tabla de búsqueda del intervalo de confianza para el método del ángulo de llegada.	151
4.6. Comparativa de métodos para obtener el ancla virtual.	153
4.7. Comparativa entre los intervalos de confianza calculados y los errores reales cometidos en diferentes métodos de geolocalización.	156

Índice de algoritmos

2.1. Cálculo de la distancia inter-site.	40
2.2. Definir la zona de cobertura por sector	41
2.3. Procedimiento de geolocalización basado en el azimut.	43
2.4. Geolocalización basada en el nivel de señal.	45
2.5. Combinación de procedimientos para localizar un MR.	47
2.6. Generación de rásters.	54
3.1. Levenverg-Marquardt modificado.	89

Acrónimos

2G	Segunda Generación de comunicaciones móviles
3G	Tercera Generación de comunicaciones móviles
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Cuarta Generación de comunicaciones móviles
A-GPS	<i>Assisted-GPS</i> es una versión mejorada del GPS que usa un servidor externo para obtener información.
AOA	<i>Angle Of Arrival</i> es un método de localización basado en la medida de ángulos.
AS	Active Set
ASN.1	Abstract Syntax Notation One
BW	BeamWidth
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CHR	Call History Recording
CPICH	<i>Common Pilot Channel</i> es el canal encargado de transmitir una portadora que es usada para estimar los parámetros del canal.
DCM	Database Correlation Method
DL	DownLink
DPCH	Dedicated Physical Channel
ECO	Ericsson Cell Optimizer
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
FBR	Front to Back Ratio

FDD	Frequency Division Duplex
GN	Gauss-Newton
GPEH	General Performance Event Handling
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Abreviación de <i>Global System for Mobile communications</i> . Es el estándar europeo de telefonía móvil de segunda generación (2G).
HO	Abreviación de <i>handover</i> , que es un procedimiento para transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones.
HPBW	Half Power BeamWidth
HSPA	High Speed Packet Access
IC	Intervalo de Confianza
IDC	International Data Corporation
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IPDL-OTDOA	Idle Periods Downlink OTDOA
Iu	Interfaz que se encuentra entre UTRAN y la Red Central.
Iub	Interfaz entre la RNC y un Nodo B.
KPI	Key Performance Indicator
LAC	Location Area Code
LANM	<i>Location-Aided Planning</i> consiste en usar la localización geográfica de los dispositivos móviles para generar planes de red alternativos según el tráfico.
LAP	<i>Location-Aided Planning</i> consiste en usar la localización geográfica de los dispositivos móviles para generar planes de red alternativos según el tráfico.
LBS	Location Based Services
LM	Levenberg-Marquardt

LMU	Abreviación de <i>Location Measurement Unit</i> . Elementos de la red que actúan como balizas de referencia con el objetivo de estimar el offset en el tiempo de transmisión entre dos estaciones bases, es decir, la sincronización entre dos Nodos B.
LOS	Abreviación de <i>Line Of Sight</i> . Hace referencia al caso en el que no hay obstáculos entre emisor y receptor, es decir, hay visibilidad directa.
LTE	Long Term Evolution
MF	<i>Multipath Fingerprint</i> es un método de posicionamiento basado en las señales multitrayecto que llegan a una estación base.
NBAP	Node B Application Part
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSS	Operation Support System
OTDOA	Observed Time Difference of Arrival
P-CCPCH	Primary Physical Common Control Channel
PCAP	Positioning Calculation Application Part
PCM	<i>Pilot Correlation Method</i> es una estrategia de posicionamiento basada en la comparación de medidas de potencia con mapas de potencia previamente generados.
PD	Propagation Delay
RANAP	Radio Access Network Application Part
RF	Radio Frequency
RNC	Radio Network Controller
RNSAP	Radio Network Subsystem Application Part
ROP	Result Output Period
RRC	Radio Resource Control
RSCP	Received Signal Code Power
RSS	Received Signal Strength
RTD	Relative Time Difference

RTT	<i>Round Trip Time</i> se refiere al tiempo que tarda una trama enviada desde un Nodo B en volver a este mismo habiendo pasado por el UE al que iba destinada.
SABP	Service Area Broadcast Protocol
SC	Scrambling Code
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCH	Synchronization Channel
SD	<i>Steepest Descent</i> es un método que realiza una búsqueda de la solución moviéndose por la superficie de error en el sentido negativo del gradiente.
SHO	Abreviación de <i>Soft Handover</i> . Procedimiento de HO en el que el terminal puede estar conectado simultáneamente a más de una estación base para mitigar los efectos del traspaso de celda.
SLL	Side Lobe Level
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	<i>Time Difference Of Arrival</i> es una técnica de posicionamiento que emplea la diferencia de tiempos para generar hipérbolas que permitan aplicar el método de multilateración.
TOA	<i>Time Of Arrival</i> es un método de posicionamiento que mide los tiempos de llegada de las señales para ubicar la posición del dispositivo en circunferencias.
TPS	Trace Processing Server
U-TDOA	<i>Uplink-TDOA</i> es una técnica de posicionamiento basada en TDOA y en el enlace ascendente.
UE	User Equipment
UL	UpLink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

INTRODUCCIÓN

OBSERVA los objetos encima de la mesa a la que estás sentado, palpa el bolsillo de tu pantalón o gira la cabeza hacia tu otra mano. Probablemente durante una de estas acciones te habrás encontrado con uno o con varios *smartphones*, sino es así, te acabas de dar cuenta de que lo has olvidado en algún lugar y te dispones a recuperarlo apresuradamente. Corre, a saber el abrumador número de nuevas notificaciones que te vas a encontrar; porque no nos engañemos, somos esclavos de estos dispositivos que parecen salidos de una novela de Isaac Asimov. De hecho, según IDC (*International Data Corporation*), desde 2011 se venden más *smartphones* que ordenadores, y la tendencia parece indicar que las diferencias de ventas seguirán aumentando.

Hoy en día, un *smartphone* contiene más información sobre ti de la que tú mismo eres capaz de memorizar o recordar. Un *smartphone* ofrece tantas facilidades que la vida anterior a su existencia parece un susurro que se ha ido llevando el viento con el paso de los años. Un *smartphone* se ha convertido en una especie de apéndice del ser humano derivado del proceso evolutivo que formuló Darwin. Un *smartphone* es la navaja suiza del siglo XXI. Pero, sobre todo, un *smartphone* y todo lo que le rodea es la máxima expresión de la ingeniería, lo más cercano a la verdadera magia que podemos experimentar actualmente. Un objeto del tamaño de una cartera que es capaz de albergar un GPS, una cámara, una videoconsola, un teléfono, una brújula, un reproductor de vídeo... De brujería lo hubieran catalogado hace algunos siglos, cuando en realidad es tan simple como la suma del trabajo, el esfuerzo, el ingenio y la innovación de millones de ingenieros orientados hacia el mismo fin.

Las comunicaciones móviles han cruzado el umbral que separa lo superfluo de lo necesario para la sociedad y la economía, convirtiéndose en el medio básico de conectividad para usuarios de toda edad y condición. Han transformado el espacio y el tiempo cambiando el contacto directo entre personas de las sociedades tradicionales por un contacto que se expande mas allá de la distancia y el tiempo en la sociedad moderna. Además, la industria de las comunicaciones móviles ha alcanzado un punto de madurez que le permite hacer más accesible esta tecnología y mejorar la calidad y variedad de los servicios ofrecidos.

En definitiva, actualmente se pueden considerar las comunicaciones móviles como las TICs (Tecnologías de la Información y la Comunicación) más demandadas y con mayor auge. Esto las hace ser un tema especialmente atractivo de investigación y estudio para un ingeniero de telecomunicaciones, ya que proporciona una oportunidad de contribuir a la sociedad de manera práctica, significativa e innovadora. De hecho, ha sido el principal motivo que ha dado pie al contenido de esta tesis.

1.1. Motivación

1.1.1. Comunicaciones Móviles

En los últimos 20 años, las comunicaciones móviles han evolucionado a un ritmo mayor del que cualquier gurú en este ámbito podía prever. La conexión de banda ancha desde los dispositivos móviles es en la actualidad accesible para el ciudadano de a pie, jugando un papel fundamental en sus vidas diarias [1].

A fecha de junio del 2015, el último informe de movilidad de Ericsson [2] señala el avasallador avance de la tecnología móvil. Según estos datos, a día de hoy, existen 7200 millones de suscripciones móviles en el mundo, lo que significa que en 2016 el número total de suscripciones móviles superará la población mundial. La Fig. 1.1 muestra el crecimiento aproximadamente exponencial de suscripciones de banda ancha móvil que se espera para 2020, en contraste con la estacionariedad de las suscripciones en la banda ancha fija. Asimismo, cabe destacar que actualmente el número de usuarios de banda ancha fija es, al menos, tres veces el número de conexiones de banda ancha fija, debido al uso compartido en hogares, empresas y puntos de acceso públicos. La telefonía móvil vive una situación opuesta, puesto que el número de suscripciones excede al de usuarios. En cualquier caso, los pronósticos no hacen más que reforzar la repercusión de las comunicaciones móviles alrededor de todo el mundo.

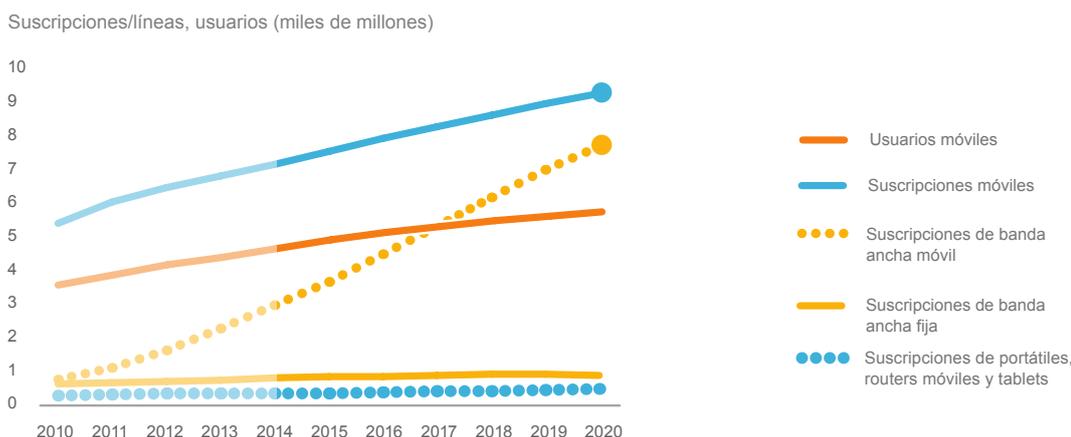


Figura 1.1: Pronóstico de la evolución de las suscripciones móviles hasta 2020 [2].

Hoy por hoy, las tecnologías de comunicaciones móviles se dividen en tres generaciones aceptadas y definidas por el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). La segunda generación (2G) marcó un cambio entre la telefonía móvil analógica y la digital. Destacan tres tecnologías dentro de esta generación, GSM (*Global System for Mobile*) [3], GPRS (*General Packet Radio Service*) [4] y EDGE (*Enhanced Data rates for Global Evolution*) [5]. A las dos últimas se las considera una etapa intermedia entre 2G y 3G, denominándolas comúnmente como tecnologías 2.5G.

La tercera generación (3G) se caracteriza por un incremento del ancho de banda con respecto a 2G, el manejo de datos, la ampliación de la cartera de servicios proporcionados por las operadoras (teleconferencia, televisión, acceso a Internet...) y el ofrecimiento de prestaciones avanzadas como negociación de la calidad de servicio, seguridad o itinerancia mundial. Se basa en la tecnología UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [6], la cual emplea la tecnología de acceso radio conocida como WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) [7]. Posteriormente, surgió una mejora del estándar 3G para la transmisión de datos, HSPA (*High Speed Packet Access*) [8]. De esta forma se alcanzan velocidades superiores de bajada y de subida, teóricamente hasta 14,4 Mbit/s en bajada y 2 Mbit/s en subida. Por supuesto, estos valores dependen siempre del estado o saturación de la red.

Por otro lado, la cuarta generación (4G) dispone de la tecnología LTE (*Long Term Evolution*) [9]. En la actualidad, esta es la tecnología de comunicaciones móviles más puntera, aunque es cierto que su implantación se encuentra todavía en fase inicial. Ni todas las compañías disponen de este tipo de red totalmente desplegada, ni mucho menos todos los terminales son compatibles con la misma. LTE utiliza una interfaz radiolétrica basada en OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para el enlace descendente y SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para el enlace ascendente. Por último, resulta llamativo destacar que ya se ha comenzado a trabajar en la siguiente generación de comunicaciones móviles, la cual, y para no perder la inercia, se ha bautizado como 5G [10]. De hecho, las primeras estimaciones apuntan a que esta evolución tecnológica llegará en el año 2020.

Una vez se tiene esta perspectiva general de las tecnologías actuales, se pretende justificar la elección de la red 3G para la elaboración de esta tesis. Para ello, se presenta la Fig. 1.2, donde se expone la evolución que se espera que sufran las diferentes tecnologías de comunicaciones móviles en los próximos años. Si bien es cierto que en 2014 GSM/EDGE constituyen la mayor parte de las suscripciones móviles, también es cierto que estas tecnologías se encaminan hacia un inexorable y precipitado declive. No obstante, seguirán teniendo cabida en el mercado, ya que es probable que los usuarios de zonas en desarrollo prefieran elegir tecnologías de bajo coste al principio. La otra cara de la moneda es LTE, pues su progresión debería ser claramente ascendente conforme las operadoras vayan desplegando sus redes 4G. Concretamente, Ericsson [2] prevé que el 40% de las suscripciones móviles sean LTE para el año 2020, lo que supone unos 3700 millones de suscripciones. Pero, a pesar de todo esto y volviendo a hacer referencia a la Fig. 1.2, la tecnología líder y con más madurez

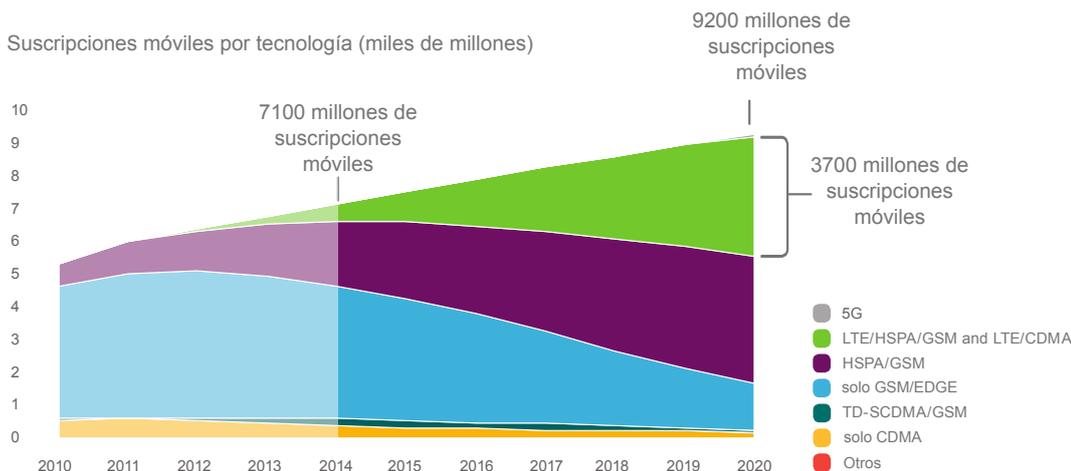


Figura 1.2: Pronóstico de la evolución de las suscripciones móviles clasificadas según las diferentes tecnologías de las comunicaciones móviles [2].

del mercado durante los próximos 6 o 7 años será UMTS. De hecho, las previsiones dicen que 3G acaparará el 40% de las suscripciones móviles en 2020.

Los argumentos esgrimidos en el párrafo anterior justifican la elección de la tecnología UMTS como tecnología principal en la que se basa esta tesis. No obstante, quisiera remarcar que parte de los algoritmos y desarrollos que se han logrado en este trabajo son fácilmente, e incluso directamente, extrapolables a otras tecnologías, tales como 2G y 4G.

1.1.2. Terminales Móviles

Los terminales móviles se han situado en pocos años entre los dispositivos electrónicos de mayor relevancia para la sociedad. Concretamente, esta industria está atravesando un periodo de rápida y constante transformación gracias a la continua aparición de nuevos servicios, aplicaciones y características que dejan obsoletos los terminales en cuestión de meses. Como consecuencia, se está observando un declive de aquellos dispositivos que carecen o tienen limitada la movilidad, véase el ejemplo del PC. Una prueba de esta afirmación queda recogida en el estudio llevado a cabo por el proveedor mundial de inteligencia de mercado IDC, y que se muestra en la Fig. 1.3. En esta figura se observa que el incremento de *smartphones* en el mercado vendrá dado a costa de los PCs, sobre todo de los de escritorio, y que en un futuro a medio-largo plazo no hay señales de que esta tendencia vaya a cambiar.

La disputa entre los principales fabricantes de *smartphones* (Apple, Google y Samsung) es feroz, lo cual se traslada a elevadas inversiones por parte de las compañías con el fin de obtener nuevos e innovadores desarrollos [11]. Igualmente, también se traduce en una guerra de ventas para garantizar productos más competitivos en relación calidad-precio, lo que desemboca finalmente en la disponibilidad de *smartphones* con buenas prestaciones a precios más bajos.

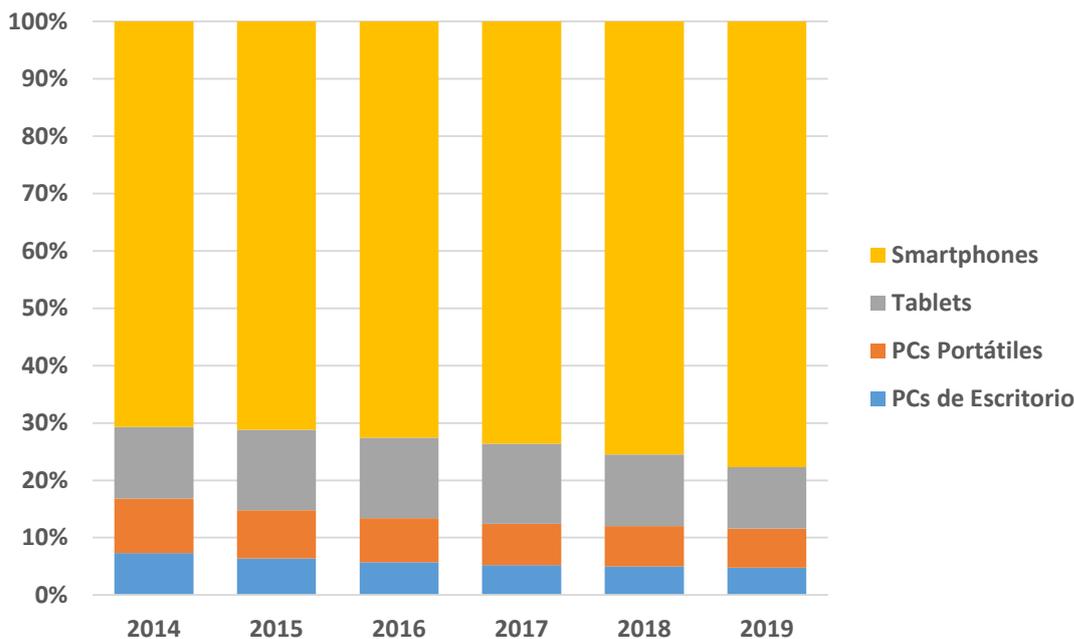


Figura 1.3: Previsión del mercado de dispositivos que usan la red de comunicaciones móviles divididos por categoría de productos [12, 13].

Por supuesto, otra de las consecuencias del incremento de *smartphones* en activo es el incremento del tráfico global en las redes móviles. Y no sólo eso, sino que los terminales van evolucionando incesantemente para soportar cada vez más cantidad y mayor velocidad del tráfico de datos. Entre otros, el iPhone 6, el Samsung Galaxy S6 o el LG Optimus G aseguran ya la compatibilidad con las redes 4G, incitando de esta forma al aumento del consumo de datos por parte de los usuarios. El informe de movilidad de Ericsson de junio de 2015 [2] presenta esta tendencia, tal y como se ha recogido en la Fig. 1.4, la cual está desglosada en trimestres para los años comprendidos entre 2010 y 2015. Sobre todo, destacar el crecimiento exponencial que ha experimentado el tráfico de datos en menos de 5 años.

Al mismo tiempo, otro aspecto que llama la atención de la Fig. 1.4 es el estancamiento que ha experimentado el tráfico de voz, y es que los usuarios gastan cada vez menos minutos de voz mensuales. La razón es que nuestros *smartphones* han llegado a ser dispositivos que integran las funcionalidades y características de otros muchos aparatos electrónicos, ofreciéndonos un sin fin de actividades y posibilidades diferentes a las tradicionales llamadas de voz. En otras palabras, los terminales móviles están reemplazando a dispositivos como la cámara digital, el reproductor de MP3, la tarjeta de crédito o el GPS [14]. De hecho, hay estudios [14, 15] que revelan el uso real que se hace de los terminales móviles, tal y como se observa en la Tabla 1.1.

En definitiva, el salto tecnológico de nuestra generación parece conducirnos a un futuro donde los ciudadanos porten, en todo momento, uno o varios terminales móviles. Terminales

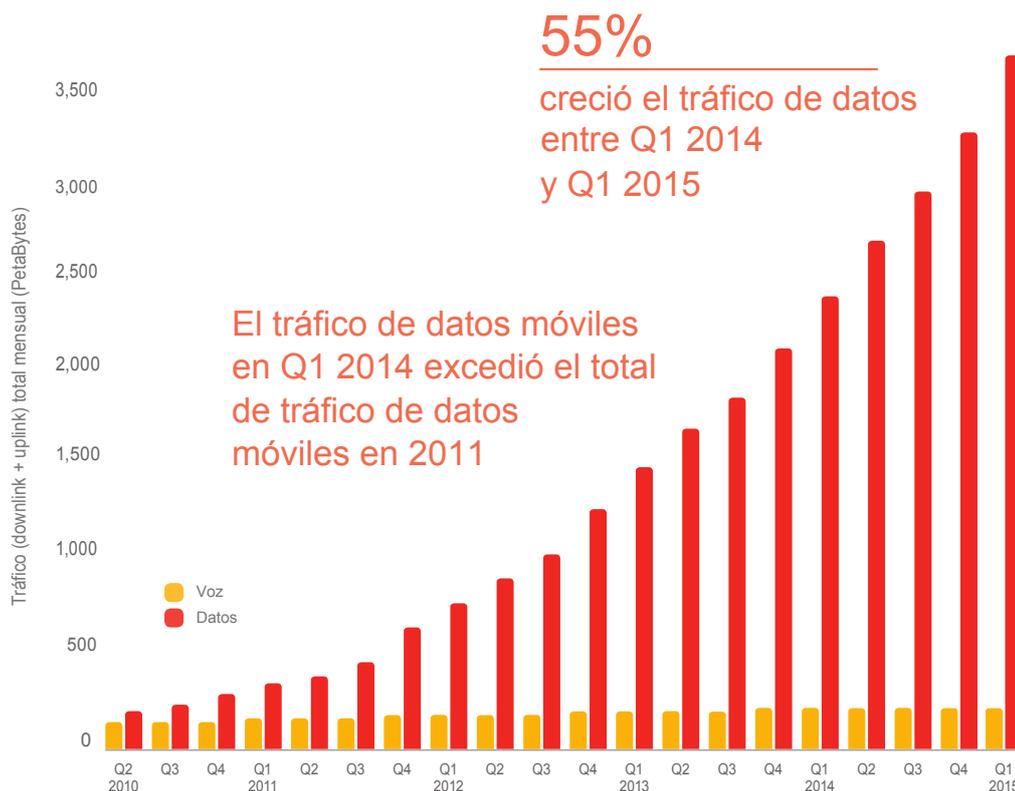


Figura 1.4: Evolución del tráfico en las redes de comunicaciones móviles [2].

que integren cientos de funciones y ofrezcan miles de servicios, muchos de los cuales giran en torno a la localización del usuario.

1.1.3. Localización

1.1.3.1. Servicios

El imponente avance de las comunicaciones móviles unido al desarrollo de nuevas tecnologías de posicionamiento ha definido el marco de los servicios basados en localización (LBS, del inglés *Location Based Services*) [16]. Los LBS para dispositivos móviles involucran la habilidad de estimar su localización geográfica y proveer servicios basados en esta información [17]. Lo más atractivo de estos servicios es que los usuarios no necesitan aportar información manualmente ni contribuir en ningún sentido para ser localizados, todo se lleva a cabo automáticamente a partir de los datos recabados por la red o por la aplicación. Eso sí, para proteger la privacidad e intimidad del cliente existen leyes muy estrictas referentes al tratamiento de la información de localización, tal y como se recoge en las especificaciones del 3GPP [18]. Por tanto, el usuario tiene que dar su permiso y consentimiento para permitir al servicio conocer la localización del dispositivo.

Tabla 1.1: Actividades realizadas con un teléfono móvil.

% de usuarios	Actividad
85	Tomar una foto
81	Enviar o recibir mensajes de texto
60	Escuchar música
52	Enviar y recibir emails
50	Descargar aplicaciones
49	Obtener direcciones, recomendaciones, u otra información basada en la localización
41	Ver vídeos
21	Participar en una vídeo llamada
18	Acceder a la cuenta bancaria online
9	Comprar online

Al principio, los servicios de localización en redes móviles no fueron vistos con fines comerciales, sino como potentes herramientas para localizar llamadas de emergencia y servir de apoyo en tareas de salvamento [19]. Este impulso inicial venía dado por la normativa reglamentaria para las llamadas de emergencia promulgada en 1996 por los Estados Unidos. No obstante, con el paso del tiempo sus ámbitos de aplicación se han multiplicado, tomando carices notoriamente más comerciales. A continuación se expone una clasificación de los LBS más relevantes en la actualidad [16, 20, 21]:

- **Servicios de información o búsqueda de servicios próximos:** es el grupo de aplicaciones más extenso y difundido. La idea consiste en hacer del terminal móvil una especie de guía portable con información del entorno que rodea al usuario en ese momento. Por ejemplo, es posible solicitar la ubicación de determinados servicios en los alrededores (restaurantes, farmacias, gasolineras...) o encontrar otros usuarios móviles (antigua aplicación *Aquí estoy* de Movistar, ahora relevada por el servicio *Movistar Protege*). Además, a veces se puede afinar la petición del cliente correlándola con información dinámica del entorno, tal como el estado del tráfico, la climatología u otros eventos de interés en las cercanías.
- **Navegación:** estos servicios permiten establecer una ruta desde una ubicación inicial hasta una dirección o lugar de destino, es decir, lo que hace el GPS grosso modo.
- **Gestión del transporte y servicios de seguimiento:** la principal utilidad es el control y planificación de una flota de vehículos, ya que se tendría información de la posición y la velocidad de cada uno de ellos en tiempo real. A título de ejemplo, algunas de las aplicaciones son la asignación de taxis, la monitorización de vehículos de emergencia o de transporte de mercancías, o el rastreo de artículos robados. En otras palabras, realizar un seguimiento de entidades con terminales móviles incorporados (usuarios,

camiones, mercancías...), a la vez que se ofrece la posibilidad de informar sobre su progreso o sus cambios de estado en el trayecto.

- **Juegos:** este tipo de aplicación se erige como una de las actividades de ocio que más fascinan a la gente. A diferencia de los clásicos videojuegos de PC, en los juegos basados en la localización la posición que se tiene en el mundo real tiene influencia en el propio desarrollo del juego. El concepto está basado en la combinación de ejercicios al aire libre como esconderse, visitar determinados lugares de una ciudad o buscar tesoros descifrando enigmas. Por supuesto, todo ello mediante la interacción y la comunicación entre los jugadores.
- **Tarificación:** se refiere a la posibilidad de tarificar a los usuarios móviles de forma dinámica según su localización. Por ejemplo, llamadas originadas en las inmediaciones de la línea cableada del hogar del usuario son facturadas como llamadas desde un fijo en vez de llamadas completamente móviles.

1.1.3.2. Gestión, planificación y optimización de la red móvil

La acción de geolocalizar, término que se usará en este trabajo como sinónimo de localizar, tiene otros entornos de aplicabilidad de especial relevancia desde un punto de vista más interno: la gestión, planificación y optimización de la propia red móvil por parte de las operadoras (LANM, del inglés *Location Assisted Network Management*, y LAP, del inglés *Location-Aided Planning*) [22, 23].

Los ingenieros de los operadores de telefonía móvil se apoyan en mapas de tráfico, de cobertura o de otro parámetro de interés para realizar su labor [24]. Estos mapas son generados gracias a la geolocalización de los dispositivos móviles cuya información queda recogida en las trazas recolectadas en las estaciones base. Entre las tareas que son asistidas por los mapas geolocalizados podemos encontrar algunas de notable interés, tales como la localización de fallas dentro del área de cobertura de una estación base, la detección de la trayectoria para planificar el comportamiento óptimo de los HO (*handovers*), el uso de sistemas de cobertura adaptativos o la resolución de problemas (*troubleshooting*).

Empresas reconocidas a nivel mundial están apostando muy fuerte por la geolocalización enfocada a analizar casi cualquier parámetro de la red móvil sin la necesidad de pruebas de campo (*drive test*) y tediosos análisis estadísticos. Algunas de estas empresas son Arieso [25], Newfield Wireless y su herramienta TrueCall [26], Ascom con la familia de productos conocida como TEMS [27], Celcite [28], Plano [24] y Ericsson [29]. Además, en aras de la claridad, en la Fig. 1.5 se muestra como ejemplo uno de estos mapas que nos ofrece la herramienta de Ericsson, y que son usados por los ingenieros para gestionar, planificar y optimizar la red móvil.

Ahora bien, la pregunta que podría surgir a continuación es por qué necesitan las compañías seguir invirtiendo en métodos de geolocalización si la mayoría de los *smartphones* integran ya un GPS. Las respuestas pueden no ser obvias. Por un lado, debido al gran número de terminales móviles que deben localizarse, es esencial que el proceso de geolocalización

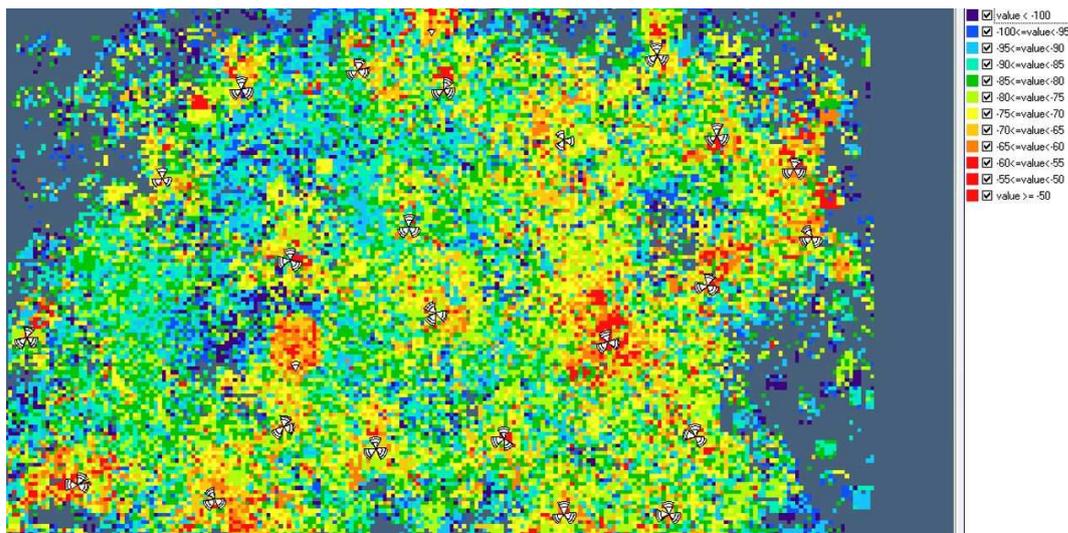


Figura 1.5: Ejemplo de mapa de potencia generado por geolocalización mediante la herramienta de Ericsson.

no cause señalización adicional en la interfaz de aire. Por otro lado, los usuarios no tienen por qué compartir su localización ni dar permiso a las operadoras para acceder a esta información. Pese a que según Oracle [14] los usuarios están ahora más dispuestos a compartir su localización con aplicaciones móviles de lo que lo estaban hace un año y un gran número de ellos están usando sus teléfonos para acceder a la banca online o hacer compras por Internet, las operadoras necesitan geolocalizar a todos los dispositivos móviles activos en la red en tiempo real y sin necesidad del consentimiento de cada usuario. Por tanto, y como se verá en el Capítulo 2, las técnicas de geolocalización deberían ser técnicas basadas en la red y usar medidas reportadas acorde a los estándares. Aunque se comentará más adelante, recalcar que usar el GPS del *smartphone* sería una técnica basada en el terminal móvil.

A continuación, y para concluir esta sección, se expone un ejemplo para ilustrar que la geolocalización para gestión, planificación y optimización de la red no es tan crítica en cuanto a precisión como lo sería uno de los servicios basados en localización comentados en la Sección 1.1.3.1. Imaginemos que un Nodo B que da cobertura a un área de 2 km de radio reporta que un grupo de móviles está sufriendo incidencias debido a mala recepción de señal. La solución más inmediata, sin tener idea de la posición de los usuarios, es enviar una unidad móvil que recorra toda la zona que debe ser servida por ese Nodo B confiando en que sea capaz de localizar la zona que falla en el menor tiempo posible. Sin embargo, si la operadora tuviera un método para geolocalizar ese grupo de usuarios, entonces directamente podría enviar a los técnicos necesarios al lugar correcto para solucionar el fallo en la red. Esto supondría un salto de calidad para los clientes y un importante ahorro de coste.

1.2. Principales objetivos de la tesis

El propósito de este trabajo es analizar y estudiar la información disponible en la red móvil UMTS proveniente de las trazas de llamadas con el objetivo de proponer y desarrollar mejoras en los actuales algoritmos de geolocalización, e incluso contribuir con nuevas alternativas.

Las trazas de llamada (*Call Traces*) son definidas como registros del flujo de mensajes, señalización y eventos para un seleccionado conjunto de protocolos en diferentes interfaces (Iub, Iu...) intercambiados entre los distintos elementos de la red durante una llamada. Estas trazas son registradas en los Nodos B aportando una enorme cantidad de información detallada y útil para tareas tales como la optimización y el *troubleshooting*, de modo que el operador tiene acceso a una valiosa fuente de información de forma fácil, sencilla y gratuita. Por tanto, un avance en la geolocalización basada en trazas se traduce directamente en un destacado beneficio para las operadoras a la hora de gestionar, monitorizar, detectar y localizar problemas en su red.

Asimismo, otro de los puntos notorios y distintivos que se pretende lograr con esta tesis es la validación de los algoritmos a través de datos reales recogidos de redes 3G actualmente dando servicio. Este conjunto de datos proporcionados por la empresa sueca Ericsson permite exponer los algoritmos propuestos a una auténtica prueba de estrés para evaluar su comportamiento fuera de la idealidad que suponen los datos sintéticos.

1.3. Estructura de la tesis

Los contenidos desarrollados en esta memoria de tesis se han estructurado en 4 capítulos, aparte de este primero que ha servido para contextualizar el marco del trabajo y justificar la necesidad del mismo.

El **Capítulo 2** se centra en un procedimiento de generación de mapas geolocalizados a partir de un método híbrido de geolocalización basado en la combinación de diferentes parámetros y eventos extraídos de las trazas. Además, es necesario disponer de un mapa de píxeles, también conocido como *Clutter*, de la zona de interés. Los mapas generados, ya sean de tráfico, nivel de señal RSCP o *Best Server*, son de utilidad a los ingenieros de campo en tareas de planificación u optimización de la red móvil, por ejemplo para analizar dónde se necesitarían desplegar nuevos Nodos B.

En el **Capítulo 3** se aborda uno de los métodos de geolocalización más favorable en redes UMTS, el método hiperbólico o método OTDOA. Esta técnica emplea las diferencias de tiempos de llegada observadas en el enlace descendente para calcular hipérbolas que al intersectarse dan lugar a la posición del usuario. Sin embargo, la aplicación de esta técnica plantea principalmente dos complejos problemas: la sincronización entre las estaciones base y la resolución del sistema de ecuaciones no lineal derivado del corte de las hipérbolas. Por tanto, a lo largo del capítulo, se analizan y desglosan las particularidades de cada problema

para, posteriormente, proponer y desarrollar soluciones que los mitiguen satisfactoriamente. Concretamente, el método numérico Levenberg-Marquardt y la búsqueda de topologías de Nodos B óptimas son algunos de los elementos innovadores que se proponen. Aparte, todo ello se engloba dentro del desarrollo de una herramienta independiente capaz de geolocalizar a los usuarios de una red móvil UMTS. Para ello, se utiliza como datos de entrada la topología de la red y los eventos *Measurement Report* extraídos de las trazas.

Por su parte, el **Capítulo 4** plantea un procedimiento para asociar y ajustar las posiciones geolocalizadas de distintos eventos pertenecientes a una misma llamada. La realidad es que, en muchas ocasiones, los eventos geolocalizables reportados por una llamada (Sección 2.2.1.2 y Sección 2.2.1.1) son geolocalizados con un determinado método, pero como entes independientes. Por tanto, el objetivo aquí es subir un nivel de abstracción para considerar la llamada como un conjunto de eventos, de forma que se pueden corregir las posiciones previamente estimadas. Para ello, se calculan los intervalos de confianza al 95 % derivados de los métodos de geolocalización empleados en cada evento de la misma llamada para, posteriormente, hacer el ajuste en base a ellos.

En el **Capítulo 5** se resumen los principales resultados y conclusiones, resaltando además las contribuciones más innovadoras y originales que se han derivado de esta tesis.

1.4. Publicaciones

Revistas

- [30] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, "Experimental Assessment of a Novel Geolocation Algorithm Based on OTDOA Technique in Real UMTS Networks," *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 3, No. 5, pp. 435-441, October, 2015
- [31] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, "Efficient Star-Topology Solving Local Minima for Geolocation in Real UMTS Networks: An Experimental Assessment with Real Data," *Wireless Personal Communications*, 2015, doi: 10.1007/s11277-015-2895-z
- [I] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and N. Sucevic, "Method based on confidence radius to adjust the location of mobile terminals," September 2015, submitted for publication.
- [II] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, "A comparative study between iterative algorithms for TDOA based geolocation techniques in real UMTS networks," July 2015, submitted for publication.

Patentes

- [32] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, "Location of terminals in a communications network," *European Patent PCT/EP2014/054875*, March, 2014 (Application Published)

Conferencias Nacionales

- [33] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, "Método basado en multilateración para geolocalización y sincronización en redes UMTS," in *XXIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Sep. 2014.

Conferencias Internacionales

- [34] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, "Experimental Assessment of a Novel Geolocation Algorithm Based on OTDOA technique in Real UMTS Networks," in *International Conference on Communications and Network Engineering, (ICCNE)*, Dic. 2014.

GEOLocalIZACIÓN HÍBRIDA

EN la actualidad existe una extensa bibliografía en torno a los métodos básicos de geolocalización. La evolución natural es buscar combinaciones de estos métodos básicos para suplir las carencias intrínsecas de cada uno por separado. Dicho esto, en la Sección 2.1 se hace una descripción de las técnicas de posicionamiento más conocidas, a la vez que se resaltan sus principales puntos fuertes y débiles. De esta manera, se pretende establecer un contexto para el desarrollo de un nuevo algoritmo híbrido de geolocalización. Los requerimientos y datos de entrada necesarios se diseccionan en la Sección 2.2, mientras que en la Sección 2.3 se hace un análisis y descripción del algoritmo propiamente dicho, y de su implementación. A continuación, durante la Sección 2.4, se detallan los resultados obtenidos a partir de datos reales. Para terminar, la Sección 2.5 refleja las conclusiones derivadas del trabajo realizado a lo largo de este capítulo.

2.1. Introducción

Los tipos de métodos de posicionamiento se pueden dividir principalmente en tres categorías [35]: basados en la red, basados en el terminal móvil y asistidos por el terminal móvil. Esta clasificación se hace en función de los elementos de la arquitectura de la red que se encargan de llevar a cabo las medidas y de hacer los cálculos de la posición. No obstante, existen también métodos híbridos [36] que combinan dos o más técnicas con el objetivo de aumentar la precisión a costa de una mayor complejidad. La idea es explotar los puntos fuertes de cada método, compensar sus debilidades y proveer la más apropiada y económica solución según los requerimientos de la aplicación.

2.1.1. Técnicas basadas en la red

Las técnicas de posicionamiento basadas en la red determinan las posiciones de los UEs (*User Equipment*) midiendo algunos parámetros (por ejemplo, el ángulo de llegada [35])

a partir de las señales recibidas desde los terminales móviles. Estas medidas son realizadas en cada Nodo B y enviadas normalmente al RNC (*Radio Network Controller*), donde los datos son procesados. La ventaja más importante de estas técnicas es la independencia del proceso con respecto a los UEs, evitando tener que hacerles modificaciones en el software o hardware. A su vez, esto conlleva que los usuarios pueden ser localizados sin su conocimiento.

2.1.1.1. Cell ID

Este es el método más sencillo y el que necesita menos ajustes en la red, pero también el de menor precisión desde un punto de vista general. La estimación de la posición se hace situando el dispositivo móvil en la localización del Nodo B de la celda que le está dando cobertura, lo cual se sabe gracias al **identificador de celda** (*Cell ID*). Lógicamente la exactitud es muy dependiente del tamaño de la celda; así, mientras que en áreas urbanas nos encontramos con celdas de decenas de metros, en áreas rurales éstas llegan a ser de varios kilómetros [37].

La precisión del método Cell ID mejora si se tiene acceso a otra información adicional:

- Si el Nodo B de la celda tiene **antenas sectoriales**, la posición del UE se coloca en el centro del sector que está reportando, tal y como se representa en la Fig.2.1(a). Hay que tener en cuenta que esto debería reducir considerablemente el error cometido, pero también hay que considerar que el multitrayecto, también llamado *multipath*, podría hacer que el sector reportado fuera erróneo y se incrementase más el error en la posición estimada.
- Si se conoce el **tiempo de ida y vuelta de una trama de datos** (RTT, del inglés *Round Trip Time*) desde el Nodo B al UE, entonces se traza una corona circular en la que debería estar el UE, tal y como se muestra en la Fig.2.1(b).
- Aprovechando el conocimiento del terreno, es decir, la **información geográfica**, es posible tener una idea de la probabilidad de que un UE esté en un sitio u otro. Por ejemplo, en trayectos entre ciudades lo normal es que los UEs se encuentren en carreteras, o que en zonas donde hay lagos y ríos no se localice ningún dispositivo (Fig.2.1(c)).

2.1.1.2. Ángulo de llegada (AOA)

El método del ángulo de llegada (AOA, del inglés *Angle Of Arrival*) emplea **antenas inteligentes o arrays de antenas** colocadas en los Nodos B para determinar cuál es el ángulo con el que llegan las señales [37, 38]. Es necesario que el UE “vea” como mínimo dos Nodos B para estimar su posición mediante trigonometría, tal y como muestra la Fig.2.2. Sin embargo, cuantos más Nodos B estén disponibles, mayor precisión se conseguirá. Asimismo, es importante destacar como ventaja que no es necesaria la sincronización entre las estaciones bases y el terminal móvil.

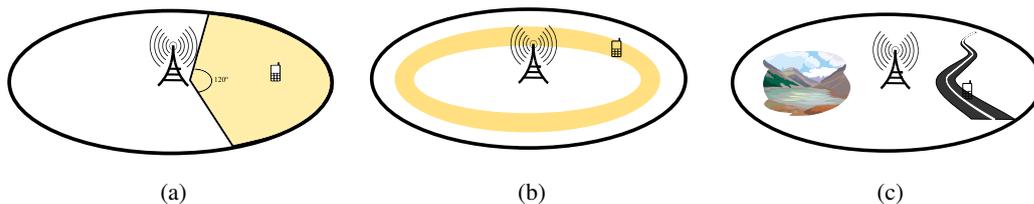


Figura 2.1: Posibles mejoras sobre el método básico de posicionamiento conocido como Cell ID. (a) Usar antenas sectoriales; (b) usar el RTT; (c) aprovechar la información del terreno.

El AOA funciona bien con visibilidad directa (LOS, del inglés *Line Of Sight*) entre el UE y los Nodos B, pero en entornos reales nos encontramos con el problema del multitrayecto. Este inconveniente es muy perjudicial para los sistemas AOA debido a que recibir señales por reflexión se traduce en errores considerables en las medidas de los ángulos. Otra desventaja que lastra a estos sistemas son las antenas. Éstas tienen un coste elevado y son muy sensibles a cualquier desalineamiento que pudiera producirse a causa del viento o de una tormenta, haciendo que el proceso de instalación y alineación sea complicado.

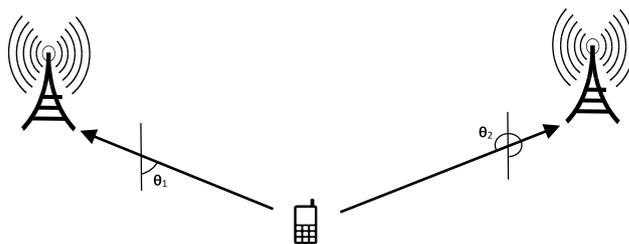


Figura 2.2: Técnica de posicionamiento por ángulo de llegada.

2.1.1.3. Tiempo de llegada (TOA)

La técnica de tiempo de llegada (TOA, del inglés *Time Of Arrival*) se basa en el cálculo del tiempo de propagación de la señal desde el UE a más de una estación base. Este tiempo tiene una relación lineal y proporcional con la distancia recorrida, por lo que es posible reducir la posición desconocida del UE a un punto en una circunferencia con centro el Nodo B.

Entonces, se aplica el principio de **trilateración** [39], que consiste en la determinación de un punto mediante la intersección de tres circunferencias con centros en posiciones fijas conocidas. El radio de las circunferencias es establecido por las medidas TOA, y la loca-

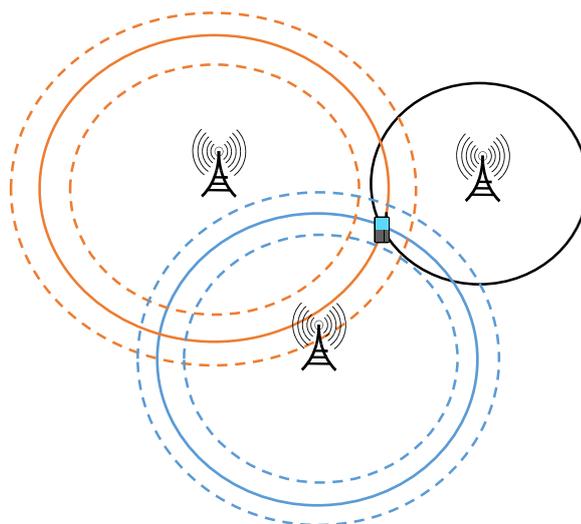


Figura 2.3: Técnica de posicionamiento TOA usando la trilateración. Las circunferencias con línea continua están asociadas a las medidas ideales, dando como resultado la posición exacta del UE. Por su parte, las circunferencias discontinuas serían consecuencia de errores en los niveles de señal medidas generando un área de incertidumbre. El Nodo B que hace de centro a la circunferencia negra no tiene circunferencias con error para una mayor claridad en el dibujo.

lización de las estaciones bases representan los centros de la circunferencias (ver Fig.2.3). Por tanto, para aplicar la técnica TOA es necesario que un UE sea capaz de reportar, como mínimo, tres Nodos B al mismo tiempo [37]. Además, para que las medidas TOA sean realizadas, la red tiene que forzar al terminal a hacer una petición de HO [40].

El principal inconveniente de este método es que se requiere una perfecta sincronización entre los elementos de la red (UE y Nodos B). Por desgracia, UMTS es una red asíncrona. La solución es instalar unidades de medida (LMUs, del inglés *Location Measurement Unit*) que actúan como componentes adicionales de la red en posiciones conocidas, pero las cuales resultan caras y costosas para las operadoras de telecomunicaciones.

2.1.1.4. Diferencia de tiempos de llegada (TDOA)

TDOA (*Time Difference Of Arrival*) utiliza la diferencia entre los TOAs de las señales procedentes de un UE a distintos pares de estaciones base. De esta forma, se cancela el error o falta de sincronía asociada a los relojes internos de los dispositivos móviles [41] y, por consiguiente, solamente es necesaria la sincronización entre Nodos B. Esta sincronización es muy importante para obtener una buena precisión en los resultados y se consigue con la instalación de LMUs o incluyendo un GPS en cada estación base (ya se comentó con anterioridad que la red UMTS es totalmente asíncrona).

Entonces, la posición del UE queda recogida a lo largo de una hipérbola, ya que, por definición, una hipérbola es el lugar geométrico formado por los puntos que satisfacen la condición geométrica de que la diferencia de sus distancias a dos puntos fijos llamados focos es una constante [37]. En nuestro caso, los focos se corresponden con los Nodos B. No obstante, se requiere la intersección de, al menos, dos hipérbolas para obtener la estimación de la posición del terminal móvil, lo cual se traduce en que debe de haber, al menos, tres Nodos B midiendo el mismo UE para que la red sea capaz de generar esas dos hipérbolas, tal y como se representa en la Fig.2.4. Este método basado en utilizar la **intersección de múltiples hipérbolas** (o hiperboloides) es conocido como **multilateración**.

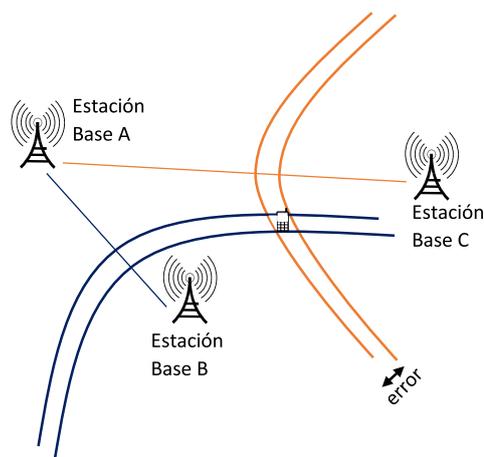


Figura 2.4: Técnica de posicionamiento TDOA. La hipérbola azul corresponde a la formada por los focos A-B, mientras que la naranja está relacionada a los focos A-C. Además, las hipérbolas no se han trazado con una sola línea, sino que se las ha dibujado con cierto grosor para representar el efecto de posibles errores como el *multipath*.

2.1.1.5. TDOA en el enlace ascendente (U-TDOA)

La técnica U-TDOA (*Uplink-TDOA*) es un caso particular de TDOA que utiliza el enlace ascendente de comunicaciones, es decir, se emplean las tramas enviadas desde el UE hacia el Nodo B. La transmisión del terminal tiene que ser escuchada por tres o más entidades de la red para aplicar la técnica de multilateración, ya sean éstas Nodos B o LMUs. Por su parte, el requisito del UE es que esté en modo de transmisión, ya sea haciendo una llamada real o por estimulación de la propia red que le obligue a transmitir durante un breve periodo de tiempo sacándolo de su inactividad [42]. Por ejemplo, uno de los escenarios más favorables para esta técnica se produce cuando el móvil está en procedimiento de *soft handover* (SHO), ya que estaría conectado al mismo tiempo a más de un Nodo B [43].

Una ventaja es que esta técnica está también estandarizada en GSM y es compatible con teléfonos de segunda generación. Pero, al mismo tiempo, existen diversos inconvenientes:

dependencia con la disposición geométrica de los Nodos B/LMUs, precisión de las tramas medidas, efecto multitrayecto y visibilidad simultánea con varios Nodos B/LMUs.

2.1.1.6. Huella multitrayecto (MF)

La huella multitrayecto (MF, del inglés *Multipath Fingerprint*) aprovecha uno de las causas principales de error en las comunicaciones móviles: las **señales multitrayecto**. La idea consiste en generar y almacenar un mapa caracterizado por las señales que llegan desde diferentes puntos debido a los rebotes en los objetos del entorno, tal y como se representa en la Fig.2.5. Para ello, el operador envía a sus técnicos a diferentes lugares, con el fin de que los Nodos B graben las huellas multitrayecto y creen una base de datos que permita efectuar las comparaciones. Como es lógico, la precisión alcanzable es dependiente de la cantidad de datos grabados en una zona. El principal problema es que el carácter variante del entorno (por ejemplo, nuevos edificios) obliga a grabar nuevas huellas de forma periódica [38].

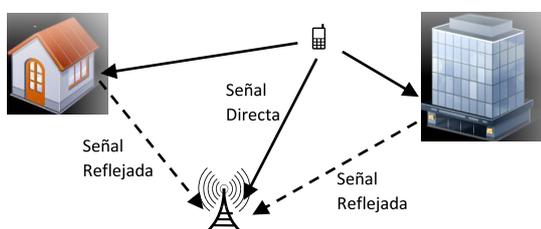


Figura 2.5: Técnica de posicionamiento MF.

2.1.2. Técnicas basadas en el terminal móvil

Las estrategias basadas en el terminal móvil se caracterizan porque la posición es calculada en el propio terminal. Entonces, el usuario puede decidir si quiere o no revelar su posición.

Se distinguen principalmente dos inconvenientes. Desde el punto de vista de las operadoras, el hecho de no tener control sobre el conocimiento de la posición restringe la flexibilidad para desarrollar tareas de optimización en la propia red; en otras palabras, las operadoras se ven supeditadas a los usuarios. Desde el punto de vista de los clientes, el consumo de potencia puede limitar la duración de la batería.

2.1.2.1. Sistema de posicionamiento global (GPS)

El sistema GPS es sobradamente conocido en todo el mundo. Funciona con una red de 27 **satélites** que tienen trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie terrestre, de forma que se garantiza que en cualquier punto de la Tierra se puedan recibir 4 satélites [42].

El receptor GPS debe tener visibilidad directa con un número mínimo de 3 satélites para ser capaz de determinar la posición en dos dimensiones; de esto se deduce que el GPS no funcione en interiores al no haber visibilidad.

Los satélites están equipados con relojes atómicos de enorme precisión, ya que es fundamental que estén perfectamente sincronizados. El motivo es que el receptor debe determinar exactamente cuánto se demoran las señales en llegar desde cada satélite GPS, y también debe ser capaz de sincronizar su propio reloj. En base a esto, se emplea la trilateración para hallar la posición del UE, tal y como se aprecia en la Figura Fig.2.6.

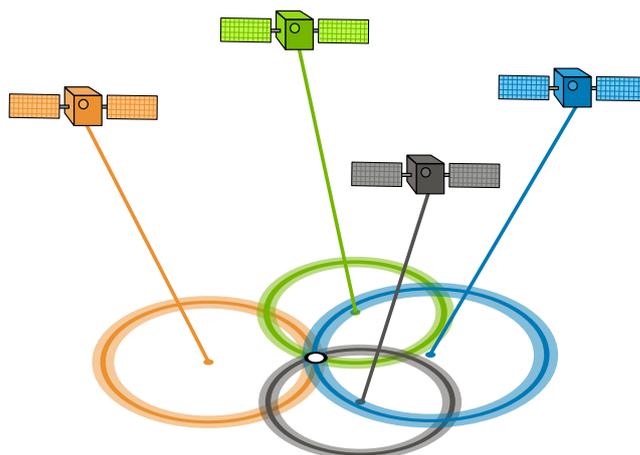


Figura 2.6: Técnica de posicionamiento GPS [44].

Aunque bien es cierto que un dispositivo con GPS ofrece más exactitud en la posición que cualquier otro método, también aparecen varias desventajas: necesidad de visibilidad directa, dispositivos más caros, gran consumo de batería o excesivo tiempo de espera inicial.

2.1.2.2. GPS Asistido (A-GPS)

A-GPS (*Assisted-GPS*) surge para mejorar la precisión obtenida con los receptores GPS integrados en los dispositivos móviles. La idea es que **la red proporcione información adicional** al receptor del UE (ver Fig.2.7) como, por ejemplo, una lista de los satélites visibles y sus efemérides o correcciones atmosféricas. Estos datos de apoyo reducen la cantidad de procesamiento del terminal, lo cual aumenta la vida de la batería y hace que la adquisición de datos inicial sea más rápida [7].

2.1.3. Técnicas asistidas por el terminal móvil

Esta subdivisión de las técnicas de geolocalización se caracteriza por ser un enfoque mixto entre las técnicas basadas en la red y las basadas en el móvil. El terminal del usuario

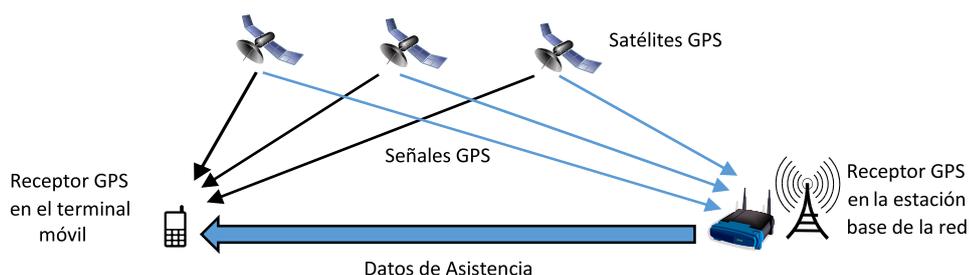


Figura 2.7: Técnica de posicionamiento A-GPS.

juega un papel fundamental ya que se encarga de efectuar algunas de las medidas que, posteriormente, la red necesitará para calcular su posición.

En este contexto aparecen en escena las **trazas de las llamadas**. Las trazas son el instrumento que tiene la red móvil para transferir y registrar los datos que fluyen entre sus distintos elementos. Su función es fundamental para aplicar un método asistido por el móvil, por lo que representan uno de los ejes centrales de esta tesis. En las siguientes secciones y capítulos serán analizadas en mayor profundidad para desgranar la información que contienen y que es susceptible de ser utilizada como punto de partida para la geolocalización.

2.1.3.1. Intensidad de señal recibida (RSS)

Esta técnica (RSS, del inglés *Received Signal Strength*) se basa en los **niveles de señal medidos** —potencia, por ejemplo— para estimar las distancias que separan al UE de distintos Nodos B [45]. RSS aplica un **algoritmo de trilateración** como el que se comentó en la Sección 2.1.1.3. Por tanto, es necesario que un UE sea capaz de reportar, como mínimo, tres Nodos B al mismo tiempo.

La principal ventaja es que las medidas de potencia no conllevan demasiada complejidad, ya que son uno de los indicadores de calidad básicos que las redes monitorizan; por ejemplo, para tomar la decisión de cuando hacer un HO. Ahora bien, pese a la simplicidad del método RSS, no suele ser una solución muy utilizada debido a algunas desventajas significativas: las medidas de potencia tienen una fuerte dependencia con las características del canal, los modelos de propagación varían según el entorno, hay atenuación debida a obstáculos y los errores en las medidas se incrementan considerablemente a distancias lejanas.

2.1.3.2. Correlación de la señal piloto (PCM)

PCM (*Pilot Correlation method*) es una alternativa a RSS que consiste en usar **mapas o huellas de potencia** (*fingerprints*). La idea es generar un mapa digital del área de servicio dividiéndola en pequeñas regiones. Cuanto menor sea el tamaño de estas regiones, mejor precisión podrá ser obtenida. Entonces, el UE mide el nivel de potencia recibido de una

celda (por ejemplo RSCP en redes 3G, del inglés *Received Signal Code Power*) sobre el canal piloto común (CPICH, del inglés *Common Pilot Channel*), y reporta este valor de vuelta a la red [42, 46]. De esta manera, en una calibración previa, se genera una base de datos con los niveles que deberían obtenerse en cada pequeña región y la posición estimada (ver Fig. 2.8). Luego, cuando se produzca una petición de localización, se compara el RSCP actual con las entradas de la base de datos y el valor más parecido se traduce en la posición estimada.

Uno de los principales inconvenientes de esta técnica es que se requiere una actualización periódica de la base de datos, ya que las condiciones de propagación varían con el tiempo.

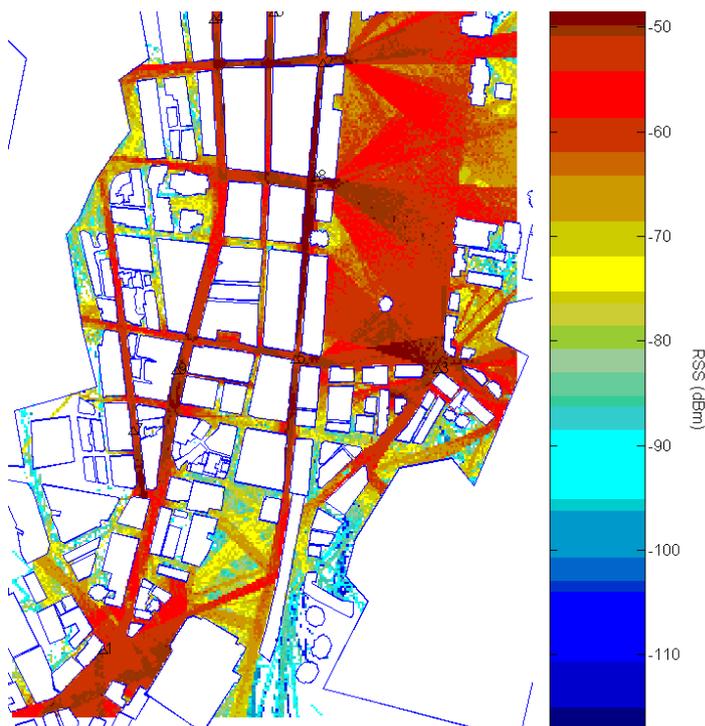


Figura 2.8: Técnica de posicionamiento RSS usando huellas de potencia [47].

2.1.3.3. TDOA en el enlace descendente (OTDOA)

El método OTDOA está basado en TDOA usando el **enlace descendente** (*downlink*), es decir, es el terminal móvil el que realiza las medidas temporales y la red la que hace el procesamiento. Al menos tres estaciones bases deben ser recibidas por el UE para emplear la **multilateración hiperbólica**.

Uno de los temas principales de esta tesis se centra en esta técnica de geolocalización, por lo que se describe y estudia en profundidad en el Capítulo 4.

2.1.4. Tabla comparativa

A continuación, se presenta la Tabla 2.1 que compara las prestaciones de los distintos métodos de posicionamiento. Los datos que se han recopilado están enfocados a redes UMTS, de forma que la columna "Estándar" se refiere a los métodos que están estandarizados para UMTS por el 3GPP. En las columnas de "Precisión" aparecen algunos porcentajes entre paréntesis, los cuales hacen referencia al porcentaje de UEs que se han localizado con ese error como máximo. Para los métodos AOA y MF en entornos suburbanos no se han encontrado referencias de precisión en la bibliografía.

Tabla 2.1: Comparativa entre los métodos de posicionamiento.

