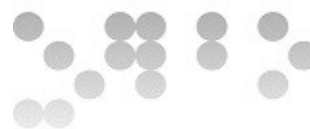


# *Posicionamiento indoor mediante fingerprinting usando el campo magnético, para el Hospital Parc Taulí de Sabadell*

Proyecto Final de Máster  
21 de junio de 2016

Director del trabajo de investigación: Dr. Antoni Pérez Navarro  
Realización del trabajo de investigación: Antonio Ortega González



## Índice

<b>1 TÍTULO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 AUTORES.....</b>	<b>1</b>
<b>3 RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>4 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>5 ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>4</b>
5.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES WiFi.....	4
5.2 CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.....	6
5.3 FASES DEL PROCESO.....	7
5.4 OBTENCIÓN DE HUELLAS.....	8
5.5 ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN.....	8
<b>6 METODOLOGÍA.....</b>	<b>11</b>
6.1 INFRAESTRUCTURA EMPLEADA.....	12
6.2 CAPTURA DE DATOS.....	17
6.3 MUESTREO DE CUADRÍCULAS.....	20
6.4 MUESTREO DE RECORRIDOS.....	21
6.5 CÁLCULO DE HUELLAS.....	22
6.6 EL ALGORITMO K-NN.....	23
6.7 ESTIMACIÓN DEL GRADO DE ACIERTO.....	23
<b>7 EXPERIMENTACIÓN.....</b>	<b>25</b>
7.1 CARACTERIZACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO.....	25
7.2 EXPERIMENTOS SOBRE LA FRECUENCIA DE MUESTREO.....	29
7.3 LOCALIZACIÓN DE CELDAS EN CUADRÍCULAS.....	35
7.3.1 <i>Estimación de la posición mediante la media, mediana y moda.....</i>	35
7.3.2 <i>Extensión del tamaño de la cuadrículas.....</i>	40
7.4 EXPERIMENTOS CON RECORRIDOS.....	42
7.4.1 <i>Comparación de recorridos con cuadrículas.....</i>	43
7.4.2 <i>Uso del sensor del acelerómetro.....</i>	54
<b>8 CONCLUSIONES.....</b>	<b>59</b>
<b>9 SIGLAS.....</b>	<b>63</b>
<b>10 REFERENCIAS.....</b>	<b>64</b>



## 1 Título

Posicionamiento indoor mediante fingerprinting usando el campo magnético, para el Hospital Parc Taulí de Sabadell.

## 2 Autores

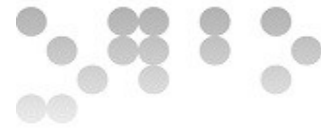
- Director del trabajo de investigación: Dr. Antoni Pérez Navarro ([aperezn@uoc.edu](mailto:aperezn@uoc.edu)).
- Realización del trabajo de investigación: Antonio Ortega González ([aortegagonz@uoc.edu](mailto:aortegagonz@uoc.edu)).

## 3 Resumen

La tecnología GPS ha conseguido resolver el problema de la localización en espacios exteriores, pero no es aplicable en el interior de los edificios, cañones naturales o urbanos, etc. Ante esta situación han surgido numerosas alternativas que pretenden solucionar el problema en estos entornos, y una de las que presenta un mayor estado de madurez es la denominada WiFi fingerprinting, que aunque en determinados espacios permite obtener resultados precisos, requiere de la existencia de una infraestructura de puntos de acceso.

Existen determinados entornos en los que esta infraestructura es inviable, hecho que ha animado a algunos colectivos a investigar nuevas tecnologías que no requieran de una infraestructura específica. En este sentido, la localización basada en la detección de las alteraciones del campo magnético terrestre producidas por los elementos estructurales de los espacios cerrados se presenta como una de las más prometedoras, pero no es aplicable en cualquier entorno, ya que depende de factores como los materiales empleados en su construcción o la distribución de elementos metálicos en su interior.

En este proyecto se han implementado algunas herramientas para poder medir y analizar la forma en la que se producen estas alteraciones, con objeto de determinar la viabilidad de implantar un sistema de estas características en el Hospital Parc Taulí de Sabadell. Se analizan algunas de las dificultades que se pueden presentar y se plantea un método para construir un mapa de campos magnético que pueda servir de base para un sistema de localización.



## 4 Introducción

Desde hace algunos años se ha podido observar como el fenómeno de la localización se ha ido convirtiendo en una necesidad para nuestra sociedad. Con la proliferación de los satélites espaciales y el uso de la tecnología GPS surgieron multitud de funcionalidades (como la conducción asistida o la orientación en rutas de montaña) que hoy en día se han convertido en cotidianas, pero que hace no demasiado tiempo parecían más propias de la ciencia ficción.

La proliferación de los teléfonos móviles inteligentes que integran de forma masiva sistemas como el GPS, WiFi e incluso sensores de movimiento han facilitado enormemente la localización, ya que hoy en día ya no es necesario adquirir hardware específico para detectar nuestra posición en cualquier parte del mundo con una precisión bastante aceptable.

Sin embargo, cuando nos encontramos en entornos cerrados (comúnmente conocidos como entornos indoor o entornos de interior) los sistemas actuales no son capaces de recibir las señales GPS y por tanto los procesos de localización de los que disponemos no son aplicables.

Este trabajo de investigación surgió con el objetivo inicial de implantar un sistema de reconocimiento basado en WiFi fingerprinting, pero tras una fase inicial de estudio de esta tecnología se comprobó que el Hospital no disponía de la infraestructura de puntos de acceso indispensables para su puesta en funcionamiento, así que se planteó la necesidad analizar la viabilidad de utilizar una tecnología diferente, optando finalmente por el uso del campo magnético terrestre.

En el apartado 5 se plantea el estado del arte actual sobre la localización en interiores basada en fingerprinting, se estudian algunos de los aspectos más destacados sobre la localización mediante WiFi fingerprinting, ya que es un sistema que en la actualidad goza de cierta madurez y ha sido implantado en casos reales, poniendo especial atención en aquellos aspectos que se han considerado que pueden ser extrapolables a la tecnología de campos magnéticos. Se analizan los problemas que han surgido en estudios previos sobre el uso del campo magnético para la localización en interiores, y las posibles soluciones planteadas.

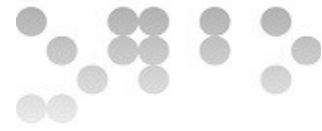
El apartado 6 se centra en la metodología empleada a lo largo del proyecto, cubriendo aspectos sobre la creación de herramientas software diseñadas durante las fases iniciales, y sobre el proceso de experimentación llevado a cabo para estudiar las características



específicas del campo magnético en el entorno seleccionado para las pruebas.

Los experimentos realizados se detallan en el apartado 7, donde se analizan de forma cuantitativa alguno de los aspectos que hemos considerado más importantes de los datos tomados sobre el terreno con las herramientas desarrolladas para ello en la fase inicial del proyecto.

Finalmente, en el apartado 8 se plantean las conclusiones a las que se han llegado tras la fase de experimentación, con el enfoque de plantear en un futuro la construcción de mapas del campo magnético del hospital que pudieran ser susceptibles de explotación como base para un sistema de localización.



## 5 Estado del Arte

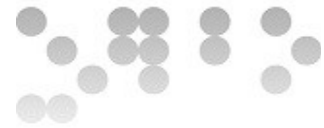
En un análisis de las líneas de investigación abiertas en los últimos 15 años se puede observar que se ha intentado resolver el problema de la localización en interiores sustituyendo la tecnología GPS por otras muchas tales como las basadas en infrarrojos, ultrasonidos, radiofrecuencia, visión, o sonido audible. En [14] se dispone de un análisis de estas tecnologías donde se puede observar que todas ellas presentan algunos inconvenientes a los que aún no se les ha podido dar solución, por ejemplo, algunos necesitan de un hardware adicional costoso, otros presentan características inasumibles como la necesidad de tener línea de visión directa (LOS) hacia los emisores y en la mayoría de los casos se requieren una serie de cálculos muy complejos que imposibilitan una localización en tiempo real o con un consumo energético aceptable. Por ejemplo, los sistemas basados en ToA, TdoA o DoA requieren de cálculos computacionalmente costosos como la triangulación o la trilaterización hiperbólica.

Uno de los sistemas en el que los investigadores están poniendo más interés recientemente es el denominado WiFi Fingerprinting, que básicamente consiste en obtener previamente mediciones de la señales WiFi que llegan en diferentes localizaciones y almacenarlas en una base de datos. De esta forma la localización se reduce a un problema de búsqueda de patrones, ya que dada una localización cuya posición desconocemos podemos volver a tomar medidas sobre las señales WiFi y buscar en la base de datos aquella que más se asemeje para estimar nuestra posición. Sin embargo esta tecnología no siempre es viable, ya que hay entornos en los que no se ha implantado una infraestructura de puntos de acceso WiFi (ya sea por cuestiones de seguridad o por evitar interferencias con otros aparatos)

En los siguientes apartados se va a estudiar la posibilidad de adaptar las técnicas desarrolladas para WiFi fingerprinting, pero usando mediciones del campo magnético terrestre en lugar de la intensidad de las señales WiFi.

### 5.1 Características de las señales WiFi

La base de las técnicas de WiFi Fingerprinting es la captura en una determinada posición de la intensidad de las señales procedentes de los routers y puntos de acceso cercanos. En [8] se recalca la importancia de conocer en profundidad las características de estas señales como



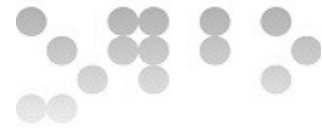
paso previo a cualquier estudio que intente construir un modelo en base a estas medidas. De este análisis se podrían extraer cuatro aspectos importantes para nuestra área de estudio:

1. Las señales WiFi presentan un nivel de fluctuación muy alto, que hacen recomendable utilizar valores como la media de las RSSI en lugar de muestras independientes.
2. Desde un punto de vista estadístico las señales se comportan de forma similar a una función normal logarítmica, sin embargo algunos factores como la reflexión, la refracción o la dispersión producen ciertos sesgos y afectan considerablemente a la desviación estándar.
3. La presencia de personas durante la toma de medidas produce sensibles atenuaciones en la señal, atenuación que además es difícil predecir, ya que en ella influyen otros factores como la orientación de los receptores hacia los puntos de acceso.
4. Las señales también pueden variar en función del momento en el que se tomen, ya que pueden aparecer interferencias originadas por aparatos que realicen emisiones electromagnéticas o incluso por la mayor o menor presencia de personas en el entorno a lo largo del día.
5. Como aspectos positivos se podría recalcar que gracias a las características específicas del protocolo IEEE 802.11, en entornos con múltiples puntos de acceso no suelen presentarse interferencias significativas entre las distintas señales, ni siquiera cuando se comparten los canales de emisión, aunque esto solo es cierto cuando el receptor se encuentra cerca de los emisores.

De todo lo anterior se deducen dos ideas fundamentales:

Junto a la intensidad de las señales RSSI puede ser recomendable tomar otros valores como la orientación del dispositivo de medida o la hora en la que se realiza la medición. Este aspecto aparece reflejado en otros estudios como [5].

Parece recomendable filtrar los puntos de acceso a utilizar para la localización, ya que la información de alguno de ellos (sobre todo los más lejanos) puede considerarse como una interferencia. Algunos detalles sobre este aspecto aparecen en [4],[5],[6],[9].



## 5.2 Características del campo magnético terrestre

Una de las principales diferencias del uso del campo magnético respecto al WiFi consiste en la existencia de un solo emisor (que consideramos como el centro de la tierra), así que lo que se van a medir son las fluctuaciones que en cada localización producen los elementos metálicos que componen las estructuras de los edificios, así como otros elementos eléctricos (como ascensores o máquinas expendedoras)

Estudios como [3],[7] demuestran dos características muy importantes del campo magnético en interiores, la estacionalidad temporal y la repetibilidad de las medidas, es decir, que el campo magnético en una posición elegida de forma aleatoria en el interior de un edificio se mantiene prácticamente estable a lo largo del tiempo, y que además la repetición de las medidas devuelve resultados similares. Otros estudios como [2],[3] prueban que los resultados son similares incluso con diferentes dispositivos móviles. También se observa que la presencia humana no afecta a las medidas del campo magnético.

Pero el principal problema con el que nos encontramos es el de la variabilidad local, es decir, que se obtienen medidas similares del campo magnético en puntos diferentes. Para sortear este problema algunos estudios ([7],[11]) recurren a técnicas como el modelo Monte Carlo (MCL), que una vez seleccionadas las huellas más similares escoge aquella que tiene más probabilidad de ser el siguiente punto dentro de un recorrido lógico del objetivo a localizar. En [12] se opta por Hidden Markov model (HMM), mientras que en [3] se propone reconocer puntos de referencia (puntos en los que cambia significativamente el campo magnético) durante el recorrido del objetivo.

En la práctica esto significa que no es viable reconocer la posición de un objetivo estático, así que es necesario estudiar su patrón de movimiento. En [12] se recurre a los acelerómetros para conocer el movimiento del usuario.

Otro aspecto importante es decidir qué valor se usarán como medida del campo magnético ya que el campo magnético se expresa en función de su intensidad en los ejes x, y, z (que no coinciden con los usados habitualmente debido a la rotación del sensor respecto a los ejes de la tierra). En [11] se justifica el uso del módulo, que simplifica el proceso y hace que las medidas sean independientes de la orientación del sensor, por ello es el sistema que se suele usar en la mayoría de los casos. En [12] se opta por la proyección de las intensidades sobre el





eje Z, que se muestra más preciso que el anterior, pero complica los cálculos por la necesidad de conocer la orientación del dispositivo mediante el uso de los acelerómetros. Otros estudios como [1],[2] se basan en la extracción de características estadísticas del módulo o los valores de la intensidad en cada eje.

### **5.3 Fases del proceso**

A pesar de que existen varias propuestas para construir sistemas de localización basados en fingerprinting, en todas ellas existen coincidencias en cuanto a la división de los algoritmos propuestos en 2 fases principales: la fase offline y la fase online. (En concreto la descripción de estas fases puede extraerse de [4],[5],[6],[9],[10])

Durante la fase offline se extraen las medidas de las señales y se almacenan en una base de datos junto con la información sobre la posición en la que se han tomado. A esta información se le denomina huella.

Durante la fase online los usuarios del sistema disponen de una aplicación en sus dispositivos móviles capaz de tomar las mismas mediciones que en la fase anterior. Esta información se compara con la almacenada en la base de datos y se estima con cuál de las huellas presenta mayores similitudes, de forma que la posición estimada será la asociada a la huella con la que coincida.

Una discusión interesante es el número de dimensiones que se deben considerar para construir los mapas de huellas. En [7] se justifica el uso de una sola dimensión, considerando que el objetivo se desplaza tan solo por el centro de un pasillo, sin embargo se reconoce que se pueden producir importantes errores en el reconocimiento. En [2] también se utiliza un modelo unidimensional, pero en este caso debido a que se considera cada habitación como un punto del espacio de reconocimiento, mientras que en [11],[12] se opta por mapas bidimensionales dividiendo el espacio en cuadrículas del mismo tamaño.



## **5.4 Obtención de huellas**

En relación a la fase offline se han planteado varias alternativas para la obtención de huellas. En [7],[10] se sugiere la posibilidad de automatizar la recogida de datos, es decir, usar algún sistema robotizado capaz de recorrer la zona de trabajo tomando las medidas y guardándolas directamente en la base de datos, pero el problema que se presenta es precisamente el de conocer la posición del robot al tomar la medida.

En [5] se propone una solución intermedia en la que en lugar de usar robots se opta por una propuesta colaborativa donde los usuarios que acceden habitualmente a la zona de trabajo usan una aplicación móvil para tomar las medidas. En este caso la posición de los usuarios se va calculando con el uso de los sensores inerciales de los dispositivos móviles, aunque los autores terminan reconociendo ciertas dificultades como los errores de precisión que actualmente presentan estos sensores o la dificultad para conocer el punto exacto en el que los usuarios inician el recorrido.

Por todo ello, hoy por hoy la opción más factible es la de realizar un trabajo de campo en el que los propios investigadores realicen de forma manual la toma de medidas, identificando las posiciones mediante etiquetas (como el número de despacho, tal y como se propone en [5]) o dividiendo el espacio en cuadrículas del mismo tamaño (como se propone en [4],[6][11]).

En el caso de los campos magnéticos puede ser interesante el uso de plataformas con ruedas (como se propone en [11]) para evitar variaciones en la orientación de los sensores. En [1] se utiliza una plataforma giratoria que permite tomar medidas en todas las orientaciones.

## **5.5 Algoritmos de localización**

En [13] se realiza una comparativa en la que aparecen 3 tipologías diferentes de algoritmos, los probabilísticos, los determinísticos y las redes neuronales, valorándose aspectos como la exactitud, la precisión, la complejidad, la robustez y la escalabilidad. De sus conclusiones se extrae que las redes neuronales presentan los peores resultados. Los modelos probabilísticos tienen la ventaja de reducir la complejidad de cálculo en la fase online (sobre todo cuando se aumenta el número de muestras que consideramos para el reconocimiento), aunque la precisión es inferior a la del modelo determinístico.

En [10] se recomienda el uso de modelos probabilísticos para localizaciones de gran



extensión, en las que se combinan entornos de interior y exterior, ya que la cantidad de huellas que se necesitaría tomar durante la fase offline sería inmanejable durante la localización.

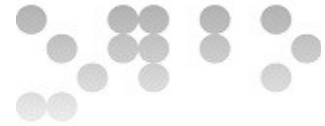
El algoritmo más utilizado en modelos determinísticos es el k-NN (en [4],[13] se usan variantes de este algoritmo), que se basa en un proceso de aprendizaje para la búsqueda de patrones mediante vectores (En WiFi fingerprinting suelen representarse los valores de RSSI de los diferentes puntos de acceso mediante un vector)

La conclusión de [13] es que k-NN es la mejor alternativa para la localización basada en WiFi fingerprinting, ya que, aunque presenta el inconveniente de una mayor complejidad, ésta se puede reducir si se disminuye el número de muestras a considerar. Se considera que con un valor de 10 muestras por localización se alcanzan comparativamente los mejores resultados de precisión con una complejidad asumible. En [6] también se llega a la misma conclusión, prestando en este caso especial atención a factores de eficiencia energética.

Tal y como se reconoce en [5], los estudios realizados hasta la fecha se basan en la experimentación en un entorno concreto y es muy arriesgado concluir que los resultados obtenidos sean extrapolables a cualquier entorno. Por ejemplo, en [9] se aprecia el aumento de los errores en la localización en entornos extensos con múltiples plantas, o en [10] se estudian las dificultades que se presentan en un campus universitario en el que el comportamiento de las señales WiFi se ven significativamente afectadas por la estructura de los edificios. Con todo ello parece recomendable implementar varios modelos para el entorno a estudiar y analizar cuál presenta los mejores resultados. En [3] se concluye que en el caso de los campos magnéticos el tipo de estructura afecta de forma muy significativa a la capacidad de los algoritmos, por ejemplo, en edificios antiguos con poco uso de materiales metálicos no se produce suficiente variabilidad local.

Para aumentar la precisión en los sistemas basados en campos magnéticos algunos estudios ([1],[2]) optan por extraer varias características probabilísticas del campo magnético y aplicar en cada caso concreto aquella que presente mayor variabilidad local.

En cualquier caso, como ya se ha comentado, con el uso de campos magnéticos parece necesario extender el reconocimiento a un camino recorrido por el usuario, y no solo a una posición estática con algoritmos como MCL o HMM. En [1],[3] se propone la detección de



los denominados “puntos de referencia” (aquellos que presenten mayor variabilidad en el campo magnético), de forma que el reconocimiento consistiría en la búsqueda de un patrón de puntos de referencia detectados durante un recorrido.



## 6 Metodología

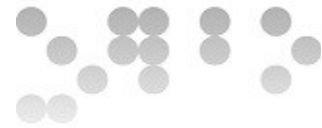
Como se ha podido ver en punto anterior, la utilización del campo magnético como mecanismo de localización no es aplicable en cualquier entorno de interior, ya que depende fundamentalmente de los materiales utilizados para su construcción, así como de los diferentes elementos metálicos distribuidos por el edificio que sean susceptibles de producir alteraciones en el campo magnético. Con todo ello, parece razonable realizar un estudio previo de las características específicas del entorno antes de abordar un proyecto de localización. Para llegar a esta meta se plantearon inicialmente los siguientes objetivos:

- Desarrollar el software necesario para medir el campo magnético, extrayendo toda la información que se pudiera considerar de interés para su posterior análisis. En concreto parece interesante poder capturar no solo las medidas del campo magnético, sino también la de otros sensores como acelerómetros o giroscopios. Además debería facilitar la toma de datos tanto de forma estática como en movimiento.
- Realizar una serie de experimentos de los que extraer información sobre el terreno de las características de las medidas tomadas con la aplicación, con objeto de estudiar la viabilidad de la creación de un sistema de localización.
- Proponer un procedimiento para construir mapas del campo magnético específico para el hospital y establecer una serie de recomendaciones para su realización a partir de los resultados obtenidos durante la experimentación.

Para conseguir estos objetivos se han utilizado dos metodologías de investigación: *diseño y creación, y experimentación*.

La metodología de *diseño y creación* está orientada a la obtención de nuevos artefactos tecnológicos capaces de solucionar problemas específicos relacionados con el contexto de la investigación. En el caso que nos ocupa estos artefactos han consistido en una aplicación Android para la captura de información de los sensores y de un repertorio de scripts capaces de procesar las muestras extraídas.

La metodología de experimentación se basa en la aplicación del método científico, consiste en la formulación de hipótesis de forma que se pueda demostrar su validez o invalidez mediante



la realización de experimentos realizados de forma sistemática.

El proceso diseñado para la realización de este proyecto se ha planteado en una estructura cíclica que engloba las dos metodologías anteriores y que básicamente ha seguido los siguientes pasos:

1. Se formulan las hipótesis iniciales, se diseñan los experimentos que se consideran necesarios para validar las hipótesis y se analizan las necesidades de recogida de información.
2. Desarrollo de artefactos para cubrir las expectativas creadas en el punto anterior (aplicación de captura de datos y scripts de análisis de la información)
3. Realización de experimentos y obtención de resultados.
4. Validación de las hipótesis formuladas en el punto primero a partir de los resultados obtenidos en el punto anterior.
5. Extracción de conclusiones.

