



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

## **DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA BASADO EN UN TRANSECTOR INALÁMBRICO EMBEBIDO EN UNA TABLA DE SURF**

Hisham Baghdadi Gonzalez

Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Pamplona, 21 de Febrero de 2014



## **Resumen**

Este proyecto se centra en la tecnología RFID/NFC, Bluetooth y ZigBee aplicada al surf y pretende ofrecer tanto nociones básicas de la tecnología y sus aplicaciones en este ámbito, como un completo estudio radioeléctrico tanto teórico como práctico de diferentes entornos. Los resultados deterministas de la simulación se presentan con la ayuda de un código interno de lanzamiento de rayos, indicando claramente la dependencia topológica y morfológica de los enlaces inalámbricos. La adopción de técnicas precisas de radiopropagación puede ayudar al despliegue de nuevas soluciones eficientes y rentables aplicadas a los deportes acuáticos.

## **Abstract**

This project focuses on RFID/NFC, Bluetooth and ZigBee technology applied to surf and aims to provide both basic knowledge of technology and its application in this field as well as a comprehensive study both theoretical and practical in different environments. Deterministic simulation results are presented with the aid of an in-house 3D ray launching code, clearly stating the topological and morphological dependence of the wireless link. The adoption of precise radioplanning techniques can aid in the deployment of efficient and cost effective new wireless solutions applied to water sports.



# Contenido

---

1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. OBJETIVOS .....	8
3. ESTADO DEL ARTE.....	9
3.1. Situación actual .....	9
3.2. Tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID).....	12
3.1.1. Evolución histórica.....	12
3.1.2. Descripción de la tecnología.....	13
3.1.3. Componentes del sistema .....	14
3.1.4. Tipos de sistemas.....	27
3.1.5. Normalización y regulación .....	32
3.1.6. Near Field Communication (NFC) .....	35
3.3. Redes inalámbricas de área personal (WPAN) .....	41
3.3.1. Tecnología Bluetooth / 802.15.1 .....	43
3.3.2. Tecnología ZigBee / 802.15.4 .....	51
4. PROPAGACIÓN RADIOELÉCTRICA .....	63
4.1. Modelo de propagación en espacio libre .....	63
4.2. Fenómenos de propagación .....	64
4.2.1. Atenuación y absorción .....	64
4.2.2. Reflexión y refracción .....	67
4.2.3. Difracción.....	68
4.2.4. Dispersión .....	69
4.2.5. Multitrayectoria.....	70
5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	73
5.1. Introducción .....	73
5.2. Definición de los escenarios .....	74
5.2.1. Escenario 1.....	74
5.2.2. Escenario 2.....	75
5.2.3. Escenario 3.....	76
5.3. Simulaciones.....	78
5.3.1. Metodología y parámetros .....	78
5.3.2. Escenario 1.....	81
5.3.3. Escenario 2.....	86
5.3.4. Escenario 3.....	87
5.4. Medidas .....	102

5.4.1. Metodología y parámetros .....	102
5.4.2. Escenario 1.....	107
5.4.3. Escenario 2.....	121
6. CONCLUSIONES.....	137
7. LÍNEAS FUTURAS.....	138
8. BIBLIOGRAFÍA .....	139
9. ANEXOS.....	141
9.1. Resultados adicionales .....	141
9.1.1. Simulaciones.....	142
9.2. Código RL-3D .....	218
9.2.1. crearescenarioTablaPersona.m .....	218
9.2.2. guardoroom.m.....	220
9.2.3. parametromaterial.m .....	221
9.2.4. extraeparametros.m.....	223
9.3. Herramientas utilizadas.....	226
9.3.1. Hardware .....	226
9.3.2. Software .....	248
9.4. Congreso: 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting .....	251



# 1. INTRODUCCIÓN

---

Los sistemas de comunicaciones inalámbricas de corto alcance y alta frecuencia han experimentado en los últimos años un crecimiento importante en cuanto al número de aplicaciones que las implementan, así como en la calidad de las mismas. Esto ha dado lugar a una amplia variedad de usos que pueden ir desde la agricultura, la ganadería o la logística hasta la domótica o la seguridad.

En este sentido, es el ámbito deportivo uno de los cuales más ha invertido en innovación y desarrollo de aplicaciones que emplean tecnología inalámbrica, sobre todo en sectores como el automovilismo o el motociclismo, sin embargo, poco o nada se puede encontrar cuando la práctica deportiva se realiza en un medio acuático y menos aún si hace referencia a tecnologías como Bluetooth, Zigbee o RFID/NFC.

Los deportes acuáticos no son sólo aquellos que se practican en el agua, sino que también se pueden practicar sobre el agua o bajo ella. En este ámbito son numerosos, los diferentes deportes que existen, y los nuevos que van apareciendo ante la creciente demanda. Dentro de este sector se encuentra el surf, uno de los deportes que cada año gana más adeptos y en el que día tras día nacen nuevas modalidades. Hay una gran cantidad de competiciones todos los años y multitud de intereses económicos en juego.

Así pues, es difícil de entender la escasa implantación de sistemas de comunicaciones inalámbricas en este tipo de deportes. Es por ello que este proyecto nace con vocación de integrar la tecnología en el surf, donde se vio una oportunidad real de innovar, proporcionando las herramientas necesarias para el desarrollo de futuras aplicaciones que pueden ser de utilidad y añadir valor a este deporte.

## 2. OBJETIVOS

---

El principal objetivo del proyecto es el análisis del impacto de un entorno exterior complejo en el desarrollo de un sistema de comunicaciones inalámbrico de corto alcance y alta frecuencia entre una persona y una tabla de surf.

Este trabajo trata de profundizar en la problemática existente y en qué medida pueden afectar a la comunicación diversos factores, tales como los materiales involucrados, el canal radio o la posición del transceptor. De este modo se podrá comprobar las limitaciones a tener en cuenta y las condiciones más óptimas de funcionamiento. Además se pretende dar una visión general de las tecnologías inalámbricas existentes y sus posibilidades de implantación en este ámbito.

Para cumplir los objetivos se cuenta con los siguientes elementos obtenidos experimentalmente durante la ejecución del proyecto:

- Medidas empíricas de radiofrecuencia.
- Medidas empíricas de calidad del enlace con dispositivos ZigBee de uso común.
- Simulaciones sobre trazado de rayos 3D deterministas.
- Análisis riguroso del impacto de sistemas de posible implantación (RFID/NFC, ZigBee y Bluetooth).

Finalmente, quedaría explicar la estructura de la memoria. La misma se ha dividido en cuatro grandes bloques. En el primero se explica el estado actual de implantación de sistemas inalámbricos aplicados al surf y las posibles tecnologías de bajo consumo y coste que podrían tener cabida. En el segundo se estudia la problemática existente respecto al canal radioeléctrico por el cual se transmiten las señales electromagnéticas. En el tercero se exponen los escenarios utilizados y se entra en detalle en los resultados obtenidos, tanto de las simulaciones como de las medidas. Y en el cuarto y último gran bloque se presentarán las conclusiones sacadas y las futuras líneas de trabajo.

## 3. ESTADO DEL ARTE

---

### 3.1. Situación actual

Antes de comenzar con el proyecto se hizo un estudio profundo de cómo está la situación actualmente respecto al tema correspondiente.

Lo primero que se comprobó fue que las aplicaciones que utilizan tecnología inalámbrica para crear redes de área local o personal en un medio acuático no están muy desarrolladas. Aunque sí es cierto que se está investigando y comenzando a avanzar en este campo, un ejemplo claro de ello es la red de sensores implantada por científicos chinos en alta mar para monitorizar distintos parámetros medioambientales.

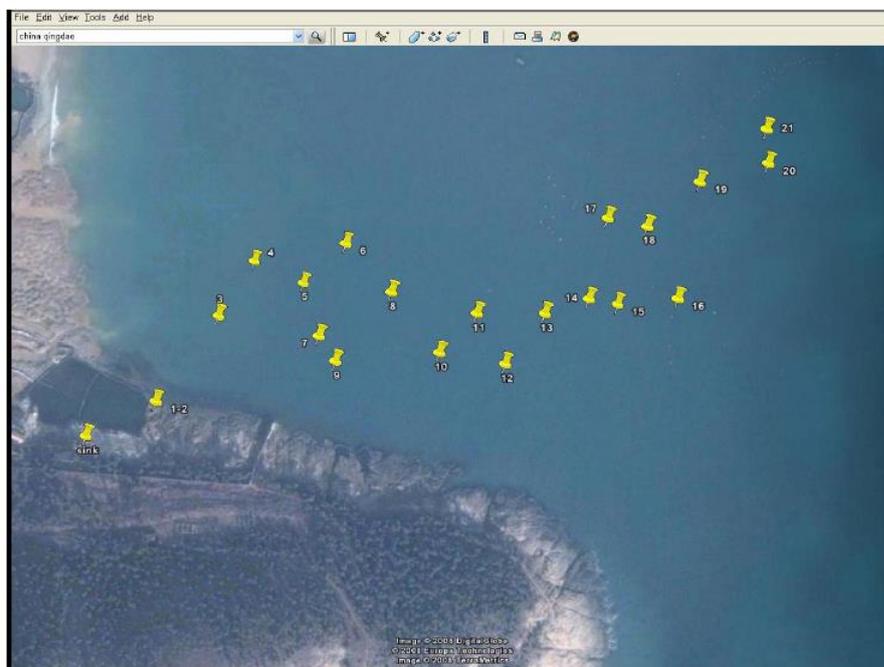


Figura 3.1. Topología de una red de sensores en el océano.

Después se encontraron investigaciones similares en las que implementaban redes de sensores en un ambiente subacuático. Aquí la problemática es distinta porque sólo existe un único medio de transmisión que es el agua, mientras que en el caso del surf aparece una interfaz aire-agua que afecta de distinta forma a la propagación de señales. Aun y todo, como referencia inicial resultó muy útil.

En cuanto a los deportes acuáticos, son pocos los estudios que hay al respecto, y todavía menos, los productos comercializados. Algunos de los más interesantes aplican la tecnología a la natación.

Si se concreta al tema del surf, Intel fue pionera en introducir tecnología en este deporte al crear la primera tabla con un ordenador portátil integrado que se alimentaba

mediante energía solar y que permitía la conexión inalámbrica del surfista a Internet a través de un punto de acceso ubicado en la playa. Al final, esta tabla resulto ser una mera acción de marketing para promocionar un festival de música y la propia empresa desistió de fabricar este tipo de tablas en serie.



Figura 3.2. Tabla de surf Intel con ordenador integrado.

Actualmente, uno de los dispositivos comercializados se denomina Trace y es un pequeño aparato externo, que puede ser colocado por cada usuario de un modo sencillo y que convierte en inteligente a cualquier tabla de surf al dotarla de sensores de inercia y tecnología GPS, lo que le permite registrar parámetros como la altura, la velocidad o la ruta seguida durante la realización de la actividad deportiva.



Figura 3.3. Dispositivo externo Trace.

Por otro lado, uno de los proyectos con mayor potencial se denomina SurfSens, y lo desarrolla la empresa Pukas Surf en colaboración con el centro de investigación aplicada Tecnalia. Consiste en una tabla de surf completamente equipada con sensores de presión, galgas extensiométricas, acelerómetros, giroscopios, brújula y GPS que registran la velocidad, los giros, la presión y muchos otros parámetros, con el objetivo de caracterizar tanto el comportamiento funcional de la propia tabla, como la técnica del surfista.



Figura 3.4. Tabla Surfens.

Finalmente, se debería comentar el proyecto realizado por investigadores del Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de Santa Catarina, en Brasil, en el cual desarrollaron e implementaron en una tabla de surf un sistema de sensorización remota, basado en tecnología ZigBee, que puede ser utilizado para transmitir datos y adquirir variables mediante el análisis experimental de la tensión mecánica de los materiales. Esta información puede ser tratada a posteriori con el propósito de obtener las conclusiones pertinentes respecto al rendimiento de los deportistas en sus entrenamientos, por ejemplo.

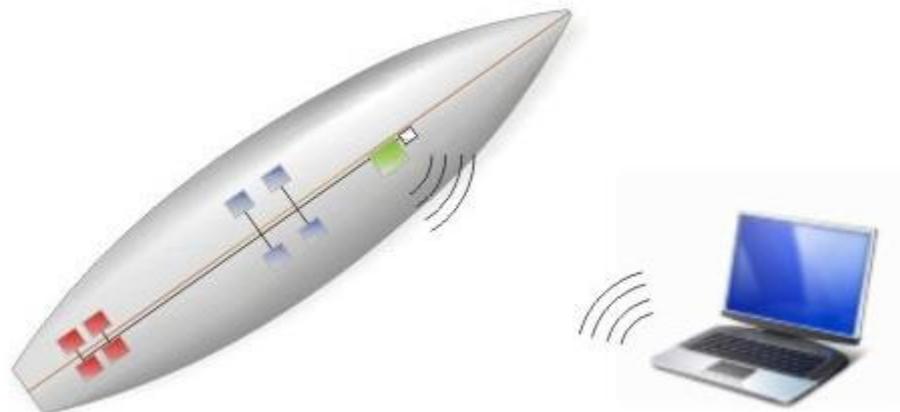


Figura 3.5. Red de sensores embebidos en una tabla de surf.

## 3.2. Tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID)

### 3.1.1. Evolución histórica

Los primeros ejemplos de aplicación de tecnología similar a la utilizada en RFID se remontan a comienzos de 1920, durante la Segunda Guerra Mundial, cuando los militares hacían uso del radar para detectar aviones.

Más tarde, en 1939, los británicos desarrollaron una tecnología similar, el sistema IFF (“Identification Friend or Foe” – “Identificación Amigo o Enemigo”) que utilizaban los aliados para el reconocimiento a distancia de los aviones. Acabada la guerra, los científicos e ingenieros continuaron sus investigaciones sobre estos temas. En octubre de 1948, Harry Stockman publicó un artículo en los Proceedings of the IRE titulado “Communications by Means of Reflected Power”, que se puede considerar como la investigación más cercana al nacimiento de la RFID.

En los años 60 se profundizó en el desarrollo de la teoría electromagnética y empezaron a aparecer las primeras pruebas de campo, como por ejemplo la activación remota de dispositivos con batería, la comunicación por radar o los sistemas de identificación interrogación-respuesta. Aparecieron las primeras invenciones con vocación comercial, como “Remotely Activated Radio Frequency Powered Devices”, de Robert Richardson, “Communication by Radar Beams” de Otto Rittenback, “Passive Data Transmission Techniques Utilizing Radar Beams” de J. H. Vogelmann, y “Interrogator-Responder Identification System”, de J. P. Vinding.

Asimismo, comenzaron las primeras actividades comerciales. Se fundaron Sensormatic y Checkpoint, que junto con otras compañías, desarrollaron un equipo de vigilancia electrónica anti-intrusión denominado EAS (Electronic Article Surveillance). EAS fue el primer desarrollo de RFID y el que indiscutiblemente se ha venido utilizando más ampliamente. Fue el prelude de la explosión de esta tecnología.

En los años 80 aparecieron nuevas aplicaciones. Fue la década de la completa implementación de la tecnología RFID. Los principales intereses en Estados Unidos estuvieron orientados al transporte, al acceso de personal y, más débilmente, a la identificación de animales. En Europa sí cobró un especial interés el seguimiento de ganado con receptores de identificación por radiofrecuencia como alternativa al marcado.

Más tarde también aparecieron los primeros peajes electrónicos. La primera aplicación para aduanas se realizó en 1987, en Noruega, y en 1989 en Dallas. Todos los sistemas eran propietarios, y no existía la interoperabilidad.

Ya en la década de los 90 se tomó conciencia de las enormes posibilidades que podía brindar la explotación de RFID y comenzaron a aparecer los primeros estándares. En Estados Unidos se siguió profundizando en la mejora de los peajes automáticos y la gestión

de autopistas. Mientras tanto en Europa se implementaron aplicaciones RFID para controles de acceso, peajes y otras aplicaciones comerciales. En 1999, un consorcio de empresas fundó el Auto-ID Center en el MIT.

Y a partir del año 2000, empezó a quedar claro que el objetivo de desarrollo de etiquetas a 0,05 dólares podría alcanzarse, con lo que la RFID podía convertirse en una tecnología candidata a sustituir a los códigos de barras existentes. El año 2003 marcó un hito e importancia en el desarrollo de la tecnología RFID: Walmart y el Departamento de Defensa (DoD) estadounidense decidieron adherirse a la tecnología RFID. Les siguieron otros fabricantes, como Target, Procter & Gamble y Gillette. En 2003 el centro AutoID se convirtió en EPCglobal, creadora de estándares adoptados por Walmart y el DoD.

### 3.1.2. Descripción de la tecnología

RFID (Identificación por Radiofrecuencia) es un método de almacenamiento y recuperación remota de datos, basado en el empleo de etiquetas en las que reside la información, y que utiliza señales de radiofrecuencia en diferentes bandas dependiendo del tipo de sistema. Atendiendo a diversos criterios, existen distintos tipos de sistemas RFID. A continuación se muestra esquemáticamente una clasificación de dichos sistemas:

- Según su capacidad de programación:
  - De sólo lectura: las etiquetas se programan durante su fabricación y no pueden ser reprogramadas.
  - De una escritura y múltiples lecturas: las etiquetas permiten una única reprogramación.
  - De lectura/escritura: las etiquetas permiten múltiples reprogramaciones.
- Según el modo de alimentación:
  - Activos: si las etiquetas requieren de una batería para transmitir la información.
  - Pasivos: si las etiquetas no necesitan batería.
- Según el rango de frecuencia de trabajo:
  - Baja Frecuencia (LF): se refiere a rangos de frecuencia inferiores a 135 KHz.
  - Alta Frecuencia (HF): cuando la frecuencia de funcionamiento es de 13.56 MHz.
  - Ultra Alta Frecuencia (UHF): comprende las frecuencias de funcionamiento en las bandas de 433 MHz, 860 MHz, 928 MHz.
  - Frecuencia de Microondas: comprende las frecuencias de funcionamiento en las bandas de 2.45 GHz y 5.8 GHz.
- Según el protocolo de comunicación:
  - Dúplex: el transpondedor transmite su información en cuanto recibe la señal del lector y mientras dura ésta. A su vez pueden ser:

- Half dúplex, cuando transpondedor y lector transmiten en turnos alternativos.
- Full dúplex, cuando la comunicación es simultánea. En estos casos la transmisión del transpondedor se realiza a una frecuencia distinta que la del lector.
- Secuencial: el campo del lector se apaga a intervalos regulares, momento que aprovecha el transpondedor para enviar su información. Se utiliza con etiquetas activas, ya que el tag no puede aprovechar toda la potencia que le envía el lector y requiere una batería adicional para transmitir, lo cual incrementaría el coste.
- Según el principio de propagación:
  - Inductivos: Utilizan el campo magnético creado por la antena del lector para alimentar el tag. Opera en el campo cercano y a frecuencias bajas (LF y HF).
  - Propagación de ondas electromagnéticas: Utilizan la propagación de la onda electromagnética para alimentar la etiqueta. Opera en el campo lejano y a muy altas frecuencias (UHF y microondas).

### 3.1.3. Componentes del sistema

#### 3.1.3.1. Transpondedores

El transpondedor es el dispositivo que va embebido en una etiqueta o tag y contiene la información asociada al objeto al que acompaña, transmitiéndola cuando el lector la solicita.

Está compuesto principalmente por un microchip y una antena. Adicionalmente puede incorporar una batería para alimentar sus transmisiones o incluso, algunas etiquetas más sofisticadas, pueden incluir una circuitería extra con funciones adicionales de entrada/salida, tales como registros de tiempo u otros estados físicos que pueden ser monitorizados mediante sensores apropiados (de temperatura, humedad, etc.).

El microchip incluye:

- Una circuitería analógica que se encarga de realizar la transferencia de datos y de proporcionar la alimentación.
- Una circuitería digital que incluye:
  - Lógica de control.
  - Lógica de seguridad.
  - Lógica interna o microprocesador.
- Una memoria para almacenar los datos. Esta memoria suele contener:

- Una ROM (Read Only Memory) o memoria de sólo lectura, para alojar los datos de seguridad y las instrucciones de funcionamiento del sistema.
- Una RAM (Random Access Memory) o memoria de acceso aleatorio, utilizada para facilitar el almacenamiento temporal de datos durante el proceso de interrogación y respuesta.
- Una memoria de programación no volátil. Se utiliza para asegurar que los datos están almacenados aunque el dispositivo esté inactivo. Típicamente suele tratarse de una EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM).
- Registros de datos (buffers) que soportan de forma temporal, tanto los datos entrantes después de la demodulación como los salientes antes de la modulación. Además actúa de interfaz con la antena.

La información de la etiqueta se transmite modulada en amplitud (ASK, Amplitude Shift Keying), frecuencia (FSK, Frequency Shift Keying) o fase (PSK, Phase Shift Keying). Es decir, para realizar la transmisión se modifica la amplitud, frecuencia o fase de la señal del lector. Típicamente la modulación más utilizada es la ASK debido a su mayor sencillez a la hora de realizar la demodulación.

La frecuencia utilizada por el transpondedor, en la gran mayoría de los casos, coincide con la emitida por el lector. Sin embargo, en ocasiones se trata de una frecuencia subarmónica (submúltiplo de la del lector) o incluso de una frecuencia totalmente diferente de la del lector (no armónica).

La antena que incorporan las etiquetas para ser capaces de transmitir los datos almacenados en el microchip puede ser de dos tipos:

- Un elemento inductivo (bobina).
- Un dipolo.

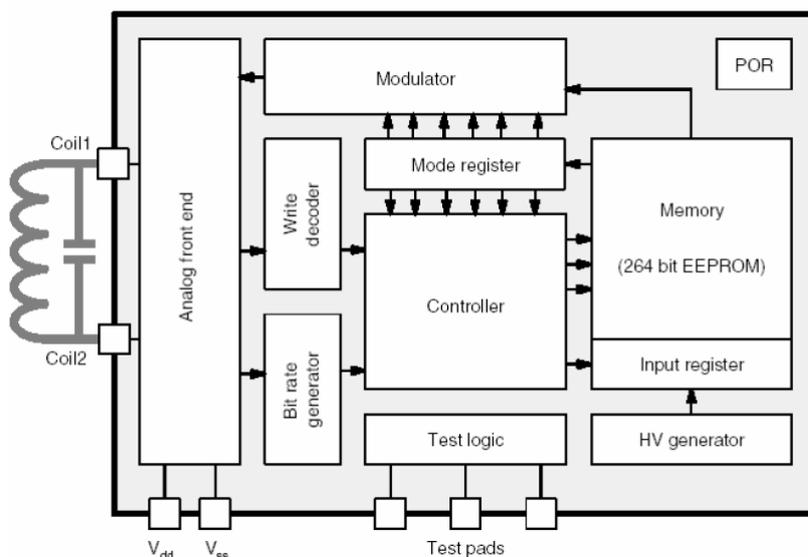


Figura 3.6. Esquema de un transpondedor de RFID.