Método	Estándar	Precisión Urbana	Precisión Suburbana	Principal Inconveniente
Cell ID	✓	50-1000 m [48]	2-10 km [48]	Demasiado error
AOA		100-200 m [42]		Arrays de antenas
U-TDOA		40-50 m [48]	40-50 m [48]	Hardware en cada Nodo B
MF		140 m (95 %) [49]		Mantener la base de datos
GPS		5-30 m [42]	5-15 m [42]	Acceso restringido al operador
A-GPS	✓	20-100 m [48]	30-150 m [48]	Acceso restringido al operador
RSS		250 m (50 %) [50]	750 m (50 %) [50]	Poca fiabilidad de las medidas
PCM		200 m (95 %) [46]	350 m (95 %) [46]	Mantener la base de datos
OTDOA	✓	50-250 m [48]	50-300 m [48]	Coste de los LMUs

2.1.5. Métodos híbridos en la bibliografía

Evidentemente, ninguno de los métodos presentados hasta ahora es la respuesta definitiva ni la solución mágica para geolocalizar. Sin embargo, la combinación de varias de estas técnicas es una posibilidad para dar robustez y ganancia a la geolocalización. Esta fusión deriva en lo que frecuentemente se conoce como métodos híbridos de posicionamiento, los cuales intentan sacar partido a distintas fuentes de información que se complementan entre sí. Básicamente, el objetivo es reducir el área en la que el usuario podría ser localizado.

Hay una extensa variedad de métodos híbridos propuestos en la bibliografía, al fin y al cabo la integración de diferentes metodologías es la evolución natural para refinar los algoritmos básicos. Borkowski [51] analiza el comportamiento y la precisión de un método que combina **CellID + RTT** bajo distintas topologías de la red en escenarios urbanos. Sus conclusiones, extraídas a través de simulaciones y no de datos reales, indican que la topología, además del área en la que se encuentra el dispositivo móvil —*soft, softer handover*, o ninguna de estas dos—, son elementos claves a la hora de obtener una mejor o peor estimación de la posición del usuario. Por su parte, Abo-Zahhad, Ahmed y Mourad [52] profundizan

sobre un sistema que aúna **Assisted-GPS + U-TDOA** con el objetivo de elegir uno de los métodos o la combinación de ambos según ciertos parámetros de las llamadas. El principal inconveniente de esta propuesta viene dado por la limitación del A-GPS de cara a las operadoras de telefonía móvil, ya que se trata de información privada del usuario.

Otra asociación de técnicas muy habitual resulta de **TDOA + AOA**. En [53] se estudia cómo mejorar la precisión y convergencia de la localización en entornos donde la geometría de los elementos es adversa, como por ejemplo en zonas alejadas de todos los nodos. Pese a que este artículo expone sus premisas para una red de sensores, las conclusiones pueden ser extrapoladas a una red móvil. Por otro lado, Cong y Zhuang [54] proponen un esquema de localización en redes WCDMA para mejorar la precisión del método TDOA ejecutado de forma independiente. La idea consiste en que el AOA ayude en situaciones donde las medidas TDOA tienen una pobre precisión y/o cuando el número de estaciones bases reportadas es pequeño. En cualquier caso, los resultados que aquí se presentan han sido obtenidos a través de datos sintéticos y simulaciones, aparte de tener la desventaja del coste que supone poder emplear arrays de antenas para medir el ángulo de llegada.

Asimismo, el uso de *fingerprints* o métodos de correlación con una base de datos (DCM, del inglés *Database Correlation Method*) son muy usados junto a otras técnicas que sirven de apoyo. Gundegard y otros [55] realizaron una comparación de *fingerprints basados en RSCP y OTDOA*, para luego evaluar el efecto de la combinación de ambos. Los resultados obtenidos a partir de datos reales recogidos en campo indicaban que por separado el error de la localización era similar, pero que en conjunto ambas técnicas permitían reducir ese error hasta un 20%. Por su parte, en [56], se plantea un algoritmo que mezcla **TOA + AOA + RSCP fingerprint**. Todo ello, en el supuesto de un escenario donde hay una estación base y un punto de acceso WiFi a los que el terminal móvil que se quiere localizar deberá estar conectado. Otras estrategias bastante similares pueden encontrarse en la literatura, pero todas tienen como primordial inconveniente la necesidad de generar esa base de datos que sirva como referencia.

2.2. Datos de entrada

La principal ventaja del método híbrido que se propone en esta tesis, y en particular en este capítulo, es que todos los datos de entrada requeridos están a disposición del operador móvil de forma directa. No hay necesidad de solicitar permisos a terceros ni al propio usuario. Del mismo modo, tampoco se necesita entrenar una base de datos mediante medidas recogidas en el propio terreno. En pocas palabras, el operador es autosuficiente para geolocalizar y generar mapas que sirvan para diagnosticar el estado de la red.

2.2.1. Trazas

Tal y como ya se adelantó en la Sección 1.2, las trazas de las llamadas o *Call Traces* se definen como registros del flujo de mensajes intercambiados entre los elementos de la

red móvil (UE, Nodo B y RNC). Las trazas proveen una enorme cantidad de información detallada sobre todo lo que sucede en la red desde el establecimiento de una llamada hasta la liberación de la misma.

Cada proveedor de equipos y sistemas de telecomunicaciones, comúnmente denominados *vendors*, tiene su propio mecanismo para recolectar las trazas. Entre los más destacados encontramos el **formato GPEH (General Performance Event Handling) perteneciente a Ericsson**, el CHR (*Call History Recording*) de Huawei o el Megamon en Nokia. Concretamente, en esta tesis emplearemos GPEH, puesto que el trabajo aquí desarrollado ha estado respaldado y patrocinado por Ericsson.

Las trazas GPEH registran diferentes tipos de eventos que se almacenan en ficheros de 15 minutos de duración, los cuales se conocen como ROPs (*Result Output Period*). Los eventos no son más que acontecimientos o sucesos de interés que se producen en la red móvil. Se pueden clasificar en dos categorías: internos de la RNC e inter-nodos. Normalmente, en los **eventos internos** se definen ciertas condiciones específicas para cada evento bajo las cuales se da la orden de registrarlo porque se considera interesante para analizar el comportamiento de la red. Asimismo, podemos configurar eventos periódicos que sirven para llevar un seguimiento continuo de algunos parámetros clave en el desarrollo de una llamada. Por su parte, los **eventos inter-nodos** son mensajes del protocolo de la capa 3 del plano de control y están especificados en el 3GPP. Este grupo se subdivide en función del protocolo que utilicen:

- RRC(*Radio Resource Control*)
- NBAP (*Node B Application Part*)
- RANAP (*Radio Access Network Application Part*)
- RNSAP(*Radio Network Subsystem Application Part*)
- PCAP(*Positioning Calculation Application Part*)
- SABP (*Service Area Broadcast Protocol*)

En nuestro caso, nos centraremos en dos eventos que reportan información aprovechable para la geolocalización:

- NBAP Radio Link Setup Request
- RRC Measurement Report

2.2.1.1. NBAP Radio Link Setup Request - Propagation Delay

Por definición, un **enlace radio o Radio Link** es el nombre lógico dado a la asociación entre un usuario y un Nodo B. Durante *soft-handover* y *softer-handover*, el UE puede mantener varios enlaces radio, uno por cada celda dentro del *active set* (AS). Dicho de otro modo, un enlace radio es simplemente un conjunto de canales físicos de subida (UL) y bajada (DL) entre el UE y el Nodo B.

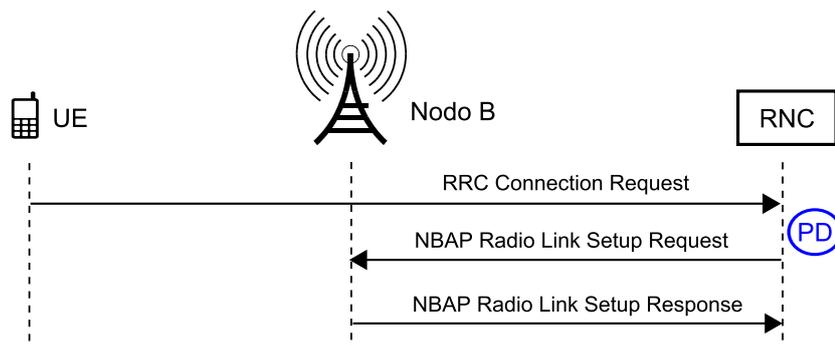


Figura 2.9: Establecimiento de un Enlace Radio

La decisión sobre los códigos de aleatorización (*scrambling code - SC*), el intervalo de tiempo de transmisión, parámetros relacionados con la calidad del servicio y otras características para el establecimiento del enlace radio es hecha por la RNC. Por este motivo, la RNC informa de todos estos detalles al Nodo B a través del mensaje **NBAP Radio Link Setup Request** [57]. Este mensaje es usado siempre que se añade un nuevo enlace radio perteneciente a un Nodo B que no estuviese todavía incluido en el AS [58].

De entre todos los parámetros incluidos en el *NBAP Radio Link Setup Request*, el que nos interesa para la geolocalización es el **Propagation Delay** (PD). La medida del PD es realizada por la RNC, a diferencia de 2G (GSM) donde era el UE el encargado de llevarla a cabo. La RNC utiliza el mensaje *RRC Connection Request* proveniente del UE, y previo al establecimiento del enlace radio, para obtener este valor, tal y como se muestra en la Fig. 2.9. En resumen, el Propagation Delay es un retardo temporal de la señal radio que sirve para estimar la distancia entre el Nodo B y el UE con la intención de sincronizar la transmisión y la recepción.

El valor del PD viene reportado dentro del mensaje en formato ASN.1, y es expresado como un número entero en el rango [0...255]. Sin embargo, la unidad en la que se mide el PD es el chip, pero en pasos de 3 chips hasta un máximo de 765, lo que en realidad significa que el PD define un rango. De este modo, se puede llevar a cabo una conversión entre el valor leído del ASN.1 y el rango en chips correspondiente. Asimismo, los chips se pueden traducir a metros de forma sencilla. Si partimos de las premisas de que la tecnología WCDMA tiene una tasa constante de 3,84 Mchip/s y que la velocidad de la luz es 300.000 km/s, entonces se puede obtener la distancia equivalente a 3 chips como

$$\frac{1}{3.84 \cdot 10^6} = 2.6041 \cdot 10^{-7} \text{ s/chip} = 0,26041 \mu\text{s/chip} \quad (2.1)$$

$$0,26041 \mu\text{s/chip} \times 3 \text{ chips} = 0.78125 \mu\text{s} \quad (2.2)$$

$$0.78125 \cdot 10^{-6} \text{ s} \times 3 \cdot 10^8 \text{ km/s} = 234.375 \text{ m} \quad (2.3)$$

Finalmente, en la Tabla 2.2 se resume la relación entre todas las magnitudes en las que podemos encontrar el PD, mientras que en la Fig. 2.10 se muestra un ejemplo de un mensaje ASN.1 decodificado. El mensaje ASN.1 en bruto provenía de un evento *NBAP Radio Link Setup Request* que había sido parseado y procesado previamente por una de las herramientas de Ericsson, el **Trace Processing Server (TPS)**. Posteriormente, para decodificar la parte ASN.1, se ha recurrido a un decodificador gratuito y online conocido como Marben [59]. Entonces, en esta imagen lo que se observa es cómo es reportado específicamente el campo Propagation Delay que será utilizado para la geolocalización; además, se han resaltado los campos que contienen los identificadores del *Radio Link* y la celda.

Tabla 2.2: Relación entre las magnitudes del Propagation Delay

<i>ASN. 1</i> (Entero)	<i>Desde</i> (chips)	<i>Hasta</i> (chips)	<i>Desde</i> (metros)	<i>Hasta</i> (metros)
0	0	3	0	234,375
1	3	6	234,375	468,75
2	6	9	468,75	703.125
...
255	765	768	59765,625	60000

```

<value>
  <RL-InformationList-RL-SetupRqstFDD>
    <SEQUENCE>
      <id>211</id>
      <criticality>
        <notify/>
      </criticality>
      <value>
        <RL-InformationItem-RL-SetupRqstFDD>
          <rL-ID>0</rL-ID>
          <c-ID>16302</c-ID>
          <firstRLS-indicator>
            <first-RLS/>
          </firstRLS-indicator>
          <frameOffset>2</frameOffset>
          <chipOffset>26624</chipOffset>
          <propagationDelay>3</propagationDelay>
          <dl-CodeInformation>
            <FDD-DL-CodeInformationItem>
              <dl-ScramblingCode>0</dl-ScramblingCode>
              <fdd-DL-ChannelisationCodeNumber>24</fdd-DL-ChannelisationCodeNumber>
            </FDD-DL-CodeInformationItem>
          </dl-CodeInformation>
          <initialDL-transmissionPower>-115</initialDL-transmissionPower>
          <maximumDL-power>30</maximumDL-power>
          <minimumDL-power>-190</minimumDL-power>
          <iE-Extensions>

```

Radio Link Setup Request
Radio link Identificador= 0
Identificador de Celda = 16302

Propagation Delay = 3

Figura 2.10: Fragmento decodificado de un mensaje ASN.1 extraído del evento *NBAP Radio Link Setup Request*. El evento está estableciendo el *Radio Link* 0 en la celda 16302, con la que ha medido un PD de 3.

2.2.1.2. RRC Measurement Report

El UE tiene la capacidad de reportar un completo conjunto de medidas a la RNC. Para ello, la RNC tiene que enviarle un mensaje *RRC Measurement Control* indicando la configuración que debe adoptar el UE a la hora de realizar y enviar esas medidas, ya sea para establecerla por primera vez o para hacer una re-configuración. El procedimiento, entonces, sería que el UE respondiese con un ***RRC Measurement Report*** que incluyese todos los resultados solicitados.

Según el 3GPP [60], las medidas llevadas a cabo por un UE pueden ser tanto **periódicas** como **disparadas por un evento** (*event-triggered*). En el caso de las activadas por un evento, el *RRC Measurement Report* es únicamente enviado cuando las medidas satisfacen ciertas condiciones. Por ejemplo, si el UE está monitorizando una celda objetivo cuyo nivel de señal llega a ser casi igual de fuerte que su celda servidora, entonces el UE enviará un *RRC Measurement Report* a la RNC con los detalles de la celda objetivo. Este evento es denominado **Evento 1A**. Por otro lado, si la configuración es periódica, el UE reportará cada pocos segundos toda la información de las celdas que se encuentre midiendo en ese momento. Los eventos periódicos tienen la ventaja de proveer de suficiente información al operador para hacer un seguimiento preciso de lo que le sucede al usuario, pero en contrapartida se somete a la red a una carga mucho mayor de señalización.

En cualquier caso, un *RRC Measurement Report* contiene el **nivel de señal de las celdas medidas (RSCP) por el UE junto a los SCs asociados**. Esta información se encuentra encapsulada dentro de un mensaje en formato ASN. 1, y es la que usaremos para la geolocalización.

Nuevamente, podemos extraer la parte ASN. 1 de un *RRC Measurement Report* real a través de TPS, y decodificarla con [59]. El resultado es mostrado en la Fig. 2.11, donde se observa que el UE está midiendo dos celdas referenciadas por los SCs 484 y 45. Asimismo, el campo **<cpich-RSCP>** indica el nivel de potencia absoluto del CPICH recibido por el UE. El rango de medida reportado varía entre -5 y 91, lo cual se corresponde a un rango comprendido entre -120 dBm y -25 dBm (ver Tabla 2.3). En este caso, la celda 1 se estaría midiendo con -114 dBm y la celda 2 con -116 dBm.

Tabla 2.3: Relación entre el CPICH RSCP reportado y el CPICH RSCP medido en un evento *RRC Measurement Report*.

Valor CPICH RSCP reportado	Valor CPICH RSCP medido
-5	RSCP < -120 dBm
...	...
1	$-115 \text{ dBm} \leq \text{RSCP} < -114 \text{ dBm}$
...	...
91	$-25 \text{ dBm} \leq \text{RSCP}$

```

<measurementReport>
  <measurementIdentity>6</measurementIdentity>
  <measuredResults>
    <intraFreqMeasuredResultsList>
      <CellMeasuredResults>
        <modeSpecificInfo>
          <fdd>
            <primaryCPICH-Info>
              <primaryScramblingCode>484</primaryScramblingCode>
            </primaryCPICH-Info>
            <cpich-Ec-N0>17</cpich-Ec-N0>
            <cpich-RSCP>2</cpich-RSCP>
          </fdd>
        </modeSpecificInfo>
      </CellMeasuredResults>
      <CellMeasuredResults>
        <modeSpecificInfo>
          <fdd>
            <primaryCPICH-Info>
              <primaryScramblingCode>45</primaryScramblingCode>
            </primaryCPICH-Info>
            <cpich-Ec-N0>12</cpich-Ec-N0>
            <cpich-RSCP>0</cpich-RSCP>
          </fdd>
        </modeSpecificInfo>
      </CellMeasuredResults>
    </intraFreqMeasuredResultsList>
  </measuredResults>
</measurementReport>

```

Figura 2.11: Fragmento decodificado de un mensaje ASN.1 extraído del evento *RRC Measurement Report*. El evento está midiendo dos celdas.

2.2.1.3. Otros parámetros de interés

Además de los dos eventos específicos que se han detallado en las secciones previas, hay otros parámetros que es necesario obtener de las trazas, ya sean directamente de las cabeceras de los eventos analizados o después de un postprocesado.

- **TimeStamp:** indica el instante temporal en el que se reportó el evento. Viene incluido en la cabecera y está dado en milisegundos en formato Unix. TPS proporciona esta información tras parsear los eventos.
- **Identificador de Celda (*Global CellID*):** es un número que identifica de forma inequívoca a una celda. El identificador de la celda servidora también se lee de la cabecera, pero para obtener el identificador de las celdas vecinas medidas, por ejemplo en un *Measurement Report*, es necesario aplicar un algoritmo de resolución de SC. Afortunadamente, TPS ya nos proporciona directamente toda esta información.
- **Identificador de llamada (*Call ID*):** para formar una llamada completa es necesario acoplar los diferentes eventos que son parseados en las trazas. Esta lógica de ensamblaje está también incluida en TPS, de manera que podemos saber qué eventos pertenecen a la misma llamada.

2.2.2. Clutter

Como se comentó anteriormente, el principal objetivo del método híbrido de geolocalización propuesto en esta tesis es **generar mapas**. Los mapas aportan capacidad para entender el comportamiento de la red móvil por regiones, de forma que permiten hacer una diagnosis rápida, práctica y visual del estado en el que se encuentra. Principalmente, los mapas más demandados por un ingeniero son los de señal, tráfico y cobertura, pero hay muchos otros, como los de terminaciones de llamadas (llamadas caídas, CS Fallback ...) o eventos especiales (establecimiento de llamada ...) que también contribuyen a la labor de *troubleshooting*.

El **Clutter**, en el ámbito de la planificación radio de redes de comunicaciones móviles, no es más que un mapa pixelado (*grid*) de la región de estudio en el que se hace una clasificación según el terreno, tal y como se muestra en la Fig. 2.12. En otras palabras, cada píxel representa un determinado tipo de superficie (agua, vegetación, desierto, urbano...) con la finalidad de tratar todos los que pertenecen a la misma categoría de manera idéntica, pero independiente a los de otra cuando la posición de un evento es estimada o ajustada.

El tamaño del píxel del clutter juega también un papel clave en términos de rendimiento del algoritmo y precisión de la estimación de la posición. A un menor tamaño de píxel, mayor es la cantidad de datos que se han de manejar y analizar; pero, por otro lado, se garantiza una representación más fiel y exacta del área, reduciendo el error cometido en la posición estimada al discretizar el espacio continuo en píxeles.

2.2.3. Datos físicos de las estaciones base

La información física de los Nodos B, a los que también nos referiremos con el término sinónimo **sites** a partir de ahora, es una de las piezas críticas para aplicar cualquier algoritmo de geolocalización. Entre los detalles requeridos podemos encontrar los siguientes:

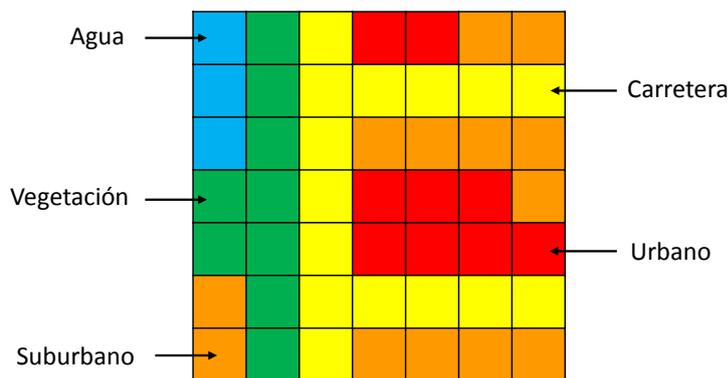


Figura 2.12: Ejemplo de Clutter en el campo de la geolocalización.

- **Identificador de Celda [Obligatorio]:** este identificador permite determinar qué sector o celda ha sido reportado por un determinado evento. El emparejamiento se lleva a cabo a través del identificador de celda que los eventos también incluyen en su cabecera, como ya se mencionó en la Sección 2.2.1.3.
- **Ubicación [Obligatorio]:** las coordenadas de los sites, normalmente dadas en latitud y longitud, es un requerimiento completamente obligatorio si se quiere estimar la posición de un dispositivo móvil. Además, estas coordenadas deben ser dadas con la mayor exactitud posible, ya que de lo contrario se estaría añadiendo una fuente de error independiente del propio algoritmo de geolocalización. De hecho, cuando las coordenadas se suministran en formato latitud y longitud decimal, es aconsejable especificar al menos 4 decimales para no incurrir en una desviación que supere la decena de metros. En aras de la claridad, se ha incluido un ejemplo en la Fig.2.13, donde se comprueba que variar una milésima la latitud se traduce en una variación de distancia de 111 metros.
- **Azimut [Obligatorio]:** tomando como referencia el Norte, indica en grados el ángulo de orientación de la antena de un determinado sector en el plano horizontal. Este dato es imperativo a la hora de distinguir en qué dirección apunta cada celda dentro del mismo site.
- **BeamWidth (BW) [Opcional]:** es el ancho de haz a 3dB de las antenas que se despliegan en cada sector. El disponer de este valor facilita el modelado del rango de cobertura de los sectores, aunque en caso de no tenerlo se pueden hacer estimaciones razonables sabiendo simplemente el número de sectores en el site. Por ejemplo, si tenemos un Nodo B trisectorial, se pueden asumir sectores con BW de 60°.

Point 1:	<input type="text" value="36.772"/>	,	<input type="text" value="-4.10045"/>	Distance:	0.1112 km (to 4 SF*)
Point 2:	<input type="text" value="36.773"/>	,	<input type="text" value="-4.10045"/>	Initial bearing:	000°00'00"
				Final bearing:	000°00'00"
				Midpoint:	36°46'21"N, 004°06'02"W

Figura 2.13: La página web [61] ofrece la posibilidad de calcular la distancia entre dos puntos dados por sus coordenadas. En este ejemplo se han elegido coordenadas de la provincia de Málaga para ver el efecto en distancia que tiene la variación de una milésima en la latitud. Para ello, se ha incrementado la latitud del segundo punto, lo que se ha traducido en que el punto 1 queda separado 111 metros del punto 2. De esta forma, se hace énfasis en la importancia de proporcionar una cantidad suficiente de decimales cuando se concreta la posición de un Nodo B.

2.3. Descripción e implementación del método híbrido

La primera cuestión que debe aclararse es que el método híbrido de geolocalización propuesto se aleja del paradigma clásico de posicionamiento. Esto quiere decir que no todo el esfuerzo está dedicado a obtener la mejor precisión punto a punto posible, sino que también se pretende generar mapas geolocalizados que sean coherentes, consistentes, completos y realistas. Por consiguiente, lo que se busca es un **compromiso entre la precisión y la integridad de los mapas**.

2.3.1. Esquema general

A continuación, en la Fig.2.14, se presenta un esquema general en formato de diagrama de flujo en el que se recogen todos los procesos implicados en la herramienta híbrida de geolocalización junto a las secciones en las que se desglosan. Los distintos procesos se han dividido en 4 categorías en función del propósito que se les atribuye. Los pertenecientes a **Datos de Entrada** abarcan todo lo relacionado con extraer la información necesaria proveniente de una fuente externa. Los **Preprocesos** tienen la función de calcular valores previos y requeridos por los procesos de **Geolocalización**, los cuales son los encargados de estimar las posiciones de los eventos. Por último, los **Postprocesos** son los responsables de suministrar el mapa geolocalizado final.

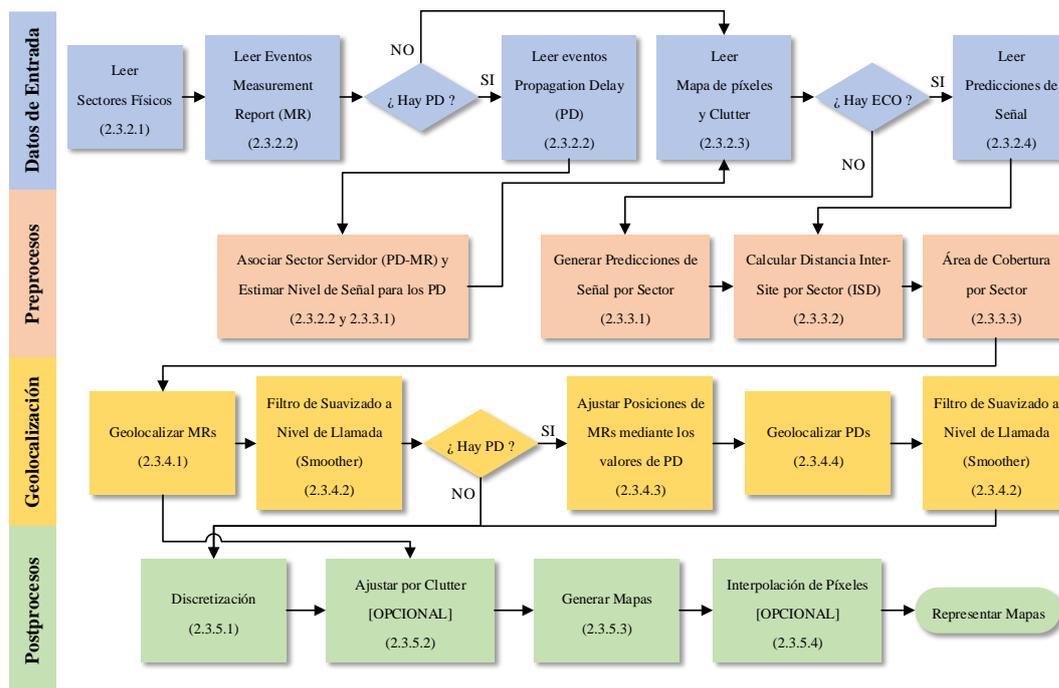


Figura 2.14: Diagrama de flujo del método híbrido

2.3.1.1. Implementación

El método híbrido completo se ha desarrollado en el lenguaje de programación **MATLAB** debido a su facilidad y flexibilidad a la hora de trabajar con matrices. Las matrices sirven para representar de forma manejable y cómoda un mapa de píxeles, donde éstos pueden tener valores de señal, clutter o cualquier otra magnitud física cuantitativa. De esta forma es sencillo trabajar con distintas capas que representan la misma zona, ya que el problema se reduce a operar con matrices.

Por su parte, la implementación se ha realizado generando funciones independientes que, en la mayoría de los casos, equivalen a cada una de las cajas o procesos representados en la Fig.2.14. Esta forma de trabajar otorga de modularidad al algoritmo permitiendo obviar algún paso en casos determinados o particularizar alguna operación concreta si fuera necesario. Asimismo, algunas de las funciones presentan parámetros configurables que pueden ser ajustados a criterio del usuario o según el escenario.

2.3.2. Procesos para los Datos de Entrada

2.3.2.1. Sectores físicos

Mediante TPS, una base de datos MySQL y la ejecución de algunas consultas, se puede obtener un archivo en formato CSV como el exhibido en la Fig.2.15. Esta información es almacenada en MATLAB en una estructura llamada *sector*, que no es más que una agrupación de datos de diferentes tipos bajo un mismo nombre. Entonces, a cada uno de los datos les llamamos campos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	SECTORNAME	SECTORID	SITEID	LONGITUDE	LATITUDE	AZIMUTH	ECO	CPICH	ANTENNA_HEIGHT	TILT
2	[REDACTED]	650	81	20.1791	21.5196	0	64	1	50	6
3	[REDACTED]	651	81	20.1791	21.5196	120	65	1	50	6
4	[REDACTED]	652	81	20.1791	21.5196	240	66	1	50	6
5	[REDACTED]	659	82	20.1804	21.5196	0	18	1.25893	50	6

Figura 2.15: Archivo CSV con sectores físicos.

Con respecto a algunas de las columnas del CSV,

- **SECTORNAME:** Nombre con el que la operadora designa al sector. Ha sido pixelado por motivos de confidencialidad.
- **SECTORID:** Número entero que sirve como identificador del sector, es asignado por TPS.
- **SITEID:** Número entero que sirve como identificador del site, es asignado por TPS.
- **ECO:** Número entero que identifica al sector en el proyecto ECO. Ver la Sección 2.3.2.4.

- **CPICH:** Potencia del canal CPICH en vatios.
- **ANNTENA_HEIGHT:** Altura de la antena en metros.
- **TILT:** Suma del tilt eléctrico y mecánico de la antena.

2.3.2.2. Eventos MR y PD

De modo similar al procedimiento seguido con los sectores (TPS + MySQL), se generan archivos CSV que recogen la información de los eventos MR y PD. Después, son almacenados en MATLAB en la estructura *event*.

En este caso, cabe destacar que los eventos PD se consideran opcionales, ya que se pueden incluir para mejorar y refinar las posiciones estimadas de los MR, pero no es estrictamente obligatorio. Por tanto, una versión más básica del algoritmo puede ser ejecutada sin ellos. Dicho esto, si los dos eventos son considerados, hace falta ejecutar algunas consultas adicionales sobre la base de datos —también existe la posibilidad de hacer las operaciones directamente en Excel— con el fin de asociar el valor de PD al MR más cercano en tiempo dentro de la misma llamada. Esta asociación es posteriormente usada en los procesos de geolocalización, y en el esquema de la Fig.2.14 es asociado con una de las operaciones realizadas en el primer **preproceso**.

Un ejemplo del CSV para el evento MR es mostrado en la Fig.2.16, donde cada línea representa una medida. De esta manera, si un *EVENTID* (identificador virtual del evento) aparece en más de una línea, como es el caso del *EVENTID* 23197125 del ejemplo, significa que en ese MR se han reportado medidas de más de una celda.

	A	B	C	D	E	F	H	I	L	M
1	EVENTID	CALLID	IMSI	TIMESTAMP	SECTORID	RSCP	LON_REF	LAT_REF	PROPAGATION DELAY	SERVING SECTOR
33	23196827	6	-1	1370376423302	57	-72	-99.15764489	19.42724541	1	57
34	23196969	6	-1	1370376423541	57	-73	-99.15764489	19.42724541	-1	-1
35	23197125	6	-1	1370376423952	57	-74	-99.15764489	19.42724541	-1	-1
36	23197125	6	-1	1370376423952	21	-74	-99.15764489	19.42724541	-1	-1
37	23197716	6	-1	1370376424772	57	-73	-99.15764489	19.42724541	-1	-1

Figura 2.16: Archivo CSV con eventos MR.

Con respecto a algunas de las columnas del CSV,

- **LON_REF & LAT_REF:** Coordenadas de las posiciones estimadas por la herramienta de Ericsson, las cuales servirán como referencia para medir la mejora del algoritmo aquí propuesto.
- **PROPAGATION_DELAY:** Se asigna un valor de propagation delay al evento MR más cercano en tiempo al verdadero evento PD. El resto de MRs tienen en este campo un valor por defecto de -1.
- **SERVING_SECTOR:** Si al MR se le ha asignado un valor de propagation delay, este campo incluirá el sector al que estaba relacionado el evento PD correspondiente.

En aras de la claridad, se puede observar un ejemplo representativo de las dos últimas columnas en la Fig.2.16. Todos los eventos que aparecen pertenecen a la misma llamada (*CALLID* = 6), pero solamente el primer MR tiene asignado un valor de Propagation Delay y Serving Sector. Normalmente, un PD se reporta al comienzo de la llamada derivando en que el primer MR de la llamada sea al que se le asocien estos valores.

2.3.2.3. Mapa y clutter

El mapa y su correspondiente clutter pueden ser facilitados por la herramienta de Ericsson denominada como ECO (*Ericsson Cell Optimizer*). En ese caso, se dispone de dos ficheros, un GRD y un CSV. El archivo GRD no es más que un contenedor que almacena los valores numéricos de un grid junto a sus coordenadas, en nuestro caso los valores numéricos hacen referencia al tipo de clutter asignado a ese píxel. Por su parte, el CSV nos traduce los identificadores numéricos del clutter y nos permite configurar algunas características, tal y como se muestra en la Fig.2.17.

	A	B	C	D	E	F	G
1	DESCRIPTION	CLUTTER	LOSS	R	G	B	WEIGHT
2	No Clutter Data	0	0	255	255	255	0
10	Forest	8	0	144	238	144	5
12	Suburban	10	15	244	164	96	20
13	Dense Urban Low	11	15	200	0	0	25

Figura 2.17: Archivo CSV con información del clutter.

Con respecto a algunas de las columnas del CSV,

- **CLUTTER:** Identificador numérico del tipo de clutter que es usado en el archivo GRD asociado.
- **LOSS:** Pérdidas de señal en dB que se le asignan a cada tipo de clutter. El ingeniero es el encargado de establecer estos valores en función de su conocimiento del terreno o de su experiencia.
- **R, G, B:** Hace referencia a los colores primarios rojo, verde y azul. Se utilizan en la representación visual para diferenciar por colores los tipos de clutter.
- **WEIGHT:** Peso que se le asigna a cada tipo de clutter para resaltar su importancia frente al resto. Se usa en el postproceso de ajuste por clutter. Ver Sección 2.3.5.2.

De forma supletoria y con objeto de evitar una completa dependencia con la herramienta ECO, también se ha implementado la posibilidad de generar una grid a medida sin clutter. Definiendo un vector con el número de píxeles [X Y] junto a los rangos de latitud y longitud de la zona de estudio, se genera una grid cuyos píxeles tienen un tamaño adaptado a los datos que se han definido previamente. A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se obtendría el tamaño del píxel, es decir, la resolución de nuestro mapa.

$$gridSize = [346 \quad 292]$$

$$rangeLongitude = [-99.2 \quad -99.18]$$

$$rangeLatitude = [19.422 \quad 19.442]$$

$$gapLon = \max(rangeLongitude) - \min(rangeLongitude) = 0.02$$

$$gapLat = \max(rangeLatitude) - \min(rangeLatitude) = 0.02$$

$$pixelLonSize = \frac{gapLon}{gridSize(1,1) - 1} = \frac{0.02}{345} = 0.00005797$$

$$pixelLatSize = \frac{gapLat}{gridSize(1,2) - 1} = \frac{0.02}{291} = 0.00006873$$

Entonces, usando [61], se comprueba que en esta situación tendríamos un píxel de aproximadamente 6 metros x 7.5 metros.

Por otro lado, hay que subrayar que la **elección del tamaño del píxel** tiene una implicación directa en el rendimiento de la herramienta híbrida de geolocalización. Es necesario buscar un compromiso entre la resolución que se quiere lograr y el tiempo computacional que se está dispuesto a tolerar. Asimismo, un tamaño de píxel excesivamente pequeño podría derivar en mapas de tráfico o señal con baja compactación debido a que hubiera píxeles en los que no se geolocalizase ningún evento.

De cualquier modo, se disponga de clutter —en cuyo caso hay que extraer la información del GRD y el CSV— o no, el mapa de píxeles se almacena en MATLAB dentro de una estructura denominada *pixel*. El clutter se almacenaría en otra estructura diferente llamada *clutter*.

2.3.2.4. Predicciones de señal generadas en ECO

ECO es una herramienta de optimización consumada que incluye entre sus funcionalidades la generación de predicciones de nivel de señal. En el supuesto de tener acceso a estas predicciones, se pueden incluir en nuestra herramienta híbrida de geolocalización. Las predicciones son generadas en un conjunto de archivos GRD que van relacionados dos a dos.

Por un lado, se tiene el número de capas o de profundidad (*N-Best Depth*) con el que las predicciones han sido calculadas, y que determina el número total de archivos. Las capas sirven para ordenar los sectores de más a menos fuertes por píxel. Por otro lado, en cada capa tenemos dos archivos, uno para indicar el sector de cada píxel y otro para indicar el nivel de señal predicho de ese sector en ese píxel. Si tenemos, por ejemplo, 20 capas, entonces tendremos 40 archivos. De este modo, cada píxel tendrá asociados 20 sectores. La capa 0 tendrá los sectores más fuertes por píxel y sus respectivos niveles de señal, la capa 1 tendrá el segundo sector más fuerte de cada píxel y sus respectivos niveles de señal, y así

sucesivamente. A continuación, en aras de la claridad, se listan los ficheros correspondientes a las capas 0 y 1 de un proyecto ECO. Los ficheros con las siglas *ID* son para indicar los sectores, mientras que los que tienen las siglas *SIG* contienen los niveles de señal.

Baseline.rf.dm.predictions-UMTS-850-1.RSSI.ID-0.grd

Baseline.rf.dm.predictions-UMTS-850-1.RSSI.SIG-0.grd

Baseline.rf.dm.predictions-UMTS-850-1.RSSI.ID-1.grd

Baseline.rf.dm.predictions-UMTS-850-1.RSSI.SIG-1.grd

Asimismo, durante el procesamiento de los archivos GRD en MATLAB **se añaden las pérdidas de señal acorde al tipo de clutter del píxel**. La idea es ajustar los niveles de señal predichos por ECO al entorno real en el que nos encontramos, de manera que si se analiza un píxel con tipo de clutter "urbano", los niveles de señal leídos del GRD se atenúen tantos dB como estuviera especificado en el CSV descrito en la Fig. 2.17. En forma de pseudocódigo, este comportamiento se puede modelar como

$$pixel.signalIn(i, j) = pixel.signalOut(i, j) - clutter.losses(clutter.value(i, j)) \quad (2.4)$$

Toda esta información se incluye como nuevos campos dentro de la estructura *pixel* ya creada en la Sección 2.3.2.3.

2.3.3. Preprocesos

2.3.3.1. Estimación analítica del nivel de señal

Uno de los puntos fuertes de esta herramienta híbrida de geolocalización debe ser su robustez frente a la información externa disponible. Por este motivo, se ha implementado un modelo alternativo de estimación del nivel de señal para garantizar el funcionamiento ante la posible ausencia de las predicciones provenientes de ECO.

Modelo de propagación

Se ha optado por emplear una **variante de Ericsson del modelo de propagación de Okumura-Hata** [62]. El método Okumura-Hata es semi-empírico y está basado en una extensa campaña de medidas llevadas a cabo en el área de Tokyo. Los resultados de estas medidas son una serie de curvas que proporcionan el nivel de atenuación media relativa al espacio libre, en función de la frecuencia, la distancia entre transmisor y receptor, la altura de las antenas de la estación base y la estación móvil, además de varios factores de corrección específicos para diferentes tipos de trayecto. Este modelo está considerado entre los más simples y mejores en términos de su precisión en el cálculo de las pérdidas en el

trayecto. Con el objetivo de hacer que este método fuera más fácil de aplicar, Hata estableció una serie de relaciones numéricas que describen el método gráfico propuesto por Okumura. Dichas expresiones son conocidas bajo el nombre de modelo de Okumura-Hata [63]. La expresión general del modelo viene dada por

$$L_b = 69.55 + 26.16\log(f) - 13.82\log(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55\log(h_b))\log(R) \quad (2.5)$$

donde L_b son las pérdidas de propagación, $a(h_m)$ es un factor de corrección que depende de la altura del dispositivo móvil, f es la frecuencia, h_b es la altura de la antena y R es la distancia.

La variante de Ericsson asume que $a(h_m)$ viene dado por el factor correspondiente a ciudades grandes y $f > 400$ MHz, es decir

$$a(h_m) = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97. \quad (2.6)$$

Además, se toma la altura del dispositivo móvil como 1.5 metros, lo que se traduce en una simplificación de la fórmula, ya que en ese caso $a(h_m)=0$.

Finalmente, el **modelo simplificado propuesto por Ericsson** queda definido como

$$L_b[dB] = A - 13.82\log(h_b) + (44.9 - 6.55\log(h_b))\log(R) \quad (2.7)$$

donde A es una constante dependiente de la frecuencia usada y del área (urbana, suburbana, rural o abierta). La Tabla 2.4 recoge los posibles valores proporcionados por Ericsson para esta constante.

Tabla 2.4: Constante A en la variante de Okumura-Hata propuesta por Ericsson.

Entorno	Frecuencia [MHz]								
	700	800	850	900	1700	1800	1900	2100	2300
Urbano	144.3	145.6	146.2	146.8	153.2	154.3	154.3	155.1	156.3
Suburbano	133.5	135.3	136.1	136.9	145.4	146.2	146.9	147.9	149.5
Rural	125.1	126.4	127	127.5	133.6	134.1	134.6	135.3	136.4
Abierto	116.1	117.3	117.8	118.3	123.8	124.3	124.8	125.4	126.4

Ganancia de la antena

El modelo de ganancia de las antenas que se ha implementado está basado en [64], donde se propone combinar el patrón de radiación horizontal y vertical. La idea de incluir el plano vertical es debido a que las estaciones base suelen tener directividad en este eje. De hecho,

una inclinación hacia abajo de la antena puede ser en ocasiones una manera eficiente de reducir las interferencias entre sectores y, por consiguiente, aumentar la capacidad.

Por un lado, el modelo de **ganancia horizontal** viene dado por

$$G_h(\varphi)[dB] = -\min\left(12\left(\frac{\varphi}{HPBW_h}\right)^2, FBR_h\right) + G_m \quad (2.8)$$

siendo *HPBW* (*Half Power BeamWidth*) el ancho de haz a 3 dB, *FBR* (*Front to Back Ratio*) la relación delante-atrás, y G_m la ganancia máxima.

Por otro lado, el modelo de **ganancia vertical** se puede escribir como

$$G_v(\theta)[dB] = \max\left(-12\left(\frac{\theta - \theta_{etilt}}{HPBW_v}\right)^2, SLL_v\right) \quad (2.9)$$

siendo θ_{etilt} el ángulo del tilt eléctrico, y *SLL* (*Side Lobe Level*) la relación de lóbulo principal a secundario.

Finalmente, ambas componentes de ganancia sumadas estiman la **ganancia total**:

$$G(\varphi, \theta) = G(\varphi) + G_v(\theta). \quad (2.10)$$

El problema de este modelo es que se requieren detalles de las antenas desplegadas en los Nodos B. Desgraciadamente, este tipo de información no suele estar disponible, por lo que se opta por usar un set de valores por defecto para todas las antenas de la zona. Por supuesto, estos valores son editables por el usuario, de manera que se otorga de flexibilidad a la herramienta.

Un último apunte antes de continuar. En el caso de **antenas omnidireccionales** —una antena se considera omnidireccional cuando solo hay un sector en un site— la ganancia horizontal es constante en todo el plano horizontal e igual a la ganancia máxima (G_m).

Nivel de señal estimado

Previamente se ha analizado como obtener las pérdidas de propagación y la ganancia de las antenas, por lo que ya se dispone de todos los ingredientes necesarios para estimar el nivel de señal de cada sector en cada píxel. Bastaría con aplicar la siguiente expresión:

$$receivedPowerDL [dBm] = sector.CPICH [dBm] + G [dB] - L_b [dB]. \quad (2.11)$$

Los N mejores sectores

Al igual que sucede cuando leemos las predicciones de señal de los archivos ECO, hace falta establecer cuántos niveles de profundidad tendrá cada píxel. En otras palabras, cuántos sectores tendrá asociado cada píxel, estando éstos ordenados de mayor a menor nivel de señal. Esta profundidad queda fijada por un parámetro denominado *maxNBestDepth*. Particularmente, la primera capa o primer nivel de profundidad representa el sector más fuerte en cada píxel.

Para concluir, la Fig.2.18 muestra la estimación de nivel de señal (RSCP) de la primera capa aplicando el modelo descrito en esta sección sobre una red real.

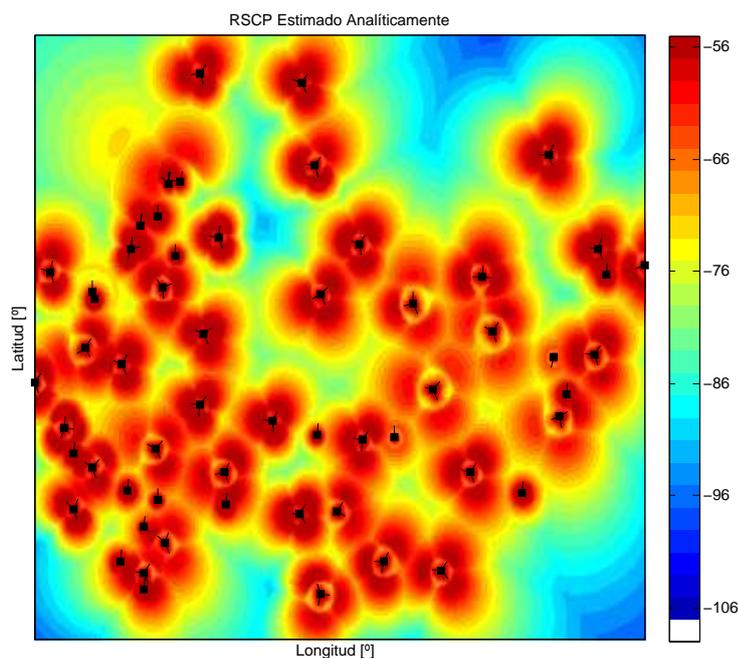


Figura 2.18: RSCP [dBm] estimado en una red real.

2.3.3.2. Distancia inter-site

La distancia inter-site es una medida que evalúa **la densidad de sites de la red móvil** bajo estudio. Este parámetro es de gran utilidad para que los algoritmos se adapten automáticamente en función de las condiciones del escenario. Es importante tener en cuenta que no se pueden aplicar exactamente las mismas lógicas con los mismos valores a escenarios distintos, como pueden ser una zona urbana y una rural. Incluso en dos escenarios similares, la distancia inter-site nos ofrece ese grado de sutil variabilidad o ajuste fino.

Para el cálculo de la distancia inter-site se ha definido una variable configurable por el usuario. Esta variable, *numberNeighbourSites*, hace referencia al número de sites vecinos

que se quiere considerar para computar la distancia inter-site de cada site. Con esta consideración, el procedimiento se resume en el Algoritmo 2.1.

Algoritmo 2.1 Cálculo de la distancia inter-site.

```
for  $i = 1 : \text{sector.numberOfSectors}$  do  
  calcular las distancias del sector  $i$  con el resto de sectores  
  filtrar sectores del mismo site que el sector  $i$   
  filtrar las distancias repetidas  
  ordenar de menor a mayor las distancias  
   $\text{sector.intersiteDistance}(i) = \text{media de las } \text{numberNeighbourSites} \text{ menores}$   
end for
```

2.3.3.3. Área de cobertura por sector

Dentro del área cubierta por la red móvil bajo análisis, cada sector tendrá limitada su influencia a una zona de cobertura. Esta zona no es más que un conjunto de píxeles en los que un evento reportando ese sector puede ser posicionado. El procedimiento consiste en computar para cada sector una matriz o mapa de píxeles con valores 1 (píxel dentro de la zona de cobertura) ó 0 (píxel fuera de la zona de cobertura), justo como se representa en la Fig.2.19, donde los píxeles rojos caracterizan el área válida para esa celda.

La **apertura** de la zona de cobertura por ambos flancos viene fijada por la mitad de la distancia angular entre los azimuts de los sectores colindantes y el del propio sector. Para la **distancia máxima** en la dirección radial se ha optado por tomar el caso peor de la distancia inter-site, es decir, la mayor de todos los sectores del conjunto de datos (*dataset*). Finalmente, un resumen del procedimiento en pseudocódigo es mostrado en Algoritmo 2.2.

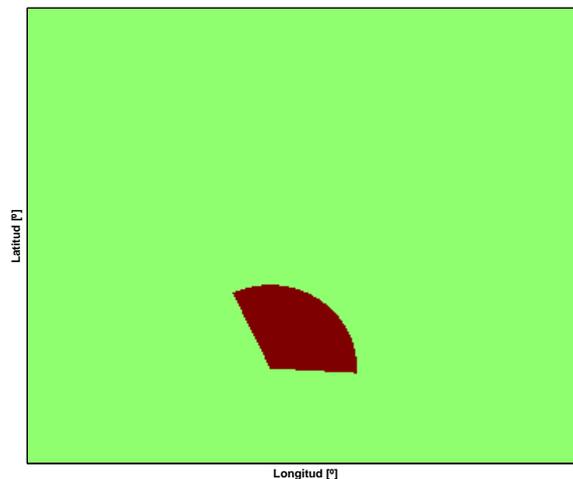


Figura 2.19: Zona de cobertura de un sector.

Algoritmo 2.2 Definir la zona de cobertura por sector

```
maxDistance = max(sector.intersiteDistance)
for i = 1 : sector.numberOfSectors do
  calcular los ángulos de apertura
  for j = 1 : pixel.axisX do
    for k = 1 : pixel.axisY do
      d = distancia del sector al píxel
      alfa = ángulo entre el sector y el píxel

      if (alfa dentro de los ángulos de apertura) & (d < maxDistance) then
        sector.validPixel { i } ( j, k ) = 1
      else
        sector.validPixel { i } ( j, k ) = 0
      end if
    end for
  end for
end for
```

2.3.4. Geolocalización

2.3.4.1. Measurement Report (MR)

La geolocalización de un *Measurement Report* puede ser abordada desde distintas perspectivas dependiendo el enfoque que se quiera seguir y la fuente de información que se quiera usar. En nuestro caso, se ha optado por seguir un camino innovador que trata de combinar estas diferentes alternativas para aprovechar al máximo toda la información disponible. Concretamente, se postulan tres componentes para sustentar la estimación de la posición del MR: el **centroide** de los sites reportados, el **azimut** de los sites reportados y el **nivel de señal** medido.

Por otra parte, los procedimientos "Azimut" y "Nivel de señal" que se detallan a continuación varían ligeramente según el número de sites diferentes que son reportados en el MR. **Se distinguen tres casos: 1 site, 2 sites, y 3 o más sites reportados.** En consecuencia, el primer detalle a señalar es que hay un prefiltrado de medidas con el objetivo de eliminar aquellas menos relevantes o que pudiesen inducir más error. Por ello, se define una variable llamada **profundidad** para cada uno de estos tres casos que indica con cuántas medidas del MR nos queremos quedar para geolocalizar, siempre partiendo de la premisa de que las que se descarten serán las de menor nivel de señal. Por defecto, si reportamos 1 site nos quedaremos con todas las medidas (no hay *profundidad*), si reportamos 2 sites nos quedaremos con las 2 mejores (*profundidad* = 2), y si hay 3 o más sites nos quedaremos con las 3 mejores medidas (*profundidad* = 3).

Centroide

El centroide es un punto que establece el centro geométrico o punto de equilibrio de un polígono. En nuestro contexto, **el polígono se define por la posición de los Nodos B** reportados en el MR, ya que actúan como los vértices del mismo. Matemáticamente, la posición del centroide (x_c, y_c) se puede representar como

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_{s_i}}{N} \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^N y_{s_i}}{N}, \quad (2.12)$$

donde $[\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s]$ son dos vectores que representan las coordenadas x e y de los sites, mientras que N es el número de sectores reportados en el MR.

El centroide se puede catalogar como un indicador aproximado y sencillo de la localización del evento, puesto que tiene en cuenta solamente la posición de los sectores medidos. Idealmente, el sentido común dice que un evento que es capaz de medir un grupo de sectores debe encontrarse en un punto intermedio entre estos sectores. Este es el significado físico que justifica el centroide como método de geolocalización.

Uno de los aspectos a destacar del centroide es que se calcula teniendo en cuenta los sectores, de forma que un site será tenido en cuenta tantas veces como sectores pertenecientes a ese site hayan sido reportados. Esto hace que la posición del centroide tienda a desplazarse hacia el site del que se recibe más medidas.

En cuanto a la generación de mapas, el centroide presenta el problema de que todos los eventos que reportan el mismo conjunto de sectores acaban siendo geolocalizados exactamente en el mismo punto. Esta circunstancia se traduce en mapas altamente despoblados. Por este motivo, se ha incluido una **componente aleatoria** en las coordenadas del centroide para distribuir uniformemente los eventos geolocalizados por un área limitada. Asimismo, se contribuye a que eventos que reporten un solo site no sean geolocalizados en las propias coordenadas del site. Entonces, el resultado viene dado por

$$x_c = x_c + \frac{\sum_{i=1}^N ISD_i}{N} \cdot U(-0.5, 0.5) \quad y_c = y_c + \frac{\sum_{i=1}^N ISD_i}{N} \cdot U(-0.5, 0.5), \quad (2.13)$$

siendo ISD la distancia inter-site, y U una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo (A, B) .

Azimut

El azimut pretende compensar algunas de las debilidades del centroide básico al mismo tiempo que se dota de más inteligencia a la geolocalización. Por ejemplo, en la Fig. 2.20 se ilustra el caso de un MR reportando el sector 1 de los sites A y B, donde el centroide cometería un excesivo error en su estimación de la posición real. La causa es que el centroide básico no aporta información sobre la dirección, cosa que sí hace el azimut.

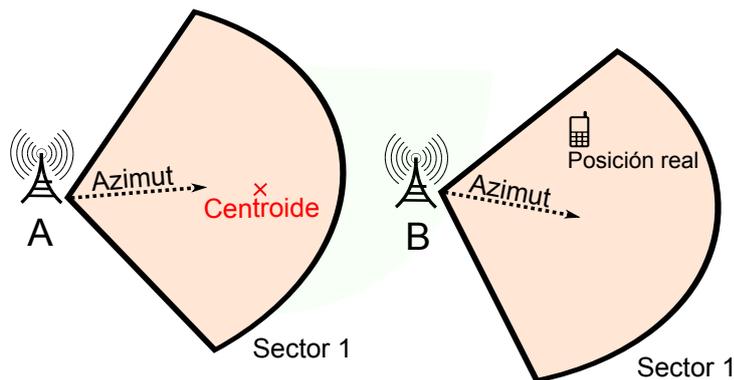


Figura 2.20: Situación adversa para el centroide.

El desarrollo implementado para considerar el azimut como elemento de apoyo a la geolocalización se describe en el Algoritmo 2.3. Fundamentalmente se basa en calcular un **centroide a partir de vértices virtuales obtenidos de los azimuts** de los sectores reportados en el MR. En primer lugar, se fija la variable *porcentajeISD* (por defecto, 0.4) para indicar qué porcentaje de la distancia inter-site del sector con más nivel de señal se quiere emplear a la hora de establecer los vértices virtuales. Esta operación da como resultado el *desplazamiento*.

Algoritmo 2.3 Procedimiento de geolocalización basado en el azimut.

$desplazamiento = porcentajeISD * (sectorsReported.intersiteDistance(1))$

```

for i = 1 : profundidad do
  calcular azimut virtual para el sector i
  calcular vértice virtual para el sector i
end for

```

calcular centroide con vértices virtuales

En segundo lugar, se obtienen los **azimuts virtuales**. Como ya se comentó en el procedimiento "Centroide", la incorporación de una componente aleatoria es necesaria para diseminar los eventos y evitar la baja densidad de los mapas. Por tanto, lo que se hace es calcular un azimut virtual a partir del azimut real del sector y de una distribución uniforme:

$$AzimutVirtual = AzimutReal + U(-40, 40), \quad (2.14)$$

estando todas las unidades en grados.

A continuación, las coordenadas de un vértice virtual (x_v, y_v) se computan como un punto separado una distancia igual a *desplazamiento* desde la posición del sector y en la dirección del azimut virtual. Entonces, a partir de la ecuación de la recta se puede lograr

$$x_v = \frac{\text{desplazamiento}}{\sqrt{\text{AzimutVirtual}^2 + 1}} + x_s \tag{2.15}$$

$$y_v = y_s + \text{AzimutVirtual} \cdot (x_v - x_s) . \tag{2.16}$$

Finalmente, se utiliza la fórmula del centroide representada en la Ec. (2.12). En aras de la claridad, la Fig.2.21 muestra el ejemplo de este procedimiento a partir de un MR que reporta 3 sectores (sectores 1 y 2 del site B, y sector 1 del site A).

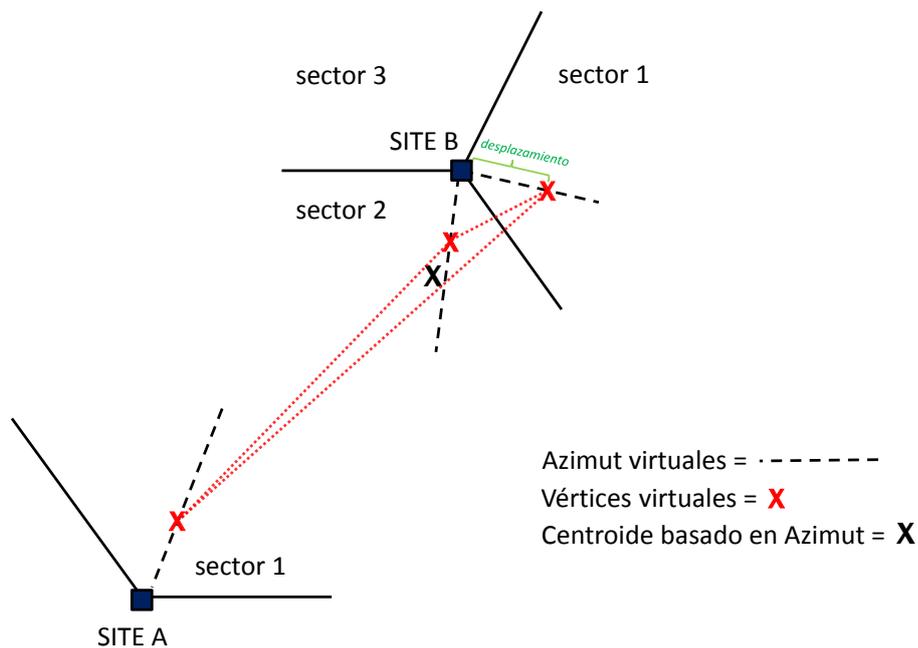


Figura 2.21: Procedimiento de geolocalización basado en azimut.

Nivel de señal

Otro elemento que nos aporta información acerca de la posible ubicación de un evento es el nivel de señal medido. En este caso, la idea consiste en **encontrar un conjunto de píxeles que cumplan las condiciones de señal** para ser considerados como candidatos de albergar la posición del MR. El proceso se resume en forma de pseudocódigo en el Algoritmo 2.4 y se representa en la Fig.2.22.

Algoritmo 2.4 Geolocalización basada en el nivel de señal.

```

if solo 1 site reportado en el MR then
    validPixels = zona de cobertura del sector más fuerte
else
    validPixels = intersección de las zonas de cobertura de los sectores reportados
end if

inicializar margenDeError

for i = 1 : profundidad do
    for j = 1 : pixel.axisX do
        for k = 1 : pixel.axisY do
            if ( abs( sector.signal ( j, k ) - event.signal ( i ) ) > margenDeError ) then
                validPixels ( j, k ) = 0
            end if
        end for
    end for
end for

posición estimada ( xs, ys ) = media( píxeles ( j, k ) en los que validPixels = 1 )
    
```

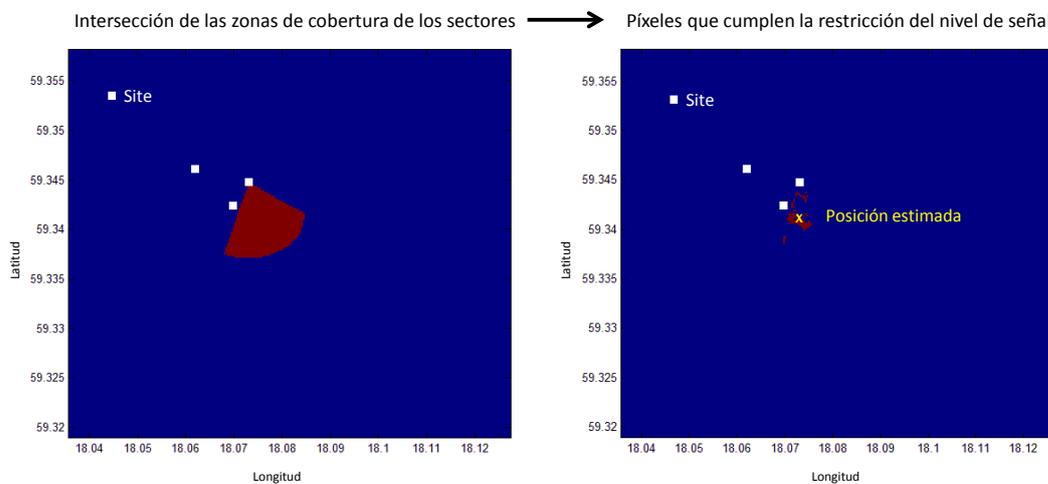


Figura 2.22: Geolocalización basada en el nivel de señal. Los píxeles rojos representan los píxeles candidatos o válidos. La primera selección se realiza mediante la intersección de zonas de cobertura (figura de la izquierda), y la segunda a través de la discrepancia de nivel de señal medido y estimado (figura de la derecha). Después, la posición estimada viene dada por la posición media de los píxeles subsistentes.

El primer paso consiste en inicializar los píxeles candidatos a partir de las **zonas de cobertura** calculadas en la Sección 2.3.3.3 para los sectores que hayan sido reportados en el MR correspondiente. De este modo, solamente los píxeles que son cubiertos por todos los sectores son considerados, mientras que el resto son directamente descartados.

A continuación, se define la variable *margenDeError* en decibelios (por defecto, 15 dB). Entonces, todos los píxeles cuya estimación de señal asociada —ya sea proveniente del modelo analítico o de ECO— difiera del nivel de señal real medido una cantidad superior a la marcada por este parámetro serán descartados como píxeles válidos para la geolocalización del evento. El objetivo es buscar zonas en las que las predicciones de señal y las medidas reales coincidan, pero dando un margen de error suficiente para tener en cuenta las aproximaciones y no idealidades del problema.

Al final, solamente deben quedar aquellos píxeles que han cumplido las restricciones impuestas. La posición media de estos píxeles da como resultado la posición estimada. En caso de no haber ningún píxel candidato, el evento se descarta y no es geolocalizado ni por este procedimiento ni por ninguno de los anteriores.

Combinación de los procedimientos

En los apartados previos se han detallado tres procedimientos para obtener diferentes estimaciones de la localización de un evento MR. Cada uno de ellos se asienta sobre un aspecto concreto de la red, véase la topología (centroide), el diseño (orientación de los azimuts) y la propagación de RF. Como se puede presuponer, ninguno de estos métodos es siempre mejor a los otros dos bajo cualquier circunstancia. Por esta razón, el siguiente paso es combinar sus resultados a efectos de lograr una posición final que haya tenido en cuenta, de una manera u otra, todas las fuentes de información.