El factor cíclico referido anteriormente se introduce en el punto cuarto, ya que cuando se ha detectado que los resultados no eran suficientes para poder validar o refutar las hipótesis planteadas, ha sido necesario retornar al punto inicial, en ocasiones para reformular los experimentos y en otros casos incluso para modificar el funcionamiento de la aplicación.

En los siguientes puntos se describen tanto los artefactos específicamente desarrollados durante la realización de este proyecto, como el proceso seguido a lo largo de la fase de experimentación.

### **6.1 Infraestructura empleada**

Al basar la localización en la captura del campo magnético terrestre se evita el uso de dispositivos de emisión (por ejemplo, en el caso de WiFi se requiere la instalación de puntos de acceso inalámbrico). Además, los sensores utilizados son los que se pueden encontrar en cualquier dispositivo móvil inteligente de los que la mayoría de los usuarios ya disponen.

Durante el proceso de experimentación se han usado tan solo dispositivos móviles para la captura de datos y ordenadores convencionales para el procesamiento de la información. Con



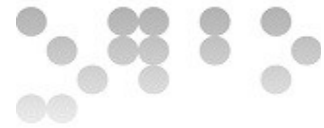
el modelo propuesto todo el sistema podría implementarse directamente en una aplicación para dispositivos móviles. Bajo estas condiciones el coste en infraestructuras puede considerarse nulo, ya que no requiere inversión en nuevos elementos.

En cuanto al software, como se verá a continuación, se basa exclusivamente en aplicaciones con licencias libres, o desarrolladas específicamente durante el proyecto y liberadas para futuros usos.

El software que se ha desarrollado para este proyecto consta de dos elementos, por un lado una aplicación Android encargada del muestreo de la información, y por otro lado una serie de scripts Scilab capaces de procesar la información muestreada para realizar cada uno de los experimentos.

A continuación se enumeran las principales funcionalidades de la aplicación desarrollada:

- Capacidad de configurar los parámetros de muestreo (tiempo y frecuencia)
- Posibilidad de elegir los sensores a muestrear (campo magnético, acelerómetros, giroscopio y campo magnético en coordenadas globales)
- Previsualización del campo magnético: El usuario puede usar la aplicación sin necesidad de almacenar las muestras capturadas, visualizando mediante gráficas o diagramas de barras la evolución de los componentes vectoriales y el módulo del campo magnético. Esta funcionalidad es útil para buscar sobre el terreno zonas que presenten cambios significativos en los valores de los sensores para analizar cómo afectan a estos valores ciertos aspectos como la posición en la que se encuentra el móvil, los movimientos del usuario mientras camina, los giros en los recorridos, etc.
- Permite realizar la captura en dos modos:
  - *Recorrido*: Se almacenan en una base de datos muestras de los sensores mientras el usuario realiza un recorrido. En la pantalla se visualiza una gráfica con los valores que se van obteniendo del campo magnético, y el usuario puede decidir el momento en el que se inicia y se detiene la captura de datos.
  - *Cuadrícula*: Está pensado para tomar muestras de forma sistemática de una zona que previamente se divide en forma de cuadrícula. Antes de iniciar la captura el



usuario podrá introducir una serie de datos para definir tanto la forma de la cuadrícula como las propiedades del muestreo (número de filas y columnas de la cuadrícula, frecuencia de muestreo, tiempo de muestreo en cada celda y sensores usados para la captura). Posteriormente se realiza la captura de los datos de cada celda previsualizando mediante un diagrama de barras los valores del campo magnético. El usuario deberá colocarse físicamente en la posición indicada por la aplicación (fila y columna) e iniciar la captura de cada celda.

- Exportación de datos en formato CSV: Como se ha comentado, la aplicación va almacenando en una base de datos la información de los sensores seleccionados para cada cuadrícula y recorrido muestreando. Toda esta información puede ser exportada a una serie de ficheros en un formato diseñado para que sean fácilmente procesables por los scripts de Scilab. Durante la exportación el usuario podrá elegir el método de envío que desee (correo electrónico, exportación a Dropbox, etc)

A continuación se muestran a modo de ejemplo dos capturas de pantalla de la aplicación en las que se puede apreciar su comportamiento durante la captura de datos.

La figura 1 se corresponde con una captura de recorridos, donde se muestra gráficamente la evolución del campo magnético. En el eje horizontal se representa la posición de las muestras dentro de la secuencia y en el vertical el campo magnético medido en  $\mu\text{T}$ . Bajo la gráfica se observa una leyenda con los colores asignados a cada uno de los sensores y al módulo del vector. A continuación se encuentra una barra de estado que durante la grabación muestra información sobre el tiempo empleado y número de muestras capturadas. En la parte inferior se sitúan los botones que nos permiten iniciar la grabación, guardar el recorrido en la base de datos o descartar los datos muestreados.

En la figura 2 aparece una captura de la aplicación durante la grabación de cuadrículas. En este caso la gráfica muestra 4 barras correspondientes a los valores vectoriales del campo magnético y al módulo del vector. En la leyenda se indica el color asignado a cada medida. En la barra de estado, además del tiempo y el número de muestras aparece la fila y columna en la que nos encontramos y el porcentaje de datos capturados en la celda. Mediante los botones de la parte inferior podemos iniciar la grabación de una celda, volver a la celda anterior, grabar la información en la base de datos o descartar los datos de toda la cuadrícula.



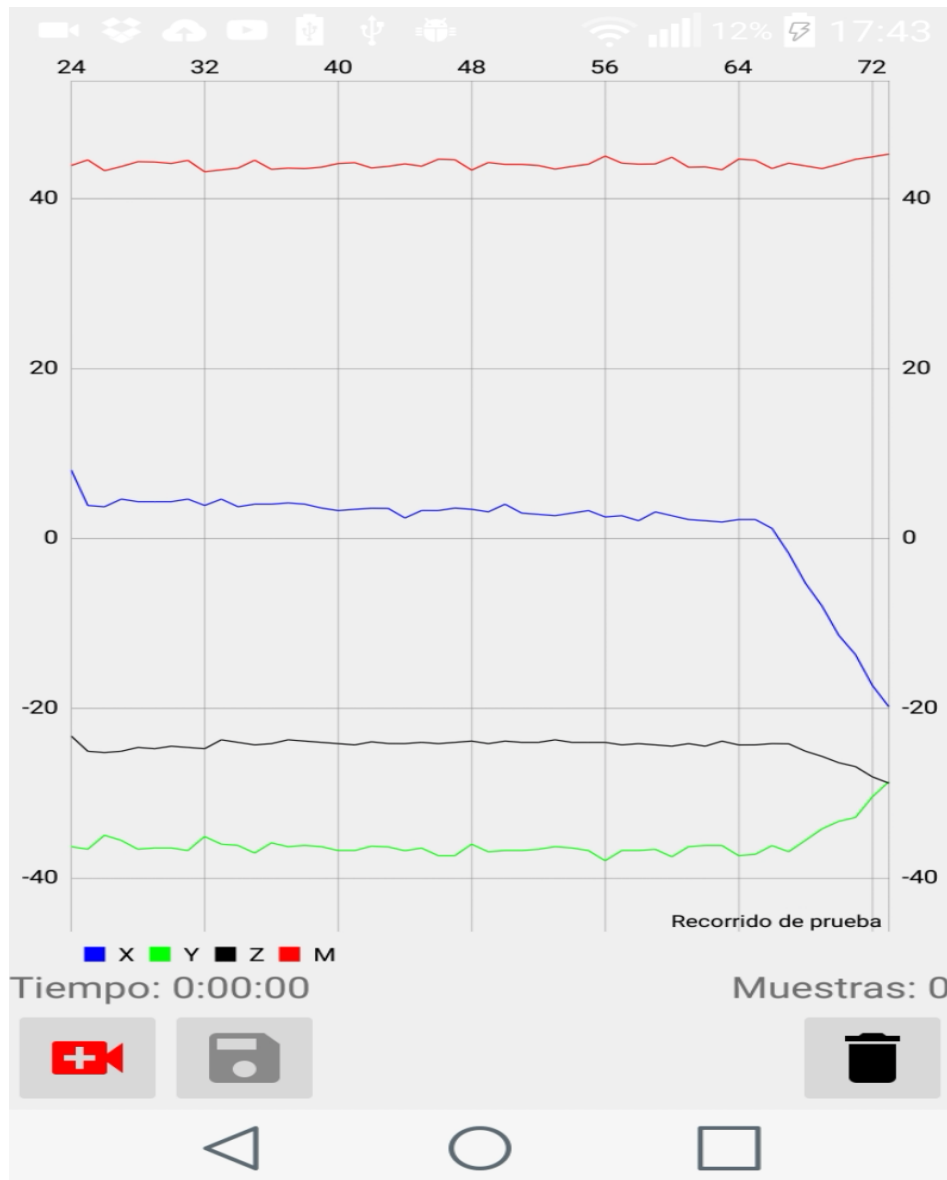
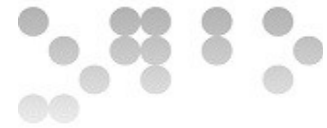


Figura 1: Imagen de la aplicación durante el muestreo de recorridos

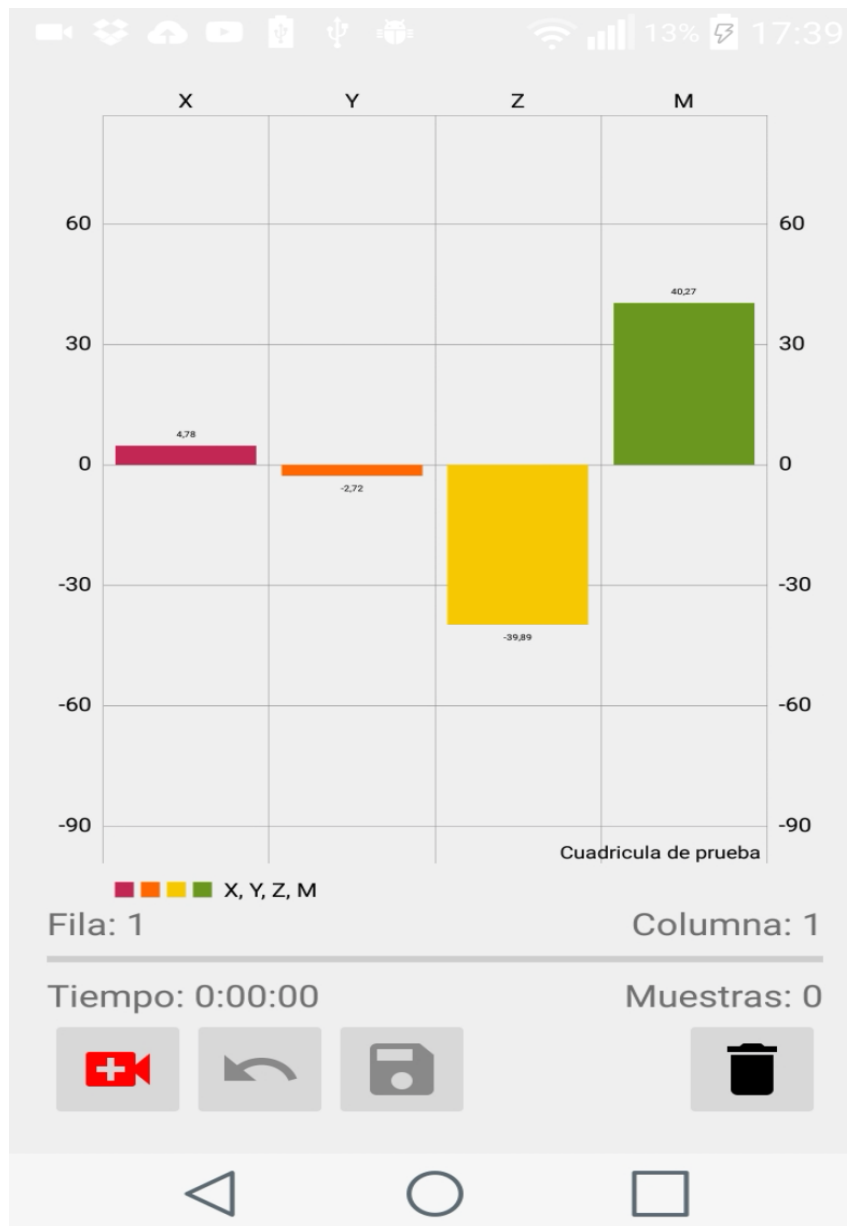
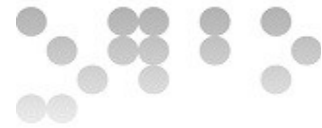


Figura 2: Imagen de la aplicación durante el muestreo de cuadrículas

El código fuente de la Aplicación se han publicado en un repositorio GitHub al que se puede acceder de forma libre<sup>1</sup>. También se han incluido los scripts Scilab<sup>2</sup> utilizados durante la fase de experimentación.

1 <https://github.com/aortegagonz/Compass>

2 <https://github.com/aortegagonz/Compass/tree/master/scilab>



## 6.2 Captura de datos

Las mediciones se han realizado mediante un teléfono Nexus 5, equipado con procesador Qualcomm Snapdragon 800, que funciona a una velocidad de 2.26 GHz. Este modelo dispone de dos módulos de sensores diferentes, por un lado el chip InvenSense MPU-6515 (se trata de un sensor de movimiento que ofrece las funciones tanto de giroscopio como de acelerómetro, con valores en 3 ejes para cada uno de los sensores), y por otro lado del chip Asahi Kasei AK8963 (brújula electrónica que nos permite medir el campo magnético terrestre en los tres ejes)

Las medidas se realizaron en en el vestíbulo y uno de los pasillos de la planta baja del Hospital Parc Taulí de Sabadell. El vestíbulo tiene unas dimensiones de 10,2 x 12 metros, y el pasillo de 8,10 metros de largo y 3 metros de ancho.

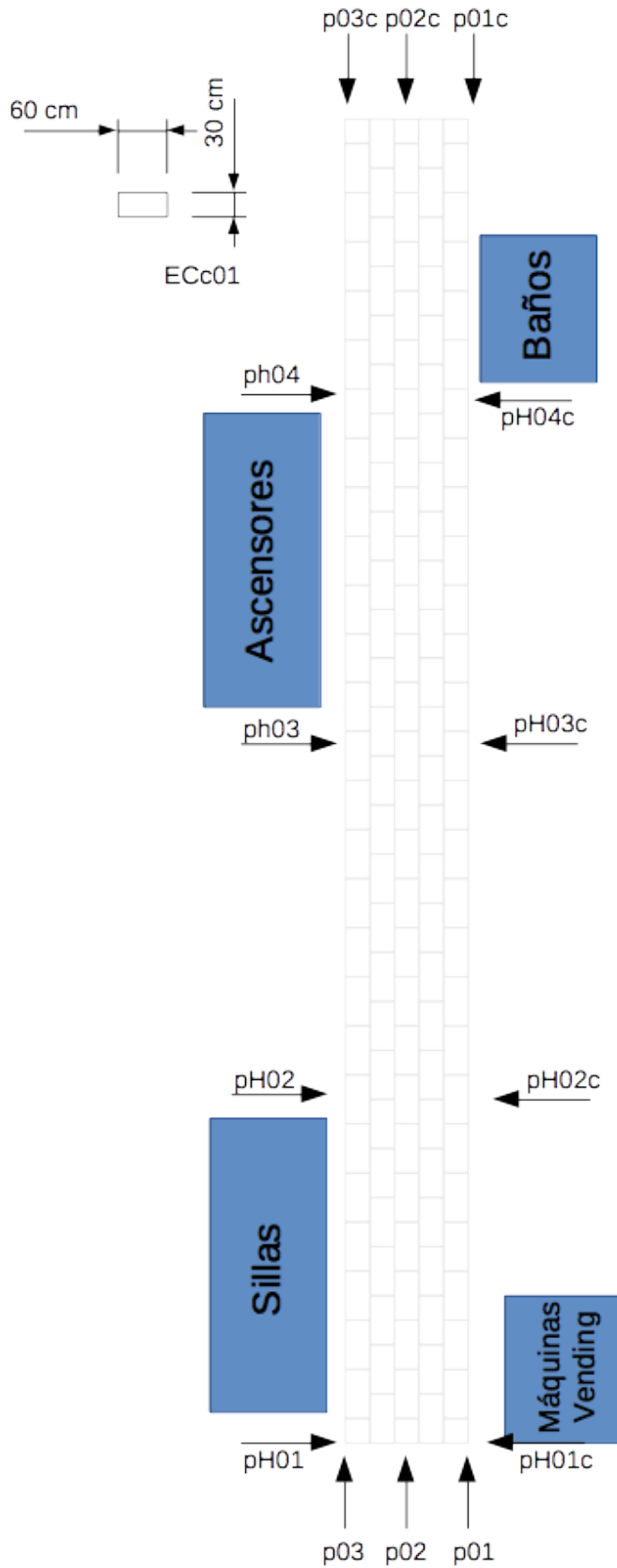
En las figuras 3 y 4 se muestran los planos correspondientes al pasillo y vestíbulo respectivamente, sobre los que se han marcado los recorridos realizados. Cada flecha se corresponde con un recorrido, que como se puede apreciar se realizaron en horizontal y vertical, y en sentido directo e inverso. Cada uno de los recorridos se repitió 3 veces.

En los planos se han dibujado aquellos elementos que se han considerado susceptibles de generar alteraciones del campo magnético, ya sea porque su estructura conste de elementos metálicos o porque pudieran generar interferencias electromagnéticas.

Además de los recorridos se grabaron 2 cuadrículas, una en el vestíbulo, de 12x3 celdas, correspondientes a la intersección de los recorridos horizontales y los 3 primeros verticales, y otra en el pasillo de 5x2 celdas, en las zonas de cruce de los recorridos.

La distancia entre las columnas de la cuadrícula (que coincide con la separación entre recorridos verticales) es de 180 cm en el caso del vestíbulo y 120 cm en el pasillo. En cuanto a la distancia entre filas (que a su vez coincide con la separación entre recorridos horizontales) es de 90 cm en el vestíbulo y 210 cm en el pasillo.

Todo el proceso se realizó portando el móvil en la misma posición, con la pantalla en paralelo al suelo y orientada hacia el techo. Los recorridos se hicieron a pié procurando mantener la velocidad y la longitud del paso constante, mientras que en las cuadrículas se capturaron los datos de forma estática, evitando realizar movimientos durante la grabación.



## Pasillo

Figura 3: Plano de las muestras realizadas en el pasillo

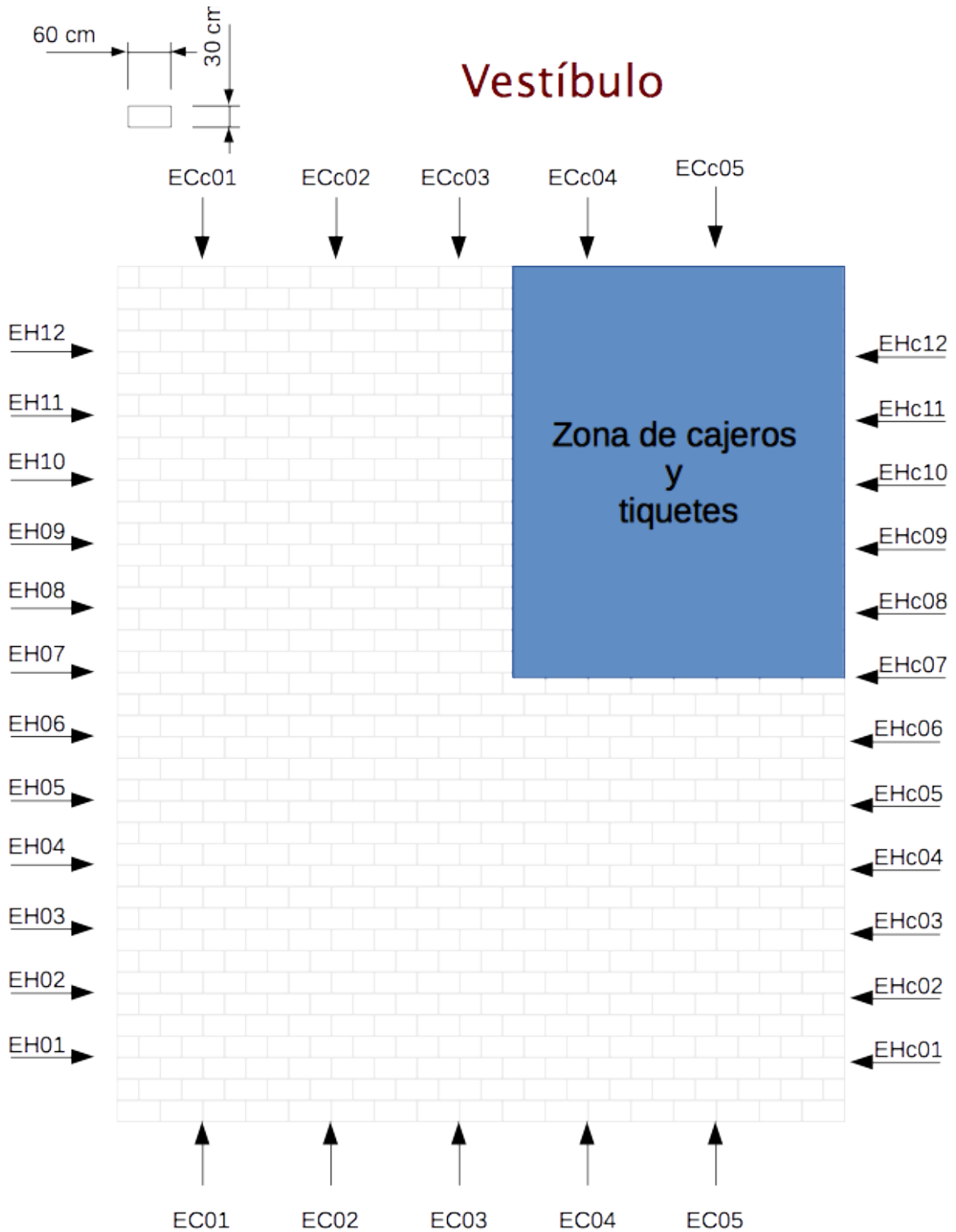


Figura 4: Plano de las muestras realizadas en el vestíbulo



### 6.3 Muestreo de cuadrículas

Para muestrear los valores del campo magnético evitando los errores producidos por los movimientos del móvil hemos usado un sistema de muestreo en cuadrículas, que consiste en dividir la zona a muestrear aplicando una cuadrícula de un número fijo de filas ( $f$ ) y columnas ( $c$ ).