Existen dos mecanismos por los cuales es posible transferir la potencia de la antena del lector a la antena de la etiqueta, para que ésta transmita su información: acoplamiento inductivo y propagación por ondas electromagnéticas. Estos dos tipos de acoplamiento dependen de si se trabaja en campo cercano o en campo lejano. En la siguiente tabla se resumen las principales características de ambos modos.

Propagación por acoplamiento inductivo	Propagación por ondas electromagnéticas
Trabaja en el campo cercano (cobertura baja)	Trabaja en el campo lejano (mayor cobertura)
Hay que considerar la orientación de la antena	La orientación de la antena es indiferente
Suele trabajar a bajas frecuencias	Suele trabajar a altas frecuencias
Suele utilizar etiquetas pasivas	Suele utilizar etiquetas activas
Es muy sensible a las interferencias electromagnéticas	Necesita regulación

Los parámetros que caracterizan las etiquetas RFID y comprenden las bases para diseñar sus especificaciones son: el modo de alimentación, la capacidad y tipo de datos almacenados, la velocidad de lectura de datos, las opciones de programación, la forma física y los costes.

### **Modo de alimentación**

Aunque los niveles requeridos para que el transpondedor envíe la información son muy pequeños, del orden de micro a miliwatios, es necesario que las etiquetas dispongan de algún tipo de alimentación. Dependiendo del modo en que éstas obtengan su potencia, las etiquetas se clasifican en activas o pasivas.

Las etiquetas activas, además de recoger energía del lector, se alimentan de una batería. Normalmente incorporan una pila que posee una alta relación potencia-peso y son capaces de funcionar en un intervalo de temperaturas que va desde -50°C hasta 70°C.

Aunque el empleo de baterías implica un tiempo de vida finito para el dispositivo, la colocación de una pila acoplada de forma apropiada a la circuitería de baja potencia, puede asegurar un tiempo de vida de algo más de 10 años, dependiendo también de las condiciones de trabajo en las que se encuentre, es decir, las temperaturas, ciclos de lectura/escritura y su utilización.

Típicamente son dispositivos de lectura/escritura. Además, una ventaja adicional que presentan frente a las etiquetas pasivas es que pueden usarse para gestionar otros dispositivos, como pueden ser los sensores.

En términos generales las etiquetas RFID activas permiten un radio de cobertura mayor, mejor inmunidad al ruido y tasas de transmisión más altas cuando se trabaja a alta frecuencia. Estas ventajas se traducen en un coste mayor, por lo que se aplican cuando los bienes a identificar lo justifican.

Existen dos tipos de etiquetas activas:

- Aquellas que normalmente se encuentran desactivadas (modo reposo) y se activan (despiertan) cuando un lector las interroga. De esta forma se ahorra batería.
- Aquellas que periódicamente envían señales, aunque un lector no las interroga. Operan a frecuencias más bajas y a menores tasas de transferencias, para ahorrar batería.

Las etiquetas pasivas funcionan sin una batería interna, obteniendo la potencia que necesitan para funcionar del campo generado por el interrogador.

La ausencia de batería provoca que los transpondedores pasivos sean mucho más ligeros, pequeños, flexibles y baratos que los activos, hecho que redundaría en que puedan ser diseñados en una amplia gama de formas. Además, ofrecen un tiempo de vida prácticamente ilimitado. Como contrapartida, poseen unos radios de cobertura menores y requieren más cantidad de energía procedente del interrogador para poder transmitir los datos. También poseen restricciones a la hora de almacenar los datos y no funcionan demasiado bien en ambientes con interferencias electromagnéticas. Asimismo, su sensibilidad y orientación están limitadas por la potencia disponible.

Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, las etiquetas pasivas ofrecen mejores ventajas en términos de coste y longevidad.

Existe un tipo especial de etiqueta pasiva que sí incorpora una batería, pero la misión de ésta es alimentar la circuitería interna del microchip. Nunca se utiliza esa energía para transmitir.

### **Tipo de datos y capacidad de almacenamiento**

Con el fin de satisfacer las necesidades de recuperación de los datos almacenados en las etiquetas, se requiere de algún tipo de organización como identificadores para los datos o bits de detección de errores (bits de paridad, bits de redundancia cíclica). Este proceso se suele conocer como codificación de fuente.

La cantidad de datos que se desea almacenar, evidentemente dependerá del tipo de aplicación que se desee desarrollar. Básicamente, las etiquetas pueden usarse con el fin de transportar:

- Un identificador. El tag almacena una cadena numérica o alfanumérica que puede representar:
  - Una identidad. Tanto para identificar un artículo de fabricación o un producto en tránsito, como para proporcionar una identidad a un objeto, animal o individuo.
  - Una clave de acceso a otra información que se encuentra almacenada en un ordenador o sistema de información.
- Ficheros de datos. Se denominan PDF (Portable Data Files) y permiten el almacenamiento de información organizada, sin perjuicio de que adicionalmente

exista un enlace a información adicional contenida en otro sitio. El objeto del PDF puede ser:

- Transmitir la información.
- Iniciar acciones.

En términos de capacidades de datos son habituales los tags que permiten almacenar desde un único bit hasta centenares de kilobits, incluso ya existen etiquetas en el orden del Mbit. Considerando que 8 bits representan un carácter, una capacidad de 1 kilobit permite almacenar 128 caracteres.

Los dispositivos de un único bit poseen dos estados: “la etiqueta está en zona de lector” o “la etiqueta no está en la zona del lector”. Algunos permiten la opción de desactivar y activar el dispositivo. Estos transpondedores no necesitan un microchip, por lo que su coste de fabricación resulta muy barato.

Los dispositivos que permiten almacenar hasta 128 bits suelen portar un número de serie o de identificación junto con, normalmente, bits de paridad. Tales dispositivos pueden ser programados por el usuario.

Las etiquetas con capacidades de hasta 512 bits son siempre programables por el usuario e ideales para alojar identificadores y otros datos específicos, como números de serie, contenido de paquetes, instrucciones de los procesos a realizar o posiblemente resultados de anteriores transferencias interrogador-transpondedor.

Las etiquetas que permiten albergar 64 kilobits o más son portadoras de ficheros de datos. Incrementando la capacidad, el servicio puede también permitir la organización de los datos en campos o páginas que pueden ser selectivamente interrogadas durante el proceso de lectura.

### **Frecuencia y velocidad de transmisión**

Las etiquetas también las podemos clasificar según el rango de frecuencias en el que opera, es decir, en que frecuencias se comunicará con el lector:

- **Baja Frecuencia (LF):** se refiere a rangos de frecuencia inferiores a 135 KHz.
- **Alta Frecuencia (HF):** cuando la frecuencia de funcionamiento es de 13.56 MHz.
- **Ultra Alta Frecuencia (UHF):** comprende las frecuencias de funcionamiento en las bandas de 433 MHz, 860 MHz, 928 MHz.
- **Frecuencia de Microondas:** comprende las frecuencias de funcionamiento en las bandas de 2.45 GHz y 5.8 GHz.

Una mayor frecuencia suele significar una mayor velocidad en la transmisión de datos, aunque también encarece el precio del sistema. Elegir el rango de frecuencia es uno de los parámetros de diseño más importante a la hora de crear un sistema RFID, y se deberá adecuar a la aplicación diseñada.

Otro aspecto a considerar es la velocidad con que las etiquetas se mueven dentro de la zona de lectura. El tiempo que tarda una etiqueta en atravesar una zona de lectura debe ser superior al tiempo de lectura de la propia etiqueta, o no dará tiempo al lector para que pueda realizar adecuadamente la lectura. Este problema puede agravarse si son varias las etiquetas que el interrogador debe detectar, ya que cuando varios tags intentan transmitir sus datos a un mismo lector, el tiempo de lectura se multiplica por el número de tags.

Estos tiempos de lectura también serán elevados para etiquetas con una alta capacidad de almacenamiento de datos. En este sentido, la opción que poseen algunas etiquetas para realizar lecturas selectivas, por bloques o por sectores, puede ser muy beneficiosa para reducir considerablemente el tiempo de lectura.

### **Opciones de programación**

Dependiendo del tipo de memoria que incorpore el transpondedor, los datos transportados pueden ser:

- **De sólo lectura.** Son dispositivos de baja capacidad, programados por el fabricante desde el primer momento. Normalmente portan un número de identificación o una clave a una base de datos donde existe información dinámica relativa al objeto, animal o persona a la que van adheridos.
- **De una escritura y múltiples lecturas.** Son dispositivos programables por el usuario, pero una única vez.
- **De lectura y escritura.** También son programables por el usuario pero adicionalmente permiten modificar los datos almacenados en la etiqueta. Los programadores permiten la escritura directamente sobre la etiqueta adherida al objeto en cuestión, siempre y cuando se encuentre dentro del área de cobertura del programador.

EPCGlobal es la organización de empresas que está específicamente orientada a desarrollar estándares globales para un Código Electrónico de Producto (EPC, Electronic Product Code) y que tiene el objetivo de normalizar la información contenida en las etiquetas RFID. En la siguiente tabla se resumen los diferentes protocolos especificados junto con el tipo de etiquetas y rango de frecuencias que lleva asociadas.

Protocolo	Frecuencia	Tipo de etiqueta
<b>Clase 0</b>	UHF	Solo lectura
<b>Clase 0 Plus</b>	UHF	Lectura-Escritura
<b>Clase 1</b>	HF/UHF	Una escritura-Múltiples lecturas
<b>Clase 1 Gen2</b>	UHF	Una escritura-Múltiples lecturas
<b>Clase 2</b>	UHF	Lectura-Escritura

### **Forma y dimensiones**





Figura 3.7. Ejemplos de etiquetas RFID comerciales.

### Coste

Las principales variables que influyen en el coste de las etiquetas son el tipo y cantidad que se adquieran. Respecto a la cantidad, la relación está clara, cuantas más etiquetas se compran, menor será su precio. En relación al tipo de etiquetas, se pueden considerar los siguientes factores:

- La complejidad de la lógica del circuito, de la construcción de la etiqueta o de su capacidad de memoria, influirá en el coste tanto de los transpondedores como de los lectores y programadores.
- La forma de la etiqueta, es decir, el modo en que el dispositivo es encapsulado para formar la etiqueta. Algunas aplicaciones pueden requerir carcasas robustas mecánica o químicamente, o de alta tolerancia a las variaciones de la temperatura, debido a las condiciones de trabajo a las que deben funcionar. El encapsulado en dichas circunstancias puede representar una proporción significativa del coste total del transpondedor (el 30%).
- La frecuencia de trabajo de la etiqueta. En general, los transpondedores de baja frecuencia son más baratos que los de alta frecuencia.
- El tipo de etiqueta: posibilidades de lectura/escritura, activas o pasivas. Los tags pasivos son más baratos que los activos.

El mínimo precio objetivo actualmente es de unos 5 céntimos de euro por etiqueta, pero cómo lograrlo implica un amplio debate, ya que el camino para alcanzarlo seguramente implicará reducir las actuales capacidades que se esperan de la etiqueta.

### *3.1.3.2. Lectores*

Un lector o interrogador es el dispositivo que proporciona energía a las etiquetas, lee los datos que le llegan de vuelta y los envía al sistema de información. Asimismo, también gestiona la secuencia de comunicaciones con el lector.

Con el fin de cumplir tales funciones, está equipado con un módulo de radiofrecuencia (transmisor y receptor), una unidad de control y una antena. Además, el lector incorpora un interfaz a un PC, host o controlador, a través de un enlace local o remoto: RS232, RS485, Ethernet, WLAN (RF, WiFi, Bluetooth, etc.), que permite enviar los datos del transpondedor al sistema de información.

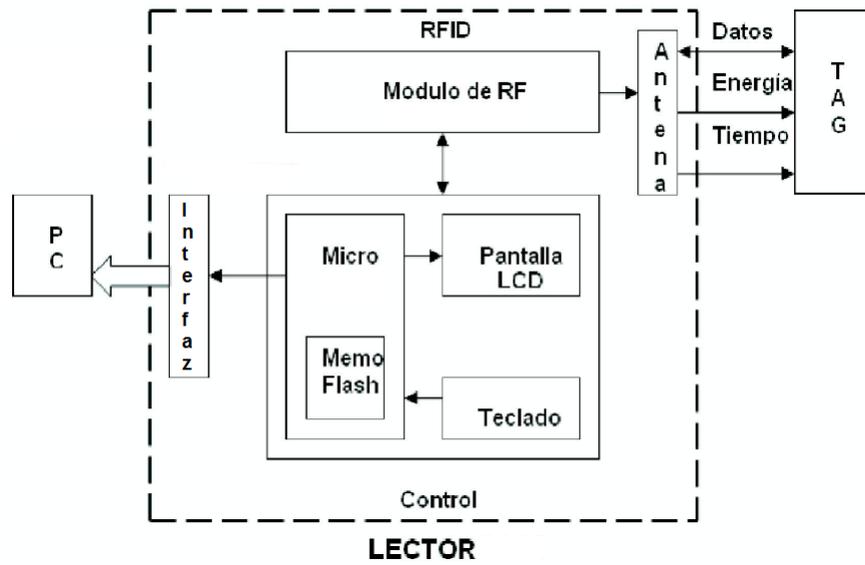


Figura 3.8. Diagrama de bloques de un lector RFID.

El lector puede actuar de tres modos:

- Interrogando su zona de cobertura continuamente, si se espera la presencia de múltiples etiquetas pasando de forma continua.
- Interrogando periódicamente, para detectar nuevas presencias de etiquetas.
- Interrogando de forma puntual, por ejemplo cuando un sensor detecte la presencia de una nueva etiqueta.

Los componentes del lector son, como podemos ver en la figura 3.8, el módulo de radiofrecuencia (formado por receptor y transmisor), la unidad de control y la antena. A continuación se procede a describir un poco más cada uno de estos elementos.

El módulo de radiofrecuencia, que consta básicamente de un transmisor que genera la señal de radiofrecuencia y un receptor que recibe, también vía radiofrecuencia, los datos enviados por las etiquetas. Sus funciones por tanto son:

- Generar la señal de radiofrecuencia para activar el transpondedor y proporcionarle energía.
- Modular la transmisión de la señal para enviar los datos al transpondedor.
- Recibir y demodular las señales enviadas por el transpondedor.

La unidad de control, constituida básicamente por un microprocesador, se encarga de realizar las siguientes funciones:

- Codificar y decodificar los datos procedentes de los transpondedores.
- Verificar la integridad de los datos y almacenarlos.
- Gestionar el acceso al medio: activar las etiquetas, inicializar la sesión, autenticar y autorizar la transmisión, detectar y corregir errores, gestionar el proceso de multilectura (anticolisión), cifrar y descifrar los datos, etc.
- Comunicarse con el sistema de información, ejecutando las órdenes recibidas y transmitiéndole la información obtenida de las etiquetas.

Una de las funciones más críticas que debe realizar la unidad de control es gestionar el acceso al medio. Cuando se transmite información mediante una tecnología que no requiere contacto físico, existe la posibilidad de que aparezcan interferencias que provoquen cambios indeseados a los datos transmitidos y, en consecuencia, errores durante la transmisión. Para evitar este problema se utilizan procedimientos de comprobación (checksum). Los más comunes son la comprobación de bits de paridad, comprobación de redundancia longitudinal (LRC, Longitudinal Redundancy Check) y comprobación de redundancia cíclica (CRC, Cyclic Redundancy Check).

El número de etiquetas que un lector puede identificar en un instante de tiempo depende de la frecuencia de trabajo y del protocolo utilizado. Por ejemplo, en la banda de alta frecuencia suele ser de 50 tags por segundo, mientras que en la banda de ultra alta frecuencia puede alcanzar las 200 tags por segundo.

La antena del lector es el elemento que habilita la comunicación entre el lector y el transpondedor. Las antenas están disponibles en una gran variedad de formas y tamaños. Su diseño puede llegar a ser crítico, dependiendo del tipo de aplicación para la que se desarrolle. Este diseño puede variar desde pequeños dispositivos de mano hasta grandes antenas independientes.

El principal aspecto a considerar a la hora de elegir una antena, es el área de cobertura requerido para la aplicación, de modo que sea lo suficientemente grande para detectar las etiquetas pero lo suficientemente pequeña para evitar lecturas espúreas no válidas que pueden afectar y confundir al sistema.

A pesar de que las etiquetas pueden leerse en todas las orientaciones, en general el campo generado por la antena del lector tiene una dirección determinada. Este hecho influye especialmente en HF y UHF, pudiendo reducirse la cobertura al 50% o incluso imposibilitando la lectura de la etiqueta. Por ello, resulta conveniente buscar el acoplamiento óptimo entre ambas antenas, y si la orientación de la etiqueta no puede controlarse se debe buscar una compensación mediante un adecuado diseño de la antena.

Todos estos aspectos hay que tenerlos en cuenta antes de adquirir el lector, ya que en general todas las antenas RFID se presentan como productos finales, por lo que es necesario analizar previamente sus características. Sin embargo, la mayoría son

sintonizables de modo que puedan ajustarse a la frecuencia de operación seleccionada para el sistema. Esto las hace susceptibles a multitud de factores externos, como son:

- Variaciones RF.
- Pérdidas por proximidad de metales.
- Variaciones del entorno.
- Efectos armónicos.
- Interferencias con otras fuentes de RF.
- Reflexiones de la señal.
- Diafonía (cross-talk).

El problema de desintonización de la antena, como consecuencia del efecto de estos factores, puede corregirse mediante la introducción de circuitos dinámicos autosintonizadores, que realimentan continuamente la antena para que ésta esté siempre bien sintonizada.

Los lectores pueden variar su complejidad considerablemente dependiendo del tipo de transpondedor que tengan que alimentar y de las funciones que deban desarrollar. Una posible clasificación los divide en fijos o móviles dependiendo de la aplicación que se considere.

- Los dispositivos fijos se posicionan en lugares estratégicos como puertas de acceso, lugares de paso o puntos críticos dentro de una cadena de ensamblaje, de modo que puedan monitorizar las etiquetas de la aplicación en cuestión.
- Los lectores móviles suelen ser dispositivos de mano. Incorporan una pantalla LCD, un teclado para introducir datos y una antena integrada dentro de una unidad portátil. Por esta razón, su radio de cobertura suele ser menor.



Figura 3.9. Lector RFID móvil Motorola MC3190-Z a la izquierda y lector RFID fijo Intermecc IV7 a la derecha

Los principales parámetros que caracterizan un lector RFID son:

- Frecuencia de operación. El lector puede funcionar a baja frecuencia, alta frecuencia, ultra alta frecuencia y frecuencia de microondas. Ya existen en el mercado lectores multifrecuencia.
- Protocolo de funcionamiento. Muchas compañías ofrecen soporte multiprotocolo (ISO, propietarios...), pero no admiten todos los protocolos existentes.
- Tipo de regulación que siguen. Por ejemplo, existen distintas regulaciones de frecuencia y de potencia en Estados Unidos y en Europa:
  - La banda de UHF funciona a 902 – 930 MHz en Estados Unidos y a 869 MHz en Europa.
  - La máxima potencia permitida es de 2 Watios en Estados Unidos y 0.5 Watios en Europa.
- Interfaz con el sistema host:
  - TCP/IP.
  - WLAN.
  - Ethernet (10BaseT).
  - Serie: RS 232, RS 485.
- Capacidad para multiplexar muchos lectores:
  - A través de concentradores.
  - A través de middleware.
- Capacidad para actualizar el software del lector on-line:
  - Vía Internet.
  - Vía interfaz con el host.
- Capacidad para gestionar múltiples antenas, típicamente 4 antenas/lector.
- Capacidad para interactuar con otros productos de middleware.
- Entrada/salida digital para conectar otros dispositivos tales como sensores externos o circuitos de control adicionales.

### 3.1.3.3. Programadores

Los programadores son los dispositivos que permiten escribir información sobre la etiqueta RFID. La programación se realiza una vez sobre las etiquetas de sólo lectura o varias veces si las etiquetas son de lectura/escritura. Es un proceso que generalmente se suele llevar a cabo antes de que el producto entre en las distintas fases de fabricación.

El radio de cobertura al que un programador puede operar, es generalmente menor que el rango propio de un lector, ya que la potencia necesaria para escribir es mayor. En ocasiones puede ser necesario distancias próximas al contacto directo.

Un tipo especial de programador es la impresora RFID. Existen impresoras con capacidad de lectura/escritura, que permiten programar las etiquetas a la vez que se imprime con tinta información visible. Antes de realizar la escritura de la etiqueta, deben introducirse los datos deseados en la impresora. Una vez escritos, un lector a la salida comprueba la fiabilidad de los datos. Evidentemente este tipo de programación debe realizarse sobre etiquetas especiales hechas de materiales flexibles y que permiten la impresión en su exterior. Algunos sistemas comerciales con este tipo de etiquetas son fabricados por Zebra y Printronix.



Figura 3.10. Impresora RFID Zebra ZM400.

#### 3.1.3.4. Middleware

El middleware es el software que se ocupa de la conexión entre el hardware de RFID y los sistemas de información. Es el responsable de la calidad y usabilidad de las aplicaciones basadas en RFID. Sus funciones principales son:

- Adquisición de datos. El middleware es responsable de la extracción, agrupación y filtrado de los datos procedentes de múltiples lectores RFID en un sistema complejo.
- Encaminamiento de los datos. El middleware dirige los datos al sistema apropiado dentro de las redes de elementos y sistemas RFID.
- Gestión de procesos. El middleware se puede utilizar para disparar eventos en función de las reglas de la organización empresarial donde opera, por ejemplo, envíos no autorizados, bajadas o pérdidas de stock, etc.
- Gestión de dispositivos. El middleware se ocupa también de monitorizar y coordinar los lectores RFID, así como de verificar su estado y operatividad, y posibilita su gestión remota.

Muchos de los middleware desarrollados o en desarrollo se ajustan a los estándares de EPCglobal, conocidos como Savant. La especificación Savant ordena los componentes del middleware de acuerdo a sus funciones.

Debido al reciente interés que ha surgido en el middleware, han aparecido gran cantidad de suministradores, aunque no se puede decir que en la actualidad exista ninguno que sea dominante. Algunos de los actores en el mercado en este momento son:

- Proveedores de software de aplicación empresarial, que ofrecen adiciones RFID a las aplicaciones de software empresarial existentes. Como ejemplo tenemos Provia, Maniatan Associates y RedPrairie.
- Proveedores de software de infraestructura, como Sun, IBM, Oracle, SAP, y Microsoft, que están ampliando sus productos middleware existentes para incluir RFID.
- Los fabricantes de equipamiento RFID extienden sus líneas de producto y se introducen en el mercado del middleware. Como ejemplos tenemos Zebra, Check Point e Intermec.
- Empresas recién llegadas a este ámbito, como GlobeRanger, OutSystems, ConnecTerra y Data Brokers, ofrecen productos para filtrado de datos y gestión y aplicación de reglas de negocio empresarial.