El **algoritmo de agregación de los procedimientos**, el cual se muestra en Algoritmo 2.5, es solo una propuesta heurística basada en la experiencia adquirida a través del trabajo desarrollado con el conjunto de datos proporcionados por Ericsson. Por tanto, un ingeniero podría añadir, ajustar o eliminar alguno de los pesos empleados en Algoritmo 2.5 en función de su conocimiento del entorno y del escenario, de manera que se le diese más relevancia a una componente que a otra bajo ciertas condiciones. Este hecho aporta flexibilidad a la herramienta híbrida de geolocalización haciéndola adaptable en ámbitos diversos.

Algoritmo 2.5 Combinación de procedimientos para localizar un MR.

(x_c, y_c) = estimación dada por el centroide

(x_a, y_a) = estimación dada por el azimut

(x_s, y_s) = estimación dada por el nivel de señal

if $(x_s, y_s) \neq \text{NULO}$ **then**

if solo 1 site reportado en el MR **then**

if (distancia entre (x_a, y_a) y (x_s, y_s)) > (*sectorsReported.intersiteDistance(1)*) **then**

$$(x_{MR}, y_{MR}) = \frac{1}{4} \cdot (x_s, y_s) + \frac{3}{4} \cdot (x_a, y_a)$$

else

$$(x_{MR}, y_{MR}) = \frac{1}{2} \cdot (x_s, y_s) + \frac{1}{2} \cdot (x_a, y_a)$$

end if

else if solo 2 sites reportados en el MR **then**

if (x_c, y_c) cae fuera de los ángulos de apertura de los sectores reportados **then**

(x_c, y_c) = coordenadas del sector servidor

end if

$$(x_{MR}, y_{MR}) = \frac{1}{3} \cdot (x_s, y_s) + \frac{1}{3} \cdot (x_a, y_a) + \frac{1}{3} \cdot (x_c, y_c)$$

else

if (x_c, y_c) cae fuera de los ángulos de apertura de los sectores reportados **then**

$$(x_{MR}, y_{MR}) = \frac{2}{3} \cdot (x_s, y_s) + \frac{1}{3} \cdot (x_a, y_a)$$

else

$$(x_{MR}, y_{MR}) = \frac{1}{2} \cdot (x_s, y_s) + \frac{1}{4} \cdot (x_a, y_a) + \frac{1}{4} \cdot (x_c, y_c)$$

end if

end if

end if

2.3.4.2. Filtro de suavizado (Smoother)

Hasta este punto los MRs han sido geolocalizados independientemente, como si se trataran de entes aislados. Sin embargo, la realidad es que esto no es cierto, ya que **los eventos forman parte de una entidad superior que es la llamada**. Durante una llamada se pueden haber producido uno o varios MRs, todo dependerá de las condiciones radio del usuario y del modo de configuración (por evento o periódico). En cualquier caso, es necesario añadir alguna lógica que sintonice la posición de los eventos asociados a una llamada con el objetivo de darle coherencia global a la posición del usuario durante la duración de la misma.

En esta herramienta se ha implementado un **filtro de suavizado** al que también nos referiremos como smoother. Dicho de otro modo, este filtro es simplemente una forma de hacer un seguimiento del movimiento de la llamada suavizando su trayectoria. Hay métodos ampliamente conocidos cuya función es precisamente esta, véase el filtro de Kalman. Sin embargo, aquí se ha optado por un método más sencillo, puesto que al tener que aplicarse sobre millones de eventos, el tiempo de procesado juega un papel significativo. Además, la mayoría de llamadas no tienden a tener demasiados eventos, lo que hace que un algoritmo muy elaborado tampoco aporte una ganancia adicional.

Otro objetivo del smoother es darle una posición a algunos de los MRs que se han quedado sin geolocalizar porque no cumplieron la condición de tener píxeles válidos cuando se aplicó el procedimiento "Nivel de Señal". De este modo, esos eventos, que parecían tener medidas poco fiables, tienen una segunda oportunidad de ser posicionados a través de eventos más estables dentro de la misma llamada.

La idea es determinar una **ventana temporal adaptativa** que dependa de la duración de la llamada y de un parámetro configurable por el usuario denominado *adaptiveWindow*. Por defecto, se escoge una ventana que sea el 50% ($adaptiveWindow = 0.5$) de la duración total. Esta ventana se va desplazando y centrando en cada uno de los eventos de la llamada para promediar la posición de todos aquellos eventos ya geolocalizados que se encuentran dentro del rango temporal. Finalmente, este promedio es la nueva posición para ese evento. La Fig. 2.23 muestra un ejemplo visual del comportamiento de la ventana temporal adaptativa del smoother, donde la nueva posición del evento (6) en el que se encuentra la ventana será el promedio de las posiciones de los eventos dentro de la misma (4, 5, 6, 7, 8, 9).

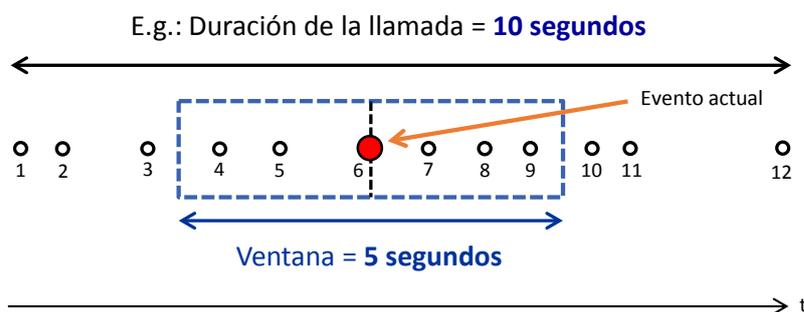


Figura 2.23: Ventana temporal adaptativa del smoother.

2.3.4.3. Ajuste de eventos MR mediante los valores de PD

Los eventos *Propagation Delay* son un elemento opcional dentro del método híbrido de geolocalización, ya que no son estrictamente necesarios para la generación de mapas geolocalizados. No obstante, es altamente recomendable su utilización porque complementan la información de geolocalización proporcionada por los MRs. **El PD sirve para fijar una corona circular alrededor del site** a través de la medida del retardo de propagación de la señales intercambiadas entre el Nodo B y el UE. Esta corona circular tendrá una precisión de 3 chips, tal y como se detalló en la Sección 2.2.1.1. Pese a todo, se debe tener en cuenta el caso en el que estos eventos puedan no estar a disposición del ingeniero, ya sea porque en el perfil de recolección de la OSS (*Operation Support System*) no estén incluidos, o bien porque se esté empleando como fuente de información un escáner en lugar de trazas. Un escáner no es más que un dispositivo móvil que mide y registra ciertos indicadores de la red móvil para que las operadoras puedan llevar a cabo pruebas en campo y garantizar la calidad de su red.

Entonces, en el supuesto de que se dispongan de **eventos PD**, se puede aprovechar esta información extra **para refinar la localización de los MRs**. El punto de partida es la asignación del valor de PD al MR más cercano en tiempo dentro de la misma llamada. Este proceso se realiza en una etapa previa de la herramienta (ver Sección 2.3.2.2).

Según esto, se analizan los MRs con PD asignado comprobando la posición del evento MR con respecto a la corona circular establecida por su correspondiente PD. Se distinguen cuatro posibles casos, los cuales se muestran en la Fig. 2.24 y se describen a continuación:

- a) **El MR está geolocalizado y cae fuera de la corona circular por la parte exterior** → Se ajusta la posición del MR forzándola al punto más cercano del límite exterior de la corona circular.
- b) **El MR está geolocalizado y cae fuera de la corona circular por la parte interior** → Se ajusta la posición del MR forzándola al punto más cercano del límite interior de la corona circular.
- c) **El MR no está geolocalizado** → Se posiciona el MR en mitad de la corona circular en la dirección del azimut de la celda servidora.
- d) **El MR está geolocalizado y cae dentro de la corona circular** → No se hace nada.

La rectificación de la posición de algunos de los MRs implica plantearse qué hacer con el resto de eventos de la llamada. Una opción sería no realizar ninguna operación con ellos, pero resultaría poco coherente haber desplazado ciertos eventos de una llamada y dejar el resto estancados a riesgo de perder la congruencia del movimiento del usuario. Con el fin de evitar esta inconsistencia, se define el parámetro *shiftPercentage* para establecer qué porcentaje del movimiento sufrido por el MR va a ser aplicado sobre los demás eventos de la llamada, tal y como se muestra en la Fig. 2.25. En otras palabras, si el MR con PD había sido desplazado X metros en la dirección Y , el resto de eventos de la llamada son desplazados $X * \text{shiftPercentage}$ metros también en la dirección Y . Por defecto, el parámetro

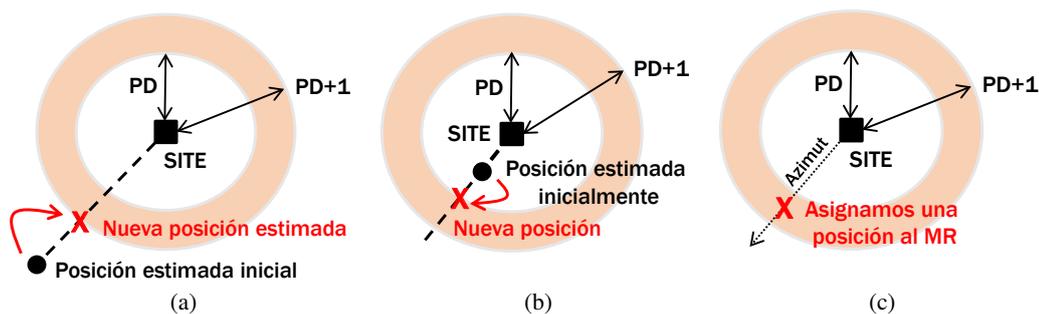


Figura 2.24: Uso del PD para refinar la posición del MR. Se muestran tres de las cuatro posibles situaciones, en concreto aquellas donde se lleva a cabo una acción sobre la posición del MR. (a) MR inicialmente en la parte exterior de la corona circular; (b) MR inicialmente en la parte interior de la corona circular; (c) MR no geolocalizado previamente.

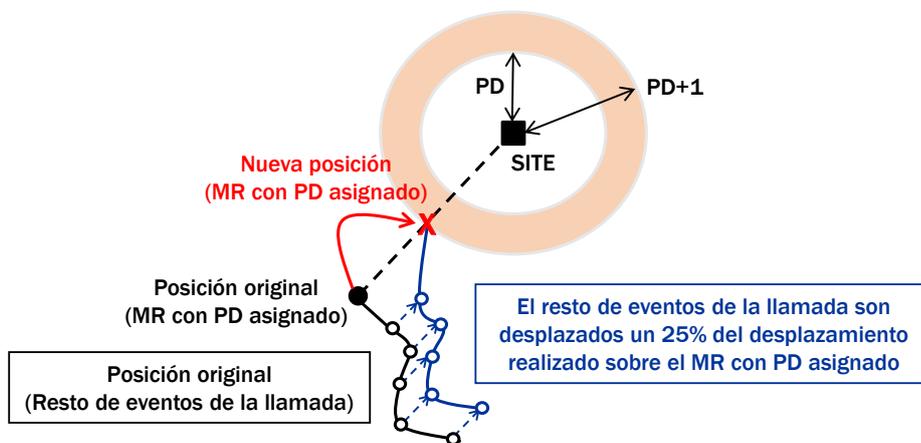


Figura 2.25: Corrección de la posición de MRs sin PD asignado.

shiftPercentage se fija heurísticamente al 25% con el propósito de buscar un compromiso entre las posiciones estimadas previamente y el ajuste realizado en base al PD. Se debe tener en cuenta que estos eventos que se desplazan pueden haber sido reportados varios segundos, o incluso minutos, después que el evento MR al que se asoció el valor del PD. Por este motivo, junto a las diferentes pruebas realizadas durante la investigación y la preferencia de un modelo simple, se justifica la propuesta heurística del 25%. No obstante, modelos más complejos basados en la diferencia de tiempo entre eventos pueden ser planteados como una futura mejora a la hora de decidir el desplazamiento que se aplica sobre cada evento.

En caso de tener más de un MR con PD asignado dentro de la misma llamada, el procedimiento desarrollado consiste en dividir la llamada en tramos acorde a su evolución temporal. Cada tramo estará encabezado por uno de los MR con PD asignado y se prolongará hasta la ocurrencia del siguiente, abarcando todos los eventos dentro de ese intervalo.

2.3.4.4. Posicionamiento de los eventos Propagation Delay (PD)

Llegados a este punto los eventos MRs están finalmente geolocalizados. Sin embargo, a los eventos PD todavía no se les ha asignado una posición pese a que la información contenida en ellos ha servido de apoyo para refinar la localización de los MRs. Por tanto, **el objetivo de esta etapa es precisamente posicionar los PDs.**

La mejor forma de minimizar el error al posicionar los PDs es tratar de apuntar al punto medio de la zona de incertidumbre que define el propio evento, es decir, el centro de la corona circular definida por el PD en la dirección del azimut del sector reportado. Este es un buen primer paso, pero se puede ir un poco más allá aprovechando la localización del MR con PD —eje central de la sección anterior— para afinar la dirección y la distancia hacia la que debe encontrarse la posición real. De este modo, el método estriba en calcular la **posición media entre el centro de la corona circular y el MR con PD** para determinar una ubicación donde geolocalizar el evento PD. El concepto se resume en la Fig. 2.26.

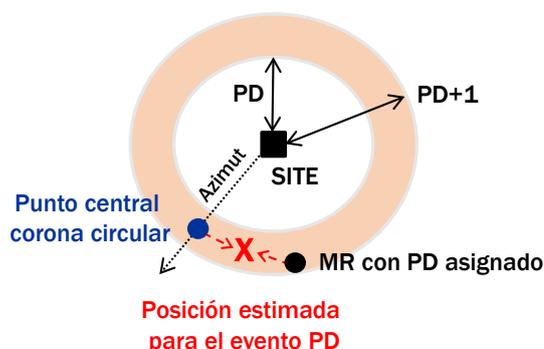


Figura 2.26: Geolocalización de eventos PD.

2.3.5. Postprocesos

2.3.5.1. Discretización

Hasta este momento se ha trabajado y operado con coordenadas espaciales continuas (latitud y longitud) para lograr la mayor precisión posible durante el proceso de geolocalización. Ahora, se necesita traducir esta información a un mapa especificado por una resolución espacial que viene dada por el tamaño del píxel. Para ello, se realiza una **conversión de las coordenadas geográficas (latitud y longitud) a las coordenadas discretas (píxeles)**. Por definición, este proceso de discretización implica una pérdida de precisión.

Partiendo de que ya tenemos definidos los píxeles por su tamaño y las coordenadas de su punto central, la conversión se basa en buscar dentro de qué píxel caen las posiciones de los eventos geolocalizados. De esta forma, a cada evento (MR o PD) se le asigna un determinado píxel. En caso de que la geolocalización de un evento no caiga dentro de ningún píxel, se descarta el evento.

2.3.5.2. Ajuste por clutter

Opcionalmente, se puede incluir un procedimiento para ajustar la posición de los eventos basándose en los tipos de clutter, sus pesos asociados y las pérdidas de señal asignadas (ver Sección 2.3.2.3). El motivo de que sea opcional es que **se necesita un clutter de alta resolución, bien clasificado y con pesos acordes a la realidad** con el fin de evitar distorsionar la geolocalización conseguida hasta ahora. La resolución es un dato de entrada externo, al igual que la clasificación. Sin embargo, la asignación de los pesos y las pérdidas es responsabilidad del ingeniero, quien debe conocer la región para ser capaz de evaluar los tipos de clutter en consonancia con la cantidad de usuarios que se esperaría encontrar en ellos.

La metodología detrás de este proceso queda ilustrada en la Fig.2.27. La idea es **multiplicar tres matrices por evento con el objetivo de calcular un peso para los píxeles candidatos donde el evento puede ser reubicado**. La primera matriz, *validPixels*, proviene del apartado "Nivel de Señal" de la Sección 2.3.4.1. Esta matriz indica con un "1" los píxeles que no sobrepasan la discrepancia entre el nivel de señal predicho y el medido en el evento, y con un "0" los píxeles que no cumplen la restricción.

La matriz de **pesos del clutter** hace referencia a los pesos extraídos del CSV descrito en la Sección 2.3.2.3. Por ejemplo, en la figura de abajo se observan 5 colores que podrían pertenecer a los siguientes tipos de clutter: bloque de edificios (rojo oscuro), urbano (rojo), suburbano (amarillo), parque (verde) y agua (azul). Los pesos asociados siguen el sentido común, ya que en principio se espera que no haya usuarios en el agua, o que haya muchos más usuarios en zona urbana que en el parque.

Por último, la matriz de la **posición original** es una forma de darle más valor o importancia a la posición geolocalizada que se toma como partida, e ir reduciendo ese valor conforme nos alejamos del punto inicial. Para ello, se emplea la siguiente expresión:

$$weight(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } (posPixX, posPixY) = (i, j) \\ 1/\sqrt{(posPixX - i)^2 + (posPixY - j)^2} & \text{resto} \end{cases}$$

siendo (i, j) números enteros que representan los píxeles x e y respectivamente, y $posPixX$ y $PosPixY$ los índices x e y del píxel donde originalmente estaba el evento.

Una vez computada la matriz de pesos final, hay que seleccionar en qué píxel se posiciona el evento finalmente. Una opción sería elegir el píxel con peso más alto, pero esto podría conducir a que todos los eventos acabaran geolocalizados en edificios, ya que normalmente estas zonas tienen el peso más grande. En su lugar, se ha optado por emplear un peso acumulado y normalizado para cada píxel. Haciendo referencia al ejemplo de la Fig.2.27, y recorriendo la matriz de arriba a abajo y de izquierda a derecha, los pesos acumulados y normalizados serían: 0.143, 0.328, 0.335, 0.341, 0.629, 0.766, 0.862 y 1. A continuación, se calcula un número aleatorio comprendido entre 0 y 1. El píxel cuyo peso acumulado esté justo por encima de ese número aleatorio será el seleccionado.

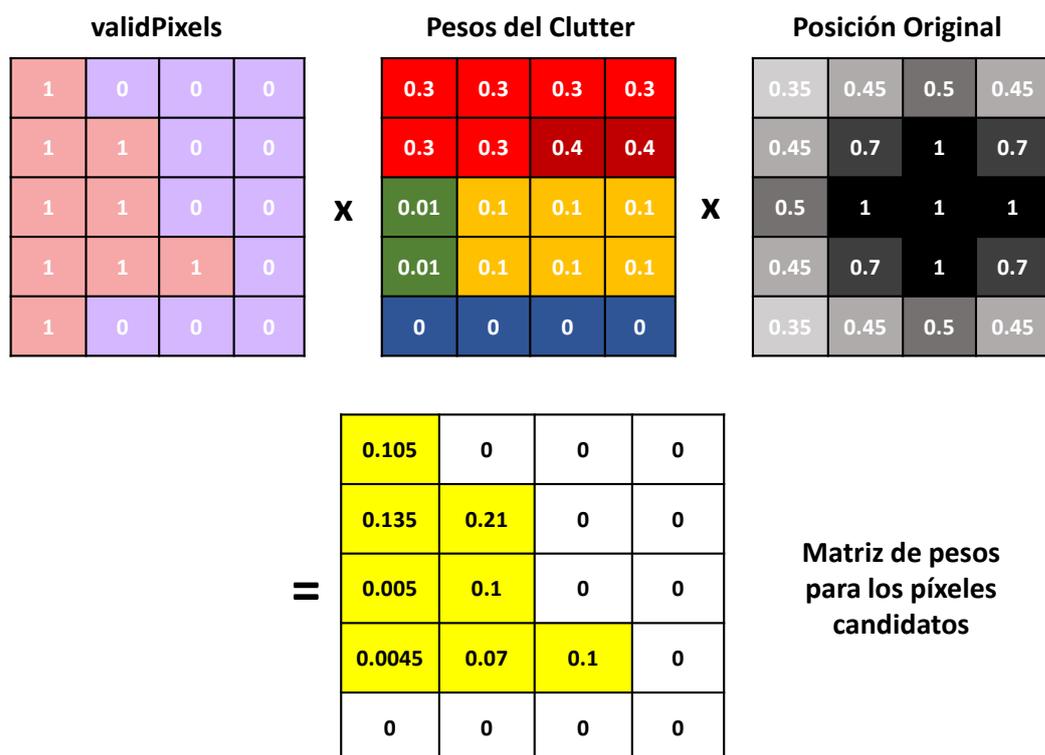


Figura 2.27: Ejemplo de la metodología seguida al ajustar por tipo de clutter la posición de un evento ya geolocalizado.

2.3.5.3. Generación de mapas

El modo de generar los mapas a partir de los eventos geolocalizados depende en gran medida del problema que se quiere abordar o de la perspectiva de la red que se quiere analizar. La información geolocalizada se puede conformar, combinar o filtrar siguiendo diferentes enfoques y técnicas con el propósito de revelar, de una forma visual, algún aspecto de la red que sea de utilidad para el ingeniero.

En esta herramienta híbrida de geolocalización se han incluido, por defecto, dos tipos de mapas geolocalizados, a los que también nos referiremos genéricamente con el término **rásters** de ahora en adelante. Ambos mapas representan resultados que han sido elegidos como respuesta a las necesidades de los ingenieros de Ericsson a la hora de llevar a cabo tareas de optimización, ya que aportan información valiosa al diseccionar el estado de la red móvil. Por un lado, se ha implementado un **ráster de nivel de señal** y, por otro lado, un **ráster de mejor celda servidora (Best Server)**.

La generación de los dos mapas sigue un procedimiento idéntico basado en la **mediana** como estimador a nivel de sector por píxel. Esta elección pretende evitar el efecto de valo-

res extremos en las medidas de señal que puedan ser consecuencia de una geolocalización incorrecta, o que puedan provenir simplemente de errores en las medidas de los terminales móviles. Siguiendo con este razonamiento, también se filtran en cada píxel las medidas pertenecientes a sectores que no hayan sido reportados, al menos, la mitad de las veces que lo ha sido el sector más reportado dentro de ese píxel. De esta manera, se eliminan potenciales sectores "ruidosos" que no son estadísticamente relevantes en comparación a otros dentro del píxel. Finalmente, el valor de señal más alto es el que se le asigna al píxel —compone la primera capa del ráster del nivel de señal—, junto al sector correspondiente para generar el ráster de *best server*. Para mayor claridad, el proceso completo se detalla en Algoritmo 2.6 en formato de pseudocódigo.

Algoritmo 2.6 Generación de rásters.

```

for  $i = 1 : numOfPixels$  do
  if  $numOfEvents > 0$  then

     $numOfSignals = zeros( numOfSectors, 1 )$ 
     $signalMatrix = ones( numOfSectors, numOfEvents ) * -200$ 

    for  $j = 1 : numOfEvents$  do

       $reportedSectors =$  sectores reportados por el evento  $j$ 
      incrementar  $numOfSignals$  para  $reportedSectors$ 
      incluir niveles de señal del evento  $j$  en  $signalMatrix( reportedSectors, j )$ 

    end for

     $validSectors =$  sectores en los que  $numOfSignals > max( numOfSignals ) / 2$ 
     $medSignal =$  calcular la mediana por sector para  $validSectors$ 
    nivel de señal en el píxel =  $max( medSignal )$ 
    best server en el píxel = sector correspondiente a  $max( medSignal )$ 

  end if
end for

```

2.3.5.4. Interpolación de píxeles

Los mapas generados hasta este punto pueden presentar un inconveniente en ciertos escenarios dependiendo de las exigencias del usuario. El inconveniente deriva de que lo normal es que no todos los píxeles de la zona bajo análisis tengan eventos geolocalizados, lo que se traduciría en píxeles vacíos. Este efecto negativo va fuertemente ligado a la cantidad de *ROPs* (15 minutos de trazas) que se hayan considerado para generar los mapas, pero que,

en caso de producirse, puede dar lugar a una sensación visual de despoblamiento o de baja correlación entre los píxeles geolocalizados.

La solución por la que se ha optado para paliar este posible efecto adverso es la **interpolación**. La interpolación consiste en rellenar píxeles vacíos, e incluso sobrescribir el valor de otros, con datos generados a partir de la información de los píxeles adyacentes. En cualquier caso, este procesamiento puede considerarse **opcional**, ya que hay ingenieros que prefieren ver únicamente la información real geolocalizada a sabiendas de que tendrán un mapa con menos ocupación.

En primer lugar, se aplica la interpolación sobre el **ráster de la mejor celda servidora** con objeto de aportar cohesión y consistencia a las áreas cubiertas por cada sector. La metodología implementada se resume en la Fig.2.28. Básicamente, se trata de analizar los píxeles circundantes de cada píxel considerando que si, al menos, 7 de los 8 píxeles vecinos tienen un mismo valor, entonces ese mismo valor será asignado al píxel bajo análisis, independientemente del valor que tuviera anteriormente. Además, este postprocesado puede ser ejecutado varias veces para un mayor refinamiento.

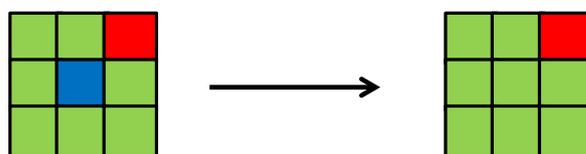


Figura 2.28: Interpolación de píxeles, donde si, al menos, 7 de los 8 píxeles adyacentes tienen un mismo valor, el píxel central pasa a tomar ese valor.

En segundo lugar, se emplea otro tipo de interpolación sobre el **ráster de nivel de señal**. En este caso, cada píxel es analizado mirando su tipo de clutter. De este modo, si un número de píxeles vecinos mayor o igual al definido por el parámetro *samePixelsNeeded* —cuyo valor por defecto es 4— tienen el mismo clutter que el píxel bajo análisis, entonces se hace la media del nivel de señal de todos esos píxeles. El valor obtenido es asignado al píxel actual. La intención de esta técnica es suavizar los cambios bruscos de nivel de señal entre píxeles adyacentes. Por otro lado, el hecho de examinar el tipo de clutter se debe a que cada uno tiene asignadas unas pérdidas de señal diferentes.

2.4. Resultados

En esta sección se pone a prueba la herramienta híbrida de geolocalización que se ha descrito a lo largo del capítulo. Para ello, se dispone de varios sets de datos reales provenientes de redes móviles 3G localizadas en diferentes países del mundo. La localización exacta de estos países debe permanecer en el anonimato por los acuerdos de confidencialidad con Ericsson. Asimismo, las prestaciones del algoritmo propuesto se comparan con los algoritmos de geolocalización que Ericsson tiene actualmente implementados en alguna

de sus herramientas. El funcionamiento de estos algoritmos tampoco puede ser revelado en esta tesis.

Antes de continuar, se quiere resaltar la trascendencia y calidad que proporciona el poder validar un algoritmo nuevo con datos provenientes directamente de la red móvil. De esta manera, se elimina la incertidumbre de la variación entre las pruebas realizadas con datos generados sintéticamente y las realizadas en campo, y se somete al algoritmo a una verdadera prueba de estrés.

2.4.1. Métrica fuzzy

Para la evaluación del ráster del *best server*, además de la percepción simplemente visual, se ha definido una **figura de mérito denominada métrica fuzzy**. Esta métrica pretende cuantificar la compactación de las áreas estimadas a las que sirve cada sector. Cuanto más uniformes y homogéneas sean las áreas de cobertura, mejor se puede asumir que ha sido la geolocalización de los eventos. En caso de obtener mapas borrosos (*fuzzy*) o "sucios", en los que no se distinguen bien zonas que pertenecen a un mismo sector, entonces es alta la probabilidad de que la geolocalización no haya sido tan precisa.

La métrica *fuzzy* se basa en calcular para cada píxel el porcentaje de píxeles vecinos que discrepan con respecto a su estimación del *best server*. De esta manera, se puede construir una CDF (*Cumulative Distribution Function*) que indique la evolución de la cantidad de píxeles con buena compactación. Cabe señalar que aquellos píxeles que tengan todos sus vecinos vacíos porque no se haya geolocalizado ningún evento en ellos, no se tendrán en cuenta en el cálculo de dicha CDF.

2.4.2. Drive test

El *Drive Test* o —buscando una posible traducción— recorrido de prueba es el análisis y evaluación de una red móvil mediante la captación y monitorización de la información real intercambiada entre las estaciones base y los terminales móviles. El objetivo es obtener datos que se aproximen a la experiencia real del cliente para identificar problemas, tales como la caída de llamadas o la identificación de las áreas de cobertura.

En un *drive test* se necesita conocer en todo momento la ubicación por GPS. Lo más común es hacer el recorrido en un vehículo donde se transporta el equipamiento necesario para monitorizar y registrar todos los parámetros y KPIs (*Key Performance Indicator*) de la red. El seguimiento de la posición es extremadamente valioso cuando se valida un algoritmo de geolocalización, puesto que se pueden obtener métricas de la precisión punto a punto calculando la diferencia entre la posición real del *drive test* y la estimada por la herramienta.

Por suerte, en alguno de los sets de datos facilitados por Ericsson se incluyen *drive tests*. Gracias a esto, la herramienta híbrida de geolocalización es verificada y evaluada para algunos escenarios con medidas de error punto a punto.

2.4.3. Norte de Europa

El primer escenario bajo análisis se localiza en el centro de una ciudad del norte de Europa. Los datos de este escenario tienen tres peculiaridades a destacar. En primer lugar, se trata de una red móvil **LTE**. Aunque la herramienta híbrida desarrollada en este capítulo se centra en redes UMTS, la algoritmia para los MR es completamente extrapolable a LTE, tal y como demuestra este set de datos. De este modo, se plasma la **facilidad de adaptación del método de geolocalización a otras tecnologías**.

En segundo lugar, el *drive test* se realizó con un **escáner** en lugar de con un teléfono móvil. Este detalle se traduce en varias diferencias significativas en lo que respecta a las características de los datos recogidos. Entre ellas, se deben mantener presente las siguientes: el escáner no incluye PDs, los eventos de medida se disparan con mayor frecuencia, y se suelen medir más sectores al mismo tiempo que con un terminal móvil convencional. Estas singularidades hacen que este escenario sea ideal para evaluar la precisión punto a punto de la herramienta.

Por último, comentar que no se tiene a disposición las trazas de toda la red, sino solamente las medidas realizadas por el escáner. Por tanto, en este caso no aplica generar mapas geolocalizados ni utilizar el ajuste por tipo de clutter.

En cuanto a los datos de entrada, se pueden resumir como:

- **Grid:** 264 x 219 píxeles
- **Tamaño del píxel:** 20 x 20 metros
- **Eventos MR:** 43 389
- **Sectores:** 301

El **tiempo de ejecución** de la herramienta híbrida fue aproximadamente de **12 minutos** empleando un portátil de 4 GB de RAM y 4 CPUs. Asimismo, se consiguió recuperar la posición de **todos los eventos**. Los resultados se representan en la Fig.2.29 y Fig.2.30.

Primeramente, la Fig.2.29 ilustra 4 CDFs —error de distancia cometido punto a punto— obtenidas con la herramienta de Ericsson, con el método híbrido sin clutter y sin ECO, con el método híbrido con clutter y sin ECO, y con el método híbrido con clutter y con ECO, respectivamente. Además, para un mejor análisis de las curvas, se han marcado los valores para el percentil 50 y el percentil 80. Lo que se observa es una clara ganancia de precisión usando el método propuesto, ganancia que es más significativa si aprovechamos la información extra del clutter y las predicciones provenientes de ECO. No obstante, prescindiendo de estos datos de entrada también seríamos capaces de ofrecer una mejora con respecto al método de Ericsson, lo que demuestra la robustez de la herramienta. En el mejor de los casos **se consigue una mejora de aproximadamente 28 metros en el percentil 50 y 34 metros en el percentil 80**. Por otra parte, un par de observaciones adicionales con respecto al clutter y a las predicciones de señal. No disponer de ECO obliga a generar las predicciones de señal con el modelo teórico desarrollado en la Sección 2.3.3.1, mientras que no tener

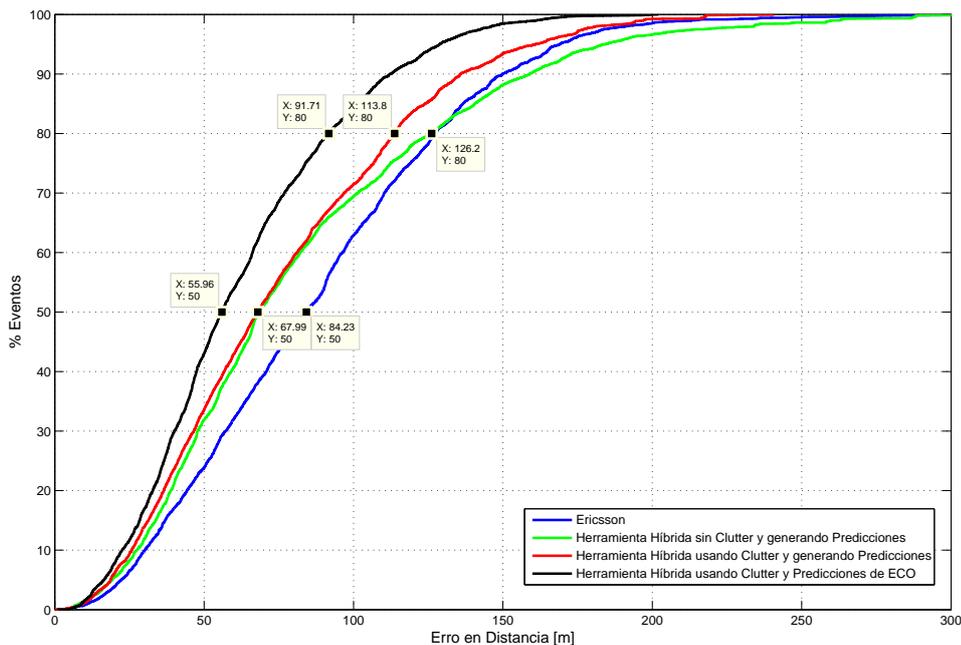


Figura 2.29: CDFs del error de distancia punto a punto para el escenario del norte de Europa. Se comparan cuatro alternativas, señalando como puntos clave el percentil 50 y el percentil 80.

clutter impide conocer las pérdidas que hay que añadir a cada píxel según el tipo de terreno que tengamos. Estos serían los perjuicios de carecer de algunos de estos elementos.

Por su parte, la figura Fig.2.30 muestra el clutter de la zona en la que se llevó a cabo el *drive test*, indicando en la leyenda de la derecha el tipo de clutter y su color asociado. Los **puntos negros revelan las posiciones exactas** que se registraron con GPS durante la prueba. Se puede comprobar a simple vista que ésta se efectuó con un vehículo circulando por las calles de la ciudad. Por otro lado, **los puntos azules denotan las posiciones estimadas por la herramienta híbrida** para el caso de utilizar clutter y ECO. Se observa que los puntos se sitúan en el centro de los píxeles como resultado del proceso de discretización. Adicionalmente, en la Fig.2.31 se ha incluido un acercamiento de parte del clutter anterior para facilitar su visualización.

2.4.4. Drive test realizado en Málaga

Además de todos los datos proporcionados por Ericsson, durante el desarrollo de la tesis surgió la posibilidad de realizar **nuestro propio drive test en Málaga**. El objetivo era recoger datos que permitiesen seguir validando los algoritmos de geolocalización, pero esta vez con la certeza de cómo y dónde se había llevado a cabo el *drive test*. De este modo, se logra un mayor control sobre el tipo de pruebas, el recorrido y las posibles incidencias que se puedan registrar.

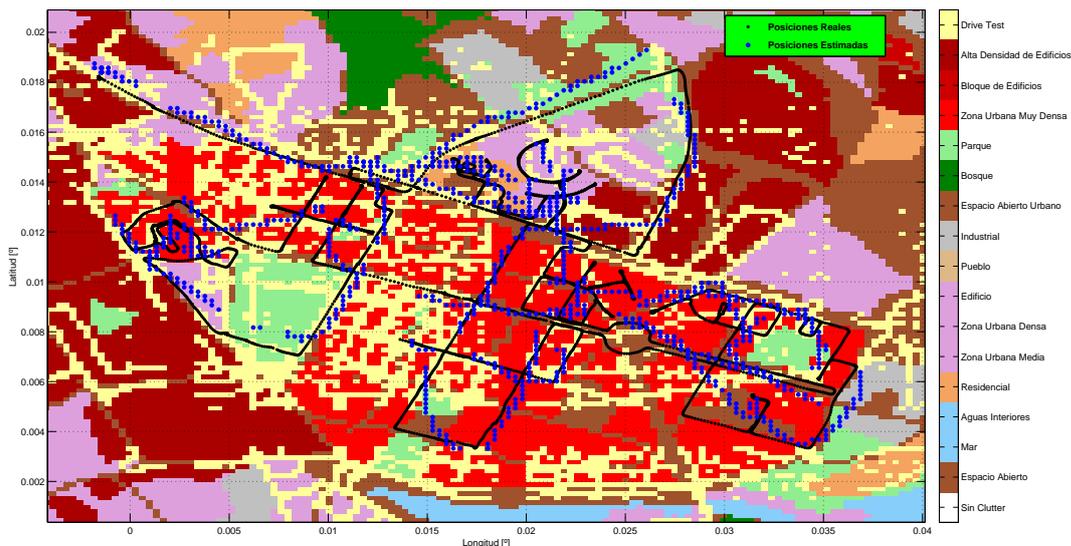


Figura 2.30: Comparación de las posiciones reales y geolocalizadas sobre el clutter de la zona del norte de Europa.

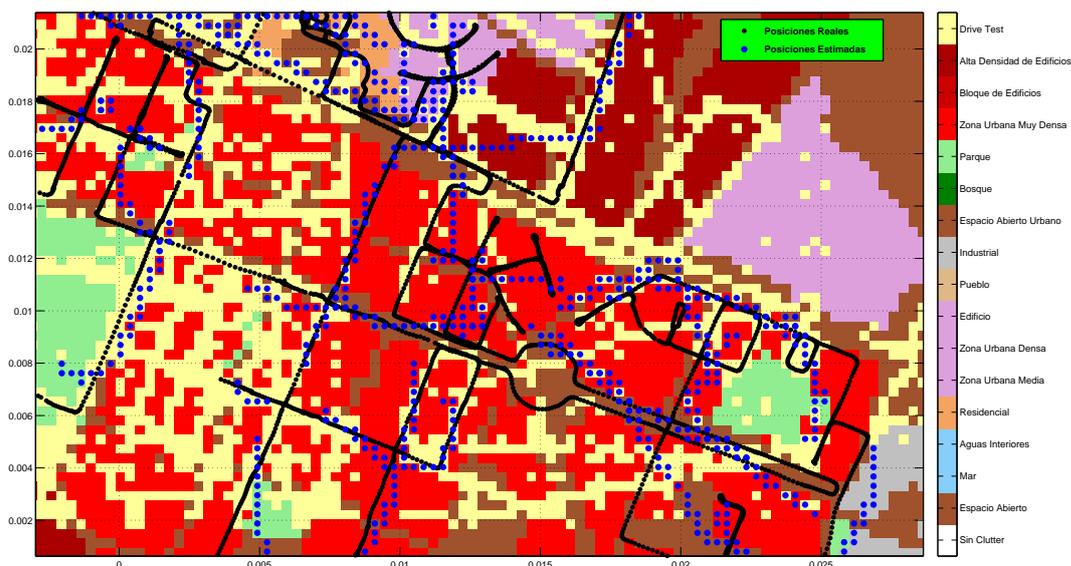


Figura 2.31: Acercamiento del clutter de la zona del norte de Europa..

Para el *drive test* se contaba con la colaboración de una de las operadores de telefonía móvil que tiene estaciones base propias desplegadas a lo largo de la provincia de Málaga. Por motivos de confidencialidad, el nombre de la operadora se mantiene en el anonimato. La operadora nos facilitó la topología completa de sus sites para planificar las pruebas y definir el recorrido. Asimismo, el día del *drive test* se comprometió a activar los eventos necesarios y a registrarlos durante las 4 horas que duraron las pruebas.

La aplicación elegida para monitorizar la red móvil durante el recorrido fue **G-NetTrack** [65]. Esta aplicación para dispositivos Android tiene una versión gratuita que mide diversos parámetros de la red móvil a la que se está conectada. Entre otros, el identificador de celda (Cellid), la tasa de bits en DL y UL, el código identificador de área (LAC), las celdas vecinas recibidas, el nivel de señal (RSCP), o la posición actual en latitud y longitud. Además, tiene la posibilidad de mostrar toda esta información en un mapa y, posteriormente, exportarla en archivos de texto y KML de Google Earth. A modo de ejemplo, el aspecto de la aplicación se recoge en la Fig.2.32.

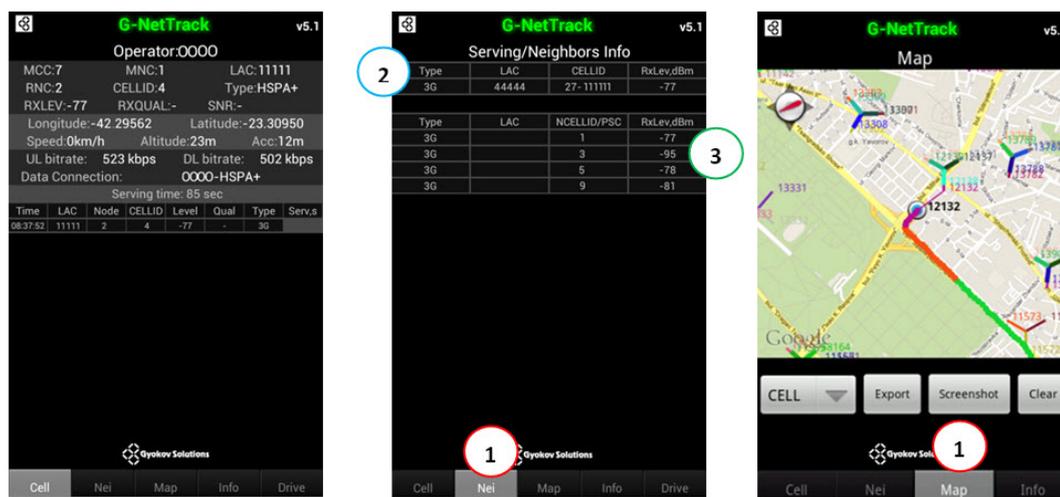


Figura 2.32: Aplicación G-Net Track [66]. La primera imagen muestra los parámetros básicos de la red móvil, mientras que la segunda muestra la información de la celda servidora junto a las celdas vecinas recibidas. Por último, la tercera imagen recoge una captura del mapa en el que se va mostrando la medida seleccionada en tiempo real.

El itinerario se definió para llevar a cabo ensayos con movilidad y en estático, es decir, realizando paradas regulares de 5 minutos. Por este motivo, las pruebas se efectuaron mediante dos terminales móviles. Uno de ellos permanecía continuamente encendido y consumiendo datos (movilidad), mientras que el otro se encendía en cada parada para realizar hasta 5 llamadas, después se mantenía apagado hasta la siguiente parada (estático). Estos terminales serían posteriormente identificados, entre todos los usuarios de las trazas, a través del IMSI y la marca de tiempo. Dentro de este marco, el recorrido que finalmente se decidió, junto al nivel de señal medido en cada punto, se ilustra en la Fig.2.33.

Finalmente, a raíz de estas pruebas, se obtuvo el siguiente set de datos:

- **Grid:** 492 x 436 píxeles
- **Tamaño del píxel:** 25 x 25 metros
- **Eventos MR:** 258 931
- **Eventos PD:** 70 410



Figura 2.33: Recorrido seguido en Málaga durante la realización del *drive test*. Se muestra el mapa de nivel de señal RSCP (dBm) que fue exportado desde la aplicación G-Net Track.

- **Eventos cuya posición real es conocida (*Drive Test*):** 59
- **Sectores:** 212

El procesado de este escenario se extendió hasta las **2 horas y 25 minutos**, consiguiendo geolocalizar el **98 %** de los eventos. Para ello, no se empleó el ajuste por tipo de clutter debido a que la resolución de 25 metros no es lo suficientemente alta.

Como ejemplo de utilidad práctica de la herramienta híbrida, en la Fig. 2.34 se ha representado el **ráster *best server* obtenido tras la ejecución**, donde cada color corresponde con un sector. Además, se ha incluido un fragmento ampliado en el lado derecho para apreciar con mayor claridad cómo se identifican las zonas en las que una celda es la mejor servidora.

Con respecto a las métricas cuantificables, por un lado la Fig. 2.35 muestra las CDFs de error de distancia en las que se comparan 4 alternativas. Las 3 ejecuciones con la herramienta híbrida arrojan una notable mejora en precisión sobre la referencia establecida por la herramienta de Ericsson, llegando a alcanzar los **293 metros de ganancia en el percentil 50**. La semejanza entre las curvas roja y negra señala que no existe un gran impacto a la hora de usar las predicciones de la herramienta ECO o las generadas con el modelo teórico propuesto en la Sección 2.3.3.1. Sin embargo, la degradación de la curva verde con respecto a las anteriores apunta a que el hecho de tener clutter supone un beneficio destacable.

Por otro lado, la Fig. 2.36 mide la calidad y cohesión del ráster *best server* generado. Los resultados de esta métrica concuerdan con lo visto en las CDFs, ya que **el caso mejor se produce al usar ECO y clutter, mientras que el peor viene dado por la herramienta de**

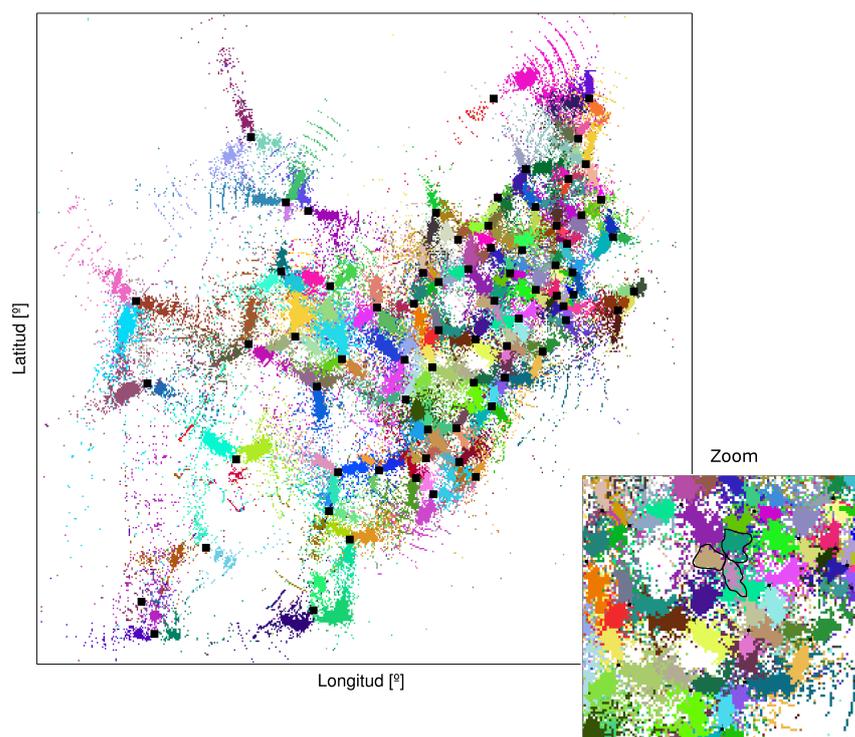


Figura 2.34: Ráster *best server* en Málaga generado con la herramienta híbrida de geolocalización con clutter y ECO.

Ericsson. Entonces, para el caso de la línea negra, la métrica nos dice que aproximadamente el 35% de los píxeles no tienen discrepancia con sus píxeles vecinos, es decir, todos los píxeles de alrededor pertenecen a la misma celda; y que un 85% de los píxeles tienen al menos algún píxel vecino igual, dejando solamente el 15% de los píxeles restante como píxeles que discrepan totalmente de todos los de alrededor.

2.4.5. Sudamérica

El siguiente marco de prueba se sitúa en Sudamérica. El inconveniente de esta colección de datos es que no incluye un *drive test*, por lo que no se pueden obtener métricas de precisión punto a punto. Los datos de entrada son los siguientes:

- **Grid:** 346 x 292 píxeles
- **Tamaño del píxel:** 10 x 10 metros
- **Eventos MR:** 440 409
- **Eventos PD:** 94 047
- **Sectores:** 147

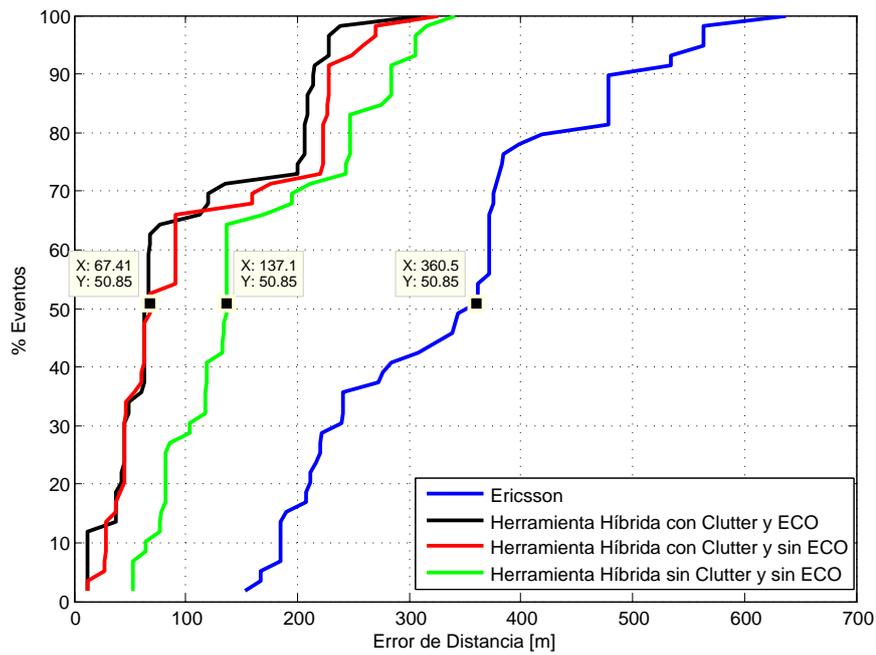


Figura 2.35: CDFs del error de distancia punto a punto para el escenario de Málaga. Se comparan cuatro alternativas, señalando como punto clave el percentil 50.

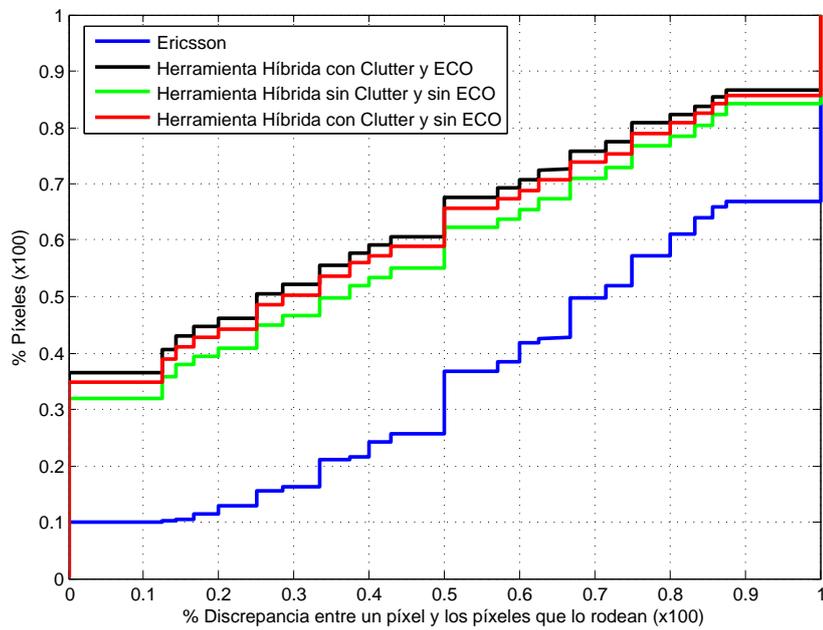


Figura 2.36: Métrica *fuzzy* para el escenario de Málaga.

Asimismo, en aras de una mejor comprensión de los resultados, los parámetros establecidos para cada tipo de clutter, así como una imagen del mismo, se ilustran en la Tabla 2.5 y la Fig.2.37, respectivamente.

Tabla 2.5: Propiedades del clutter del escenario de Sudamérica

Descripción	Pérdidas (dB)	Peso
Sin Clutter	0	0
Mar / Rio / Pantano	0	0
Árido / Pasto / Agricultura	0	10
Bosque / Bosque de Árboles	0	5
Pueblo	0	5
Suburbano	15	20
Urbano Muy Poco Denso	15	25
Urbano Poco Denso	15	30
Urbano	20	35
Urbano Alto	20	40
Urbano Denso	20	45
Urbano Muy Denso / Bloque de Edificios	25	50
Edificios Altos Aislados	25	70
Industrial	15	30
Aeropuerto	20	50
Espacio Abierto Urbano	10	10
Calle / Calle Principal	0	10

Por su parte, la Fig.2.38 muestra la comparativa de la métrica *fuzzy* entre 6 enfoques distintos usados para obtener el ráster del *best server*. En azul y verde se observan las referencias extraídas de la herramienta de Ericsson, la cual posee también un método de geolocalización avanzado basado en el ajuste por clutter. Seguidamente, en rojo y negro, se representan los resultados obtenidos con la herramienta híbrida sin aplicar el postprocesado opcional detallado en la Sección 2.3.5.2. Finalmente, los trazos amarillo y rosa añaden el resultado de emplear la herramienta híbrida junto al postprocesado del ajuste por tipo de clutter, ya que en este caso se dispone de una resolución suficientemente alta, esto es, 10 metros. A continuación, se enumeran algunos apuntes y conclusiones:

- El tiempo de ejecución sin ajuste por clutter llegó a 1 hora 40 minutos, mientras que con la inclusión de este postproceso se dilató hasta las 2 horas empleando un portátil de 4 GB de RAM y 4 CPUs.
- Alrededor del **98 %** de los eventos fue geolocalizado.

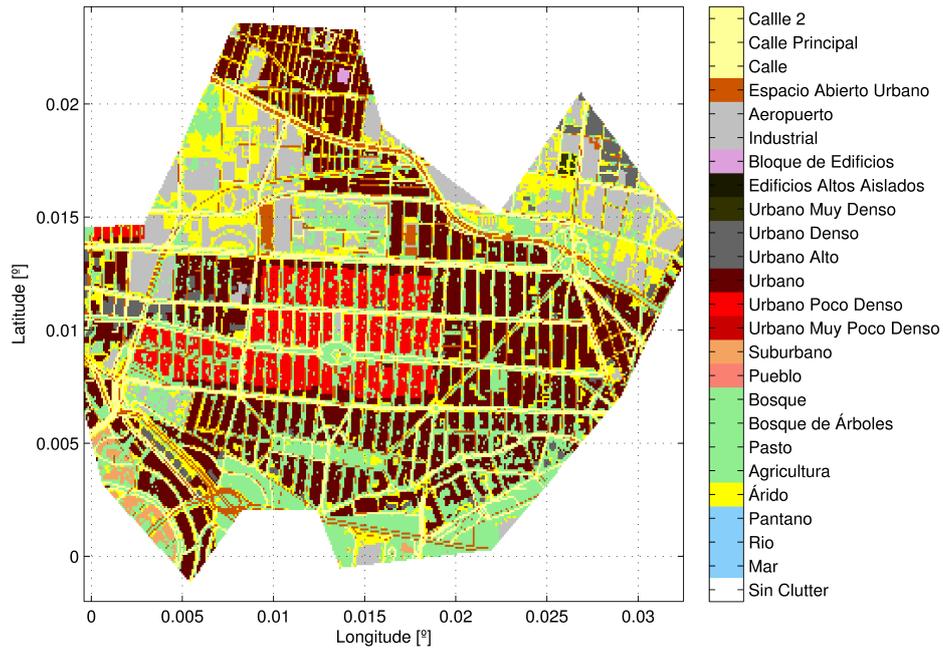


Figura 2.37: Clutter del escenario de Sudamérica.

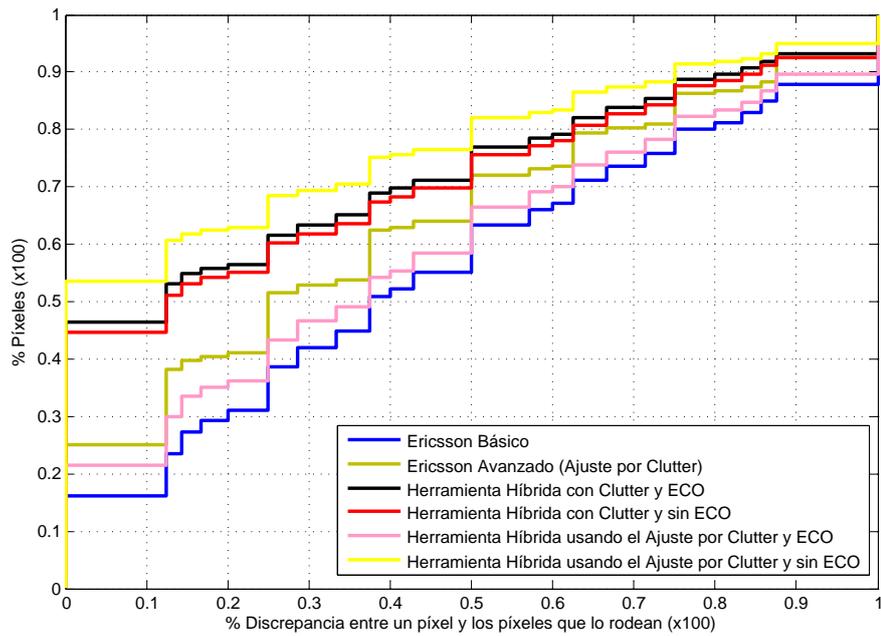


Figura 2.38: Métrica *fuzzy* para el escenario de Sudamérica.

- El mejor resultado se logra mediante la herramienta híbrida que usa el ajuste por clutter y las predicciones de señal internas, es decir, sin ECO.

- El motivo de que al usar el ajuste por clutter se obtenga un mejor resultado sin ECO es debido a que los niveles de señal calculados por ECO están sobrestimados, es decir, los niveles de señal reales son más bajos en general. Por tanto, el proceso de ajuste por clutter elimina por completo los píxeles de aquellas zonas en los que la discrepancia de señal predicha y real es muy elevada, generando áreas poco geolocalizadas al alejarnos de los sectores (zonas de bajo nivel de señal). Estas evidencias permiten afirmar que para este escenario **las predicciones generadas mediante el modelo teórico propuesto son más fieles a la realidad que las de Ericsson.**

Otra comprobación relevante de la geolocalización es la **percepción visual** que transmiten los rásters al usuario. La Fig.2.39 recoge una comparativa de los mapas generados mediante el método avanzado de Ericsson, la herramienta híbrida sin ajuste por clutter y la herramienta híbrida con el ajuste por clutter, estos dos últimos casos sin datos de ECO. El primer detalle a destacar es que los rásters del *best server* muestran, en general, más densidad y compactación que en el escenario de Málaga presentado en la Fig.2.34. La razón es que en Sudamérica hay una mayor cantidad de eventos para un grid más pequeño y un número de sectores también más reducido.

En cuanto a la comparación entre métodos, se demuestra que utilizar algún proceso de **ajuste por clutter aporta valor visual** al ráster de nivel de señal, tal y como ejemplifican las figuras (b) y (f) con respecto a la (d). Esta consideración se traduce en mapas donde se intuyen las calles y los edificios, poniendo además de manifiesto que en zonas exteriores el nivel de señal es mayor. Por otra parte, **la herramienta híbrida con ajuste por clutter muestra rásters menos "sucios", mejor definidos y más diáfanos que los que ofrece Ericsson.** La principal ventaja de estas circunstancias es que confieren confianza en el resultado visual, además de corroborar las conclusiones extraídas de la métrica *fuzzy*.

2.4.6. Asia occidental

El último escenario real se emplaza en una influyente ciudad de Asia occidental. Las características de los datos son similares a los de Sudamérica en el sentido de que no tiene *drive test* y el clutter es de la misma resolución. No obstante, en este caso no se dispone de datos provenientes de ECO. Según esto, los datos de entradas son los siguientes:

- **Grid:** 382 x 269 píxeles
- **Tamaño del píxel:** 10 x 10 metros
- **Eventos MR:** 296 237
- **Eventos PD:** 59 850
- **Sectores:** 79

A continuación, la Fig.2.41 muestra el clutter de la zona bajo análisis. Los parámetros de cada tipo de clutter (pérdidas de señal y peso) son iguales a los descritos en la Tabla 2.5 con una excepción. En este clutter no se ha definido el tipo "Calle", en su lugar el clutter

2.4 Resultados

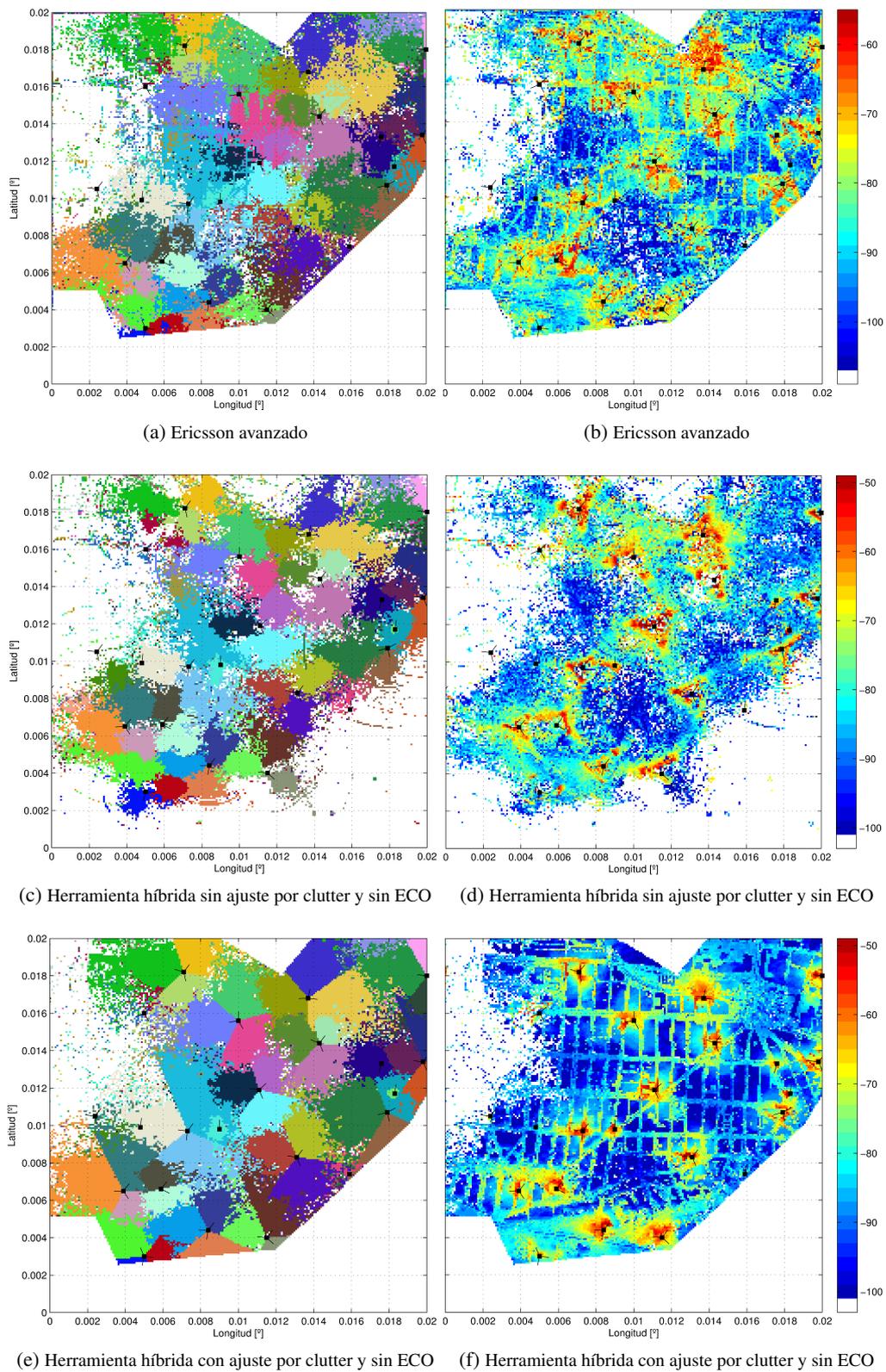


Figura 2.39: Rásters *best server* (izquierda) y nivel de señal en dBms (derecha) en Sudamérica.