$$C_{i,j} \rightarrow \text{Celda situada en fila } i, \text{ columna } j \quad \begin{array}{l} 1 \leq i \leq f \\ 1 \leq j \leq c \end{array}$$

Para cada celda  $C_{i,j}$  tomamos  $n$  muestras del campo magnético (MF). Al tratarse de un valor vectorial lo representaremos mediante sus componentes sobre los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . De esta forma, el vector  $MF_{i,j}(t)$  sería la medida del campo magnético para la celda  $[i,j]$  en el instante  $t$ . Los componentes del vector serían las muestras tomadas en el instante  $t$  de los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , que representamos mediante  $mfx_{i,j}(t)$ ,  $mfy_{i,j}(t)$  y  $mfz_{i,j}(t)$  respectivamente.

$$MF_{i,j}(t) = [mfx_{i,j}(t), mfy_{i,j}(t), mfz_{i,j}(t)] \quad 1 \leq t \leq n$$

Como veremos más adelante, además de los componentes vectoriales trabajaremos con el módulo del vector.

$$\|MF_{i,j}(t)\| = \sqrt{(mfx_{i,j}(t))^2 + (mfy_{i,j}(t))^2 + (mfz_{i,j}(t))^2}$$

El hecho de tomar varias muestras para una celda está justificado por la necesidad de evitar errores en la estimación del campo magnético en un punto, que como se verá más adelante, pueden producirse por las imprecisiones de los sensores utilizados o por variaciones en la orientación del sensor. Al tener un conjunto de muestras se pueden extraer alguna de sus características estadísticas como la media, la moda o la mediana. Por ejemplo, con la siguiente expresión se obtendría la media del campo magnético para una celda.

$$\text{media}(\|MF_{i,j}\|) = \frac{\sum_{t=1}^n \|MF_{i,j}(t)\|}{n}$$

Por otro lado, junto a las medidas del campo magnético también se toman muestras del sensor de acelerómetro (AC) y del giroscopio (G). Se tratan también magnitudes vectoriales, así que de nuevo se trabajará con sus correspondientes módulos.

$$AC_{i,j}(t) = [acx_{i,j}(t), acy_{i,j}(t), acz_{i,j}(t)] \quad 1 \leq t \leq n$$



$$\|AC_{i,j}(t)\| = \sqrt{(acx_{i,j}(t)^2 + acy_{i,j}(t)^2 + acz_{i,j}(t)^2)}$$

$$G_{i,j}(t) = [gx_{i,j}(t), gy_{i,j}(t), gz_{i,j}(t)] \quad 1 \leq t \leq n$$

$$\|G_{i,j}(t)\| = \sqrt{(gx_{i,j}(t)^2 + gy_{i,j}(t)^2 + gz_{i,j}(t)^2)}$$

## 6.4 Muestreo de recorridos

En el caso de los recorridos lo que se hace es tomar un número  $n$  de muestras mientras se camina con el móvil, en este caso no se deben considerar filas ni columnas, sino una secuencia de componentes vectoriales. Así para un recorrido se representará mediante  $MF(t)$  el valor del campo magnético medido en el instante  $t$ , que al igual que en las cuadrículas será un vector cuyos componentes en los 3 ejes se representan mediante  $mfx(t)$ ,  $mfy(t)$  y  $mfz(t)$ .

$$MF(t) = [mfx(t), mfy(t), mfz(t)] \quad 1 \leq t \leq n$$

con lo que se puede expresar su módulo mediante la expresión;

$$\|MF(t)\| = \sqrt{(mfx(t)^2 + mfy(t)^2 + mfz(t)^2)}$$

Los valores relativos al acelerómetro (AC) y giroscopio (G) se expresan de la siguiente forma:

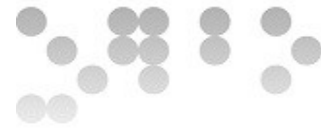
$$AC(t) = [acx(t), acy(t), acz(t)] \quad 1 \leq t \leq n$$

$$G(t) = [gx(t), gy(t), gz(t)] \quad 1 \leq t \leq n$$

Hay que tener en cuenta que en los recorridos no se tiene una referencia espacial del punto en el que se toman las muestras, es decir, se parte de una posición conocida pero se desconoce el sentido y la velocidad en el que se mueve el usuario, así que no es posible conocer la posición en la que se toma cada medida.

Las cuadrículas se utilizarán durante la fase de aprendizaje, ya que se necesita saber la posición en la que se toma cada muestra, mientras que los recorridos serán analizados en la fase de reconocimiento.

Los datos tomados del giroscopio no se han analizado en este proyecto, aunque se han incluido en la aplicación en previsión de futuros usos. En concreto se podrían utilizar para detectar si el usuario cambia de orientación durante un recorrido.



## 6.5 Cálculo de huellas

Se define una huella mediante un par de valores  $[V,P]$  donde  $P$  representa una posición en el espacio a reconocer, y  $V$  el valor de una determinada característica del campo magnético medida en la posición  $P$ .

En el caso de las cuadrículas cada posición  $P$  identifica una celda de nuestra cuadrícula y se representará mediante un vector de 2 valores que se corresponden con su fila y columna respectivamente.

Durante los experimentos que se describen en los siguientes apartados se han probado varios criterios para la determinación de los valores de  $P$  y  $V$ :

a) Usar cada muestra como huella de la celda en la que se obtuvo:

$$\text{Las huellas serían los pares } [p, v] \left\{ \begin{array}{l} p = \|MF_{i,j}(t)\| \\ v = (i, j) \end{array} \right\}$$

Es importante observar que en este caso se tendrían varias huellas para una misma posición (tantas como muestras se tomen en cada celda)

b) Usar la media de las muestras de una celda como la característica de su huella:

$$\text{Las huellas serían los pares } [p, v] \left\{ \begin{array}{l} p = \text{media}(\|MF_{i,j}\|) \\ v = (i, j) \end{array} \right\}$$

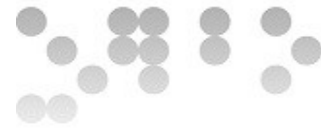
c) Usar la mediana de las muestras de una celda como la característica de su huella:

$$\text{Las huellas serían los pares } [p, v] \left\{ \begin{array}{l} p = \text{mediana}(\|MF_{i,j}\|) \\ v = (i, j) \end{array} \right\}$$

d) Usar la moda de las muestras de una celda como la característica de su huella

$$\text{Las huellas serían los pares } [p, v] \left\{ \begin{array}{l} p = \text{moda}(\|MF_{i,j}\|) \\ v = (i, j) \end{array} \right\}$$





## 6.6 El algoritmo k-NN

En los experimentos realizados durante este proyecto se ha utilizado el algoritmo de k vecinos más cercanos (k-NN) para estimar la localización de una muestra a partir de un conjunto de huellas, cuyo funcionamiento es el siguiente:

Se parte de una muestra  $x$  que será el módulo del campo magnético tomado en una posición desconocida, y de un conjunto de huellas ( $H$ ) representadas por  $m$  pares de posiciones y valores, donde cada valor  $v$  será el módulo del campo magnético medido en la posición  $p$ .

$$H(i)=[p(i),v(i)] \quad 1 \leq i \leq m$$

Se calcula la distancia<sup>3</sup> de  $x$  respecto a cada huella:

$$distancia(i)=\sqrt{(x^2-v(i)^2)}$$

Se obtienen las  $k$  huellas con menor distancia en orden creciente de distancia.

Si se desea localizar un valor concreto tiene sentido utilizar el algoritmo con  $k=1$ , ya que se obtendría la posición de la huella cuyo valor de campo magnético es más cercano al del punto a localizar.

Sin embargo, si el objetivo es ubicar un recorrido, tiene sentido utilizar valores diferentes de  $k$ , de forma que para cada muestra del recorrido se obtendrían las  $k$  posiciones más cercanas y en lugar de seleccionar la primera se podría optar por aquella que se considere más probable en función de los resultados obtenidos para las muestras anteriores.

Durante la fase de experimentación se estudiará el comportamiento de este parámetro. Además se propondrá el uso de las distancias calculadas para ponderar la probabilidad de reconocimiento que se asigna a cada uno de los vecinos.

---

<sup>3</sup> En este proyecto hemos utilizado la distancia euclídea para estimar la diferencia entre dos medidas del campo magnético, aunque existen otras alternativas, como por ejemplo la distancia de Distancia de Mahalanobis.



## 6.7 Estimación del grado de acierto

En los experimentos con cuadrículas se va a necesitar calcular el grado de acierto de las localizaciones que se estiman. Para ello se puede probar el algoritmo de localización con las propias muestras tomadas para generar las cuadrículas, cuya localización ya se conoce, y estudiar con qué probabilidad se produciría un acierto en su localización.

Para cada muestra de la celda  $C_{ij}$  tomada en el instante  $t$  se define su probabilidad de acierto de la siguiente forma:

$$PA_{i,j}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si el resultado de la localización es la celda } C_{i,j} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Es importante resaltar para la obtención de huellas se han empleado datos de diferentes cuadrículas, así que se podría dar el caso de que al estimar la posición para una muestra de una celda diera como resultado una celda de una cuadrícula diferente. En este caso también se considera que el valor de la probabilidad es 0.

De esta forma la probabilidad de acierto en una celda puede calcularse como la media de acierto en las muestras de dicha celda.

$$PA_{i,j} = \frac{\sum_{t=1}^n PA_{i,j}(t)}{n}$$



## 7 Experimentación

El objetivo de este apartado es describir el resultado de los diferentes experimentos que se han realizado con las muestras capturadas, y que se han dividido en 4 bloques.

En los dos primeros bloques se analizarán aspectos generales sobre el proceso de captura de datos como la caracterización del campo magnético y la frecuencia de muestreo. El tercer bloque agrupa una serie de experimentos relacionados con los datos obtenidos en las cuadrículas, mientras que el último de los bloques se centra en el estudio de los recorridos.

### 7.1 Caracterización del campo magnético

Una de las primeras decisiones que se debe tomar para construir los mapas de campos magnéticos sobre un espacio es cómo se va a caracterizar cada una de las medidas. El campo magnético es una magnitud vectorial definida por sus valores sobre los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , que son precisamente los valores que se van a leer de los sensores disponibles en los dispositivos móviles. En la figura 5 se puede observar el comportamiento de estas señales, así como del módulo del campo magnético, tomando las medidas durante un periodo de unos 3 segundos en una posición fija y sin cambiar la orientación del móvil.

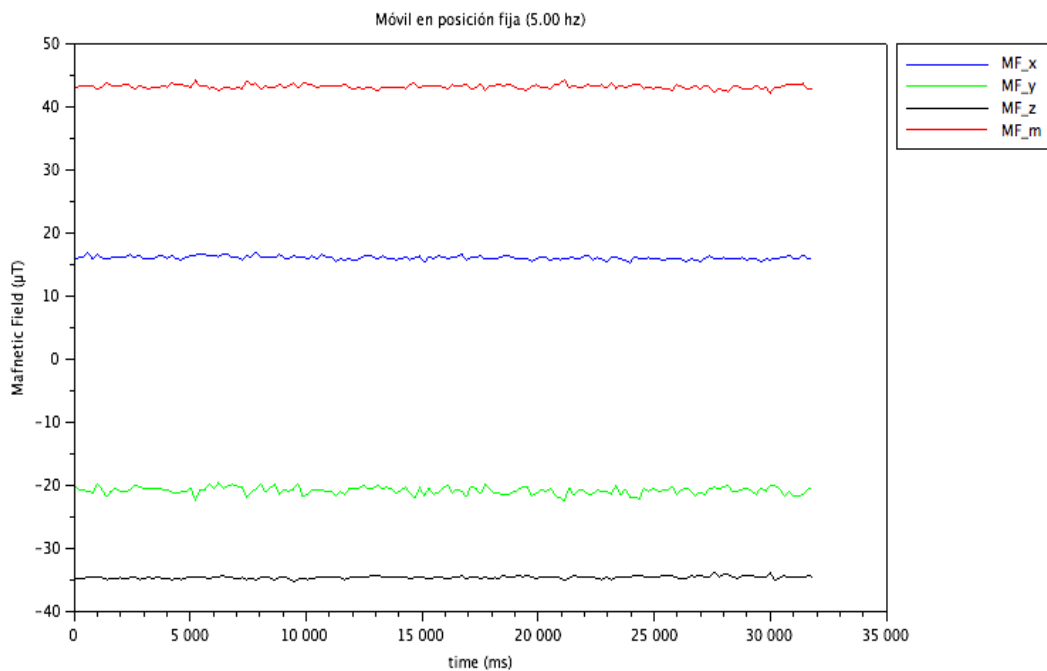
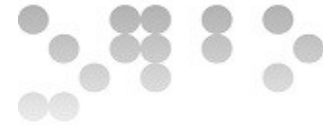


Figura 5: Componentes vectoriales y módulo del campo magnético en una posición fija y orientación estable

	X	Y	Z	M
Media	16,21	-20,68	-34,46	43,34
Desviación	0,3	0,6	0,22	0,35

Tabla 1: Media y desviación de los componentes vectoriales y el módulo del campo magnético en una posición fija y orientación estable

La desviación observada en la tabla 1, tanto de los componentes vectoriales como del módulo, es muy reducida y por tanto parece razonable considerar que ambos podrían caracterizar de forma correcta el valor del campo en una posición, pero a continuación se va a analizar el efecto que se produce en las medidas cuando se cambia la orientación del sensor. En la figura 6 se ha repetido la medida anterior, pero esta vez realizando secuencialmente una rotación de 360 grados del dispositivo móvil sobre cada uno de sus ejes, es decir, durante la grabación del recorrido se ha permanecido en la misma posición, pero se ha girado 360 grados el dispositivo sobre su eje X (primeros 5 segundos), posteriormente sobre Y (en torno a los 8 segundos) y finalmente sobre su eje Z (últimos 5 segundos)

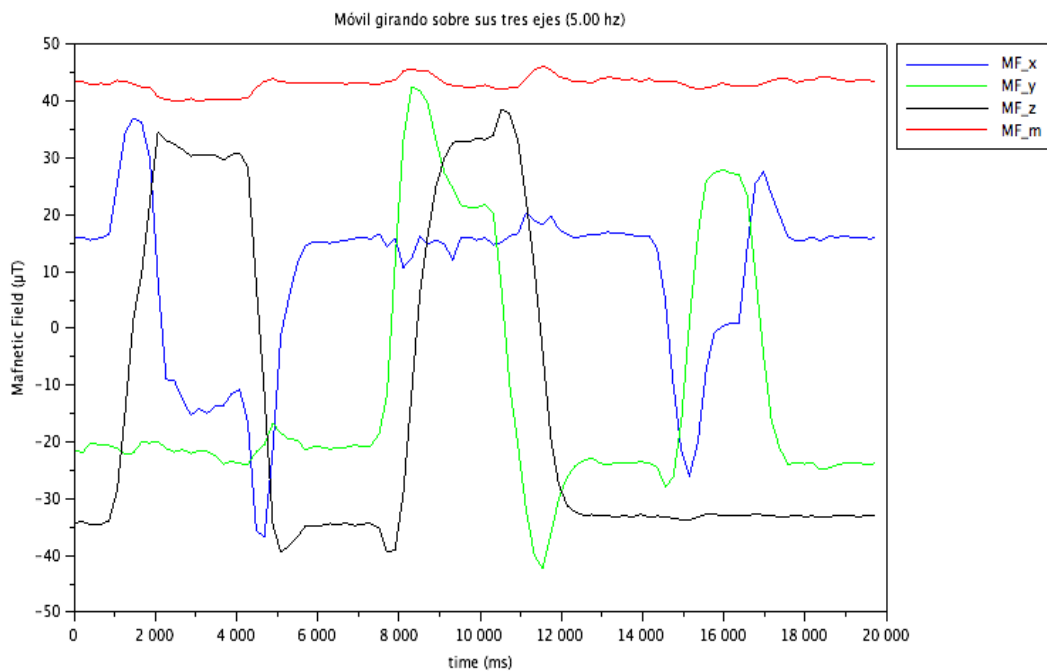
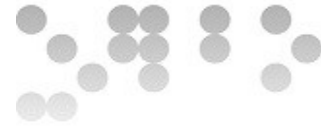


Figura 6: Componentes vectoriales y módulo del campo magnético en una posición fija y al rotar el dispositivo sobre sus 3 ejes

	X	Y	Z	M
Media	9,66	-11,64	-13,54	43,11
Desviación	14,72	20,88	28,46	1,3

Tabla 2: Media y desviación de los componentes vectoriales y el módulo del campo magnético en una posición fija y rotando el dispositivo sobre sus 3 ejes

Los nuevos datos de la tabla 2 indican que en los componentes vectoriales la variabilidad aumenta considerablemente, lo cuál obliga a descartarlos, mientras que el comportamiento del módulo, aunque aumenta en variabilidad, continúa manteniéndose en valores aceptables. Este experimento se ha repetido en diferentes localizaciones y con diversos dispositivos móviles, obteniéndose resultados similares.

Por último se va a estudiar la posibilidad de convertir las coordenadas x, y, z representadas sobre los ejes de coordenadas del móvil al eje de coordenadas X, Y, Z de la tierra, usando la matriz de rotación que proporciona la propia API de Android<sup>4</sup>. En la figura 7 se muestran los resultados de esta transformación.

<sup>4</sup> [https://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorManager.html#getRotationMatrix\(float\[\], float\[\], float\[\], float\[\]\)](https://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorManager.html#getRotationMatrix(float[], float[], float[], float[]))

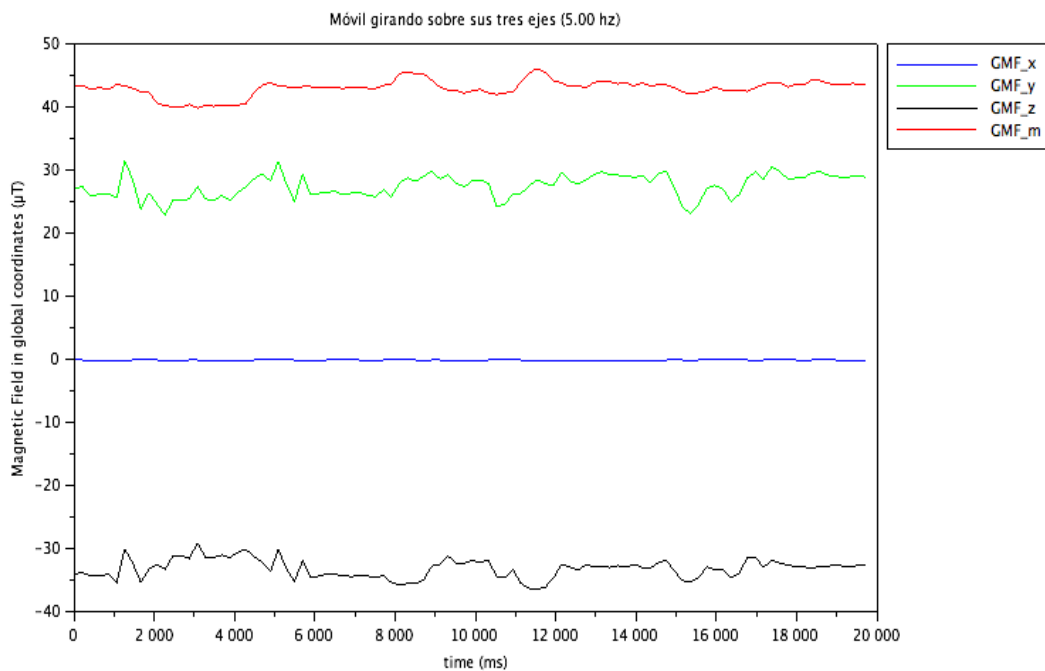
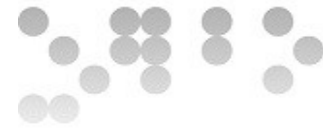


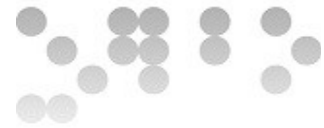
Figura 7: Componentes vectoriales y módulo del campo magnético sobre los ejes globales de la tierra, en una posición fija y rotando el dispositivo sobre sus 3 ejes

	X	Y	Z	M
Media	0	27,61	-33,05	43,11
Desviación	0	1,82	1,5	1,3

Tabla 3: Media y desviación de los componentes vectoriales y módulo del campo magnético sobre los ejes globales de la tierra, en una posición fija y rotando el dispositivo sobre sus 3 ejes

Aplicando la rotación (tabla 3) se observa que la desviación se reduce considerablemente, sin embargo se aprecian variaciones en las muestras sobre los ejes y, z. Estas variaciones pueden deberse a dos causas, por un lado a los errores de precisión de los sensores, y por otro a que estos sensores no se localizan en el centro del móvil, así que si se rota respecto a su propio centro de coordenadas, realmente se está desplazando la posición del sensor.

Por todo lo anterior, y a partir de este momento, cuando se hable de una medida del campo magnético se hará referencia al módulo del vector, además, a la hora de estimar su cálculo habrá que tener en cuenta ciertas desviaciones, sobre todo cuando se toman las medidas en movimiento, ya que inevitablemente se producen cambios en la orientación del dispositivo móvil.



Durante la fase de aprendizaje se pueden evitar estas desviaciones calculando las huellas mediante el sistema propuesto de cuadrículas, que permite tomar las medidas evitando movimientos del móvil. Durante la fase de reconocimiento sería recomendable analizar conjuntamente los valores del campo magnético y de los sensores de movimiento, descartando aquellas medidas en las que los movimientos del dispositivo sean más bruscos.

## 7.2 Experimentos sobre la frecuencia de muestreo

Tal y como se indica en la documentación de Android<sup>5</sup> la frecuencia de muestreo que se especifica a la hora de muestrear los valores de los sensores son solo una sugerencia, así que se van a analizar las frecuencias de muestreo reales a las que se obtienen los datos.

En primer lugar se mide la media y la desviación de la frecuencia de muestreo sobre las muestras tomadas para la cuadrícula del vestíbulo. En la figura 8 se muestran los datos correspondientes al campo magnético y al giroscopio para la celda [1,1].