### *3.1.3.5. Sistema de información*

El principal objetivo de la aplicación software es gestionar y tratar los datos recibidos por el lector. El sistema debe ser lo suficientemente robusto para poder manejar las múltiples lecturas que permiten realizar los sistemas RFID, coordinar tiempos y flujos de información, gestionar los distintos eventos, soportar las realimentaciones de los usuarios, introducir las actualizaciones del sistema cuando sea requerido e integrarlo con otros sistemas de información.

Algunos de los sistemas de información con los que se puede integrar un sistema RFID son: el sistema de planificación de recursos ERP (Enterprise Resource Planning), el sistema de gestión de almacenes WMS, (Warehouse Management System), el sistema de albaranes y comprobantes de entrega POD (Proof Of Delivery) o el sistema de comprobantes de recogida POC (Proof Of Collection).

## *3.1.4. Tipos de sistemas*

### *3.1.4.1. Sistemas de baja frecuencia (135 KHz)*

Los sistemas RFID de baja frecuencia suelen emplear etiquetas pasivas y utilizan para su funcionamiento el acoplamiento inductivo. Poseen pocos requisitos regulatorios.

### **Capacidad de datos**

En el caso normal de etiquetas pasivas, la capacidad de datos es baja, de alrededor de 64 bits. Si se trata de etiquetas activas, éstas permiten una capacidad de almacenamiento de hasta 2 kbits.

### **Velocidad y tiempo de lectura de datos**

Las tasas de transferencia de datos son bajas, típicamente entre 200 bps y 1 kbps. Por ejemplo, una etiqueta de 96 bits transmitiéndose a una velocidad de 200 bps, necesitará 0.5 segundos para ser leída, lo que implica un tiempo de lectura muy lento.

### **Cobertura**

Al tratarse de un sistema inductivo, el campo magnético decrece muy rápidamente con la distancia (con el inverso del cubo de la distancia) y con las dimensiones de la antena. Este hecho puede verse como una ventaja en aplicaciones donde se requiera que la zona de cobertura esté estrictamente limitada a un área pequeña.

Las antenas que utilizan son pequeñas y complejas, pero la tecnología está muy desarrollada.

Las etiquetas pasivas suelen poseer una cobertura pequeña, que alcanza como mucho los 0.5 metros, aunque depende también de la potencia disponible en la etiqueta.

Las etiquetas activas pueden superar los 2 metros, aunque este rango también depende de la potencia, construcción, configuración de la antena y tamaño.

### **Zona de lectura**

La penetración en materiales no conductores es buena, pero no funcionan bien con materiales conductores. Este problema se incrementa con la frecuencia. Además son muy susceptibles a interferencias electromagnéticas industriales de baja frecuencia.

### **Áreas de aplicación**

Aptas para aplicaciones que requieran leer poca cantidad de datos y para pequeñas distancias. Se puede utilizar por ejemplo para control de accesos, identificación de animales, gestión de bienes, identificación de vehículos y contenedores, y como soporte a la producción.

El control de accesos es sin duda la aplicación más extendida para este intervalo de frecuencias. Sin embargo, hay que considerar la baja cobertura y pequeña capacidad de memoria de las etiquetas pasivas, por lo que para este tipo de aplicaciones en ocasiones puede ser necesario el empleo de etiquetas activas para ampliar la zona de lectura y poder mejorar la seguridad encriptando la información.

Las etiquetas de baja frecuencia también aparecen en la identificación animal con el fin de gestionar el ganado, identificar y controlar las especies protegidas o identificar animales domésticos.

#### *3.1.4.2. Sistemas de alta frecuencia (13,56 MHz)*

La mayoría de los sistemas que trabajan a 13.56 MHz utilizan etiquetas RFID pasivas y su principio de funcionamiento básico, al igual que en baja frecuencia, se basa en el acoplamiento inductivo.

##### **Capacidad de datos**

Las etiquetas (pasivas) suelen poseer capacidades típicas que van desde 512 bits hasta 8 kbits, divididos en sectores o bloques que permiten direccionar los datos.

##### **Velocidad y tiempo de lectura de datos**

Típicamente la velocidad de datos suele ser de unos 25 Kbps (menor si se incluyen algoritmos de comprobación de errores de bit). También existen dispositivos con tasas superiores a 100 Kbps.

Los sistemas RFID a esta frecuencia son capaces de leer aproximadamente 40 etiquetas por segundo.

##### **Cobertura**

Típicamente las etiquetas pasivas poseen un radio de cobertura de alrededor de 1 metro.

##### **Zona de lectura**

Posee una buena penetración en materiales y líquidos no conductores. Sin embargo, no funciona bien cuando existen materiales metálicos en la zona de lectura, ya que éstos producen reflexiones en la señal. Su inmunidad al ruido por interferencias electromagnéticas industriales de baja frecuencia es mejor que para los sistemas de baja frecuencia.

La orientación de la etiqueta puede resultar otro problema según aumenta la distancia, debido a las características vectoriales de los campos electromagnéticos. Este efecto puede contrarrestarse mediante la utilización de antenas de transmisión más complejas.

##### **Áreas de aplicación**

Al igual que en LF, los sistemas de HF son aptos para aplicaciones que requieran leer poca cantidad de datos y a pequeñas distancias. Es el caso de la gestión de maletas en

aeropuertos, bibliotecas y servicios de alquiler, seguimiento de paquetes y aplicaciones logísticas en la cadena de suministros.

### *3.1.4.3. Sistemas de ultra alta frecuencia (433 MHz, 860 MHz, 928 MHz)*

Los sistemas RFID que trabajan a ultra alta frecuencia basan su funcionamiento en la propagación por ondas electromagnéticas para transmitir los datos y para alimentar la etiqueta en caso de que ésta sea pasiva.

#### **Capacidad de datos**

Están disponibles etiquetas activas y pasivas con capacidades típicas desde los 32 bits hasta los 4 Kbits, típicamente divididos en páginas de 128 bits para permitir direccionar los datos.

#### **Velocidad y tiempo de lectura de datos**

La velocidad de transferencia de datos está típicamente alrededor de 28 kbps (menor si se incluyen algoritmos de comprobación de errores de bit) pero también están disponibles velocidades mayores. Permite la lectura de aproximadamente 1000 etiquetas por segundo.

#### **Cobertura**

Las etiquetas de UHF pasivas pueden alcanzar una cobertura de 3 ó 4 metros. Trabajando con etiquetas activas y a la frecuencia más baja, 433 MHz, la cobertura puede alcanzar los 10 metros.

Sin embargo, la cobertura está significativamente influenciada por las regulaciones de los distintos países correspondientes a la cantidad de potencia permitida, que es menor en Europa que en Estados Unidos. La estandarización es insuficiente y la tecnología poco madura.

Sin ir más lejos, en Europa, donde la potencia máxima emitida por el lector es de 0.5 Watios, el alcance del sistema puede reducirse hasta los 33 centímetros. Se espera que este valor se incremente hasta los 2 metros, cuando la potencia máxima permitida aumente hasta 2 Watios.

#### **Zona de lectura**

Posee una buena penetración en materiales conductores y no conductores, pero presenta dificultades ante la presencia de líquidos (agua). Su inmunidad al ruido por interferencias electromagnéticas industriales de baja frecuencia es mejor que para los sistemas de baja frecuencia, pero debe considerarse la influencia de otros sistemas de UHF operando en las proximidades.

La orientación de la etiqueta también puede resultar un problema a esta frecuencia, debido a las características vectoriales de los campos electromagnéticos. Este efecto puede contrarrestarse mediante la utilización de antenas de transmisión más complejas.

### **Áreas de aplicación**

Apta para aplicaciones que requieran distancias de transmisión superiores a las bandas anteriores, como en la trazabilidad y seguimiento de bienes y artículos, y logística de la cadena de suministros.

#### *3.1.4.4. Sistemas en frecuencia de microondas (2.45 GHz, 5.8 GHz)*

### **Capacidad de datos**

Están disponibles sistemas de etiquetas activas y pasivas, con capacidades que van típicamente desde 128 bits hasta dispositivos de 512 Kbits, que pueden dividirse en sectores o bloques para permitir direccionar los datos.

### **Velocidad y tiempo de lectura de datos**

Depende del diseño de la etiqueta, pero suele ser elevada. La velocidad típica está por debajo de los 100 kbps, aunque algunos dispositivos pueden alcanzar 1 Mbps. Por ejemplo 32 kbits transmitidos a 100 kbps tardan 0.3 segundos. Si lo que mide son bloques de 128 bits, de 40 etiquetas, se emplearán 0.05 segundos.

### **Cobertura**

Buen rango de trabajo, abarcando regiones de entre 1 y 2 metros para dispositivos pasivos y hasta 15 metros o más, para dispositivos activos.

### **Zona de lectura**

Posee una buena penetración en materiales no conductores, pero no así en líquidos que contienen agua, donde el coeficiente de absorción es importante. Es reflejado por metales y otras superficies conductoras. Es susceptible al ruido. Se trata de una banda de trabajo compartida.

### **Áreas de aplicación**

Apta para aplicaciones que requieran alta cobertura y velocidades de transmisión elevadas, como por ejemplo, automatización en la fabricación, control de accesos, peaje de carreteras, logística de la cadena de suministros y aplicaciones logísticas militares.

## 3.1.5. Normalización y regulación

### 3.1.5.1. Estándares

Existen numerosos organismos regulatorios que influyen en mayor o menor medida en la estandarización de la tecnología RFID. La ISO (“International Organization for Standardization”) define estándares comerciales e industriales a nivel mundial. La IEC (“International Electrotechnical Commission”), por su lado, promueve la cooperación internacional para la estandarización en los campos de la electrónica y las tecnologías. Ambos organismos definen los estándares ISO/IEC.

Estándares ISO/IEC para RFID	
<b>11784</b> <b>11785</b> <b>14223</b>	Contienen la estructura del código de identificación por radiofrecuencia para animales. El estándar ISO 14223 detalla el interfaz aire entre el lector y el transpondedor RFID basado en la condición de compatibilidad según la norma ISO 11784-5.
<b>10536</b> <b>14443</b> <b>15693</b>	Definen las características físicas, el interfaz aire y la inicialización, y los protocolos anti-colisión y de transmisión de tarjetas inteligentes (“vicinity cards” y “proximity cards”). Estas tarjetas se pueden utilizar para una o múltiples aplicaciones (control de acceso, autenticación de usuarios, prepago).
<b>10374</b>	Especifica todos los requisitos de usuario para la identificación automática de contenedores de carga, incluyendo sistemas de identificación del contenedor, codificación de datos, criterios de rendimiento y seguridad.
<b>15961</b> <b>15962</b> <b>15963</b>	Estándares para las técnicas de identificación automática y adquisición de datos para gestión de objetos. Incluyen protocolo de datos, interfaz de aplicación, reglas de codificación de datos e identificación única.
<b>Series 18000</b>	Las normas ISO 18000 1 a 7 definen los parámetros para el interfaz aire en las frecuencias aceptadas de forma internacional: 135 kHz, 13.56 MHz, banda UHF, 2.45 GHz y 5.8 GHz. La norma 18046 se centra en los métodos de prueba de rendimiento de tags y lectores, mientras que la norma 18047 se ocupa de los test de conformidad de los dispositivos. Este estándar es similar al de EPCGlobal.

La serie ISO/IEC 18000 se utiliza conjuntamente con otros estándares de capas superiores que definen el resto de funcionalidades. En la siguiente tabla se describen los estándares de esta serie que definen el interfaz aire de un sistema RFID.

Estándar ISO/IEC - Serie 18000	
<b>18000-1</b>	Parámetros genéricos para el interfaz aire en todas las frecuencias.
<b>18000-2</b>	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones por debajo de 135 kHz.
<b>18000-3</b>	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones a 13.56 MHz.
<b>18000-4</b>	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones a 2,45 GHz.
<b>18000-5</b>	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones a 5.8 GHz.
<b>18000-6</b>	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones desde 860 a 960 MHz. La ISO 18000-6A y B especifican el interfaz aire para RFID pasivas en la banda UHF (900 MHz).
<b>18000-7</b>	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones a 433 MHz.

### 3.1.5.2. EPCGlobal

EPCGlobal es una organización sin ánimo de lucro que se creó, apoyada por la industria, para establecer y mantener la red EPCGlobal (“EPCGlobal Network”) como el estándar mundial para la identificación automática de objetos en la cadena de suministro. Por tanto, EPCGlobal define estándares RFID a todos los niveles:

- El formato lógico de los datos contenidos en una etiqueta EPC.
- El protocolo de comunicaciones de los siguientes tipos de etiquetas:
  - Clase 0 a 900 MHz.
  - Clase 1 a 13.56 MHz.
  - Clase 1 para el rango de 860 a 930 MHz.
- Middleware de recogida y tratamiento de datos (“Savant”), incluyendo la comunicación con los equipos de lectura/escritura.
- La especificación PML (“Physical Markup Language”), lenguaje basado en XML que define el formato de la información intercambiada ente componentes dentro de la red EPC.
- La especificación ONS (“Object Name Service”), para la red global, que retiene la información sobre cualquier objeto en el mundo etiquetado con un tag EPC.

El estándar EPC Clase 1 Generación 2 (C1G2) se ha publicado como estándar ISO 18000-6C reconocido internacionalmente para gestión y control de cadenas de suministros. Es, por tanto, el punto de unión entre los estándares ISO y EPC.

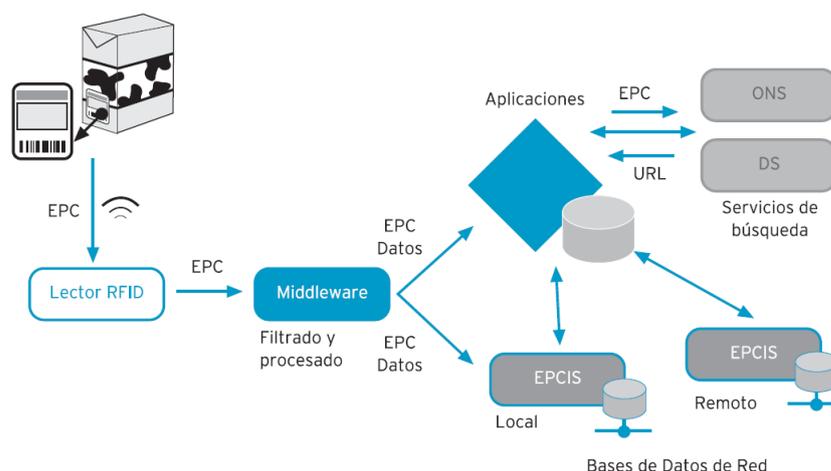


Figura 3.11. Esquema de la red EPCGlobal.

### 3.1.5.3. Legislación

Adicionalmente a la regulación del espectro radioeléctrico y a la estandarización de la tecnología, existen otras consideraciones legales a nivel internacional que afectan al desarrollo e implantación global de la tecnología RFID, y que hay que tener en cuenta en los proyectos que incluyan esta tecnología.

Para LF y HF encontramos que existe una legislación homogénea en todo el mundo. Sin embargo, en la banda UHF, al estar aún en desarrollo, no se ha llegado a dicha homogeneización.

En Estados Unidos, sin tener en cuenta las leyes individuales aprobadas por los distintos estados que limitan o regulan el uso de la tecnología, la FCC (“Federal Communications Commission”) ha aprobado que los lectores de RFID en la banda UHF puedan operar con una potencia máxima de transmisión de 4 W, el doble que en Europa. El ancho de banda permitido para la comunicación es también mayor que el aprobado en Europa, lo que permite instalar una mayor cantidad de lectores en un mismo emplazamiento (mayor densidad).

Estas restricciones de potencia y ancho de banda de comunicación en Europa se deben a la coincidencia de la banda UHF con la utilizada por los móviles GSM. Actualmente, con la aprobación en 2004 del estándar EN 302 208 de la ETSI, la potencia máxima que pueden utilizar los equipos es de 2 W, en la banda de 865 a 868 MHz. En España ya se ha aprobado su utilización, eliminando la solicitud de licencia que era necesaria previamente.

En otros países también existen diferencias regulatorias. En China, siendo uno de los mercados con mayores expectativas, aún no existe regulación oficial para la banda UHF.

Otras regulaciones que influyen de forma positiva en el desarrollo de RFID son las relacionadas con la seguridad o con la trazabilidad de los productos. En la Unión Europea,

la regulación (EC) No. 178/2002 exige la trazabilidad de los alimentos. Por tanto, todas las operadoras de alimentos deben:

- Asegurar que los alimentos cumplen los requisitos de la ley en todas las fases de producción, procesado y distribución.
- Identificar a cualquier suministrador.
- Habilitar sistemas para identificar a otras empresas a las que hayan distribuido alimentos.
- Ser capaces de iniciar procedimientos para retirar los alimentos del mercado en caso de que sea necesario.

### 3.1.6. Near Field Communication (NFC)

#### 3.1.6.1. Fundamentos de la comunicación

Este tipo de comunicación se realiza por acoplamiento magnético entre las antenas de espira de dos elementos NFC. Cuando un dispositivo NFC, alimentado eléctricamente, se acerca lo suficiente a otro, el campo magnético creado por el primero es capaz de inducir una corriente en el segundo de tal forma que pueda establecerse la comunicación y, por lo tanto, la transferencia de datos entre ellos.

Existen dos clases de dispositivos NFC:

- **Activos:** Los que son capaces de crear su propio campo de RF utilizando para ello alimentación eléctrica (baterías normalmente). Se corresponden, principalmente, con los smartphones.
- **Pasivos:** Si la alimentación que reciben procede del campo de RF de otro dispositivo. Aquí se incluirían las etiquetas NFC.

A continuación se pueden observar los diferentes tipos de etiquetas NFC definidas por el NFC Forum:

Tipo	Estándar	Modos	Memoria	Velocidad
<b>Tipo 1</b>	ISO 14443A	Solo lectura	96 bytes	106 Kbit/s
		Lectura/Escritura	Ampliable a 2 Kbytes	
<b>Tipo 2</b>	ISO 14443A	Solo lectura	48 bytes	106 Kbit/s
		Lectura/Escritura	Ampliable a 2 Kbytes	
<b>Tipo 3</b>	Sony FeliCa	Solo lectura	1 Mbytes	212 Kbit/s ó
				424 Kbit/s

<b>Tipo 4</b>	ISO 14443A y B	Solo lectura	32 Kbytes	Hasta 424 Kbit/s
		Lectura/Escritura		

Por otra parte, dependiendo de la función que realice dentro de la comunicación (ser emisor o receptor), un dispositivo NFC puede ser:

- **Iniciador (initiator):** Si es quien inicia y controla el intercambio de información.
- **Objetivo (target):** Si es quien responde a los requerimientos del iniciador.

En este aspecto habría que decir que un dispositivo NFC activo puede actuar como iniciador o como objetivo, pero un dispositivo pasivo sólo puede ser objetivo.

Relacionado con las diferentes formas de actuar de los dispositivos comentadas anteriormente, el NFC Forum define dos modos de operación entre aquellos que desean establecer la comunicación:

- **Modo pasivo:** El Iniciador (activo), que posee una fuente de alimentación propia, es quien empieza la comunicación a una determinada velocidad de transferencia, generando el campo electromagnético que alimentará la circuitería del Objetivo (pasivo) y haciendo que éste pueda enviar su respuesta a la misma velocidad.

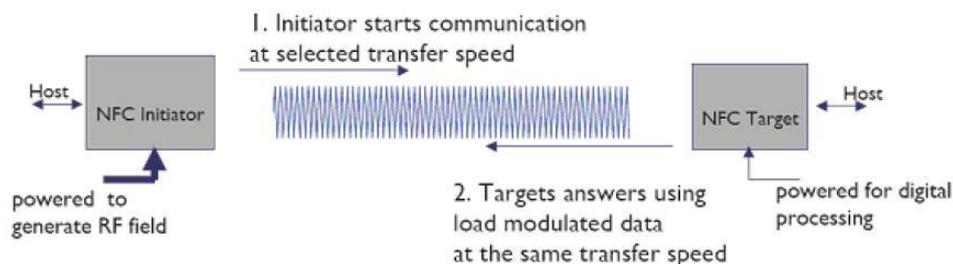


Figura 3.12. Comunicación en modo pasivo.

- **Modo activo:** Tanto el Iniciador (activo) como el Objetivo (activo) disponen de una fuente de alimentación para generar señales electromagnéticas por lo que éste último no depende del primero cuando tiene que enviar datos, o lo que es lo mismo, uno de los dispositivos desactiva su campo de RF mientras espera a una respuesta.

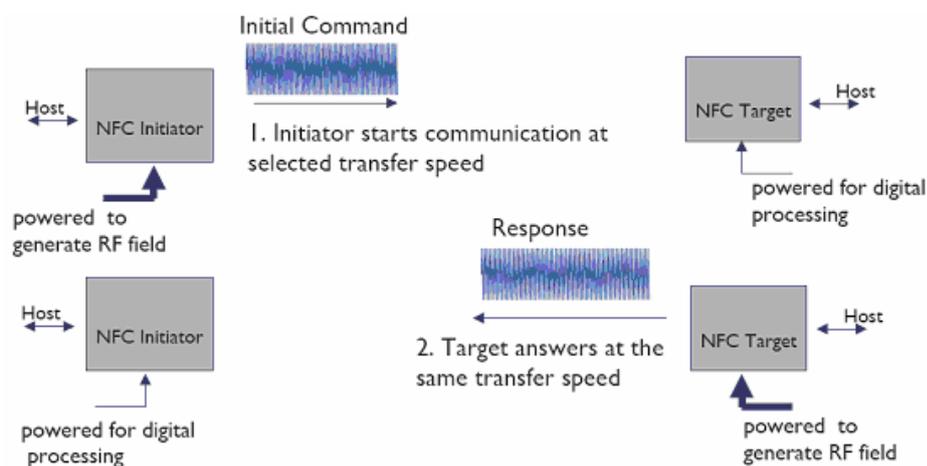


Figura 3.13. Comunicación en modo activo.

Una comunicación NFC consta de cinco fases diferenciadas que cuentan con una función específica:

1. **Descubrimiento:** Los dispositivos involucrados inician el proceso de rastreo y reconocimiento.
2. **Autenticación:** Los dispositivos verifican si el otro dispositivo está autorizado o si deben implantar algún tipo de cifrado en la comunicación.
3. **Negociación:** En esta parte del establecimiento, los dispositivos definen parámetros como la velocidad de transmisión, la identificación del dispositivo, el tipo de aplicación, su tamaño, y si es necesario, también definen la acción a ser solicitada.
4. **Transferencia:** Una vez negociados los parámetros de la comunicación se puede comenzar con el intercambio de datos.
5. **Confirmación:** El dispositivo receptor confirma el establecimiento de la comunicación y la transferencia de información.