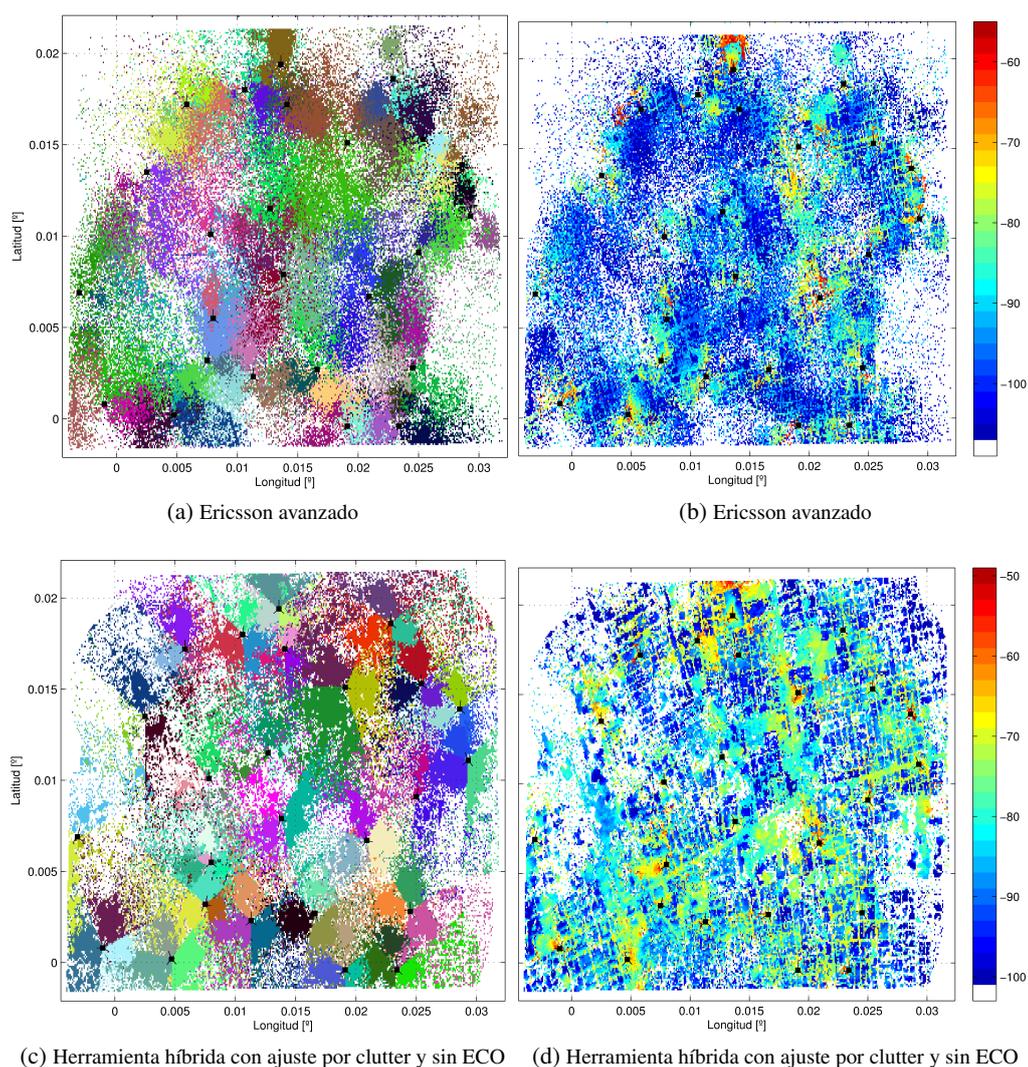


Figura 2.40: Rásters *best server* (izquierda) y nivel de señal en dBms (derecha) en Asia.

"Espacio Abierto Urbano" representa todos los tipos de calles y zonas abiertas en la ciudad. Por este motivo, se le asigna un peso mayor (20) y no se le atribuyen pérdidas (0 dB).

La ejecución de la herramienta híbrida tardó **una hora y media**, mientras que el porcentaje de eventos geolocalizados estuvo en torno al **90 %**. En este caso, el análisis de los resultados se ha hecho comparando directamente la herramienta híbrida con ajuste por clutter y el método de Ericsson avanzado, que es aquel que aprovecha también el clutter a su propio modo. La Fig. 2.40 recoge los dos rásters generados con ambos métodos. Una vez más, la primera impresión que se recibe es la mejora visual lograda con la herramienta desarrollada en esta tesis. En primer lugar, las áreas de cobertura de los sectores en el ráster del *best server* quedan mejor delimitadas permitiendo distinguir de forma más sencilla

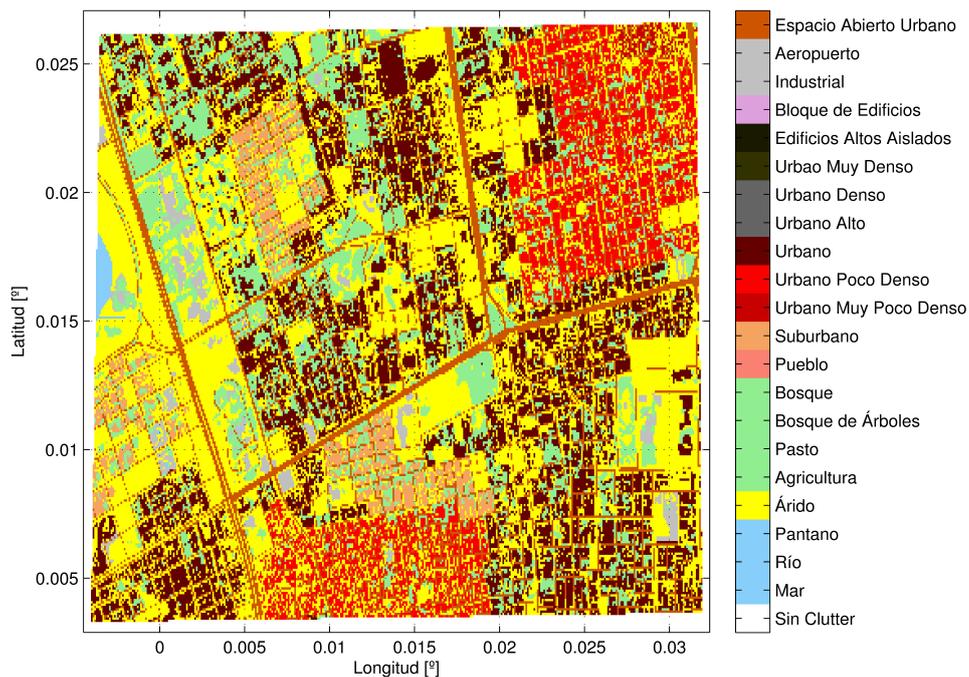


Figura 2.41: Clutter del escenario de Asia occidental.

donde empieza la dominancia de un sector frente a otro. Este resultado es más complicado de extraer del mapa proporcionado por Ericsson debido a la distorsión entre las zonas de cada sector. Igualmente, el ráster de nivel de señal proporcionado por la herramienta híbrida identifica las zonas de interior y exterior de forma clara a través de la diferencia entre los niveles de señal. En el caso de Ericsson también se puede intuir cierto patrón de calles y edificios, pero mucho más desdibujado y difuminado.

La métrica *fuzzy* asociada se muestra en la Fig. 2.42, donde se observa de nuevo un mejor comportamiento de la herramienta híbrida. Por ejemplo, **la herramienta híbrida logra un 20 % más de píxeles con 0 % de discrepancia que el método de Ericsson**, esto es, el 35 % frente al 15 % que se distingue en la gráfica.

2.5. Conclusiones

En este capítulo se ha descrito el proceso completo llevado a cabo para lograr una herramienta de geolocalización que funcione de modo independiente a partir de un conjunto de datos de entrada. El resultado es la generación de mapas geolocalizados que sirven a los ingenieros de las operadoras de telefonía móvil para multitud de funciones, entre ellas la detección de problemas o la optimización de la red móvil. Asimismo, el hecho de llamarlo proceso completo se debe a que se ha seguido una evolución progresiva empezando por el

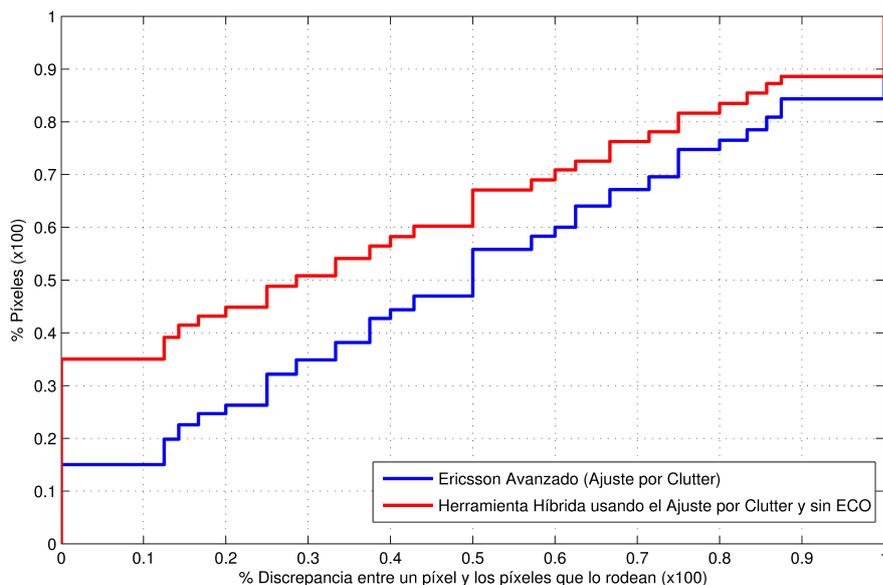


Figura 2.42: Métrica *fuzzy* para el escenario de Asia occidental.

planteamiento, continuando con el desarrollo, pasando posteriormente a la implementación, y concluyendo con la verificación sobre datos reales.

Entrando en materia, a continuación se listan las conclusiones más relevantes del capítulo:

- El primer punto debe servir para destacar la **mejora de la herramienta híbrida frente a la herramienta de Ericsson** en todos los aspectos que se han analizado (visualización de mapas, generación de predicciones de nivel de señal, métrica *fuzzy* y precisión punto a punto). Esta afirmación se ha corroborado en cuatro escenarios reales y distintos con objeto de proporcionar fiabilidad y veracidad.
- La herramienta híbrida nace enfocada a mejorar la información geolocalizada en redes **UMTS (3G)**. Sin embargo, en la Sección 2.4.3 se comprobó y confirmó que es posible aplicar la mayoría de las premisas y métodos desarrollados a redes móviles **LTE (4G)**, obteniendo resultados muy positivos en la precisión punto a punto.
- Se ha verificado que el hecho de disponer de un clutter de alta resolución permite realizar un procedimiento opcional de **ajuste por clutter**, el cual incrementa las prestaciones de la herramienta híbrida. Una de las ventajas principales de este ajuste es la eliminación de muestras geolocalizadas en píxeles donde no se espera encontrar usuarios, como por ejemplo el agua.
- Otro aspecto positivo a destacar es el **alto porcentaje de eventos geolocalizados** en todos los escenarios, siempre por encima del 90%. Los eventos sin localizar suelen ser eventos que no tienen suficientes medidas o que, si las tienen, se han reportado con demasiado error para encajar con las predicciones internas de la herramienta.

En cualquier caso, el análisis de los eventos no geolocalizados es un enfoque que se podría incluir como línea de investigación futura.

- Se ha comprobado que es importante tener una **alta relación entre el número de eventos y el número de píxeles** con el fin de generar mapas poblados y densos. Los escenarios reales utilizados disponían de 15 minutos de trazas con las siguientes relaciones: 1.2 en Málaga, 3.46 en Asia, y 5.29 en Sudamérica. Estos números concuerdan con la sensación visual de píxeles geolocalizados en cada escenario.
- Como característica a mejorar destaca el **tiempo de ejecución**. Las dos horas del escenario de Sudamérica sobrepasan el tiempo tolerable para incluir toda la herramienta en un producto de Ericsson. No obstante, las mejoras de rendimiento de la herramienta híbrida son todavía un horizonte por explorar, lo cual apunta a que el margen de mejora del rendimiento puede ser muy amplio.
- Por último, destacar la participación en la realización de un ***drive test* por la ciudad de Málaga** para recoger datos de la red móvil 3G. Estos datos han servido para verificar el comportamiento del algoritmo híbrido de geolocalización, así como para ayudar a Ericsson a obtener un nuevo conjunto de datos que es de utilidad para tareas de verificación en algunas de sus herramientas. Asimismo, la realización de estas pruebas ha aportado nuevas competencias en el trabajo con redes de telefonía móvil desde otra perspectiva, la que llevan a campo los ingenieros de campo. Al fin y al cabo, comprender y experimentar el proceso de recogida de medidas en una red móvil proporciona una visión más global del flujo de trabajo que llevan a cabo las operadoras cuando quieren conocer el estado de su red.

GEOLocalIZACIÓN HIPERBÓLICA

EN la Sección 2.1.3.3 se definió brevemente el **método OTDOA** (*Observed Time Difference of Arrival*, cuya traducción al español sería "Diferencia Observada en el Tiempo de Llegada") como uno de los métodos de geolocalización asistidos por el terminal. El procedimiento OTDOA está estandarizado por la normativa del 3GPP [67], y es una de las técnicas de geolocalización más empleadas en las redes UMTS debido a que es capaz de proveer los mejores resultados de precisión en la estimación de la posición del usuario bajo condiciones ideales. Téngase en cuenta que cuando hacemos mención a los mejores resultados en precisión, nos referimos a la geolocalización basada en las trazas de llamadas donde el operador no puede disponer de información de geolocalización precisa y privada del usuario (GPS o WiFi). Por tanto, en este capítulo se aborda y desgrana este método de geolocalización para desarrollar una herramienta autónoma que sea capaz de geolocalizar a los usuarios y recuperar la sincronización de la red móvil sin necesidad de soporte auxiliar de la red.

El capítulo se estructura de la siguiente forma. La Sección 3.1 introduce el inconveniente del método OTDOA que se quiere solucionar, incluyendo un estudio preliminar de las alternativas propuestas en la bibliografía junto a sus ventajas y desventajas. En la Sección 3.2 se formula el problema de la multilateración hiperbólica en redes asíncronas, dando como resultado un sistema de ecuaciones no lineal. Para resolverlo, la Sección 3.3 compara hasta tres métodos numéricos iterativos para encontrar la mejor alternativa en términos de precisión y rendimiento. Seguidamente, la Sección 3.4 se centra en buscar condiciones que minimicen la aparición de mínimos locales en los métodos numéricos. Para ello, se analiza el comportamiento de diferentes topologías de estaciones base, proponiendo finalmente la configuración en estrella como la configuración ideal. A continuación, la Sección 3.5 describe detalladamente la implementación de la herramienta completa de geolocalización basada en OTDOA. En la Sección 3.6 se presentan los resultados obtenidos con esta herramienta. Asimismo, se cita la participación en una prueba de campo (*drive test*) para la recopilación de datos reales con los que validar la herramienta. Por último, en la Sección 3.7 se recogen las conclusiones de este capítulo.

3.1. Introducción

La técnica OTDOA se basa en la **multilateración hiperbólica en el enlace descendente**, es decir, la generación de varias hipérbolas que se cortan en un punto indicando la posición del UE. A su vez, las hipérbolas son resultado de las diferencias de tiempos medidas por el móvil cuando recibe las tramas de diferentes Nodos B. Al menos tres estaciones base deben ser recibidas por el UE para tener la posibilidad de generar como mínimo dos hipérbolas. Estas medidas son posteriormente reportadas a la RNC en forma de *Measurement Report*.

Los **requisitos** para emplear adecuadamente el método OTDOA pasan por tener las **posiciones exactas de los Nodos B** y la **sincronización** entre ellos, ya que la red UMTS es una red asíncrona. Esta sincronización no es algo trivial de lograr, aunque sí totalmente indispensable, por lo que normalmente se opta por instalar receptores GPS en las estaciones base, o desplegar sistemas adicionales conocidos como LMUs (*Location Measurement Unit*). Los LMUs actúan como móviles ficticios en posiciones conocidas por la red móvil para medir la asincronía existente, siendo su principal desventaja el coste monetario que tienen para las operadoras móviles.

La otra dificultad a la que se enfrenta el método OTDOA en redes asíncrona es puramente matemática. Las ecuaciones resultantes de la intersección de varias hipérbolas constituyen un **sistema de ecuaciones no lineal** realmente complejo de resolver, sobre todo debido a la formación de mínimos locales y a la divergencia del propio método numérico encargado de hallar una solución. Además, se suma el inconveniente de tratar con medidas temporales que suelen sufrir ya de por sí errores intrínsecos, tales como el redondeo o el multitrayecto.

Por tanto, el **objetivo** que se marca en este capítulo es el análisis, desarrollo, implementación y verificación con datos reales de una herramienta de geolocalización basada en OTDOA. El propósito de la herramienta es **estimar conjuntamente la posición de los UEs y la sincronización entre los Nodos B sin la necesidad de equipos adicionales como los LMUs**. El impacto de evitar la utilización de estos equipos es un considerable ahorro económico para las operadoras de telecomunicaciones, además de otorgar al método OTDOA de autosuficiencia para ser capaz de geolocalizar independientemente del grado de sincronización de la red, o de la existencia de cualquier sistema externo de soporte.

Otro de los puntos fuertes de la herramienta es la inclusión de técnicas para reducir, e incluso evitar, el impacto perjudicial de los mínimos locales y de las divergencias asociadas al método numérico. Todo ello confiere robustez, consistencia y estabilidad al resultado.

Antes de continuar, se quiere señalar que de ahora en adelante, y con el objetivo de seguir una notación más estándar, la sincronización entre Nodos B puede ser referida como "Diferencia Relativa de Tiempos" (**RTD**, del inglés *Relative Time Difference*).

3.1.1. Estado de la técnica

Uno de los artículos pioneros en recapitular las técnicas de posicionamiento en sistemas de comunicaciones móviles 3G es [68]. En él, Zhao presenta el método OTDOA junto a

sus particularidades, ventajas e inconvenientes. Los cuatro problemas que describe son la habilidad de "escucha" de los dispositivos móviles, la pérdida de capacidad, la geometría formada por la posición de las estaciones base, y la falta de sincronía entre los Nodos B en el modo FDD (*Frequency Division Duplex*). Los dos últimos problemas son puntos claves a resolver en esta tesis.

Respecto al problema de "escucha", OTDOA tiene que enfrentarse con el conocido **efecto "cerca-lejos"**. Si el UE está demasiado cerca del Nodo B servidor, no podrá escuchar a los otros Nodos B a causa de la potencia de la señal proveniente del mismo. Una solución que se ha implantado para combatir este efecto es el **IPDL-OTDOA** (*Idle Periods Downlink OTDOA*), donde se aprovechan los periodos de inactividad en el enlace descendente del Nodo B servidor para captar las señales piloto de los Nodos B vecinos. La Fig. 3.1 ilustra el procedimiento.

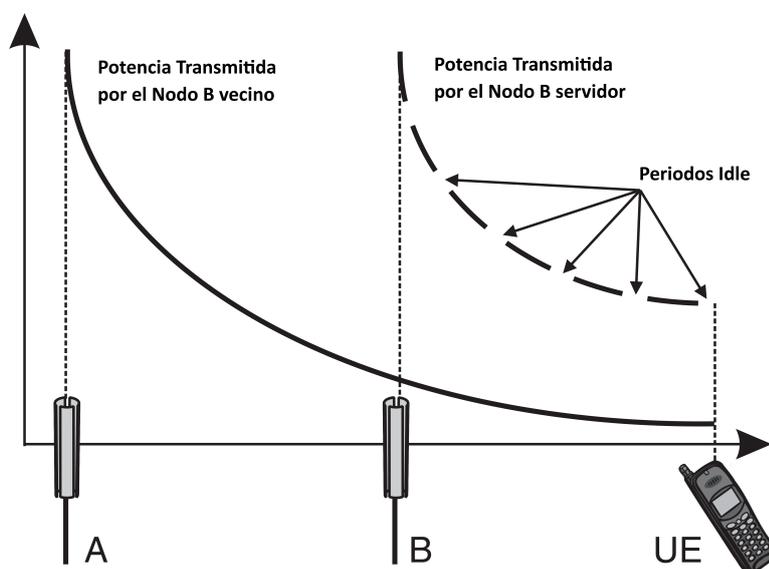


Figura 3.1: Funcionamiento de los periodos inactivos (*idle periods*) en OTDOA. El Nodo B llamado "B" ejerce como servidor enmascarando la señal del Nodo B llamado "A", teniendo en cuenta que el eje vertical representa la potencia de señal. Entonces, se aprovecha los periodos de inactividad de "B" para recibir a "A" [7].

Por otra parte, la **pérdida de capacidad** proveída al usuario por parte del sistema, así como la propia reducción de capacidad de cómputo de la RNC, son desventajas intrínsecas como consecuencia de ofrecer más funcionalidad. La red móvil usa canales de tráfico y señalización, además de potencia de cálculo del UE o la red, para proveer servicios de localización.

La **falta de sincronía en UMTS**, en general, se solventa asumiendo la existencia y disponibilidad de equipos externos instalados en posiciones conocidas, normalmente denominados LMUs [69, 70]. La idea básica es emplear transmisores locales que calculen o ayuden

a calcular las RTDs [71], las cuales son posteriormente almacenadas en una base de datos y actualizadas periódicamente con objeto de prevenir los errores asociados a las derivas de los relojes de las estaciones base [67].

Otras veces, sin embargo, directamente se omite este problema y se trabaja con redes idealmente sincronizadas. En estos casos, la finalidad es tratar de **resolver el sistema de ecuaciones no lineal** derivado del corte de las hipérbolas. En [72] se comparan las prestaciones de tres métodos de mínimos cuadrados aplicados a OTDOA: Gauss-Newton (GN), método de máxima pendiente (SD, del inglés *Steepest Descent*) y Levenberg-Marquardt (LM). Por otro lado, en [73] se contrastan el funcionamiento de un algoritmo de gradiente estocástico con un método basado en Monte Carlo. No obstante, en este último el análisis realizado se centra en un único escenario donde además se carece de mínimos locales, motivando que el estudio sea poco ajustado a la diversidad de situaciones que se dan en escenarios reales.

El problema de **calcular las RTDs de los Nodos B, o evitar el efecto adverso de la falta de esta información**, ha sido también ampliamente estudiado en la bibliografía. En primer lugar, en [74, 75] se propone un algoritmo OTDOA que permite calcular la posición geográfica de un usuario sin la diferencia relativa de tiempos (RTD) entre las estaciones bases, es decir, sin necesidad de LMUs. El algoritmo está basado en un sistema de ecuaciones no lineales que necesita los siguientes datos de entrada (*inputs*): posiciones de los Nodos B, RTTs en dos instantes de tiempo y medidas de TDOA en dos instantes de tiempo (tienen que ser los mismos instantes que los del RTT). Sin embargo, el principal inconveniente asociado a esta estrategia es que no siempre se disponen de los datos de entrada necesarios. Normalmente, el RTT solo está disponible al principio de la conexión o llamada y, además, en el reporte del RTT no se incluye el TDOA y viceversa.

En segundo lugar, un **algoritmo iterativo que calcula las RTDs y geolocaliza** fue publicado en [76]. El funcionamiento es sencillo: en una iteración se fijan las posiciones estimadas de los UEs en la iteración previa, y se obtienen las RTDs, de forma que en la siguiente iteración se fijan las RTDs estimadas en la iteración anterior, y se calculan las posiciones de los UEs. De esta manera, no solo se geolocalizan los dispositivos móviles, sino que también se recupera la sincronización de la red. De hecho, parte del trabajo desarrollado en este capítulo está realizado tomando como base este algoritmo iterativo con la idea de ofrecer una versión mejorada y refinada del mismo.

En resumen, el estado de la técnica tiende a obviar el problema de la sincronización entre Nodos B, lo cual es un modelado incompleto del método OTDOA cuando nos enfrentamos a redes móviles reales. En otros casos, se asume el uso de LMUs, que no es una buena elección en términos de escalabilidad y viabilidad económica para las operadoras móviles. Además de que los LMUs también sufren errores por falta de visibilidad directa (NLOS, del inglés *Non-Line-Of-Sight*) y multitrayecto, especialmente en áreas urbanas y suburbanas [77]. Finalmente, métodos más concienciados de la importancia de la sincronización se inclinan a emplear datos de entrada adicionales y eventuales, u orientarse hacia métodos iterativos que pueden ir acumulando errores y llegar a tener una alta carga computacional.

Por último, se quiere hacer énfasis en que la gran mayoría de análisis relacionados al método OTDOA no se contrastan con **datos reales** para verificar el funcionamiento en un entorno real. Este es otro de los puntos clave que se ha pretendido solventar en esta tesis, verificando todos los desarrollos con datos provenientes directamente de redes móviles reales que están actualmente dando servicio a millones de usuarios.

3.2. Multilateración hiperbólica basada en OTDOA

3.2.1. Procedimiento OTDOA básico

Idealmente, el procedimiento OTDOA presume de partida que los sites están sincronizados entre ellos en el tiempo, es decir, las tramas se transmiten desde los sites hacia el UE en el mismo instante. De este modo, **el móvil se encarga de medir la diferencia entre los tiempos de llegada de las señales**, eliminando del proceso el problema de que el reloj del UE no está sincronizado con la red móvil.

Entonces, la posición del UE queda recogida a lo largo de una **hipérbola**, ya que, por definición, una hipérbola es el lugar geométrico formado por los puntos que satisfacen la condición geométrica de que la diferencia de sus distancias a dos puntos fijos llamados focos es una constante, tal como ya se explicaba en la Sección 2.1.1.4 y se mostraba en la Fig. 2.4. Además, en el caso de reportar más de 3 sites, se pueden obtener hipérbolas adicionales que ayudan a eliminar la ambigüedad producida por los dos puntos de corte procedentes del caso de tener solamente dos hipérbolas. Por tanto, este método basado en utilizar la intersección de múltiples hipérbolas (o hiperboloides) es conocido como **multilateración**.

3.2.2. RRC Measurement Report - Parámetro T_m

Llegados a este punto, sabemos que una vez que el móvil ha calculado las diferencias de tiempos tiene que reportarlas de vuelta a la red, concretamente a la RNC. Para ello, se encapsula la información en los eventos *RRC Measurement Report*, los cuales se reportan de forma periódica o al cumplirse ciertas condiciones.

De entre todos los posibles parámetros incluidos en un *Measurement Report* según el 3GPP [60], el **parámetro T_m/T_M** resulta clave para el método OTDOA. El T_M representa el offset restante entre tramas una vez que se ha restado el offset integral del offset total. Por ejemplo, si el offset total es de 2.5 tramas, entonces se le resta el offset integral que sería 2, quedando 0.5 como offset asociado al T_M . La diferencia se hace entre una trama del DPCH (*Dedicated Physical Channel*) de la estación base servidora y las tramas del P-CCPCH (*Primary Physical Common Control Channel*) de las estaciones bases vecinas. Asimismo, el parámetro T_M tiene una resolución de 1 chip debido al redondeo, y un rango que va desde 0 hasta 38399 chips [60]. Recordemos que una trama en UMTS tiene una duración de 10 ms o 38400 chips [7]. En aras de la claridad, se ha tomado y decodificado el

contenido ASN.1 de un *Measurement Report* para ilustrar en la Fig. 3.2 cómo es reportado realmente el parámetro T_M .

Con respecto al parámetro T_M hay que hacer otra aclaración relevante. Las medidas obtenidas por sectores del mismo site o estación base solamente deben ser computadas una vez. No aportan información adicional ni nuevas ecuaciones linealmente independientes, ya que la distancia física de estos sectores a un UE es exactamente la misma. No obstante, estos casos sí que pueden tener utilidad para discriminar medidas corruptas, tal y como se verá a lo largo de este capítulo.

```
ASN.1 interface: 3GPP UMTS Release 12 RRC (UL-DCCH-Message) 12.2.0

*** DECODING ***
<encoding>
80000001 02240085 0F20DB86 4C3684A0 045000CD 1690941F 0E4859B4 CA1281AB
E3CB6A0F 3850F20E B96348E6 0000DA
</encoding>
<UL-DCCH-Message> Protocolo
  <integrityCheckInfo>
    <messageAuthenticationCode>00000000000000000000000000000010</messageAuthenticationCode>
  </integrityCheckInfo>
  <rrc-MessageSequenceNumber>0</rrc-MessageSequenceNumber>
  </integrityCheckInfo>
  <message>
    <measurementReport>
      <measurementIdentity>1</measurementIdentity>
      <measuredResults>
        <intraFreqMeasuredResultsList>
          <CellMeasuredResults>
            <cellSynchronisationInfo>
              <modeSpecificInfo>
                <fdd>
                  <countC-SFN-Frame-difference>
                    <countC-SFN-High>0</countC-SFN-High>
                    <off>242</off>
                  </countC-SFN-Frame-difference>
                  <tm>3512</tm> TM
                </fdd>
              </modeSpecificInfo>
            </cellSynchronisationInfo>
            <modeSpecificInfo>
              <fdd>
                <primaryCPICH-Info>
                  <primaryScramblingCode>152</primaryScramblingCode>
                </primaryCPICH-Info>
                <cpich-Ec-N0>27</cpich-Ec-N0>
                <cpich-RSCP>33</cpich-RSCP>
              </fdd>
            </modeSpecificInfo>
          </CellMeasuredResults>
        </intraFreqMeasuredResultsList>
      </measuredResults>
    </measurementReport>
  </message>
</UL-DCCH-Message>
```

Contenido ASN.1

Referencia a la celda

Figura 3.2: Fragmento decodificado de un mensaje ASN.1 extraído del evento *RRC Measurement Report*. El evento está reportando el T_M con valor 3512 chips para la celda con *Scrambling Code* 152.

Asimismo, se requiere una **normalización por site del parámetro** T_M una vez ha sido extraído del *Measurement Report*, y antes de ser empleado en las ecuaciones. La razón es que existe una variable T_{cell} , la cual debe ser proveída junto con la configuración de la red por el operador de telefonía móvil, cuyo objetivo es asignar un offset entre los canales SCH (*Synchronization Channel*) de los diferentes sectores de un mismo Nodo B. Esto evita el solape e interferencia de estos canales [78]. Además, T_{cell} tiene una resolución de 256 chips y toma valores entre 0-9. La siguiente expresión [76] recoge la normalización necesaria:

$$\widehat{T}_M[i_S] = T_M[i] + 256 \cdot T_{cell}[i], \quad (3.1)$$

donde \widehat{T}_M es el parámetro T_M normalizado, e i_S es el site al que pertenece el sector i .

3.2.3. Multilateración en redes asíncronas

UMTS es una red que se despliega de forma **asíncrona cuando opera en modo dúplex por división en frecuencia (FDD)**, es decir, cada estación base posee una referencia de tiempos diferente. Además, los UEs no disponen de información sobre la diferencia relativa de tiempos (RTD) entre las estaciones base. Las ventajas de disponer de esta red en formato asíncrono son: eliminar la necesidad de sincronizar los Nodos B a una fuente temporal externa, usar el espectro de forma más eficiente al prescindir de bandas de guarda, y ofrecer mayor flexibilidad en la asignación de recursos, ya que el uso de los mismos no tiene que producirse de forma simultánea [79].

Teniendo en mente lo mencionado en el párrafo anterior, la característica de asincronicidad en UMTS obliga a que la **RTD tiene que ser considerada como una incógnita más del problema**. Por tanto, la situación para un evento *Measurement Report* (MR) se resume en que se necesita calcular su posición dada por las coordenadas cartesianas x e y , además de las RTDs de las estaciones base que esté reportando. Para ello, a partir del segundo site reportado, ya que el primero sirve como referencia para hacer la diferencia de tiempos, se puede derivar una nueva ecuación no lineal (hipérbola) por cada nuevo Nodo B incluido en el *Measurement Report*. El problema es que cada nueva ecuación va a seguir introduciendo una nueva incógnita proveniente de la RTD del nuevo site. No obstante, juntando las ecuaciones de varios eventos que midan el mismo conjunto de sectores se puede llegar a obtener un sistema resoluble de ecuaciones, tal y como se verá en la Sección 3.2.4. La única condición que deben cumplir los eventos es que **el número de sites que reporten sea, al menos, 4** ($N_S \geq 4$, siendo N_S el número de sites reportados). Este hecho difiere del método OTDOA básico, donde solamente se necesitaban 3 sites al ser las RTDs parámetros conocidos del sistema. En definitiva, se requieren eventos que estén “viendo” 4 sites y que, por ende, generen tres hipérbolas cada uno, tal y como se muestra en la Fig.3.3. Asimismo, la posición de estos 4 sites debe ser conocida para obtener la distancia que los separa y trazar el eje focal imaginario que habría entre ellos, sin olvidar la relación de RTDs que también los vincula (ver Fig.3.4).

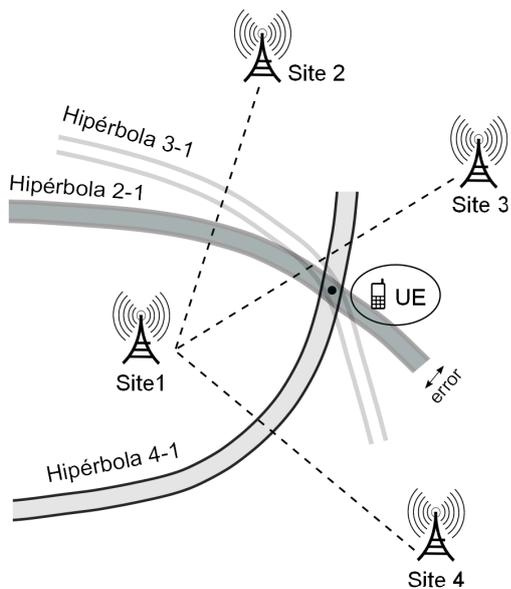


Figura 3.3: Ejemplo de multilateración hiperbólica en un escenario conformado por 4 sites. Se han representado las tres hipérbolas que se generan tomando el site 1 como referencia. Asimismo, el grosor de las hipérbolas es debido a posibles errores en las medidas causados, por ejemplo, por el multitrayecto o el redondeo.

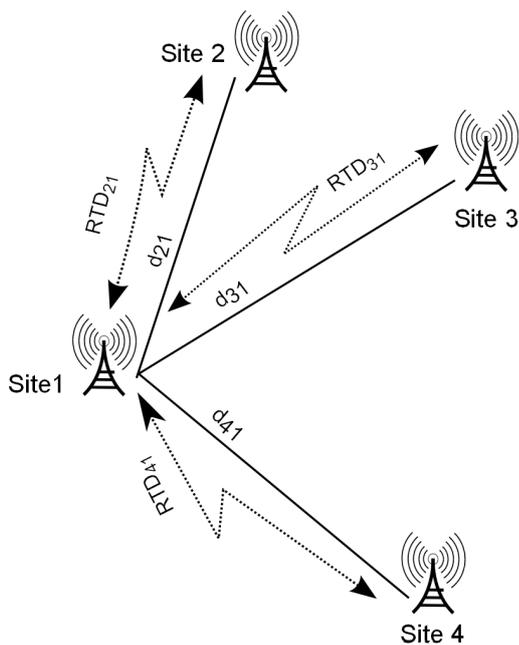


Figura 3.4: Escenario básico de 4 sites, donde se resaltan las relaciones entre el site de referencia (site 1) y el resto. Por un lado, los ejes focales corresponden a las distancias entre los sites (d_{21}, d_{31}, d_{41}). Por otro lado, las RTDs relacionan las diferencias de sincronización.

3.2.4. Sistema de ecuaciones no lineal

Hasta ahora se han detallado y expuesto todos los ingredientes y condiciones necesarias para construir el aparato matemático que permita resolver el problema de la geolocalización y la falta de sincronía. Así pues, el primer paso es definir la distancia entre el evento i -ésimo localizado en $\mathbf{x} = [x_i, y_i]$ y los sites medidos por éste, los cuales están ubicados en $\mathbf{x}_{S_j} = [x_{S_j}, y_{S_j}]$, $j \in 1, 2, \dots, N_S$. Entonces, esta distancia viene dada, según [76], por

$$d_i[j] = \sqrt{(x_{S_j} - x_i)^2 + (y_{S_j} - y_i)^2}. \quad (3.2)$$

Ahora, para generar una hipérbola se necesita una diferencia de distancias constante. Tomando dos Nodos B como focos y el UE como un punto de la hipérbola, se puede definir dicha curva hiperbólica como

$$d_i[1, j] = d_i[1] - d_i[j] = \sqrt{(x_{S_1} - x_i)^2 + (y_{S_1} - y_i)^2} - \sqrt{(x_{S_j} - x_i)^2 + (y_{S_j} - y_i)^2}, \quad (3.3)$$

donde el site 1, al ser el de referencia, es siempre uno de los focos, y $X[a, b] = X[a] - X[b]$.

A continuación, se introduce el parámetro \widehat{T}_M , que es la estimación de la medida real del T_M , pero normalizada al site. Así pues, este parámetro es leído y normalizado a partir de los MRs procesados, y también la RTD. La ecuación resultante viene dada, según [76], por

$$d_i[1, j] = \frac{\widehat{T}_M[j, 1] + RTD[1, j]}{\rho}, \quad (3.4)$$

siendo ρ un parámetro para hacer la conversión de chips a metros (1 metro corresponde a 0.0128 chips en UMTS), ya que \widehat{T}_M y RTD están expresados en chips. Aludiendo nuevamente al parámetro T_M , es conveniente recordar que $T_M[j]$ indica la diferencia de tiempos entre dos Nodos B, en este caso entre el Nodo B servidor y un Nodo B "j" medido por el UE, y $T_M[j, i]$ indica la diferencia entre dos parámetros T_M , el $T_M[j]$ y el $T_M[i]$. No obstante, existe la excepción del parámetro $T_M[1]$, el cual está referido al sector servidor del UE, ya que esta medida no representa una diferencia de tiempos entre Nodos B, tal y como se explica a continuación.

En este punto puede surgir la pregunta: ¿por qué se utiliza la diferencia de parámetros T_M , si de por sí ya son diferencias de tiempos? La respuesta es que se requiere establecer una referencia de tiempos absoluta con respecto al Nodo B de referencia para eliminar la dependencia con la sincronización entre los canales físicos P-CCPCH y DPCH del Nodo B servidor. De esta forma, restando dos parámetros T_M medidos por el mismo UE, se consigue suprimir esa dependencia. La siguiente definición del T_M permite aclarar esta idea:

$$T_M[1] = Q \quad (3.5)$$

$$T_M[j] = Q + d[1, j]\rho - RTD[1, j], \quad (3.6)$$

donde Q es la temporización entre los canales DPCH y P-CCPCH, y se asume que el site 1 es la estación base servidora. Igualmente, y con objeto de facilitar la comprensión del proceso, la Fig.3.5 resume gráficamente las disimilitudes entre la medida del T_M estándar, es decir, entre dos celdas, y el T_M referido únicamente a la celda servidora.

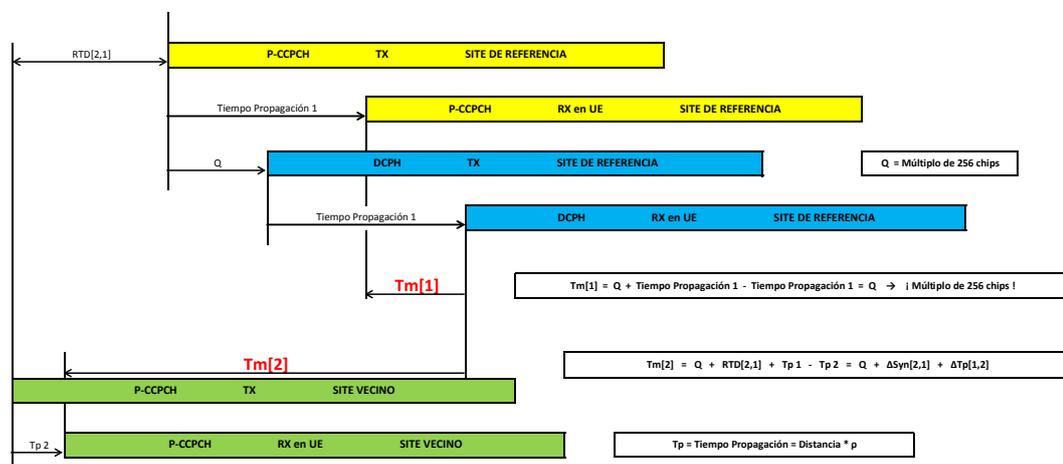


Figura 3.5: El esquema revela los detalles y particularidades del proceso de medida del parámetro T_m (también denotado como T_M). En primer lugar, existe un T_m medido con respecto a la celda servidora ($T_m[1]$) que indica la diferencia de tiempos entre el canal dedicado (DPCH) del site de referencia (barras de color azul) y el canal común (P-CCPCH) de este mismo site (barras de color amarillo). Este valor en realidad se corresponde con la temporización del canal DPCH que puede diferir según el UE. Aquí se ha denominado con el parámetro Q , el cual debe ser múltiplo de 256 chips para preservar la ortogonalidad del enlace descendente en la celda. En segundo lugar, se dispone del T_m estándar, que es el que se calcula entre dos celdas ($T_m[2]$) usando el canal P-CCPCH del site vecino medido por el UE (barras de color verde).

Tras estas explicaciones, se tiene lo necesario para construir el **sistema de ecuaciones no lineal**. Si en primera instancia se considera el caso genérico con M eventos reportando T_{Ms} de N diferentes sites, entonces el sistema de ecuaciones queda compuesto por $M \cdot (N - 1)$ ecuaciones. Cada evento introduce $N + 1$ incógnitas: las coordenadas geográficas x e y de su posición, además de las $N - 1$ RTDs asociadas a los sites reportados. Ahora bien, las $N - 1$ incógnitas referidas a las RTDs son idénticas para todos los eventos que componen el sistema siempre que se trabaje en un intervalo de tiempo delimitado. Asumiendo esta premisa, se concluye que en un escenario de M eventos y N sites el número total de incógnitas es $2M + (N - 1)$. Finalmente, y teniendo en mente que para obtener un sistema de ecuaciones resoluble se necesita que el número de ecuaciones sea al menos igual al número de incógnitas, se llega a una expresión simplificada que indica el número mínimo de eventos requeridos en función a la cantidad de sites del escenario:

$$M = \frac{(N-1)}{(N-3)}. \quad (3.7)$$

Otro dato clave que se puede extraer a simple vista de la ecuación anterior es que el número mínimo de sites en un escenario debe ser 4. Por consiguiente, tomando como referencia un **escenario básico de 4 sites** (Fig.3.4), se identifican las incógnitas que tiene nuestro problema: coordenadas x e y de cada evento que reporte los 4 sites del escenario, y las 3 RTDs de los sites. De nuevo, cada evento que se incluye aporta 3 ecuaciones (una por cada hipérbola generada) y 5 incógnitas. Entonces, aplicando la Ec. (3.7), se obtiene que se necesitan como mínimo 3 eventos en el escenario para construir un sistema resoluble. Este sistema tiene 9 ecuaciones y 9 incógnitas (las coordenadas de los 3 eventos y las 3 RTDs), y viene dado por

$$\begin{cases} \widehat{T}_{M_1}[2,1] = (\rho \cdot d_1[1,2] + RTD[2,1]) \\ \widehat{T}_{M_1}[3,1] = (\rho \cdot d_1[1,3] + RTD[3,1]) \\ \widehat{T}_{M_1}[4,1] = (\rho \cdot d_1[1,4] + RTD[4,1]) \\ \widehat{T}_{M_2}[2,1] = (\rho \cdot d_2[1,2] + RTD[2,1]) \\ \widehat{T}_{M_2}[3,1] = (\rho \cdot d_2[1,3] + RTD[3,1]) \\ \widehat{T}_{M_2}[4,1] = (\rho \cdot d_2[1,4] + RTD[4,1]) \\ \widehat{T}_{M_3}[2,1] = (\rho \cdot d_3[1,2] + RTD[2,1]) \\ \widehat{T}_{M_3}[3,1] = (\rho \cdot d_3[1,3] + RTD[3,1]) \\ \widehat{T}_{M_3}[4,1] = (\rho \cdot d_3[1,4] + RTD[4,1]). \end{cases} \quad (3.8)$$

Hay que tener en cuenta dos consideraciones relacionadas con este sistema de ecuaciones:

- En primer lugar, los eventos MRs que se extraigan de las trazas deben estar acotados en el tiempo. El motivo es que el **drift o deriva de los relojes** puede hacer variar la sincronización de los sites varios chips en pocos minutos. Entonces, se opta por la aproximación de fijar la **unidad temporal de agrupación de los MRs al ROP**, es decir, en intervalos de 15 minutos. De este modo, se busca un compromiso entre tener un número suficiente de eventos y minimizar las derivas de las RTDs. De hecho, la norma 3GPP dice en [67] que la mayor diferencia de frecuencia entre dos estaciones base o Nodos B es $\pm 1E-9$, esto es, el caso peor. Considerando los 15 minutos como 900 segundos, y sabiendo que la tasa de chip en UMTS es 3.84 Mcps, se puede calcular el error máximo que se podría cometer al emplear esta aproximación como

$$900 \cdot (1 \cdot 10^{-9}) = 9 \cdot 10^{-7} \text{ s}, \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{3.84 \cdot 10^6} = 0.26 \mu\text{s}/\text{chip}, \quad (3.10)$$

$$\frac{9 \cdot 10^{-7}}{0.26 \cdot 10^{-6}} = 3.46 \text{ chips}. \quad (3.11)$$

Redondeando, se obtiene que en 15 minutos, para el peor de los casos, no debería haber una desviación mayor de 3 chips en la sincronización entre Nodos B.

- En segundo lugar, se ha razonado que como mínimo un escenario tiene que tener 3 eventos. No obstante, **incluir más eventos tiende a mejorar la solución obtenida**, ya que tener redundancia ayuda a que las RTDs se repitan muchas veces y, por tanto, propendan a la solución correcta. El inconveniente es la complejidad computacional que representa añadir muchos eventos, ya que cada uno se traduce en 3 nuevas ecuaciones. Por este motivo, lo más adecuado es buscar un compromiso entre complejidad y respaldo al sistema de ecuaciones por redundancia.

La siguiente cuestión es plantearse cómo resolver un sistema de ecuaciones no lineal como el descrito en la Ec. (3.8) para encontrar la solución al problema de la geolocalización y la sincronización entre Nodos B. La resolución no es nada trivial y, de hecho, se necesita recurrir a métodos numéricos iterativos.

3.3. Métodos numéricos

Esta sección está centrada en la resolución del sistema de ecuaciones no lineal. Lo primero es definir la función de coste, linealizar las ecuaciones y hallar la Jacobiana. Una vez hecho esto, se presentan tres métodos numéricos iterativos: Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt y Levenberg-Marquardt modificado.

3.3.1. Linealización

El objetivo principal es encontrar las posiciones de los UEs y las RTDs que minimicen una función de coste dada por la diferencia de los T_M extraídos de los MRs y los valores estimados por el modelo. Concretamente, se emplea un **criterio de mínimos cuadrados** [72]. En un proceso estocástico, donde las medidas están sujetas a errores estocásticos desconocidos, la optimización mediante la norma euclídea es la mejor aproximación si estos errores son independientes [80]. Por lo tanto, la función de coste, también llamada residuo, queda definida como:

$$\varepsilon(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{RTD}) = \sum_{i=1}^N \left(\widehat{\mathbf{T}}_{M_i} - \widetilde{\mathbf{T}}_{M_i}(x_i, y_i, \mathbf{RTD}) \right)^T \cdot \left(\widehat{\mathbf{T}}_{M_i} - \widetilde{\mathbf{T}}_{M_i}(x_i, y_i, \mathbf{RTD}) \right), \quad (3.12)$$

donde N es el número de eventos *Measurement Report*, \mathbf{x} e \mathbf{y} son vectores que contienen las coordenadas cartesianas de los eventos, y \mathbf{RTD} contiene las diferencias relativas de tiempo entre el site de referencia y el resto de sites que componen el escenario. Por otra parte, $\widehat{\mathbf{T}}_{M_i}$ es un vector con las diferencias de medidas reales normalizadas al site, de la forma $\widehat{\mathbf{T}}_{M_i} = [\widehat{T}_{M_i}[2, 1], \widehat{T}_{M_i}[3, 1], \widehat{T}_{M_i}[4, 1]]$. Finalmente, $\widetilde{\mathbf{T}}_{M_i}$ representa un vector que incluye los valores estimados para cada evento.

En general, el problema es que (3.12) no tiene una solución cerrada. Por este motivo, se propone el uso de un método iterativo que vaya generando soluciones aproximadas a partir de valores o semillas iniciales, las cuales se representan como $(\mathbf{x}^{(0)}, \mathbf{y}^{(0)}, \mathbf{RTD}^{(0)})$. No obstante, es necesario linealizar previamente las ecuaciones para los i -ésimos eventos mediante la expansión de series de Taylor, obteniendo

$$\widetilde{\mathbf{T}}_{M_i} \approx \widetilde{\mathbf{T}}_{M_i} \left(x_i^{(0)}, y_i^{(0)}, \mathbf{RTD}^{(0)} \right) + \mathbf{A}_i(x_i, y_i) \Big|_{\substack{x_i=x_i^{(0)} \\ y_i=y_i^{(0)}}} \cdot (\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_i^{(0)})^T, \quad (3.13)$$

en la que \mathbf{z}_i , y la matriz Jacobiana, $\mathbf{A}_i(x_i, y_i)$, vienen dados por

$$\mathbf{z}_i = ([x_i] [y_i] [\mathbf{RTD}])^T, \quad (3.14)$$

$$\mathbf{A}_i = [\mathbf{A}_{ix} \mathbf{A}_{iy} \mathbf{B}], \quad (3.15)$$

donde $\mathbf{B} = \frac{\partial \widetilde{T}_{M_i}[j,1]}{\partial \mathbf{RTD}[j,1]} \forall j = 2 \dots N_s$ es la matriz identidad de tamaño $(N_s - 1) \times (N_s - 1)$.

Esta matriz sirve para representar las derivadas parciales de (3.8) con respecto a las RTDs. La razón de que se obtenga la matriz identidad es que las RTDs se asumen constantes en el intervalo de un ROP. Por su parte, \mathbf{A}_{ix} y \mathbf{A}_{iy} indican las derivadas parciales con respecto a las coordenadas cartesianas, las cuales se definen como

$$\mathbf{A}_{ix} = \frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{x_{S_2} - x_i}{d_2} - \frac{x_{S_1} - x_i}{d_1} \\ \frac{x_{S_3} - x_i}{d_3} - \frac{x_{S_1} - x_i}{d_1} \\ \vdots \\ \frac{x_{N_s} - x_i}{d_{N_s}} - \frac{x_{S_1} - x_i}{d_1} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{A}_{iy} = \frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial y} = \begin{bmatrix} \frac{y_{S_2} - y_i}{d_2} - \frac{y_{S_1} - y_i}{d_1} \\ \frac{y_{S_3} - y_i}{d_3} - \frac{y_{S_1} - y_i}{d_1} \\ \vdots \\ \frac{y_{N_s} - y_i}{d_{N_s}} - \frac{y_{S_1} - y_i}{d_1} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

donde $\mathbf{d}_i = [d_i[1,2], d_i[1,3], \dots, d_i[1, N_s]]$, y $d_i[1, j]$ fue definido en (3.3).

Ya se dispone de todo lo necesario para construir la matriz Jacobiana completa del sistema de ecuaciones. Recordemos que las incógnitas con las que se han hecho las derivadas parciales han sido las coordenadas cartesianas de los UEs (\mathbf{A}_{ix} y \mathbf{A}_{iy}) y las RTDs (\mathbf{B}). Por tanto, a partir de (3.15), (3.16) y (3.17), la expresión de la matriz Jacobiana queda como:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1x} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{1y} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{2x} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{2y} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{B} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{Nx} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{Ny} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Esta matriz es la base para desarrollar los tres métodos numéricos iterativos que se presentan a continuación. El motivo es que una de las aplicaciones más interesantes de la Jacobiana es la posibilidad de aproximar linealmente a la función multivariable en un punto, tal y como muestra la serie de Taylor en (3.13).

3.3.2. Gauss-Newton

El **método de Gauss-Newton (GN)** es una mejora del método de Newton para resolver problemas de mínimos cuadrados no lineales [81], ya que evita hacer uso de la inversa de la matriz Hessiana. Esto permite reducir considerablemente el coste computacional y conseguir que el método tenga una rápida convergencia. En concreto, GN busca el mínimo de una función no lineal siguiendo direcciones descendentes establecidas por su primera y segunda derivada. Además, GN requiere buenos valores iniciales para proveer estimaciones precisas y convergencia rápida; en caso contrario, existe riesgo de alcanzar un mínimo local en la función de coste o, incluso peor, de divergir. Por ejemplo, valores iniciales pobres o condiciones geométricas malas se traducen en matrices con rango deficiente y, por tanto, no invertibles para determinadas configuraciones de eventos y sites. Como consecuencia, se produce la divergencia del método [72].

En términos generales, el **algoritmo GN se resume en tres pasos:**

1. Definir la semilla inicial $x^{(0)}$. Hacer $k = 1$ y $x^{(1)} = x^{(0)}$.
2. Determinar $x^{(k+1)}$.
3. Siendo Tol la tolerancia, si $(x^{(k+1)} - x^{(k)}) < Tol$ o $k = k_{max}$, parar. El problema está resuelto. En caso contrario, hacer $k = k + 1$, $x^{(k)} = x^{(k-1)}$ e ir al paso 2.

La expresión para calcular $x^{(k+1)}$ en el punto 2 está deducida paso a paso en [82]:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \left(J(x^{(k)})^T J(x^{(k)}) \right)^{-1} \cdot J(x^{(k)})^T f(x^{(k)}), \quad (3.19)$$

donde J se refiere a la matriz Jacobiana, y al término $J^T J$ se le conoce como pseudo-Hessiana. Precisamente, este último es el que evita el uso de la matriz Hessiana tal cual.

Si ahora se traduce la expresión (3.19) a la notación que se ha desarrollado previamente, la siguiente relación recursiva es obtenida

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \mathbf{z}^{(k)} + (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \left(\widehat{\mathbf{T}}_{\mathbf{M}} - \widetilde{\mathbf{T}}_{\mathbf{M}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{RTD}) \right). \quad (3.20)$$

Con (3.20) ya se tiene lo necesario para utilizar el procedimiento de GN sobre nuestro sistema de ecuaciones no lineal. Es importante resaltar que el **principal inconveniente** de este método es que tiene poca flexibilidad o capacidad de adaptación, lo que deriva en un alto porcentaje de casos divergentes y convergentes a mínimos locales.

3.3.3. Levenberg-Marquardt

Levenberg-Marquardt (LM) es un **método de gradiente descendente híbrido entre GN y el método de descenso de la máxima pendiente (SD)**. La técnica SD busca un mínimo basado únicamente en la primera derivada de la función, asegurando la convergencia de una forma lineal. Por este motivo, la convergencia puede llegar a ser muy lenta en las iteraciones finales [72]. Por otro lado, recordemos que GN provee convergencia cuadrática, pero tiende a divergir si los valores iniciales están alejados del mínimo absoluto o la matriz Jacobiana está mal condicionada. Por consiguiente, la idea es minimizar los defectos de ambos algoritmos. Esto explica que LM sea una permanente elección entre la dirección de GN y la de SD, o alguna entre ambas. También puede verse como una clase de método GN amortiguado.

El fundamento de LM sugiere una mejora para aumentar la robustez de GN basada en el **parámetro de amortiguación** $\lambda > 0$. Este parámetro se añade a los elementos de la diagonal principal de la matriz pseudo-Hessiana con el propósito de hacerla bien condicionada e invertible. Cuando λ se acerca a cero, el método se acerca al método de GN, que funciona bien en las cercanías de la solución. Para valores grandes de λ , el método produce pequeños pasos en la dirección negativa del gradiente, acercándose al procedimiento de SD.

Por tanto, la forma en la que se determina $\mathbf{z}^{(k+1)}$ varía levemente con respecto a (3.20), quedando la expresión

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \mathbf{z}^{(k)} + \left(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda^{(k)} \mathbf{I} \right)^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \left(\widehat{\mathbf{T}}_{\mathbf{M}} - \widetilde{\mathbf{T}}_{\mathbf{M}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{RTD}) \right), \quad (3.21)$$

siendo \mathbf{I} la matriz identidad.

La forma más básica de LM implica fijar un valor de λ al principio y mantenerlo durante la ejecución del algoritmo. Sin embargo, esta metodología no aporta una gran ventaja con respecto a GN, por lo que la opción más común es hacer que λ sea adaptativo, modificándolo en cada iteración según el resultado del residuo obtenido. En este sentido, el **algoritmo para modificar** λ que se ha utilizado en este trabajo queda sintetizado de la siguiente forma:

1. Inicializar $k = 1$, $\lambda^{(1)} = 1$ y $v = 5$.

2. Realizar cálculos y determinar el nuevo residuo.
3. Comparar residuo de la iteración actual con el de la iteración anterior.
4. Si el residuo se ha reducido, $\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)}/\nu$ y mantenemos los nuevos valores de las variables; si no, $\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} \cdot \nu$ y volvemos a los valores de las variables de la iteración anterior.
5. Hacer $k = k + 1$ y volver a 2 hasta que se cumpla la condición de fin del algoritmo.

La elección y ajuste de los valores de $\lambda^{(1)}$ y ν se ha realizado heurísticamente después de analizar los resultados logrados en zonas europeas de carácter suburbano .

3.3.4. Levenberg-Marquardt modificado

Un aspecto negativo común a GN y LM es la tendencia a caer en mínimos locales. Si bien LM atenúa este inconveniente con respecto a GN gracias a su capacidad de adaptación, sigue habiendo un porcentaje considerable de escenarios y eventos en los que LM conduce a la solución errónea. Por tanto, éste y la aspiración a mejorar aún más la precisión punto a punto son los principales motivos para proponer una **versión mejorada y amoldada de LM al problema de la multilateración hiperbólica**.

El método propuesto queda recogido al completo en pseudocódigo en Algoritmo 3.1. A continuación, se enumeran algunas de las **características** más relevantes:

- k representa las iteraciones, habiéndose fijado un máximo de 100 como se observa en la **línea 9**. Se ha elegido un valor intermedio en pos del balance entre rendimiento y calidad.
- *networkRadius* es una variable que indica, en metros, el tamaño aproximado de la red móvil con la que se va a trabajar. Se recomienda fijar un valor que sea varias veces la distancia inter-site de la zona donde se quiere geolocalizar. OTDOA es un algoritmo especialmente adecuado para entornos suburbanos, por lo que, por defecto, se fija un valor de 3000 metros.
- El **parámetro α (líneas 6, 18 y 19)** representa la aportación más significativa del LM aquí propuesto. Este parámetro provee al método de alta robustez contra mínimos locales considerando la estimación de la iteración previa para evitar cambios abruptos entre dos iteraciones consecutivas, lo cual puede conducir hacia esos engañosos mínimos. Un ejemplo de la mejora lograda con α se observa en la Fig.3.6, donde hay dos escenarios formados por una configuración de sites en cuadrado. Ambas situaciones se han simulado sintéticamente generando medidas libres de error de 1000 UEs distribuidos por todo el espacio mostrado en la figura. Asimismo, la posición de partida de todos los UEs al aplicar el método numérico iterativo es el centro de masas de los sites. Pues bien, a la izquierda se ve el caso de LM clásico, mientras que a la derecha está LM usando el parámetro α . Comparando ambas imágenes, en la izquierda se observa cómo hay una nube de puntos generados en la proximidad de los sites, que no

Algoritmo 3.1 Levenverg-Marquardt modificado.

```

1:  $k \leftarrow 0$ 
2:  $\lambda^{(k)} \leftarrow 1$ 
3:  $v^{(k)} \leftarrow 2$ 
4:  $uplam^{(0)} \leftarrow 0.5$ 
5:  $incX^{(0)} \leftarrow 0$ 
6:  $\alpha \leftarrow 0.65$ 
7:  $updateJ \leftarrow 1$ 
8:  $networkRadius \leftarrow 3000$ 
9: while  $k \leq 100$  do
10:  if  $updateJ = 1$  then
11:    Calcular  $\widehat{\mathbf{T}}_M$ 
12:    Calcular la matriz Jacobiana
13:    if  $k = 0$  then
14:       $residuo^{(1)} \leftarrow \|\widehat{\mathbf{T}}_M - \widetilde{\mathbf{T}}_M\|$ 
15:    end if
16:  end if
17:   $incX^{(k)} \leftarrow \left(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda^{(k)} \mathbf{I}\right)^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \left(\widehat{\mathbf{T}}_M - \widetilde{\mathbf{T}}_M\right)$ 
18:   $incX^{(k)} \leftarrow \alpha \cdot incX^{(k)}$ 
19:   $\alpha \leftarrow 0.8\alpha$ 
20:  if  $updateJ = 0$  then
21:    Actualizar posiciones y RTDs
22:  else
23:    Actualizar solamente posiciones
24:  end if
25:  Calcular el nuevo residuo
26:
27:  
$$\rho \leftarrow \frac{residuo^{(k-1)} - residuo^{(k)}}{incX^{(k)T} \left( \left( \lambda^{(k)} incX^{(k)} \right) + \mathbf{A}^T \left( \widehat{\mathbf{T}}_M - \widetilde{\mathbf{T}}_M \right) \right)}$$

28:  if  $residuo^{(k)} < residuo^{(k-1)}$  then
29:    Actualizar la solución y el residuo
30:     $uplam \leftarrow \left(1 - (2\rho - 1)^3\right)$ 
31:    if  $uplam > 1$  then
32:       $uplam \leftarrow 0.99$ 
33:    end if
34:     $\lambda^{(k+1)} \leftarrow \lambda^{(k)} \cdot \max(0.5, uplam)$ 
35:     $v^{(k+1)} \leftarrow 1.1$ 
36:     $updateJ \leftarrow 1$ 
37:  else
38:     $\lambda^{(k+1)} \leftarrow \lambda^{(k)} v^{(k)}$ 
39:     $v^{(k+1)} \leftarrow 1.2v^{(k)}$ 
40:     $updateJ \leftarrow 0$ 
41:    if  $\lambda^{(k+1)} > 1000$  then
42:       $v^{(k+1)} \leftarrow 1.01$ 
43:       $\lambda^{(k+1)} \leftarrow 1$ 
44:    end if
45:  end if
46:   $k \leftarrow k + 1$ 
47: end while

```

son más que UEs cuya posición estimada ha quedado atascada en mínimos locales. Por el contrario, en la derecha todas las posiciones estimadas han sido calculadas sin error gracias a la ayuda del parámetro α .