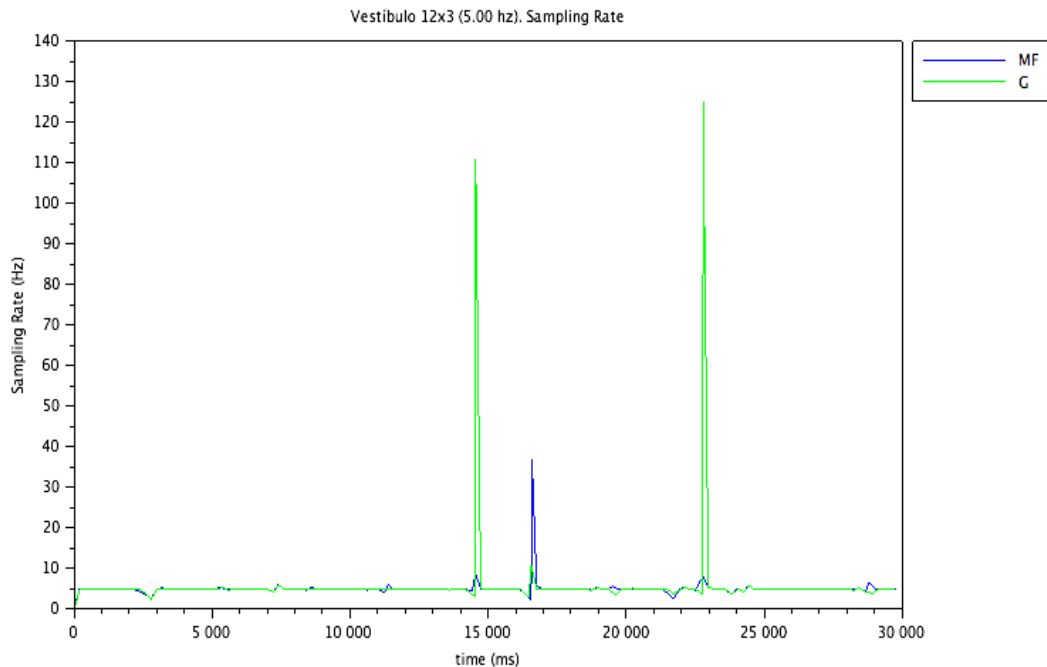


Figura 8: Frecuencia de muestreo del campo magnético (MF) y del giroscopio (G) en la celda [1,1] de la cuadrícula del vestíbulo

<sup>5</sup> [https://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorManager.html?hl=es#registerListener\(android.hardware.SensorListener, int, int\)](https://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorManager.html?hl=es#registerListener(android.hardware.SensorListener, int, int))



Para la muestra se especificó una frecuencia de muestreo de 5.00 Hz, que como se puede apreciar se mantiene constante prácticamente durante todo el tiempo, a excepción de ciertos puntos en los que no se mantiene dicho valor. Para analizar estas variaciones, en la tabla 4 se muestra la media y desviación calculada para cada una de las celdas de la cuadrícula del vestíbulo.

Media frecuencia muestreo			Desviaciones		
Media <sub>1,1</sub> = 5,21	Media <sub>1,2</sub> = 4,96	Media <sub>1,3</sub> = 5,53	Desv <sub>1,1</sub> = 2,73	Desv <sub>1,2</sub> = 0,52	Desv <sub>1,3</sub> = 4,90
Media <sub>2,1</sub> = 5,50	Media <sub>2,2</sub> = 5,65	Media <sub>2,3</sub> = 5,28	Desv <sub>2,1</sub> = 4,81	Desv <sub>2,2</sub> = 5,00	Desv <sub>2,3</sub> = 4,18
Media <sub>3,1</sub> = 5,29	Media <sub>3,2</sub> = 5,83	Media <sub>3,3</sub> = 5,27	Desv <sub>3,1</sub> = 3,42	Desv <sub>3,2</sub> = 6,36	Desv <sub>3,3</sub> = 3,95
Media <sub>4,1</sub> = 5,34	Media <sub>4,2</sub> = 5,58	Media <sub>4,3</sub> = 5,31	Desv <sub>4,1</sub> = 4,47	Desv <sub>4,2</sub> = 5,45	Desv <sub>4,3</sub> = 4,20
Media <sub>5,1</sub> = 5,00	Media <sub>5,2</sub> = 5,45	Media <sub>5,3</sub> = 5,29	Desv <sub>5,1</sub> = 0,74	Desv <sub>5,2</sub> = 4,55	Desv <sub>5,3</sub> = 3,75
Media <sub>6,1</sub> = 4,97	Media <sub>6,2</sub> = 5,29	Media <sub>6,3</sub> = 4,96	Desv <sub>6,1</sub> = 0,58	Desv <sub>6,2</sub> = 4,45	Desv <sub>6,3</sub> = 0,58
Media <sub>7,1</sub> = 5,18	Media <sub>7,2</sub> = 5,42	Media <sub>7,3</sub> = 5,41	Desv <sub>7,1</sub> = 2,62	Desv <sub>7,2</sub> = 4,17	Desv <sub>7,3</sub> = 4,46
Media <sub>8,1</sub> = 5,05	Media <sub>8,2</sub> = 5,65	Media <sub>8,3</sub> = 5,88	Desv <sub>8,1</sub> = 0,93	Desv <sub>8,2</sub> = 5,87	Desv <sub>8,3</sub> = 6,82
Media <sub>9,1</sub> = 5,23	Media <sub>9,2</sub> = 5,65	Media <sub>9,3</sub> = 4,96	Desv <sub>9,1</sub> = 3,54	Desv <sub>9,2</sub> = 6,25	Desv <sub>9,3</sub> = 0,49
Media <sub>10,1</sub> = 4,95	Media <sub>10,2</sub> = 5,00	Media <sub>10,3</sub> = 5,48	Desv <sub>10,1</sub> = 0,47	Desv <sub>10,2</sub> = 0,71	Desv <sub>10,3</sub> = 4,57
Media <sub>11,1</sub> = 4,97	Media <sub>11,2</sub> = 4,95	Media <sub>11,3</sub> = 4,94	Desv <sub>11,1</sub> = 0,65	Desv <sub>11,2</sub> = 0,50	Desv <sub>11,3</sub> = 0,49
Media <sub>12,1</sub> = 4,99	Media <sub>12,2</sub> = 4,96	Media <sub>12,3</sub> = 4,96	Desv <sub>12,1</sub> = 0,59	Desv <sub>12,2</sub> = 0,50	Desv <sub>12,3</sub> = 0,51
Promedio de la media			Promedio de la desviación:		
			3,02		

Tabla 4: Media y desviación de la frecuencia de muestreo del campo magnético en la cuadrícula del vestíbulo

Como se observa, aunque la media se aproxima a la frecuencia de muestreo deseada, la desviación promedio es muy grande. Sin embargo, observando las gráficas de todas las celdas se ve que en la mayoría de los casos el error se produce porque en ciertos puntos el sensor envía información a una frecuencia muy superior a la indicada. Por tanto se puede concluir que la frecuencia de muestreo sugerida va a suponer la frecuencia de muestreo mínima.

A continuación se repite el experimento anterior pero en este caso analizando los valores recogidos mediante el sensor del acelerómetro.



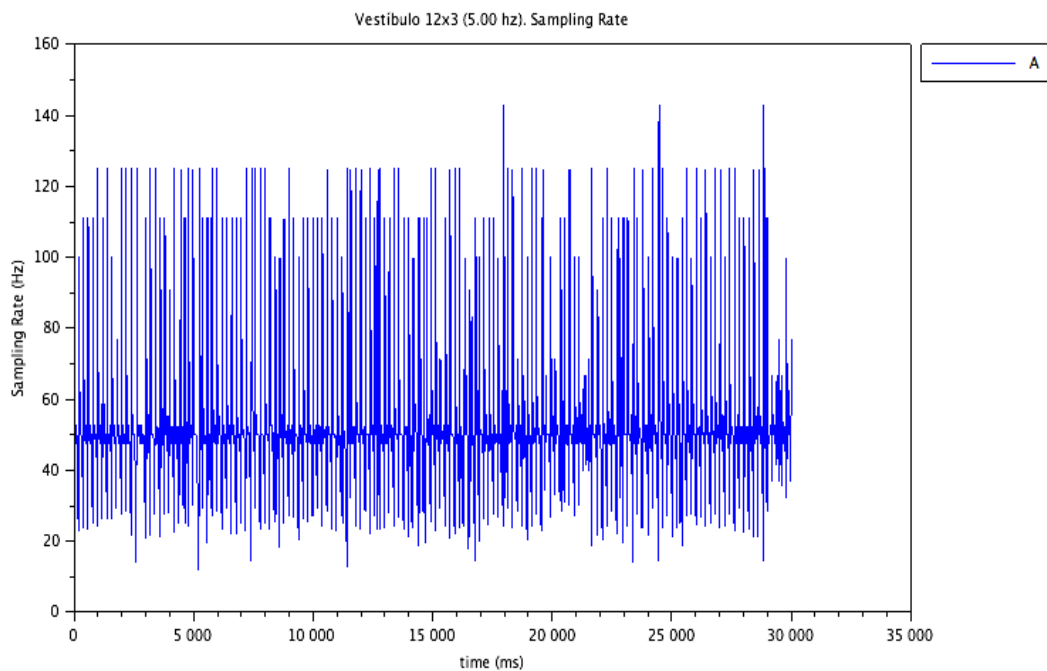


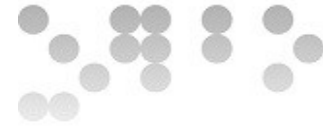
Figura 9: Frecuencia de muestreo del acelerómetro en la celda [1,1] de la cuadrícula del vestíbulo

Media frecuencia muestreo			Desviaciones		
Media <sub>1,1</sub> = 58,63	Media <sub>1,2</sub> = 56,93	Media <sub>1,3</sub> = 55,96	Desv <sub>1,1</sub> = 25,35	Desv <sub>1,2</sub> = 23,10	Desv <sub>1,3</sub> = 21,46
Media <sub>2,1</sub> = 56,47	Media <sub>2,2</sub> = 57,57	Media <sub>2,3</sub> = 56,62	Desv <sub>2,1</sub> = 22,09	Desv <sub>2,2</sub> = 23,85	Desv <sub>2,3</sub> = 22,41
Media <sub>3,1</sub> = 57,12	Media <sub>3,2</sub> = 58,52	Media <sub>3,3</sub> = 56,91	Desv <sub>3,1</sub> = 23,19	Desv <sub>3,2</sub> = 25,37	Desv <sub>3,3</sub> = 23,10
Media <sub>4,1</sub> = 57,36	Media <sub>4,2</sub> = 56,25	Media <sub>4,3</sub> = 55,70	Desv <sub>4,1</sub> = 23,84	Desv <sub>4,2</sub> = 22,49	Desv <sub>4,3</sub> = 21,03
Media <sub>5,1</sub> = 56,45	Media <sub>5,2</sub> = 58,30	Media <sub>5,3</sub> = 56,67	Desv <sub>5,1</sub> = 22,31	Desv <sub>5,2</sub> = 25,07	Desv <sub>5,3</sub> = 22,74
Media <sub>6,1</sub> = 57,07	Media <sub>6,2</sub> = 57,41	Media <sub>6,3</sub> = 57,19	Desv <sub>6,1</sub> = 23,43	Desv <sub>6,2</sub> = 24,09	Desv <sub>6,3</sub> = 23,31
Media <sub>7,1</sub> = 56,85	Media <sub>7,2</sub> = 45,18	Media <sub>7,3</sub> = 16,78	Desv <sub>7,1</sub> = 22,93	Desv <sub>7,2</sub> = 26,43	Desv <sub>7,3</sub> = 7,67
Media <sub>8,1</sub> = 58,32	Media <sub>8,2</sub> = 56,45	Media <sub>8,3</sub> = 57,74	Desv <sub>8,1</sub> = 24,85	Desv <sub>8,2</sub> = 22,38	Desv <sub>8,3</sub> = 24,39
Media <sub>9,1</sub> = 56,52	Media <sub>9,2</sub> = 56,93	Media <sub>9,3</sub> = 55,89	Desv <sub>9,1</sub> = 22,48	Desv <sub>9,2</sub> = 23,04	Desv <sub>9,3</sub> = 21,36
Media <sub>10,1</sub> = 56,10	Media <sub>10,2</sub> = 57,32	Media <sub>10,3</sub> = 58,55	Desv <sub>10,1</sub> = 21,69	Desv <sub>10,2</sub> = 23,52	Desv <sub>10,3</sub> = 25,23
Media <sub>11,1</sub> = 56,75	Media <sub>11,2</sub> = 56,38	Media <sub>11,3</sub> = 56,30	Desv <sub>11,1</sub> = 23,06	Desv <sub>11,2</sub> = 22,22	Desv <sub>11,3</sub> = 22,04
Media <sub>12,1</sub> = 56,46	Media <sub>12,2</sub> = 57,04	Media <sub>12,3</sub> = 56,41	Desv <sub>12,1</sub> = 22,19	Desv <sub>12,2</sub> = 23,43	Desv <sub>12,3</sub> = 22,26
Promedio de la media		55,53	Promedio de la desviación:		22,76

Tabla 5: Media y desviación de la frecuencia de muestreo del acelerómetro en la cuadrícula del vestíbulo

En el caso del acelerómetro, Android no respeta la sugerencia que se le indica, aunque como se ve en la tabla 5, su valor real es muy superior al de la frecuencia indicada.

Por último se va a estudiar el comportamiento de los sensores cuando se modifica la frecuencia de muestreo. Las muestras anteriores se realizaron especificando una frecuencia fija de 5.00 Hz, en esta ocasión se va a medir la media y la desviación de la frecuencia de muestreo de acelerómetro y campo magnético realizando recorridos a 5 Hz, 10Hz y 20 Hz. A



continuación se muestran las imágenes correspondientes al campo magnético, ya que como se ha comentado anteriormente Android no utiliza este valor para el acelerómetro.

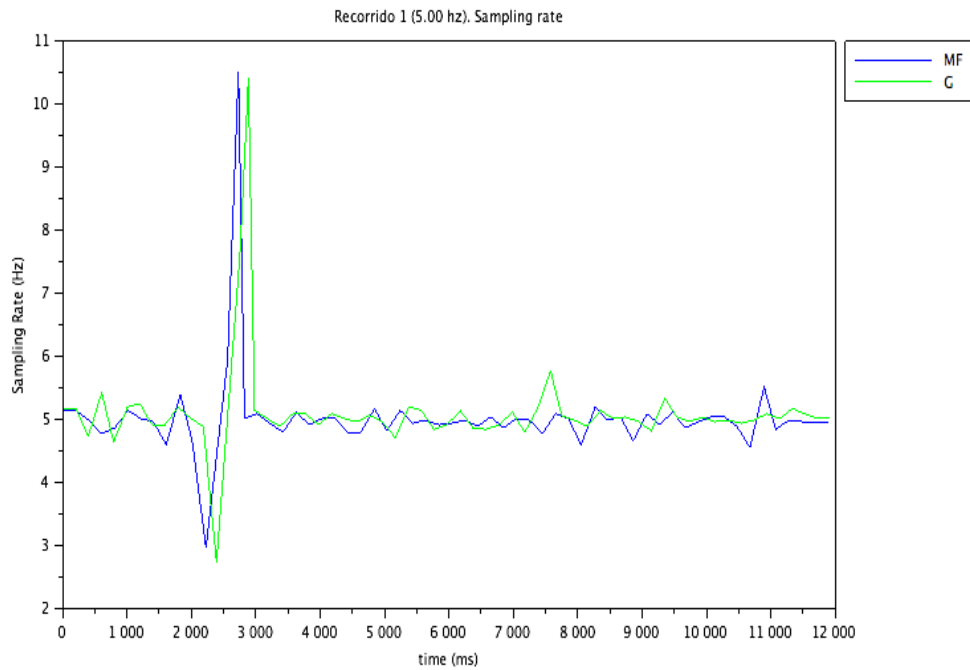


Figura 10: Frecuencia de muestreo del campo magnético y giroscopio durante un recorrido capturado a 5.00 Hz

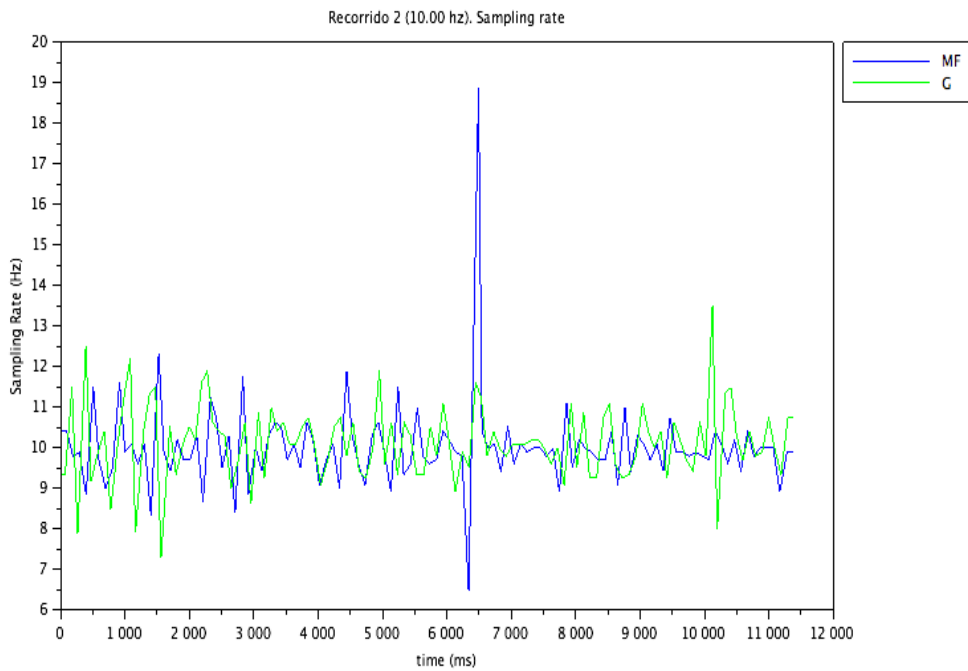


Figura 11: Frecuencia de muestreo del campo magnético y giroscopio durante un recorrido capturado a 10.00 Hz

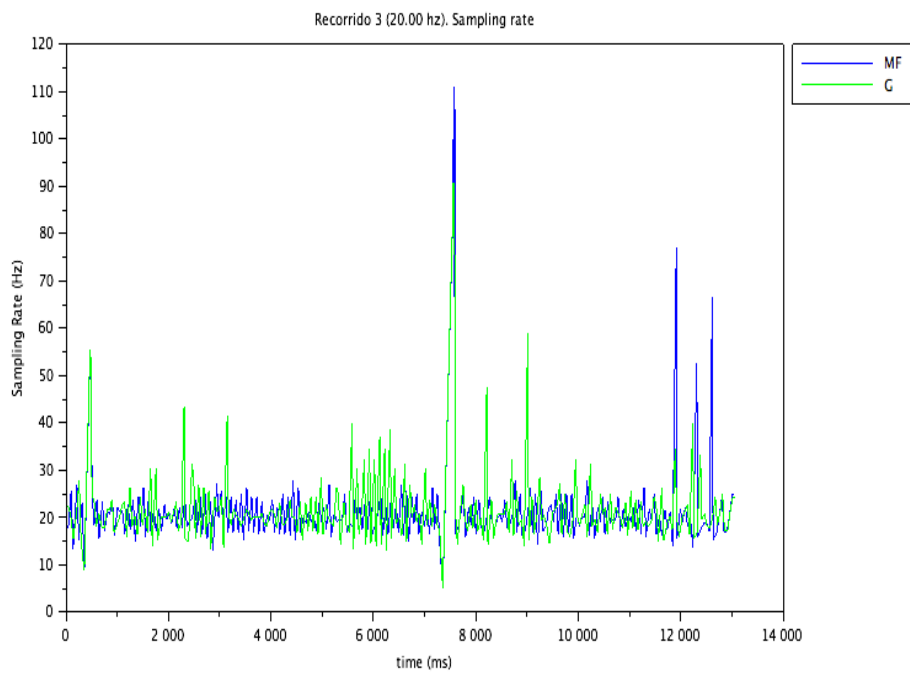


Figura 12: Frecuencia de muestreo del campo magnético y giroscopio durante un recorrido capturado a 20.00 Hz



En la tabla 6 se muestra un resumen de los datos obtenidos:

Recorrido	Freq muestreo	Acelerómetro		Campo Magnético	
		Media	Desviación	Media	Desviación
1	5,00	230,18	226,21	5,05	0,79
2	10,00	237,51	184,83	10,03	1,12
3	20,00	335,71	309,05	22,01	11,10

Tabla 6: Media y desviación de la frecuencia de muestreo del acelerómetro y campo magnético en recorridos realizados con diferentes frecuencias de muestreo

Es importante resaltar que parte de estas imprecisiones pueden deberse a que la aplicación no sea capaz de responder a los eventos disparados por los sensores a la velocidad necesaria, por ello se recomienda ajustar la frecuencia al mínimo valor que realmente se considere necesario y evitar la captura de datos en aquellos sensores que no se vayan a necesitar.

De las observaciones realizadas en este apartado se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La frecuencia de muestreo que se indica a los sensores va a ser en realidad el valor mínimo de ésta, pero no se puede esperar un muestreo uniforme.
- En el caso del campo magnético cuando la frecuencia de muestreo es baja la precisión es aceptable, pero a medida que se aumenta la frecuencia los errores crecen considerablemente.
- En el caso del acelerómetro Android no sigue la recomendación que se le da, pero la frecuencia de muestreo es muy superior.
- Estas diferencias en la toma de datos de diferentes sensores sugieren la necesidad de calcular interpolaciones si se desea tener la posibilidad de analizar en el mismo instante las muestras de sensores diferentes.
- En cualquier caso, la velocidad de una persona caminando es de 1.6 m/s de media<sup>6</sup>, así que una frecuencia de muestreo de 5 Hz parece más que razonable en el ámbito de este proyecto, por lo tanto es la que se usará en el resto de los experimentos.

<sup>6</sup> [https://es.wikipedia.org/wiki/Kil%C3%B3metro\\_por\\_hora](https://es.wikipedia.org/wiki/Kil%C3%B3metro_por_hora)



### 7.3 Localización de celdas en cuadrículas

A continuación se describe el proceso realizado durante la realización de experimentos con los datos de las cuadrículas, con el objetivo de determinar si es posible localizar una determinada medición en una celda de la cuadrícula.

#### 7.3.1 Estimación de la posición mediante la media, mediana y moda

Para poder predecir la precisión con la que se comportaría el sistema de reconocimiento se han realizado una serie de experimentos en los que los mismos datos muestreados para la obtención de las huellas servirán como candidatos para probar el cálculo de la localización mediante el algoritmo k-NN con un valor de  $k=1$ .