En esta tecnología se tiene la capacidad de poder implementar tres configuraciones distintas:

- **Modo lectura/escritura:** En este modo el dispositivo NFC puede leer los cuatro tipos de etiquetas NFC. Cuando se establece esta configuración los dispositivos NFC pueden intercambiar pequeñas cantidades de información como puede ser un texto en claro, una dirección web o un número de teléfono. Este modo tiene compatibilidad de RF (a nivel físico) con la ISO/IEC 14443 y FeliCa.
- **Modo emulación de tarjeta inteligente:** Este modo se utiliza para que el dispositivo NFC actúe como una etiqueta o una tarjeta inteligente (modo de funcionamiento pasivo). En este modo es posible utilizar las características de seguridad avanzadas, lo cual es muy interesante si utilizamos el dispositivo como medio de pago o para el almacenamiento y gestión de todo tipo de entradas y recibos.
- **Modo Peer-to-Peer:** Este modo sirve básicamente para el intercambio de pequeñas cantidades de datos utilizando el protocolo tradicional de NFC. Pero si es necesario un intercambio masivo de información, también se podría utilizar para establecer

los parámetros de una comunicación inalámbrica basada en otra tecnología como Bluetooth o Wi-Fi.

### *3.1.6.2. Especificaciones técnicas*

La principal característica que identifica a la tecnología NFC es el hecho de haber sido desarrollada con objeto de ser utilizada en las comunicaciones inalámbricas de muy corto alcance, quedando determinada como tal, una distancia máxima no superior a los 10cm.

Los dispositivos NFC se pueden comunicar por proximidad, es decir, sin necesidad de haber contacto, con cuatro velocidades de transmisión de datos diferentes: 106, 212, 424 o 848 Kbit/s, aunque esta última no está reflejada en ISO/IEC 18092. Esta limitación se debe a que la tecnología NFC no está orientada a la transmisión masiva de datos, sino a pequeñas comunicaciones entre dispositivos.

La banda de frecuencias utilizada se corresponde con la banda ISM (Industrial, Scientific, and Medical) que está globalmente disponible para su uso, sin restricciones ni necesidad de licencia, lo que representa una ventaja para su implantación ya que el canal de transmisión es libre y no tiene un sobre coste añadido. Concretamente, NFC tiene asignada la banda alojada en los 13,56 MHz, tradicionalmente asociada a las etiquetas RFID. También hay que decir que la mayor parte de la energía de radiofrecuencia se concentra en torno a  $\pm 7$  KHz, aunque una vez modulada la señal, el ancho de banda empleado es de 1,8 MHz.

En este sentido, ahora tocaría hablar de la modulación y codificación utilizada por esta tecnología. En la gran mayoría de las situaciones NFC trabaja con una modulación ASK, cuyo índice de modulación es del 10%, y con una codificación Manchester. Excepto en un caso concreto en el que se produce una variación: cuando la comunicación queda establecida en modo activo y a una velocidad de 106 Kbit/s. Aquí la modulación empleada sigue siendo ASK, pero su índice de modulación cambiaría a un 100%. Sin embargo, para la codificación de línea se emplearía en este caso un código de Miller Modificado.

Finalmente se debe comentar que el tiempo de configuración que necesita NFC para establecer una comunicación entre dos dispositivos es inferior a los 100ms y que su consumo de potencia es menor de 15mA.

### 3.1.6.3. Protocolos

#### **NFC Interface and Protocol-1 (NFCIP-1)**

Este estándar está definido en el ECMA-340 y en la ISO/IEC-18092. En él se especifican los esquemas de modulación y codificación, y la arquitectura para las velocidades de transferencia de 106 a 424 Kbits/s, además de la banda de frecuencias utilizada. También define los modos de operación activo y pasivo, los métodos anticolidión para el modo activo y la selección de objetivo e inicialización para el modo pasivo.

#### **NFC Interface and Protocol-2 (NFCIP-2)**

Está definido en el ECMA-352 y en la ISO/IEC-21481. NFCIP-2 especifica un método para escoger uno de entre estos tres modos de comunicación:

- Modo NFC (NFCIP-1)
- Modo Proximity card reader (ISO/IEC-14443)
- Modo Vicinity card reader (ISO/IEC-15693)

Es por ello que éste estándar provee una puerta de entrada para otros estándares diferentes que existen actualmente, es decir, permite la compatibilidad con otras tecnologías como Mifare, FeliCa, RFID, etc.

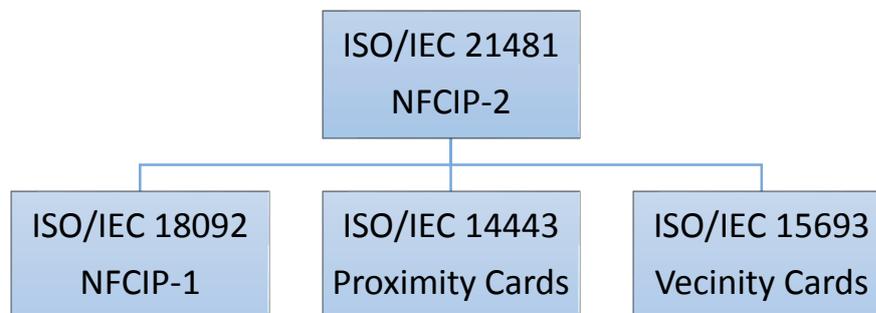


Figura 3.14. Esquema de los estándares empleados por NFC.

#### **NFC Data Exchange Format (NDEF)**

Para que las etiquetas y los dispositivos puedan comunicarse entre sí, y para posibilitar la interoperabilidad entre dispositivos NFC y RFID de los diferentes fabricantes, el NFC Forum definió un formato de datos estandarizado. Este formato, denominado NDEF (en español, formato de intercambio de datos NFC) propone una forma de organizar el contenido almacenado en la etiqueta o que viaja de un dispositivo a otro.

Un mensaje NDEF se caracteriza por estar compuesto de uno o más registros, cada uno de los cuales contienen, además del bloque de datos, una cabecera con la información de control como el identificador, la longitud de la información y el tipo concreto.

Una desventaja del formato NDEF es que toda la información es accesible por todos los dispositivos NFC. Esto hace que datos escritos previamente en una etiqueta por un dispositivo NFC puedan ser borrados o sobrescritos con otra información en cualquier momento y por cualquier dispositivo. Si esto fuera un inconveniente, podría ser solventado mediante el uso de claves de acceso.

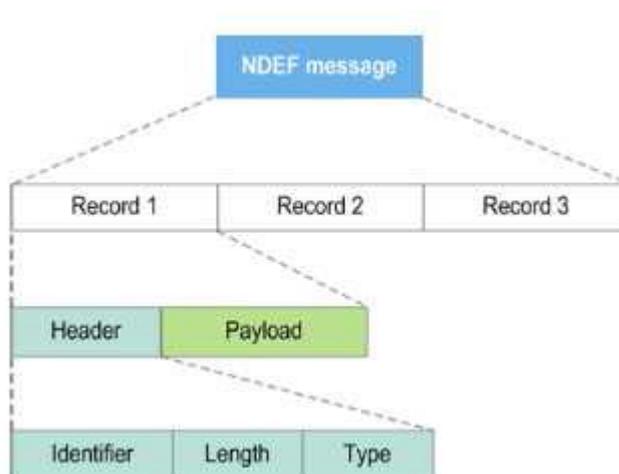


Figura 3.15. Estructura del mensaje NDEF.

### **Record Type Definition (RTD)**

La especificación RTD (en español, definición de tipo de registro) proporciona las pautas para describir los diferentes tipos de registros incluidos en un mensaje NDEF.

El NFC Forum define dos clases. Por un lado estarían los NFC Forum External Types, que da a los organismos la posibilidad de especificar sus propios tipos independiente del NFC Forum y, por el otro, el NFC Forum Well-Known Types creados por dicha asociación para disponer de unos formatos comunes. Dentro de esta última categoría estarían los siguientes tipos:

- **Text Record Type:** Sólo texto simple, ninguna aplicación específica asignada.
- **Uniform Resource Identifier (URI) Record Type:** Correo electrónico, direcciones de Internet, números de teléfono u otros códigos de identificación.
- **Smart Poster Record Type:** Es una extensión del tipo de registro URI, que proporciona información adicional acerca del URI, como iconos o acciones recomendadas.
- **Generic Control Record Type:** Proporciona una estructura para cualquier actividad de control.
- **Signature Record Type:** Utilizada para certificar la veracidad de unos datos determinados.

- **Connection Handover:** Ofrece traspaso de una conexión NFC a otra tecnología de comunicación con mayor rendimiento de datos (por ejemplo, Bluetooth).

### 3.3. Redes inalámbricas de área personal (WPAN)

Una red de área personal está pensada para interconectar dispositivos en el radio de acción de una persona, esto es, en un radio de unos 10 metros, aproximadamente.

Estas redes nacieron en el año 1999, cuando el IEEE creó el grupo de trabajo 802.15, cuyo propósito es el estudio de las redes de área personal. De forma resumida los objetivos del grupo 802.15 son:

- Que los equipos tengan un consumo de potencia mínimo para facilitar su uso con baterías.
- Que los equipos sea ligeros y manejables ya que al ser portátiles deben poder moverse con facilidad para facilitar su uso dentro de la WPAN.
- Conseguir bajos costes para asegurar su competitividad en el mercado.
- Resolver el problema de interferencias ya que estas redes suelen trabajar en la banda ISM (Industrial Scientific Medical) de 2,4 GHz, muy utilizada por este tipo de equipos al ser una banda de uso sin licencia.

Dentro del estándar 802.15 existen diferentes grupos de trabajo, dedicado cada uno de ellos a diferentes objetivos para satisfacer el máximo de necesidades de comunicación.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.1:** El grupo de trabajo IEEE 802.15.1 fue aprobado como un nuevo estándar el 15 de abril de 2002 y se publicó el 14 de junio del mismo año. Al 802.15.1 a menudo se le confunde con el estándar Bluetooth, pero la realidad es que Bluetooth basa sus capas inferiores en esta especificación. Este estándar está orientado a interconectar dispositivos electrónicos, teléfonos móviles, ordenadores, PDA's, periféricos de ordenadores y además permite la transmisión de voz y datos.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.2:** En este grupo de trabajo se aborda la coexistencia de diferentes sistemas inalámbricos que trabajan en bandas de frecuencia que no necesitan licencia. El 802.15.2 propone dos mecanismos de coexistencia, dependiendo de los protocolos establecidos entre las diferentes redes. Existe el mecanismo colaborativo en el cual las redes "negocian" el mínimo de interferencia mutua. Si no hay ningún tipo de protocolo entre las redes se usa el mecanismo no colaborativo. Dependiendo del entorno en el que se esté trabajando será conveniente el uso de uno u otro mecanismo.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.3:** Este estándar fue creado por la creciente necesidad de crear WPAN que fueran capaces de transmitir la información con una mayor velocidad y eficiencia. Las principales características del 802.15.3 son:

- Múltiples rangos de velocidad de transmisión de datos: 11, 22, 33, 44 y 55 Mbps.
- Bajo consumo de potencia. Se estima una potencia de transmisión de 8dBm para un rango de distancias de 30 a 50 metros.
- Bajo costo debido a la baja complejidad del estándar.
- Comunicación entre dispositivos punto a punto.
- Utiliza un algoritmo de encriptación llamado Advanced Encryption Standard, lo que hace al 802.15.3 un estándar muy robusto en cuanto a la seguridad. El nivel de seguridad puede variar según las necesidades del usuario.

Dentro de este último grupo de trabajo cabe destacar varios estándares:

- **El estándar IEEE 802.15.3a o UWB:** UWB es una tecnología que empezó a ser desarrollada en la década los 60 con el objetivo de hacer transmisiones de datos a muy alta velocidad. La velocidad de transmisión de datos que se ha conseguido es de 110 Mbps a 10 metros y una máxima de 480 Mbps a distancias inferiores a un metro. La aplicación que se le quiere dar es similar a la del Bluetooth, sin pretender que compitan, ya que es usada para transmisiones de datos que necesitan de un gran ancho de banda, cosa que el Bluetooth no puede llevar a cabo debido a su velocidad de transmisión de datos (1Mbps).
- **El estándar IEEE 802.15.3b:** Este estándar se ha desarrollado para dotar a la capa MAC (Medium Access Control) del 802.15.3 de una mayor interoperabilidad y mejorar también la compatibilidad con estándares más antiguos.
- **El estándar IEEE 802.15.3c:** el grupo de trabajo TG3c diseño en septiembre de 2009 una capa física basada en ondas milimétricas para el estándar 802.15.3. Este tipo de ondas se transmiten en la banda libre de 57-64 GHz y permiten unas velocidades de transferencia de hasta 2 Gbps pensadas para accesos a internet de alta velocidad, retransmisión de streamings o retransmisiones en HD.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.4:** Las características más relevantes del estándar IEEE 802.15.4 son la flexibilidad de la red, bajo costo y bajo consumo de energía. Este estándar es mucho más simple y por lo tanto es más fácil de implementar. El 802.15.4 trabaja en la banda libre de 2.4 GHz por lo que junto con las características anteriormente mencionadas, tiene grandes aplicaciones en la domótica y en la industria. Bajo este estándar trabaja el protocolo ZigBee.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.5:** Este estándar comenzó a formarse en mayo de 2004 con el objetivo de desarrollar un estándar para WPAN, de forma que dividiera en mallas WPAN de baja transmisión y en mallas WPAN de alta transmisión.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.6:** Este estándar, también conocido como BAN (Body Area Network), comenzó a desarrollarse a mediados de 2007. Aún no está claro la banda de frecuencia en la que va a trabajar, sin embargo, si lo están sus aplicaciones, las cuales quieren dotar a las futuras generaciones de un estándar de bajo consumo de potencia que actúe sobre, dentro o alrededor del cuerpo humano (sin limitarlo a los humanos), para servir una variedad de aplicaciones, incluyendo médicas, electrónica de consumo personal de entretenimiento y otros.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.7:** El estándar 802.15.7, también conocido como VLC (Visible Light Communication) es el estándar más reciente en el que está trabajando el grupo IEEE 802.15. Fue creado en enero de 2009 y aún está en pleno desarrollo. Lo más característico de este nuevo estándar es la modificación de las capas física y MAC (Medium Access Control) para poder conseguir comunicaciones con el espectro de luz visible.

Estas redes son el desafío tecnológico del momento. Surgen por la creciente necesidad de acercar la red al usuario y de integrar todos los servicios en base a conseguir una automatización total del entorno, de forma que se obtenga un esquema de comunicaciones y de monitorización completo de toda la infraestructura. En relación con esto, los siguientes apartados profundizarán en las tecnologías ZigBee y Bluetooth.

### 3.3.1. Tecnología Bluetooth / 802.15.1

#### 3.3.1.1. Definición

La tecnología Bluetooth es un protocolo inalámbrico abierto pensado para el intercambio de datos en distancias cortas entre dispositivos móviles y fijos. En sus inicios fue concebido para sustituir las conexiones cableadas RS-232. Mediante este protocolo se pueden conectar varios dispositivos evitando problemas de sincronización.



Figura 3.16. Logotipo Bluetooth.

Bluetooth es un sustituto de conexiones cableadas para cantidades modestas de información. Posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes equipos, como por ejemplo entre teléfonos móviles y periféricos como micrófonos, manos libres de coches o para controlar equipos industriales, entre otras conexiones. Los principales objetivos que se pretende conseguir con esta tecnología son:

- Facilitar las comunicaciones entre equipos móviles y fijos
- Eliminar cables y conectores entre éstos
- Ofrecer la posibilidad de crear pequeñas redes inalámbricas y facilitar la sincronización de datos entre nuestros equipos personales

### 3.3.1.2. Historia

En 1994 se iniciaron estudios por parte de la empresa Ericsson para determinar la viabilidad de una interfaz vía radio, de bajo coste y consumo, para conectar teléfonos móviles con sus accesorios eliminando los cables y conectores entre aparatos.

A principios de 1998 Nokia, IBM, Toshiba e Intel se unieron a Ericsson formando el grupo de trabajo Bluetooth SIG (Special Interest Group). El Bluetooth SIG es una organización privada, sin ánimo de lucro, que se encarga del desarrollo de la tecnología dejando de lado la fabricación y venta de productos. La idea sobre la que se formó este proyecto era llegar a una gran cantidad de mercado con esta tecnología, y por ello se contó con dos líderes del sector de las telecomunicaciones, dos líderes del mercado de los PC y PCs portátiles y un líder en la fabricación de chips.

Posteriormente Motorola, Microsoft, Lucent o 3Com además de cerca de 2000 empresas tecnológicas se han incorporado al Bluetooth SIG con la finalidad de investigar productos y servicios relacionados con Bluetooth en las áreas de las telecomunicaciones, informática, automatizaciones industriales o medioambientales.

### 3.3.1.3. Versiones

La primera versión de la norma, 1.0a, se publicó en 1998 y posteriormente ha sido sustituida por las versiones 1.0b, 1.1 (2002), 1.2 (2005), 2.0 (2004), 2.1 (2007), 3.0 (2009) y la más reciente 4.0 publicada en 2010. A continuación se enumeran estas versiones con las modificaciones más importantes introducidas en cada versión:

- **Versiones 1.0a y 1.0b.** Versiones iniciales con muchos problemas de interoperabilidad.
- **Versión 1.1 (2002).** Primera versión reconocida como estándar por el IEEE con el estándar IEEE.802.15.1-2002. Corregía muchos de los errores de las versiones inmediatamente anteriores y añadió soporte para canales no cifrados e incorporó el indicador de señal recibida (RSSI).
- **Versión 1.2 (2005).** Reconocido como el estándar IEEE.802.15.1-2005 permitía una conexión más rápida, la detección de otros dispositivos Bluetooth dentro del radio de alcance, mayor resistencia a interferencias, velocidad de transmisión real de 721kbit/s, mayor calidad en los enlaces de audio, control de flujo y modos de retransmisión L2CAP.
- **Versión 2.0 + EDR (2004).** La principal diferencia con la versión inmediatamente anterior en la introducción del EDR (EDR, Enhanced Data Rate) que introduce una mayor velocidad de transmisión de datos que acelera la transferencia de datos entre dispositivos pudiendo alcanzarse velocidades de transmisión de hasta 2,1 Mbit/s.

- **Versión 2.1 + EDR (2007).** Las ventajas que introduce esta versión son un mejor emparejamiento de dispositivos a la vez que se mejora la seguridad e introduce una técnica que reduce el consumo a niveles modo de bajo consumo.
- **Versión 3.0 + HS (2009).** Esta versión soporta velocidades de transmisión de hasta 24Mbit/s en los casos en que se utiliza HS. Esta técnica consiste en que se utiliza en enlace Bluetooth para el establecimiento de la conexión pero la transferencia de datos se hace mediante un enlace 802.11. La incorporación de las altas tasas de transmisión no son obligatorias por lo que sólo los dispositivos marcados con la etiqueta +HS dispondrán del enlace de transmisión 802.11 y por tanto la tasa de transmisión de 24Mbit/s
- **Versión 4.0 (2010).** Es la versión más reciente de las publicadas por el Bluetooth SIG. Incluye el Bluetooth clásico, el de alta velocidad de transmisión y protocolos de bajo consumo siendo esta última característica la principal valía de esta versión.

#### *3.3.1.4. Características técnicas*

La tecnología Bluetooth opera en la banda sin licencia ISM (Industrial, Scientific, Medical; Industrial, Científica, Medicinal) entre 2,4 GHz y 2,485 GHz de amplio espectro, posibilidad de transmisión full-duplex mediante saltos de frecuencia hasta un máximo de 1600 saltos por segundo. El uso de la banda ISM a 2,4 GHz permite la interoperabilidad de los dispositivos bajo esta tecnología en un gran número de países.

Como se ha comentado anteriormente una de los problemas de las redes inalámbricas son las interferencias. Bluetooth utiliza la tecnología de salto de frecuencia adaptable AFH (Adaptative Frequency Hopping) que fue diseñada para evitar las interferencias entre dispositivos que comparten la banda de frecuencias de 2,4 GHz. Esta tecnología comprueba si otros dispositivos están transmitiendo en su rango y evita las frecuencias que están siendo utilizadas.

Para efectuar esta comprobación realiza saltos entre 79 frecuencias a intervalos de 1MHz consiguiendo una transmisión más eficiente y más robusta frente a posibles interferencias de otros dispositivos que operen en la misma banda de frecuencias.

El rango de alcance depende del tipo de dispositivos que estemos utilizando, en la siguiente tabla podemos ver una comparativa de los distintos dispositivos Bluetooth clasificados en clases. A diferencia de los infrarrojos, no es necesario que los dispositivos estén en línea de vista, ni siquiera deben estar en la misma estancia.

Clase	Potencia máxima permitida (mW)	Potencia máxima permitida (dBm)	Rango (aproximado)
Clase 1	100 mW	20 dBm	~100 metros
Clase 2	2.5 mW	4 dBm	~10 metros
Clase 3	1 mW	0 dBm	~1 metro

En cuanto al consumo de energía se ha considerado una tecnología de bajo consumo. La mayoría de los dispositivos funcionan con la radio de clase 2 (2,5mW) y poseen modos de trabajo de bajo consumo que permiten alargar la autonomía de la mayoría de los dispositivos que utilizan esta tecnología y se alimentan con baterías.

Las principales características técnicas de Bluetooth se presentan a continuación:

- Posibilidad de transmisión Full Duplex.
- Posibilidad de soportar transmisiones de voz y datos de manera simultánea.
- Bajo consumo energético.
- Multiplexación: FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), que disminuye el riesgo de que las comunicaciones sean interceptadas o presenten interferencia con otras aplicaciones.
- Topología: Las redes Bluetooth tienen una topología donde un dispositivo hace las veces de maestro y hasta siete dispositivos adicionales pueden operar como esclavos. Esta configuración se conoce como piconet. Un grupo de piconets es conocido como scatternet.
- Tasa de transmisión máxima: la velocidad de transferencia depende de la versión que se está utilizando, la versión 1.2 permite velocidades de hasta 720kbit/s, la versión 2.0 hasta 2,1 Mbit/s, la versión 2.1 hasta 3 Mbit/s y las más recientes permite velocidades de hasta 24 Mbit/s.
- Banda de frecuencia: desde 2.4 a 2.48 GHz.
- Alcance máximo: dependiendo del tipo de dispositivo que utilicemos, como hemos visto antes el alcance máximo es de 100 m.
- El nivel de sensibilidad real se define como el nivel de entrada para el cual se satisface un porcentaje de error de bit (BER) del 0,1%. Para cualquier transmisor Bluetooth, la sensibilidad del receptor será de -70 dBm o inferior.