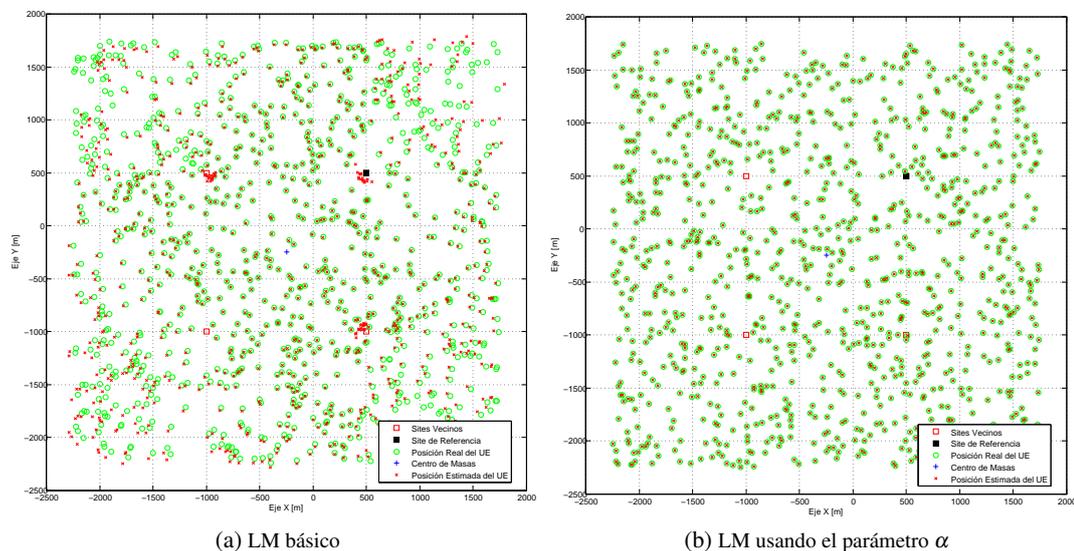


Figura 3.6: Simulación de un escenario con los sites en geometría de cuadrado y 1000 UEs distribuidos por el espacio de alrededor. En la izquierda, el uso de LM básico hace que muchos eventos acaben erróneamente localizados en mínimos locales generados en las inmediaciones de los sites. En la derecha, el parámetro α permite "saltar" esos mínimos locales logrando que la localización de todos los eventos sean perfectamente estimada.

- La variable *updateJ* registra si el residuo de la nueva iteración ha mejorado con respecto a la anterior, en cuyo caso toma el valor 1.
- *uplam* sirve para controlar el valor de λ cuando se cumplen ciertas condiciones
- Las expresiones de las **líneas 26, 29 y 33** para ajustar λ de forma inteligente han sido extraídas de [72].
- La condición de la **línea 20** ayuda a desacoplar, en cierta medida, las RTDs estimadas de las posiciones estimadas. De esta forma, si el residuo disminuye, en la siguiente iteración se busca optimizar solamente las posiciones de los eventos asumiendo que el algoritmo va por buen camino. En caso contrario, se interpreta que se necesita cambiar ambas magnitudes.
- Por último, las **líneas 27-43** abarcan un conjunto de condiciones cuyo objetivo es establecer el mejor valor del parámetro λ según la situación. Gran parte de estos ajustes han sido obtenidos heurísticamente a partir del significado físico de los parámetros, y de los resultados alcanzados en simulaciones con escenarios sintéticos y reales.

3.4. Configuración en estrella

Como se ha comentado anteriormente, los **mínimos locales** son el principal lastre que arrastran los métodos numéricos iterativos a la hora de calcular la posición de los eventos y la sincronización entre los sites. De hecho, uno de los factores más destacados en la formación de estos mínimos locales es la distribución espacial de los Nodos B. Es bien sabido que hay geometrías especialmente perjudiciales, tales como la línea recta [83], o situaciones donde las localizaciones de los móviles es tal que las diferencias de distancias entre el dispositivo móvil y las estaciones base llega a ser nula [84].

Concretamente, para mayor claridad, la Fig.3.7 muestra un par de ejemplos de mínimos locales al intentar estimar conjuntamente la posición geográfica de los UEs y las RTDs asociadas a los sites involucrados en el escenario. Estos UEs son representados como circunferencias (posición real de los eventos) y cruces (estimación de los anteriores posiciones reales de los eventos). El sistema provee una estimación para la posición de cada evento, así como estima las RTDs asociadas a los 4 sites del escenario. Por último, las tres hipérbolas dibujadas, tomando como referencia el Nodo B representado con un cuadrado sólido negro, hacen referencia al UE actual que va ser posicionado (círculo negro). La intersección de estas curvas determina la posición real del usuario.

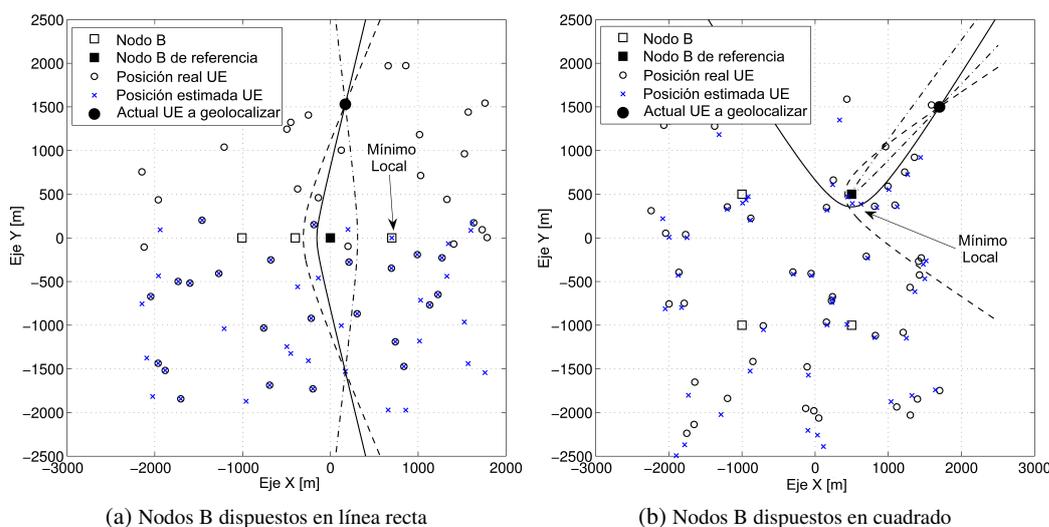


Figura 3.7: Ejemplos de malas geometrías: (a) La geometría en línea recta manifiesta una ambigüedad irresoluble en la estimación de las posiciones de los UEs. Además, mínimos locales son detectados en el extremo de los ejes focales. (b) Sites colocados en cuadrado con presencia de mínimos locales. Para el actual UE a geolocalizar, en la intersección de las 3 hipérbolas, el algoritmo iterativo falla porque se forma un mínimo local cerca del Nodo B de referencia. Ahí, se produce la intersección de dos hipérbolas, muy cerca en el espacio a la tercera hipérbola, por lo que la función de coste llega a ser muy pequeña.

Como se ha mencionado previamente, el algoritmo de posicionamiento puede fallar al hacer frente a los mínimos locales, ofreciendo, en muchos casos, soluciones poco precisas. Por consiguiente, el nefasto efecto de los mínimos locales debería ser minimizado tanto como sea posible, por ejemplo seleccionando geometrías de sites adecuadas. En este sentido, esta sección presenta una propuesta original de configuración espacial de sites que ha demostrado ser robusta contra estos mínimos locales. A esta geometría de 4 sites se le ha dado el nombre de **configuración en estrella** [31, 32] porque su forma recuerda precisamente a una estrella. Analizando diferentes entornos de Europa Central, Europa Occidental y USA con datos reales, se ha observado que estas configuraciones espaciales de sites son fácilmente reconocibles y localizables en cualquier escenario real. En consecuencia, la Fig.3.8 representa tres redes móviles en activo que muestran tres representativas geometrías en estrella de las muchas posibles que pueden ser advertidas.

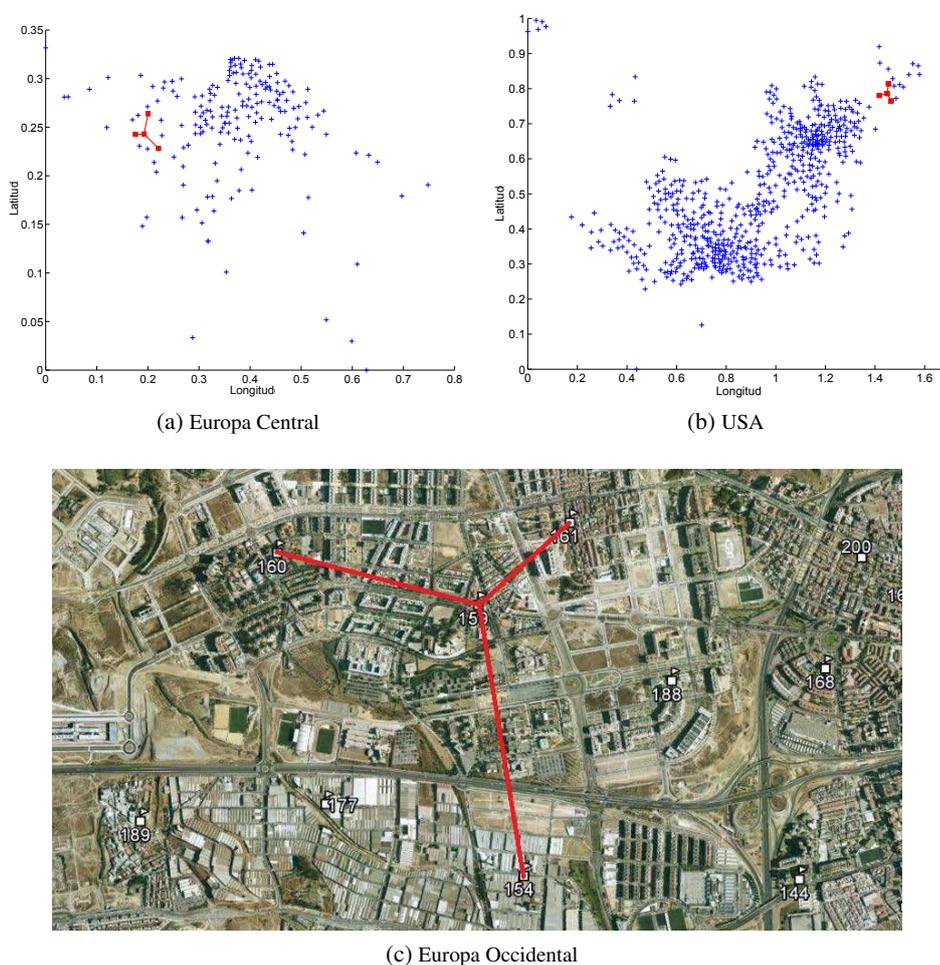


Figura 3.8: Posiciones de estaciones base en tres escenarios reales correspondientes a (a) Europa Central, (b) USA, y (c) Europa Occidental, donde configuraciones en estrella (marcadas en rojo) son frecuentemente encontradas sin esfuerzo.

3.4.1. Definición de estrella

Los distintos tests realizados han revelado que los sites dispuestos en una configuración de estrella deben satisfacer la geometría mostrada en la Fig.3.9. Entonces, y tomando el site 'A' como el Nodo B de referencia, los ángulos entre dos de los sites restantes deben medir idealmente 120° , mientras que la diferencia en distancia entre cualquier Nodo B y el Nodo B de referencia debe ser idéntica. Afortunadamente, esta configuración en estrella tiene la ventaja de que sus especificaciones pueden ser suavizadas.

Experimentalmente, se ha comprobado que **los ángulos entre dos sites consecutivos, con el site 'A' en el vértice del ángulo, deberían medir más de 100° y menos de 140°** para preservar la robustez de la geometría. Asimismo, **la diferencia de distancia entre el site más alejado y el más cercano al Nodo B de referencia no debe exceder la proporción 3:1**. Por ejemplo, y siguiendo la notación de la Fig. 3.9, si $d_{AC} = 1.5$ km y $d_{AD} = 1$ km, entonces se recomienda que $d_{AB} < 3$ km. Si ahora nos referimos al escenario real de la Fig.3.8(c), las distancias entre el site #159 y los sites #160, #161 y #154 son, respectivamente, 934, 551 y 120 metros, y, en consecuencia, $d_{\#159-\#164}/d_{\#159-\#161} = 2.23$. Por otro lado, considerando el site #159 como vértice, los ángulos entre los sites son: 123° , 123° y 114° , para los pares #160-#161, #161-#154 y #154-#160, respectivamente. Por último, recordar que la proporción 3:1 no es una condición completamente cerrada, de modo que el sistema podría funcionar adecuadamente con diferencias de distancias superiores.

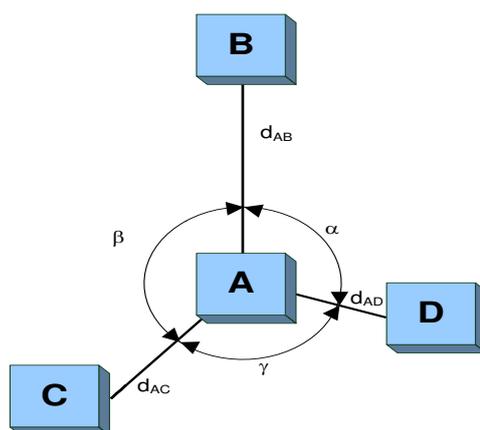
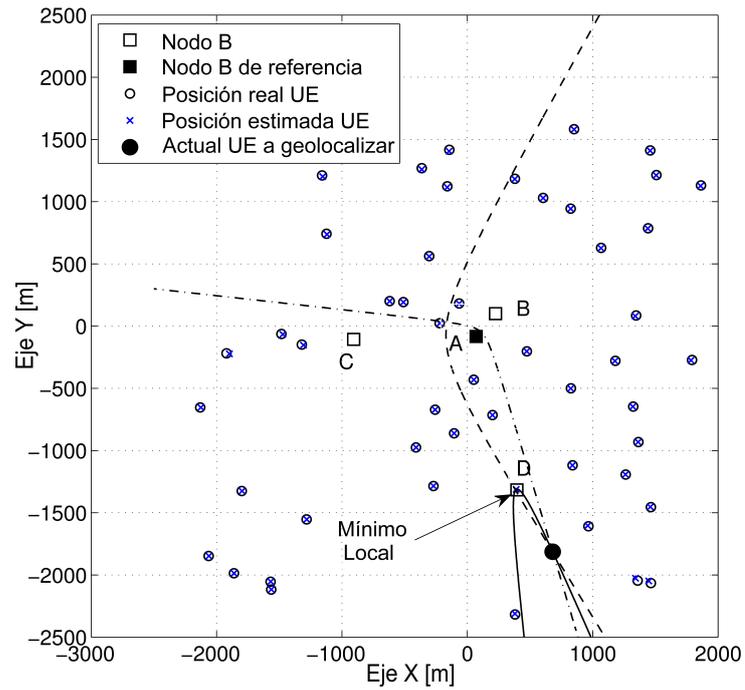
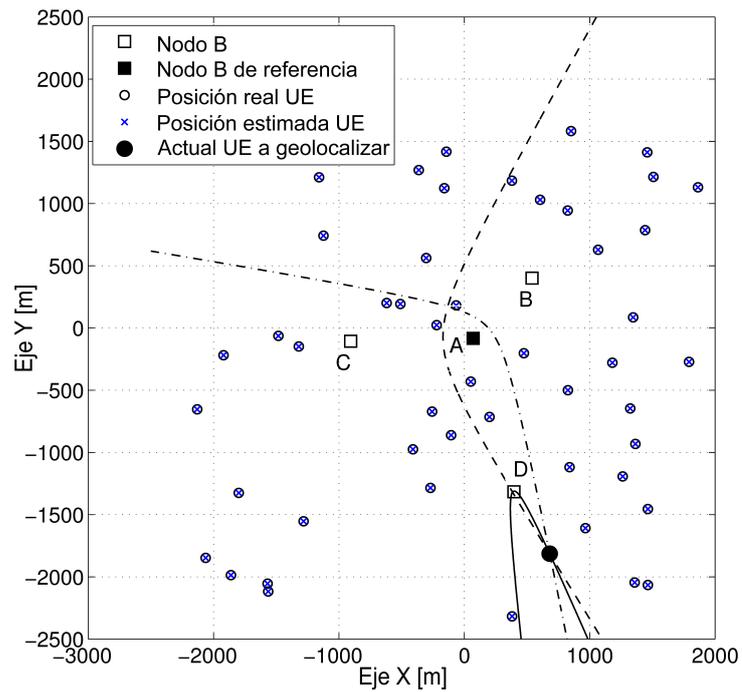


Figura 3.9: Sites situados en una geometría en estrella formada por cuatro sites nombrados 'A', 'B', 'C' y 'D', siendo 'A' el site de referencia. Los ángulos entre dos de estos sites (α , β , γ) deben estar entre 100° y 140° , esto es, 1.75 y 2.44 rads. Por otro lado, la distancia entre el site más lejano y el más cercano con respecto al site de referencia no debería exceder la proporción 3:1.

El efecto de la condición de distancia es mostrado en la Fig.3.10, donde 'A' es de nuevo el site de referencia. En primer lugar, se observa un mínimo local en la Fig.3.10(a), donde los ángulos α , β , γ , ya definidos en la Fig.3.9, están fijados a 103.48° , 125.23° y 131.29° , respectivamente. Por su parte, las distancias son: $d_{AB} = 0.241$ km, $d_{AC} = 0.977$ km



(a) No se cumple la proporción 3:1



(b) Se cumple la proporción 3:1

Figura 3.10: Efecto de las distancias entre Nodos B en un escenario con sites dispuestos en geometría de estrella, donde el ratio entre el site más alejado y el más cercano al site 'A' de referencia es: (a) 5.29 y (b) 1.89.

y $d_{AD} = 1.275$ km. Evidentemente, la proporción $d_{AD}/d_{AB} = 5.29$ es mayor que la restricción propuesta de 3:1 y, por tanto, se forma un mínimo local prácticamente encima del site 'D'. De hecho, cerca de esta localización se produce la intersección entre dos de las hipérbolas derivadas de la combinación de sites 'A' - 'B' y 'A' - 'D'. Además, la hipérbola generada por la pareja de sites 'A' - 'C' pasa también cerca de este punto, lo cual provoca que el valor de la función de coste sea pequeño. Por esta razón, el algoritmo iterativo empleado para geolocalizar tiende a quedar bloqueado por este tipo de mínimos locales. Sin embargo, si d_{AB} se incrementa hasta 0.675 km, entonces $d_{AD}/d_{AB} = 1.89$, lo que significa que se cumple la proporción propuesta de 3:1. Con esto, el mínimo local no aparece, tal y como se puede ver en la Fig.3.10(b). Bajo esta configuración, α , β , γ se modifican a 103.48° , 121.03° y 135.49° .

3.4.2. Características de la geometría en estrella

Para mayor sencillez, e igual que se hiciera en la Fig.3.10, a lo largo de esta sección se van a emplear escenarios sintéticos para demostrar la robustez y características de la configuración en estrella propuesta en esta tesis. Estos escenarios ofrecen mayor flexibilidad y pueden ser generados de forma sencilla y rápida. De este modo, el impacto de los mínimos locales puede ser aislado de otros efectos adversos, como el multitrayecto.

3.4.2.1. Impacto de la proporción entre la distancia mínima y máxima

Para justificar a alto nivel la limitación en el ratio entre la mayor y la menor distancia entre uno de los Nodos B y el Nodo B de referencia, se considera el escenario genérico de la Fig.3.9. Entonces si, por ejemplo, d_{AB} es pequeña, todas la familia de hipérbolas generadas entre 'A' y 'B' tendrán sus vértices comprimidos en una distancia d_{AB} . Siguiendo una aproximación no lineal de mínimos cuadrados, se formula una función de coste similar a la Ec. (3.12), pero escrita de forma más simplificada, como

$$\varepsilon(\mathbf{x}) = \left(\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x}) \right)^T \cdot \left(\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x}) \right), \quad (3.22)$$

donde $\mathbf{d} = [d[A, B], d[A, C], d[A, D]]$, con $d[A, i]$, $i \in B, C, D$ formulada en la Ec. (3.4).

Ahora, se asume la presencia de un mínimo local formado por la intersección de las hipérbolas 'A' - 'C' y 'A' - 'D'. En este contexto, si la distancia d_{AB} fuera pequeña, ésta tendría un impacto menor en la función de coste. En realidad, su máxima contribución a esta función sería d_{AB}^2 ; por ejemplo, si se tuviera un UE con posición real en el site 'A', pero su posición se hubiera geolocalizado en el site 'B'. Por este motivo, habría una leve diferencia de residuo entre el mínimo local y el mínimo global, lo cual llegaría a ser una potencial fuente de bloqueo para un algoritmo iterativo. Precisamente, para evitar este efecto, se sugiere que las distancias entre cualquiera de los Nodos B del escenario y el Nodo B de referencia sean similares y, en este aspecto, se propone la proporción 3:1.

De nuevo, esto puede ser mostrado en la Fig. 3.10(a) observando la hipérbola cuyos focos corresponden a los sites 'A' y 'B'. Considera que una nueva hipérbola con estos focos es dibujada (no se representa en la figura por motivos de claridad), pero en este caso conteniendo al mínimo local en lugar del mínimo global (posición real del UE). En esta situación, la diferencia en distancia de ambas hipérbolas 'A' - 'B' sería solamente de 0.252 chips, es decir, 19.69 m entre los vértices. Sin embargo, repitiendo este ejercicio para el caso de la Fig. 3.10(b), esta diferencia se incrementa hasta los 1.725 chips, es decir, 134.76 m. Asimismo, cabe destacar que la presencia de un mínimo local afecta a la precisión de otras posiciones geolocalizadas, ya que se propagaría cierto error a las estimaciones de las RTDs, las cuales afectarían a su vez a otras posiciones. Esto se observa, por ejemplo, a la izquierda del site 'C'.

Por último, se quiere destacar la importancia en la elección del método numérico a utilizar. Un método como Levenberg-Marquardt aumenta las posibilidades de "saltar" este tipo de mínimos locales gracias al parámetro λ . Un valor pequeño de este parámetro hace que los incrementos entre iteraciones consecutivas puedan ser más grande, con objeto de evitar quedar atrapado en ese mínimo local y llegar así directamente al mínimo global.

3.4.2.2. Robustez frente a las semillas iniciales

La Fig. 3.11 muestra cómo la topología en estrella es completamente **independiente de la posición de la semilla inicial**, la cual es utilizada por los métodos numéricos iterativos como punto de partida. Por su parte, otras geometrías, véase, por ejemplo, el rectángulo, no son tan robustas.

Así pues, el comportamiento de un escenario con sites colocados en disposición rectangular es comparado con respecto a la geometría en estrella. Se asume que la posición de los eventos no contiene ninguna fuente de error. Las semillas iniciales son diferentes para los casos representados en las Fig. 3.11(a)-(e). Para todas estas situaciones, se generan mínimos locales, proporcionando soluciones imprecisas, incluso sin que haya fuentes de error afectando a las medidas de los eventos. Por el contrario, la configuración en estrella ilustrada en la Fig. 3.11(f) demuestra ser robusta para estos mismos valores iniciales, ya que siempre provee la misma solución que, por otra parte, es la correcta.

3.4.2.3. Efecto de la resolución del parámetro T_M

En los escenarios reales, los T_M medidos tienen una resolución de un chip, lo que significa que intrínsecamente se parte de un error de ± 0.5 chips solamente por el **efecto del redondeo**. Evidentemente, esta limitación adicional respalda la idea de evitar distancias muy pequeñas entre Nodos B. Con el fin de evaluar la repercusión de esta limitación en la geometría en estrella, se han simulado dos escenarios en los que se ha incluido el efecto de este error a los eventos sintéticos generados. Las simulaciones se recogen en la Fig. 3.12, donde se representa una topología rectangular y una en estrella. Los eventos en ambos casos están situados en las mismas localizaciones para hacer la comparación de modo objetivo.

3.4 Configuración en estrella

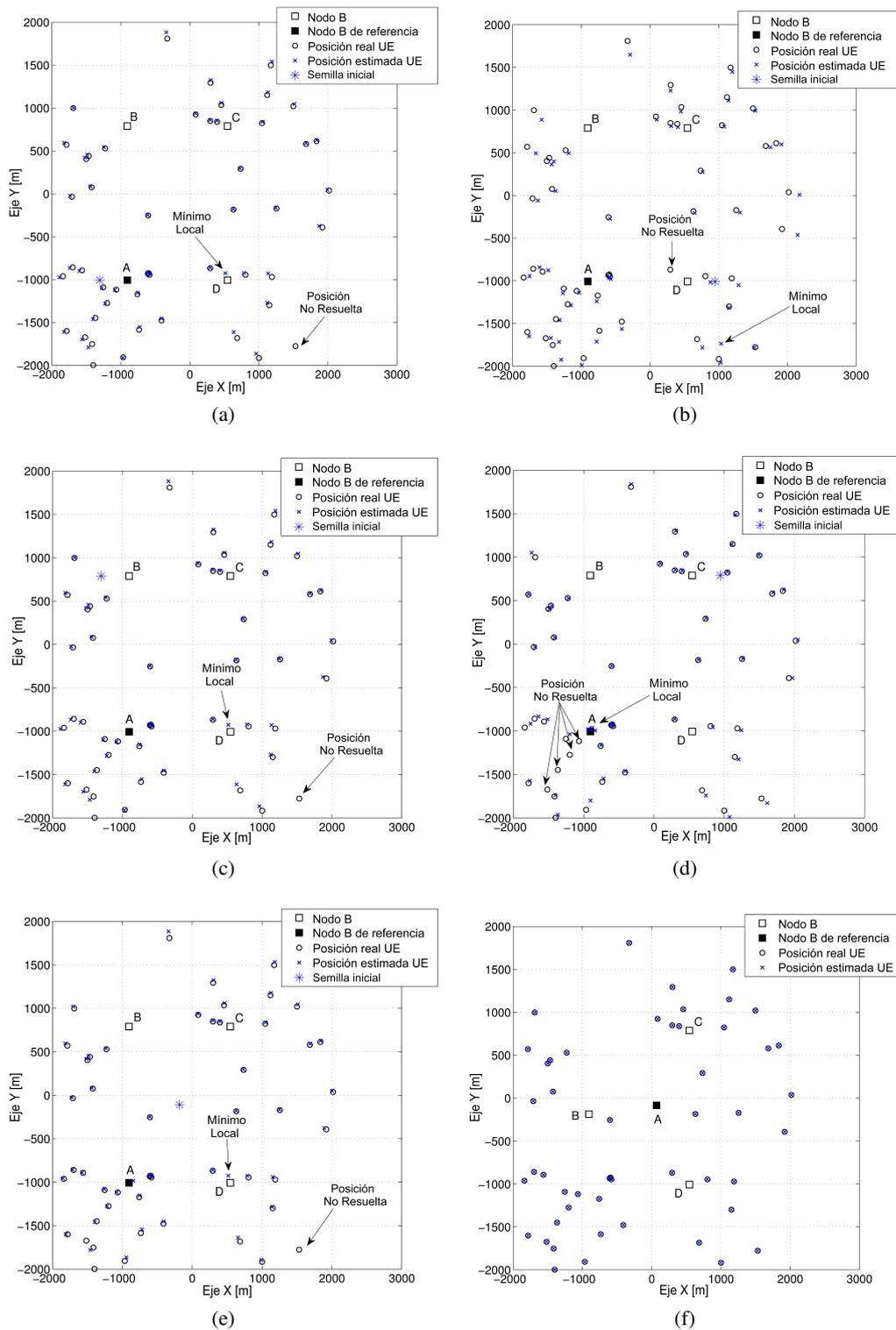


Figura 3.11: Escenarios con una configuración de sites en rectángulo e idénticas posiciones de los eventos en todos los casos. Los eventos son ideales y sintéticos, es decir, sin errores asociados. Los valores iniciales para el algoritmo de Levenberg-Marquardt fueron elegidos cerca de cualquiera de los sites involucrados en el escenario, tal y como se muestra en los casos (a) hasta (d); y en el centro de masas de los sites, tal y como indica (e). Todos ellos son comparados con la configuración en estrella recogida en (f), la cual ha empleado los mismos valores iniciales mencionados para la configuración rectangular. En el caso de la estrella, siempre se consigue exactamente la misma solución.

La Fig.3.12(a) muestra un obvio mínimo local cerca del Nodo B de referencia. Como consecuencia, los eventos detrás de este site están incorrectamente geolocalizados, y Levenberg-Marquardt acaba estimando sus posiciones justo delante del site señalado. Se observa también que el error del T_M induce un desplazamiento en la posición de las hipérbolas, causando que las tres hipérbolas trazadas no intersecten en el mismo punto, que en condiciones ideales sería la posición del UE a geolocalizar (círculo negro). Al comparar, se advierte que en la estrella, Fig.3.12(b), no hay un cúmulo de puntos que indiquen la formación de mínimos locales, ya que dos de las hipérbolas siempre son capaces de constituir una trayectoria despejada para alcanzar el mínimo global. No obstante, las posiciones no son perfectamente recuperadas a consecuencia del error de redondeo.

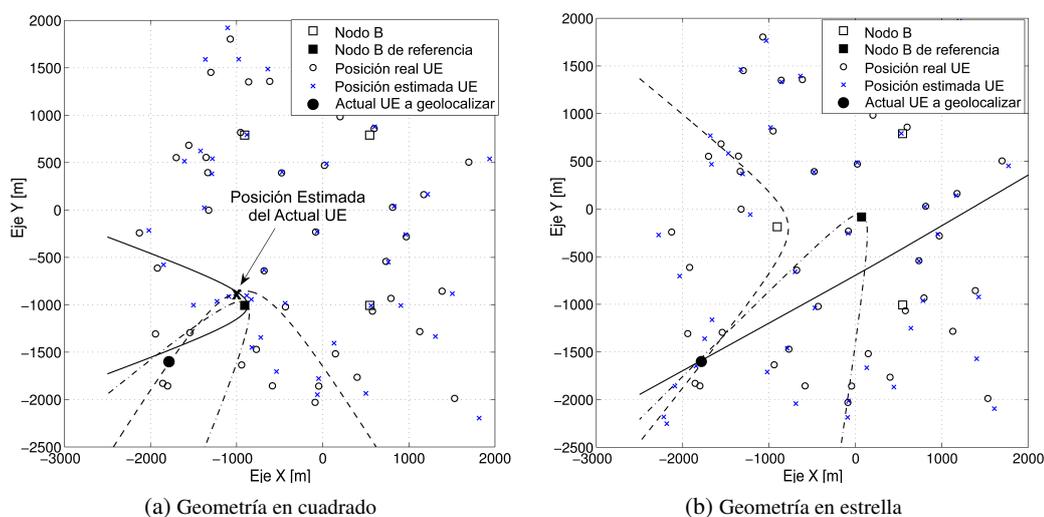


Figura 3.12: Escenarios con eventos sintéticos a los que se le ha añadido el error por redondeo del parámetro T_M a todas las medidas. Por otro lado, (a) muestra una configuración de 4 sites en rectángulo y (b) en estrella. Las tres hipérbolas dibujadas se refieren a un UE particular representado como un círculo grande negro. Como resultado, el mínimo local detectado en la configuración rectangular es evitado al emplear la geometría en estrella. Asimismo, la posición estimada para el UE particular bajo análisis es resaltada con una 'X' en negrita para el caso (a).

3.4.3. Rango de las diferencias de pendientes

Esencialmente, son dos los factores que inducen la aparición de mínimos locales: un **rango de diferencias de pendientes estrecho** y el **cruce de dos hipérbolas cerca de la tercera**. En este trabajo, se ha definido el rango de diferencias de pendientes como la diferencia entre el valor mayor y el menor de la derivada de y con respecto a x , dx/dy .

3.4.3.1. Definición analítica

Se establece la ecuación de una hipérbola [85] con semieje mayor a , paralelo al eje x , y semieje menor b , paralelo al eje y , como

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1, \tag{3.23}$$

donde el centro está en el punto (x_0, y_0) . Tomando la derivada implícita de la Ec. (3.23):

$$\frac{2(x-x_0)}{a^2} - \frac{2(y-y_0)}{b^2} \frac{dy}{dx} = 0. \tag{3.24}$$

Entonces, la pendiente de la línea tangente a la hipérbola en un punto $P = (x_p, y_p)$ es

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b^2(x_p-x_0)}{a^2(y_p-y_0)} \triangleq m. \tag{3.25}$$

Ahora, y asumiendo la Fig.3.13 como referente, se define el site llamado ‘A’ como site de referencia en todas las medidas. Este site está centrado en el origen de coordenadas $(0,0)$, por lo que $x_0 = d_{Ai}/2$ e $y_0 = 0$, siendo d_{Ai} la distancia del site de referencia (situado en uno de los focos) a cualquier punto focal $i \in \{A, B, C\}$ establecido por los sites restantes del escenario A, B y C , respectivamente.

Asimismo, de [85], los dos focos en una hipérbola están separados por una distancia $2c$, donde c está relacionado a los semiejes siguiendo la relación $c^2 = a^2 + b^2$.

En primera instancia, para cualquiera de las tres hipérbolas que pueden ser formadas, se asume que los focos están colocados en el eje x . Si este no es el caso, entonces es necesario

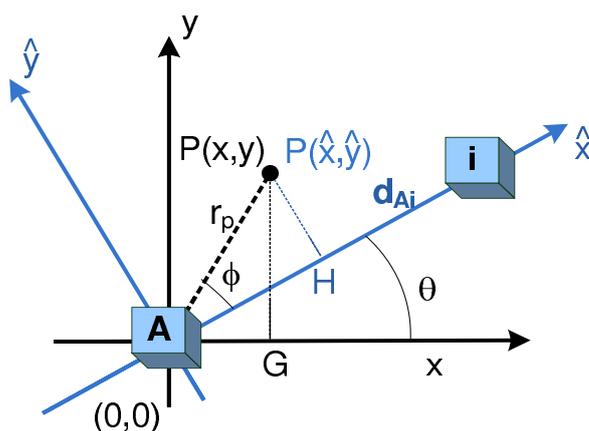


Figura 3.13: Rotación de los ejes de coordenadas x e y .

realizar una rotación de los ejes. En este sentido, primero se supone que los ejes de coordenadas x e y han sido rotados sobre el origen por un ángulo θ . En otras palabras, un site $i \in \{A, B, C\}$ es rotado θ grados con respecto al eje x , mientras que el site de referencia 'A' se mantiene fijo en el origen. Este aspecto se ilustra también en la Fig.3.13.

Procediendo así, y teniendo en cuenta los ángulos θ y ϕ expuestos en la figura, las coordenadas para un punto P en el plano $\hat{x}\hat{y}$ y en el plano rotado xy son, respectivamente, (\hat{x}_p, \hat{y}_p) y (x_p, y_p) , y son calculadas del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \hat{x}_p &= r_p \cos \phi & y & \hat{y}_p = r_p \sin \phi & ; \\ x_p &= r_p \cos(\theta + \phi) & y & y_p = r_p \sin(\theta + \phi). \end{aligned} \quad (3.26)$$

Por tanto, las coordenadas para un punto P en el plano relativo al sistema de coordenadas xy ha sido determinado. Después, se aplica directamente la Ec. (3.25) para obtener la pendiente de la hipérbola asociada a dos sites ('A' como el site de referencia, e i como el site objetivo). Posteriormente, la rotación de los ejes escrita en la Ec. (3.26) debe ser revertida aplicando simplemente:

$$m = m + \theta. \quad (3.27)$$

Llegados a este punto, se han hallado tres pendientes (m_{AB} , m_{AC} , m_{AD}) correspondientes a las hipérbolas generadas cuando los focos están situados en: 1) sites 'A' y 'B', 2) sites 'A' y 'C'; y 3) sites 'A' y 'D'. Ahora, estos tres valores son comparados. La idea es extraer el rango de diferencias de pendientes restando dos a dos las tres pendientes calculadas, y quedarse con el caso en el que la diferencia es mayor, es decir, el caso más perpendicular posible. Este rango estará contenido en el intervalo $[0, \pi/2]$ rads, siendo una intersección de $\pi/2$ rads entre dos hipérbolas en un punto dado, P , el caso más favorable, ya que equivale a hipérbolas perpendiculares. Por esta razón, la presencia de mínimos locales está fuertemente asociada a hipérbolas paralelas, o cuasi-paralelas, en una entorno reducido cercano al punto P .

En aras de la claridad, la Fig.3.14 muestra las diferencias de pendientes de un punto concreto denominado P dentro de un escenario formado por sites en disposición rectangular. Tres diferencias de pendientes se derivan de las tres hipérbolas: 187.77° , 160.28° y 56.41° . Estos ángulos tienen que ser manipulados para figurar en el intervalo $[0, 90^\circ]$, de forma que se obtienen los valores: 7.77° , 19.72° y 56.41° . Éste último, 56.41° , es el valor más alto, por lo que equivale al rango de diferencias de pendientes buscado, esto es, 0.9845 rads.

3.4.3.2. Evaluación general sobre diversas distribuciones espaciales de sites

En este apartado, el rango de diferencias de pendientes es evaluado para diferentes geometrías espaciales de sites, tal y como se muestra en la Fig.3.15. Ahí, se analizan cuatro tipos de escenarios diferentes según la distribución de los sites en el espacio (línea recta, cuadrado, disposición en 'T' y estrella). Las áreas en rojo representan zonas con un ran-

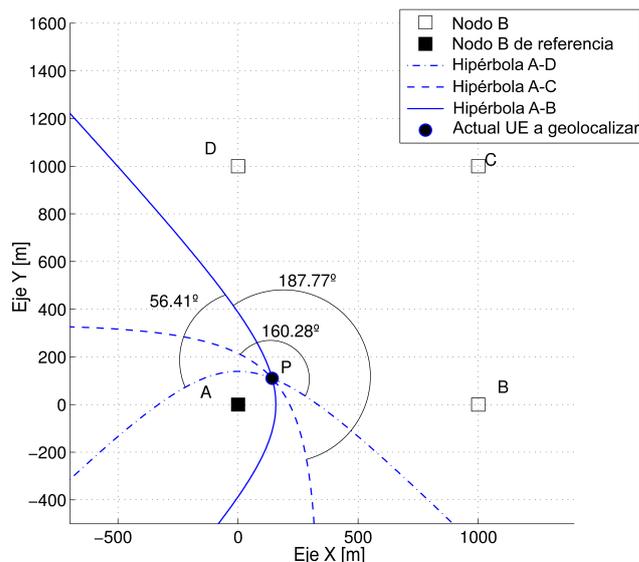


Figura 3.14: Diferencias de pendientes de tres hipérbolas en un determinado punto *P* para un escenario con topología rectangular.

go cercano a $\pi/2$ rads, lo que se traduce en zonas prácticamente libres de mínimos locales, mientras que las áreas más azuladas corresponden a zonas con un rango menor de $\pi/5$ rads, es decir, zonas en las que no se puede asegurar la ausencia de mínimos locales, y que, además, son propensas a tenerlos.

Un ejemplo ilustrativo se muestra en la Fig. 3.16, donde se presenta un escenario de 1000 eventos que reportan un conjunto de cuatro sites dispuestos en cuadrado, situación análoga a la representada en la Fig. 3.15(b). Directamente, se observa que los UEs localizados en áreas de alto rango de diferencias de pendientes están geolocalizados correctamente. Los problemas aparecen en las zonas detrás de los sites 'B' y 'D', o en regiones más distantes de su site más cercano. Por ejemplo, el par de puntos denotado como P_1 en la Fig. 3.16 indica dos posiciones reales de UEs cuyas estimaciones han sido posicionadas cerca del site 'D', formando un área de mínimos locales. Al buscar estas posiciones en la Fig. 3.15(b), se ve que están ubicadas en una zona con rango de diferencias de pendientes menor de 20° . Una situación similar se produce en los puntos denominados como P_2 .

Finalmente, el punto llamado P_3 está a 650 metros del site 'A', es decir, está justamente situado en una zona con un rango de diferencias de pendientes de $\pi/5$ rads, tal y como se comprueba en la Fig. 3.15(b). Así pues, su estimación queda atrapada en una nueva zona de mínimos locales generada alrededor del site 'A'.

Volviendo otra vez a la Fig. 3.15, la configuración en estrella provee una solución óptima, puesto que es la que cubre el área más amplia con rangos altos, es decir, áreas para evitar los mínimos locales. El caso de la línea recta representado en la Fig. 3.15(a), cuya área en rojo podría ser comparable en tamaño a la configuración en estrella, presenta el grave inconveniente de la simetría espejo con respecto a su eje principal. Esta característica causa

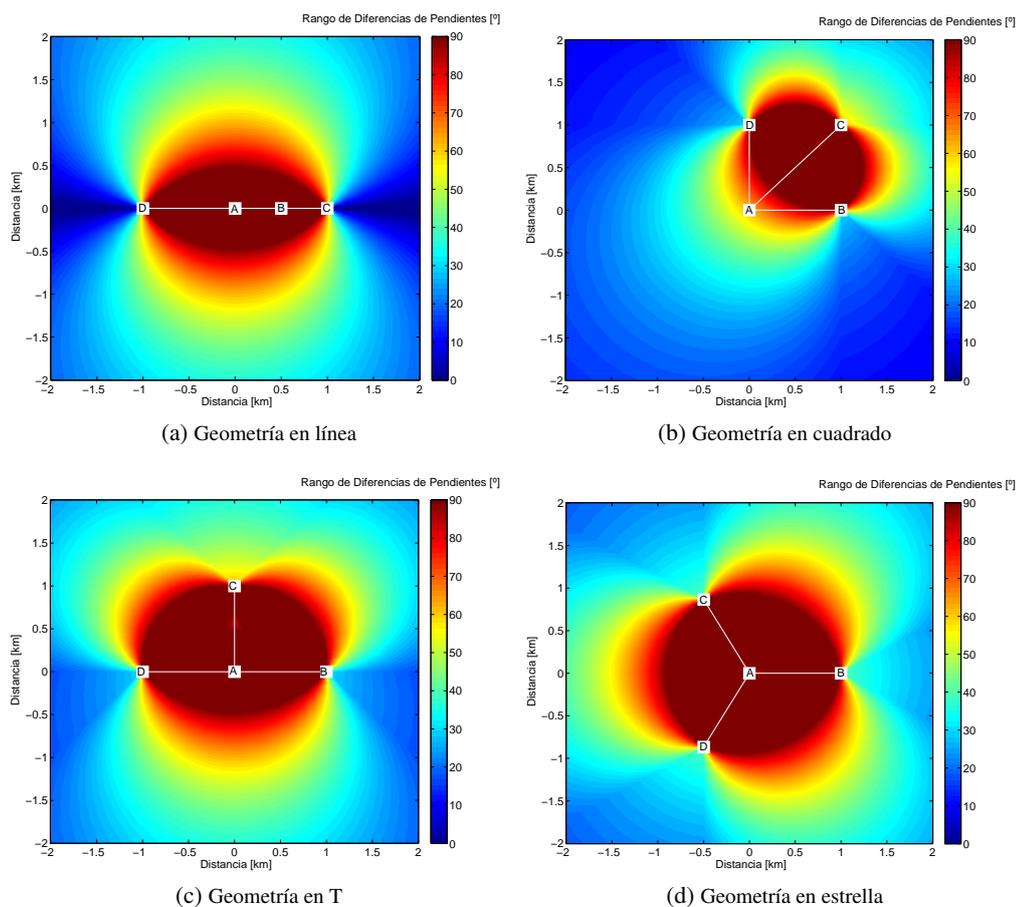


Figura 3.15: Rango de diferencias de pendientes evaluado para distribuciones de sites en: (a) línea recta, (b) cuadrado, (c) disposición de ‘T’, y (d) estrella. En todos los casos, el site ‘A’ es el site de referencia para que todas las medidas diferenciales sea tomadas con respecto a él.

que siempre se produzcan dos intersecciones de las tres hipérbolas, por lo que se necesita información adicional para deshacer la ambigüedad. En cuanto a la ya mencionada configuración en cuadrado ilustrada en la Fig. 3.15(b), se deduce que cualquier punto dentro del polígono definido por las estaciones base estará libre de mínimos locales. Este mismo rasgo también sucede en la Fig. 3.15(c). Sin embargo, para estos dos últimos casos, las zonas libres de mínimos locales son más reducidas que las obtenidas con la configuración en estrella, tal y como muestra la Fig. 3.15(d). Por tanto, la geometría en estrella se reafirma como la geometría óptima.

3.4.3.3. Análisis de zonas con un rango alto

Con el objetivo de probar la validez del rango de diferencias de pendientes como figura de mérito, esto es, un valor para este rango cercano a los $\pi/2$ rads es sinónimo de ausencia de

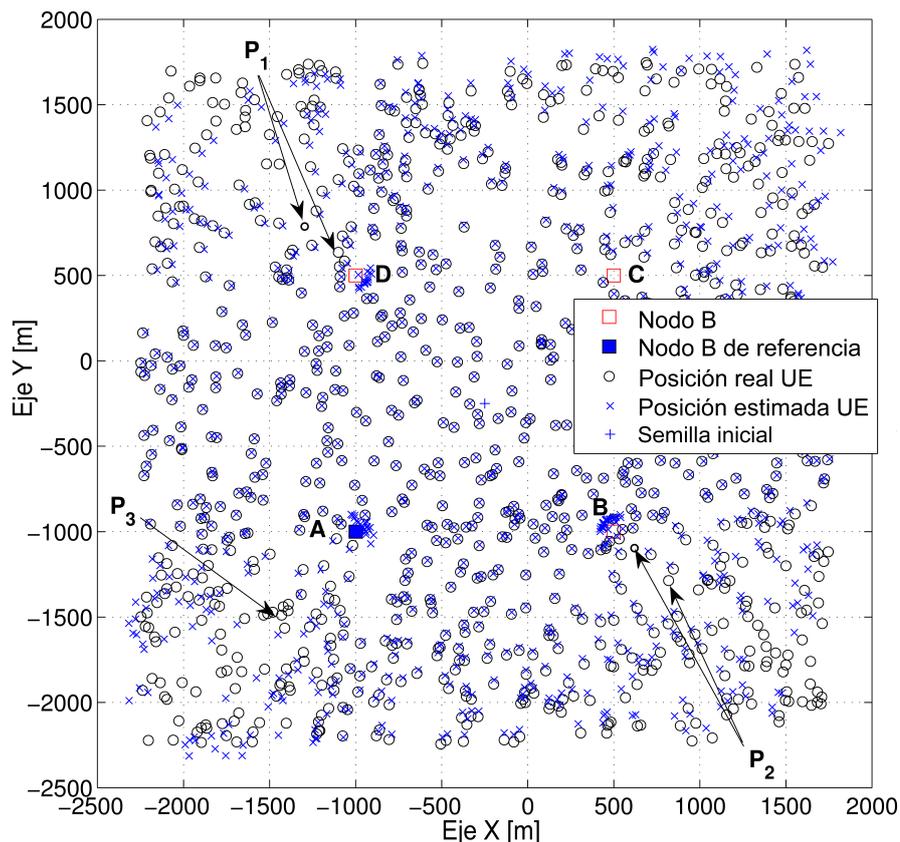


Figura 3.16: Escenario de 1000 eventos reportando cuatro sites dispuestos en cuadrado.

mínimos locales, se han elaborado las Figs. 3.17 a 3.20. En estas figuras, se han representado distintos UEs que precisan ser geolocalizados y que, además, están ubicados en zonas de rango de diferencias de pendientes alto (áreas rojas en la Fig.3.15). Igualmente, se han representado las tres hipérbolas correspondientes a cada UE, es decir, las tres hipérbolas que intersectan en su ubicación exacta. Otro detalle importante es que se ha tomado el centro de masas (media de la posición de los sites) como semilla inicial para el algoritmo iterativo Levenberg-Marquardt. De hecho, desde este valor inicial, se facilita encontrar una trayectoria para alcanzar la posición real del UE sin cortar ninguno de los tres posibles ejes focales y, por consiguiente, se reduce el riesgo de pasar por un mínimo local antes de encontrar el mínimo global. La principal razón para sustentar esta afirmación es el hecho de que los vértices de las hipérbolas están contenidos en los ejes focales. A su vez, estos vértices implican cambios en la curvatura de las hipérbolas, convirtiendo sus proximidades en zonas potenciales de mínimos locales. Por último, solamente destacar que el escenario con los sites posicionados en línea recta (Fig.3.17) es un claro ejemplo de mala geometría. El motivo es que el corte de las hipérbolas devuelve dos soluciones perfectamente válidas, una representando la posición real del UE, y la otra un punto espejo del primero.

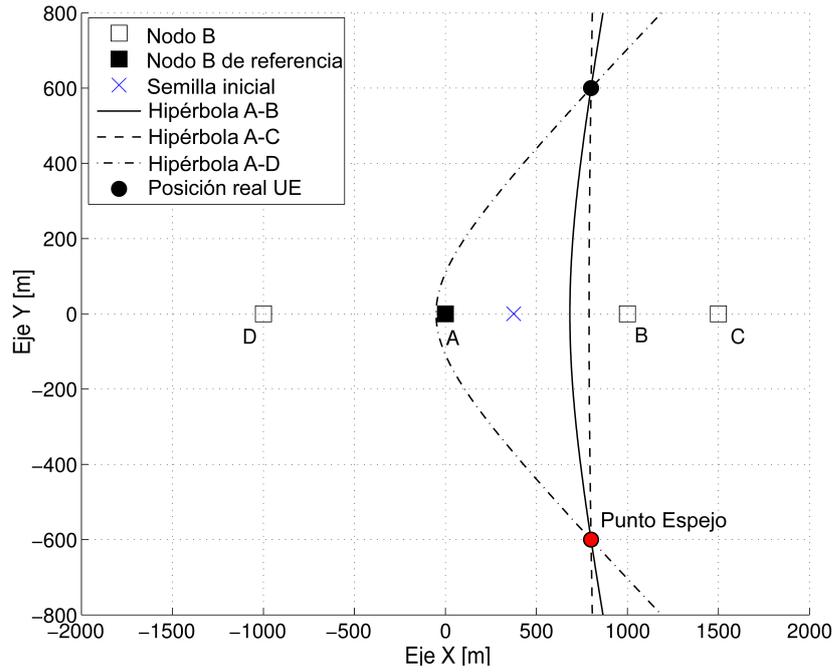


Figura 3.17: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en línea. También se representa el punto espejo derivado de este tipo de topologías.

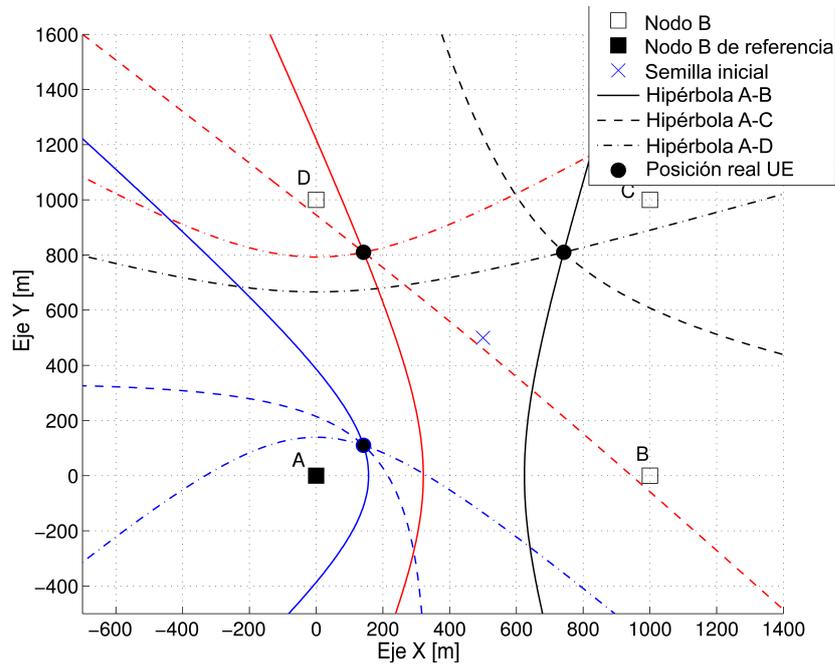


Figura 3.18: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en cuadrado cuando los puntos a geolocalizar están dentro del polígono formado por los cuatro sites.

3.4 Configuración en estrella

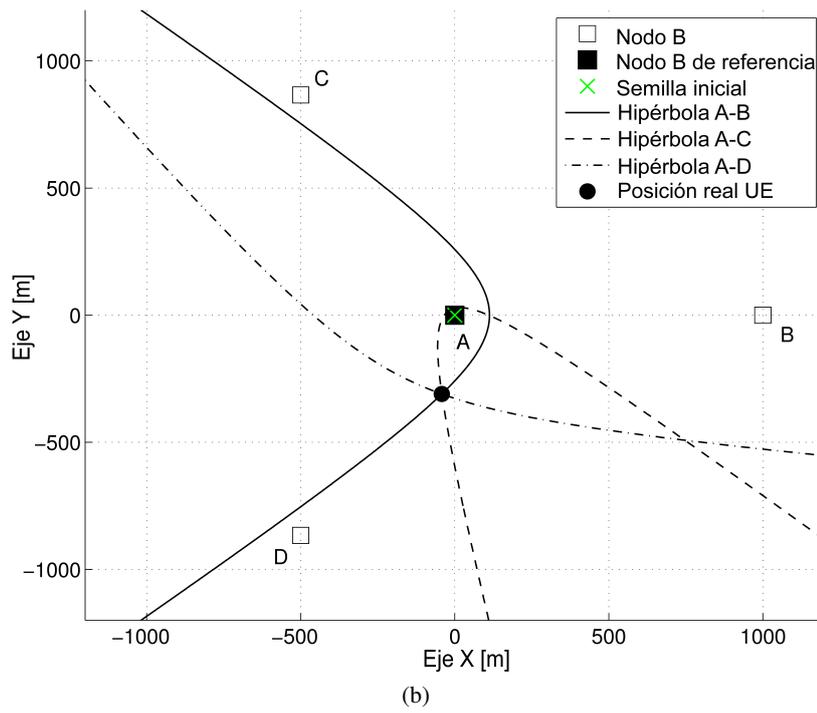
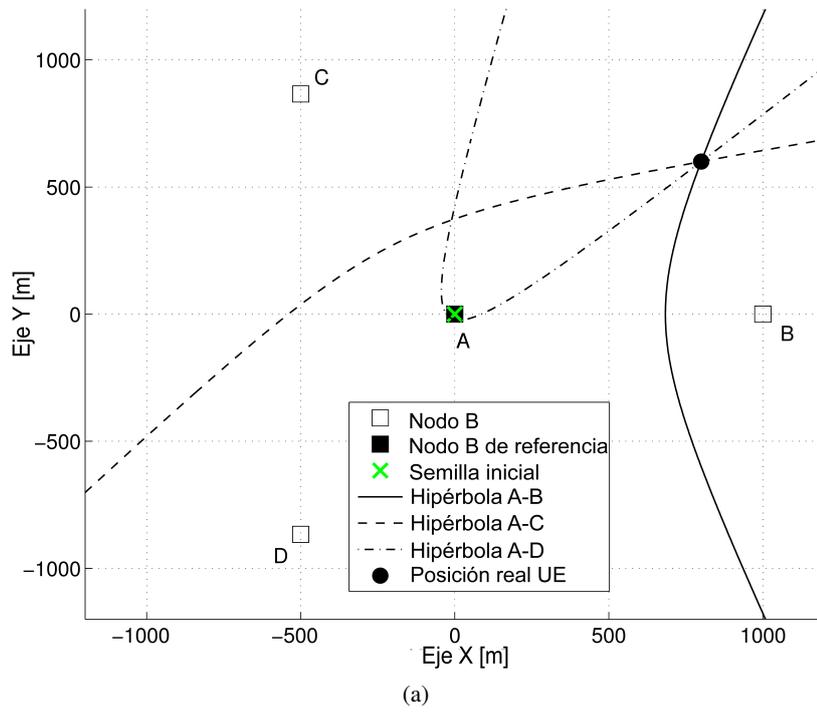


Figura 3.19: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en estrella cuando los puntos a geolocalizar están en áreas de alto rango de diferencias de pendientes.

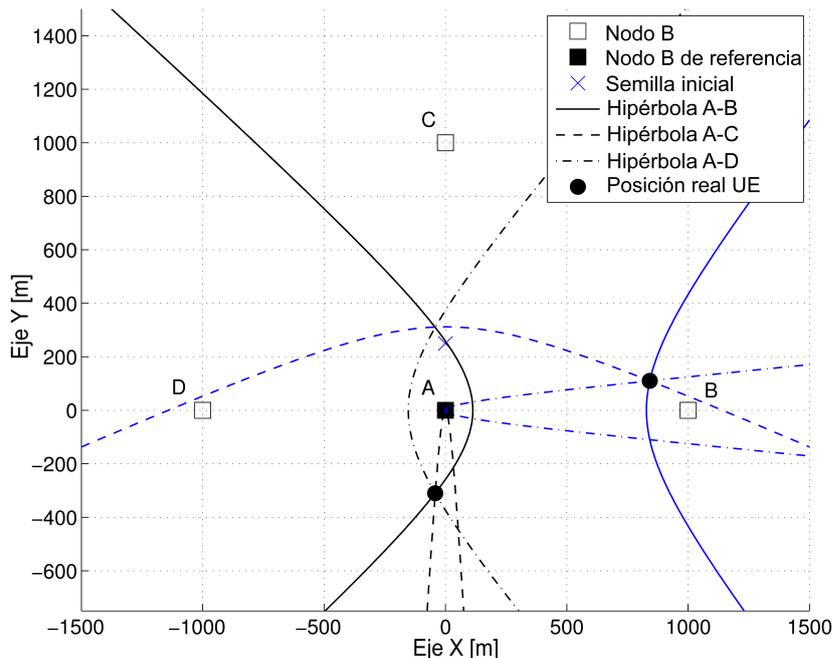


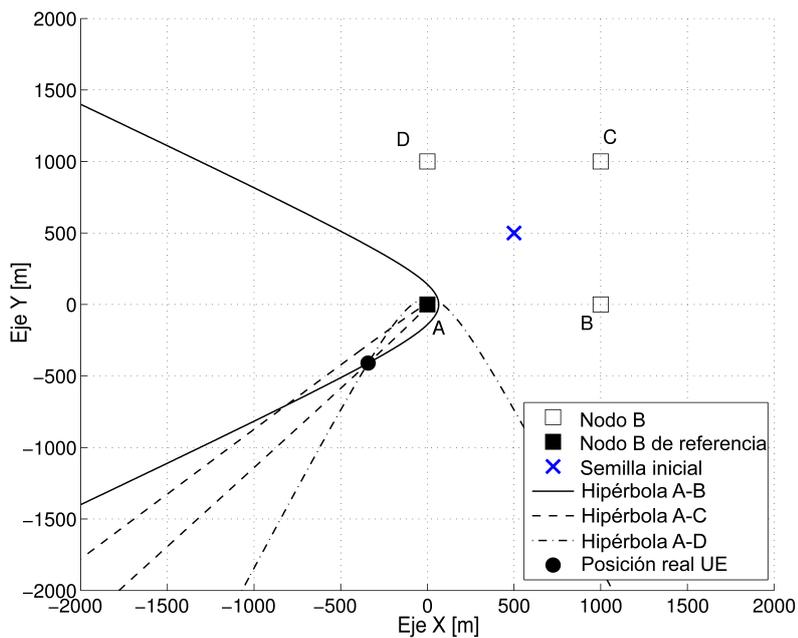
Figura 3.20: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en T cuando los puntos a geolocalizar están en áreas de alto rango de diferencias de pendientes.

3.4.3.4. Análisis de zonas con un rango bajo

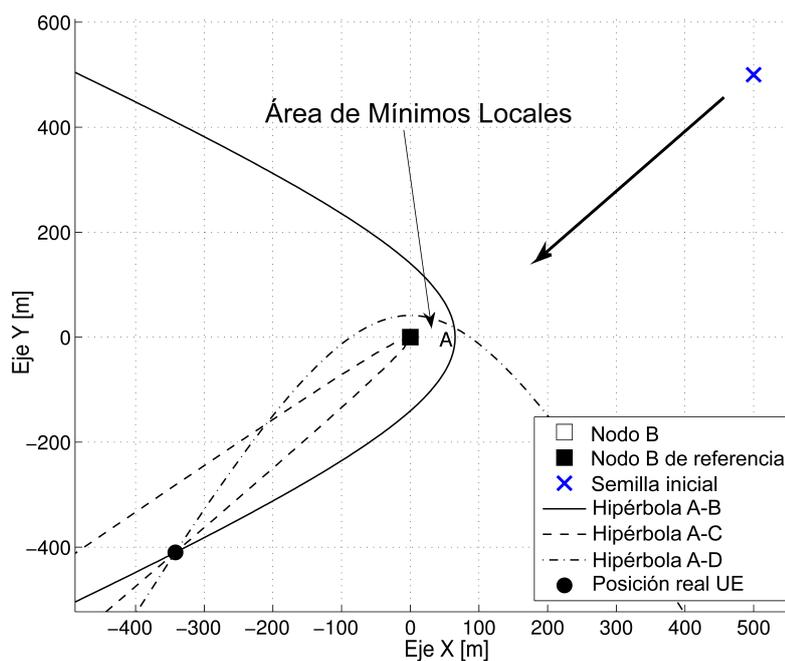
Hasta este momento, se ha mostrado el aspecto genérico de las tres hipérbolas involucradas en el método OTDOA cuando se trabaja en áreas de alto rango de diferencias de pendientes. Ahora, se expone un ejercicio similar, pero para aquellas zonas de rango bajo. Las representaciones gráficas se recogen en las Figs. 3.21 a 3.27 para las configuraciones de sites ya presentadas con anterioridad: la configuración en cuadrado, la disposición en T y la geometría en estrella. Se ha obviado el escenario de los sites dispuestos en línea recta debido a la ambigüedad de soluciones y al hecho de que no aporta información complementaria.