En la tabla 7 se muestran los resultados calculados para las muestras del pasillo, utilizando como característica la media de del módulo del campo magnético.

Huellas del Pasillo usando la media		Probabilidad de acierto por celda	
Media <sub>1,1</sub> = 101,06	Media <sub>1,2</sub> = 99,05	PA <sub>1,1</sub> = 0,23	PA <sub>1,2</sub> = 0,90
Media <sub>2,1</sub> = 101,78	Media <sub>2,2</sub> = 100,50	PA <sub>2,1</sub> = 0,26	PA <sub>2,2</sub> = 0,60
Media <sub>3,1</sub> = 105,30	Media <sub>3,2</sub> = 107,81	PA <sub>3,1</sub> = 0,77	PA <sub>3,2</sub> = 0,98
Media <sub>4,1</sub> = 101,66	Media <sub>4,2</sub> = 102,51	PA <sub>4,1</sub> = 0,07	PA <sub>4,2</sub> = 0,51
Media <sub>5,1</sub> = 103,86	Media <sub>5,2</sub> = 101,53	PA <sub>5,1</sub> = 0,74	PA <sub>5,2</sub> = 0,23
		Media:	0,53

Tabla 7: Resultados del algoritmo k-NN para la cuadrícula del pasillo usando la media

Como se puede observar, los valores de la media en cada celda son muy cercanos, y por tanto es difícil identificar de forma unívoca una celda a partir de la medida del campo magnético. En este caso la posibilidad de acierto es del 53%, que no se puede considerar suficiente. Además la distribución de los aciertos por celda no es uniforme, detectándose una posibilidad de acierto del 98% para las muestras de la celda [3,2] frente a un 7% de la celda [4,1].

En la tabla 8 se puede comprobar que si se repite el experimento sobre las celdas del vestíbulo los resultados son aún peores.



Huellas del Vestíbulo usando la media		
Media <sub>1,1</sub> = 87,86	Media <sub>1,2</sub> = 84,35	Media <sub>1,3</sub> = 87,42
Media <sub>2,1</sub> = 87,25	Media <sub>2,2</sub> = 85,75	Media <sub>2,3</sub> = 87,67
Media <sub>3,1</sub> = 84,56	Media <sub>3,2</sub> = 85,74	Media <sub>3,3</sub> = 85,81
Media <sub>4,1</sub> = 83,84	Media <sub>4,2</sub> = 78,64	Media <sub>4,3</sub> = 80,18
Media <sub>5,1</sub> = 85,45	Media <sub>5,2</sub> = 82,35	Media <sub>5,3</sub> = 80,12
Media <sub>6,1</sub> = 87,29	Media <sub>6,2</sub> = 80,91	Media <sub>6,3</sub> = 82,58
Media <sub>7,1</sub> = 85,99	Media <sub>7,2</sub> = 82,20	Media <sub>7,3</sub> = 83,96
Media <sub>8,1</sub> = 81,92	Media <sub>8,2</sub> = 81,42	Media <sub>8,3</sub> = 82,15
Media <sub>9,1</sub> = 77,96	Media <sub>9,2</sub> = 80,68	Media <sub>9,3</sub> = 79,54
Media <sub>10,1</sub> = 78,01	Media <sub>10,2</sub> = 80,87	Media <sub>10,3</sub> = 81,56
Media <sub>11,1</sub> = 78,79	Media <sub>11,2</sub> = 82,56	Media <sub>11,3</sub> = 82,25
Media <sub>12,1</sub> = 85,91	Media <sub>12,2</sub> = 84,96	Media <sub>12,3</sub> = 83,60

Probabilidad de acierto por celda		
PA <sub>1,1</sub> = 0,50	PA <sub>1,2</sub> = 0,13	PA <sub>1,3</sub> = 0,05
PA <sub>2,1</sub> = 0,28	PA <sub>2,2</sub> = 0,00	PA <sub>2,3</sub> = 0,07
PA <sub>3,1</sub> = 0,09	PA <sub>3,2</sub> = 0,05	PA <sub>3,3</sub> = 0,03
PA <sub>4,1</sub> = 0,05	PA <sub>4,2</sub> = 0,16	PA <sub>4,3</sub> = 0,11
PA <sub>5,1</sub> = 0,15	PA <sub>5,2</sub> = 0,08	PA <sub>5,3</sub> = 0,05
PA <sub>6,1</sub> = 0,01	PA <sub>6,2</sub> = 0,06	PA <sub>6,3</sub> = 0,11
PA <sub>7,1</sub> = 0,15	PA <sub>7,2</sub> = 0,03	PA <sub>7,3</sub> = 0,03
PA <sub>8,1</sub> = 0,07	PA <sub>8,2</sub> = 0,11	PA <sub>8,3</sub> = 0,06
PA <sub>9,1</sub> = 0,62	PA <sub>9,2</sub> = 0,17	PA <sub>9,3</sub> = 0,19
PA <sub>10,1</sub> = 0,09	PA <sub>10,2</sub> = 0,01	PA <sub>10,3</sub> = 0,01
PA <sub>11,1</sub> = 0,08	PA <sub>11,2</sub> = 0,05	PA <sub>11,3</sub> = 0,02
PA <sub>12,1</sub> = 0,02	PA <sub>12,2</sub> = 0,09	PA <sub>12,3</sub> = 0,19
Media:		0,11

Tabla 8: Resultados del algoritmo k-NN para la cuadrícula del vestíbulo usando la media

La distribución de la media sigue sin presentar alteraciones importantes, pero al aumentar el número de celdas se aumenta considerablemente la tasa de error. En esta ocasión la probabilidad de éxito es del 11%. De nuevo se pueden apreciar grandes diferencias en el porcentaje de acierto a lo largo de las celdas, pasando del 0% de la celda [2,2] al 62% de la celda [9,1].

En las figuras 13 y 14 se muestra de forma tridimensional la distribución de la media a lo largo de las cuadrículas del pasillo y vestíbulo respectivamente. Los valores del campo magnético se han desplazado con la intención de centrarlos sobre el eje Z, para poder así observar la variación del campo magnético a medida que nos desplazamos por las celdas. A la derecha de las gráficas se muestra un plano de la zona en el que se han marcado los puntos en los que se tomaron las muestras.

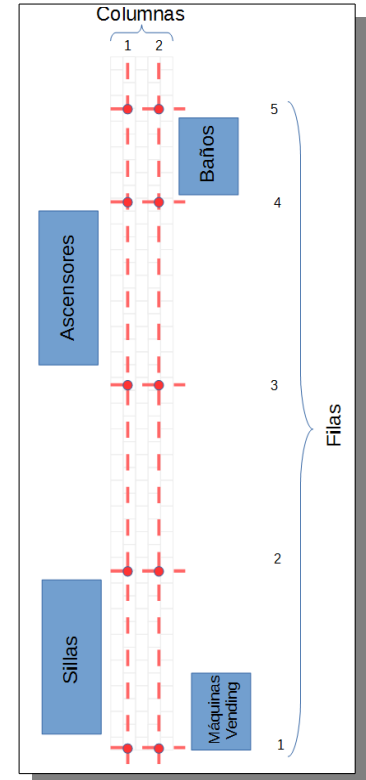
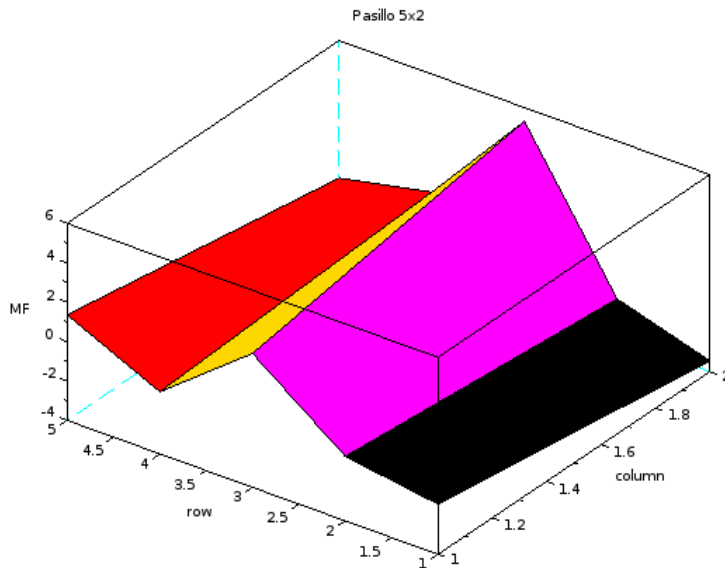


Figura 13: Variación del valor medio del campo magnético en las celdas de la cuadrícula del pasillo

En la cuadrícula del pasillo la diferencia entre el valor mínimo y máximo de las medias calculadas es de  $8.76\mu\text{T}$ . En los experimentos anteriores se ha concluido que la variabilidad atribuible a errores de los sensores es menor a  $1\mu\text{T}$ , y la relacionada con las pequeñas variaciones en la orientación del móvil inferiores a  $2\mu\text{T}$ , así que una variabilidad de  $8.76\mu\text{T}$  indica que se aprecian alteraciones del campo magnético producidas por elementos estructurales del edificio. En el caso del vestíbulo el rango de valores de la media aumenta hasta los  $9.90\mu\text{T}$ .

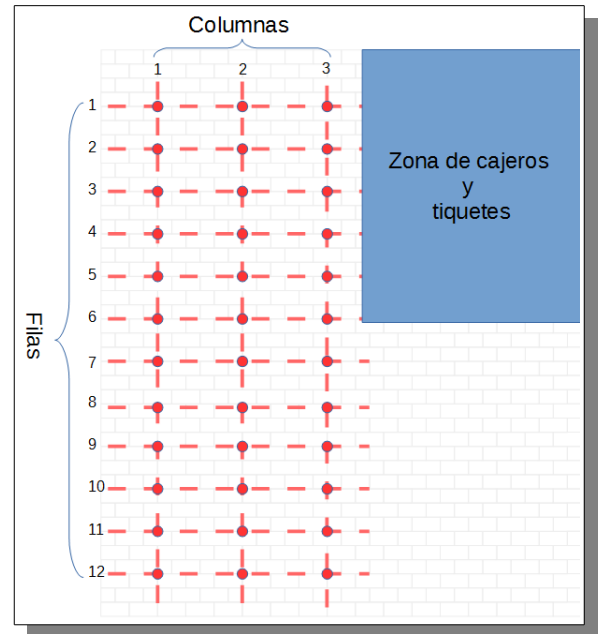
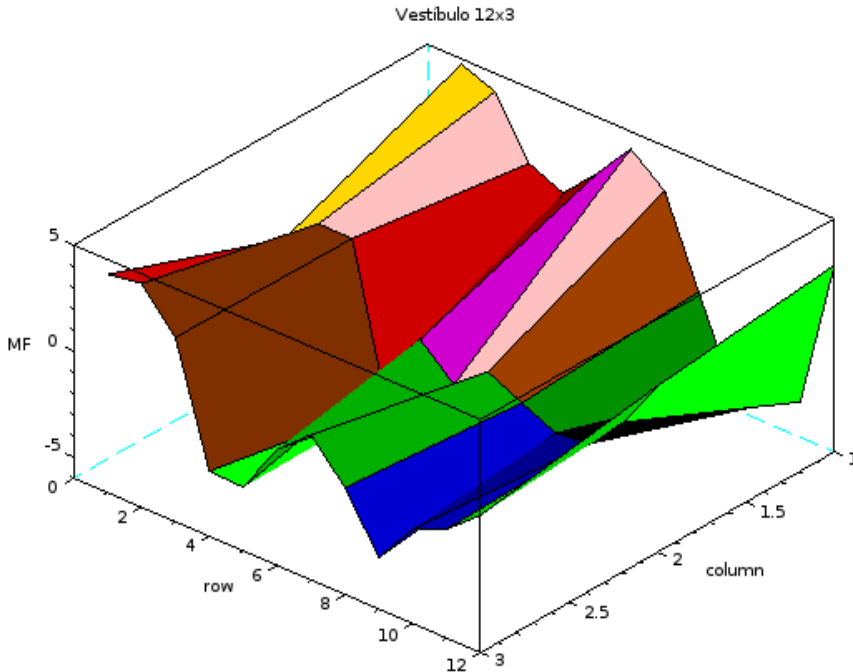


Figura 14: Variación del valor medio del campo magnético en las celdas de la cuadrícula del vestíbulo

En las tablas 9 y 10 se muestran los resultados del experimento usando la mediana como característica, en el pasillo y vestíbulo respectivamente.

Huellas del Pasillo usando la mediana	
Mediana <sub>1,1</sub> = 100,94	Mediana <sub>1,2</sub> = 99,09
Mediana <sub>2,1</sub> = 101,77	Mediana <sub>2,2</sub> = 100,47
Mediana <sub>3,1</sub> = 105,27	Mediana <sub>3,2</sub> = 107,70
Mediana <sub>4,1</sub> = 101,61	Mediana <sub>4,2</sub> = 102,49
Mediana <sub>5,1</sub> = 103,83	Mediana <sub>5,2</sub> = 101,48

Probabilidad de acierto por celda	
PA <sub>1,1</sub> = 0,22	PA <sub>1,2</sub> = 0,90
PA <sub>2,1</sub> = 0,24	PA <sub>2,2</sub> = 0,56
PA <sub>3,1</sub> = 0,77	PA <sub>3,2</sub> = 0,99
PA <sub>4,1</sub> = 0,11	PA <sub>4,2</sub> = 0,52
PA <sub>5,1</sub> = 0,74	PA <sub>5,2</sub> = 0,27
Media:	0,53

Tabla 9: Resultados del algoritmo k-NN para la cuadrícula del pasillo usando la mediana





Huellas del Vestíbulo usando la mediana		
Mediana <sub>1,1</sub> = 87,81	Mediana <sub>1,2</sub> = 84,32	Mediana <sub>1,3</sub> = 87,06
Mediana <sub>2,1</sub> = 87,05	Mediana <sub>2,2</sub> = 85,81	Mediana <sub>2,3</sub> = 87,54
Mediana <sub>3,1</sub> = 84,32	Mediana <sub>3,2</sub> = 85,48	Mediana <sub>3,3</sub> = 85,89
Mediana <sub>4,1</sub> = 84,00	Mediana <sub>4,2</sub> = 78,55	Mediana <sub>4,3</sub> = 80,07
Mediana <sub>5,1</sub> = 85,29	Mediana <sub>5,2</sub> = 82,23	Mediana <sub>5,3</sub> = 79,82
Mediana <sub>6,1</sub> = 87,52	Mediana <sub>6,2</sub> = 80,85	Mediana <sub>6,3</sub> = 82,31
Mediana <sub>7,1</sub> = 85,69	Mediana <sub>7,2</sub> = 81,96	Mediana <sub>7,3</sub> = 83,78
Mediana <sub>8,1</sub> = 81,80	Mediana <sub>8,2</sub> = 81,22	Mediana <sub>8,3</sub> = 82,09
Mediana <sub>9,1</sub> = 77,64	Mediana <sub>9,2</sub> = 80,63	Mediana <sub>9,3</sub> = 79,63
Mediana <sub>10,1</sub> = 78,44	Mediana <sub>10,2</sub> = 80,28	Mediana <sub>10,3</sub> = 80,65
Mediana <sub>11,1</sub> = 78,59	Mediana <sub>11,2</sub> = 82,52	Mediana <sub>11,3</sub> = 82,12
Mediana <sub>12,1</sub> = 86,69	Mediana <sub>12,2</sub> = 84,97	Mediana <sub>12,3</sub> = 83,64

Probabilidad de acierto por celda		
PA <sub>1,1</sub> = 0,56	PA <sub>1,2</sub> = 0,07	PA <sub>1,3</sub> = 0,09
PA <sub>2,1</sub> = 0,10	PA <sub>2,2</sub> = 0,07	PA <sub>2,3</sub> = 0,07
PA <sub>3,1</sub> = 0,09	PA <sub>3,2</sub> = 0,09	PA <sub>3,3</sub> = 0,18
PA <sub>4,1</sub> = 0,11	PA <sub>4,2</sub> = 0,03	PA <sub>4,3</sub> = 0,10
PA <sub>5,1</sub> = 0,09	PA <sub>5,2</sub> = 0,03	PA <sub>5,3</sub> = 0,03
PA <sub>6,1</sub> = 0,06	PA <sub>6,2</sub> = 0,09	PA <sub>6,3</sub> = 0,03
PA <sub>7,1</sub> = 0,03	PA <sub>7,2</sub> = 0,07	PA <sub>7,3</sub> = 0,04
PA <sub>8,1</sub> = 0,13	PA <sub>8,2</sub> = 0,18	PA <sub>8,3</sub> = 0,04
PA <sub>9,1</sub> = 0,64	PA <sub>9,2</sub> = 0,10	PA <sub>9,3</sub> = 0,17
PA <sub>10,1</sub> = 0,13	PA <sub>10,2</sub> = 0,08	PA <sub>10,3</sub> = 0,03
PA <sub>11,1</sub> = 0,13	PA <sub>11,2</sub> = 0,20	PA <sub>11,3</sub> = 0,02
PA <sub>12,1</sub> = 0,09	PA <sub>12,2</sub> = 0,10	PA <sub>12,3</sub> = 0,19
Media:		0,12

Tabla 10: Resultados del algoritmo k-NN para la cuadrícula del vestíbulo usando la mediana

En las tablas 11 y 12 se muestran los resultados del experimento usando la moda como característica, en el pasillo y vestíbulo respectivamente.

Huellas del Pasillo usando la moda	
Moda <sub>1,1</sub> = 101,60	Moda <sub>1,2</sub> = 99,39
Moda <sub>2,1</sub> = 101,39	Moda <sub>2,2</sub> = 100,11
Moda <sub>3,1</sub> = 105,51	Moda <sub>3,2</sub> = 106,68
Moda <sub>4,1</sub> = 101,67	Moda <sub>4,2</sub> = 103,14
Moda <sub>5,1</sub> = 103,78	Moda <sub>5,2</sub> = 101,34

Probabilidad de acierto por celda	
PA <sub>1,1</sub> = 0,06	PA <sub>1,2</sub> = 0,88
PA <sub>2,1</sub> = 0,07	PA <sub>2,2</sub> = 0,60
PA <sub>3,1</sub> = 0,64	PA <sub>3,2</sub> = 1,00
PA <sub>4,1</sub> = 0,35	PA <sub>4,2</sub> = 0,47
PA <sub>5,1</sub> = 0,65	PA <sub>5,2</sub> = 0,32
Media:	
0,50	

Tabla 11: Resultados del algoritmo k-NN para la cuadrícula del pasillo usando la moda

Huellas del Vestíbulo usando la moda		
Moda <sub>1,1</sub> = 86,97	Moda <sub>1,2</sub> = 84,67	Moda <sub>1,3</sub> = 87,56
Moda <sub>2,1</sub> = 86,92	Moda <sub>2,2</sub> = 86,56	Moda <sub>2,3</sub> = 87,92
Moda <sub>3,1</sub> = 85,13	Moda <sub>3,2</sub> = 85,24	Moda <sub>3,3</sub> = 86,10
Moda <sub>4,1</sub> = 84,60	Moda <sub>4,2</sub> = 78,69	Moda <sub>4,3</sub> = 80,89
Moda <sub>5,1</sub> = 85,31	Moda <sub>5,2</sub> = 82,11	Moda <sub>5,3</sub> = 82,22
Moda <sub>6,1</sub> = 88,38	Moda <sub>6,2</sub> = 80,85	Moda <sub>6,3</sub> = 83,98
Moda <sub>7,1</sub> = 86,61	Moda <sub>7,2</sub> = 82,19	Moda <sub>7,3</sub> = 83,19
Moda <sub>8,1</sub> = 82,17	Moda <sub>8,2</sub> = 80,99	Moda <sub>8,3</sub> = 81,17
Moda <sub>9,1</sub> = 77,59	Moda <sub>9,2</sub> = 80,60	Moda <sub>9,3</sub> = 79,46
Moda <sub>10,1</sub> = 79,25	Moda <sub>10,2</sub> = 79,46	Moda <sub>10,3</sub> = 85,14
Moda <sub>11,1</sub> = 77,70	Moda <sub>11,2</sub> = 85,06	Moda <sub>11,3</sub> = 82,56
Moda <sub>12,1</sub> = 85,46	Moda <sub>12,2</sub> = 83,78	Moda <sub>12,3</sub> = 82,80

Probabilidad de acierto por celda		
PA <sub>1,1</sub> = 0,10	PA <sub>1,2</sub> = 0,11	PA <sub>1,3</sub> = 0,14
PA <sub>2,1</sub> = 0,10	PA <sub>2,2</sub> = 0,07	PA <sub>2,3</sub> = 0,17
PA <sub>3,1</sub> = 0,02	PA <sub>3,2</sub> = 0,05	PA <sub>3,3</sub> = 0,22
PA <sub>4,1</sub> = 0,16	PA <sub>4,2</sub> = 0,30	PA <sub>4,3</sub> = 0,03
PA <sub>5,1</sub> = 0,05	PA <sub>5,2</sub> = 0,18	PA <sub>5,3</sub> = 0,05
PA <sub>6,1</sub> = 0,32	PA <sub>6,2</sub> = 0,05	PA <sub>6,3</sub> = 0,03
PA <sub>7,1</sub> = 0,04	PA <sub>7,2</sub> = 0,03	PA <sub>7,3</sub> = 0,12
PA <sub>8,1</sub> = 0,04	PA <sub>8,2</sub> = 0,07	PA <sub>8,3</sub> = 0,21
PA <sub>9,1</sub> = 0,50	PA <sub>9,2</sub> = 0,34	PA <sub>9,3</sub> = 0,19
PA <sub>10,1</sub> = 0,12	PA <sub>10,2</sub> = 0,00	PA <sub>10,3</sub> = 0,01
PA <sub>11,1</sub> = 0,13	PA <sub>11,2</sub> = 0,03	PA <sub>11,3</sub> = 0,12
PA <sub>12,1</sub> = 0,09	PA <sub>12,2</sub> = 0,11	PA <sub>12,3</sub> = 0,12
Media:		0,12

Tabla 12: Resultados del algoritmo k-NN para la cuadrícula del vestíbulo usando la moda



Como se puede observar, los resultados para las tres características son muy similares, lo que indica que pueden usarse indistintamente en el sistema propuesto. En cualquier caso, sería necesario realizar muestreos de todas las zonas del hospital para seleccionar cuál de las características presenta un mejor comportamiento.