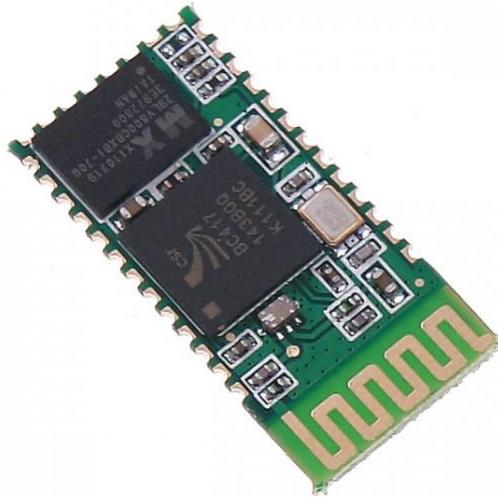


Figura 3.17. Transceptor Bluetooth.

### 3.3.1.5. Protocolos Bluetooth

Uno de los principales objetivos de la tecnología Bluetooth desde su nacimiento ha sido la total compatibilidad entre los dispositivos que usen esta tecnología independientemente del fabricante. Para ello todos los equipos deberán estar implementados sobre la misma estructura de protocolos. En la figura 12 se muestra la pila de protocolos completa.

Esta arquitectura fue diseñada con el propósito de maximizar el número de aplicaciones que puedan implementarse bajo el protocolo Bluetooth. Para conseguir este propósito se reutilizaron protocolos existentes para las capas superiores dejando los específicos de Bluetooth para las capas inferiores.

Típicamente las aplicaciones no utilizan todas las capas disponibles. No obstante, la especificación permite a los fabricantes desarrollar sus propias capas de aplicación para aumentar las capacidades de sus aplicaciones creadas sobre la tecnología Bluetooth.

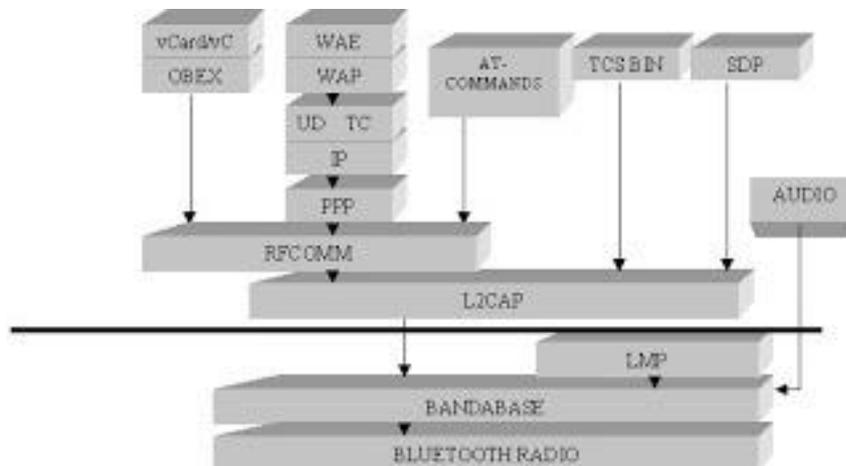


Figura 3.18. Protocolos Bluetooth.

Los protocolos mostrados en la figura anterior pueden ser clasificados según su propósito en los siguientes cuatro grupos:

- Protocolos centrales de Bluetooth: Banda base, LMP, L2CAP y SDP.
- Protocolos de sustitución de cable: RFCOMM.
- Protocolos de control de telefonía: TCS BIN y AT-Commands.
- Protocolos adaptados: PPP, UDP y TCP/IP, OBEX, WAP, vCard, VCal y WAE.

Los protocolos centrales son los desarrollados completamente por el Bluetooth SIG en la gran mayoría de los dispositivos y son los encargados de, según el modelo OSI, los niveles físico, de enlace y de red. Los protocolos de sustitución de cable, control de telefonía y adaptados son los orientados a la aplicación y se encargan de asegurar que las aplicaciones funcionen sobre los protocolos centrales.

La banda base se podría incluir en la capa física del modelo OSI. Su principal función es controlar los canales y enlaces físicos. Además de su función principal también se encarga de las funciones de sincronización, codificación, decodificación, control de errores y seguridad al más bajo nivel. Soporta enlaces simétricos punto a punto (SCO) y enlaces punto a multipunto ACL.

La capa de radio es la inferior del estándar y la más cercana a la capa física del modelo OSI. Es la encargada de la transmisión de los datos. Como ya se ha comentado, Bluetooth trabaja sobre la banda ISM de 2,4 GHz.

A continuación se hace una breve descripción de algunos de los protocolos enumerados anteriormente:

- **L2CAP** (Protocolo de Adaptación y Control de Enlace Lógico): está implementado sobre el protocolo de banda base. Se encarga de proporcionar servicios de datos orientados y no orientados a la conexión para protocolos de niveles superiores. Con esta técnica se hacen opacos los niveles de enlace y físico para las aplicaciones.
- **SDP** (Protocolo de descubrimiento de servicios): proporciona a las aplicaciones una forma de descubrir los servicios disponibles y determinar sus características. Se construye sobre enlaces L2CAP. Una vez que se ha establecido un enlace L2CAP entre dos dispositivos puede usarse el protocolo SDP para encontrar servicios y conectarse a ellos.
- **RFCOMM** (Protocolo de emulación de puerto serie): se encarga de la emulación de los puertos serie (RS-232) sobre el protocolo L2CAP. Del mismo modo que los puertos serie tiene nueve circuitos que pueden ser utilizados para transferir datos y señalización.
- **OBEX** (Protocolo de Intercambio de Objetos): se ha desarrollado para el intercambio simple y espontáneo de objetos. En su definición utiliza un modelo de representación de objetos, un formato estándar para transmitirlos y un protocolo de sesión para el intercambio de peticiones y respuestas entre dispositivos.

### 3.3.1.6. Perfiles Bluetooth

El estándar Bluetooth fue diseñado con el objetivo de ser utilizado por un gran número de fabricantes y ser implementado en distintos campos. Para evitar distintas interpretaciones del estándar el bluetooth SIG creo un conjunto de perfiles. Un perfil define una selección de mensajes y protocolos necesarios para la implementación de una determinada aplicación.

La definición de cada perfil contiene, al menos, información de los siguientes conceptos:

- Sugerencias a cerca del formato de las interfaces de usuario.
- Partes específicas del protocolo de pila usado por el perfil. Para llevar a cabo esta tarea cada perfil utiliza opciones particulares y parámetros en cada capa de la pila.
- Dependencias con otros perfiles.

La tecnología Bluetooth describe un amplio conjunto de perfiles que muestran los diferentes tipos de escenarios en los que pueden ser utilizados. En la figura 3.19 se muestran estos perfiles.

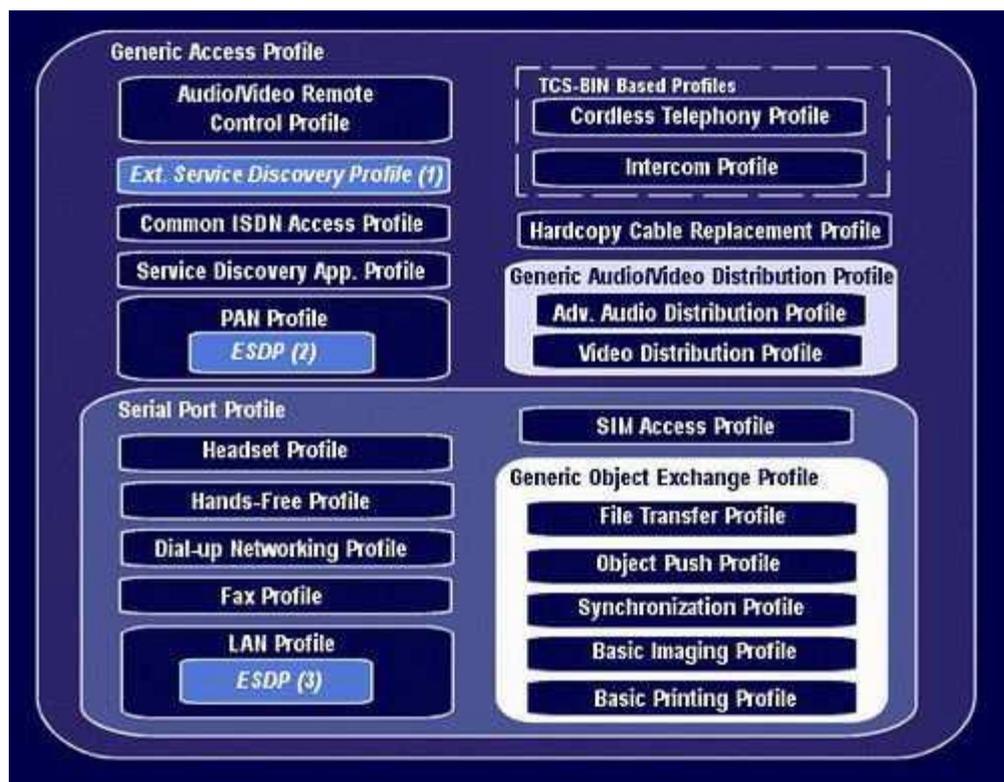


Figura 3.19. Perfiles Bluetooth.

### 3.3.1.7. Topologías de red

Como se ha adelantado anteriormente, Bluetooth proporciona dos tipos de conexiones, punto a punto y punto a multipunto. En el segundo caso dos o más dispositivos comparten el canal. Cuando dos o más dispositivos comparten el canal se define el tipo de red como piconet. En esta topología de red uno de los dispositivos actúa como maestro y los demás como esclavos. El estándar permite a todos los dispositivos asumir cualquiera de los dos roles permitiendo incluso que un dispositivo sea maestro en una red y esclavo en otra.

El número máximo de dispositivos en una red piconet es 8. Teniendo en cuenta que uno de ellos es el maestro, podrá haber hasta 7 esclavos activos. La puntualización de hasta 7 esclavos activos quiere decir que pueden haber muchos más dispositivos en la red pero no podrá haber nunca más de siete transmitiendo. El maestro se encarga de decidir cuáles de los disponibles pueden acceder al canal. Un conjunto de varias redes piconet forman la topología de red denominada scatternet.

Como ya se ha dicho, cada red piconet puede tener un único dispositivo maestro pero los dispositivos esclavo pueden participar en más de una piconet utilizando técnicas de multiplexación en el tiempo. En la figura 3.20 se pueden ver las topología descritas.

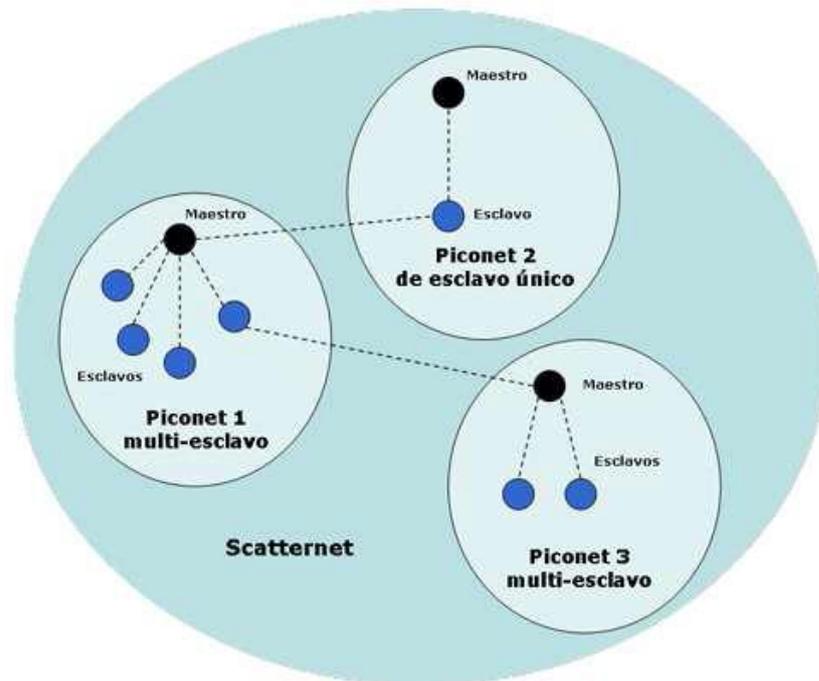


Figura 3.20. Topologías de red Bluetooth.

## 3.3.2. Tecnología ZigBee / 802.15.4

### 3.3.2.1. Introducción

La idea de ZigBee empezó a finales de los 90 cuando los ingenieros se planteaban que Wi-Fi y Bluetooth dejaban un hueco vacío para cierto tipo de aplicaciones. En particular muchos grupos de ingenieros tenían la necesidad de diseñar redes ad-hoc de interfaz radio digital que pudieran organizarse automáticamente sin la necesidad de configuración externa o administración de la red. El estándar IEEE 802.15.4 se completó en 2003 y fue ratificado a finales de 2004.

Por otro lado, ZigBee Alliance es una asociación formada en 2002, sin ánimo de lucro, de más de 175 empresas, la mayoría de ellas fabricantes de semiconductores, con el objetivo de auspiciar el desarrollo e implantación de una tecnología inalámbrica de bajo coste, así como de promocionar eventos entre fabricantes, como los llamados “BeeFests”, dedicados a intentar mejorar la interoperabilidad entre marcas, de la misma forma que Bluetooth SIG promociona los conocidos como “UnplugFests”.



Figura 3.21. Logotipo ZigBee Alliance.

Destacan empresas como Invensys, Mitsubishi, Honeywell, Ember, Philips y Motorola que trabajan para convertir ZigBee en un sistema estándar de comunicaciones, vía radio y bidireccional, para aplicaciones de domótica, automatización de edificios, control industrial, periféricos de PC, juguetería, sensores médicos, etc. Los miembros de esta alianza justifican, como se comentaba antes, el desarrollo de este estándar para cubrir el vacío que se produce por debajo del Bluetooth.

ZigBee describe un protocolo inalámbrico normalizado para Redes de Área Personal o WPAN. Es diferente de los otros estándares inalámbricos porque ha sido diseñado para soportar un mercado de diversas aplicaciones que requieren bajo coste y bajo consumo, con una conectividad más sofisticada que otros sistemas inalámbricos. El estándar ZigBee enfoca a un segmento del mercado no atendido por los estándares existentes, con baja transmisión de datos y bajo ciclo de servicio de conectividad. La razón de promover un nuevo protocolo como estándar es para permitir la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por compañías diferentes.

ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4, que define la capa física (PHY) y la de control de acceso al medio (Mac). La alianza ZigBee ha añadido las especificaciones de

las capas red (NWK) y aplicación (APL) para completar lo que se llama la pila o stack ZigBee.

### 3.3.2.2. Arquitectura

ZigBee está basado en el modelo OSI de siete capas de red. Las capas física y de acceso al medio están definidas en el estándar 802.15.4, definiendo la especificación ZigBee, las capas de red y aplicación y los mecanismos de seguridad. La capa de aplicación está formada por la subcapa APS de soporte de aplicación, el ZigBee Device Object (ZDO) y los objetos de aplicación definidos por cada fabricante.

Así pues, la arquitectura de referencia de la especificación ZigBee se presenta en la figura 3.22:

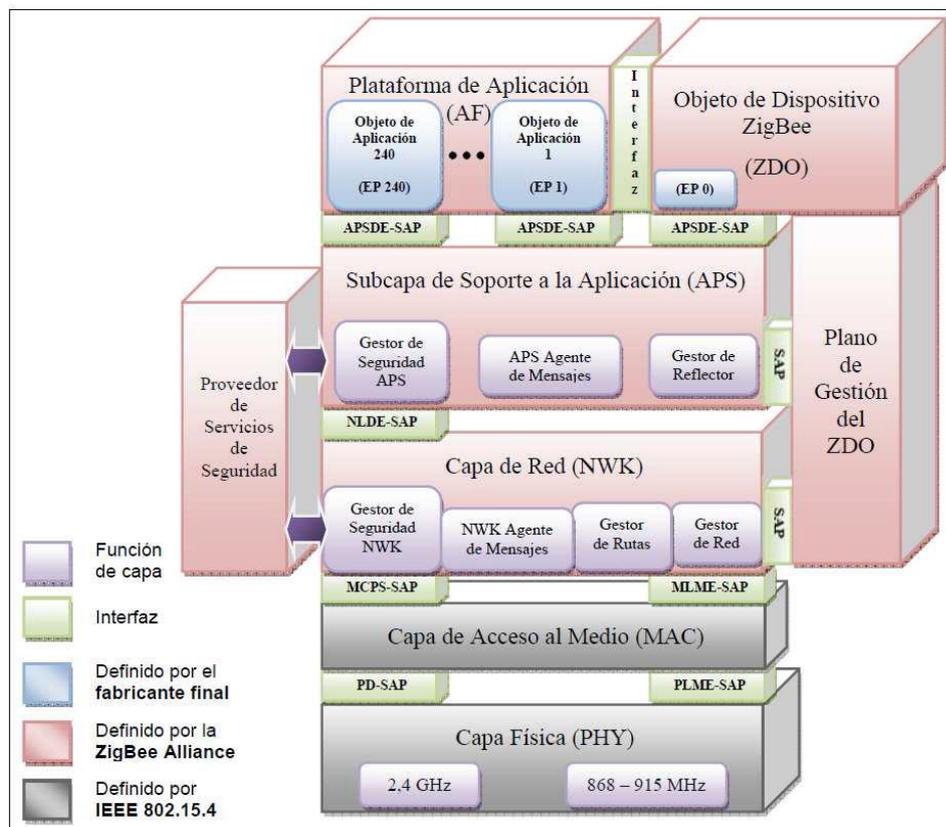


Figura 3.22. Arquitectura de la especificación ZigBee.

### 3.3.2.3. Capa física (PHY)

El IEEE 802.15.4 ofrece dos opciones de PHY que combinan con el MAC para permitir un amplio rango de aplicaciones en red. Ambas PHYs se basan en métodos de secuencia directa de espectro ensanchado (DSSS) que resultan en bajos costes de implementación, y ambas comparten la misma estructura básica de paquetes low-duty-cycle (bajo ciclo de ocupación) con operaciones de bajo consumo de energía. La principal diferencia entre

ambas PHYs radica en la banda de frecuencias. La PHY de los 2.4 GHz, especifica la operación en la banda industrial, médica y científica (ISM), que prácticamente está disponible a nivel mundial, mientras que la PHY de los 868/915 MHz especifica operaciones en la banda de 865 MHz en Europa y 915 MHz en la banda ISM en Estados Unidos.

La disponibilidad internacional de la banda de los 2.4 GHz ofrece ventajas en términos de mercados más amplios y costes de manufactura más bajos. Por otro lado las bandas de 868 MHz y 915 MHz ofrecen una alternativa a la congestión creciente y demás interferencias asociadas a la banda de 2.4 GHz. Y mayores rangos de alcance debido a que existen menores pérdidas de propagación.

Otra diferencia en las características de la PHY es la velocidad de transmisión. La PHY de 2.4 GHz permite una tasa de 250 kb/s, mientras que la PHY de los 868/915 MHz ofrece tasas de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s, respectivamente. Las diferentes velocidades de transmisión se pueden utilizar para lograr una amplia variedad de aplicaciones. Por ejemplo la baja densidad de datos en la PHY de los 868/915 MHz sirve para lograr mayor sensibilidad y mayores áreas de cobertura, con lo que se reduce el número de nodos requeridos para cubrir un área geográfica, mientras que la velocidad de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir poca latencia.

Capa física	Banda	Parámetros de los Datos			Parámetros de chip	
		Velocidad bits (kbps)	Velocidad símbolos (kbaud)	Modulación	Velocidad chip (kchip/s)	Modulación
868/915 MHz	868 – 868.6 MHz	20	20	BPSK	300	BPSK
	902 – 928 MHz	40	40	BPSK	600	BPSK
2.4GHz	2.4 – 2.4835 GHz	250	62.5	16-ary ortogonal	2000	O-QPSK

Figura 3.23. Parámetros de modulación.

### **Canalización.**

En el IEEE 802.15.4 se definen 27 canales de frecuencia entre las tres bandas. La PHY de los 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia que se puede utilizar el mismo hardware para ambos y así reducir costes de fabricación. La PHY de los 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz), para facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción.

Dado que existe una tendencia a tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencias, así como las interferencias no intencionadas de las diferentes aplicaciones, la capacidad de relocalización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de las redes inalámbricas. El estándar fue diseñado para implementar una selección dinámica de canales, a través de una selección específica de

algoritmos, la cual es responsabilidad de la capa de red. La capa MAC incluye funciones de búsqueda de señales a través de una lista de canales permitidos, mientras que la PHY contiene varias funciones de bajo nivel, tales como la detección de los niveles de energía recibidos, indicadores de calidad en el enlace así como de conmutación de canales, lo que permite asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Esas funciones son utilizadas por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar canales en respuesta a una pausa muy prolongada.

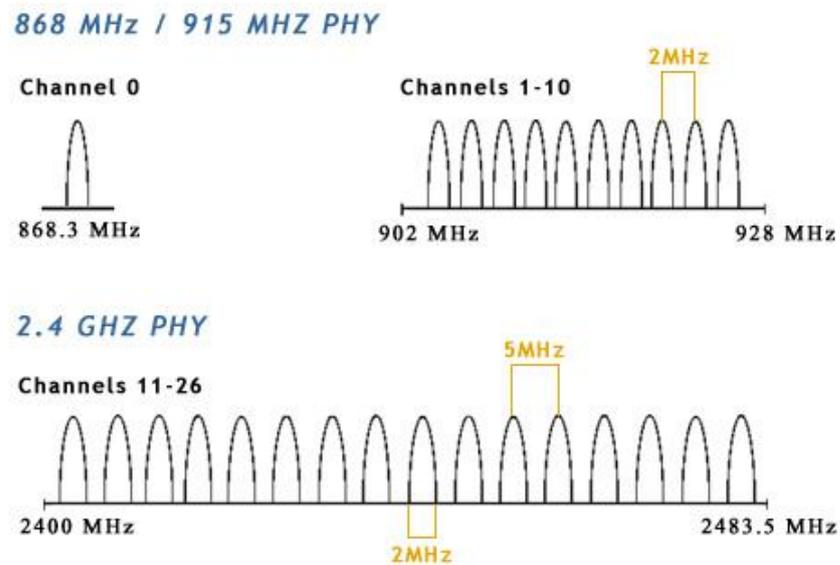


Figura 3.24. Estructura de canales.

### Modulación.

La PHY en los 868/915 MHz utiliza una aproximación simple DSSS en la cual cada bit transmitido se representa por un chip-15 de máxima longitud de secuencia (secuencia m). Los datos binarios son codificados al multiplicar cada secuencia m por +1 o -1, y la secuencia de chip que resulta es modulada dentro de la portadora utilizando BPSK (binary phase shift keying). Antes de la modulación se utiliza una codificación de datos diferencial para permitir una recepción diferencial coherente de baja complejidad.