Por tanto, las Figs. 3.21 y 3.22 presentan la forma típica de las hipérbolas que son necesarias para geolocalizar a un usuario que se encuentra fuera del área delimitada por el **cuadrado**, o rectángulo, que forman los cuatro sites. Lógicamente, ambas figuras corresponden a zonas donde el rango de diferencias de pendientes es reducido, tal y como se puede comprobar en la Fig. 3.15(b). A este respecto, la Fig. 3.21(a) muestra que la trayectoria desde el punto inicial del algoritmo iterativo hasta la ubicación real del UE está bloqueada por las propias hipérbolas. Este aspecto se presenta de forma más clara y ampliada en la Fig. 3.21(b). Ahí, se observa que, partiendo del punto inicial —centro de masas de los sites—, el algoritmo intentará converger hacia la solución final atravesando una zona en la que han intersectado dos hipérbolas, aquellas formadas por las parejas de sites ‘A’ - ‘B’ y ‘A’ - ‘D’. Justo en esa zona, el residuo llega a ser considerablemente pequeño, quedando el método numérico atrapado en un mínimo local. De hecho, cuando la estimación alcanza la

3.4 Configuración en estrella



(a)



(b)

Figura 3.21: Caso 1: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en cuadrado cuando los puntos a geolocalizar están en áreas de bajo rango de diferencias de pendientes —ver Fig.3.15(b)—. Además, en (b) se muestra una ampliación de (a) para una mejor apreciación de las hipérbolas.

intersección de estas dos hipérbolas, la evaluación de la función de coste en una zona cercana a este mínimo local da lugar a valores de residuo más elevados. No obstante, la tercera hipérbola también juega un papel fundamental. Según su posición relativa con respecto a las dos hipérbolas que se han cortado, el mínimo local será más abrupto o más suave. Por ejemplo, en la Fig. 3.22 se ha representado un caso en el que el mínimo local es leve porque la tercera hipérbola sigue una dirección de aproximación hacia las otras dos. En otras palabras, al intersectar las hipérbolas 'A' - 'B' y 'A' - 'D', la distancia con respecto a 'A' - 'C' es grande, pero conforme ésta se acerca al mínimo global, la distancia se va reduciendo, lo que reduce a su vez el valor del residuo. Entonces, en una situación como esta, el resto de estimaciones de las posiciones de los eventos del escenario podrían ayudar al método numérico a escapar del mínimo local.

En cuanto al escenario con **geometría en T**, la metodología es similar a la explicada en el párrafo anterior. Se generan las hipérbolas requeridas para geolocalizar en zonas de bajo rango de diferencias de pendientes (ver Fig. 3.15(c)), y se analiza el comportamiento. En primer lugar, la Fig. 3.23(a) muestra un UE ubicado detrás del site 'B', justo en un área de rango bajo. En este caso, y como sucedía en la configuración de sites en cuadrado, no hay un camino despejado para alcanzar la posición del usuario si el punto de partida es el centro de masas de los sites. El método numérico falla porque se encuentra con dos puntos de corte de dos pares de hipérbolas: primero, 'A' - 'C' con 'A' - 'D', y segundo, 'A' - 'B' con 'A' - 'C'. De nuevo, la evaluación de la función de coste en los alrededores de estos mínimos locales

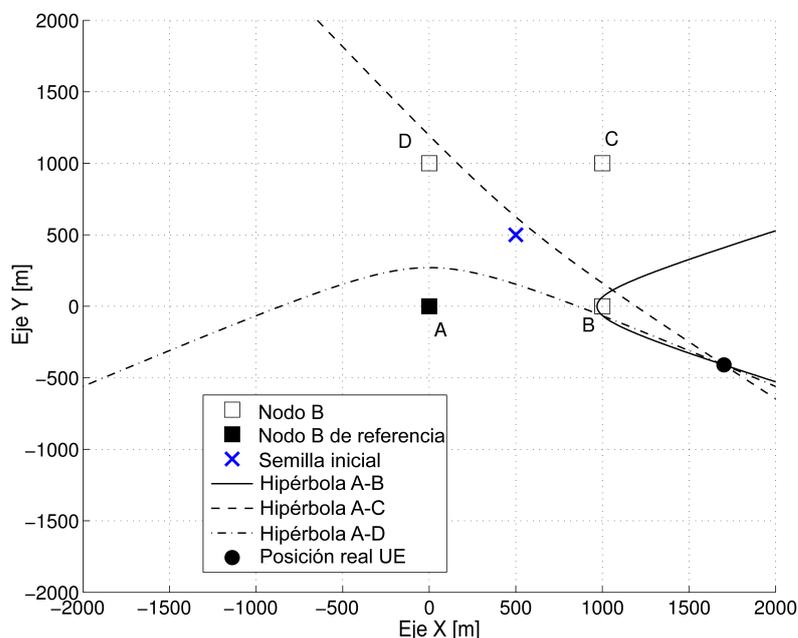


Figura 3.22: Caso 2: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en cuadrado cuando los puntos a geolocalizar están en áreas de bajo rango de diferencias de pendientes —ver Fig. 3.15(b)—.

3.4 Configuración en estrella

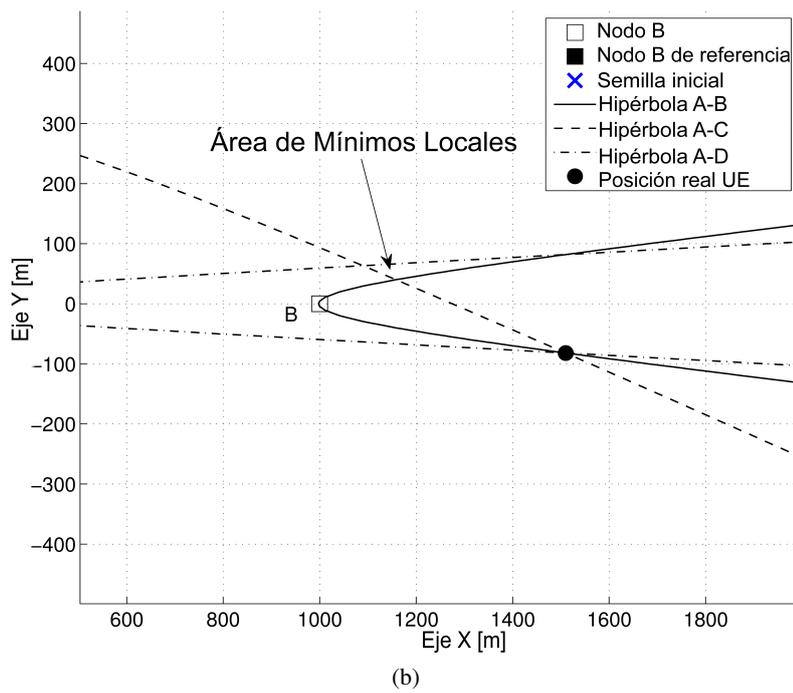
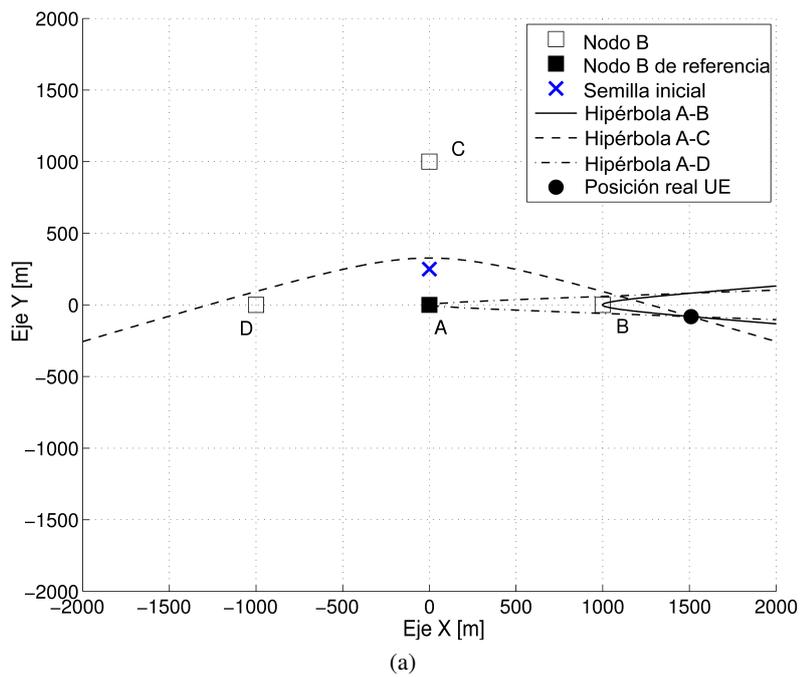


Figura 3.23: Caso 1: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en T cuando los puntos a geolocalizar están en áreas de bajo rango de diferencias de pendientes —ver Fig.3.15(c)—. Además, en (b) se muestra una ampliación de (a) para una mejor apreciación de las hipérbolas.

se traduce en valores mayores, propiciando el bloqueo del método iterativo. Asimismo, en pro de la claridad, se ha hecho una ampliación de la zona problemática en la Fig.3.23(b). Como complemento, comentar que si un UE estuviera situado a la izquierda del site ‘D’, el efecto sería equivalente al que se acaba de describir por la simetría de la geometría.

Para terminar el análisis de la configuración en T, la Fig.3.24 muestra un UE colocado detrás del site ‘C’, es decir, una zona con un rango de diferencias de pendientes entre 50° y 60°, tal y como se demuestra en la Fig.3.15(c). Para esta situación concreta, hay una trayectoria evidente que permite llegar a la posición real del usuario sin cruzar ninguna hipérbola ni ningún eje focal. De este modo, se evita el efecto adverso de los mínimos locales.

Finalmente, las Figs. 3.25 a 3.27 ilustran tres diferentes ubicaciones de un UE en un escenario con **topología de estrella**. Estas ubicaciones se encuentran más allá de la posición de los sites si se mira desde el centro de masas, el cual coincide con el Nodo B de referencia. Concretamente, el UE ha sido situado en tres zonas definidas por un bajo rango de diferencias de pendientes, tal y como se comprueba en la Fig.3.15(d), pero buscando que en cada ocasión el site más cercano sea distinto. Entonces, para los tres casos representados, hay siempre una trayectoria clara que permite alcanzar el mínimo global evitando la presencia de mínimos locales. Por consiguiente, se prueba que la configuración en estrella es robusta contra los mínimos locales, y se debe considerar como la configuración espacial óptima desde este punto de vista.

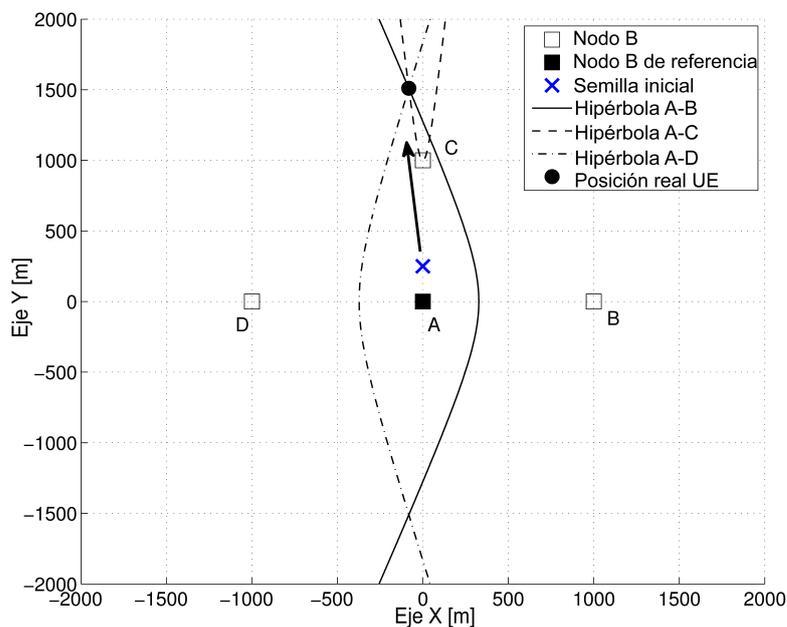


Figura 3.24: Caso 2: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en T cuando los puntos a geolocalizar están en áreas de bajo rango de diferencias de pendientes —ver Fig.3.15(c)—.

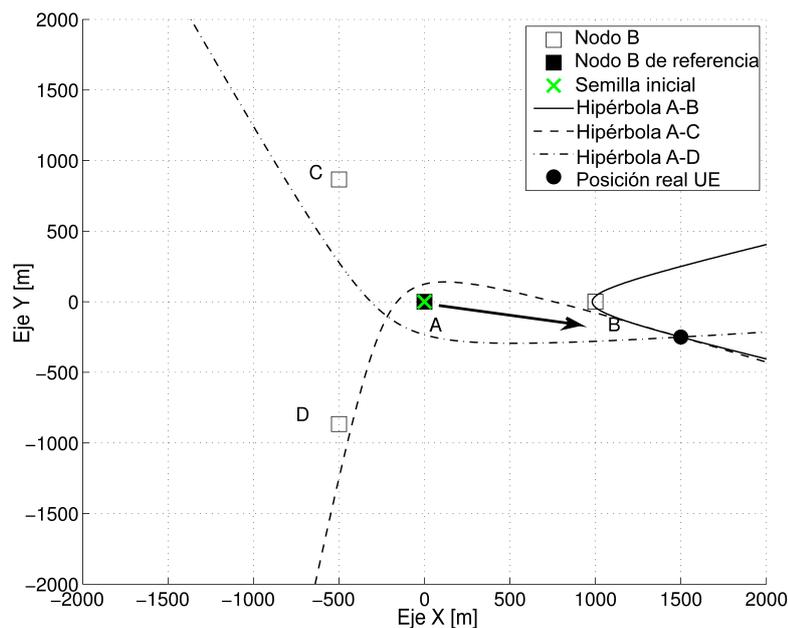


Figura 3.25: Caso 1: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en estrella cuando los puntos a geolocalizar están en áreas de bajo rango de diferencias de pendientes —ver Fig.3.15(d)—.

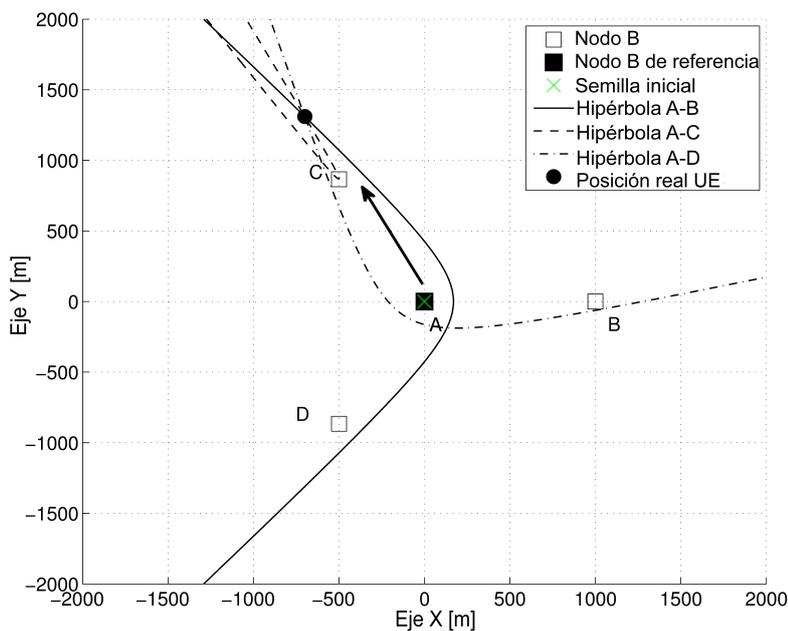


Figura 3.26: Caso 2: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en estrella cuando los puntos a geolocalizar están en áreas de bajo rango de diferencias de pendientes —ver Fig.3.15(d)—.

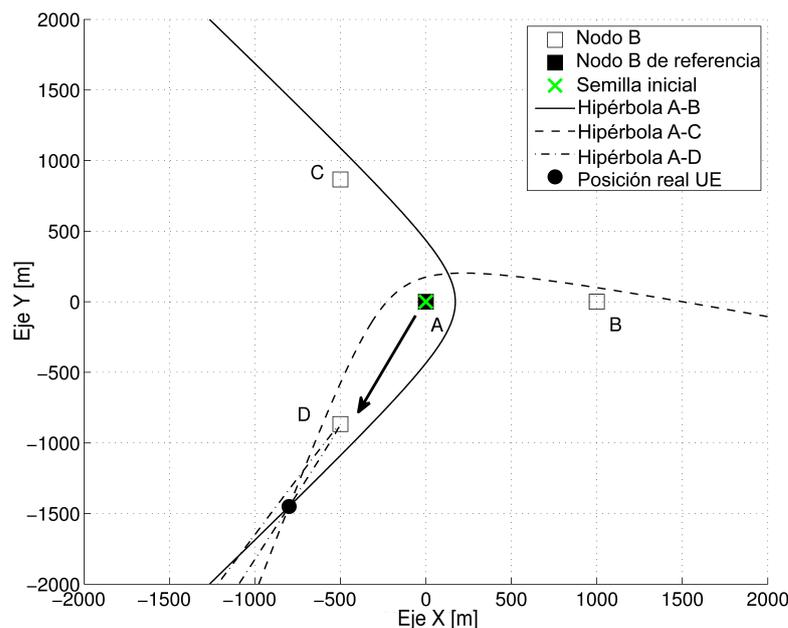


Figura 3.27: Caso 3: Aspecto de las hipérbolas en un escenario con geometría en estrella cuando los puntos a geolocalizar están en áreas de bajo rango de diferencias de pendientes —ver Fig.3.15(d)—.

3.4.4. Resultados

Una última demostración para reforzar la conclusión de que la estrella es la configuración óptima consiste en **simular y resolver un conjunto de 100 escenarios para cada geometría**. Estos escenarios se diferencian en la posición de la semilla inicial empleada por el método numérico iterativo, en este caso Levenberg-Marquardt, y en la posición de los 300 eventos que se generan en un radio de 2 km alrededor de los cuatro sites involucrados en el escenario. Para ser más concretos, las posibles posiciones de la semilla inicial que se utilizaron eran las propias localizaciones de los sites y el centro de masas. Igualmente, los eventos se generaron con medidas ideales, es decir, sin añadir ninguna fuente de error, ni siquiera el error intrínseco debido a la resolución de 1 chip.

En el caso de los 100 escenarios en estrella, todos los eventos de todos los escenarios fueron geolocalizados perfectamente. Como es lógico, el valor medio de la función de coste resultó ser cero. Por su parte, en los escenarios con geometría en cuadrado solamente un 10% de los eventos fueron recuperados con 0 metros de error. Además, en este caso el valor medio del error es aproximadamente 170 metros. Finalmente, en lo referente a los escenarios con disposición en T, el 20% de los eventos pudieron ser geolocalizados sin error, siendo el valor medio igual a 25 metros.

Aparte de estos números, la Fig.3.28 presenta las funciones de distribución acumulada (CDF) correspondientes a las situaciones descritas previamente. En esta figura, se recoge

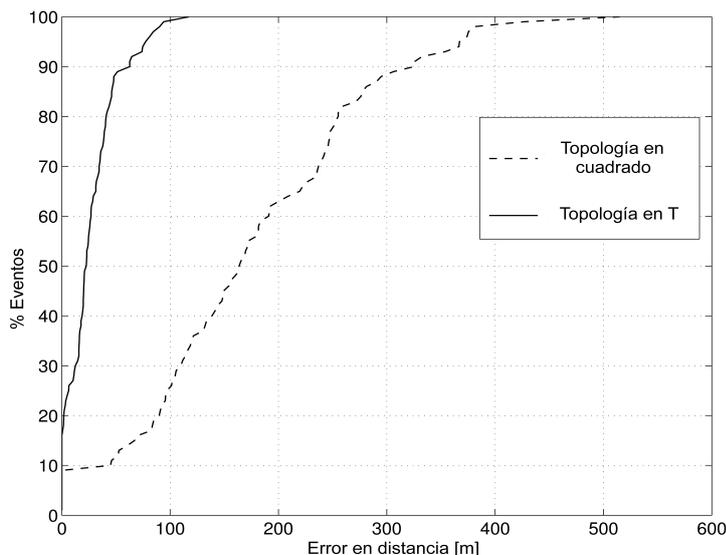


Figura 3.28: Distribución del error de geolocalización en un conjunto de escenarios ideales con topología en cuadrado y en T. La geometría en estrella no aparece representada, ya que en todas las simulaciones las estimaciones presentaban 0 metros de error [31].

el error en distancia entre las estimaciones devueltas por Levenberg-Marquardt y los datos esperados generados sintéticamente por el simulador. Las curvas se muestran para la configuración en cuadrado y en T, ya que la estrella permitía una estimación perfecta en el 100 % de los casos. Entonces, la presencia de mínimos locales se refleja claramente debido al hecho de que es la única fuente de error que influye en los escenarios simulados.

3.5. Herramienta de geolocalización hiperbólica

Llegados a este punto, se ha descrito el problema de la multilateración hiperbólica junto a los datos de entrada requeridos, se han analizado tres métodos numéricos para resolver los sistemas de ecuaciones no lineales y se ha presentado una topología de sites óptima para minimizar el efecto adverso de los mínimos locales. Toda esta metodología y algoritmia es ahora empaquetada en una herramienta de geolocalización [30, 34] que, aparte de cubrir estos ítems, también debe incluir cierta inteligencia adicional y funcionalidad de filtrado.

3.5.1. Concepto de banda

El primer concepto que debe precisarse es el concepto de "banda". La **definición de banda** en este trabajo hace referencia al rango de valores en el cual tienen que estar contenidas las medidas de T_M asociadas a dos sites. Este rango posee un **tamaño de dos veces la distancia inter-site (ISD)**, siendo la distancia inter-site la distancia física entre dos sites.

Imaginemos que tenemos un UE justo en el punto intermedio entre dos sites, entonces la diferencia de distancias entre el móvil y ambos sites sería nula, y el T_M medido debería coincidir exactamente con la RTD entre esos dos sites. Pensemos ahora en un caso extremo, es decir, un UE situado justo en el site. En este caso, la diferencia de distancias coincidiría con la distancia inter-site positiva o negativa en función de si estamos en el site de referencia o no. Por lo tanto, se puede concluir que el valor de cualquier T_M , bajo condiciones ideales, debe estar acotado en el intervalo siguiente: $[-ISD+RTD, ISD+RTD]$. La Fig. 3.29 sirve como aclaración de esta explicación.

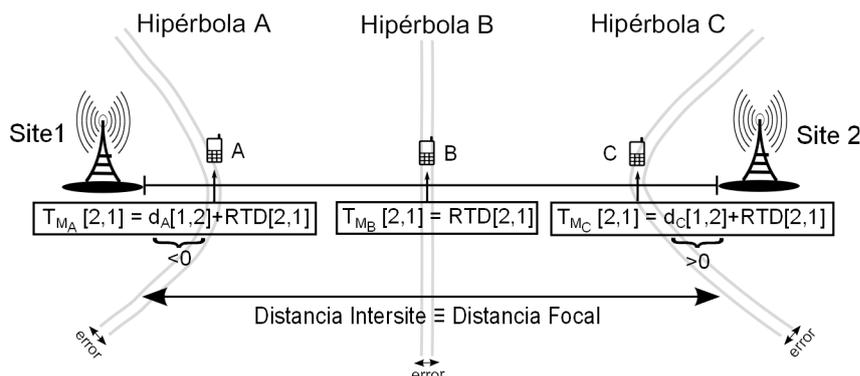


Figura 3.29: Representación del concepto de banda como el rango en el que pueden acotarse los valores del parámetro T_M . Tres UEs denominados A , B y C están colocados en tres posiciones distintas a lo largo del eje focal, que es la línea que separa los sites 1 y 2. T_{M_i} , $i \in A, B, C$ representa el valor ideal medido por cada UE, donde se aprecia que la $RTD[2, 1]$ es constante en las tres medidas. Asimismo, la diferencia de distancia toma valores negativos (d_A) en la parte derecha (hipérbolas que se cierran en torno al site 1) y valores positivos (d_C) en la parte izquierda (hipérbolas que se cierran en torno al site 2).

3.5.2. División de escenarios

Las redes de comunicaciones móviles que se analizan pueden estar formadas por cientos de sites, por lo que es necesario desarrollar algún criterio o algoritmo para ir **seleccionando grupos de 4 sites que formen un escenario básico**. Además, como es lógico, resulta imposible estudiar todas las posibles combinaciones de 4 sites, es decir, hay que fijar ciertas reglas para hacer descartes. Por esta razón, se siguen los siguientes pasos para dividir el área completa en escenarios:

1. Se ordenan los sites de mayor a menor según el número de eventos que los reportan. De este modo, los sites más reportados estarán en lo más alto de la lista.
2. Se definen dos parámetros: **radio del escenario** y **máximo número de sites vecinos**. El primero indica la mayor distancia que puede haber entre el site de referencia y el resto. De esta forma, se genera un área circular donde van a estar todos los posibles sites vecinos al de referencia, que a su vez ocupa el centro del círculo (ver Fig. 3.30).

Por otro lado, el máximo número de sites vecinos impone un límite al número de sites que podrían localizarse dentro del área circular que definía el parámetro anterior. Entonces, si se supera este número máximo, los sites mas lejanos son descartados como sites vecinos. En nuestro caso, se ha fijado un radio de 3000 metros y 12 vecinos como máximo. Estos valores están orientados a áreas suburbanas, pero dependiendo del tipo de zona geográfica en la que se geolocalice, los parámetros podrían adaptarse.

3. Se elige el primer site de la lista como site de referencia.
4. Se generan todas las posibles combinaciones de escenarios de 4 sites con el site de referencia y sus vecinos.
5. Se cuenta el número de eventos y se calculan las bandas definidas por cada par de sites en cada escenario formado en el paso 4. Las bandas se calculan haciendo la resta del T_M máximo menos el T_M mínimo de entre todas aquellas medidas de T_M reportadas por los eventos correspondientes al escenario y pareja de sites concretos.
6. Se aplican criterios de **filtrado** de eventos y escenarios. Ver la Sección 3.5.3.
7. Se ordenan los escenarios restantes en función a su **fiabilidad**. La fiabilidad viene ponderada fundamentalmente por dos elementos. El primero es la distribución espacial de los sites. Aquellos escenarios que tengan los sites dispuestos en **configuración de estrella** deben tener un mayor peso, es decir, mayor prioridad, tal y como se demostró en la Sección 3.4. El segundo criterio es la **ocupación de las bandas** de un escenario. Cuanta mayor sea la ocupación de las bandas, mayor será la diversidad de medidas y, por tanto, mayor tiene que ser el peso asignado a ese escenario.
8. **Se limita el número de escenarios por resolver** con el objetivo de reducir la carga computacional de la herramienta. Para ello, se selecciona el mínimo número de escenarios necesarios para que al menos todos los sites participen en uno de ellos. Por ejemplo, si se han seleccionado los escenarios con [Site-A Site-B Site-C Site-D] y [Site-A Site-B Site-C Site-E], posteriormente el escenario con [Site-A Site-B Site-D Site-E] sería automáticamente descartado porque todos sus sites ya han participado en al menos uno. En esta circunstancia, la $RTD[D, E]$ no quedaría sin resolver, sino que se podría obtener después por medio de combinaciones lineales. Este punto se comenta en la Sección 3.5.6.
9. Se vuelve al paso 3 siempre que queden sites sin ser elegidos como referencia, es decir, hasta llegar al final de la lista.

Finalmente, se consigue una serie de escenarios que han cumplido todas las condiciones impuestas o, dicho de otro modo, escenarios robustos y de alta fidelidad. Estos escenarios son transferidos al método numérico iterativo, en nuestro caso Levenberg-Marquardt modificado (ver Sección 3.3.4), para que sean resueltos. Como resultado, se obtienen las estimaciones de las posiciones de los eventos y las diferencias de sincronización entre los Nodos B, es decir, las RTDs.

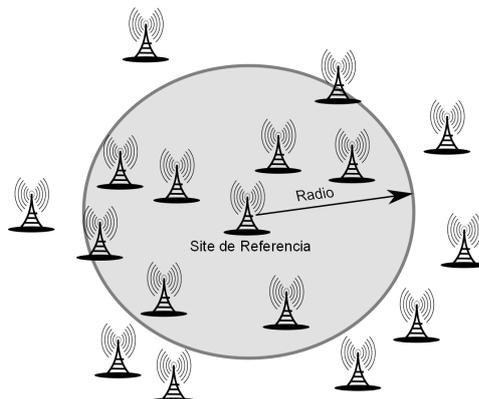


Figura 3.30: Todo los sites que caigan dentro del área circular oscura son sites vecinos del de referencia, es decir, se utilizarán para formar combinaciones de escenarios básicos de 4 sites. En el caso de que el número de sites vecinos superara el máximo impuesto, entonces se toman únicamente los más cercanos hasta completar el cupo máximo.

3.5.3. Funciones de filtrado

3.5.3.1. Filtrado de eventos

A la hora de escoger eventos, se hacen dos tipos de filtrado con idea de **eliminar las medidas corruptas y las que aportan información redundante**:

- A los **eventos que son reportados por dos sectores de un mismo site** se les presta una atención especial. Se comparan las medidas realizadas por cada sector. Si estas medidas difieren mucho, 3 chips en nuestro caso, el evento se descarta porque la diferencia indica que hay algún tipo de error considerable. En caso contrario, los parámetros T_M se promedian para minimizar el error que pueda haber, ya sea por redondeo, multitrayecto u otra fuente externa.
- Por otra parte, puede darse el caso de que una llamada produzca muchos **eventos en una misma zona**, es decir, que la distancia entre eventos consecutivos apenas varíe. Este tipo de casos no aporta gran información, ya que entre un evento y otro apenas ha habido desplazamiento. Para evitar esta redundancia y su derivada carga computacional extra, cuando todos los parámetros T_M de varios eventos son similares, entendiendo por similares un rango de ± 1 chip, entonces se promedian quedando solamente un evento.

3.5.3.2. Filtrado de escenarios

Hay ciertos escenarios que son propensos a ser descartados debido a sus pobres condiciones. De esta manera, se consigue evitar que sus resultados, los cuales tienen un alto grado

de incertidumbre, afecten a los logrados en otros escenarios más fiables y robustos. Aquí se definen dos criterios para llevar a cabo este filtrado:

- En primer lugar, se emplea el **máximo tamaño esperado de una banda**. En la Sección 3.5.1, se vio que la banda establecida por dos sites debía tener un tamaño ideal de dos veces la distancia inter-site y un rango desde $-|d[a,b]| + RTD[a,b]$ a $|d[a,b]| + RTD[a,b]$. Por consiguiente, este primer criterio se basa en descartar aquellos escenarios en los que alguna de sus bandas calculadas excede el 10% del tamaño ideal. El motivo es que al cumplirse esta condición se pone de manifiesto que las medidas relativas a ese par de sites están siendo reportadas con demasiado error y, por ende, introduciéndolo al sistema de ecuaciones completo.
- El segundo criterio está asociado con la **distribución de los eventos en la banda**. Una distribución homogénea de eventos, es decir, una amplia diversidad de valores T_M , provee más información al sistema de ecuaciones, incrementando considerablemente la precisión del resultado final. Por tanto, el criterio adoptado es que si ninguna de las bandas del escenario supera el 50% de ocupación, el escenario es descartado. Aclarar que se entiende como ocupación de la banda al porcentaje del tamaño de la banda calculado a partir de los T_M con respecto al tamaño ideal.

3.5.4. Cálculo de las semillas iniciales

La elección de las semillas iniciales es uno de los aspectos claves al aplicar un método numérico iterativo. Una mala elección puede arrastrar a todas las soluciones a estimaciones pésimas, mientras que una aproximación inicial aceptable puede traducirse en un gran éxito desde el punto de vista del método numérico. En nuestro contexto, se tienen que establecer dos semillas iniciales: las posiciones de los eventos y las RTDs.

Primero, para las posiciones de los eventos, se ha comprobado que la mejor metodología consiste en colocar todos los eventos partiendo del **centro de masas** formado por los sites. Se han contemplado otras opciones, como colocar cada evento en una posición aleatoria o situarlos todos en un site. No obstante, la técnica del centro de masas ha mostrado ser la más robusta, pues evita que los eventos produzcan una situación de arrastre irregular entre sí en el proceso iterativo. Este arrastre suele desembocar en la divergencia de algunos eventos y, por tanto, en la degradación de las estimaciones del resto de soluciones.

En segundo lugar, las RTDs iniciales se toman para que coincidan con los **puntos medios de las bandas**, es decir, se usan los valores mínimo y máximo del T_M reportado. En un caso ideal, si los móviles estuviesen ocupando perfectamente toda la banda entre dos sites, la RTD vendría dada simplemente como la mitad de la misma, tal y como se explica en la Sección 3.5.1. Desafortunadamente, la idealidad está lejos de existir en los casos reales, ya que podemos encontrar zonas geográficas entre dos sites que no sean reportadas por ningún UE, como por ejemplo un lago. Este hecho causa que se generen falsos valores de mitad de banda, tal y como señala la Fig.3.31. Igualmente, las medidas de los UEs tienen asociados errores que también desplazan o falsean las bandas. No obstante, por lo general, con este

procedimiento tan simple se obtienen aproximaciones lo suficientemente buenas para ser aprovechadas como semillas iniciales.



Figura 3.31: Ejemplo de mala estimación inicial de la RTD. La zona más cercana al site de la derecha está ubicada en un lago, donde, como es evidente, es difícil encontrar algún UE reportado. Por tanto, cuando se calcula el valor medio de la banda con los UEs extraídos de los MRs, el valor hallado saldrá bastante desplazado a la izquierda de su posición real, ya que el T_M máximo está muy distorsionado con respecto al valor esperado. Sin duda, esta técnica para extraer semillas iniciales de las RTDs es muy dependiente de la situación geográfica debido a que podemos encontrar edificios y zonas despobladas entre dos sites.

3.5.5. Redundancia con combinaciones de 3 sites

Opcionalmente, se plantea la posibilidad de incluir un módulo adicional encargado de añadir más redundancia en el propio método numérico. Esta redundancia procede de aquellos eventos que reportan tres de los cuatro sites que conforman el escenario que se quiere resolver, aunque el site de referencia debe ser parte obligatoria de este subconjunto. Por ejemplo, en un escenario genérico con sites #1 (referencia), #2, #3 y #4; se podrían añadir eventos que reportasen las ternas de sites #1-#2-#3, #1-#2-#4 y #1-#3-#4. El propósito es proveer con más fuentes de información al sistema de ecuaciones para que la resolución se consolide en cada iteración hacia el resultado deseado. Con este objetivo, se genera un subconjunto de ecuaciones en el que las RTDs se consideran conocidas, ya que sus valores se fijan a las obtenidas en la iteración previa del algoritmo LM. De este modo, estos eventos solamente llevan asociados dos incógnitas, las coordenadas cartesianas de su posición. Con esto, el subconjunto de ecuaciones de 3 eventos, cada uno reportando una terna de sites distinta, puede ser escrito como

$$\begin{cases} \widehat{T}_{M_1}^{(k)} [2, 1] = (\rho \cdot d_{n_1}^{(k)} [1, 2] + RTD^{(k-1)} [2, 1]) \\ \widehat{T}_{M_1}^{(k)} [3, 1] = (\rho \cdot d_1^{(k)} [1, 3] + RTD^{(k-1)} [3, 1]) \\ \widehat{T}_{M_2}^{(k)} [2, 1] = (\rho \cdot d_2^{(k)} [1, 2] + RTD^{(k-1)} [2, 1]) \\ \widehat{T}_{M_2}^{(k)} [4, 1] = (\rho \cdot d_2^{(k)} [1, 4] + RTD^{(k-1)} [4, 1]) \\ \widehat{T}_{M_3}^{(k)} [3, 1] = (\rho \cdot d_3^{(k)} [1, 3] + RTD^{(k-1)} [3, 1]) \\ \widehat{T}_{M_3}^{(k)} [4, 1] = (\rho \cdot d_3^{(k)} [1, 4] + RTD^{(k-1)} [4, 1]), \end{cases} \quad (3.28)$$

representando eventos que son reportados por los sites #1-#2-#3, #1-#2-#4 y #1-#3-#4, respectivamente. Por su parte, k denota la iteración actual. Como se puede observar, el término $RTD^{(k-1)}[j, 1]$ está referido a la iteración previa y, consecuentemente, no es una incógnita, sino una magnitud ya determinada.

Finalmente, este nuevo conjunto de ecuaciones se agrega a las originales definidas en Ec. (3.8), alcanzando un nuevo sistema de ecuaciones no lineales que resolver mediante LM.

3.5.6. Sincronización de los Nodos B

Para terminar, se requiere que la herramienta sea capaz de proporcionar la **diferencia de sincronización entre todas las parejas de sites** del área bajo análisis. Durante el procesado de los escenarios se trabaja con grupos de 4 sites para los cuales se recuperan sus correspondientes RTDs. Sin embargo, es evidente que hay muchas parejas de sites que no coinciden en un escenario o que, simplemente, están muy alejados espacialmente. Resumiendo, el objetivo es tener todos los sites relacionados y sincronizados

Para ello, se incluye una función que mediante **combinaciones lineales** permite hallar todas las posibles RTDs. La idea es sencilla, se utiliza un grafo orientado donde cada nodo es un site y el peso de las aristas que unen los nodos son las RTDs. Entonces, cada nodo ha de estar conectado a todos los otros nodos. Si dos nodos ya tienen conexión directa es debido a que la RTD ha sido calculada en algún escenario, en caso contrario se busca el camino más corto saltando entre nodos para conectarlos. De este modo, se intenta reducir en la medida de lo posible la propagación de errores. Como aclaración, hay que tener en mente que las RTDs son valores en módulo 38400. Por ejemplo, si del site 'A' al 'B' la diferencia de sincronización es de 100 chips, la diferencia opuesta, es decir, del site 'B' al 'A', será de 38300 chips porque $-100 \bmod 38400 = 38300$.

3.5.7. Implementación

La implementación de todos los pasos de la herramienta se ha llevado a cabo empleando la versión 2010 de **MATLAB**. Los MRs son ficheros Excel en formato CSV que son leídos también desde **MATLAB** para extraer la información necesaria. Este proceso de lectura resulta lento y tedioso, ya que el archivo de los MRs contenidos en un intervalo de 15 minutos (ROP) puede llegar a superar el millón de entradas. La topología de los sites (coordenadas y azimuts) también es obtenida a partir de un fichero CSV.

Todo el procedimiento se hace de manera automática, de forma que se van resolviendo los escenarios seleccionados uno a uno, y almacenando los resultados de las posiciones y las RTDs que se van obteniendo. No obstante, si en uno de los escenarios procesados la distancia entre alguna de las posiciones estimadas y el centro de masas es mayor que un determinado umbral, entonces el escenario debería ser descartado por divergencia. Una vez que se han ejecutado todos los escenarios, se promedian aquellos valores de posiciones o de

RTDs que se hayan resuelto más de una vez. Por ejemplo, es posible que dos sites iguales, o un mismo evento, aparezcan en dos escenarios distintos.

Finalmente, se tiene un algoritmo cerrado que solo precisa de los MRs y de la topología de la red para ser ejecutado. El rendimiento del mismo y la precisión de los resultados se comprueba en el siguiente capítulo, en el que se han utilizado valores y medidas reales para otorgar a la herramienta propuesta de una auténtica garantía de éxito.

3.6. Resultados

Durante este capítulo, se ha descrito y desarrollado el proceso para obtener una herramienta autónoma de geolocalización basada en OTDOA. Ahora es el momento de evaluarla y llevarla a la práctica, de forma que se pueda comparar su rendimiento y sus resultados, tanto con respecto a la herramienta de Ericsson como con respecto a sí misma, dependiendo de si se emplea un método numérico u otro.

En lo referente al procedimiento que se sigue en TPS actualmente (herramienta de Ericsson), se puede decir que en un primer paso se resuelve de forma independiente la diferencia de sincronización entre los Nodos B mediante un sistema de grafos. Después, en un segundo procedimiento, y asumiendo las RTDs ya estimadas, se aplica un método numérico prácticamente igual al de Gauss-Newton o, en el caso de eventos que reportan solamente tres sites, una fórmula analítica.

Los resultados se han clasificado en tres apartados. El primero está centrado en escenarios sintéticos que se han empleado para sacar conclusiones preliminares sobre el funcionamiento del método OTDOA, y del comportamiento que se deriva de la propuesta de resolver las RTDs y las posiciones de los eventos de manera conjunta. Por otra parte, los dos apartados siguientes se enfocan en conjuntos de datos reales facilitados por Ericsson para poner a prueba la herramienta completa en un verdadero caso de uso.

3.6.1. Escenarios sintéticos

En primera instancia, se desarrolló un **simulador de escenarios básicos sintéticos** sobre los que aplicar el método OTDOA. De este modo, se dispone de un medio rápido y eficiente para verificar distintas estrategias, y sacar las correspondientes conclusiones.

Los escenarios sintéticos se componen de 4 sites y se definen por dos parámetros: el tamaño de la red y el número de eventos. El tamaño de la red hace referencia a la distancia que se quiere cubrir con los sites. Por defecto, se asigna un valor de 3 km, ya que los métodos de geolocalización hiperbólicos están enfocados principalmente a áreas suburbanas. Por su parte, el número de eventos es en general fijado a un valor entre 100 y 300, y se disponen de forma aleatoria por el espacio del escenario. Para simular la diferencia de sincronización entre los sites, se generan tres números aleatorios comprendidos en el intervalo $[0, 38399]$, los cuales indican el valor en chips de las 3 RTDs que se pueden obtener si uno de los sites se

considera como la referencia. Finalmente, conociendo la posición de los eventos virtuales y las RTDs, se pueden construir los parámetros T_M de cada uno de los eventos. Estos valores constituyen los datos de entrada sintéticos para poner en marcha la geolocalización por OTDOA. A modo de ejemplo, la Fig. 3.32 muestra la resolución de un escenario sintético mediante el método de Gauss-Newton visto en la Sección 3.3.2. El error medio cometido para 100 eventos fue de 61.45 metros. Un segundo ejemplo, pero en esta ocasión usando el método de Levenberg-Marquardt descrito en la Sección 3.3.3, es ilustrado en la Fig. 3.33. En este caso, se logra una recuperación perfecta, tanto de las posiciones como de las RTDs.

A lo largo del capítulo ya se han ido adelantado algunos resultados y conclusiones relevantes obtenidos gracias a los escenarios sintéticos. En primer lugar, la mejora lograda mediante la inclusión del parámetro α en el método numérico de Levenberg-Marquardt se mostraba en la Fig. 3.6. En segundo lugar, en la descripción de la configuración en estrella (ver Sección 3.4) se hicieron numerosas referencias a análisis y pruebas llevadas a cabo en este simulador.

Dentro de este marco, también se ha realizado un **análisis de los tres métodos numéricos iterativos** [30, 86, 33] propuestos en la Sección 3.3. Para ello, cada método se ha empleado para resolver 1000 escenarios OTDOA aleatorios. Idealmente, la recuperación de las posiciones y las RTDs debería ser siempre perfecta, puesto que no se han añadido errores de ningún tipo a las medidas. Sin embargo, esta premisa no se cumple por la propia naturaleza del método numérico, el cual puede conducir los resultados hacia la divergencia o hacia mínimos locales. Por esta razón, uno de los aspectos que se ha querido cuantificar

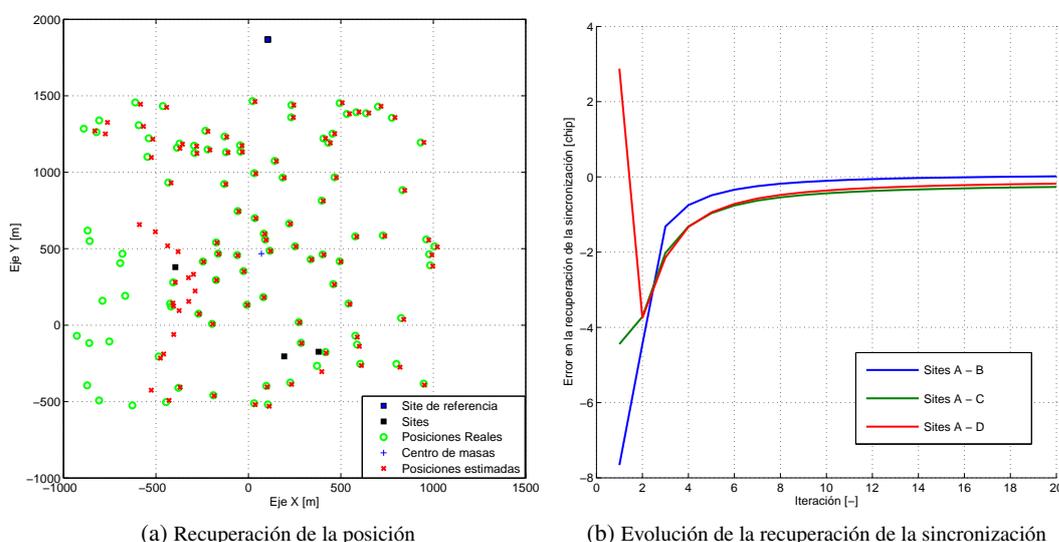


Figura 3.32: Escenario OTDOA sintético resuelto mediante Gauss-Newton. En (a) se representa la comparativa visual entre las posiciones reales y las estimadas. Por su parte, en (b) se ilustra la evolución de la recuperación de la sincronización a lo largo de las primeras 20 iteraciones del método numérico. Se observa que aproximadamente a partir de la iteración 10, el error en las estimaciones de las RTDs se estabiliza sin que se llegue a alcanzar por completo los valores buscados.

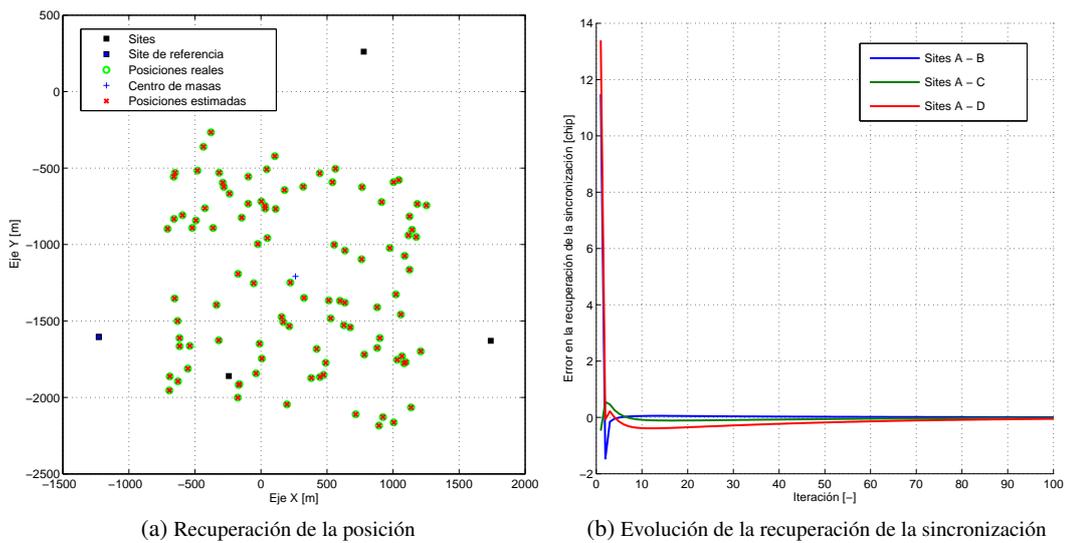


Figura 3.33: Escenario OTDOA sintético resuelto mediante Levenberg-Marquardt. En (a) se representa la comparativa visual entre las posiciones reales y las estimadas al final de la ejecución del algoritmo. Por su parte, en (b) se ilustra la evolución de la recuperación de la sincronización a lo largo de las primeras 100 iteraciones del método numérico. Se observa que finalmente las estimaciones de las RTDs acaban convergiendo a los valores deseados.

es el porcentaje de escenarios que son perfectamente resueltos, es decir, el porcentaje de escenarios en el que se recuperan las posiciones y las RTDs con error nulo. Asimismo, otro factor de mérito es la rapidez de convergencia del método numérico. Este aspecto también se ha medido teniendo en cuenta únicamente las iteraciones de aquellos escenarios que han sido resueltos sin error. Así pues, la Tabla 3.1 recoge los resultados obtenidos.

Tabla 3.1: Comparativa de los métodos numéricos en escenarios sintéticos. Para cada método numérico se han resuelto 1000 escenarios diferentes compuestos por 100 eventos.

Método Numérico Iterativo	Escenarios resueltos sin error	Nº medio de iteraciones
Gauss-Newton	25.4%	8.6
Levenverg-Marquardt	54.7%	264.2
Levenberg-Marquardt modificado	63.5%	29.2

Los resultados muestran que el método de **Gauss-Newton** (GN) tiene un bajo porcentaje de éxito, pese a ofrecer la mayor velocidad de convergencia. Principalmente los escenarios que fallan son debido a la **divergencia** y, de hecho, MATLAB ya avisa de esto porque en las ejecuciones se puede ver el mensaje: *Warning: Matrix is singular, close to singular or badly scaled. Results may be inaccurate. RCOND = NaN*. Este mensaje viene a decir que la matriz Jacobiana está mal condicionada y no debemos fiarnos de la solución del sistema. MATLAB, a medida que resuelve el sistema, calcula mediante el comando “`rcond(A)`” una

aproximación del inverso del número de condición de la matriz de coeficientes A , dando un aviso para que se tenga en cuenta que si “ $\text{rcond}(A)$ ” es pequeño, entonces hay posibilidad de un gran error en la solución. En otras palabras, la matriz resultante del término $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$ visto en la Ec. (3.19) no es invertible.

Precisamente para solucionar el anterior inconveniente de GN, **Levenberg-Marquardt (LM)** incluye el parámetro de amortiguación λ . Este parámetro asegura la invertibilidad de la matriz $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$, dotando de mucha más estabilidad al método numérico y, en consecuencia, incrementando el número de escenarios resueltos satisfactoriamente, aunque la velocidad de convergencia se vea degradada. Sin embargo, el punto negativo de LM es que tiende a quedar atascado en **mínimos locales**, ya que su objetivo es encontrar un mínimo, sea local o global. Este es el motivo de que aún haya un porcentaje considerable de escenarios que no son calculados correctamente.

Por último, el propuesto **Levenberg-Marquardt modificado** [30, 34] logra los mejores resultados en términos de escenarios resueltos, incrementando además la velocidad de convergencia con respecto al LM clásico. La razón de esta mejora reside en los mecanismos de control y protección desarrollados y descritos en la Sección 3.3.4. No obstante, el problema de los mínimos locales sigue estando presente al ser imposible erradicarlo por completo, ya que forma parte de la propia naturaleza del método numérico. En cualquier caso, tal y como se ha visto en la Sección 3.4, la **configuración en estrella** [31, 32] ofrece una posibilidad para evitar íntegramente la aparición de mínimos locales.

3.6.2. Región de Europa

Llegados a este punto, es el momento de verificar el funcionamiento completo de la herramienta OTDOA. La forma más certera y fiable de hacerlo es mediante datos reales provenientes de redes móviles UMTS en las que, además, se ha llevado a cabo algún *drive test* que facilite las posiciones precisas del usuario. Así pues, en este primer set de datos, se va a emplear información de una red perteneciente a una **región suburbana de Europa**. En este sentido, se dispone de 1 hora de trazas, es decir, 4 ROPs de 15 minutos.

3.6.2.1. Primer ROP: 09:45 - 10:00

El primero de los ROPs se ha elegido para hacer un estudio y análisis más detallado. De este modo, la herramienta de geolocalización se ha ejecutado hasta en 3 ocasiones, variando el método numérico subyacente entre GN, LM y LM modificado. La idea es comparar estas estrategias, junto a la solución actual de Ericsson, desde un punto de vista de precisión punto a punto. Los resultados logrados se representan en la Fig. 3.34, donde los eventos del *drive test* utilizados son aquellos que reportan al menos 4 sites, es decir, que forman parte de un escenario básico para aplicar el algoritmo. **El 94 % de estos eventos han conseguido ser geolocalizados**, mientras que el 6 % restante han sido descartados por pertenecer a escenarios que han sido filtrados al no cumplir las condiciones impuestas por la herramienta.

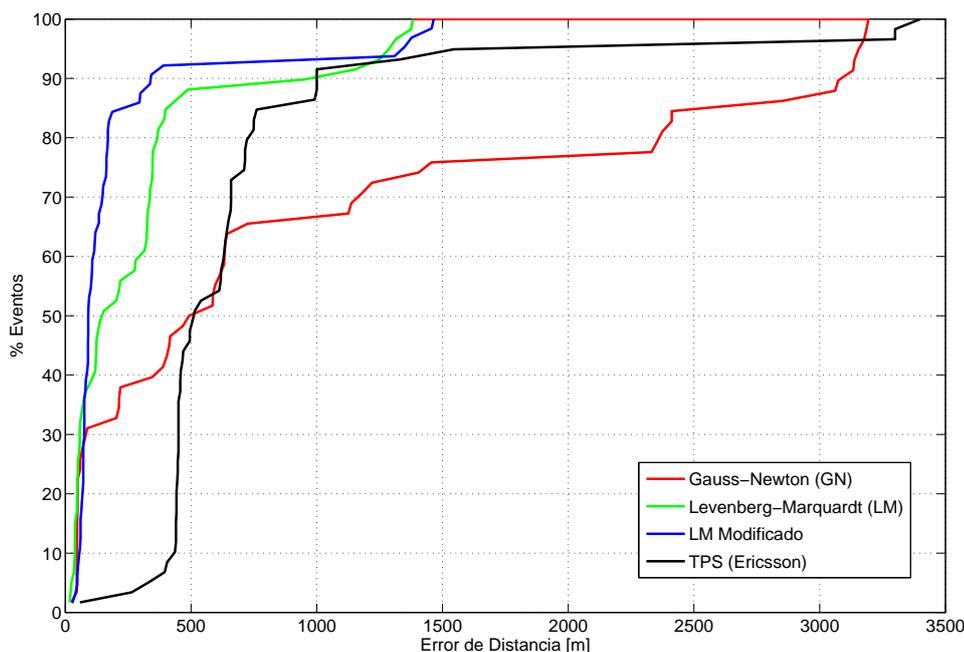


Figura 3.34: CDF del error de distancia correspondiente al primer ROP del set de datos de Europa. Se representa la comparativa de precisión obtenida en una región suburbana entre GN, LM, LM modificado y TPS [30, 86].

La conclusión visual y evidente que se extrae de la CDF es que el método Levenberg-Marquardt modificado es el que ofrece mejor precisión. Si ahora nos fijamos en tres puntos claves para compararlo con TPS:

- **50 Percentil:** los 90 metros alcanzados con LM modificado se contraponen a los casi 500 metros de TPS y GN. Por tanto, esto se traduce en una **ganancia de 410 metros**.
- **75 Percentil:** LM modificado logra 150 metros por los 660 metros de TPS, es decir, **510 metros de mejora**.
- **90 Percentil:** en 215 este último caso **la ganancia es de 660 metros**.

Otro detalle que se aprecia es el carácter divergente de GN. Hasta el percentil 30, se ve que GN mantiene un rendimiento similar a los métodos de LM, pero a partir de ese punto se produce una degradación que acaba proporcionando una precisión lejos de ser aceptable.

En todo caso, se puede dar un paso más para analizar la precisión de los resultados. Una vez ejecutado todo el algoritmo por completo, se ha hallado la sincronización entre sites. Esto quiere decir que ahora es posible quitar las RTDs como incógnitas del sistema de ecuaciones visto en la Ec. (3.8) y, por tanto, resolver la posición de eventos que tan solo vean 3 sites. Es fácil intuir que cada evento introduce ahora solamente las incógnitas de su posición en coordenadas cartesianas, por lo que si el evento reporta 3 sites, es capaz a su vez de generar dos hipérbolas que definen su localización. Entonces, modificando levemente el

algoritmo, se van seleccionando uno a uno los eventos que reportan 3 sites, y se fijan las RTDs que ya se han obtenido anteriormente. De esta forma, se posicionan también estos eventos. Además, este procedimiento sirve para dar una idea de lo precisas que resultan ser las estimaciones de las RTDs. Si el nivel de precisión resultó ser pobre, se estará acarreado ese efecto negativo sobre las nuevas posiciones estimadas. Por el contrario, si la estimación de la posición del evento que reporta 3 sites resulta ser buena, entonces significa que las RTDs empleadas también deberían estar cerca de la realidad. Finalmente, la Fig.3.35 muestra los resultados de estos eventos.

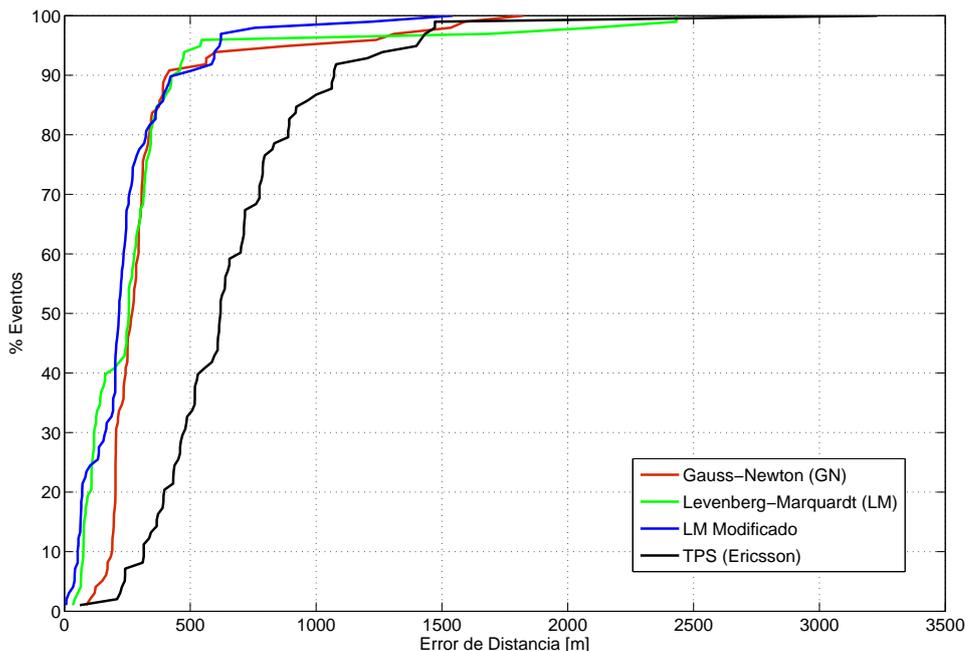


Figura 3.35: CDF del error de distancia correspondiente al primer ROP del set de datos de Europa en el caso de eventos que reportan solamente 3 sites. Para ello, se aprovechan los valores de sincronización entre sites obtenidos en la ejecución de la herramienta de geolocalización hiperbólica. Se representa la comparativa de precisión obtenida en una región suburbana entre GN, LM, LM modificado y TPS [30, 86].

En este contexto, los tres métodos numéricos implementados en la herramienta propuesta dan resultados similares. Este hecho nos indica que las RTDs que se han estimado deben ser una buena aproximación de la realidad. En cualquier caso, LM modificado es de nuevo el que ofrece mejor precisión en el 50 percentil, siendo además el que diverge menos en los percentiles más elevados. Igualmente, en cuanto a la comparativa con TPS:

- **50 Percentil:** en este punto, LM modificado presenta 215 metros de error, mientras que TPS presenta 620 metros. Por consiguiente, se alcanza una **ganancia de 405 metros**.

- **75 Percentil:** si bien LM modificado da una precisión de 260 metros, la de TPS ronda los 775 metros. El resultado es una **mejora de 515 metros**.
- **90 Percentil:** en este último caso **la ganancia es de 600 metros**.

Para terminar, y a título demostrativo, se ha utilizado el software *Google Earth* para mostrar sobre un mapa cartográfico un ejemplo concreto de uno de los escenarios resueltos en este apartado. Esta representación se recoge en la Fig. 3.36. Se comprueba como los eventos del *drive test* siguen una línea recta que viene dada por el trayecto de carretera seguido por la furgoneta que realizaba las pruebas. Además, visualmente se observa que las estimaciones calculadas por la herramienta OTDOA se aproximan notablemente a las reales, tanto en forma como en localización.



Figura 3.36: Geolocalización representada sobre *Google Earth* para un escenario real sub-urbano de Europa. Se muestra la comparativa entra las localizaciones reales dadas por el GPS del *drive test* (marcadores verdes vacíos) y las localizaciones estimadas por LM modificado (marcadores amarillos con punto negro). Por su parte, los sites han sido representados con hexágonos blancos, teniendo en cuenta que el site 'A' es el site de referencia.

3.6.2.2. Segundo ROP: 10:00 - 10:15

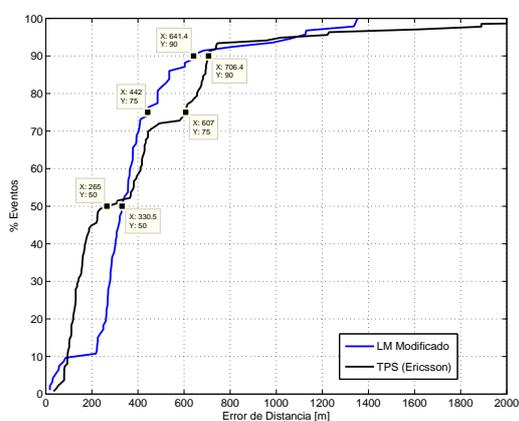
No se ha podido geolocalizar ningún evento del *drive test*.

El motivo es que el *drive test* estaba pasando por una zona en la que uno de los cuatro posibles sites para formar un escenario de OTDOA se encontraba demasiado lejos del resto. Recordemos que en el paso 2 del algoritmo de división de escenarios (Sección 3.5.2) se utiliza un área de búsqueda de 3 km para seleccionar sites que pertenezcan a un mismo escenario. Pues bien, uno de los sites que reportaban las medidas del *drive test* se encontraba a una distancia mayor que este umbral.

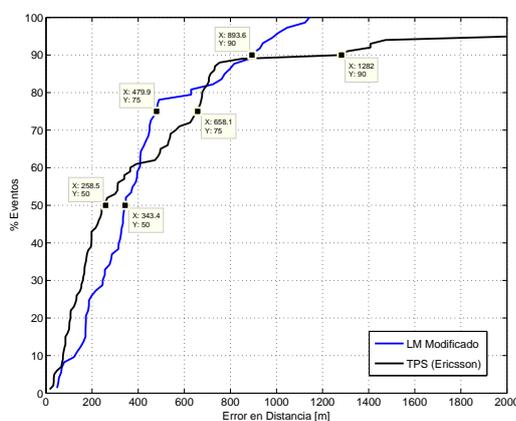
3.6.2.3. Tercer ROP: 10:15 - 10:30

Los resultados logrados en este tercer ROP se recogen en la Fig.3.37. En este contexto, se presentan algunos números relevantes:

- El **68 %** de los eventos del *drive test* reportando 4 o más sites ha sido geolocalizado.
- El **76 %** de los eventos del *drive test* que reportaban 3 sites ha sido geolocalizado.
- **50 Percentil:** hay una **degradación** de **66 metros** en el caso de 4 o más sites, y de **86 metros** en el caso de 3 sites.
- **Error medio:** hay una **mejora** de **37 metros** en la Fig.3.37(a), y de **215 metros** en la Fig.3.37(b).
- **70 Percentil:** en ambos casos se observa una **ganancia** de precisión.
- **90 Percentil:** en ambos casos se observa una **ganancia** de precisión.