En vista de los resultados obtenidos, en el siguiente apartado se procederá a ampliar el área representada por las huellas para comprobar si mejora la precisión.

### 7.3.2 Extensión del tamaño de la cuadrícula

En el apartado anterior se pudo comprobar que la precisión del algoritmo de reconocimiento no es suficiente para detectar a qué celda pertenece cada una de las muestras de una cuadrícula, pero se ha de tener en cuenta que la distancia entre las celdas es muy reducida, y aunque utilizando otros sistemas como Wifi fingerprinting se podría alcanzar esa precisión, en el caso del campo magnético la variabilidad local no es suficiente para obtener unos resultados aceptables. En este apartado se va a extender la búsqueda a un espacio mayor para estudiar el comportamiento del algoritmo de reconocimiento.

En primer lugar se va a realizar un reconocimiento por filas, es decir, es este caso la característica calculada en cada celda va a servir para identificar la fila en lugar de la celda. Se mostrarán tan solo los resultados calculados para la media, ya que al igual que ocurría en el apartado anterior, el comportamiento de la mediana y la moda es prácticamente idéntico.

Probabilidad de acierto en fila por celda del Pasillo			
$PA_{1,1} =$	0,25	$PA_{1,2} =$	0,91
$PA_{2,1} =$	0,32	$PA_{2,2} =$	0,62
$PA_{3,1} =$	0,81	$PA_{3,2} =$	1,00
$PA_{4,1} =$	0,26	$PA_{4,2} =$	0,53
$PA_{5,1} =$	0,74	$PA_{5,2} =$	0,24
	Media:		0,57

Probabilidad de acierto en fila por celda del vestíbulo					
$PA_{1,1} =$	0,62	$PA_{1,2} =$	0,13	$PA_{1,3} =$	0,30
$PA_{2,1} =$	0,35	$PA_{2,2} =$	0,09	$PA_{2,3} =$	0,28
$PA_{3,1} =$	0,10	$PA_{3,2} =$	0,16	$PA_{3,3} =$	0,09
$PA_{4,1} =$	0,05	$PA_{4,2} =$	0,18	$PA_{4,3} =$	0,17
$PA_{5,1} =$	0,15	$PA_{5,2} =$	0,09	$PA_{5,3} =$	0,09
$PA_{6,1} =$	0,01	$PA_{6,2} =$	0,12	$PA_{6,3} =$	0,16
$PA_{7,1} =$	0,20	$PA_{7,2} =$	0,06	$PA_{7,3} =$	0,10
$PA_{8,1} =$	0,30	$PA_{8,2} =$	0,23	$PA_{8,3} =$	0,34
$PA_{9,1} =$	0,70	$PA_{9,2} =$	0,32	$PA_{9,3} =$	0,47
$PA_{10,1} =$	0,10	$PA_{10,2} =$	0,06	$PA_{10,3} =$	0,03
$PA_{11,1} =$	0,09	$PA_{11,2} =$	0,07	$PA_{11,3} =$	0,09
$PA_{12,1} =$	0,09	$PA_{12,2} =$	0,23	$PA_{12,3} =$	0,26
			Media:		0,19

Tabla 13: Resultados del algoritmo k-NN para las cuadrícula del vestíbulo y pasillo usando la media para localizar la fila



En los datos de la tabla 13 sigue llamando la atención la diferencia entre la probabilidad media en el pasillo, que ya es del 57% frente al 19% del vestíbulo, pero se debe tener en cuenta que en el vestíbulo existen menos elementos físicos capaces de alterar el campo magnético.

A continuación se calculan las probabilidades para realizar un reconocimiento por columnas, es decir, la media calculada en cada celda va a servir para identificar la columna en la que se encuentra.

Probabilidad de acierto en columna por celda del pasillo		
$PA_{1,1} =$	0,45	$PA_{1,2} =$ 0,99
$PA_{2,1} =$	0,52	$PA_{2,2} =$ 0,75
$PA_{3,1} =$	0,96	$PA_{3,2} =$ 0,98
$PA_{4,1} =$	0,53	$PA_{4,2} =$ 0,59
$PA_{5,1} =$	0,87	$PA_{5,2} =$ 0,58
	Media:	0,72

Probabilidad de acierto en columna por celda del vestíbulo					
$PA_{1,1} =$	0,77	$PA_{1,2} =$	0,28	$PA_{1,3} =$	0,15
$PA_{2,1} =$	0,85	$PA_{2,2} =$	0,28	$PA_{2,3} =$	0,19
$PA_{3,1} =$	0,37	$PA_{3,2} =$	0,33	$PA_{3,3} =$	0,14
$PA_{4,1} =$	0,30	$PA_{4,2} =$	0,18	$PA_{4,3} =$	0,54
$PA_{5,1} =$	0,60	$PA_{5,2} =$	0,38	$PA_{5,3} =$	0,37
$PA_{6,1} =$	0,79	$PA_{6,2} =$	0,34	$PA_{6,3} =$	0,42
$PA_{7,1} =$	0,66	$PA_{7,2} =$	0,43	$PA_{7,3} =$	0,40
$PA_{8,1} =$	0,11	$PA_{8,2} =$	0,33	$PA_{8,3} =$	0,41
$PA_{9,1} =$	0,78	$PA_{9,2} =$	0,45	$PA_{9,3} =$	0,46
$PA_{10,1} =$	0,57	$PA_{10,2} =$	0,30	$PA_{10,3} =$	0,56
$PA_{11,1} =$	0,52	$PA_{11,2} =$	0,30	$PA_{11,3} =$	0,39
$PA_{12,1} =$	0,58	$PA_{12,2} =$	0,18	$PA_{12,3} =$	0,54
			Media:		0,42

Tabla 14: Resultados del algoritmo k-NN para las cuadrícula del vestíbulo y pasillo usando la media para localizar la columna

En la tabla 14 se observa que la localización de la columna en las celdas del pasillo llega hasta el 72% frente al 42% en el vestíbulo.

Pero si se amplía el reconocimiento a nivel de cuadrícula, es decir, creando una huella por cada celda capaz de localizar la cuadrícula en la que se encuentra, y por tanto discriminando si se trata de una muestra del pasillo o del vestíbulo la probabilidad de acierto es prácticamente del 100%



Analizando los datos anteriores se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Se observan alteraciones del campo magnético no atribuibles a errores en los sensores ni giros en la orientación del móvil.
- La media, mediana y la moda tienen un comportamiento muy similar a la hora de representar los valores asociados a las huellas.
- La variabilidad local del campo magnético no es suficiente para localizar un punto concreto dentro del mapa de huellas, aunque aumenta a medida que se incrementa la distancia entre las celdas de la cuadrícula.
- Parece necesario recurrir a un análisis de la evolución del campo a lo largo de un recorrido para obtener mejores resultados.

#### **7.4 Experimentos con recorridos**

En los experimentos anteriores se ha analizado el comportamiento del campo magnético de forma estática, es decir se establecía una cuadrícula y se tomaban medidas en cada posición, pero durante la toma de medidas el usuario no se movía. A continuación se estudian las alteraciones en el campo magnético cuando el usuario realiza un recorrido a pié.

En estas circunstancias se presentan nuevos aspectos que se deben tener en cuenta:

- Durante un recorrido se van a producir inevitablemente cambios en la orientación del dispositivo móvil. Aunque se intente mantener orientado del mismo modo que se hacía al medir las celdas de la cuadrícula, el propio balanceo del cuerpo al andar va a producir variaciones en orientación.
- Ahora no se puede predecir la posición en la que se toman las medidas. Se conoce el punto en el que se inicia el recorrido, pero al no tener referencias sobre la velocidad ni la orientación con la que se desplaza el usuario no se puede calcular el punto en el que se encuentra en cada momento.



### 7.4.1 Comparación de recorridos con cuadrículas

En este primer experimento se van a comparar las medidas muestreadas a lo largo de un recorrido con las huellas extraídas mediante las cuadrículas. Las estimaciones se basan en las huellas calculadas usando como característica la media del campo magnético en cada celda.

El procedimiento empleado sería el siguiente:

1. Para cada celda de cada cuadrícula se crea una huella en la que el valor sería el campo magnético caracterizado mediante la media, y la posición se correspondería con la localización de la celda, es decir, sería una tripleta formada por los identificadores de la cuadrícula, la fila y la columna.
2. Para cada muestra del recorrido se ejecuta el algoritmo k-NN para identificar las posiciones (cuadrícula, fila y columna) en la que se estima la posición.

Se analizará en primer lugar uno de los recorridos del vestíbulo. En la figura 15 se puede ver la evolución del campo magnético durante el recorrido.

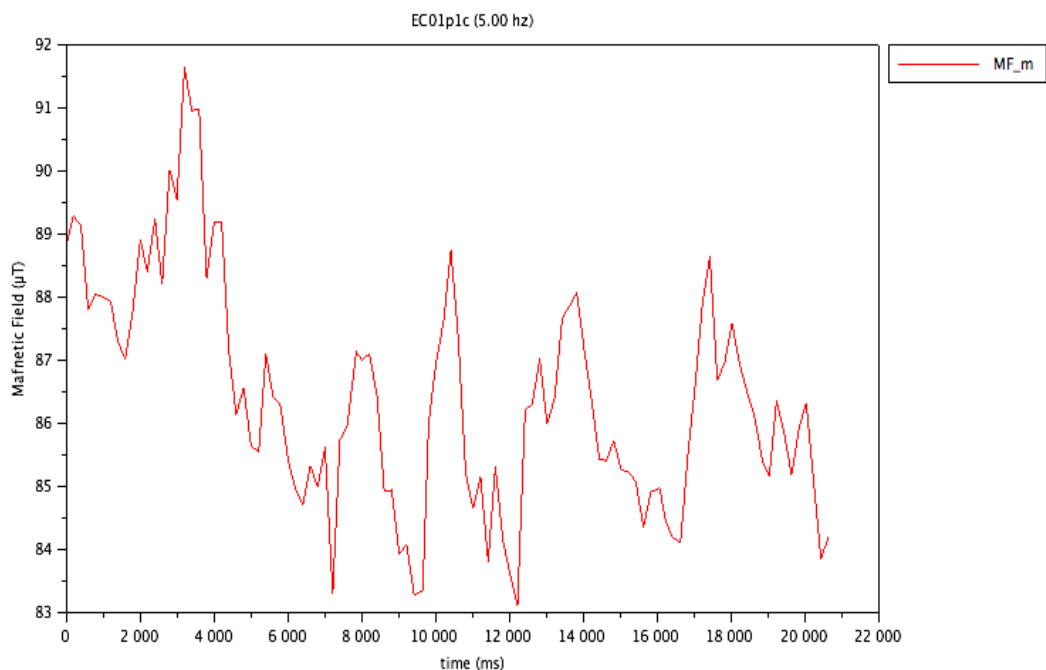
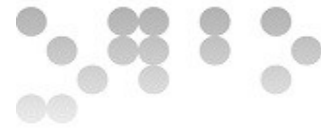


Figura 15: Variación del campo magnético en un recorrido sobre el vestíbulo



El campo magnético se mueve entre un rango de valores de  $83.13 \mu\text{T}$  a  $91.64 \mu\text{T}$ . El aspecto de la gráfica en forma de pico de sierra es consecuencia de las alteraciones de la señal debida a los cambios de orientación del dispositivo. En la figura 16 se muestran los valores del acelerómetro para el mismo recorrido, donde se pueden observar los picos de la señal que coinciden con los pasos realizados durante el recorrido.

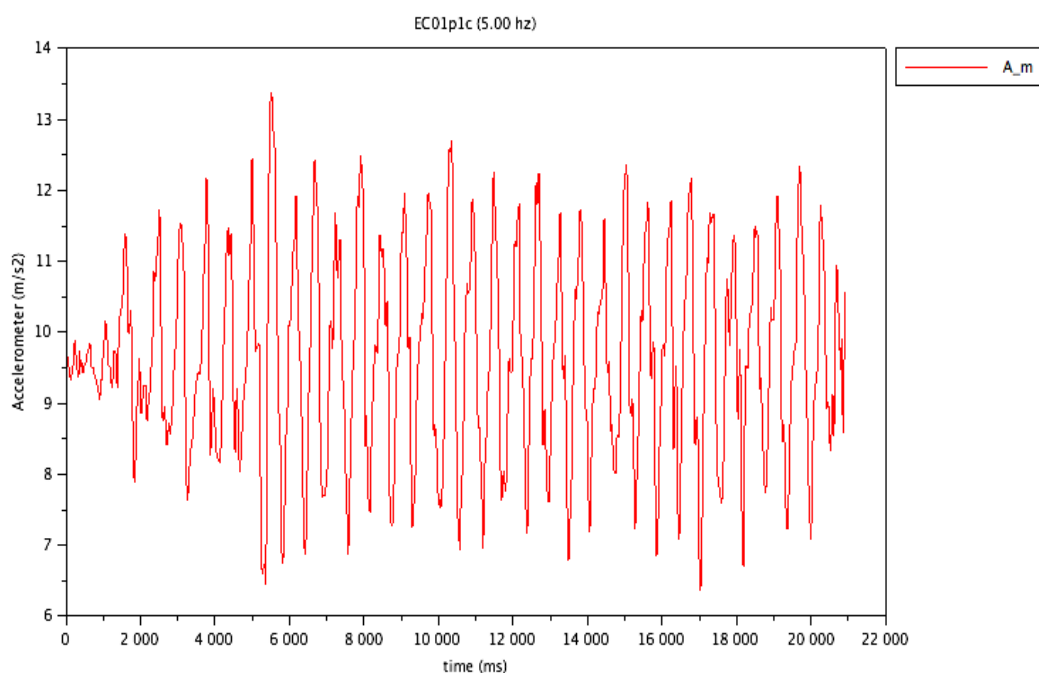


Figura 16: Variación del acelerómetro en un recorrido sobre el vestíbulo

Para poder comparar ambos sensores ha sido necesario realizar una interpolación de ambas señales, ya que como se ha comentado anteriormente sus frecuencias de muestreo son diferentes. Además se han normalizado los valores del acelerómetro para que su máximo y mínimo coincidan con los del campo magnético, con objeto de que puedan ser comparables de forma gráfica. En la figura 17 se muestran gráficamente los resultados.

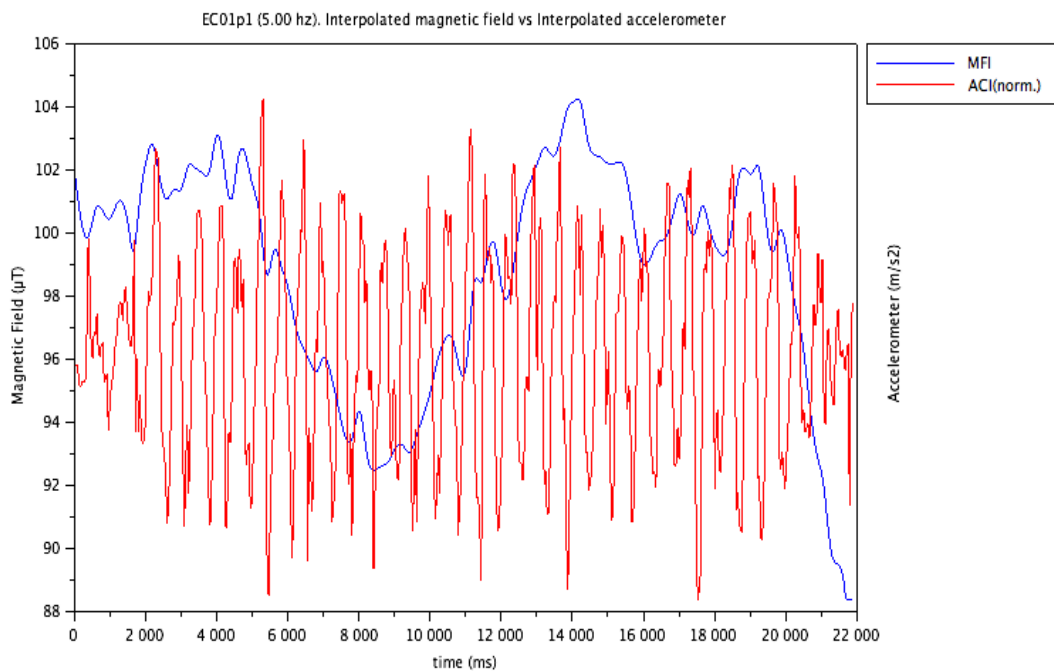


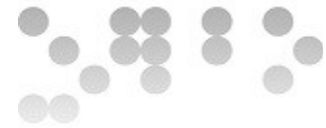
Figura 17: Comparativa del campo magnético y el acelerómetro en un recorrido sobre el vestíbulo

Como ya ha sido analizado en experimentos anteriores, esas pequeñas perturbaciones inferiores a  $1 \mu\text{T}$  se deben a los movimientos en la orientación del sensor, sin embargo se puede apreciar como a lo largo del recorrido se producen cambios muy superiores del campo magnético, que se pueden atribuir a alteraciones producidas por los elementos estructurales situados en las posiciones por las que va pasando el usuario durante su recorrido.

Al ejecutar el algoritmo k-NN (con  $k=1$ ) para estos valores, tomando como referencia las huellas capturadas mediante las cuadrículas se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 15, en la que se representa para cada celda de la cuadrícula del vestíbulo el número de veces que dicha celda se estima como la posición del usuario a lo largo del recorrido.







En la figura 18 se puede apreciar como muchas de las localizaciones se concentran en ciertos puntos concretos de la cuadrícula. Estos son los puntos que se podrían considerar como referencias a buscar durante la fase de reconocimiento. La localización mediante campos magnéticos no permite estimar la zona concreta en la que se encuentra el objetivo, pero durante los recorridos se reconocen puntos de referencias susceptibles de ser reconocidos mediante algoritmos de cálculo de patrones.

Se va a analizar también el comportamiento del algoritmo k-NN para diferentes valores de k. Hay que recordar que el significado de este parámetro es el número de celdas cercanas que se van a obtener en cada localización, así, si se toma como referencia un valor de k=3 se estarían obteniendo las 3 celdas estimadas como más cercanas a la posición que se intenta localizar.

A continuación se muestran las tablas y gráficas de localizaciones para k=3 y k=5.

Localizaciones para k=3					Localizaciones para k=5				
FILAS					FILAS				
1					1				
2					2				
3					3				
4					4				
5					5				
6					6				
7					7				
8					8				
9					9				
10					10				
11					11				
12					12				
COLUMNAS	1	27	9	40	COLUMNAS	1	40	19	42
	2	16	11	27		2	44	36	40
	3	14	18	21		3	23	42	34
	4	10	0	0		4	15	0	0
	5	22	0	0		5	26	1	0
	6	15	0	1		6	44	0	4
	7	19	0	13		7	22	0	16
	8	0	0	0		8	0	0	0
	9	0	0	0		9	0	0	0
	10	0	0	0		10	0	0	0
	11	0	1	0		11	0	4	0
	12	18	19	8		12	27	23	13

Tabla 16: Localizaciones de un recorrido del vestíbulo mediante las huellas de las cuadrículas (k=3, k=5)

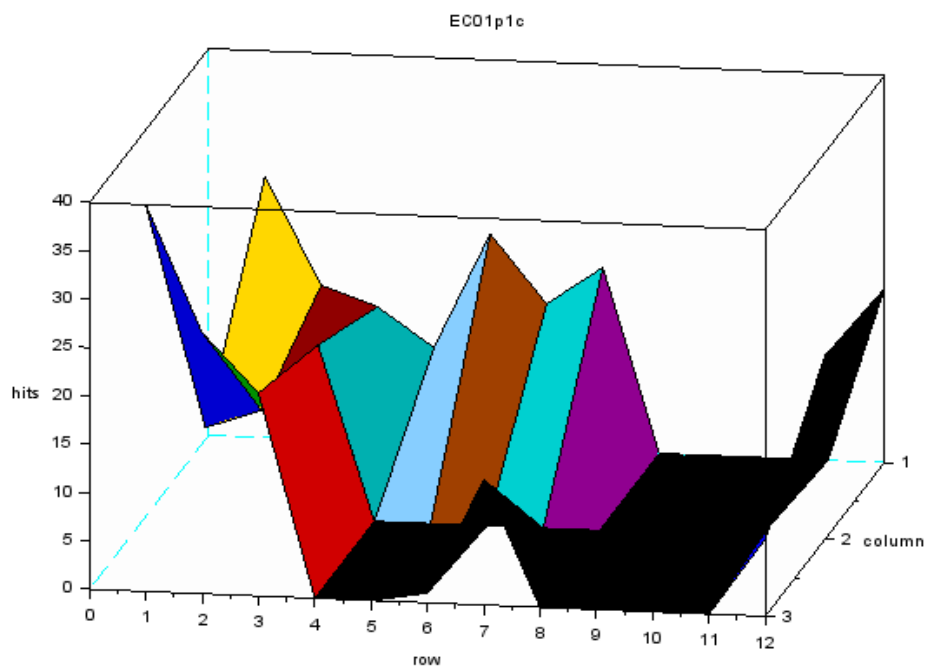
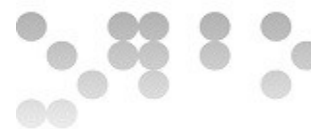


Figura 19: Localizaciones de un recorrido del vestíbulo mediante las huellas de las cuadrículas ( $k=3$ )

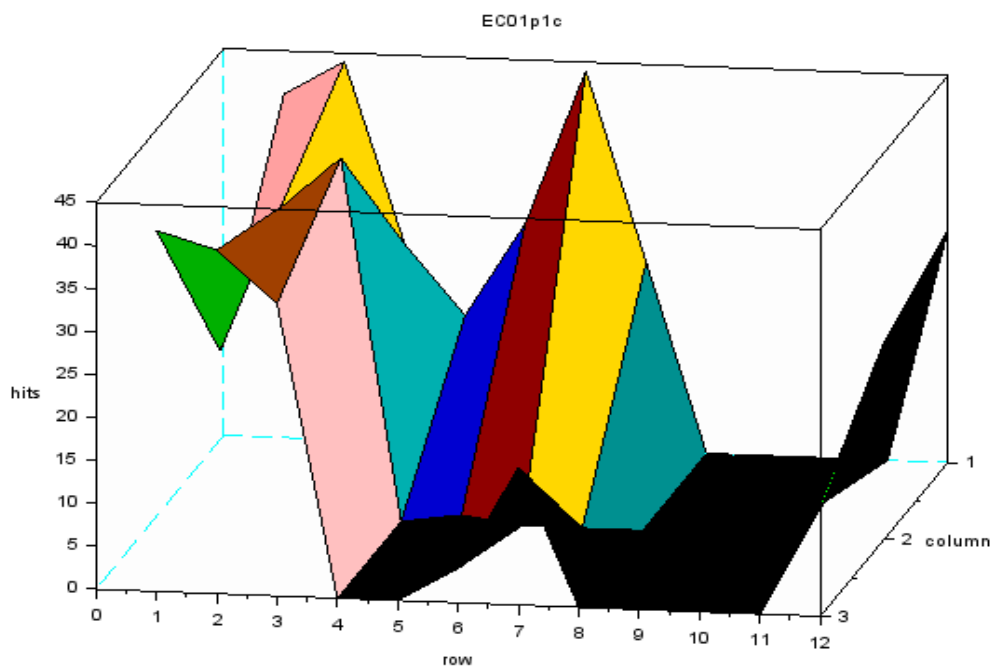


Figura 20: Localizaciones de un recorrido del vestíbulo mediante las huellas de las cuadrículas ( $k=5$ )



Es importante destacar que para el cálculo de las huellas se han usado tanto la cuadrícula del pasillo como la del vestíbulo, y sin embargo en todas las ejecuciones del algoritmo k-NN para este recorrido las posiciones estimadas han sido del pasillo. Se han repetido los cálculos para el resto de los recorridos del vestíbulo y aparecen algunos errores (medidas en el recorrido que son confundidas con las del pasillo), sin embargo el porcentaje de error es inferior al 5%.