La PHY de los 2.4 GHz emplea una técnica de modulación semi-ortogonal basada en métodos de DSSS (con propiedades similares). Los datos binarios son agrupados en símbolos de 4 bits, y cada símbolo especifica una de las 16 secuencias de transmisión semiortogonales de código de pseudo-ruido (PN). Las secuencias de PN son concatenadas para que sean datos de símbolos correctos, y la secuencia agregada al chip es modulada en la portadora utilizando MSK (minimum shift keying). El uso de símbolos "casi ortogonales" simplifica la implementación a cambio de un SNR ligeramente menor (< 0.5 dB).

En términos de eficiencia (energía requerida por bit), la señalización ortogonal mejora su SNR en 2 dB que BPSK diferencial. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, la PHY 868/915 MHz tiene una ventaja de 6-8 dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas. Por supuesto, que en ambos casos las pérdidas de

implementación debido a la sincronización, forma del pulso, simplificaciones en el detector, y demás resultan en desviaciones en sus curvas óptimas de detección.

### **Sensibilidad y rango de alcance**

Las especificaciones actuales de sensibilidad del IEEE 802.15.4 especifican -85 dBm para la PHY de los 2.4 GHz y de -92 dBm para la PHY de los 868-915 MHz. Dichos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias requeridas debido a las imperfecciones de fabricación. En cualquier caso, los mejores dispositivos deben de ser del orden de 10 dB mejores que las especificaciones.

Naturalmente el rango de alcance deseado variará en función de la sensibilidad del receptor así como de la potencia del transmisor. El estándar especifica que cada dispositivo debe de ser capaz de transmitir al menos 1 mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación, la potencia de transmisión puede ser mayor o menor.

Los dispositivos ZigBee se espera que cubran un rango de 10-100 m, aunque esto depende del entorno, de la potencia de transmisión concreta y de la sensibilidad del receptor exacta. Para aplicaciones que requieran mayor tiempo de latencia, la topología tipo mesh ofrecen una alternativa atractiva con coberturas caseras dado que cada dispositivo solo necesita suficiente energía para comunicarse con su vecino más cercano.

#### *3.3.2.4. Capa de control de acceso al medio (MAC)*

La capa MAC, es la responsable de asegurar la comunicación entre un nodo y todos los nodos conectados directamente a él, evitando colisiones y mejorando la eficiencia. Más concretamente, las tareas que la capa MAC tiene que realizar son:

- Generar balizas (beacons) si el dispositivo es un coordinador y funciona en modo balizado.
- Sincronizar las balizas de la red.
- Gestionar la conexión y desconexión a la red de los dispositivos asociados al propio nodo.
- Emplear el algoritmo CSMA-CA para gestionar el acceso al canal.
- Asegurar un enlace fiable con la capa MAC de los nodos contiguos.

El protocolo MAC soporta dos modos de funcionamiento (el coordinador es el encargado de seleccionar uno u otro en el momento de iniciar la red):

- **Modo balizado.** La baliza es generada periódicamente por el coordinador y distribuida por toda la red gracias a los routers. Dicha baliza sirve para sincronizar todos los nodos de la red, de modo que estos puedan despertarse en un momento determinado (conocido por todos), enviar los datos almacenados y volver al modo de ahorro energético (sleep). Así, tanto el coordinador, como los routers y los

dispositivos finales pueden pasar gran parte del tiempo en modo de bajo consumo. La topología en malla no admite el modo balizado debido a la complejidad que ello conllevaría (a un mismo dispositivo podrían llegarle balizas provenientes de distintos routers).

- **Modo no balizado.** En este modo los dispositivos no están sincronizados unos con otros. Así, únicamente los dispositivos finales pueden entrar en el modo sleep mientras que los routers y el coordinador deben estar continuamente con el sistema radio en modo recepción y así estar preparados para recibir datos en cualquier momento. Este modo es más simple pero hace que gran parte de sus nodos (el coordinador y los routers) tengan un mayor consumo energético. Asimismo, impide que los coordinadores puedan planificar sus envíos a los dispositivos finales.

### 3.3.2.5. Capa de red (NWK)

La capa de red se define en la especificación de ZigBee. Esta capa es necesaria para gestionar las capas físicas y MAC del estándar 802.15.4, y para proveer de una adecuada interfaz de servicio al nivel de aplicación. Básicamente las tareas que realiza la capa de red son las siguientes:

- Configuración de nuevos dispositivos.
- Inicialización de la red PAN.
- Asociación, reasociación y abandono de una red.
- Adjudicación de direcciones de red.
- Descubrimiento de la topología de red.
- Encaminamiento (routing).

A nivel de red, existen dos tipos de direcciones, direcciones cortas (16 bits) y direcciones largas o direcciones IEEE (64 bits). Cada dispositivo debe tener asignada una dirección IEEE única. No puede haber dos dispositivos que cumplan con la especificación ZigBee y que posean la misma dirección IEEE. Así pues, esta dirección es asignada en el momento de la fabricación del dispositivo. Por contra, la dirección corta es asignada por la capa de red de forma dinámica. Dentro de una red ZigBee no puede haber más de un dispositivo con igual dirección corta.

El estándar IEEE 802.15.4 dispone de dos tipos distintos de dispositivos:

- **FFD (Full Function Device):** dispositivo de función completa que se puede usar en cualquier topología. Puede operar como Coordinador de Red de Area Personal (Coordinador PAN) o como dispositivo de red (end point).
- **RFD (Reduced Function Device):** dispositivo de función reducida. Limitado a una topología en estrella. No puede ser Coordinador de red, solo puede recibir órdenes

o informar a un Coordinador cercano, y es muy fácil de implementar.

También se definen los roles que pueden adquirir los dispositivos en la red:

- **Coordinador:** es el dispositivo encargado de inicializar y gestionar la red, así como las tareas de seguridad. En toda red ZigBee ha de existir un coordinador.
- **Router:** estos dispositivos gestionan el tráfico y dan la posibilidad de aumentar el tamaño y número de dispositivos en una red. Son los encargados de establecer nuevos caminos en posibles casos de congestión o de fallos en algún nodo. Pueden estar conectados al coordinador o a otro router.
- **Dispositivo Final:** este tipo de dispositivos normalmente serán los que envíen y reciban información pero no realizan tareas de encaminamiento. Deben estar conectados a un router o directamente al coordinador y no admiten dispositivos conectados a ellos. Al no tener que realizar tareas de gestión de red estará la mayor parte del tiempo en modo de bajo consumo saliendo de él únicamente cuando tenga que transmitir información.

Toda red ZigBee estará formada por un sólo coordinador, uno o varios routers, y varios dispositivos finales.

### Topologías de red

#### *Topología en estrella*

Las redes formadas en estrella están compuestas por un FFD como coordinador y una serie de FFD o RFD como dispositivos finales. El coordinador es el encargado de iniciar la red y gestionarla posteriormente, y todos los dispositivos finales estarán conectados a él. Las comunicaciones entre dispositivos finales han de pasar por el coordinador. El mayor inconveniente de esta topología es que la expansión de la red se ve limitada por el radio de alcance del dispositivo coordinador. Otro factor que podría considerarse un inconveniente es la recomendación de alimentar el dispositivo coordinador a partir de la red eléctrica ya que al ser el encargado de gestionar toda la red su consumo puede ser elevado para un funcionamiento con baterías.

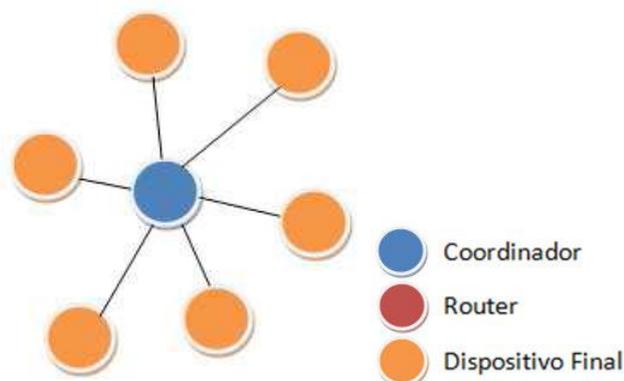


Figura 3.25. Topología de red en estrella.

### Topología en malla

Las redes desplegadas en topología de malla están compuestas por un coordinador, uno o varios routers y uno o varios dispositivos finales. Todos los dispositivos de la red pueden comunicarse entre sí. La función de coordinador la llevará a cabo el primer router que inicie la red compartida con los demás router que formen parte de la red. El hecho de repartir las tareas de coordinación y encaminamiento en más de un dispositivo aumenta la fiabilidad y la flexibilidad, a costa de una mayor complejidad. La comunicación entre dispositivos tiene más de un camino posible y la planificación de dichos caminos ha de solventarse por la propia red.

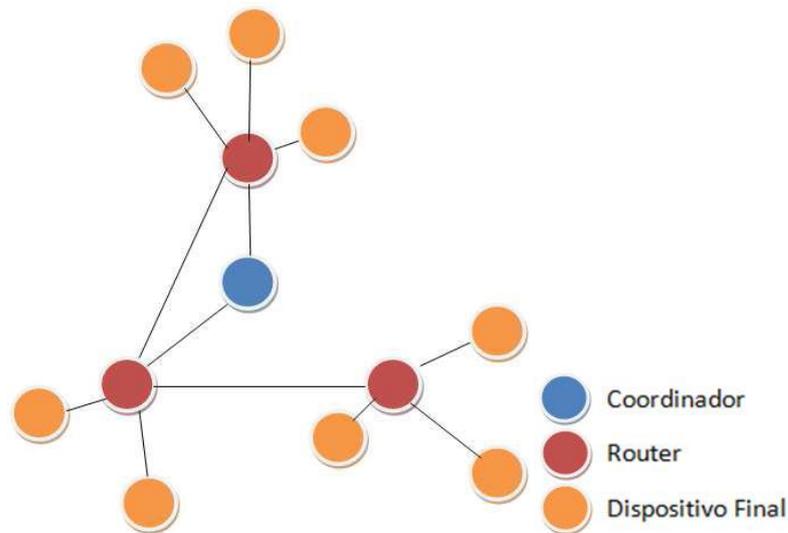


Figura 3.26. Topología de red en malla.

### Topología en árbol

La topología en árbol puede ser considerada como una variante de la topología en malla. La diferencia entre las dos es que en árbol los nodos se organizan de una forma jerárquica. Los dispositivos encargados de gestionar la red y realizar las tareas de encaminamiento pueden tener nodos colgando de ellos. La topología en árbol facilita la expansión de una red al poder añadir nodos con facilidad. Al igual que en el caso anterior se recomienda que el coordinador y los routers estén alimentados con baterías.

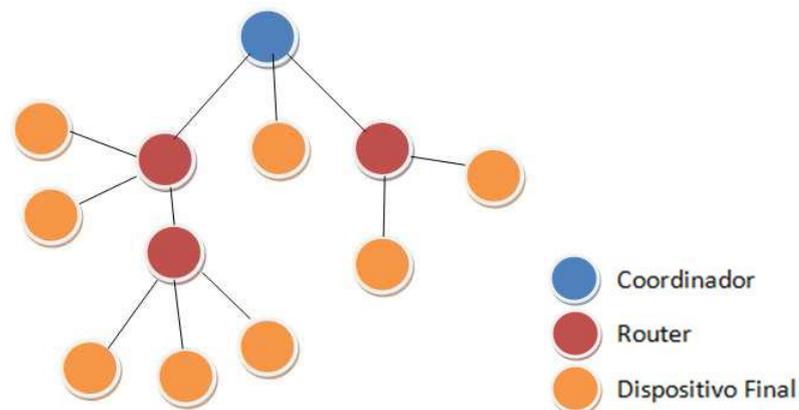


Figura 3.27. Topología de red en árbol.

### 3.3.2.6. Capa de aplicación (APL)

La capa de aplicación ZigBee está compuesta por la subcapa de soporte de aplicación (APS), el marco de aplicación (application framework) y el objeto de dispositivo ZigBee (ZigBee Device Object o ZDO). En la figura 2.11 podemos ver una representación de la capa de aplicación y sus diferentes partes.

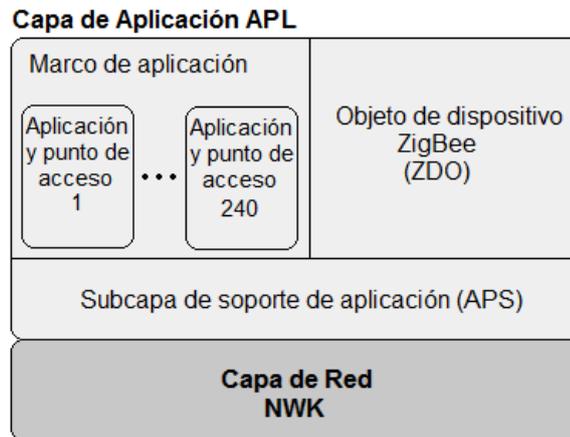


Figura 3.28. Capa de aplicación.

#### **Subcapa de soporte de aplicación (APS o Application Sublayer)**

La subcapa de soporte de aplicación proporciona una interfaz de comunicación entre la capa de red y la capa de aplicación. Las tareas que realiza esta capa son:

- Genera la PDU a nivel de aplicación.
- Una vez los puntos de acceso de dos dispositivos están vinculados, la capa APS es la encargada de gestionar el intercambio de mensajes.
- Mejorar la fiabilidad de la capa de red. Por ejemplo, se puede definir una confirmación ack a nivel de aplicación.
- Rechaza mensajes recibidos por duplicado.

#### **Marco de aplicación (AF o Application Framework)**

El marco de aplicación es el entorno en el cual se gestionan las diferentes aplicaciones. Cada una de dichas aplicaciones está relacionada a un punto de acceso distinto.

Se permiten hasta 240 aplicaciones distintas dentro de un mismo dispositivo. El punto de acceso 0 está asignado al nivel ZDO. El rango de 241-254 está reservado para uso futuro. Por último, el punto de acceso 255 es usado para la comunicación broadcast con todas las aplicaciones dentro del marco de aplicación.

Esta capa es la encargada de definir tanto el perfil de aplicación como los diferentes clusters. Cada cluster se caracteriza por un identificador propio (cluster ID).

### **Objeto de dispositivo ZigBee (ZDO o ZigBee Device Object)**

Este nivel satisface necesidades comunes a todas las aplicaciones dentro del marco de aplicación. Las tareas que realiza son:

- Inicializar las capas APS y de red.
- Definir el rol del dispositivo dentro de la red (coordinador, router o dispositivo final).
- Gestiona los vínculos entre puntos de acceso.
- Asegura una comunicación segura entre dispositivos.

#### *3.3.2.7. Implementaciones comerciales*

Algunos de los principales fabricantes de dispositivos electrónicos basados en ZigBee/802.15.4 son:

#### **Digi International**

XBee es una gama de módulos de radio que dispone de una amplia variedad de modelos, componentes, firmware, potencias de transmisión y antenas. Trabajan con un voltaje de operación de 3,3 voltios y, aunque incorporan hasta 20 pines para distintas operaciones como reinicio o modo de bajo consumo, pueden funcionar haciendo uso tan sólo de sus 4 pines principales: alimentación, tierra, y entrada y salida de datos.

Cuentan con un microchip que, además de ocuparse de las tareas propias de la comunicación radio, les permite realizar operaciones con un nivel de lógica muy básico, como por ejemplo leer directamente datos de sensores y retransmitirlos sin tener que contar con procesado externo. Para lógica más avanzada deben conectarse a otro dispositivo que se encargue de ello, como un microcontrolador más complejo.

Algunos de los tipos de módulos XBee son:

- Serie 1. Esta serie de módulos XBee proporciona soporte para comunicaciones punto a punto de forma simple y basándose en el estándar 802.15.4. Su principal ventaja es la sencillez.
- Serie 2. Estos módulos permiten implementar redes malladas siguiendo el protocolo ZigBee. Además poseen un mayor alcance y un menor consumo que la serie 1.

Cabe destacar que los módulos XBee de la serie 1 y la serie 2 son incompatibles entre sí, y no pueden interactuar entre ellos de ninguna forma. Los módulos pertenecientes a una serie sólo se pueden comunicar con otros módulos de la misma serie.

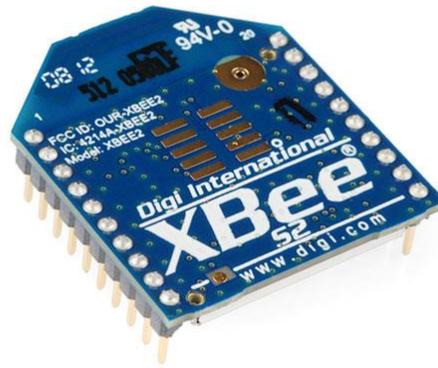


Figura 3.29. Módulo XBee de la Serie 2.

### **Atmel**

Esta empresa ofrece dispositivos basados en la combinación de su serie de microcontroladores conocida como AVR y un sistema radio especialmente diseñado para 802.15.4. Atmel ofrece dos gamas de dispositivos:

- Series AT86RF230 y AT86RF231. Ambas trabajan a 2,4 GHz.
- Serie AT86RF212. Esta serie trabaja en las frecuencias de 868 y 915 MHz y cumple con el estándar 802.15.4c. Dicho estándar es una variante del 802.15.4 que especifica el uso de la banda ISM en China. Con la comercialización de esta serie Atmel pretende expandir su cuota de mercado en dicho país.

### **Ember**

Ember se centra casi exclusivamente en la fabricación de dispositivos relacionados con ZigBee/802.15.4. Los productos básicos que ofrece son:

- EM250 SoC. Sistema que engloba tanto el microprocesador como el transceptor y trabaja a 2,4 GHz.
- EM260 Co-Processor. Este chip combina un transceptor, que también trabaja a 2,4 GHz, con un microprocesador de capacidad limitada. Tiene una conexión SPI (Serial Peripheral Interface)/UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) para poder conectar cualquier microprocesador a dicho sistema. De esta forma se permite al diseñador implementar de forma independiente la parte más alta de la capa de aplicación (marco de aplicación).

### **Freescale**

En relación con ZigBee/802.15.4, Freescale ofrece las siguientes gamas de productos:

- MC1320X RF Transceiver. Transceptor basado en 802.15.4. Posee una conexión SPI para poder conectarlo a cualquier microprocesador.

- MC1321X System in Package. Combina un transceptor MC13202 con un microprocesador de freescale (MC9S08GT).
- MC13224 Platform in Package. Combinación de transceptor 802.15.4 y microcontrolador centrada en la optimización energética del transceptor.

La versión ZigBee de Freescale es conocida como BeeStack. Respecto a la capa MAC, Freescale ofrece la posibilidad de usar el protocolo SMAC (simple MAC), una versión propia y simplificada de la capa MAC 802.15.4.

### **Jennic**

Jennic oferta los siguientes chips. Los tres están compuestos por un transceptor y un microprocesador. JN5148 es el producto más reciente y el que ofrece unas mejores características. Jennic tiene una versión propia de la capa de red conocida como JenNet.

- JN5148.
- JN5139.
- JN5121.

### **Texas Instruments**

Texas Instruments (TI) ofrece varias gamas de productos ZigBee/802.15.4, todas ellas trabajando a 2,4 GHz:

- CC2430 y CC2431. Combinación de transceptor y microcontrolador en un único chip. Trabaja usando Z-Stack, la versión de ZigBee de TI. Los Kits de desarrollo asociados son CC2430DK y CC2431DK.
- CC2480. Coprocesador ZigBee con conexión SPI/UART. Está pensado para trabajar conectado a un microprocesador. El coprocesador ZigBee maneja el sistema radio y en él se integran las capas física, MAC, de red y parte de la de aplicación. El Kit de desarrollo asociado es eZ430-RF2480.
- CC2420 y CC2520. Transceptor 802.15.4 pensado para trabajar conectado a un microprocesador MSP430 de TI. El Kit de desarrollo asociado es CC2520DK.

TI también brinda la oportunidad de trabajar con una capa MAC propia conocida como TIMAC.

## 4. PROPAGACIÓN RADIOELÉCTRICA

---

### 4.1. Modelo de propagación en espacio libre

El modelo de propagación en espacio libre se utiliza para predecir el nivel de potencia recibido en cierta ubicación, cuando no existe ningún objeto cercano al enlace que puede afectar la propagación electromagnética. Esta es una condición mucho más exigente que la conocida como “línea-de-vista” (line-of-sight, LOS) entre el transmisor (Tx) y receptor (Rx) que solo considera obstáculos en la línea que une ambos elementos del enlace. Un enlace puede ser LOS, pero ello no impide que objetos cercanos produzcan reflexiones que puedan afectar la señal que se propaga en el trayecto directo. El modelo de propagación de espacio libre es sin embargo una buena referencia para enlaces más complejos y es además bastante exacto cuando el efecto de elementos cercanos no es significativo.

El modelo predice que la potencia disminuye en función de la separación,  $d$ , entre transmisor y receptor, de acuerdo a la ecuación de Friis:

$$P_r(mW) = \frac{P_t(mW)G_{Tx}G_{Rx}}{L} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Donde  $P_t$  es la potencia transmitida,  $P_r(d)$  es la potencia recibida, que depende de la distancia entre transmisor y receptor,  $G_t$  es la ganancia de la antena de transmisión,  $G_r$  es la ganancia de la antena de recepción,  $d$  es la separación Tx-Rx en metros,  $L$  son las pérdidas del sistema ( $L \geq 1$ ) y  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal electromagnética en metros.

Las pérdidas de trayecto (path loss) representan la atenuación de la señal como una magnitud positiva (en dB) dependiente de la frecuencia de operación y de la distancia entre transmisor y receptor, y están definidas como la diferencia entre la potencia transmitida y recibida de acuerdo a la ecuación:

$$PL(dB) = -20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)$$

## 4.2. Fenómenos de propagación

### 4.2.1. Atenuación y absorción

La atenuación es descrita matemáticamente por la ley del cuadrado inverso que explica cómo se reduce la densidad de potencia con la distancia a la fuente. El campo electromagnético continuo se dispersa a medida que el frente de onda se aleja de la fuente, lo que hace que las ondas electromagnéticas se alejen cada vez más entre sí. En consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor.

Cabe destacar que no se pierde ni se disipa nada de la potencia irradiada por la fuente a medida que el frente de onda se aleja, sino que el frente se extiende cada vez más sobre un área mayor lo que hace una pérdida de potencia que se suele llamar atenuación de la onda. La atenuación de la onda se debe a la dispersión esférica de la onda, a veces se le llama atenuación espacial de la onda.

La causa de la absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire es que el aire no es un vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Estos materiales pueden absorber a las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricos.

La cantidad de potencia perdida va a depender de su frecuencia y por supuesto, del material. La potencia decrece de manera exponencial y la energía absorbida generalmente se transforma en calor.

En las comunicaciones inalámbricas, se considera al metal y el agua como absorbentes perfectos, o sea no van a ser atravesados (aunque capas finas de agua podrían permitir que una parte de la potencia pase). Cuando hablamos del agua, tenemos que recordar que la misma se encuentra en diferentes formas: lluvia, niebla, vapor y nubes bajas y todas van a estar en el camino de los radioenlaces.