(a) Eventos que reportan 4 o más sites



(b) Eventos que reportan 3 sites

Figura 3.37: CDF del error de distancia correspondiente al tercer ROP del set de datos de Europa. Se representa la comparativa de precisión obtenida en una región suburbana entre LM modificado y TPS. En primer lugar, se ilustra en (a) el error correspondiente a los eventos calculados directamente por la herramienta OTDOA, mientras que en (b) se representa el error de los eventos calculados posteriormente fijando las RTDs.

Del análisis de estos resultados, se desprende una mejora global de la precisión con respecto a TPS. Si bien es cierto que el valor del 50 percentil ha empeorado, también es cierto que el error medio logrado con la herramienta propuesta es hasta 215 metros menor. Además, en los percentiles altos se visualiza un comportamiento divergente de TPS, mientras que LM modificado es capaz de mantener esos errores más altos controlados. En conclusión, la mejora obtenida con este ROP de datos no es tan destacada como en el primer ROP, pero aún así se ha logrado progresar en la geolocalización de los eventos y la recuperación de la sincronización gracias a unos resultados más estables en líneas generales.

3.6.2.4. Cuarto ROP: 10:30 - 10:45

Las funciones de distribución acumulada correspondientes al cuarto y último ROP se recopilan en la Fig. 3.38. En este marco, se presentan algunos datos relevantes:

- El **100 %** de los eventos del *drive test* reportando 4 o más sites ha sido geolocalizado.
- El **100 %** de los eventos del *drive test* que reportaban 3 sites ha sido geolocalizado.
- **50 Percentil:** hay una **mejora** de **17 metros** en el caso de 4 o más sites, y de **95 metros** en el caso de 3 sites.
- **Error medio:** hay una **mejora** de **2 metros** en la Fig. 3.38(a), pero una **degradación** de **41 metros** en la Fig. 3.38(b).
- **70 Percentil:** en ambos casos se observa un **deterioro** de la precisión.
- **90 Percentil:** en ambos casos se observa un **deterioro** de la precisión.

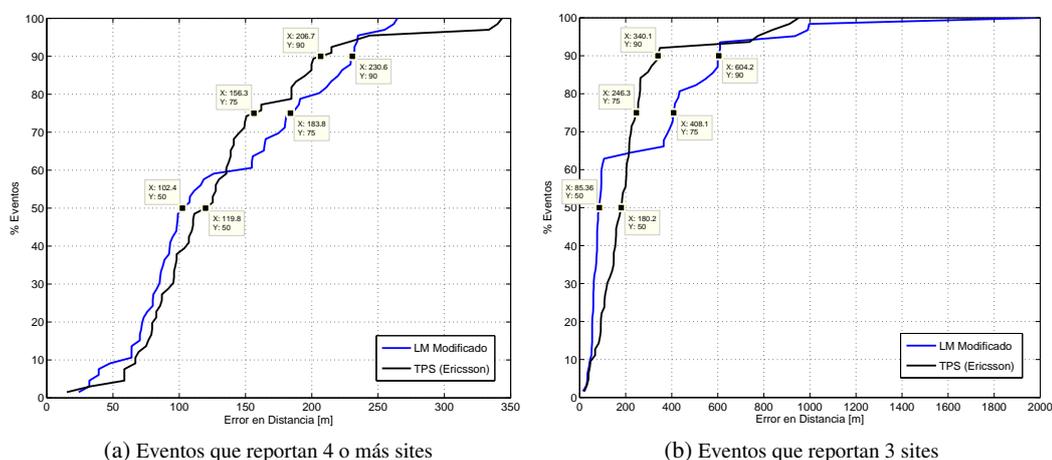


Figura 3.38: CDF del error de distancia correspondiente al cuarto ROP del set de datos de Europa. Se representa la comparativa de precisión obtenida en una región suburbana entre LM modificado y TPS. En primer lugar, se ilustra en (a) el error correspondiente a los eventos calculados directamente por la herramienta OTDOA, mientras que en (b) se representa el error de los eventos calculados posteriormente fijando las RTDs.

Este ROP es el que ofrece los resultados más igualados entre TPS y la herramienta hiperbólica con LM modificado. Por consiguiente, y a la vista de los números, se puede asumir un comportamiento y rendimiento similares entre ambos enfoques. Igualmente, resaltar que, en este caso, la exactitud obtenida por TPS ya era muy alta de por sí, esto es, un error en el 50 percentil de tan solo **120 metros**. Esta circunstancia se traduce en que es muy complicado conseguir una mejora apreciable cuando la solución de referencia es ya precisa y, además, las medidas reales acarrear errores intrínsecos asociados que imposibilitan la resolución ideal del problema.

3.6.3. Región de Norteamérica

El segundo set de datos reales proviene de una **región suburbana de Norteamérica**, y contiene únicamente un ROP de información. No obstante, y pese a ser una región suburbana, la zona bajo análisis tiene la peculiaridad cartográfica de incluir edificios bastante altos. Esta característica agudiza el efecto negativo de los errores por multitrayecto o, dicho de otra manera, las medidas de T_M son proclives a contener más errores.

Bajo estas nuevas condiciones del entorno, también se ha querido realizar un estudio y análisis más detallado. Por ello, la herramienta de geolocalización se ha ejecutado nuevamente con los 3 posibles métodos numéricos: GN, LM y LM modificado. A este respecto, los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 3.39, donde los eventos del *drive test* utilizados son aquellos que reportan al menos 4 sites, es decir, que forman parte de un escenario básico para aplicar el algoritmo. **El 62 % de estos eventos han conseguido ser geolocalizados**, mientras que el 38 % restante han sido descartados por pertenecer a escenarios que han sido filtrados al no cumplir las condiciones impuestas por la herramienta. Así pues, lo que se observa es que LM clásico tiene un comportamiento errático a partir del 70 percentil debido a los mínimos locales, los cuales están probablemente favorecidos por los errores multitrayectos en las medidas de los dispositivos móviles. Por su parte, LM modificado, GN y TPS mantienen una precisión estable y por debajo de los 1000 metros de error en todos los casos. No obstante, LM modificado vuelve a mostrarse como la estrategia con mejores resultados en líneas generales. Esta afirmación se consolida viendo algunos números:

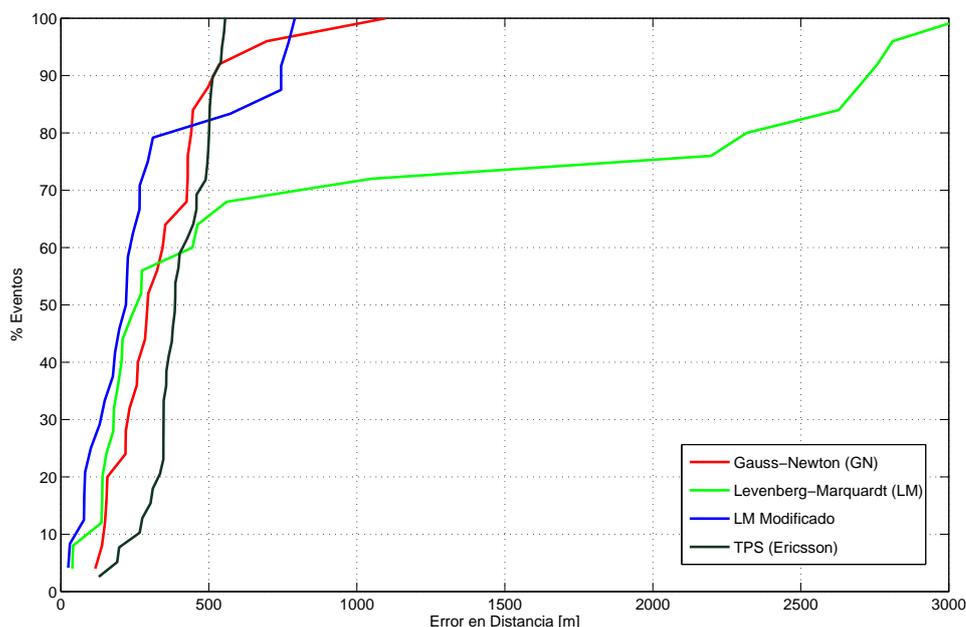


Figura 3.39: CDF del error de distancia correspondiente al set de datos de Norteamérica. Se representa la comparativa de precisión obtenida en una región suburbana entre GN, LM, LM modificado y TPS [30, 86].

- **50 Percentil:** los 220 metros de error de LM modificado destacan por encima de los 386 metros que da TPS. Por tanto, se logra una **ganancia de 166 metros**.
- **75 Percentil:** LM modificado da una precisión de 294 metros, mientras TPS ronda los 495 metros. El resultado es una **mejora de 201 metros**.
- **90 Percentil:** en este último caso se produce un cambio de tendencia. Este cambio se traduce en una **degradación de 237 metros** de LM modificado con respecto a TPS.

Otro aspecto que se advierte si contrastamos estos resultados con los del set de datos de Europa es que el nivel de precisión ha disminuido. El principal motivo es el incremento del error asociado a las medidas reportadas, el cual depende de la red móvil y el entorno concretos. Por ejemplo, recordemos que ya habíamos señalado el aumento de edificios altos en la región de estudio. Asimismo, en lo referente a la distancia inter-site, ambos conjuntos de datos son similares en términos generales. Sin embargo, en Norteamérica es común encontrarse grandes extensiones de terreno vacío y despoblado entre zonas habitadas, lo cual se traduce en una distribución del terreno menos homogénea que en la región de Europa. Esta circunstancia causa que en el set de datos de Norteamérica se puedan formar escenarios con una distancia inter-site mayor, derivando en la reducción del nivel de precisión y del porcentaje total de eventos geolocalizados.

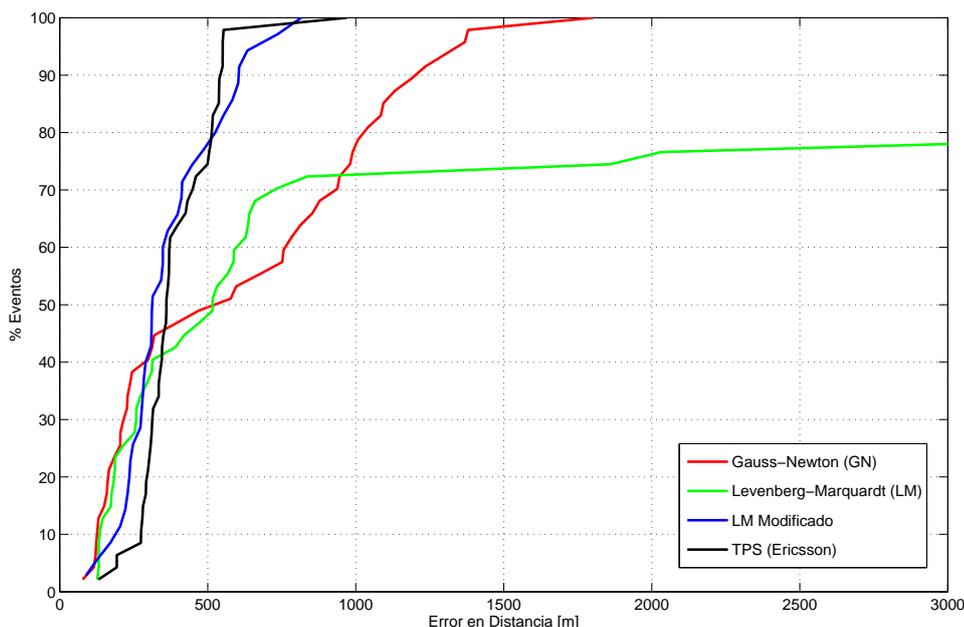


Figura 3.40: CDF del error de distancia correspondiente al set de datos de Norteamérica en el caso de eventos que reportan solamente 3 sites. Para ello, se aprovechan los valores de sincronización entre sites obtenidos en la ejecución de la herramienta de geolocalización hiperbólica. Se representa la comparativa de precisión obtenida en una región suburbana entre GN, LM, LM modificado y TPS [30][II].

En lo referente a los eventos que reportan 3 sites, los resultados se recogen en la Fig. 3.40. Lo primero comentar que el porcentaje de **eventos recuperados es del 72 %**. Lo segundo es que LM modificado y TPS ofrecen mejores prestaciones que GN y LM, tal y como se percibe a simple vista en las gráficas. Esto es consecuencia de situaciones de divergencia (GN) y de mínimos locales (LM). Por su parte, **LM modificado logra una ganancia de entre 20 y 30 metros sobre TPS hasta el 80 percentil**, punto en el que se produce un leve cambio de tendencia. Igualmente, también es interesante señalar la correlación de los resultados de LM clásico cuando se comparan las CDFs de ambas figuras, donde se observa un punto de interrupción en torno al 70 percentil. Este detalle señala como el error en la estimación de las posiciones se traslada al error en la estimación de las RTDs y viceversa.

En último lugar, se ha reproducido sobre *Google Earth* uno de los escenarios reales resueltos. De este modo, se pretende reflejar la realidad junto a las estimaciones con las que se generarán los mapas que usarán los ingenieros para tareas de detección de problemas u optimización, entre otras.

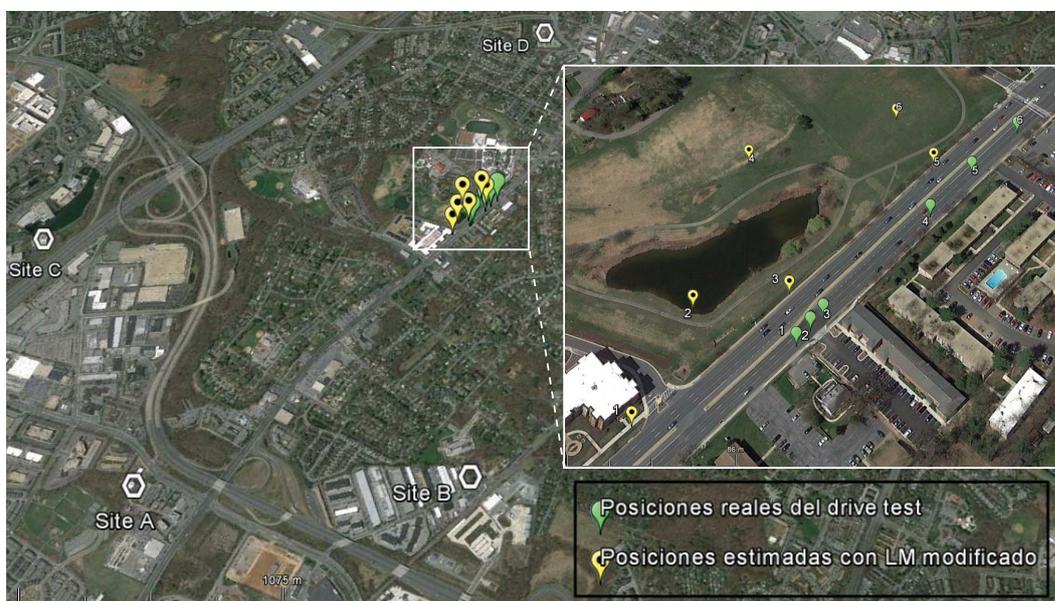


Figura 3.41: Geolocalización representada sobre *Google Earth* para un escenario real suburbano de Norteamérica. Se muestra la comparativa entre las localizaciones reales dadas por el GPS del *drive test* (marcadores verdes vacíos) y las localizaciones estimadas por LM modificado (marcadores amarillos con punto negro). Por su parte, los sites han sido representados con hexágonos blancos, teniendo en cuenta que el site 'A' es el site de referencia.

3.7. Conclusiones

A modo de resumen, en este capítulo se ha presentado una herramienta autónoma y completa de geolocalización basada en OTDOA, esto es, basado en el corte de hipérbolas. El

objetivo de la herramienta es estimar conjuntamente la posición de los eventos *Measurement Report* reportados en las trazas de llamada, así como recuperar la sincronización entre los Nodos B de una red móvil UMTS. De este modo, el funcionamiento de la herramienta comprende el procesado de los datos de entrada, el filtrado de medidas, la selección de escenarios óptimos, la aplicación de un método numérico iterativo para resolver los sistemas de ecuaciones no lineales y la preparación de los resultados finales.

Uno de los hitos más destacados de este desarrollo ha sido la selección del **método numérico** encargado de resolver el problema de la multilateración hiperbólica. Para ello, se han analizado dos alternativas ampliamente conocidas en la bibliografía, el método de Gauss-Newton y el método de Levenberg-Marquardt. El primero ha demostrado ofrecer una rápida convergencia, pero también debilidad frente a la divergencia. Por su parte, Levenberg-Marquardt se ha mostrado como un método más preciso, estable y lento, pero con el principal inconveniente de tender a quedar atascado en mínimos locales bajo ciertas circunstancias. A raíz de estos inconvenientes, se ha optado por desarrollar una **modificación de Levenberg-Marquardt** mediante el ajuste de ciertas variables y la inclusión de nuevos parámetros. De esta manera, se ha logrado un método numérico rápido, sin divergencia y más robusto frente a mínimos locales. Estas conclusiones han sido extraídas, en primer término, con un simulador de escenarios sintéticos y, posteriormente, reforzadas con la resolución de escenarios y datos reales.

Otra aspecto fundamental que se ha investigado ha sido la selección de una **disposición óptima de cuatro sites** para evitar la aparición de mínimos locales. En este sentido, se ha probado que una **topología en estrella** es robusta contra la presencia de los mismos. Geometrías menos favorables pueden inducir a singularidades y baja precisión en las estimaciones debido al hecho de que los algoritmos iterativos empleados pueden llegar a quedar bloqueados en áreas donde dos hipérbolas intersectan, o en áreas donde un eje focal se interpone entre la estimación obtenida en la iteración previa y la posición real del evento. Es más, estas malas estimaciones podrían impactar en la precisión del resto de estimaciones. Por esta razón, la búsqueda y utilización de una geometría espacial óptima es un punto cardinal en la herramienta de geolocalización. De hecho, las pruebas realizadas en escenarios sintéticos han demostrado que, mientras escenarios con sites en disposición de 'T' y en rectángulo proporcionan errores medios de 27 y 176 metros respectivamente, los escenarios con geometría en estrella logran una geolocalización perfecta siempre que no haya fuentes de errores externas.

Estas estrategias, junto a otros elementos y procedimientos de menor envergadura, componen la herramienta OTDOA propuesta. **La precisión de esta herramienta ha sido evaluada en dos set de datos reales** proporcionados por Ericsson para comparar la precisión lograda con respecto a la que se obtiene en TPS, que es la herramienta de Ericsson encargada de geolocalizar. Los resultados medidos mediante CDFs han mostrado una **ganancia de precisión punto a punto** en la mayoría de casos. Concretamente, y promediando los resultados de todos los ROPs en el percentil 50, la herramienta propuesta ofrece una precisión de 210 metros, por los 330 de TPS, lo se traduce en una **mejora de 120 metros**. Esta mejora se deriva, a su vez, en una mejor estimación de la sincronización entre Nodos B.

Desde un punto de vista absoluto, una **precisión media de 210 metros** es sinónimo de un gran resultado si tenemos en cuenta el contexto. Los métodos hiperbólicos tienen su campo de aplicación en **entornos suburbanos**, donde la distancia entre sites puede rondar entre 500 y 2000 metros. Zonas muy urbanas o, en términos más generales, con un bajo ratio entre la distancia inter-site y la distancia equivalente a 1 chip, no son favorables para el corte de hipérbolas, ya que pequeños errores en las medidas se traducen en enormes errores de estimación por la propia naturaleza geométrica de las hipérbolas. Por su parte, en áreas rurales es muy difícil la aplicación del método OTDOA debido a que es necesario que el dispositivo móvil reporte al mismo tiempo al menos 4 Nodos B.

Respecto a los **aspectos negativos** de la herramienta propuesta, se pueden destacar básicamente dos. En primer lugar, el **tiempo de ejecución** puede llegar a ser excesivo si el número de escenarios a resolver es elevado porque el número de combinaciones de sites crece exponencialmente. No obstante, todo depende del caso de uso. Si la principal necesidad del ingeniero es la precisión punto a punto, esta herramienta cumple el objetivo; pero, si el requisito fundamental es obtener alguna aproximación de la geolocalización en poco tiempo, entonces la herramienta hiperbólica podría quedar fuera del campo de aplicación. En segundo lugar, la **cantidad de eventos** que reportan 4 o más sites no es en general muy alta. El estudio llevado a cabo en [76] muestra que esta cantidad suele estar por debajo del **30 %**. Sin embargo, si incluimos los eventos que reportan también 3 sites, puesto que pueden ser geolocalizados a posteriori fijando las RTDs obtenidos previamente, entonces el porcentaje se incrementa hasta aproximadamente el **60 %** de los eventos. En cualquier caso, todo depende de la red y el entorno específicos.

CORRECCIÓN DE LA GEOLOCALIZACIÓN MEDIANTE INTERVALOS DE CONFIANZA

EN este capítulo se detalla una técnica para ajustar de forma inteligente las posiciones de los UEs estimadas por diferentes métodos de geolocalización (hiperbólicos (OTDOA), ángulo de llegada (AOA), Propagation Delay (PD), etc.), así como elegir cuál de estos métodos ofrece mayor fiabilidad para posicionar la llamada. Para ello, el capítulo se divide en cinco secciones. La Sección 4.1 presenta el problema de tener eventos geolocalizados por diferentes métodos para una misma llamada, además de revisar el estado de la investigación relacionado a la estimación del error en técnicas de geolocalización. A continuación, la Sección 4.2 introduce varias técnicas de geolocalización junto al procedimiento para extraer sus intervalos de confianza al 95 %. Estas regiones de confianza garantizan que la posición real del terminal móvil está dentro de ellas con un 95 % de certeza. Con esta información, la Sección 4.3 expone el algoritmo para corregir las posiciones de los eventos a nivel de llamada aprovechando los ya mencionados intervalos de confianza. Posteriormente, en la Sección 4.4 se muestran los resultados logrados con el algoritmo propuesto usando datos reales, y en la Sección 4.5 se presentan las conclusiones finales del capítulo.

4.1. Introducción

La creciente popularidad de los *smartphones*, junto a las correspondientes mejoras en la tecnología de sensores, hacen posible que haya diversas fuentes de información para usar en la geolocalización. De este modo, se pueden proveer algoritmos fiables y precisos para estimar la posición de los usuarios, como los propuestos en el Capítulo 2 y en el Capítulo 3. Los algoritmos tienen sus peculiaridades y diferencias dependiendo si tratamos con redes móviles GSM, UMTS o LTE, pero al final siempre existe alguna técnica de geolocalización que se puede aplicar a una o varias de estas tecnologías.

En términos generales, un método de posicionamiento consta de 3 pasos: primero, es necesario proporcionar asistencia inicial e información para la estimación de la posición; a continuación, la ejecución de ciertas medidas y los consecuentes reportes deben ser completados; finalmente, el método estima las posiciones geográficas de los diferentes UEs basándose en los resultados de las medidas mencionadas previamente. Más concretamente, el proceso de localización puede contar con medidas en términos de ángulo de llegada (AOA), nivel de señal recibido (RSS), tiempo de llegada (ToA) o retardo de propagación (PD), y la diferencia de tiempos de llegada (TDOA). De hecho, las metodologías asociadas ya se describieron con detalle en la Sección 2.1.

Ahora bien, imaginemos que la **geolocalización es realizada a nivel de evento como ente independiente**, por ejemplo, en UMTS se geolocalizan los eventos vistos en la Sección 2.2.1.2 y la Sección 2.2.1.1. Esto se traduce en que llamadas suficientemente largas pueden dar lugar a varios eventos geolocalizados con diferentes métodos que, en consecuencia, tendrán posiciones estimadas diferentes. Cada uno de ellos encerrará sus ventajas e inconvenientes, y su grado de error asociado. Además, si se deduce que se trata de una llamada estática, lo lógico es asignar una única posición a toda la llamada. Por tanto, surge la necesidad de combinar esa variedad de resultados a nivel de llamada con el fin de mejorar la geolocalización final, ya que algunos de esos resultados tendrán una fiabilidad mayor y, por tanto, deberían ser una componente con más peso dentro de la llamada.

Se parte del hecho de que las posiciones calculadas nunca corresponden con las posiciones reales, debido tanto a los errores de las medidas (multitrayecto, desvanecimiento de la señal...) como a los del propio método de posicionamiento empleado (topología de la red, resolución de los parámetros...). Por consiguiente, la idea es **estimar estadísticamente el error de cada posición calculada en función de la técnica de geolocalización y de las variables claves**. Para ello, se recurre a los **intervalos de confianza**, los cuales establecen el área dentro de la cual la posición real tiene un determinado porcentaje de probabilidad de encontrarse. Posteriormente, se propone un **algoritmo de compresión** para corregir la posición de los eventos de la misma llamada en base a estos intervalos de confianza, los cuales también pueden ser vistos como límites superiores de error [I].

En resumen, los principales objetivos y ventajas de esta propuesta son:

- Cohesionar los eventos geolocalizados de una misma llamada.
- Mejorar notablemente la precisión punto a punto.
- Mitigar los efectos adversos del multitrayecto y otras fuentes de error que inducen a la falta de exactitud de ciertos métodos bajo ciertas condiciones.
- Asociar características de un evento con el error derivado de la geolocalización.

4.1.1. Estado de la técnica

Los métodos de geolocalización pueden ser ajustados para mejorar las estimaciones de la posición. En este contexto, varias estrategias han sido propuestas en [87, 88, 89, 90] para

refinar tales estimaciones. El denominador común es incluir algún tipo de área de confianza donde se pueda asegurar que el terminal móvil es localizado con el mínimo error.

En este sentido, en [87], un factor de confianza para la geolocalización basada en medidas de RF es derivado de lo que se denomina áreas válidas de geolocalización. Concretamente, estas áreas son obtenidas solapando las zonas de visibilidad y cobertura de cada sector que mide el móvil. Por supuesto, este proceso necesita datos geográficos de la zona para conocer dónde se produce esa cobertura y visibilidad. En cuanto al factor de confianza, su objetivo es doble. Por un lado, descartar posiciones estimadas cuyo factor de confianza esté por debajo de un umbral γ , y por otro lado, corregir las posiciones basándose en las mencionadas áreas válidas de geolocalización. Pese a todo, este planteamiento presenta limitaciones. Las más relevantes son que solamente se aborda la geolocalización basada en medidas RF, y que se necesita información geográfica del área, la cual es muchas veces inaccesible.

Por otra parte, en [88] y [89], se divulga un sistema de localización para infraestructuras de comunicaciones móviles. Este sistema se basa en una solución end-to-end para las tecnologías GSM, GPRS, CDMA, TDMA y WiFi. Una vez más, se usan valores de confianza para proveer un indicador de la fiabilidad de las estimaciones de la localización, pero en esta ocasión a través de reglas difusas que se encargan de manejar y procesar valores de nivel y retardo de señal. No obstante, dos puntos débiles se desprenden de estas propuestas. El primero es la no consideración de tecnologías móviles de tercera y cuarta generación, y el segundo es el uso exclusivo de lógica difusa para hacer los ajustes de la posición, es decir, falta el enfoque que se quiere buscar en este trabajo. Este enfoque es calcular y aprovechar la probabilidad de error asociado al método usado para geolocalizar.

Asimismo, el trabajo presentado en [90] propone un método eficaz para geolocalizar en diferentes tecnologías (GSM, UMTS y LTE), pero altamente dependiente de la topología de la red. La manera de estimar la posición está principalmente basada en el cálculo del centroide de un área de incertidumbre, la cual está definida con la ayuda de diferentes fuentes de información: ángulo de llegada, identificador de celda, potencia de señal y medidas de tiempos. Su principal argumento a favor es que no es necesaria una calibración en campo, ya que el método no está supeditado a predicciones de propagación RF ni a *drive tests*. Sin embargo, aunque se utilizan áreas de mínimo error de geolocalización, el método propuesto queda mejor catalogado como una especie de método híbrido, puesto que en ningún momento se hace un ajuste posterior de las posiciones geolocalizadas en base al error estadístico del método de geolocalización. Además, tampoco se tiene en cuenta el enfoque de varios eventos por llamada, propiedad que sí se explota en el desarrollo de este capítulo.

4.2. Intervalos de confianza

En esta sección se va a discutir en profundidad el **cálculo del intervalo de confianza al 95 %, o área de incertidumbre**, asociado a algunos de los métodos de geolocalización más empleados hoy en día. En primera instancia, se recuerda que el intervalo de confianza al 95 % se corresponde con el área en la que, con un 95 % de probabilidad, se encuentra la posi-

ción real del evento que se desea geolocalizar. Como casos más significativos de técnicas de geolocalización, se ha incluido el método del centroide (Sección 4.2.2), los métodos basados en medidas temporales (Sección 4.2.3), la multilateración hiperbólica (Sección 4.2.4), y el ángulo de llegada (Sección 4.2.5). En cualquier caso, se debe tener en mente que este parámetro estadístico se puede obtener para cualquier método de posicionamiento diseñado e implementado siguiendo algún principio matemático.

4.2.1. Conceptos básicos

Brevemente, se van a refrescar los fundamentos básicos del intervalo de confianza al 95 % usando [91] y [92] como referencias.

Asumiendo una variable aleatoria que sigue una distribución Normal $N(\mu, \sigma)$ donde la varianza es un valor fijo conocido $\sigma^2 = \sigma_0^2$, el objetivo es, dada una muestra aleatoria simple de tamaño n de la variable, obtener un intervalo con nivel de confianza del 95 % para el parámetro μ de la distribución.

En virtud del teorema del límite central, si el tamaño de las muestras es lo suficientemente grande, la distribución de medias muestrales (\bar{X}) es, prácticamente, una distribución normal con media μ y una desviación típica dada por la expresión $\sigma_{\bar{x}} = \sigma_0/\sqrt{n}$. Entonces, estandarizando, se puede construir la siguiente variable aleatoria normal estándar:

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma_0/\sqrt{n}} = Z \sim N(0, 1) \quad (4.1)$$

En una distribución $Z \sim N(0, 1)$ puede calcularse fácilmente un intervalo dentro del cual caigan un determinado porcentaje de las observaciones, esto es, es sencillo hallar z_1 y z_2 tales que $P[z_1 \leq z \leq z_2] = 1 - \alpha$, donde $(1 - \alpha) \cdot 100$ es el porcentaje deseado. Por consiguiente, suponiendo una distribución centrada en 0 y de doble cola (valores positivos y negativos), se obtiene que

$$P[-z_{\alpha/2} \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma_0/\sqrt{n}} \leq z_{\alpha/2}] = 1 - \alpha. \quad (4.2)$$

En concreto, **para la distribución $N(0, 1)$ el valor de $z_{\alpha/2}$ es 1.96 cuando se busca la confianza del 95 %**, tal y como se muestra en la Fig.4.1.

4.2.2. Centroide

Los UEs pueden medir varios sites al mismo tiempo, reportando estas medidas a la red móvil a través del evento *Measurement Report*. Por ejemplo, en 3G, las zonas de *soft-handover* suelen ser espacios donde hay un mayor número de conexiones a sites diferentes, al contrario de lo que ocurre en las zonas cercanas a un Nodo B, donde este número se

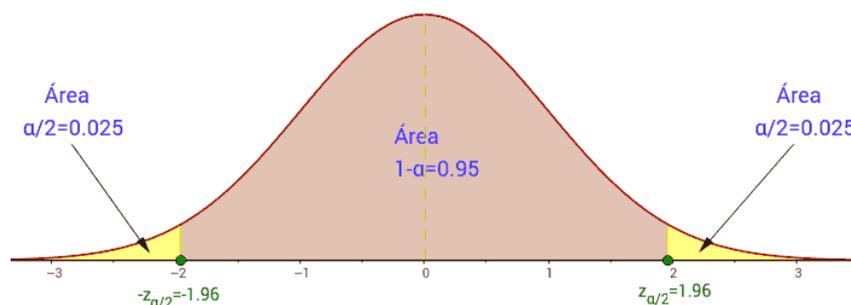


Figura 4.1: Intervalo de confianza al 95 % para la distribución Normal.

reduce a uno o dos. Para el centroide, el número de sectores medidos por los eventos es un factor clave, ya que mayor cantidad de medidas significa, por lo general, mejor precisión. Pero también una limitación, puesto que hace falta medir al menos dos sites diferentes para geolocalizar el evento por este método. En cualquier caso, en el apartado "Centroide" de la Sección 2.3.4.1 hay más detalles, y en la Ec. (2.12) está la expresión matemática.

En cuanto a la parte estadística del problema, es sencillo ver que el **grado de libertad** es simplemente el número de sectores reportados menos uno. Este es el número de componentes libres que deben ser conocidas antes de que el vector de muestras esté completamente determinado para obtener un valor concreto para el centroide.

A raíz del comentario anterior, la distribución de probabilidad de este método plantea el inconveniente de que **el número de sites reportados**, hasta en el mejor de los casos, es **pequeño en términos de estadístico suficiente**. De hecho, un estadístico es suficiente con respecto a un modelo estadístico y su parámetro desconocido asociado si ningún estadístico que pueda ser calculado de la misma muestra provee información adicional acerca del valor del parámetro. Por tanto, para este caso particular, se ha recurrido a la **distribución de probabilidad conocida como distribución T de Student [93]**. Esta distribución es efectiva para estimar parámetros de una población cuando el tamaño de la muestra es pequeño. De nuevo, recalcar que aquí el número de sectores medidos es el conjunto de observaciones, y que un UE, como máximo, suele medir 7 sectores al mismo tiempo.

A continuación, se formula el funcionamiento del algoritmo. En primer lugar, se define $\nu = n - 1$, donde ν representa el grado de libertad asociado a la distribución, mientras que n es el número de sectores medidos por un evento específico. Así pues, se fija un intervalo de confianza del 95 % para un rango unilateral, es decir, de una cola, ya que se busca el radio del área de incertidumbre. En este punto, se selecciona el valor apropiado de la distribución correspondiente al 95 % de probabilidad. Para ello, se utiliza una tabla predefinida mostrada en la Tabla 4.1. Por ejemplo, si se considera un evento que reporta 3 sectores ($n = 3$ y $\nu = 2$), entonces el intervalo de confianza al 95 % viene dado por la entrada de la tabla señalada en negrita ($t_{95,2} = 2.92$). Dicho de otro modo, la probabilidad de que T sea menor que 2.92 es 95 %, esto es,

$$Pr(-\infty < T < 2.92) = 0.95. \quad (4.3)$$

Tabla 4.1: Valores de probabilidad asociados a la distribución T de Student unilateral.

ν	90 %	95 %	99 %
1	3.078	6.314	31.82
2	1.886	2.92	6.965
3	1.638	2.353	4.541
4	1.533	2.132	3.747
5	1.476	2.015	3.365
10	1.372	1.812	2.764
100	1.29	1.66	2.364
∞	1.282	1.645	2.326

Luego, por simetría de la distribución,

$$Pr(T < -2.92) = 1 - Pr(T > -2.92) = 1 - 0.95 = 0.05. \quad (4.4)$$

Empleando el Teorema del Límite Central para el conjunto de eventos disponibles, no para el número de sites que reportan, y asumiendo que los datos siguen una distribución normal (suposición aceptable para la localización de los sites), el **límite superior del intervalo de confianza (IC)** puede ser calculado usando la expresión

$$IC = t_{95, n-1} \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \quad (4.5)$$

donde S_n indica la desviación estándar de la distribución, la cual puede ser calculada como

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_c)^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_c)^2}{n}}, \quad (4.6)$$

con X_i, Y_i representando las coordenadas cartesianas del i -ésimo site, y X_c, Y_c denotando las coordenadas del centroide asociado a los sites reportados por el evento.

De esta manera, la Ec. (4.5) facilita el radio de un área circular de confianza centrada en la posición estimada del evento por el centroide. Visto desde otro enfoque, **este valor proporciona un límite superior del error cometido al posicionar el evento**. La Fig. 4.2 muestra un ejemplo con un intervalo de confianza al 95 % de 183 metros. El significado físico de este valor es que la posición real del UE está, con un 95 % de probabilidad, dentro de ese área circular de 183 metros de radio.

La obtención de este intervalo de confianza se presta a ser realizada en tiempo real, con el único requerimiento de almacenar en base de datos la Tabla 4.1. No obstante, es posible reducir el tiempo de procesado si, con anterioridad, se han simulado un número suficiente de escenarios virtuales con localizaciones aleatorias tanto de los UEs como de los sites. Además, en estas simulaciones también se variará el número de sites reportado por el UE, con

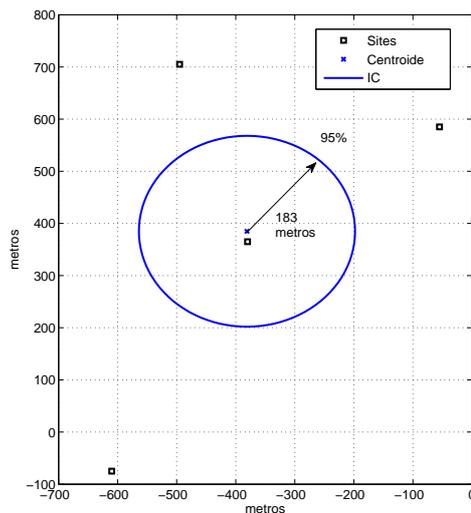


Figura 4.2: Se muestra un ejemplo real del intervalo de confianza al 95 % calculado para el método del centroide. La posición estimada del evento es la cruz azul (centroide), mientras que la circunferencia es el área de incertidumbre, la cual tiene un radio de 183 metros.

el fin de generar una tabla de búsqueda que asocie número de sites reportados y, por ejemplo, distancia inter-site (ISD) media, con el intervalo de confianza esperado. Estas tablas de búsqueda estarán disponibles cuando se desee calcular el intervalo de confianza asociado al método de geolocalización del centroide, de donde se desprende una gran ganancia de rendimiento.

4.2.3. Medidas temporales

Seguidamente, se evalúa el intervalo de confianza de los procedimientos de geolocalización basados en medidas temporales, entendiendo por tales el **Propagation Delay (PD)** en UMTS, y el **Timing Advance (TA)** en GSM y LTE. El PD se definió en la Sección 2.2.1.1, pero básicamente representa el retardo de propagación de la señal entre el UE y su celda servidora. El concepto del TA es análogo, aunque difiere en la periodicidad con que es reportado y en la granularidad del propio parámetro. El PD es medido en pasos de 3 chips, mientras que el TA de LTE tiene una resolución equivalente a 1 chip de UMTS (78.125 metros), y el de GSM a 550 metros.

En cualquier caso, para ambos parámetros, el radio de confianza debería depender de:

- El propio valor del parámetro (**PD** o **TA**).
- El ancho de haz o *beamwidth* (**BW**) relativo al sector servidor reportado por el evento que se geolocaliza.
- Opcionalmente, se podría incluir una variable que midiese el **tiempo** transcurrido desde la ocurrencia del evento.

La filosofía que se persigue es similar a la del apartado anterior, buscando generar una tabla de búsqueda que esté disponible para cualquier escenario a procesar. No obstante, antes de continuar, se necesita saber cómo se geolocalizan inicialmente estos eventos. La propuesta que se presenta a continuación es solo una posible alternativa, pudiendo haber otras técnicas en la literatura. La idea consiste en asignar una posición al evento usando **dos distribuciones de probabilidad, una gaussiana para la coordenada angular, y otra uniforme para la coordenada radial**. En pro de la claridad, se ha incluido la Fig.4.3, donde se muestra gráficamente ambas distribuciones. El ángulo donde posicionar el evento vendrá dado aleatoriamente por una distribución normal centrada en el azimut del sector y con $\sigma = BW/2$, mientras que la distancia medida desde la posición del site es seleccionada aleatoriamente por una distribución uniforme entre PD/TA y $PD/TA + 1$.

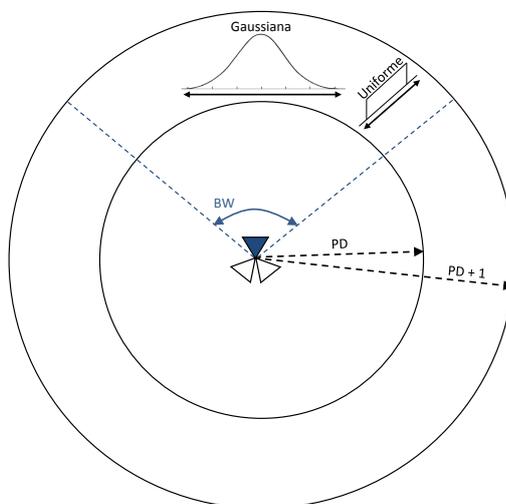


Figura 4.3: En la imagen se representa un site tri-sectorial, resaltando uno de los sectores junto a su BW. Un evento que ha medido un valor de PD con respecto a ese sector debe quedar localizado en la corona circular comprendida entre PD y PD+1. La posición dentro de esa zona delimitada quedará determinada angularmente por una distribución de probabilidad Gaussiana y, radialmente, por una uniforme.

Ahora, para el cálculo del intervalo de confianza, se ha implementado un **simulador** que genera eventos virtuales en escenarios sintéticos. Las simulaciones se encargan de ir generando escenarios donde geolocalizar hasta 10,000 eventos virtuales. Cada escenario se rige por un valor concreto de BW y de PD/TA. Los valores de PD/TA van desde 0 (valor que define la primera corona circular) hasta el valor correspondiente a aproximadamente 50 km (TA = 640 y PD = 214). Entonces, se van generando escenarios nuevos variando el BW en pasos de 10° , desde 10° hasta 360° , para cada posible valor de PD/TA, habiéndose fijado un valor máximo N . Por ejemplo, la Fig.4.4 muestra la distribución de eventos virtuales generada por el simulador para $BW = 60^\circ$ y $PD = 1$.

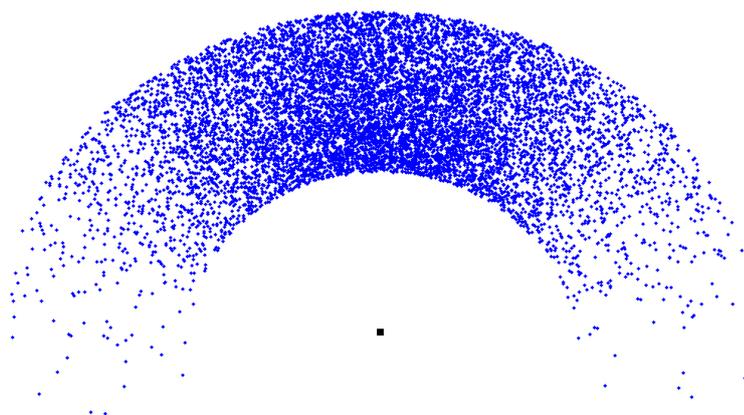


Figura 4.4: Distribución de eventos generados en una simulación numérica para estimar el error. En este caso, la imagen muestra un escenario con $BW = 60^\circ$ y $PD = 1$.

Tal y como se ha descrito anteriormente, la distribución de eventos para un par concreto de PD/TA y BW puede verse como una suma de dos procesos aleatorios $X + Y$, siendo X la distribución angular e Y la distribución en distancia radial. Independientemente de la naturaleza estadística de X e Y , estas variables son transformadas a coordenadas cartesianas x e y , por lo que, en general, se trabaja con variables correladas. Luego, en ese caso, la varianza de su suma es la suma de sus varianzas como

$$\text{Var}(X + Y) = \sigma_{X+Y}^2 = \text{Var}(X) + \text{Var}(Y) + 2\text{Cov}(X, Y), \quad (4.7)$$

donde $\text{Cov}()$ representa la matriz de covarianza, la cual es cero para variables aleatorias independientes.

Además, al resultado obtenido en (4.7) se le puede incluir una **dependencia con el tiempo**. El propósito de esta dependencia es extender la utilidad de esta estimación de error a otros tipos de eventos. Por ejemplo, si se quiere comparar la precisión de la estimación de un evento PD y un evento MR pertenecientes a la misma llamada, el intervalo de confianza del PD deberá tener en cuenta el tiempo transcurrido entre ambos. Para ello, se introduce esa dependencia temporal, que esencialmente viene a decir que cuánto más tiempo haya pasado desde que se reportó el PD, más error podría contener la estimación de la posición debido a la incertidumbre del desplazamiento del usuario durante ese periodo. Heurísticamente, este factor se ha definido como

$$\text{TimeFactor} = \frac{10 + \text{Offset}}{10}, \quad (4.8)$$

$$\widehat{\sigma_{X+Y}^2} = \text{TimeFactor} \cdot \text{Var}(X + Y), \quad (4.9)$$

siendo Offset el tiempo transcurrido en segundos desde la ocurrencia del evento.

Finalmente, el cálculo del intervalo de confianza (IC) se puede realizar directamente como el 95% del área bajo una curva gaussiana (la suma de una distribución normal y una uniforme se asume gaussiana), es decir, 1.96 veces la desviación estándar:

$$IC = 1.96 \cdot \sqrt{\widehat{\sigma}_{X+Y}^2} = 1.96 \cdot \widehat{\sigma}_{X+Y} \quad (4.10)$$

Con este procedimiento, el simulador calcula un IC para cada combinación de PD/TA, BW y tiempo. Posteriormente, estos resultados se almacenan en una tabla de la base de datos como la representada en la Tabla 4.2. De este modo, cuando se extrae un nuevo evento PD de las trazas, se puede encontrar su IC haciendo simplemente una búsqueda en la tabla.

Tabla 4.2: Extracto de la tabla de búsqueda que asocia valores de PD, BW y tiempo transcurrido con su correspondiente intervalo de confianza al 95%.

PD	BW	Tiempo transcurrido (s)	IC (m)
0	310	0	266.57
0	320	0	264.75
0	330	0	266.09
0	340	0	266.97
0	350	0	262.29
0	360	0	264.4
1	10	0	145.43
1	20	0	179.45
1	30	0	221.58
1	40	0	270.36
1	50	0	317.19
1	60	0	360.86

4.2.4. Multilateración

Red Móvil Asíncrona

En esta sección se expone un método para determinar el área de incertidumbre asociada a la técnica de geolocalización basada en la multilateración hiperbólica. Se asume que la red es asíncrona y que, por lo tanto, se requieren eventos que midan al menos 4 sites. Para más detalles sobre esta forma de geolocalizar, se puede consultar el Capítulo 3.

El primer paso es definir los tres parámetros básicos de los que va a depender el IC:

- **Número de sites medidos.**
- **Distancia inter-site (ISD):** definida como la distancia media entre el centroide y los sites reportados por el evento.
- Si el evento ha sido geolocalizado **fuera (0) o dentro (1) del polígono** formado por los sites reportados, tal y como se muestra en la Fig.4.5.

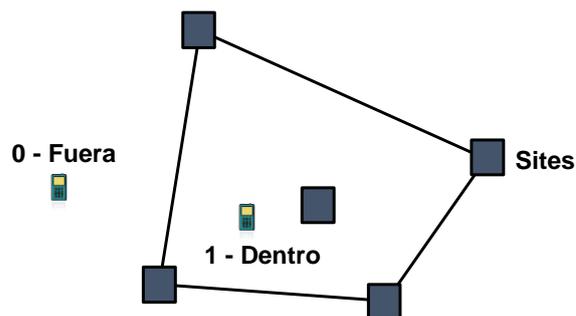


Figura 4.5: Posición del evento relativa al polígono formado por los sites reportados.

Ahora, siguiendo la misma filosofía empleada en la sección anterior, se ha desarrollado un **simulador** que emula un escenario referencia de topología hexagonal con radio variable (R), según se indica en la Fig.4.6. Este escenario se varía de tamaño en pasos de 200 metros aumentando el valor de R . El propósito es hallar los intervalos de confianza para un rango de valores de la ISD.

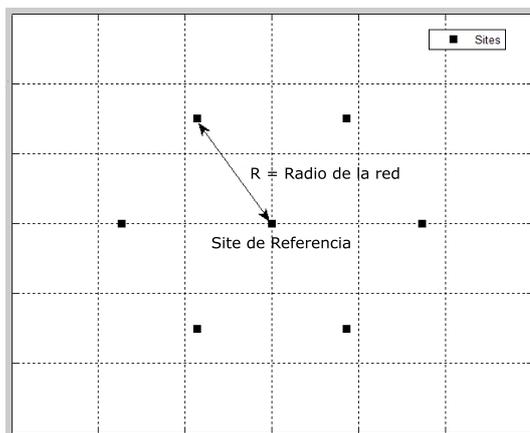


Figura 4.6: Escenario hexagonal de referencia para hallar el IC de la multilateración hiperbólica. El site de referencia se sitúa en el centro, y el tamaño de la red queda definido por el parámetro R .

Sobre cada escenario se distribuyen aleatoriamente hasta 100,000 eventos virtuales. Además, cada evento virtual añade una componente aleatoria uniforme a la posición de los sites reportados para evitar tener siempre una configuración hexagonal perfecta. De hecho, la Fig.4.7 ilustra uno de los escenarios de simulación. Por otro lado, no todos los eventos virtuales que se generan son exactamente iguales, sino que se clasifican con la misma probabilidad en los siguientes grupos:

- Miden 4 sites elegidos aleatoriamente, excepto el de referencia.
- Miden 5 sites elegidos aleatoriamente, excepto el de referencia.

- Miden 6 sites elegidos aleatoriamente, excepto el de referencia.
- Miden 7 sites elegidos aleatoriamente, excepto el de referencia.

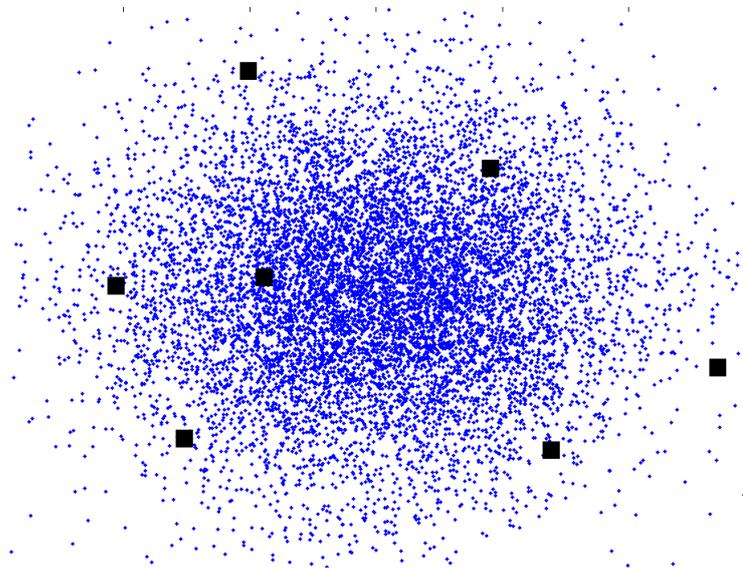


Figura 4.7: Escenario sintético compuesto de 100,000 eventos virtuales y 7 sites sobre el que se aplica la técnica de multilateración.

Asimismo, antes de resolver el problema, se modela de forma sencilla el **error de las medidas**, el cual proviene de diferentes fuentes, tales como la recuperación de la sincronización, el multitrayecto o el redondeo. Para ello, se emplea una distribución uniforme de ± 3 chips sobre el parámetro TM ideal:

$$TM_{medido} = TM_{ideal} + error. \quad (4.11)$$

Ahora, se puede ejecutar cualquier método numérico o algoritmo para minimizar el problema, resolver los sistemas de ecuaciones y obtener la localización de los eventos. De esta forma, para cada evento analizado en cada escenario simulado, se almacena la información relativa a si el evento ha sido geolocalizado dentro o fuera del polígono, junto al número de sites que reportaba y el error cometido en la estimación de la posición. Posteriormente, un factor de 1.64 veces la desviación típica es aplicado al **radio de confianza** obtenido previamente para asegurar un 95% de certeza, asumiendo una curva gaussiana de una cola, ya que el radio de confianza es una distancia siempre positiva. Cabe recalcar que el valor 1.64 se obtiene de calcular el área bajo la curva gaussiana de una sola cola.

Finalmente, se evalúa la **convergencia o divergencia** como un factor a considerar en el IC. En este sentido, en cada escenario simulado se cuenta el número de eventos convergentes y divergentes para juzgar la fiabilidad del método. Se considera que un evento ha convergido si la distancia entre su posición estimada y la posición real es menor que un umbral;

de lo contrario, se asume que el evento ha divergido. Este umbral debería variar según cada escenario dependiendo de la distancia inter-site del mismo, por ejemplo, en este trabajo se ha empleado un umbral igual a 3 veces la ISD. Por consiguiente, se propone la siguiente expresión heurística para calcular el IC:

$$IC = \frac{IC_{eventos_convergentes}}{\left[\frac{numEventosConvergentes}{numEventosTotales}\right]^2}, \quad (4.12)$$

donde $IC_{eventos_convergentes}$ corresponde al intervalo de confianza calculado solamente a partir de aquellos eventos que han convergido, $numEventosConvergentes$ es el número de eventos convergentes, y $numEventosTotales$ es el número total de eventos en el escenario.

Como comentario final, en la Tabla 4.3 se ha incluido una muestra de los intervalos de confianza obtenidos habiendo usado el método numérico de Gauss-Newton para resolver el problema de la multilateración. En los resultados se observa que cualquier evento dentro del polígono (1) ofrece una región de incertidumbre menor que los eventos fuera (0). Asimismo, el intervalo de confianza siempre se reduce conforme aumenta el número de sites medidos, lo cual es coherente con la idea de que más información se traduce en mejor precisión. Otro apunte es que el error disminuye al aumentar la ISD debido a que la técnica de multilateración hiperbólica es óptima en áreas suburbanas. El motivo es que pequeños errores de medida en zonas de baja ISD se convierten en grandes errores en las hipérbolas.

Tabla 4.3: Extracto de la tabla de búsqueda que asocia las características del evento con su correspondiente intervalo de confianza al 95 % para la multilateración hiperbólica en redes asíncronas habiendo empleado el método de Gauss-Newton.

ISD	Sites	Polígono	IC (m)
200	5	1	1136.67
200	5	0	2200
200	6	1	767.62
200	6	0	1406.91
200	7	1	717.27
200	7	0	1060.21
400	4	1	610.92
400	4	0	1480.2
400	5	1	440.54
400	5	0	784.16
400	6	1	372.26
400	6	0	533.05
400	7	1	327.26
400	7	0	448.53
600	4	1	506.59
600	4	0	1287.19
600	5	1	384.18
600	5	0	688.97

Red Móvil Síncrona

En caso de una red sincronizada, la intersección de dos hipérbolas, por supuesto, a partir de un evento que reporte 3 o más sites, puede ser resuelta mediante una **fórmula analítica**.

La metodología sigue las mismas directrices del caso de una red asíncrona, con la diferencia de que se incluyen eventos que miden 3 sites, y que la algoritmia para calcular las posiciones es diferente. De hecho, ésta se basa en aplicar la fórmula analítica sobre todas las posibles **combinaciones distintas de 3 sites** que se derivan de los sites reportados por el evento. Por ejemplo, si un evento mide 4 sites, las combinaciones serían:

- Site 1 - Site 2 - Site 3
- Site 1 - Site 2 - Site 4
- Site 1 - Site 3 - Site 4
- Site 2 - Site 3 - Site 4

Todas estas combinaciones son resueltas y sus soluciones, algunas de ellas previamente filtradas por divergencia, son promediadas. De esta manera, se espera disminuir el error y paliar el conflicto de la solución "espejo", el cual se produce porque las hipérbolas se cortan en más de un punto.

Finalmente, se consigue también una tabla de búsqueda que se almacena en base de datos. Un ejemplo de la misma es representada en la Tabla 4.4. Respecto a los resultados recogidos en esta tabla, cabe destacar la evolución algo inesperada del error en función del número de sites reportados para el caso en el que el usuario se encuentra dentro del polígono (*Polígono* = 1). La razón de que al principio el error aumente conforme aumenta el número

Tabla 4.4: Extracto de la tabla de búsqueda que asocia las características del evento con su correspondiente intervalo de confianza al 95 % para la multilateración hiperbólica en redes síncronas habiendo empleado una fórmula analítica.

ISD	Sites	Polígono	IC (m)
400	3	1	393.55
400	3	0	854.98
400	4	1	413.89
400	4	0	823.45
400	5	1	521.09
400	5	0	729.07
400	6	1	463.58
400	6	0	634.21
400	7	1	368.64
400	7	0	519.99
600	3	1	315.16
600	3	0	1113.6
600	4	1	425.41
600	4	0	999.76

ro de sites es que la resolución de la fórmula analítica devuelve dos soluciones válidas, es decir, las dos hipérbolas se cortan en dos puntos. En el caso de más de 3 sites reportados, algunas combinaciones de sites resueltas pueden devolver la solución incorrecta, ocasionando que la posición final promediada pueda sufrir cierta degradación a causa de estas soluciones "espejo". En este sentido, si el evento solo reporta 3 sites, no se hace un promediado, sino que se escoge directamente una de las dos soluciones obtenidas con la fórmula analítica. Este efecto, que en principio puede parecer poco intuitivo, no se hace presente en los casos donde el usuario está fuera del polígono debido a que en estas situaciones una de las dos soluciones suele ser fácilmente descartable por hallarse lejos de la zona de los sites.

4.2.5. Ángulo de llegada

En general, el método del ángulo de llegada (AOA) se basa en el axioma geométrico que establece que el punto de intersección entre dos líneas rectas es único, tal y como ya se describió brevemente en la Sección 2.1.1.2. No obstante, aquí nos vamos a centrar en un procedimiento de AOA un poco diferente, con idea de adaptarnos a lo que usa la herramienta TPS de Ericsson.

Este algoritmo se basa en **estimar la posición de un evento *Measurement Report* que reporta medidas de señal de dos sectores del mismo site** [94]. A grandes rasgos, la idea consiste en comparar la diferencia de niveles de señal (por ejemplo, RSRP en LTE) con los patrones de ganancia de las antenas de los sectores reportados. De esta manera, siempre se obtienen dos soluciones válidas debido a que hay dos ángulos que cumplen la diferencia de ganancias reportadas. Para ilustrar este comportamiento, la Fig. 4.8 señala con elipses negras dos soluciones donde la diferencia de ganancias es aproximadamente 40 dB. Entonces, lo que se suele hacer es optar por la solución más cercana al azimut de la celda servidora.

Una vez se ha estimado el ángulo en el que posicionar el evento, hace falta hallar la distancia. Para ello, se busca el evento PD/TA más cercano en tiempo al evento MR, y se le asocia la correspondiente medida temporal. De este modo, se halla el rango de distancia en el que debería encontrarse el MR. Para finalizar, se coge un valor aleatorio dentro de ese rango, con lo que ya se determina la posición final del evento.

Respecto al intervalo de confianza, éste va a depender de dos parámetros:

- La **medida temporal** asociada al MR, véase PD o TA.
- El **error en la medida de señal** (MEAS_ERROR) en decibelios. El propósito de este error es, sobre todo, modelar la disparidad de precisión que tienen unos terminales móviles frente a otros a la hora de realizar medidas.

Nuevamente, se recurre a un **simulador** en MATLAB para generar eventos virtuales en un escenario sintético y, posteriormente, emplear la estrategia de AOA mencionada arriba. Para ello, se usa un grid de píxeles de 81x81, donde cada píxel tiene hasta 20 valores de señal generados mediante una simulación de Monte Carlo, en otras palabras, se dispone de un mapa sintético de RSCP/RSRP. Estos valores están vinculados a los 20 sectores ubicados

en diferentes posiciones del grid. Por su parte, los eventos virtuales son colocados aleatoriamente en el grid, considerando que tienen que estar distribuidos homogéneamente entre los diferentes posibles valores de PD/TA. Además, son forzados a reportar dos celdas del mismo site. Finalmente, para originar situaciones más cercanas a la realidad, se añaden tres fuentes de error a las situaciones simuladas:

- Error intrínseco del método de **Monte Carlo**.
- **Patrón de antena no real:** $BW \pm 20^\circ$ con distribución uniforme.
- **Error de medida de señal:** $RSRP \pm 0.5 \cdot N(0, MEAS_ERROR^2)$. Recordemos que $N(\mu, \sigma^2)$ es la distribución normal con media μ y desviación típica σ .

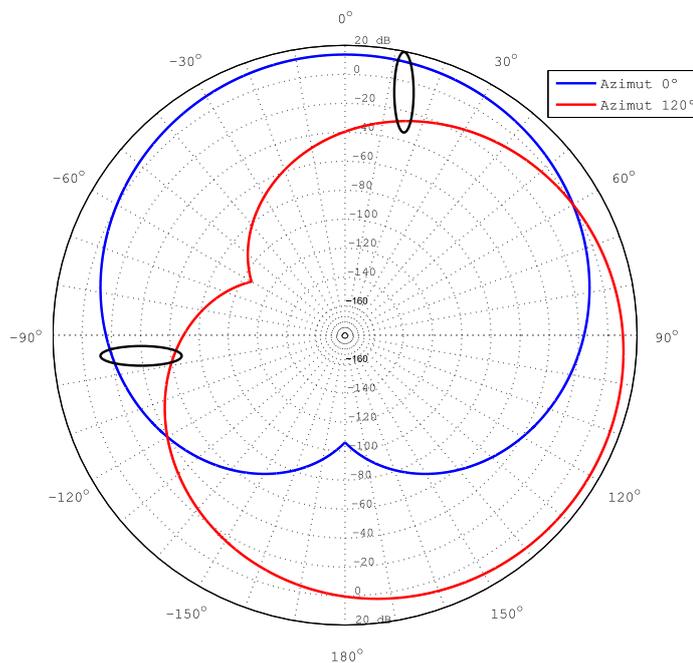


Figura 4.8: Aplicación del método AOA cuando se emplean medidas de sectores del mismo site. Se han representado los diagramas de radiación de dos sectores cuyos azimuts apuntan a 0° (azul) y 120° (rojo), respectivamente. Además, se ha señalado con elipses negras un ejemplo que representa que siempre hay dos ángulos para los que se cumple que la diferencia de ganancia entre los sectores es igual, en este caso unos 40 dB.

Con todo esto, el simulador se encarga de posicionar los eventos, calcular el error entre la posición estimada y la real, y extraer el IC al 95%. Este intervalo de confianza se obtiene computando 1.64 veces la desviación típica, ya que, de nuevo, se tiene una distribución gaussiana de una cola. Una muestra de la tabla de búsqueda lograda, se recoge en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Extracto de la tabla de búsqueda del intervalo de confianza para el método AOA basado en medidas de dos sectores del mismo site.

TA	MEAS_ERROR (dB)	IC (m)
1	0	63.34
2	0	83.65
3	0	109.27
1	1	63.43
2	1	83.76
3	1	109.02
1	2	63.5
2	2	84
3	2	110.17

4.3. Compresor

Llegados a este punto, se dispone de tablas y expresiones que proporcionan estimaciones del error cometido por distintos métodos de geolocalización, concretamente algunos de los implementados en la herramienta de Ericsson. El objetivo ahora es sacar provecho de esta información para refinar las posiciones estimadas, pero a nivel de llamada en lugar de evento. Entonces, partiendo de la premisa de que la llamada está correctamente ensamblada, el concepto es coger todos aquellos eventos geolocalizados por llamada, y aplicarles una transformación basada en los intervalos de confianza.