A continuación se muestran los resultados para uno de los recorridos del pasillo.

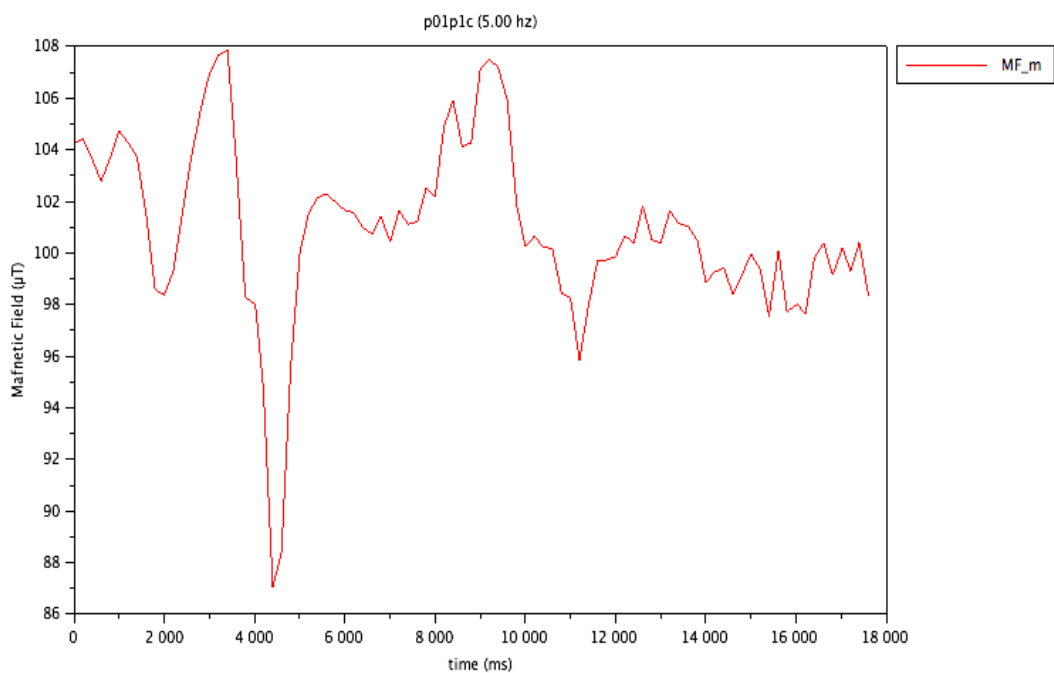


Figura 21: Variación del campo magnético en un recorrido sobre el pasillo

		Localizaciones para k=1			Localizaciones para k=3			Localizaciones para k=5		
		FILAS			FILAS			FILAS		
		1	2		1	2		1	2	
COLUMNAS	1	5	25		51	34		63	38	
	2	3	19		15	46		48	51	
	3	5	6		20	9		21	11	
	4	3	5		18	17		74	35	
	5	10	5		22	26		23	65	

Tabla 17: Localizaciones de un recorrido del pasillo mediante las huellas de las cuadrículas (k=1, k=3, k=5)



En esta ocasión (tabla 17) el campo magnético se mueve en un rango de valores desde los  $87.03 \mu\text{T}$  hasta los  $107.85 \mu\text{T}$ . Y las localizaciones erróneas (que ahora serían confusiones con celdas del vestíbulo) son inferiores al 10%.

Las gráficas tridimensionales correspondientes a estas elecciones de k-NN serían las siguientes:

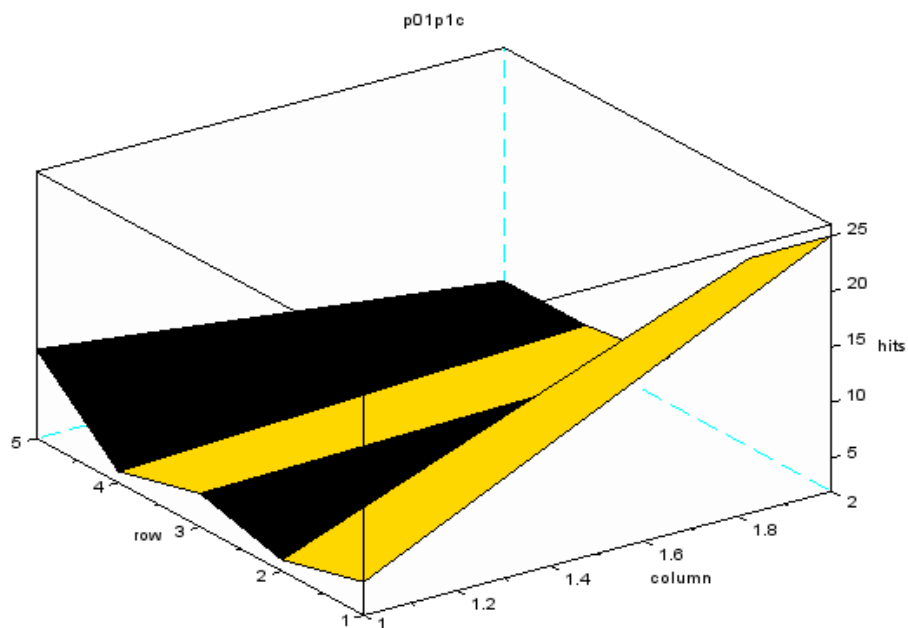


Figura 22: Localizaciones de un recorrido del pasillo mediante las huellas de las cuadrículas ( $k=1$ )

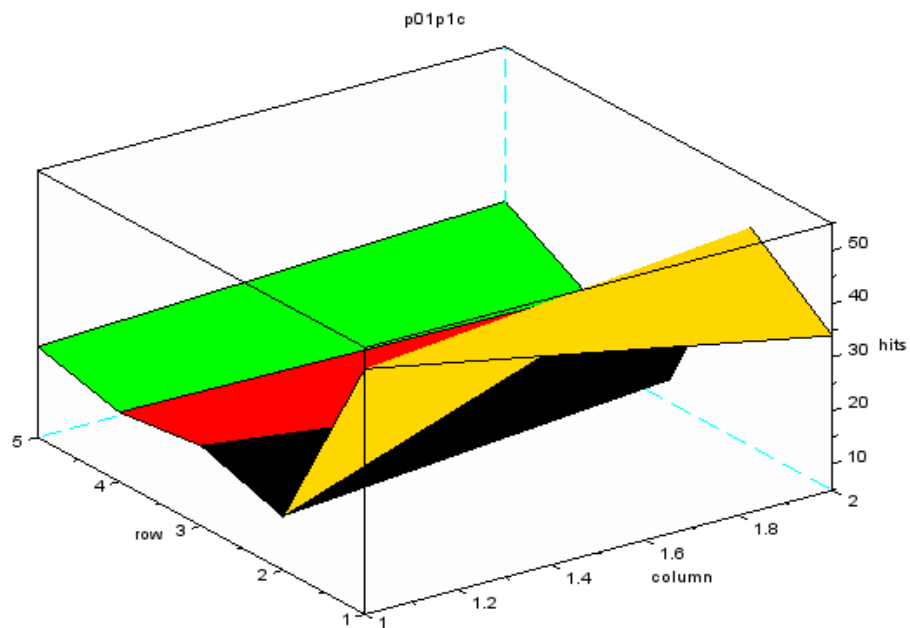
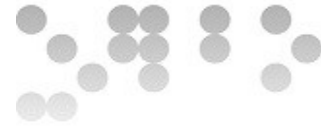


Figura 23: Localizaciones de un recorrido del pasillo mediante las huellas de las cuadrículas ( $k=3$ )

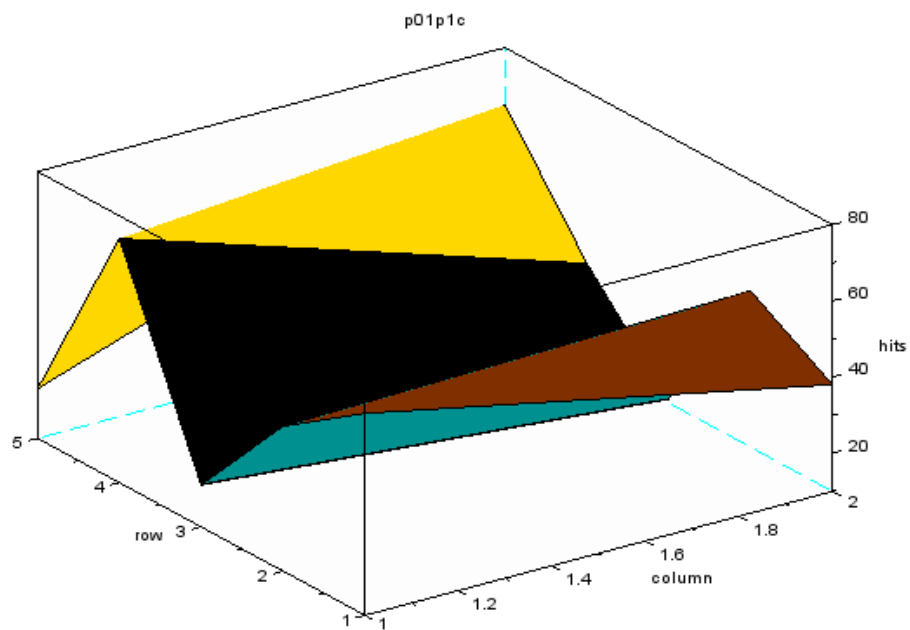
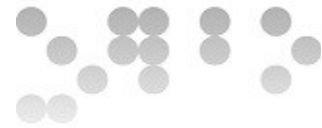


Figura 24: Localizaciones de un recorrido del pasillo mediante las huellas de las cuadrículas ( $k=5$ )



Como ya se había adelantado en experimentos anteriores, la estimación de la posición mediante el campo magnético no tiene una precisión suficiente para establecer la posición exacta de un objetivo, sin embargo en la mayor parte de las medidas de los recorridos la estimación de la celda coincide al menos en la zona reconocida (95% en recorridos del pasillo y 90% en los del vestíbulo)

En una situación óptima los aciertos de un recorrido deberían coincidir de forma más o menos uniforme con las celdas de una fila, pero esto no es así porque el algoritmo confunde localizaciones en las que o bien no hay alteración significativa del campo magnético, o bien su módulo coincide en localizaciones diferentes. Esto lleva a la conclusión de que no es posible determinar durante un recorrido la posición del usuario en cada momento, sino que deberíamos centrarnos en obtener patrones de celdas en las que el número de localizaciones tengan valores altos. Por ejemplo, para el recorrido analizado del pasillo con  $k=3$  se ve que las celdas [1,1], [1,4] y [2,5] tienen respectivamente 65, 74 y 65 estimaciones.

También se debe prestar especial atención al valor del parámetro  $k$ . El hecho de que los valores del campo magnético en diferentes celdas sean muy cercanos hace que con valores muy pequeños de  $k$ , las localizaciones se agrupen en determinadas celdas.

En cualquier caso, en estos cálculos se ha partido de la simplificación de dar a todas las estimaciones el mismo peso, pero si se desea mayor precisión se deberían ponderar las estimaciones usando la distancia de la muestra respecto a la localización. Es decir, imaginemos que para una posición elegida de forma aleatoria que queramos localizar se mide un valor del campo magnético  $X$ . El resultado de la ejecución de  $k$ -NN devolvería  $k$  posiciones que llamaremos  $P_1, P_2, \dots, P_k$ . Según los cálculos realizados en este apartado la probabilidad de que la localización sea una de las anteriores sería un valor constante de

$$\frac{1}{k}$$

Si llamamos  $V_i$  al valor del campo magnético en  $P_i$  se puede calcular la distancia de cada localización mediante la siguiente fórmula.

$$D_i = \sqrt{(X^2 - V_i^2)} \quad 1 \leq i \leq k$$



siendo  $D$  la suma total de las distancias

$$D = \sum_{i=1}^k D_i$$

De esta forma se puede ponderar la probabilidad ( $Q$ ) de cada estimación en función de su distancia:

$$Q_i = \frac{D - D_i}{(n-1) \cdot D}$$

A modo de ejemplo en la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos para el recorrido del vestíbulo con  $k=5$ . Los valores se han representado gráficamente en la figura 25.

Localizaciones ponderadas para $k=5$				
FILAS				
	1	2	3	
COLUMNAS	1	7,6	3,93	8,7
	2	8,63	6,81	8,28
	3	4,38	7,62	6,59
	4	3,18	0	0
	5	5,75	0,17	0
	6	8,77	0	0,75
	7	4,68	0	3,41
	8	0	0	0
	9	0	0	0
	10	0	0	0
	11	0	0,73	0
	12	5,42	5,06	2,53

Figura 18: Localizaciones ponderadas de un recorrido del vestíbulo mediante las huellas de las cuadrículas ( $k=5$ )

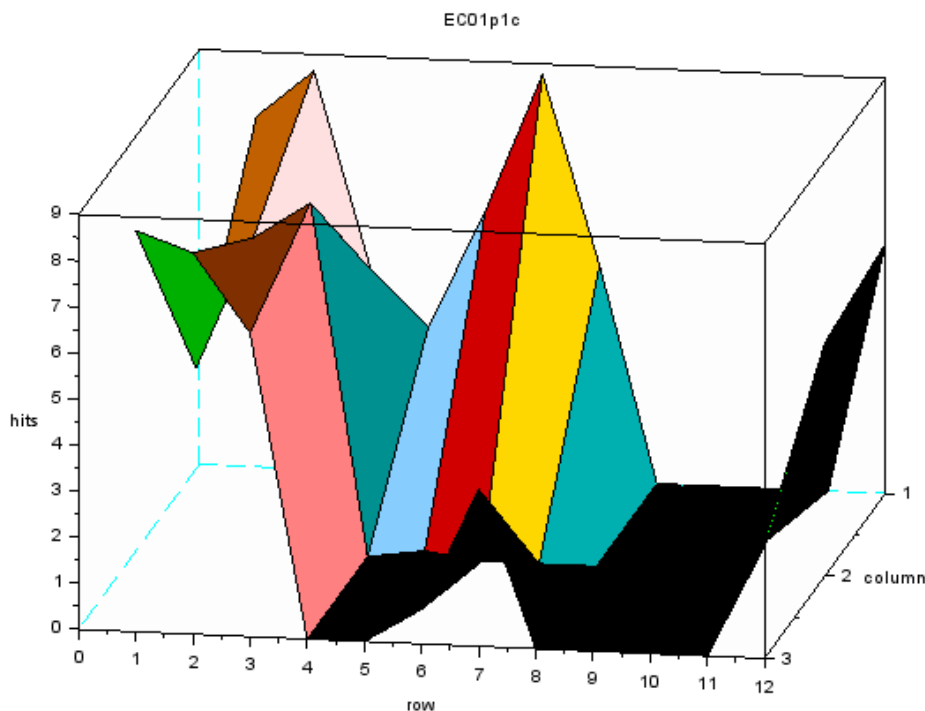
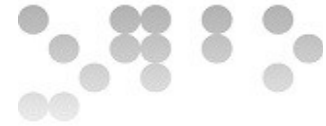


Figura 25: Localizaciones ponderadas de un recorrido del vestíbulo mediante las huellas de las cuadrículas ( $k=5$ )

Con este sistema se extiende el número de celdas reconocidas y por tanto se consigue aumentar las posibilidades de que los patrones asociados a diferentes zonas presenten mayores diferencias.

### 7.4.2 Uso del sensor del acelerómetro

En apartados anteriores se ha sugerido la necesidad de analizar en los recorridos conjuntamente las lecturas de diferentes sensores. A continuación se verán algunos ejemplos en los que los valores del acelerómetro dan información útil para entender el movimiento que realiza el usuario durante el recorrido y que puede resultar útil para mejorar la precisión de la localización.

En las figuras 26 y 27 se muestran dos repeticiones del mismo recorrido sobre el pasillo, que a priori deberían ser prácticamente iguales en base a las propiedades de estacionalidad local y repetibilidad que se atribuyen al campo magnético.



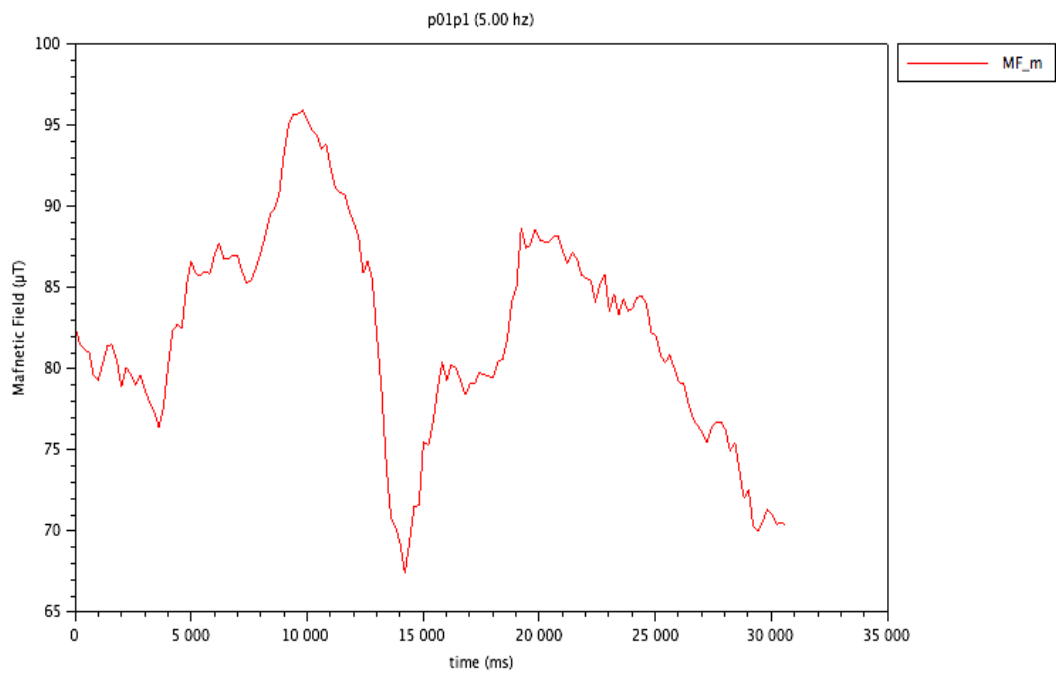
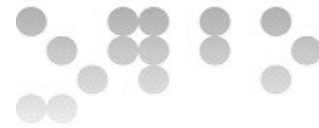


Figura 26: Campo magnético en la primera repetición de uno de los recorridos del pasillo

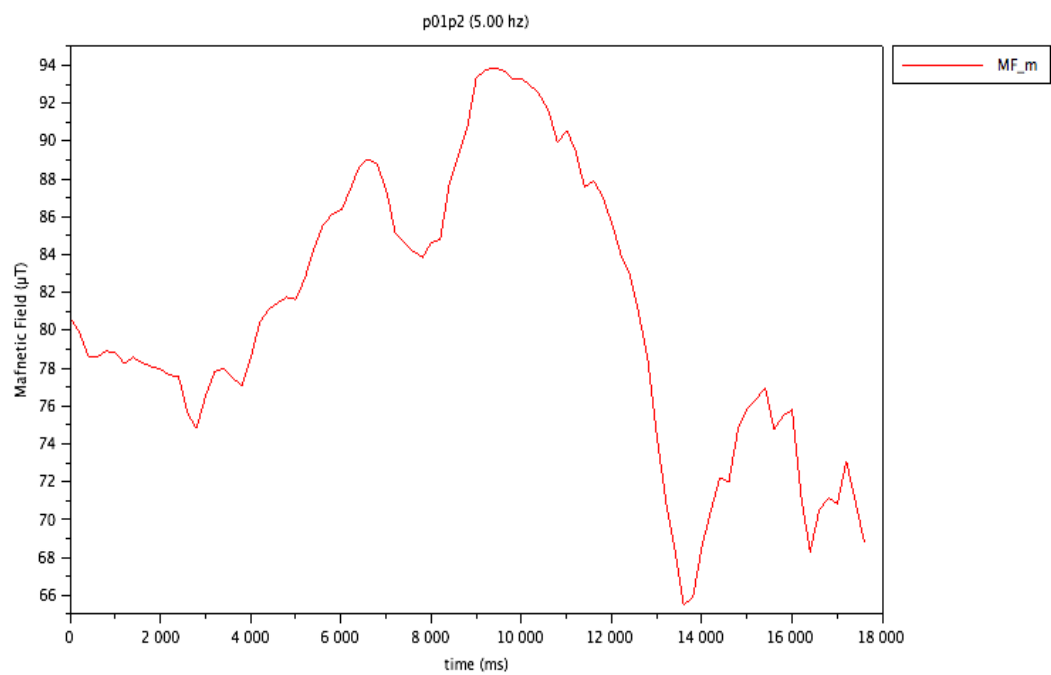
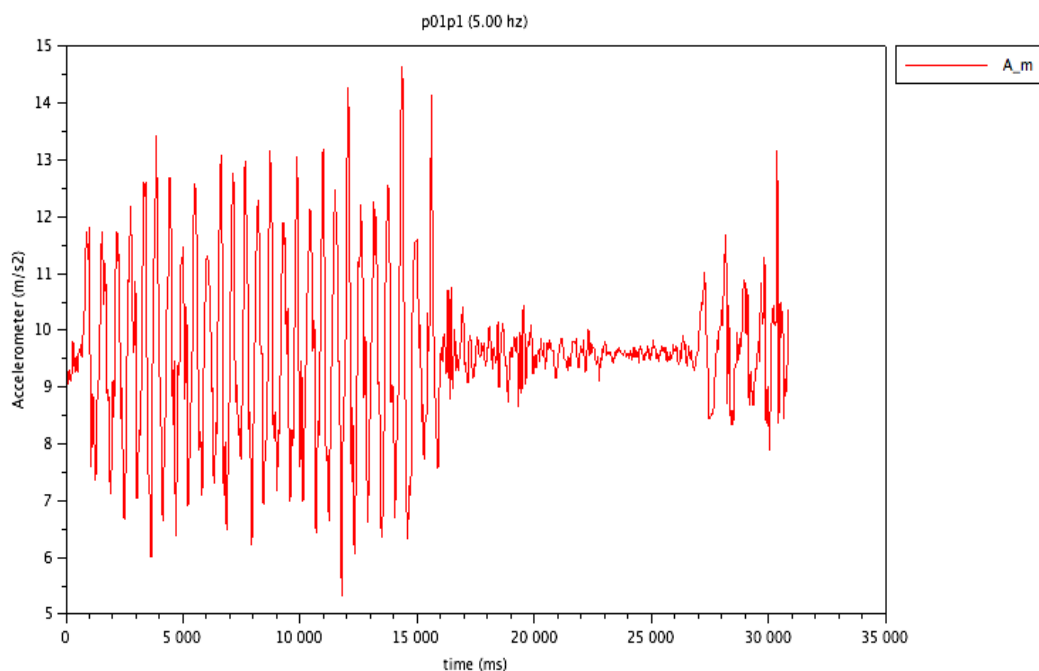


Figura 27: Campo magnético en la segunda repetición de uno de los recorridos del pasillo



Lo primero que se observa al comparar las figuras 26 y 27 es que el primer recorrido tiene una duración de unos 30 segundos frente a los 18 del segundo. En un principio se podría pensar que esta diferencia se debe a una variación en la velocidad de desplazamiento del usuario, pero en las gráficas se ve como los primeros 10 segundos son prácticamente iguales.