Existen otros materiales que tienen un efecto más complejo en la absorción de la radiación electromagnética, por ejemplo, la absorción en los árboles y la madera, depende de cuánta cantidad de agua y de otros compuestos químicos contenga. Generalmente los plásticos y materiales similares, no absorben mucha energía de radio, pero esto varía dependiendo de la frecuencia y el tipo de material.

Un ejemplo interesante, por la temática de éste proyecto, es el agua de mar que, a bajas frecuencias se comporta como un conductor y a frecuencias UHF y próximas a microondas se comporta como un dieléctrico con pérdidas moderadas:

$$\sigma = 5 \frac{S}{m}$$

$$\varepsilon_r = 80$$

$$\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon} = \frac{9 \cdot 10^8}{f(\text{Hz})}$$

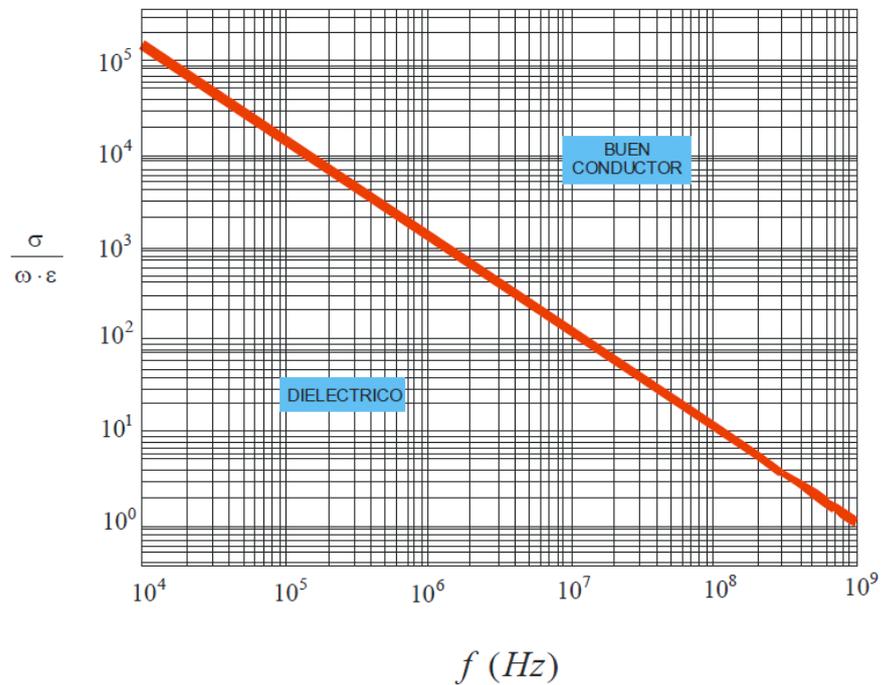


Figura 4.1. Comportamiento del agua de mar en función de la frecuencia.

Se observa que para  $f > 100$  MHz el agua de mar comienza a dejar de ser buen conductor y para  $f > 1$  GHz ya se comporta como dieléctrico, aunque con pérdidas. La siguiente figura da una idea de lo absorbentes que son distintos tipos de superficie.

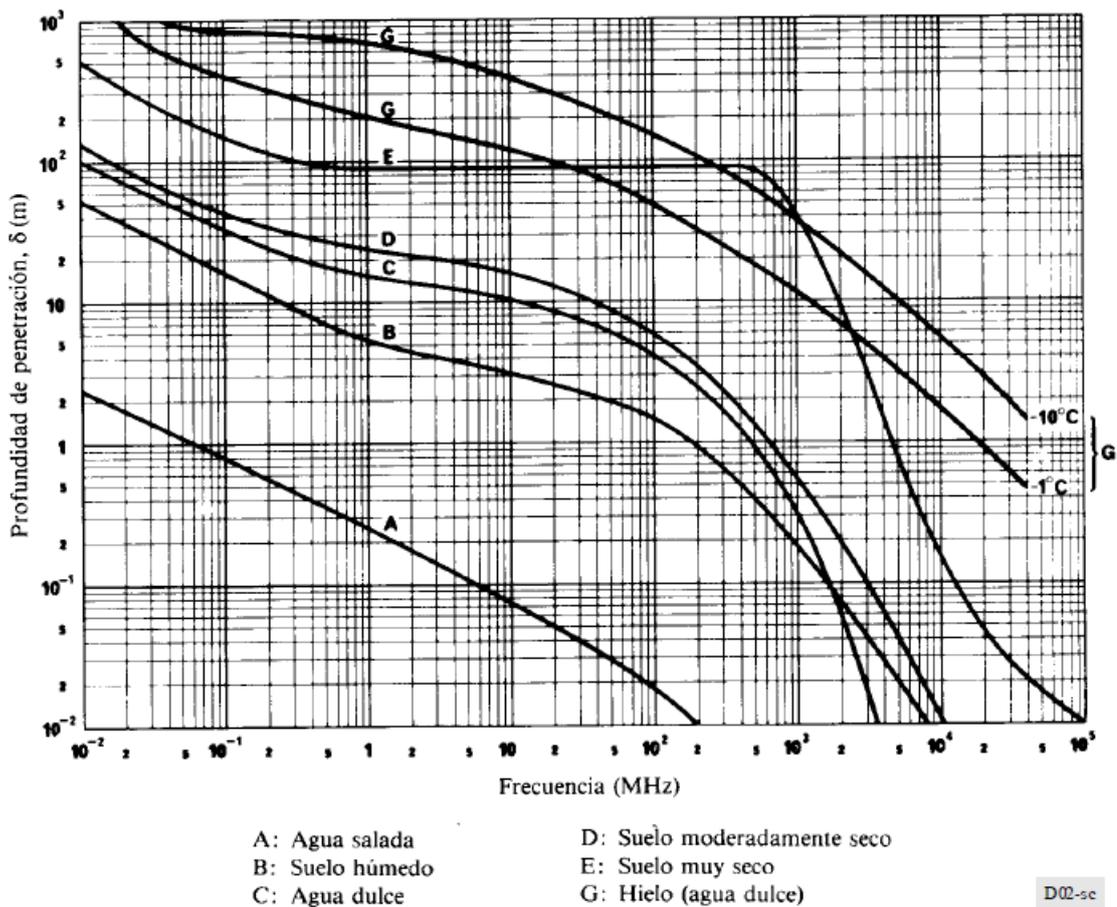


Figura 4.2. Profundidad de penetración ( $\delta$ ) para distintos materiales.

Al contrario de lo que ocurre en el vacío o en dieléctricos sin pérdidas, en buenos conductores la densidad de energía media asociada al campo magnético es mucho mayor que la asociada al campo eléctrico. La energía de una onda que se propaga en un buen conductor es fundamentalmente magnética. Ello da lugar a corrientes parásitas o de Foucault que están asociadas a pérdidas por efecto Joule y es el mecanismo de funcionamiento de los blindajes metálicos a alta frecuencia. También este fenómeno tiene gran importancia el estudiar la respuesta biológica de los seres vivos a los campos electromagnéticos.

El cuerpo humano se puede considerar como un conductor de conductividad media-alta, debido a su gran contenido en agua y electrolitos. Por ello hay una profundidad de penetración dependiente de la frecuencia que hace que, excepto para frecuencia extremadamente bajas (por debajo de los 30 Hz), la penetración del campo eléctrico es despreciable. La mayor parte de la energía es magnética, traduciéndose en corrientes de Foucault y otros efectos. Este es el motivo de que la mayoría de los estudios se centran en el efecto de los campos magnéticos sobre la salud.

BANDA SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DE ABSORCIÓN	FRECUENCIA MHz	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN cm	
		Músculos, piel y tejidos con alto contenido en agua	Grasa, huesos y tejidos con bajo contenido en agua
$f < 30$ MHz La absorción en el tronco decrece rápidamente con la frecuencia. Absorción significativa puede ocurrir en cuello y piernas.	1	91,30	-
	10	21,60	-
	27,12	14,30	150,00
$30 \text{ MHz} < f < 400 \text{ MHz}$ Absorción alta debido a resonancias del cuerpo entero (70 MHz) e incluso más altas en partes del cuerpo, como la cabeza, por ej. (400 MHz)	40,68	11,20	118,0
	100	6,66	60,40
	200	4,79	39,20
	300	3,89	32,10
$400 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$ Absorción localizada por resonancias o por enfoque quasi-óptico del campo E.M. incidente	433	3,57	26,20
	750	3,18	23,00
	915	3,04	17,70
	1500	2,42	13,90
$3 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$ La energía se disipa en la superficie del cuerpo de forma similar a las radiaciones infrarrojas	2450	1,70	11,20
	3000	1,61	9,74
	5000	2,78	6,67
	5300	0,72	5,24
	8000	0,41	4,61
	10000	0,34	3,39

Figura 4.3. Absorción del cuerpo humano.

#### 4.2.2. Reflexión y refracción

La reflexión y la refracción de las ondas electromagnéticas están basadas en la óptica geométrica donde se supone que la energía es transportada a lo largo de rayos cuyo comportamiento sigue leyes geométricas simples.

Cuando una onda se propaga en un medio de permitividad  $\epsilon_1$ , permeabilidad  $\mu_1$  y conductividad  $\sigma_1$ , incide sobre la frontera de otro medio de parámetros  $\epsilon_2$ ,  $\mu_2$ ,  $\sigma_2$ , en la forma en que se ilustra en la figura 4.4, una parte de la energía de la onda se refleja y otra se transmite al segundo medio. El ángulo de incidencia y el de reflexión,  $\phi$ , son iguales, mientras que el ángulo de refracción es diferente y depende la relación entre las permitividades relativas de los medios.

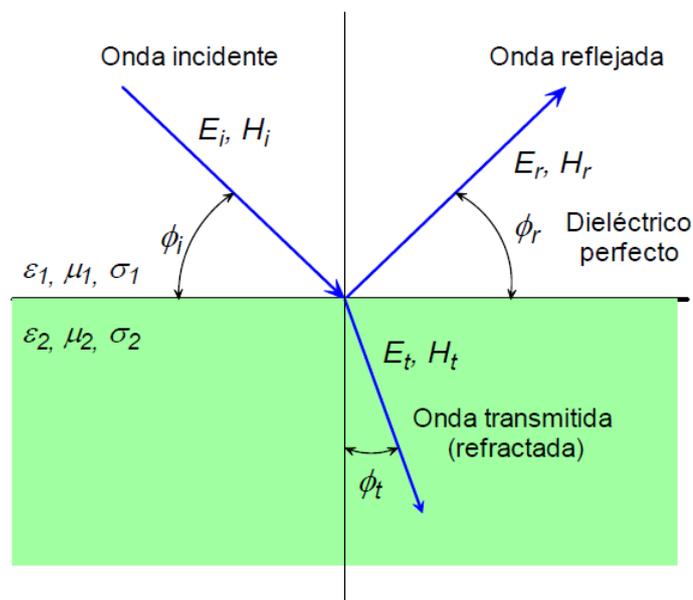


Figura 4.4. Reflexión y refracción en la frontera entre dos medios distintos.

La velocidad de propagación es  $v = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$ , donde  $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$  y  $\mu = \mu_0\mu_r$ . En el espacio libre,  $v = 3 \times 10^8$  m/s.

Uno de los principios de la óptica geométrica establece que:

$$\frac{v_i}{\sin \phi_i} = \frac{v_r}{\sin \phi_r} = \frac{v_t}{\sin \phi_t}$$

Como la velocidad de propagación en un medio de permitividad relativa  $\varepsilon_r$  es  $v = c/\sqrt{\varepsilon_r} = c/n$ , donde  $n$  es el índice de refracción del medio, igual a la raíz cuadrada de la permitividad relativa:

$$\phi_i = \phi_r$$

$$n_1 \sin \phi_i = n_2 \sin \phi_t$$

Esta última relación se conoce como ley de Snell, en la que  $n_1$  es el índice de refracción del primer medio y  $n_2$  el del segundo.

### 4.2.3. Difracción

La difracción ocurre cuando la trayectoria de radio entre el transmisor y el receptor está obstruida por una superficie que tiene irregularidades agudas (bordes). Las ondas secundarias resultantes desde la superficie obstructora están presentes a través del espacio e incluso detrás del obstáculo, dando lugar a una flexión de ondas alrededor del obstáculo, al igual que cuando no existe una trayectoria de línea de visión entre el transmisor y el receptor. A alta frecuencia, la difracción depende de la geometría del objeto, así como de la amplitud, la fase, y la polarización de la onda incidente.

En la difracción se genera una pérdida de potencia de transmisión, donde la potencia de la onda difractada es significativamente menor que el frente de onda que la provoca.

El Principio de Huygens provee un modelo para comprender este comportamiento, donde cada punto de un obstáculo genera un nuevo frente de ondas, y este nuevo frente puede hasta rodear al obstáculo. Si bien el fenómeno de la difracción se da en todas las frecuencias, cuanto más baja es la frecuencia, las ondas electromagnéticas se difractan más, dando la impresión de doblar la esquina. Por otro lado, cuanto mayor sea la frecuencia de transmisión, mayores serán las pérdidas.

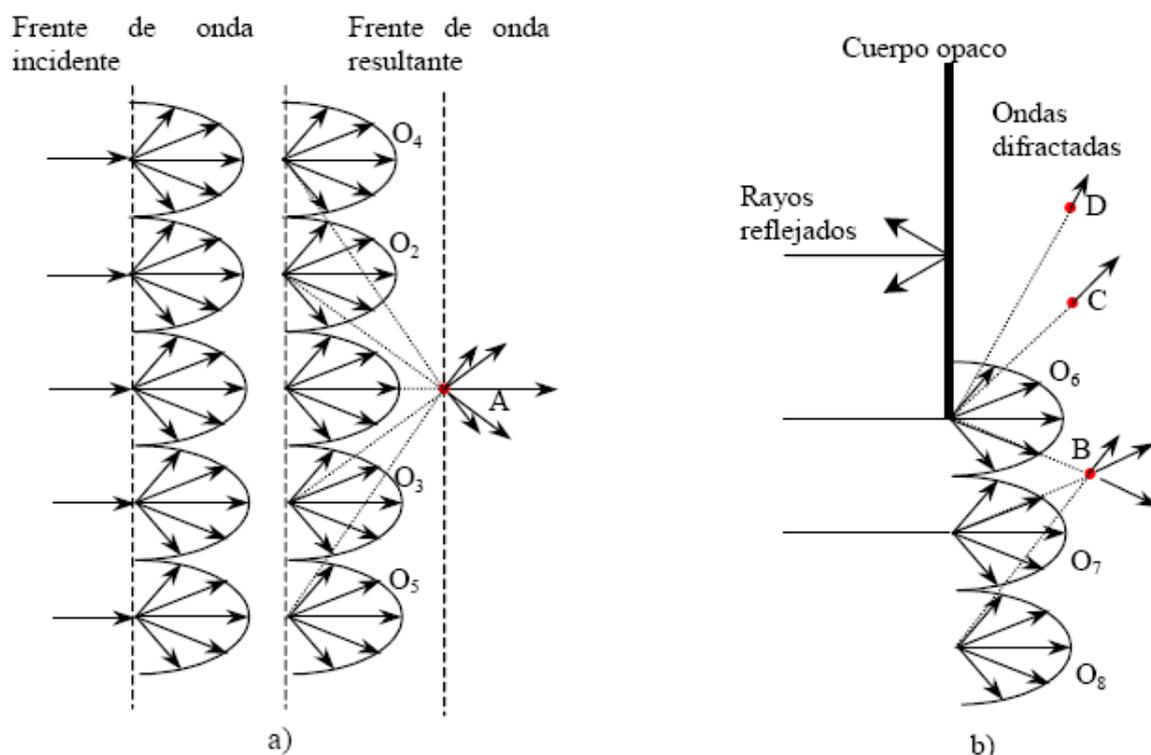


Figura 4.5. Principio de Huygens.

#### 4.2.4. Dispersión

La dispersión o scattering, ocurre cuando las ondas electromagnéticas inciden sobre una superficie rugosa. La rugosidad de la superficie es diferente para cada onda, ya que depende de la longitud de onda de la señal incidente. Generalmente, si la variación en una superficie es mayor que  $\lambda/8$ , la superficie se considera rugosa y dispersará la señal en varias direcciones.

Es un proceso de interacción general entre las ondas electromagnéticas y los objetos. La dispersión provoca que parte de la energía sea irradiada en numerosas direcciones diferentes. Si hay muchos objetos en la trayectoria de la señal, y los objetos son relativamente pequeños comparados con la longitud de onda de la señal, entonces el

frente de onda propagado se distribuirá en múltiples direcciones, sumándose a las interferencias constructivas y destructivas de la señal.

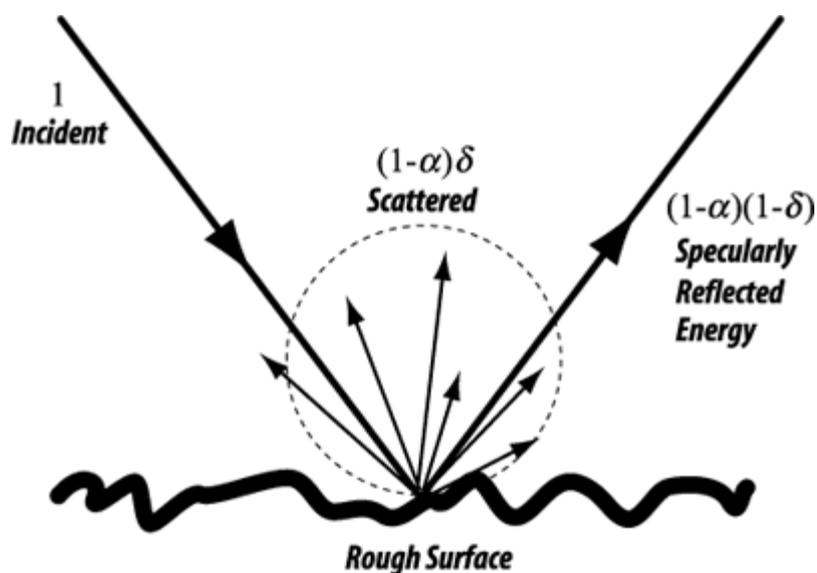


Figura 4.6. Dispersión de una señal transmitida.

#### 4.2.5. Multitrayectoria

El efecto de la multitrayectoria (multipath) explica que, a causa de los fenómenos descritos anteriormente, las señales llegan al receptor a través de diferentes caminos, y por consiguiente en tiempos diferentes. Este fenómeno juega un papel muy importante en las comunicaciones inalámbricas por los retardos e interferencia que provocan.

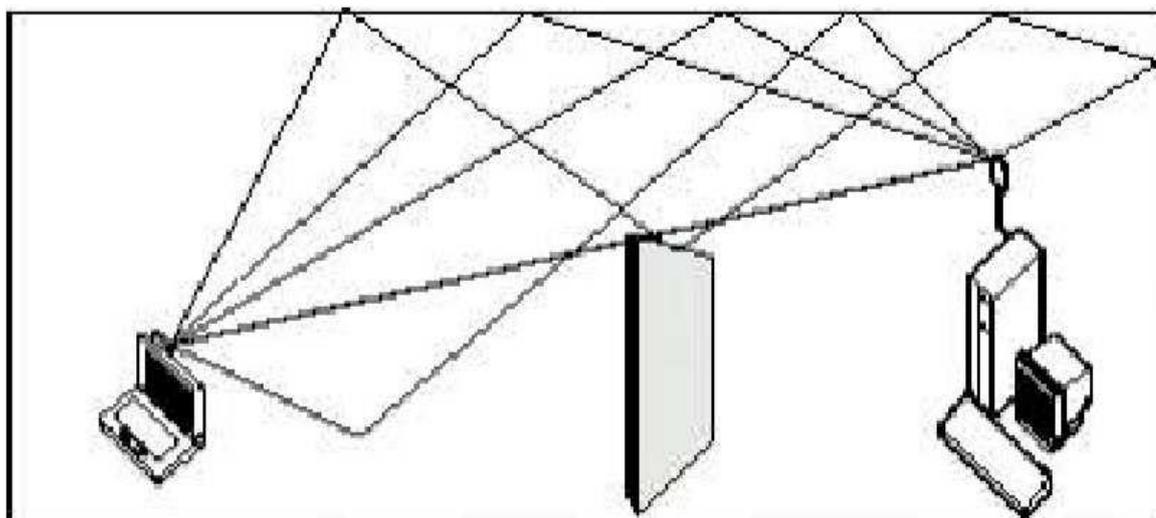


Figura 4.7. Propagación multitrayectoria.

Por lo tanto, el canal de radio también puede estar caracterizado por la recepción multitrayectoria (multipath), donde la señal ofrecida al receptor está compuesta no solamente de ondas de radio de visión directa entre transmisor y receptor (line of sight,

LOS), sino también de una gran cantidad de ondas de radio reflejadas, dispersadas o difractadas por estructuras tales como paredes, suelos, objetos, etc.

Las trayectorias resultantes para cada una de las ondas principales llegan con muchos pequeños retardos, y tienen diferentes valores de fase debido a las diferentes distancias recorridas. El número de trayectorias diferentes en un punto dado del espacio dependen de la forma y la estructura del edificio. Los niveles reales de la señal reflejada también dependen de la geometría del entorno.

Algunas señales ayudarán a la trayectoria directa (interferencia constructiva), mientras que otras señales restarán (interferencia destructiva).

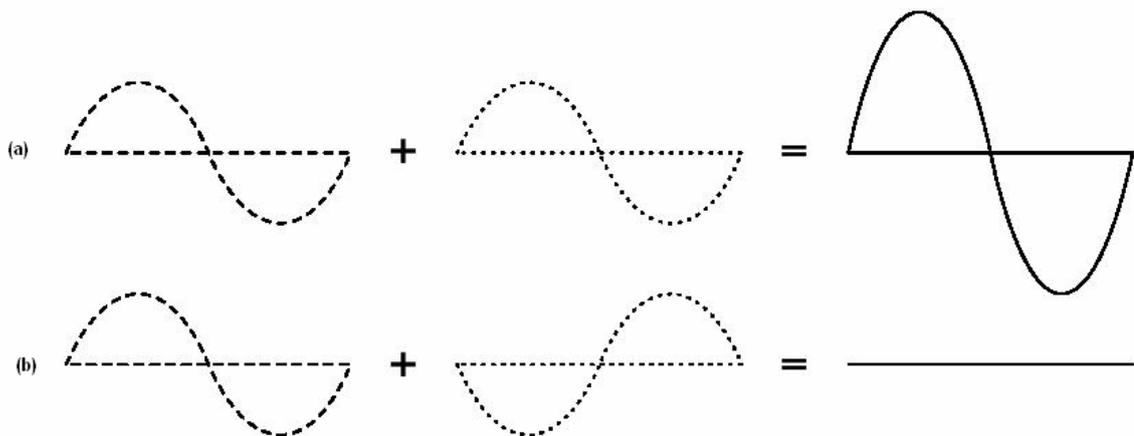


Figura 4.8. Interferencia (a) constructiva y (b) destructiva.