El primer punto a tener en cuenta es que las **llamadas se clasifican como estáticas o dinámicas**. Esta clasificación es directamente proveída por TPS, entendiéndose como estática aquellas llamadas donde el usuario se ha desplazado escasos metros, o no se ha movido en absoluto. El tratamiento en ambos casos debe ser diferente, ya que mientras en las estáticas todos los eventos pueden ser procesados conjuntamente, en las dinámicas se requiere dividir los eventos en grupos según el tiempo transcurrido. Por consiguiente, se propone la siguiente metodología:

- **Llamadas estáticas:** todos los eventos se computan juntos, como un solo conjunto.
- **Llamadas dinámicas:** se divide la llamada en intervalos de 20 segundos, y se computa cada conjunto de eventos por separado. Por ejemplo, si una llamada dura un minuto, se trabaja con 3 conjuntos de eventos. De esta forma, se pretende evitar la interacción de eventos que estarían realmente alejados en el espacio como consecuencia del desplazamiento del usuario.

El segundo punto es definir el **compresor** [I]. El compresor es un proceso de ajuste de la posición que se divide en dos etapas:

1. Se calcula un punto fijo virtual, al que denominamos **ancla virtual**. Este punto se calcula mediante un combinación ponderada de las posiciones estimadas de los eventos que pertenecen a un conjunto de una misma llamada, según sea estática o dinámica. Por su parte, la ponderación se realiza en base a los intervalos de confianza.

2. La segunda etapa consiste en **comprimir los eventos**, esto es, moverlos en dirección al ancla virtual dándoles una nueva posición.

4.3.1. Ancla Virtual

El IC da una valoración del máximo error cometido, lo que quiere decir que un valor mayor se traduce en una estimación de la posición que, en principio, es menos precisa. En otras palabras, probabilísticamente hablando es mejor asignar más peso a aquellos eventos con un valor de IC más pequeño. Para tener esto en cuenta, a cada conjunto de eventos cuyos IC vienen dados por un vector **IC**, se les aplica la siguiente **transformación**:

$$pesos[i] = \max(\mathbf{IC}) + \min(\mathbf{IC}) - IC[i]. \quad (4.13)$$

Seguidamente, se requiere alguna **operación que combine lineal o no linealmente los pesos**. Para ello, se han analizado seis propuestas a través de un simulador en MATLAB. Cada simulación generaba 100,000 llamadas estáticas en ubicaciones aleatorias. Estas llamadas estaban compuestas por 5 eventos situados también aleatoriamente en las cercanías de la posición real de la llamada, y a los que se les asignaba una determinada área de incertidumbre virtual equivalente al intervalo de confianza al 95 %. Se ha obviado la utilización de llamadas dinámicas, pues, como ya se mencionó anteriormente, éstas se pueden subdividir en llamadas estáticas de corta duración. De este modo, se calculaba el ancla virtual para cada llamada y, posteriormente, se obtenía el error medio en distancia entre las anclas y las posiciones reales de las llamadas. Así pues, los seis métodos se formulan como

$$\mathbf{1. Centroide} \rightarrow Ancla_{x/y} = \frac{\sum_{i=1}^N eventos_{x/y}[i]}{\sum_{i=1}^N i} \quad (4.14)$$

$$\mathbf{2. Lineal} \rightarrow Ancla_{x/y} = \frac{\sum_{i=1}^N eventos_{x/y}[i] \cdot pesos[i]}{\sum_{i=1}^N pesos[i]} \quad (4.15)$$

$$\mathbf{3. Cuadrático} \rightarrow Ancla_{x/y} = \frac{\sum_{i=1}^N eventos_{x/y}[i] \cdot (pesos[i])^2}{\sum_{i=1}^N (pesos[i])^2} \quad (4.16)$$

$$\mathbf{4. Tercer orden} \rightarrow Ancla_{x/y} = \frac{\sum_{i=1}^N eventos_{x/y}[i] \cdot (pesos[i])^3}{\sum_{i=1}^N (pesos[i])^3} \quad (4.17)$$

$$5. \text{ Cuarto orden} \rightarrow Ancla_{x/y} = \frac{\sum_{i=1}^N eventos_{x/y}[i] \cdot (pesos[i])^4}{\sum_{i=1}^N (pesos[i])^4} \quad (4.18)$$

$$6. \text{ Logarítmico} \rightarrow Ancla_{x/y} = \frac{\sum_{i=1}^N eventos_{x/y}[i] \cdot \log(pesos[i])}{\sum_{i=1}^N \log(pesos[i])} \quad (4.19)$$

Notar que el subíndice x/y significa que se ha de aplicar la misma expresión para hallar las coordenadas x y y del ancla. Asimismo, N representa el número de eventos del conjunto que se está computando. Recordemos que si bien en las llamadas estáticas se toman todos los eventos a la vez, en las dinámicas se utilizan subconjuntos de 20 segundos.

En cuanto a los resultados para cada método, se presentan en la Tabla 4.6. Se observa que el **Cuadrático** es el que devuelve un error menor. Por tanto, será el que se emplea de aquí en adelante.

Tabla 4.6: Comparativa de métodos para obtener el ancla virtual.

MÉTODO	Error Medio del Ancla Virtual (m)
Centroide	668.45
Lineal	522.49
Cuadrático	500.31
Tercer Orden	508.64
Cuarto orden	519.35
Logarítmico	596.78

4.3.2. Comprimir eventos

Una vez se ha obtenido el ancla virtual, todos los eventos incluidos en el segmento de la llamada bajo estudio deben ser movidos para ajustar su posición. En este sentido, se desarrollan dos posibilidades dependiendo de si el ancla virtual cae dentro del área de incertidumbre del evento o no.

- **El ancla virtual está dentro del intervalo de confianza del evento:** el evento se desplaza a la posición del ancla virtual. Ver Fig.4.9.
- **El ancla virtual está fuera del intervalo de confianza del evento:** el evento se desplaza al borde de su intervalo de confianza, pero en la dirección del ancla virtual. Ver Fig.4.10.

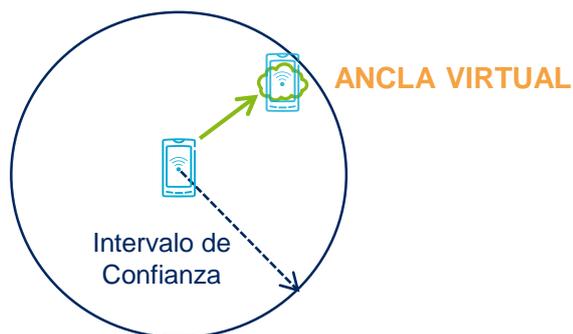


Figura 4.9: Ajuste de la posición si el ancla virtual está en el IC.

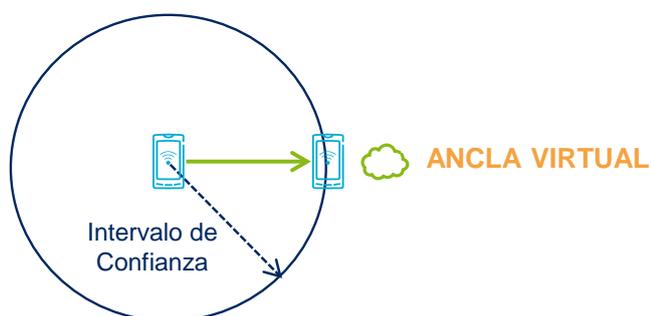


Figura 4.10: Ajuste de la posición si el ancla virtual está fuera del IC..

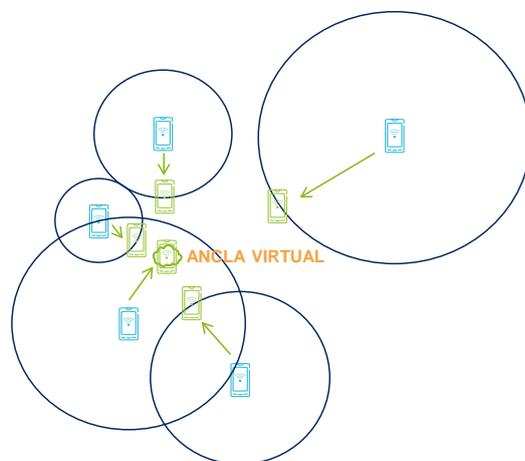


Figura 4.11: Funcionamiento teórico del compresor con cinco eventos (móviles azules) que se hallan en el centro de las circunferencias que representan sus correspondientes intervalos de confianza al 95 %. Tras aplicar el compresor, las nuevas posiciones de los eventos (móviles verdes) se agrupan en torno al ancla virtual según los criterios definidos previamente. De hecho, uno de los eventos termina desplazado justamente en la posición del ancla virtual.

De esta forma, se consigue dar coherencia a la llamada, ya que se fuerza que los eventos geolocalizados, a menudo dispersos, se concentren en un punto común calculado considerando más relevantes aquellas posiciones con menor margen de error. No obstante, siempre con un límite, de ahí que si el ancla virtual está muy lejos, no se fuerza al evento a un desplazamiento tan drástico, manteniéndolo en el borde de su IC. En aras de una mayor claridad, se han incluido la Fig.4.11 y la Fig.4.12 para concretar, gráficamente, el comportamiento esperado. La primera muestra el funcionamiento teórico del compresor con una llamada de cinco eventos, donde solamente uno de ellos es desplazado al ancla virtual. Por su parte, la segunda ilustra uno de los casos del **simulador** utilizado en la Sección 4.3.1.

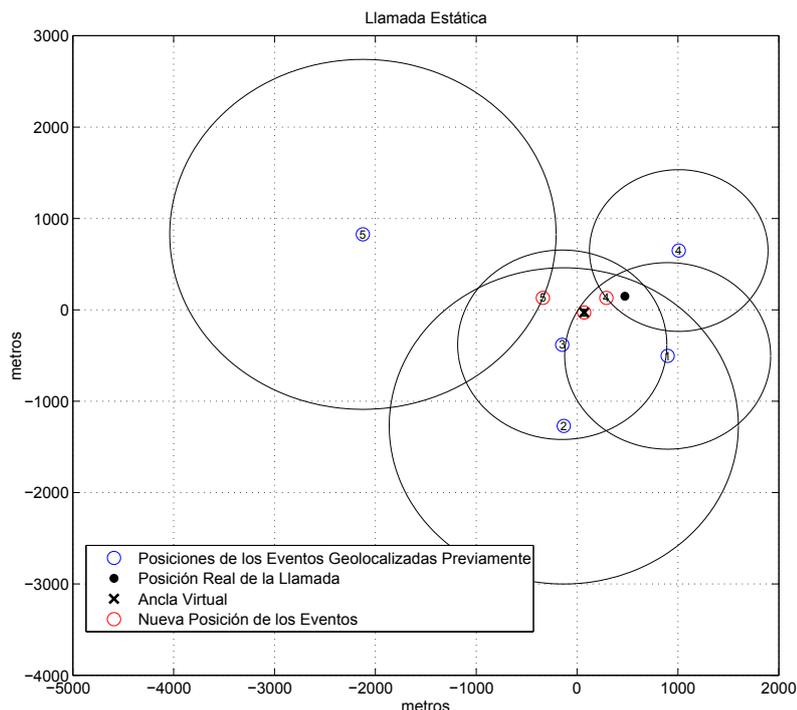


Figura 4.12: La imagen muestra una llamada estática simulada de la que se han geolocalizado cinco eventos. Cada evento representa el centro de la circunferencia que simboliza su intervalo de confianza al 95%. Entonces, el compresor fuerza la posición de los eventos 1, 2 y 3 hacia la posición del ancla virtual, ya que esta última cae dentro de las áreas de confianza de tales eventos. Por otro lado, los eventos 4 y 5 se quedan geolocalizados en el borde de sus intervalos de confianza.

4.4. Resultados

Los primeros resultados obtenidos están relacionados con cada uno de los métodos detallados en la Sección 4.2 para calcular los intervalos de confianza. El objetivo es **evaluar**

cómo de fiable es la estimación de error de cada método de geolocalización con respecto al error real cometido tras geolocalizar. Para llevar a cabo esta comprobación, Ericsson nos ha facilitado datos de *drive tests* de redes móviles 3G y 4G actualmente en funcionamiento. Estos resultados se resumen en la Tabla 4.7, donde se recogen los diferentes métodos evaluados junto al error medio real y estimado, esto es, el intervalo de confianza al 95 %. Asimismo, se ha calculado el porcentaje de eventos que han sido posicionados con un error superior al estimado. Por otro lado, también se han incluido representaciones gráficas de las comparativas de cada método en la Fig.4.13, la Fig.4.14, la Fig.4.15, la Fig.4.16, la Fig.4.17, y la Fig.4.18.

Tabla 4.7: Comparativa entre los intervalos de confianza calculados y los errores reales cometidos en diferentes métodos de geolocalización.

Método (Tecnología)	Error medio estimado (metros)	Error medio real (metros)	% eventos fuera del IC
Centroide (3G)	1034 m	383 m	10 %
Propagation Delay (3G)	621 m	412 m	13 %
Timing Advance (LTE)	944 m	738 m	14 %
AOA (LTE)	282 m	140 m	0 %
OTDOA - Red Síncrona (3G)	946 m	155 m	0 %
OTDOA - Red Asíncrona (3G)	1129 m	211 m	0 %

En primer lugar, se observa que el **centroide** devuelve un 10% de posiciones con más error que el estimado. El intervalo de confianza estaba calculado al 95 %, por lo que, siendo estrictos, hay un 5 % de eventos por encima de lo esperado. No obstante, hay que tener presente que los resultados provienen de una muestra de eventos pequeña, probablemente no suficiente para alcanzar un valor estadístico estable, ya que solamente se pueden usar aquellos datos con *drive test* asociado. Por tanto, se puede asumir que, a la vista de los resultados, el cálculo del IC del centroide se ajusta bastante bien a lo especificado.

En segundo lugar, los métodos basados en **medidas temporales**, véase PD y TA, ofrecen valores medios de error real y estimado muy próximos entre sí. De hecho, si se examinan la Fig.4.14 y la Fig.4.15, se observa que son los métodos donde el IC se aproxima y sigue con más precisión al error real. Es cierto que el porcentaje de eventos fuera del IC ronda el 14 %, pero las gráficas indican que, en la mayor parte de estas ocasiones, los desbordes son solamente de escasas decenas de metros. Por consiguiente, se puede afirmar que los resultados están aproximadamente en un rango acorde a lo esperado.

Después, el error del **ángulo de llegada** también presenta una ajustada estimación, consiguiendo incluso que ningún evento la sobrepase, tal y como ilustra la Fig.4.16. El inconveniente de este método es que hay pocos eventos geolocalizados con él, ya que las condiciones

4.4 Resultados

para aplicarlo son más severas. En cualquier caso, los resultados son prometedores y parecen ir en la dirección correcta.

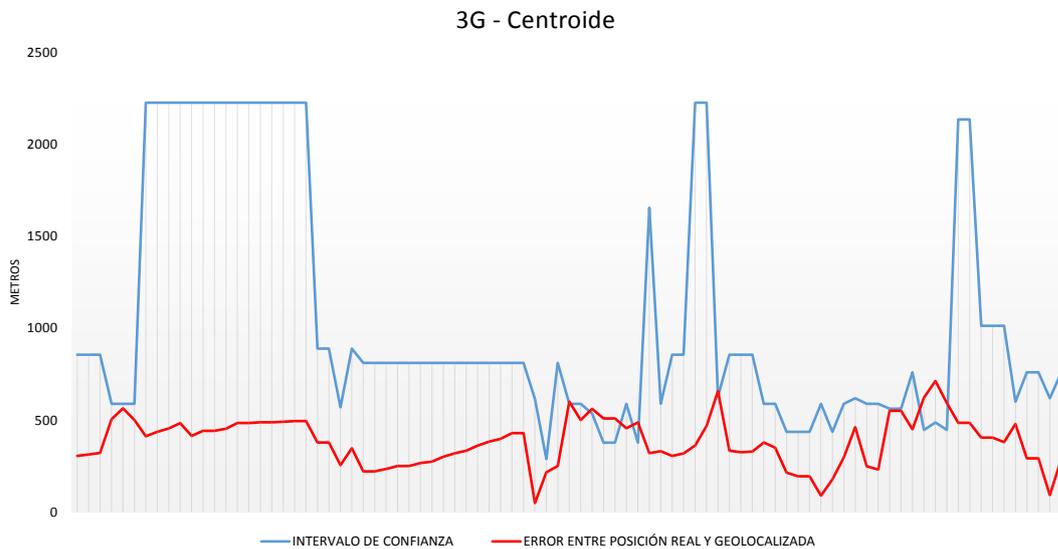


Figura 4.13: Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método del centroide, donde cada referencia del eje x es un evento geolocalizado.

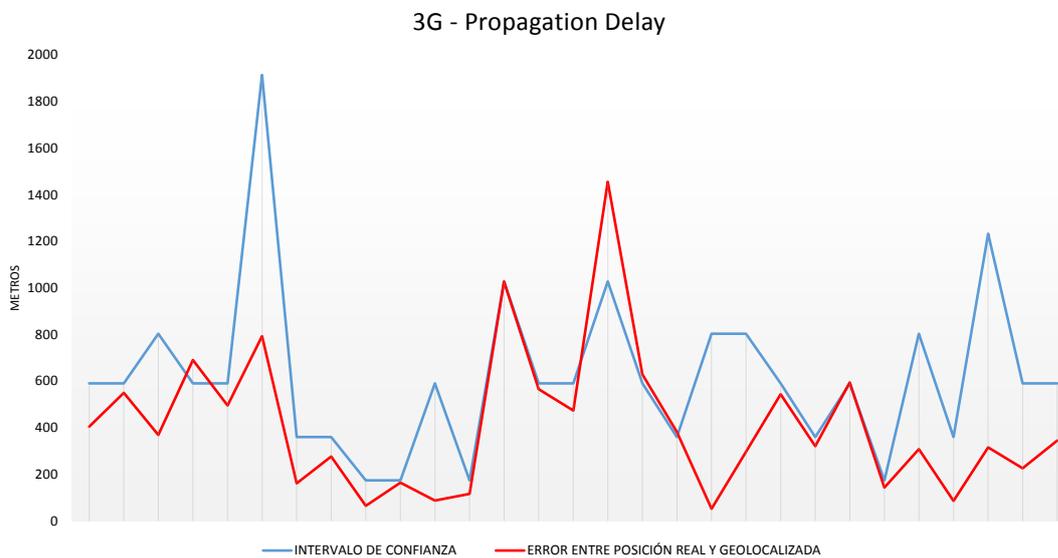


Figura 4.14: Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método del propagation delay, donde cada referencia del eje x es un evento geolocalizado.

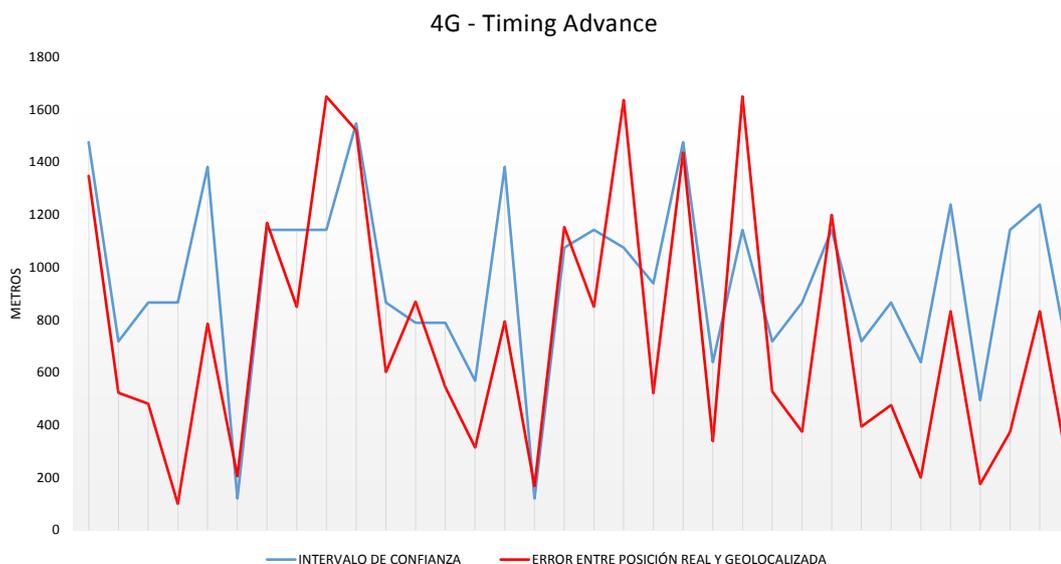


Figura 4.15: Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método del timing advance, donde cada referencia del eje x es un evento geolocalizado.

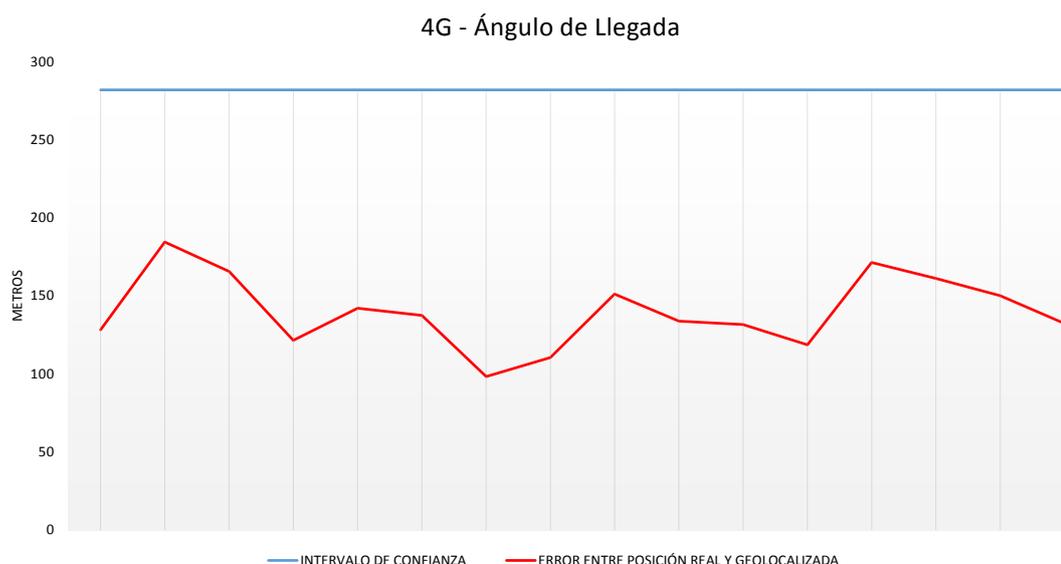


Figura 4.16: Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método del ángulo de llegada, donde cada referencia del eje x es un evento geolocalizado.

Por último, en los **métodos hiperbólicos** se evidencia cierto sobredimensionamiento en los cálculos del intervalo de confianza. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estos métodos de geolocalización son los más variables e inestables porque dependen mucho del tipo de red móvil y de cómo esté configurada. La sincronización entre Nodos B puede ser cons-

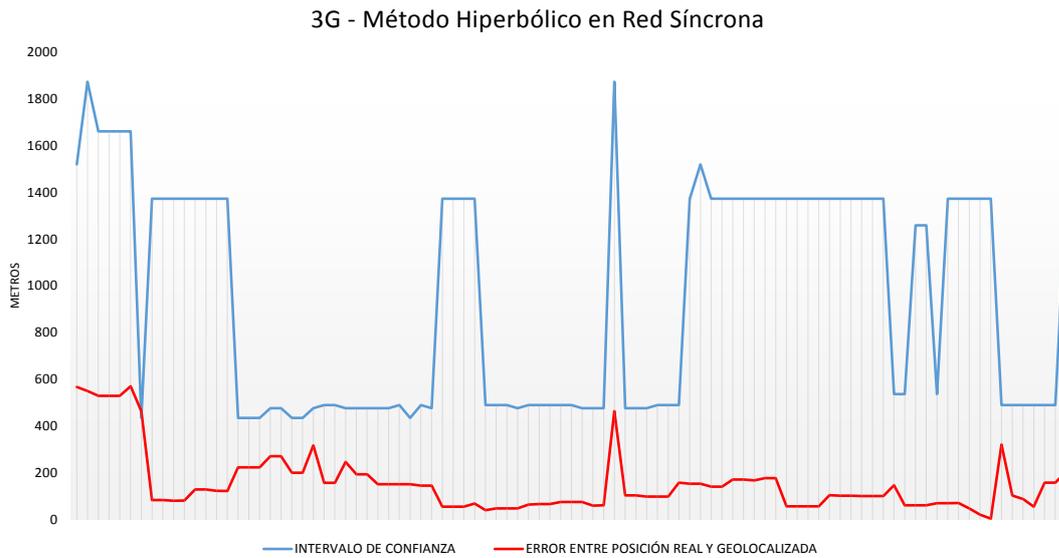


Figura 4.17: Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método hiperbólico en una red síncrona, donde cada referencia del eje *x* es un evento geolocalizado.

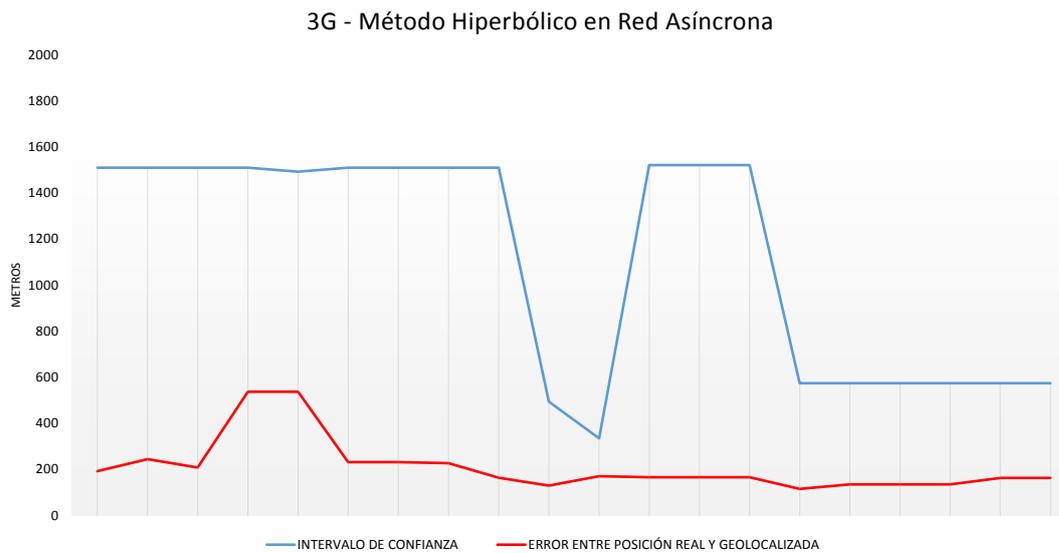


Figura 4.18: Comparativa entre el intervalo de confianza y el error real cometido por el método hiperbólico en una red asíncrona, donde cada referencia del eje *x* es un evento geolocalizado.

tante o variar rápidamente a lo largo del tiempo, y las medidas pueden contener importantes errores debido al multitrayecto cuando el entorno es desfavorable. Estas variables difíciles de predecir provocan que el error estimado sea alto, ya que se tiende a pensar en el caso

peor. De cualquier modo, se ha logrado que ningún evento geolocalizado por estos métodos tenga un error mayor que su estimación. De nuevo, resaltar que el intervalo de confianza se muestra como una cota superior de error, tal y como se refleja de manera sintetizada en la Tabla 4.7. Por tanto, esta medida aporta un indicio de la confianza que pueden dar estas técnicas, ya que un intervalo de confianza bajo implica una medida muy fiable, y viceversa.

El siguiente punto es ver los resultados del procedimiento completo, es decir, la precisión punto a punto (evento a evento) que se consigue a la salida del **compresor**. Para ello, se han obtenido, tanto para 3G como LTE, dos funciones de distribución acumulada (CDF) que representan el error de localización de los eventos antes y después de aplicar el compresor. Estas funciones se presentan en la Fig.4.19 y la Fig.4.20. Asimismo, cabe también apuntar que el resultado etiquetado como "Sin Compresor" sería la referencia que ofrece la herramienta de Ericsson.

La primera gráfica (Fig.4.19) hace referencia a una red 3G, y muestra una evidente ganancia en precisión gracias al compresor. **En el 50 percentil se logra una mejora de 80 metros, mientras que en el 80 percentil se llega hasta los 150 metros.**

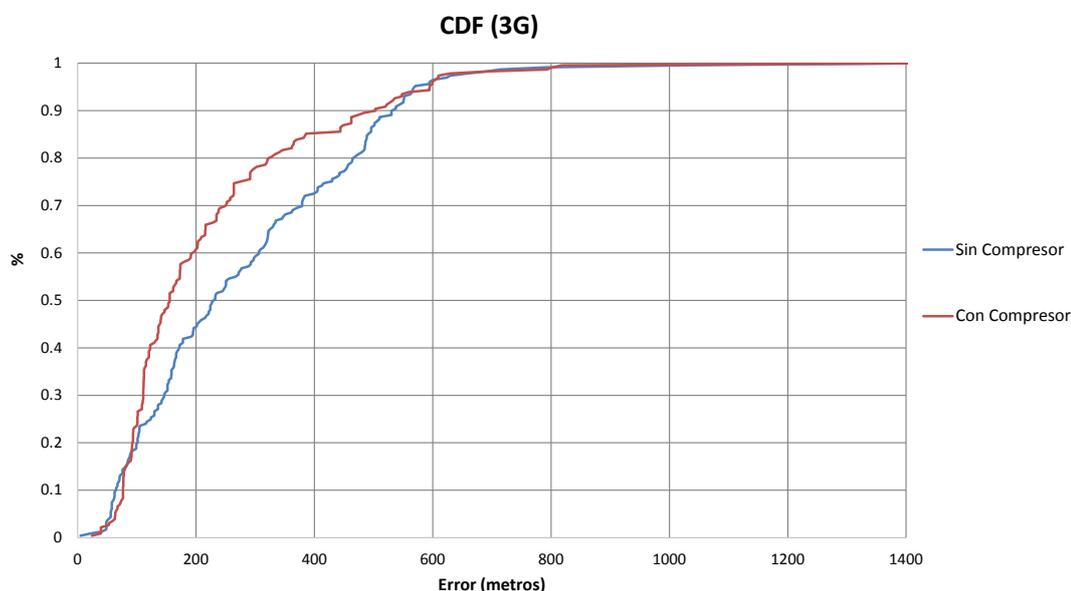


Figura 4.19: CDFs del error cometido al geolocalizar antes y después de aplicar el compresor en una red 3G [I].

Por otro lado, en la segunda gráfica (Fig.4.20) se ha querido evaluar el rendimiento del compresor únicamente sobre las llamadas estáticas de una red LTE. En principio, el compresor debería tener más potencial para este tipo de llamadas, puesto que se elimina la deriva ocasionada por el movimiento del usuario. Casi todos los eventos de una llamada estática están confinados en un área muy pequeña, lo que implica que, si se consideran sus posiciones como la misma, se tiene una mayor redundancia, algo que, como se ha ido mostrando a lo largo de esta tesis, favorece la eliminación de incertidumbres (en este caso, incertidumbre

del movimiento asociado a una llamada dinámica). De hecho, esta premisa se corrobora con los resultados, ya que se han alcanzado hasta **275 metros de mejora en el 50 percentil**.

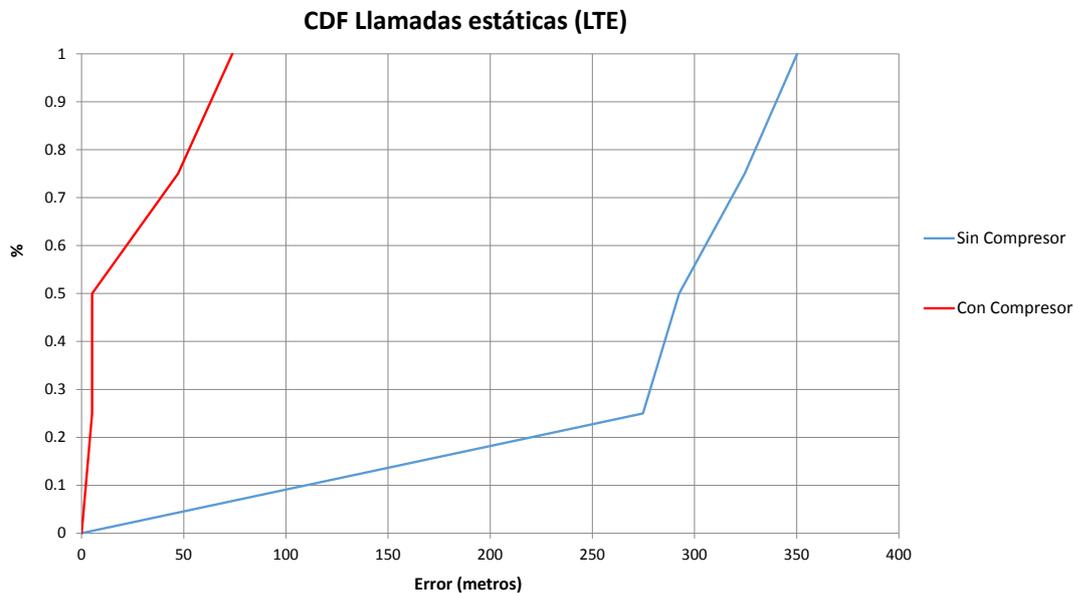


Figura 4.20: CDFs del error cometido al geolocalizar antes y después de aplicar el compresor sobre llamadas estáticas en una red LTE [I].

4.5. Conclusiones

Como observación final, en este capítulo se ha propuesto la inclusión de una etapa que puede refinar la estimación de la posición dada por los métodos básicos de geolocalización. Esta etapa se basa en el conocimiento del área de incertidumbre definida por el intervalo de confianza asociado a cada evento. El intervalo de confianza es calculado una vez, y los datos se almacenan en diferentes tablas de búsqueda en una base de datos. En este sentido, se asegura alta independencia con la topología de la red y acceso inmediato a las tablas de búsqueda sin necesidad de operaciones matemáticas adicionales.

La información proveída por el intervalo de confianza es, al fin y al cabo, una estimación del límite superior del error esperado al geolocalizar. Esta estimación se usa posteriormente para desplazar las posiciones estimadas de los eventos a nivel de llamada. Previamente, las llamadas dinámicas deben ser fragmentadas para asegurar la independencia con el movimiento, es decir, dividir una llamada dinámica en pequeñas llamadas estáticas. Así pues, se obtiene un ancla virtual combinando la estimaciones previas de los eventos y las correspondiente estimaciones de error. Seguidamente, y según la posición del ancla virtual con respecto al área de certidumbre de cada evento, el evento es desplazado a la misma posición del ancla virtual o al borde de su área de incertidumbre.

Los resultados logrados con datos reales confirman una notable mejora en la precisión punto a punto gracias al compresor, tanto en redes 3G como LTE. Además, el rendimiento apenas se ve degradado en términos de tiempo de cómputo, ya que las tablas de búsqueda están calculadas con anterioridad. En este aspecto, se ha evaluado la fiabilidad, fidelidad y certeza de los intervalos de confianza empleando datos reales de *drive tests*. Los resultados han sido, en general, muy positivos. La mayoría de las situaciones se han resuelto con una estimación de error ajustada al error real, pero manteniendo esa estimación por encima del error medido en la mayoría de los casos, tal y como se planteaba inicialmente con el uso del intervalo de confianza al 95 %.

No obstante, quedan también varios frentes abiertos con margen de mejora. Sobre todo, estos frentes aluden a los modelos empleados en los simuladores para obtener los intervalos de confianza de cada método. Estos modelos pueden optimizarse afinando algunas distribuciones y parámetros, e incluso incluir nuevas variables claves que tengan un impacto considerable en el resultado de la geolocalización. Es más, estas variables podrían también incluirse como parámetros de discriminación en las tablas de búsqueda. Por ejemplo, el centroide podría contemplar la geometría formada por los sites o emplear algún tipo de ponderación basada en el nivel de señal.

CONCLUSIONES

Este capítulo recoge las principales conclusiones alcanzadas con esta tesis. En primer lugar, la Sección 5.1 presenta las contribuciones más destacadas que se han derivado del trabajo desarrollado. Seguidamente, en la Sección 5.2 se apuntan algunas de las líneas de investigación futuras que pretenden ser la continuación de los resultados y conclusiones aquí obtenidos.

5.1. Principales contribuciones

La evolución de las comunicaciones móviles ha alcanzado un comportamiento exponencial en los últimos años. Las redes LTE no están todavía completamente desplegadas en muchas de las ciudades y, sin embargo, ya se habla de redes 5G. La demanda de tráfico de datos móviles no deja de crecer, y con ella la aparición de nuevos servicios que ofrecen todo tipo de ventajas y comodidades al usuario. De hecho, actualmente hay tantas suscripciones móviles como personas en el mundo. Resumiendo, las comunicaciones móviles se han convertido en uno de los motores de la sociedad. Y, al final, esta importancia se traduce en necesidad y en inversión por parte de las operadoras móviles.

Entre las tareas básicas e imprescindibles que estas operadoras tienen que llevar a cabo se encuentran la detección de problemas (*troubleshooting*), la optimización y la monitorización. Estas actividades requieren de información actualizada sobre el estado de la red móvil, de forma que los ingenieros puedan tomar las decisiones necesarias. El estado de la red puede venir dado por contadores, indicadores de rendimiento (KPIs), mapas, etc. Particularmente, los mapas geolocalizados son un recurso muy valioso, ya que ayudan a discernir visualmente todo tipo de problemas y comportamientos anómalos en la red de manera sencilla y rápida.

Por estos motivos, el objetivo de esta tesis era estudiar, analizar, proponer y desarrollar algoritmos avanzados de geolocalización en redes UMTS, las cuales son actualmente las redes más usadas y con mayor cantidad de usuarios. A su vez, este objetivo estaba también

promovido por la empresa Ericsson, con la que se ha realizado una estrecha colaboración durante todo el desarrollo de la tesis. Ericsson dispone de una herramienta denominada TPS (*Trace Processing Server*) cuya función principal es procesar las trazas de llamadas de los usuarios para, posteriormente, generar diversos mapas geolocalizados. Por consiguiente, la idea era desarrollar nuevos algoritmos de geolocalización que pudieran ser verificados con datos reales proporcionados por Ericsson y, según los resultados, ser implementados directamente en TPS.

El primer punto de investigación estaba centrado en conseguir mapas visualmente más completos y consistentes sin perder de vista la precisión punto a punto. En ocasiones, los ingenieros se quejan cuando ven mapas geolocalizados poco poblados o que parecen incongruentes. De hecho, un mapa "bonito" puede vender más que un mapa que se ha generado pensando solamente en minimizar el error de precisión. La principal causa de esta situación es la geolocalización de los eventos como entes independientes, es decir, la utilización solamente de la información reportada por ese evento para estimar su posición. Por tanto, y en contraste con este tipo de estrategias, en el Capítulo 2 se ha desarrollado una herramienta híbrida de geolocalización.

El principio de funcionamiento de esta herramienta es la combinación de diversas fuentes de información para, conjuntamente, obtener las posiciones de todos los eventos de una llamada. Estos datos de entrada van desde los niveles de señal y retardo de propagación reportados en los eventos *Measurement Report* y *Radio Link Setup Request*, respectivamente, hasta información geográfica en forma de clutter, pasando por modelos teóricos de propagación de señal. Todo ello hace posible tener mayor variedad de elementos, que procesados de forma inteligente, otorgan una mejor localización final a los eventos. En cuanto a la herramienta, se ha desarrollado para ser utilizada de forma independiente, y está formada por distintos módulos que dependen secuencialmente entre sí, proporcionando cierto grado de flexibilidad al usuario. Así pues, los resultados obtenidos con datos reales han mostrado una mejora relevante con respecto a TPS, tanto de precisión como de visualización en los mapas. Concretamente, los mapas aparecen más cohesionados, más rellenos, y las CDFs de error han mejorado hasta centenas de metros. Estas ganancias han conducido a que algunas estrategias y planteamientos hayan sido, posteriormente, adaptados e integrados en TPS. Asimismo, y aunque la herramienta estaba principalmente enfocada a 3G, la mayoría de procedimientos desarrollados tienen aplicación directa en redes LTE.

Por otra parte, el método de geolocalización por excelencia en UMTS es el método OTDOA, también conocido como método hiperbólico. Partiendo de una red donde los Nodos B están sincronizados, este es el método que debería ofrecer mejor precisión con diferencia. Desgraciadamente, por defecto esta sincronización no es tal, y se requiere calcularla previamente para poder geolocalizar de esta forma. TPS utiliza una estrategia de grafos para la recuperación de la sincronización y, después, un método numérico para resolver el corte de las hipérbolas. Sin embargo, en algunos escenarios el resultado devuelto no es lo suficientemente bueno, sugiriendo que todavía existe margen de mejora.

En este sentido, el Capítulo 3 se ha dedicado a desarrollar una herramienta hiperbólica que recupere simultáneamente las sincronizaciones entre Nodos B y las posiciones de los

eventos. La idea de resolver el problema de forma simultánea ayuda a que todas las estimaciones empujen y tiendan al mismo tiempo hacia la solución correcta, incrementando la robustez y la convergencia del problema. De este modo, varios hitos relevantes se han logrado a raíz de esta investigación. Por un lado, el desarrollo de un método numérico iterativo propio basado en Levenberg-Marquardt que aumenta la estabilidad y rapidez de convergencia del método original. En segundo lugar, se ha hallado una geometría espacial óptima de sites que permite evitar la aparición de mínimos locales y, por consiguiente, mejorar la precisión general del método numérico. Otros procedimientos auxiliares, por ejemplo de filtrado, también han sido analizados y desarrollados con objeto de encontrar escenarios y medidas que maximicen la precisión final de la geolocalización. Finalmente, los resultados conseguidos se traducen en una mejora de más de 100 metros de precisión con respecto a TPS. De ahí que, desde Ericsson, se decidiese la traducción de la herramienta de código MATLAB a código JAVA para ser integrada como un módulo opcional en TPS.

En último lugar, señalar que la geolocalización de eventos como entes independientes se puede llevar a cabo por diferentes métodos, por ejemplo el ángulo de llegada (AOA) o el OTDOA. Asumiendo esta filosofía, tal y como hace TPS, se ha visto la posibilidad de ajustar posteriormente las posiciones estimadas de los eventos subiendo un nivel de abstracción, es decir, a nivel de llamada. Para ello, en el Capítulo 4, la idea ha sido calcular las regiones de confianza al 95% para algunos de los métodos de geolocalización más comunes, almacenando los resultados en tablas de base datos. Esto ha sido posible mediante el desarrollo e implementación de diversos simuladores en MATLAB, los cuales han generado estas tablas de búsqueda que dependen de diversos parámetros de la red móvil y del evento según el método. En otras palabras, disponer de estimaciones del error cometido permite usar técnicas para ajustar la posición de todos aquellos eventos que pertenecen a una misma llamada, ya que partimos de la premisa de que los reportes de la misma llamada tienen que producirse en una región espacial cercana. Por consiguiente, se ha propuesto el uso de un compresor de las posiciones estimadas de los eventos, siendo éstas pesadas por el error estimado o región de confianza. El objetivo es dar más importancia o peso a aquellos eventos que se espera tengan mayor precisión, y puedan ayudar a refinar la posición de otros eventos dentro de la misma llamada. Por supuesto, esta técnica distingue entre llamadas estáticas y dinámicas, de forma que no se perjudique la percepción de movilidad del usuario a nivel visual sobre el mapa. Con esto, los resultados logrados después de someter a los eventos a este procedimiento han mostrado una ganancia considerable de la precisión. Por ejemplo, en el caso de las llamadas estáticas se ha conseguido una mejora de hasta 275 metros. Asimismo, toda esta algoritmia fue implementada por nosotros en MySQL como parte del procesado básico de TPS, y actualmente forma parte de la etapa de geolocalización.

Resumiendo, el trabajo desarrollado en esta tesis ha estado fuertemente influido y ligado al mundo empresarial. Gran parte de las investigaciones se han centrado en aspectos claves a mejorar dentro de las herramientas de monitorización usadas por las operadoras móviles para conocer el estado de su red. De este modo, se ha logrado llevar el ámbito de la investigación a la práctica real, convirtiendo prototipos y simuladores en innovaciones de la herramienta de Ericsson.

5.2. Líneas futuras

Son varias las líneas futuras de investigación que se abren como resultado del trabajo llevado a cabo en esta tesis. Algunas de ellas vienen directamente ligadas a posibles mejoras en los algoritmos de geolocalización planteados, mientras que otras pueden ser consideradas como evoluciones propias de la geolocalización. Así pues, las propuestas son:

- Aprovechar el clutter para ajustar la posición de las llamadas en función a su movilidad. Concretamente, diseñando un algoritmo para catalogar de forma fiable las llamadas como estáticas o dinámicas, o siendo incluso más precisos, estimar la velocidad media del usuario; entonces, se puede recurrir al tipo de clutter para forzar las posiciones de los eventos a un determinado conjunto de píxeles. Por ejemplo, velocidades de vehículo deberían asociarse a píxeles con tipo de clutter "carretera".
- Analizar la posibilidad de emplear métodos hiperbólicos en redes LTE con objeto de aprovechar las técnicas desarrolladas para UMTS. Hasta fechas recientes, los eventos reportados en las trazas LTE de Ericsson, denominadas *Cell Trace Recording* (CTR), no parecen contener información sobre la diferencia de tiempos. Por tanto, no se ha podido utilizar el método OTDOA. Sin embargo, en las últimas versiones de RAN liberadas por Ericsson han aparecido nuevas funcionalidades que podrían permitir la activación de eventos que reportasen la información necesaria.
- Introducir una tercera dimensión en el problema de la multilateración hiperbólica. Hasta ahora, se ha asumido un modelo plano para calcular la intersección de las hipérbolas. La cuestión es que esto no es completamente cierto. La altura a la que están situadas las antenas influye en las medidas de tiempos que reportan los eventos, llegando a distorsionar las hipérbolas asociadas. De esta manera, se podría abrir una línea de investigación para analizar el problema OTDOA de forma tridimensional.
- Refinar los procedimientos que calculan las regiones de confianza acorde al método de geolocalización empleado. En los resultados de esta tesis se ha visto que, en general, las estimaciones de error obtenidas se aproximaban con bastante precisión a lo esperado. No obstante, también se ha visto que en algunos casos existían ciertas discrepancias que probablemente se deban a la necesidad de incluir otras variables que ayuden a ajustar aún más estos intervalos de confianza. Por ejemplo, en los métodos hiperbólicos se podría estudiar el efecto de añadir la dependencia con la topología espacial formada por los sites.
- Se ha observado que los eventos *Measurement Report* a veces reportan la localización exacta dada por el GPS del dispositivo móvil. Esto parece suceder cuando es una llamada de emergencia. Si bien es cierto que no es un caso muy frecuente, sí que se ha comprobado que se dispone de varios eventos de este tipo por ROP. Estos eventos, cuya localización la podemos conocer con exactitud, podrían ser utilizados como anclas o puntos de referencia para ajustar la posición de otros eventos. Por ejemplo, eventos que reporten condiciones radio similares podrían ser arrastrados a una zona cercana a la del evento con medida del GPS.

Bibliografía

- [1] C. A. Feijoo, “Una vía de doble sentido: Comunicaciones móviles y sociedad,” *Telos: Cuadernos de comunicación e innovación*, vol. 84, pp. 18–29, 2010.
- [2] “Ericsson mobility report,” Ericsson, Tech. Rep., Junio 2015. [Online]. Available: <http://www.ericsson.com/mobility-report>
- [3] Mobile technologies GSM. ETSI. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/gsm>
- [4] General packet radio service, GPRS. ETSI. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/gsm>
- [5] EDGE. ETSI. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/edge>
- [6] UMTS. 3GPP. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/Technologies/Keywords-Acronyms/article/umts>
- [7] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS*. John Wiley & Sons, 2002.
- [8] HSPA. 3GPP. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>
- [9] 3GPP. LTE. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/LTE>
- [10] “5G radio access,” Ericsson, Tech. Rep., Junio 2013. [Online]. Available: <http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-5g.pdf>
- [11] “Evolución del macro-sector de las telecomunicaciones en España 2012-2015,” Altran Iberia, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: <http://www.altran.es/fileadmin/medias/ES.altran.es/documents/Ecosistema/EvolucionTelecomunicaciones2012-2015.pdf>
- [12] (2014, Junio) IDC worldwide quarterly smart connected device tracker. IDC. [Online]. Available: <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS24935114>
- [13] (2015, Marzo) IDC worldwide quarterly smart connected device tracker. IDC. [Online]. Available: <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS25500515>
- [14] (2011, Octubre) Opportunity calling: The future of mobile communications. ORACLE. [Online]. Available: <http://www.oracle.com/us/industries/communications/oracle-communications-future-mobile-521589.pdf>
- [15] M. Duggan. (2013, Septiembre) Cell phone activities. Pew Research Internet Project. [Online]. Available: <http://www.pewinternet.org/files/old-media/Files/Reports/2013/>

PIP_Cell%20Phone%20Activities%20May%202013.pdf

- [16] J. Schiller and A. Voisard, *Location-Based Services*. Elsevier, 2004.
- [17] E. Gorrita, R. Sierra, and S. Montejo, “Aplicaciones y servicios basados en localización,” *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 3, no. 1, pp. 45–52, 2012.
- [18] 3GPP, “Functional stage 2 description of location services (LCS),” Technical Specification 23.271 - V11.3.0, 2014, (Release 11).
- [19] P. Bellavista, A. Küpper, and S. Helal, “Location-based services: Back to the future,” *IEEE Pervasive Computing*, vol. 7, pp. 85–89, 2008.
- [20] M. E. González-Cortés. (2009, Noviembre) Sistemas de localización en UMTS. Proyecto Fin de Carrera. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11844/>
- [21] J. Raper, G. Gartner, H. Karimi, and C. Rizos, “Applications of location-based services: a selected review,” *Journal of Location Based Services*, vol. 1, no. 2, pp. 89–111, Junio 2007.
- [22] H. Laitinen, S. Ahonen, S. Kyriazakos, J. Lähteenmäki, R. Menolascino, and S. Parkkila, “Cellular location technology,” CELLO Consortium, Tech. Rep., 2001. [Online]. Available: (<http://telecom.ntua.gr/cello>)
- [23] S. Horsmanheimo, H. Jormakka, and J. Lähteenmäki, “Location-aided planning in mobile network,” *Wireless Personal Communications*, vol. 30, pp. 207–216, 2004.
- [24] Planogeo. Plano. [Online]. Available: <http://www.plano-net.com/content/plano-geo.html>
- [25] AriesoGEO. Arieso. [Online]. Available: <http://www.arieso.com/>
- [26] TrueCall. Newfield Wireless. [Online]. Available: <http://www.newfieldwireless.com/our-products/truerecall/benefits>
- [27] TEMS. Ascom. [Online]. Available: <http://www.ascom.com/nt/en/index-nt/tems-products-3/tems-discovery-11.htm#overview>
- [28] Call trace geo-location systems. Celcite. [Online]. Available: <http://www.celcite.com/call-trace-geo-location-systems/index.html>
- [29] Ericsson RAN analyzer. Ericsson. [Online]. Available: <http://www.ericsson.com/ourportfolio/telecom-operators/ran-analyzer>
- [30] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, “Experimental assessment of a novel geolocation algorithm based on OTDOA technique in real UMTS networks,” *Journal of Automation and Control Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 435–441, October 2015.
- [31] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, “Efficient star-topology solving local minima for geolocation in real UMTS networks:

- An experimental assessment with real data,” *Wireless Personal Communications*, Jul 2015, doi: 10.1007/s11277-015-2895-z.
- [32] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, “Location of terminals in a communications network,” European Patent PCT/EP2014/054 875, 2014, Application Published. [Online]. Available: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2015135581>
- [33] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, “Método basado en multilateración para geolocalización y sincronización en redes UMTS,” in *XXIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Sep 2014.
- [34] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C. Úbeda, “Experimental assessment of a novel geolocation algorithm based on OTDOA technique in real UMTS networks,” in *International Conference on Communications and Network Engineering (ICCNE)*, Dic 2014.
- [35] A. H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, “Network-based wireless location,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, pp. 24–40, 2005.
- [36] A. Clarkson, S. McCallum, N. Solhjoo, and S. Velentzas, “Hybridised positioning algorithms in location based services,” in *Proceedings of the 1st Workshop on positioning, navigation and communication*, 2004.
- [37] A. Roxin, J. Gaber, M. Wack, and A. Nait-Sidi-Moh, “Survey of wireless geolocation techniques,” in *IEEE Globecom Workshops*, 2007.
- [38] A. M. Bernardos-Barbolla, J. A. Besada-Portas, and J. R. Casar-Corredera, *Tecnologías y Servicios para la Sociedad de la Información*, 2005, ch. Tecnologías de Localización: Fundamentos y Aplicaciones, pp. 12–45.
- [39] S. Mazuelas, F. A. Lago, D. González, A. Bahillo, J. Blas, P. Fernández, R. M. Lorenzo, and E. J. Abril, “Sistema de localización inalámbrica mediante mediciones de potencia sin calibración previa,” in *URSI*, 2008.
- [40] Nokia, “Background information about location services standardization,” ETSI, Tech. Rep., 1998. [Online]. Available: http://www.quintillion.co.jp/3GPP/GSM/SMG_27/tdocs/P-98-0728.pdf
- [41] *Las Telecomunicaciones y la Movilidad en la Sociedad de la Información*. División de Relaciones Corporativas y Comunicación de Telefónica I+D, 2005, ch. 20: Servicios y plataformas de localización, pp. 329–344. [Online]. Available: http://sociedadinformacion.fundacion.telefonica.com/docs/repositorio/es_ES/TelefonicaySI/Publicaciones/telecoymovilidad.pdf
- [42] A. Schmidt-Dannert, “Positioning technologies and mechanisms for mobile devices,” in *Seminar Master Module SNET2*, 2010.

- [43] Y. R. Hamdy and S. A. Mawjoud, "Assessment of uplink time difference of arrival (U-TDOA) position location method in urban area and highway in Mosul City," *Al-Rafidain Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 54–65, April 2013.
- [44] Openclipart. [Online]. Available: www.openclipart.org
- [45] 3GPP, "Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Evaluation of the inclusion of path loss based location technology in the UTRAN," Technical Specification 25.907 - V9.0.1, 2010, (Release 9).
- [46] J. Borkowski and J. Lempiäinen, "Practical network-based techniques for mobile positioning in UMTS," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2006, pp. 1–15, 2006.
- [47] P. S. Maher, "Fingerprint location methods using ray-tracing," Ph.D. dissertation, The University of New South Wales, 2010.
- [48] A. Küpper, *Location-Based Services: Fundamentals and Operation*. John Wiley & Sons, 2005.
- [49] S. Ahonen and H. Laitinen, "Database correlation method for UMTS location," in *57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference*, 2003.
- [50] M. Keski-Heikkilä. (2002, Febrero) End-user location in digital mobile networks. [Online]. Available: http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/reports/Mika_End_user_location_in_cellular_systems%20.pdf
- [51] J. Borowski, J. Niemelä, and J. Lempiäinen, "Performance of cell ID+RTT hybrid positioning method for UMTS radio networks," in *The 5th European Wireless Conference Mobile and Wireless Systems beyond 3G*, February 2004, pp. 24–27.
- [52] M. Abo-Zahhad, S. M. Ahmed, and M. Mourad, "Hybrid uplink-time difference of arrival and assisted-GPS positioning technique," *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 5, no. 6, pp. 303–312, 2012.
- [53] A. N. Bishop, B. Fidan, K. Doğançay, B. D. O. Anderson, and P. N. Pathirana, "Exploiting geometry for improved hybrid aoa/tdoa-based localization," *Signal Process.*, vol. 88, no. 7, pp. 1775–1791, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2008.01.015>
- [54] L. Cong and W. Zhuang, "Hybrid TDOA/AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems," *IEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, pp. 439–447, 2002.
- [55] D. Gundegard, A. Akram, S. Fowler, and H. Ahmad, "Cellular positioning using fingerprinting based on observed time differences," in *International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT)*, vol. 1, 2013, pp. 1–5.
- [56] A. Yassine, Y. Nasser, M. Awad, and B. Uguen, "Hybrid positioning data fusion in heterogeneous networks with critical hearability," *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking*, p. 215, 2014. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/>

- ejwcn/ejwcn2014.html#YassineNAU14
- [57] 3GPP, “UTRAN Iub interface Node B application part (NBAP) signalling,” Technical Specification 25.433 - V12.5.0, 2015, (Release 12).
- [58] C. Johnson, *Radio Access Networks for UMTS: Principles and Practice*. John Wiley & Sons, 2011.
- [59] Free online asn.1 decoder. Marben. [Online]. Available: <http://www.marben-products.com/asn.1/services/decoder-asn1.html>
- [60] 3GPP, “Universal mobile telecommunications system (UMTS); physical layer; measurements (FDD),” Technical Specification 25.215 - V12.1.0, 2015, (Release 12).
- [61] Calculate distance, bearing and more between latitude/longitude points. Movable. [Online]. Available: <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- [62] *LTE L14 Radio Network Design*, Ericsson AB 2014 ed., Ericsson, Student Book LZT1381002 R2A.
- [63] Okumura-hata. [Online]. Available: <https://www.xirio-online.com/help/es/okumurahata.html>
- [64] F. Gunnarsson, M. Johansson, A. Furuskar, M. Lundevall, A. Simonsson, C. Tidestav, and M. Blomgren, “Downtilted base station antennas - A simulation model proposal and impact on HSPA and LTE performance,” in *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, Sept 2008, pp. 1–5.
- [65] G-NetTrack. Gyokov Solutions. [Online]. Available: <http://www.gykovsolutions.com/G-NetTrack%20Android.html>
- [66] G-NetTrack (y otras herramientas) para prueba y monitoreo de 2G-3G-4G GSM-UMTS-LTE. telecomHall ES. [Online]. Available: <http://www.telecomhall.com/es/g-nettrack-y-otras-herramientas-para-prueba-y-monitoreo-de-2g-3g-4g-gsm-umts-lte.aspx>
- [67] 3GPP, “Stage 2 functional specification of user equipment (UE) positioning in UTRAN,” Technical Specification 25.305 - V6.1.0, 2003, (Release 1999).
- [68] Y. Zhao, “Standardization of mobile phone positioning for 3G systems,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 40, no. 7, pp. 108–116, Jul 2002.
- [69] SnapTrack, a Qualcomm company, “Location technologies for GSM, GPRS and UMTS networks,” White Paper, 2003.
- [70] R. Saadane, M. Belkasm, M. El Koutbi, and M. Dadda, “Evaluation of hybrid geolocation based on UMTS and GPS technologies,” in *2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, May 2012, pp. 62–66.
- [71] J. P. Vanderspool II, “Method for calculating a location of a remote unit utilizing observed time difference (OTD) and real time difference (RTD) measurements.” U.S. Patent, 2000, US Patent 6,108,558. [Online]. Available:

<https://www.google.com/patents/US6108558>

- [72] C. Mensing and S. Plass, "Positioning algorithms for cellular networks using TDOA," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 4, 2006, pp. 513–516.
- [73] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Positioning using time-difference of arrival measurements," in *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03). 2003 IEEE International Conference on*, vol. 6, April 2003, pp. VI–553–6 vol.6.
- [74] J. Stefanski, "Simplified algorithm for location service for the UMTS," in *Vehicular Technology Conference*, vol. 4, 2005, pp. 2741–2744.
- [75] J. Stefanski, "Low cost method for location service in the WCDMA system," *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, vol. 14, pp. 626–634, 2012.
- [76] C. Úbeda, J. Romero, and J. Ramiro, "Evaluation of a time-delay based geolocation algorithm in real UMTS networks," in *Fifth International Conference on Broadband and Biomedical Communications (IB2Com)*, 2010, pp. 1–4.
- [77] V. Loscri, E. Natalizio, E. Viterbo, D. Mauro, G. D'Aquila, and G. Brasili, "Carrier independent localization techniques for gsm terminals," in *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008.*, Sept 2008, pp. 1–5.
- [78] 3GPP, "Synchronization in UTRAN stage 2," Technical Specification 25.402 - V11.0.0, 2012, (Release 11).
- [79] R. K. Rao and G. Radhamani, *WiMAX: A Wireless Technology Revolution*. CRC Press, 2007.
- [80] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Mobile positioning using wireless networks: possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements," *IEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, pp. 41–53, 2005.
- [81] C. G. Argos. (2003) Apuntes de métodos numéricos. [Online]. Available: <http://www.telecos-malaga.com/descargas/apuntes/2Curso/MN/MN-Apuntes.pdf>
- [82] S. M. Goñi and R. H. Mascheroni. (2013) Notas sobre sistemas de ecuaciones algebraicas no-lineales. [Online]. Available: http://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/Q0808/descargar.php?secc=0&id=Q0808&id_inc=11794
- [83] Y. Chan and K. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 8, pp. 1905–1915, Aug 1994.
- [84] J. Roa, A. Jiménez, F. Seco, J. Prieto, and J. Ealo, "Optimal placement of sensors for trilateration: Regular lattices vs meta-heuristic solutions," in *Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2007*, ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2007, vol. 4739, pp. 780–787. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-75867-9_98

- [85] E. W. Weisstein. Hyperbola. Wolfram. [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/Hyperbola.html>
- [86] J. A. García-Fernández, A. Jurado-Navas, M. Fernández-Navarro, and C.Úbeda, “A comparative study between iterative algorithms for TDOA based geolocation techniques in real UMTS networks,” July 2015, submitted for publication.
- [87] P. Kenington and N. Randell, “Method and apparatus for geolocating a wireless communication unit,” Jan. 28 2015, EP Patent App. EP 20,130,154,703. [Online]. Available: <https://www.google.co.in/patents/EP2626719A3?cl=en>
- [88] D. Dupray, F. LeBlanc, C. Karr, and S. Goldberg, “Locating a mobile station and applications therefor,” Mar. 31 2015, US Patent 8,994,591. [Online]. Available: <http://www.google.com/patents/US8994591>
- [89] C. Karr, F. LeBlanc, and D. Dupray, “Locating a mobile station using a plurality of wireless networks and applications therefor,” Oct. 4 2005, US Patent 6,952,181. [Online]. Available: <http://www.google.com/patents/US6952181>
- [90] P. Soma, P. Boyer, and R. Mia, “Time and power based wireless location and method of selecting location estimate solution,” Feb. 18 2014, US Patent 8,655,377. [Online]. Available: <http://www.google.com/patents/US8655377>
- [91] Un ejemplo de construcción de un intervalo de confianza. Universidad de Barcelona. [Online]. Available: <http://www.ub.edu/stat/GrupsInnovacio/Statmedia/demo/Temas/Capitulo8/B0C8m1t3.htm>
- [92] Intervalo de confianza. Wikipedia. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo_de_confianza
- [93] Student’s t-distribution. Wolfram. [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/Studentst-Distribution.html>
- [94] N. Deblauwe, *GSM-Based positioning: techniques and applications*. ASP/VUBPRESS/UPA, 2008, pp. 148–151.