Para comprobar lo que ha sucedido se va a analizar el comportamiento del acelerómetro en ambos recorridos.



*Figura 28: Acelerómetro en la primera repetición de uno de los recorridos del pasillo*

En la figura 28 se aprecia una disminución considerable en los valores del acelerómetro a partir de los 16 segundos, que no existe en la segunda repetición del recorrido (figura 29). En este caso se debe a que el usuario interrumpe momentáneamente el recorrido y continúa a partir de los 28 segundos.

Esta es una situación que hay tener en cuenta, ya que en el intervalo en el que el usuario permanece parado las muestras del campo magnético pueden alterar el resultado del reconocimiento.

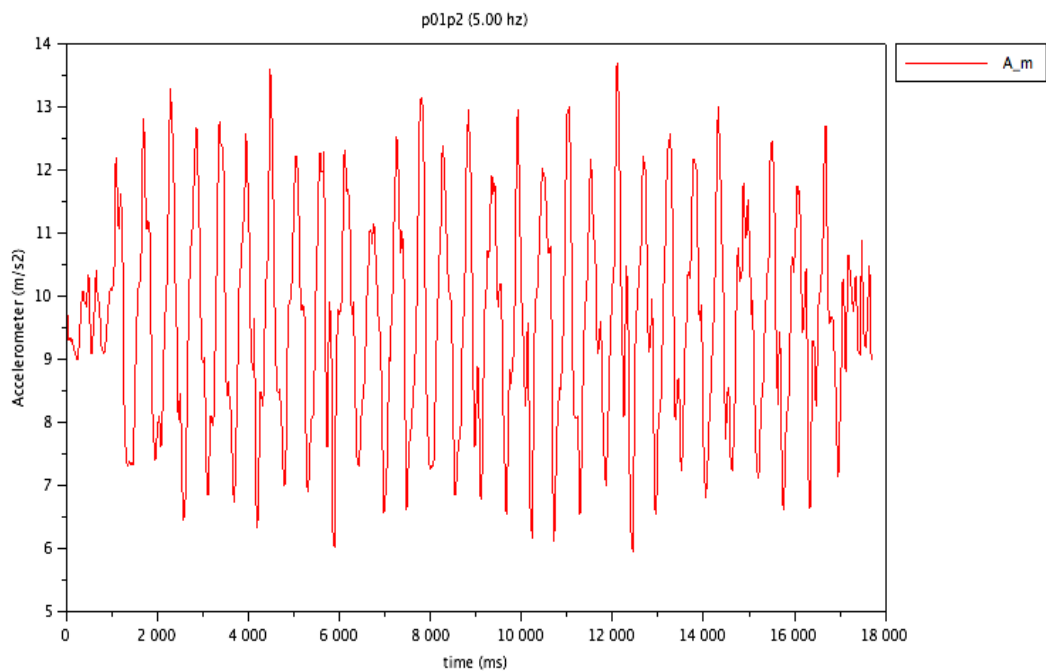


Figura 29: Acelerómetro en la segunda repetición de uno de los recorridos del pasillo

Para evitar estas situaciones es necesario analizar en tiempo real los picos del acelerómetro y cuando se detecte que la separación entre ellos es superior a un tiempo fijado se considerará que el usuario se ha parado. En estos casos el sistema de reconocimiento debería esperar hasta que el usuario se pusiera de nuevo en movimiento para continuar con el cálculo de la localización.

Para buscar estos picos se ha implementado un script que calcula la derivada discreta de la señal. Los picos superiores serían aquellos en los que el valor de la derivada es 0 y en los puntos inmediatamente anterior y posterior sea mayor y menor que cero respectivamente. Además solo se van a considerar los picos que superen un umbral, que de forma empírica se ha estimado en  $10.5 \text{ m/s}^2$ . Para calcular este límite se ha ejecutado el script Scilab para todos los recorridos del pasillo y el vestíbulo, comprobándose que con valores menores se detectaban picos falsos en las zonas de inicio y fin de los recorridos, mientras que con valores mayores se descartaban los picos en los que las alteraciones del acelerómetro eran menores, pero que sí correspondían con pasos del usuario.

En la figuras 30 y 31 se muestra gráficamente el resultado del algoritmo de búsqueda de picos para las dos gráficas anteriores.

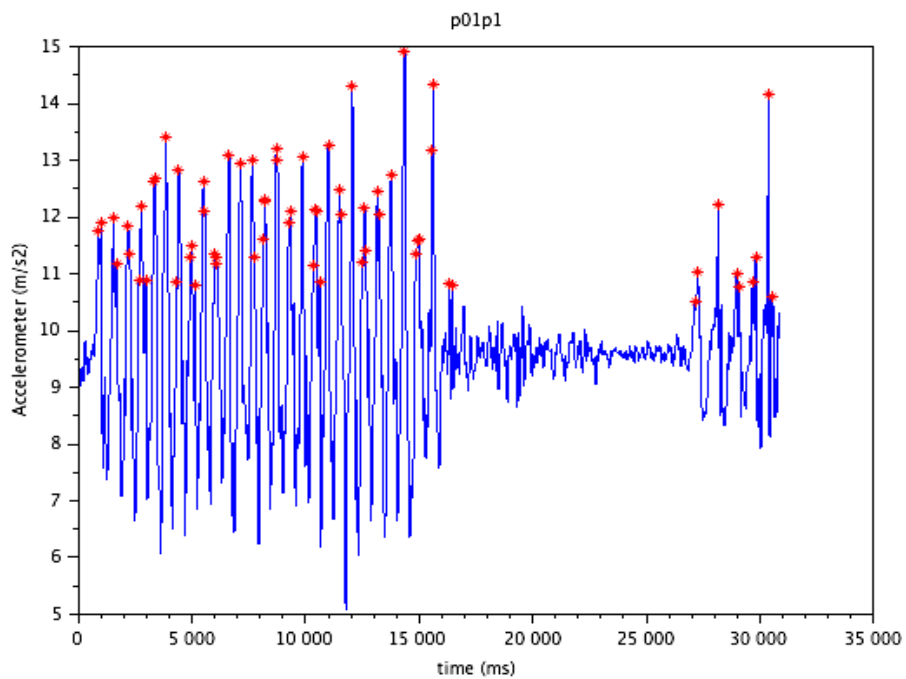


Figura 30: Reconocimiento de picos del acelerómetro en la primera repetición de uno de los recorridos del pasillo

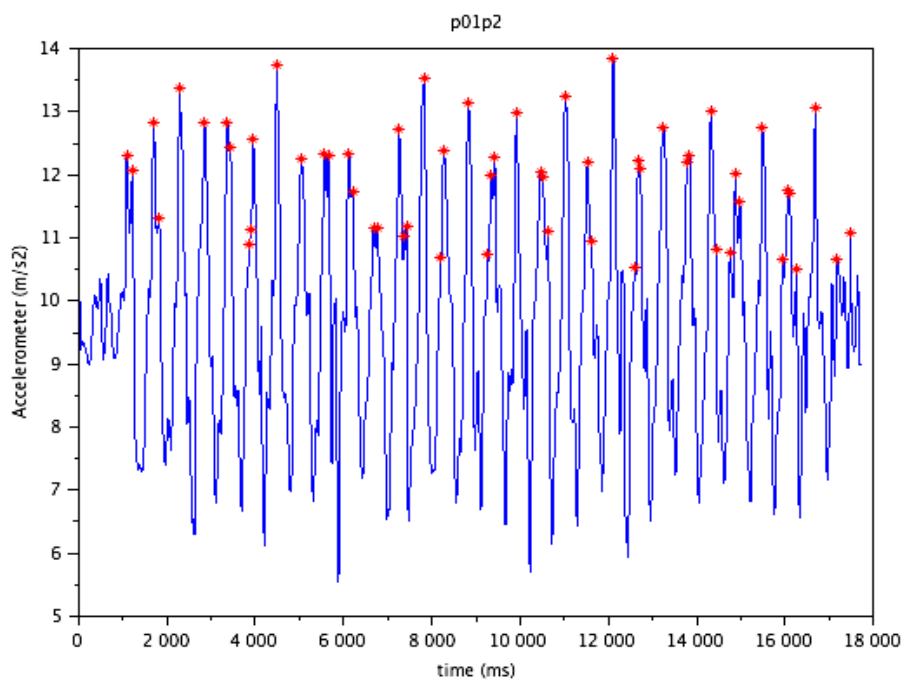


Figura 31: Reconocimiento de picos del acelerómetro en la segunda repetición de uno de los recorridos del pasillo



## 8 Conclusiones

Este proyecto surgió con el objetivo de estudiar la viabilidad de utilizar las variaciones del campo magnético para localizar un objetivo en un entorno de interior.

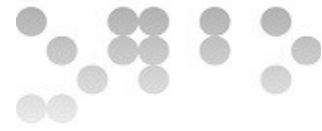
En una primera fase se diseñó una aplicación Android capaz de medir no solo el campo magnético, sino algunos otros sensores que pudieran facilitar información útil para los objetivos planteados.

El siguiente paso fue realizar mediciones de diversas cuadrículas y recorridos en dos zonas concretas del Hospital Parc Taulí de Sabadell que servirían de base para realizar el proceso de experimentación.

Para la última fase se diseñaron una serie de scripts Scilab capaces de importar la información tomada con la aplicación móvil y procesarla en una serie de experimentos cuyos resultados se han detallado en este proyecto.

Inicialmente se analizan características generales de las medidas tomadas sobre el campo magnético y el acelerómetro, donde se pudieron observar algunas características que debería tener en cuenta cualquier sistema de localización basado en estos sensores, de entre las que se podrían destacar la siguientes:

- Los sensores de los que disponen los dispositivos móviles no han sido construidos con la finalidad de usarse con el objeto que se ha planteado, por ejemplo, el sensor capaz de medir el campo magnético terrestre se ha diseñado para ser utilizado como una brújula digital que detecte nuestra orientación respecto a los polos magnéticos de la tierra, pero quizás para nuestro objetivo sería deseable una mayor precisión. En los experimentos realizados se han observado leves variaciones del campo magnético inferiores a  $1 \mu\text{T}$  atribuibles a estos errores en la precisión de los sensores.
- Se han analizado diferentes opciones para caracterizar el campo magnético, llegando a la conclusión de que lo más recomendable es utilizar el módulo del vector tridimensional que se puede medir con el sensor de un dispositivo móvil. Este valor es mucho más estable que las componentes sobre los 3 ejes, pero también presenta ciertas alteraciones cuando se modifica la orientación del dispositivo. Es los experimentos



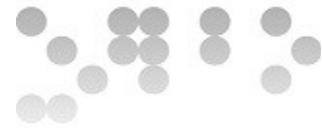
realizados se observan variaciones detectables, aunque inferiores a  $2\mu\text{T}$ , cuando se realizan rotaciones del dispositivo sobre sus 3 ejes.

- La frecuencia de muestreo que se especifica cuando se intentan medir los valores de los sensores de Android no se debe considerar como un valor exacto, sino más bien como la mínima frecuencia a la que se desea realizar el muestreo, ya que como se ha demostrado en la fase de experimentación es habitual que se produzcan ciertos desfases. En el caso del acelerómetro Android ni siquiera respeta esta indicación, obteniéndose unas frecuencias de muestreo superiores a las especificadas. Con los datos aportados en los experimentos parece recomendable utilizar una frecuencia de muestreo aproximada de 5 Hz. Además, dadas las diferencias entre las frecuencias de muestreo de los diferentes sensores, es necesario calcular interpolaciones si se quieren realizar operaciones que necesiten conocer las lecturas de diferentes sensores en un mismo instante.

Además de analizar estas características sobre los sensores se han realizado experimentos con objeto de estudiar la precisión que se podría alcanzar para localizar un objetivo en una posición concreta usando como referencia tan solo la medición del campo magnético en dicha posición.

En un primer lugar se ha analizado el proceso de localización de forma estática, es decir, con las medidas realizadas para obtener las cuadrículas, que se tomaban en posiciones fijas del espacio a estudiar, evitando realizar movimientos del dispositivo móvil. Posteriormente se ha extendido el proceso con las muestras de los recorridos para analizar el comportamiento del campo magnético con el objetivo en movimiento.

En las pruebas de localización sobre cuadrículas la precisión del algoritmo k-NN para localizar la celda en la que se tomó cada medida fue del orden del 50% en los experimentos realizados en un pasillo y en torno al 10% en los experimentos realizados en el vestíbulo. Se utilizaron diferentes caracterizaciones de las huellas como la media, la mediana y la moda de las muestras tomadas en cada muestra para tomar las huellas, obteniéndose resultados similares. Estos resultados llevan a la conclusión de que el campo magnético no ofrece suficiente variabilidad local como para estimar la posición concreta de un objetivo, sin embargo los experimentos realizados ampliando el espacio de reconocimiento obtuvieron



mejores resultados. Concretamente, el reconocimiento de la columna de la cuadrícula en la que se tomaban las medidas consiguió un grado de acierto del 72% y 42% en las zonas de pasillo y vestíbulo respectivamente, y extendiendo la búsqueda a nivel de cuadrícula la probabilidad llegaba a un valor cercano al 100%.

En el siguiente bloque de experimentación se analizó el comportamiento de los recorridos, en los que hay tener en cuenta las variaciones en el campo magnético motivadas por el movimiento y cambio de orientación del móvil que inevitablemente se producen durante los movimientos del usuario al caminar. Sin embargo las variaciones de las señales a lo largo de algunos recorridos fueron cercanas a  $10 \mu\text{T}$ , y por lo tanto no atribuibles a errores en los aparatos de medidas o distorsiones por movimiento de los sensores.

Se implementaron pruebas de localización de las muestras de los recorridos sobre las huellas tomadas durante el cálculo de las cuadrículas, en las que se localizan lo que se podrían considerar como puntos de referencia, es decir, puntos en los que se produce una variación importante del campo magnético y por tanto permiten identificar la zona en la que nos encontramos. En el caso de los recorridos se han realizado pruebas aumentando el valor del parámetro  $k$  del algoritmo  $k$ -NN. Con valores de 3 y 5 se observa que aumenta la aparición de estos puntos de referencia, lo que permitiría mejorar la precisión del reconocimiento. Además se ha propuesto el uso de la ponderación de los vecinos encontrados en función de la distancia respecto a la medida del punto a localizar, de forma que se tenga en cuenta no solo a los  $k$  vecinos más cercanos, sino que se consideren en proporción a la probabilidad de estar más cerca a la muestra a estudiar.

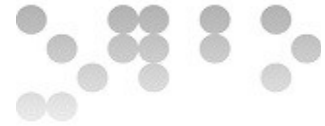
Finalmente se ha analizado utilidad del acelerómetro durante la fase de localización. En concreto, buscando los picos del acelerómetro durante un recorrido es posible detectar los pasos que da el usuario, para predecir situaciones como una parada o un giro brusco.

Con toda la información obtenida se van a dar una serie de recomendaciones para realizar el mapa de campos magnéticos del hospital, paso previo indispensable para obtener las huellas necesarias para aplicar algoritmos de reconocimiento.



- Las muestras estáticas son mucho más estables, así que parece recomendable utilizar el sistema de cuadrículas propuesto en este proyecto en lugar de realizar recorridos.
- La toma de datos debería realizarse en todas las orientaciones lógicas en las que se desplazan los usuarios, es decir, en los pasillos tiene sentido tomar las medidas en sentido de ida y de vuelta, mientras que en espacios mayores como vestíbulos sería recomendable grabar las cuadrículas al menos hacia los cuatro puntos cardinales.
- Es recomendable tomar todas las medidas a una misma frecuencia de muestreo (5Hz parece un valor razonable), y junto a al módulo del campo magnético es útil almacenar los valores del acelerómetro.
- En los pasillos pueden aparecer elementos susceptibles de generar variaciones del campo magnético a ambos lados, así que se recomienda tomar las medidas en tres columnas, una en el centro del pasillo y las otras dos más cercanas a las paredes laterales.
- En zonas amplias como salas o vestíbulos interesa realizar cuadrículas con un espaciado fijo entre filas y columnas. Una separación de entre 60 y 90 cm parece razonable para poder captar los diferentes valores que pudieran darse en cada zona.
- Los campos magnéticos pueden alterarse si se cambian de posición elementos metálicos o si se modifica la estructura de la zona de reconocimiento, así que si se dan alguna de las circunstancias anteriores sería recomendable repetir las mediciones.
- El uso de una plataforma con ruedas sobre la que se coloque el dispositivo móvil para tomar las muestras puede reducir la aparición de errores debidos a cambios en su orientación.





## 9 Siglas

En este apartado se incluye una serie abreviaturas que se han utilizado a lo largo del documento. Se ha optado por usar la versión inglesa ya que es la más extendida en la documentación relacionada con el contexto de este proyecto.

- AoA: Angle of arrival.
- CaDet: Clustering and Decision-tree-based method.
- DoA: Direction of Arrival.
- GSM: Global System for Mobile communications.
- HMM: Hidden Markov Model.
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- k-NN: K Nearest Neighbors.
- LOS: Line Of Sight.
- MCL: Monte Carlo Localization.
- RSS: Received Signal Strength.
- RSSI: Received Signal Strength Indication.
- TdoA: Time difference of Arrival.
- ToA: Time of Arrival.
- WCNC: Wireless Communications and Networking Conference.
- WLAN: Wireless Local Area Network.



## 10 Referencias

- [1] Carrillo, D., Moreno, V., Úbeda, B., & Skarmeta, A. (2015). MagicFinger: 3D Magnetic Fingerprints for Indoor Location. *Sensors*, *15*(7), 17168–17194.
- [2] Galván-Tejada, C., García-Vázquez, J., & Brena, R. (2014). Magnetic Field Feature Extraction and Selection for Indoor Location Estimation. *Sensors*, *14*(6), 11001–11015.
- [3] Gozick, B., Subbu, K. P., Dantu, R., & Maeshiro, T. (2011). Magnetic Maps for Indoor Navigation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *60*(12), 3883–3891.
- [4] Jiang, P., Zhang, Y., Fu, W., Liu, H., & Su, X. (2015). Indoor Mobile Localization Based on Wi-Fi Fingerprint's Important Access Point, *2015*.
- [5] Kim, Y., Chon, Y., & Cha, H. (2012). Smartphone-Based Collaborative and Autonomous Radio Fingerprinting. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, *42*(1), 112–122.
- [6] Yiqiang Chen, Y., Qiang Yang, Q., Jie Yin, J., & Xiaoyong Chai, X. (2006). Power-efficient access-point selection for indoor location estimation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, *18*(7), 877–888.
- [7] Haverinen, J., & Kemppainen, A. (2009). A global self-localization technique utilizing local anomalies of the ambient magnetic field. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 3142–3147). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152885>
- [8] Kaemarungsi, K., & Krishnamurthy, P. (2004). Properties of indoor received signal strength for WLAN location fingerprinting. In *The First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004.* (pp. 14–23). IEEE.
- [9] Li, K., Bigam, J., Bodanese, E. L., & Tokarchuk, L. (2013). Location estimation in large indoor multi-floor buildings using hybrid networks. In *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 2137–2142).



- [10] Roberts, B., & Pahlavan, K. (2009). Site-Specific RSS Signature Modeling for WiFi Localization. In *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference* (pp. 1–6).
- [11] Saxena, A., & Zawodniok, M. (2014). Indoor positioning system using geo-magnetic field. In *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings* (pp. 572–577). IEEE.
- [12] Shahidi, S., & Valae, S. (2015). GIPSy: Geomagnetic indoor positioning system for smartphones. In *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (pp. 1–7). IEEE. <http://doi.org/10.1109/IPIN.2015.7346761>
- [13] Tsung-Nan Lin, T.-N., & Po-Chiang Lin, P.-C. (2005). Performance comparison of indoor positioning techniques based on location fingerprinting in wireless networks. In *2005 International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing* (Vol. 2, pp. 1569–1574). IEEE.
- [14] Macías Valanzuela M. (2016). Sistema de posicionament en alçada per ultrasons amb Arduino en un sistema de posicionament indoor. *Repositorio institucional Universitat Oberta de Catalunya*.