Existen dos clases de multitrayectoria. La multitrayectoria difusa, que proporciona un tipo de nivel de ruido de fondo, y la multitrayectoria especular, que puede causar interrupciones en la señal o puntos muertos de radio dentro de un edificio (hasta de 40 dB en algunos casos). Este problema es especialmente difícil en callejones subterráneos, túneles y habitaciones pequeñas. El funcionamiento apropiado del acoplamiento de la comunicación por radio requiere que la multitrayectoria sea reducida al mínimo o eliminada.

En este contexto, la técnica FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) es prácticamente inmune a los efectos de la multitrayectoria, debido a su propia filosofía estructural, ya que al estar basado en el salto a diferentes frecuencias, la interferencia multipath queda automáticamente contrarrestado. Sin embargo, la técnica DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) puede solucionar este problema aumentando la capacidad de la antena (por ejemplo diversidad de antenas), lo que genera costes y complejidad añadidos.

Por último la multitrayectoria se relaciona con los modelos de propagación y la pérdida de camino mediante el empleo teorías estocásticas y funciones de distribución de probabilidad para poder estimar el comportamiento del canal de radio. Las variaciones de

la señal en un edificio donde no hay trayectorias con línea de visión clara entre receptor y transmisor se pueden aproximar, por ejemplo, por la función de distribución Rayleigh.

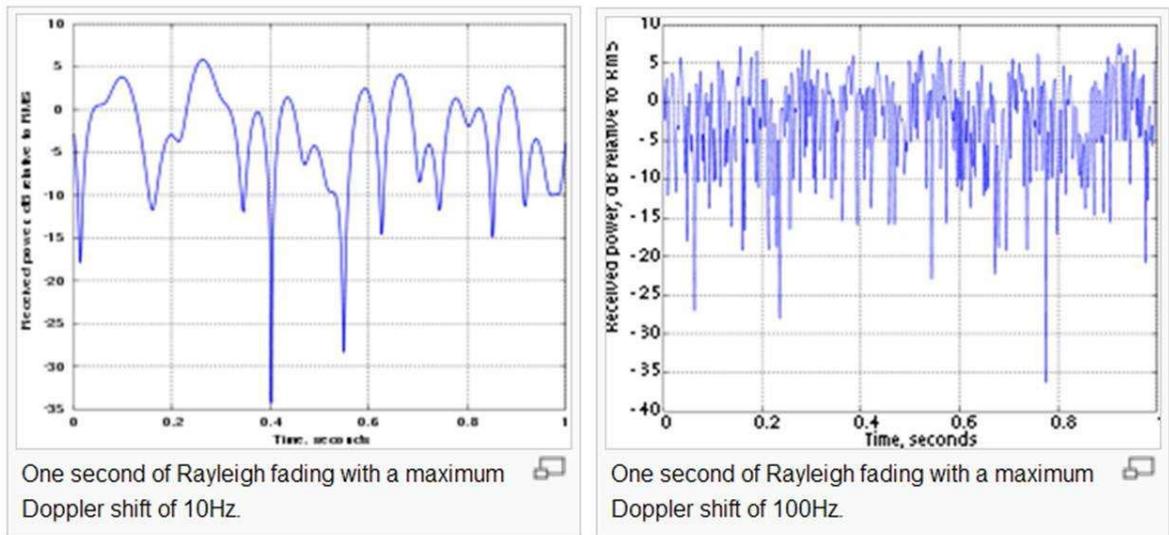


Figura 4.9. Desvanecimiento en un canal Rayleigh.

## 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

---

### 5.1. Introducción

En este punto se explicará detalladamente la parte más empírica del proyecto, es decir, la referida tanto a las medidas realizadas como a los resultados obtenidos mediante simulación, incluyendo las pertinentes valoraciones respecto a los mismos.

Dada la dificultad que conllevaba el hecho de realizar el experimento en un entorno real, se optó por utilizar un sitio más práctico, y tener en cuenta todo aquello que pudiera influir en los valores finales con el fin de obtener unos resultados válidos. Tras pensar en varios espacios, la ubicación final fue una zona del laboratorio de antenas y microondas, situado en la planta baja del edificio de los Tejos. En la figura 5.1 se puede ver una imagen de dicho laboratorio.



Figura 5.1. Laboratorio de antenas y microondas.

A pesar de ser éste el único lugar donde se realizó toda la actividad experimental, se crearon diferentes escenarios correspondientes a distintos casos de estudio. Estos escenarios se definirán a continuación para posteriormente poder presentar, por un lado los valores obtenidos en las simulaciones, y por el otro, los obtenidos en las medidas.

Por último, habría que añadir que durante todo el proyecto se ha trabajado con las frecuencias de 2,4 GHz y 868 MHz, pertenecientes a la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), de libre uso y muy utilizadas en comunicaciones WPAN, entre otras cosas.

## 5.2. Definición de los escenarios

### 5.2.1. Escenario 1

Este escenario inicial fue una primera toma de contacto con lo que iba a ser el resto del proyecto. Aquí se definieron las radiales a usar en las medidas, que debían cubrir todo el espacio correspondiente a la tabla de surf, y que seguimos utilizando para todas las demás. También se determinaron tres alturas (17, 45 y 75cm) que podrían ser de interés para el ámbito de aplicación.

Como se puede ver en la figura 5.2, en ésta escena se colocó la tabla de surf sobre una de las mesas del laboratorio, concretamente en las coordenadas  $(x, y) = (3m, 3m)$  si tenemos en cuenta el eje de coordenadas de la imagen, y elevándola mediante tacos de madera a una altura de 0,11m (siendo el valor absoluto desde el suelo igual a 0,9825m) para que efectos tales como la reflexión, refracción o difracción en la mesa influyesen lo menos posible.

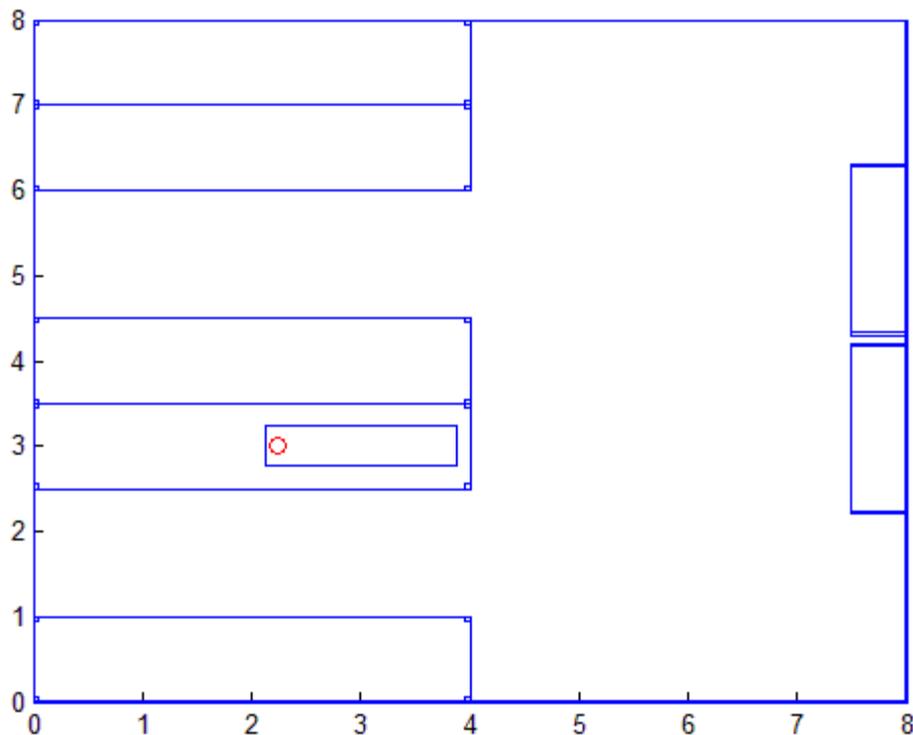


Figura 5.2. Plano del escenario 1.

El objetivo era por un lado, observar cómo podían afectar los materiales de los que se compone la tabla al estudio de potencias recibidas, y por el otro, calibrar el software de simulación para conseguir unos resultados óptimos.

### 5.2.2. Escenario 2

En éste escenario se introdujo por primera vez a una persona de 170cm de altura situada encima de la tabla en dos posiciones diferentes, tumbada y de pie. Para cada uno de estos casos se establecieron dos planos a 30 y 90cm de altura, que se corresponden de forma aproximada con el tobillo y las muñecas respectivamente, para una persona de este tamaño.

El escenario se puede ver en la figura 5.3, donde el conjunto tabla más persona se colocó en las coordenadas  $(x, y) = (3,975\text{m}, 1,75\text{m})$  porque se creyó que en este lugar el mobiliario afectaría en menor medida a los resultados.

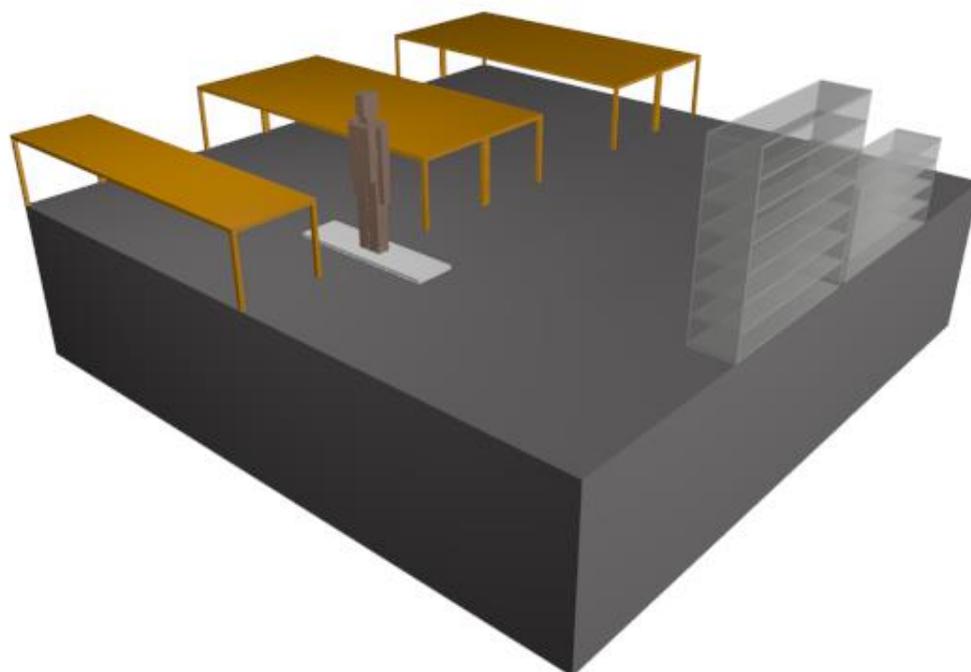


Figura 5.3. Representación en 3D del escenario 2 con la persona de pie.

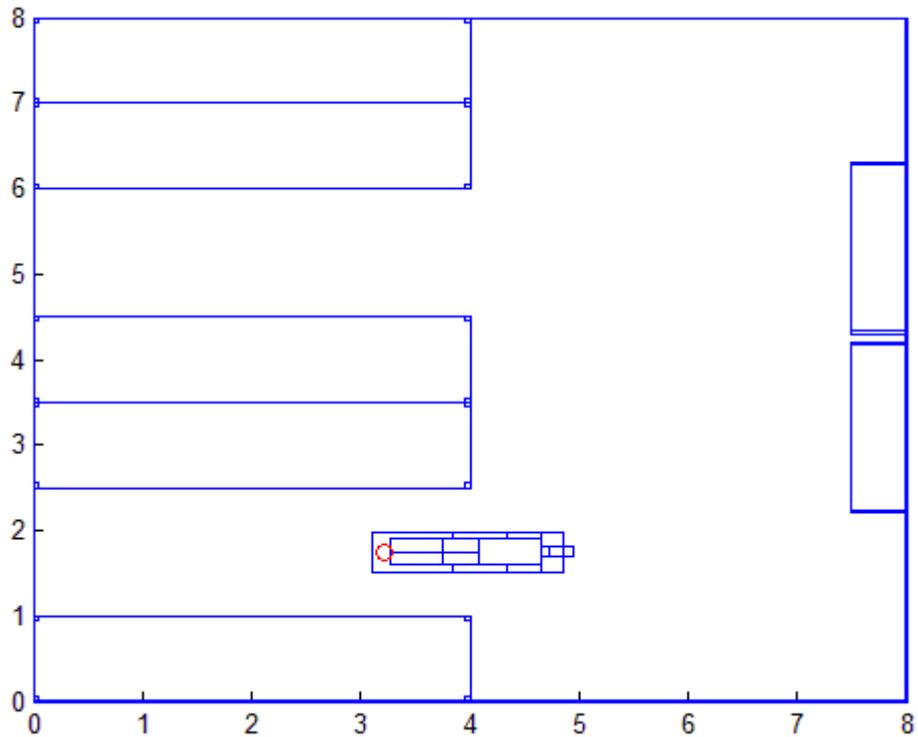


Figura 5.4. Plano del escenario 2 con la persona tumbada.

Dada su fragilidad, la tabla no se pudo elevar sobre el suelo al igual que en el escenario anterior, por lo que fue inevitable que las componentes multipath afectasen de manera considerable a los valores obtenidos. En cualquier caso, esto se tuvo en cuenta haciendo que no fuese relevante de cara a un análisis riguroso de la influencia del cuerpo humano en un sistema de comunicaciones con una tabla de surf.

### 5.2.3. Escenario 3

Este escenario se mantiene igual que el anterior con la diferencia de que se ha añadido el equivalente a 2m de agua para observar el comportamiento del sistema en ese ambiente.

Obviamente, ante la inviabilidad de crear un escenario real con agua como superficie, se decidió realizar únicamente simulaciones, sin medidas, de modo que se mantuvieron los objetos del escenario 2 en sus mismas posiciones aunque elevándolos una altura de 2m para rellenar la parte inferior con agua (figura 5.5).

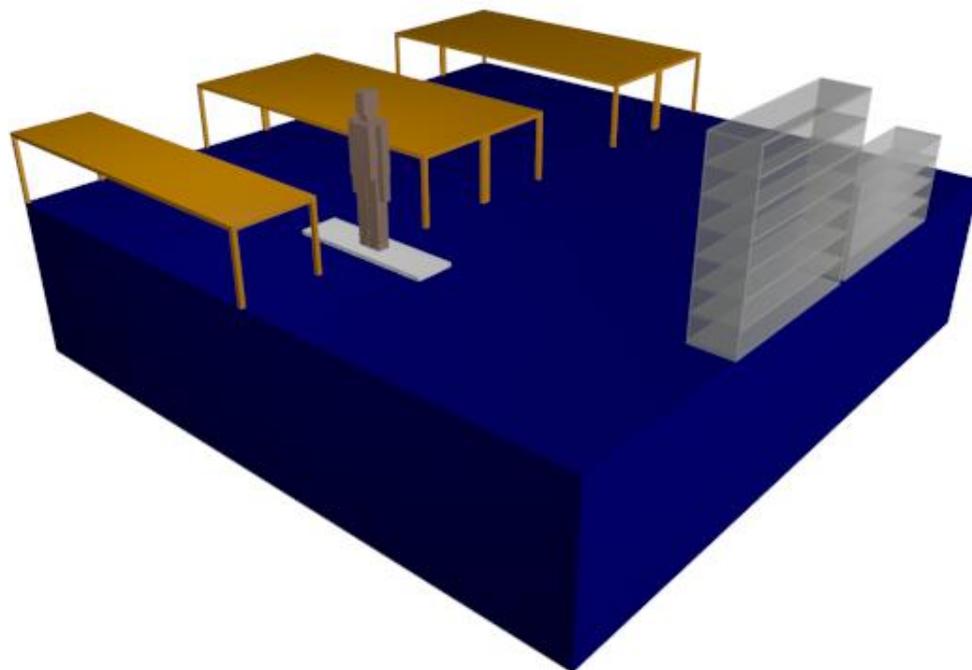


Figura 5.5. Representación en 3D con la persona de pie.

El hecho de mantener los objetos fue para no alterar los resultados respecto a la otra escena, de modo que, por comparación, se saquen unas mejores conclusiones respecto a la influencia del agua.

Dentro de éste escenario se definieron cuatro casos distintos, consecuencia de variar el tipo de agua (agua dulce o agua salada) y el estado de la piel de la persona que está encima de la tabla (piel seca o piel mojada). Todas las posibles permutaciones son las siguientes:

- **Caso 1:** Agua dulce y piel seca
- **Caso 2:** Agua dulce y piel mojada
- **Caso 3:** Agua salada y piel seca
- **Caso 4:** Agua salada y piel mojada

Finalmente habría que comentar que lo del agua dulce surgió de la observación de que, si bien es cierto que el surf es una práctica deportiva que se realiza en el mar (agua salada), existen deportes, algunos de los cuales están emergiendo en los últimos años, como el kitesurf o el windsurf, cuya práctica tiene lugar en lagos, pantanos o incluso ríos (agua dulce).

## 5.3. Simulaciones

### 5.3.1. Metodología y parámetros

Para recrear todos los escenarios y obtener los datos de interés, se utilizó un software de trazado de rayos en tres dimensiones implementado en un entorno Matlab y basado en un algoritmo de Ray-Launching. El código de éste simulador se puede ver en el anexo 9.2.

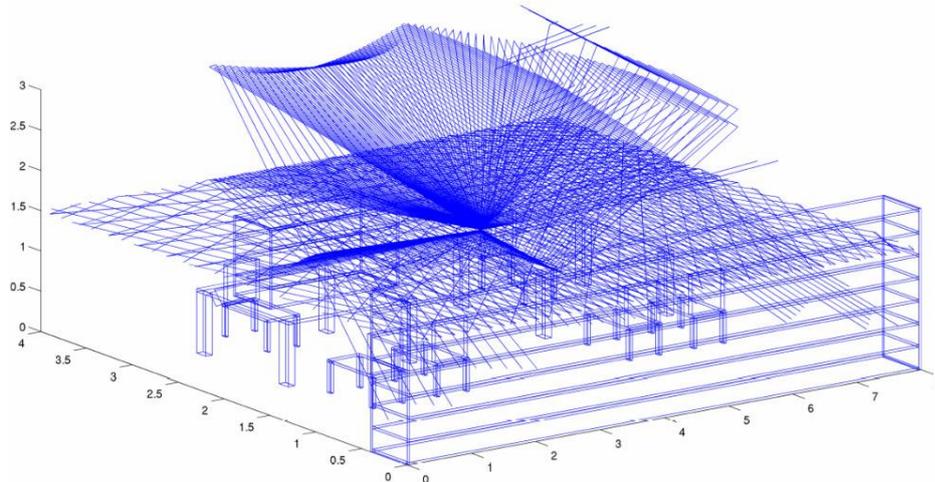


Figura 5.6. Ejemplo de escenario interior en 3D con los rayos lanzados desde un transmisor situado en el centro.

Cada rayo se computa individualmente, y el campo eléctrico de cada punto del escenario es la suma de todas las contribuciones de los rayos que los atraviesan. Al calcular la potencia recibida en cada punto del espacio, pueden crearse mapas de cobertura a una altura fija, como se muestra en la figura 5.7.

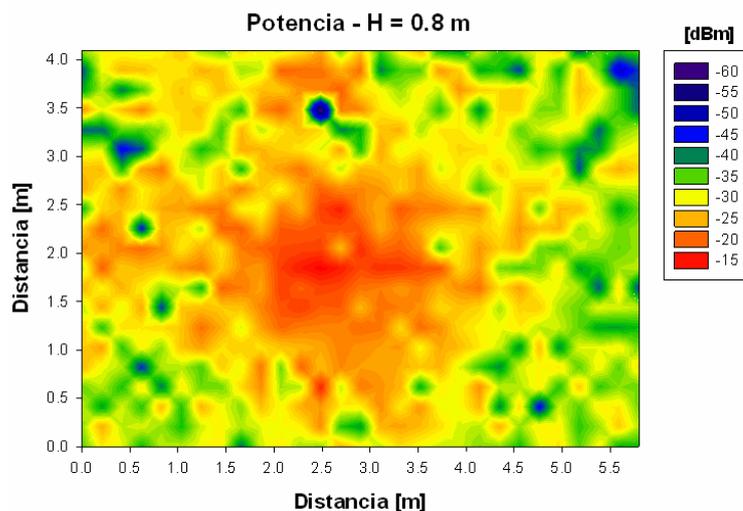


Figura 5.7. Ejemplo de mapa de potencia recibida a una altura de 0,8m y con un único transmisor situado en el centro.

Además, hay que decir que para hacer esto, el software divide el escenario en cuboides iguales y de menor tamaño, proporcionando tras los cálculos, el valor de potencia que encierra cada uno de ellos. De esto dependerá la resolución del escenario de tal manera que, a mayor resolución los cuboides serán más pequeños, y viceversa.

A pesar de lo que pueda parecer, una mayor resolución no implica unos mejores resultados. Si los cuboides son demasiado grandes (poca resolución) se pierde precisión en los datos y si los cuboides son muy pequeños (gran resolución) existen problemas de reflexión, refracción y difracción que hacen que los datos obtenidos se desvíen considerablemente de la realidad, por lo que al igual que antes se pierde exactitud, por no hablar del coste computacional que supone para una máquina procesar esa gran cantidad de cálculos.

Consecuentemente, existe un compromiso que se deberá resolver en cada caso de estudio, realizando un análisis previo y calibrando de forma correcta el escenario, como se ha hecho en este proyecto.

Otra de las limitaciones del software está referida a la imposibilidad de generar objetos con formas curvadas. Es por ello que la tabla de surf se tuvo que aproximar por un prisma rectangular de dimensiones similares a la tabla real. En la figura 5.8 se puede ver el modelo de tabla utilizado en las simulaciones junto a la posición de la antena transmisora.

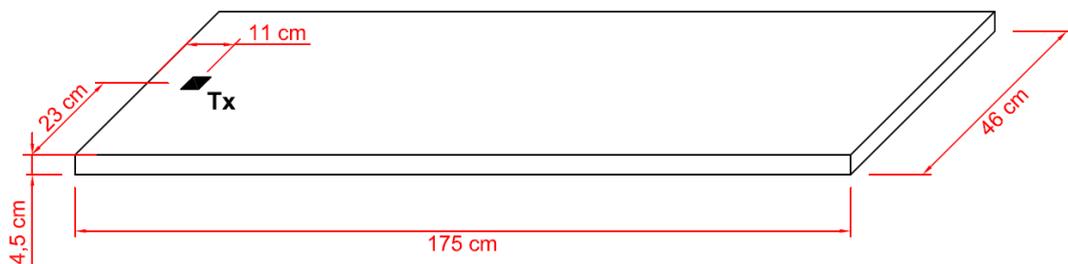


Figura 5.8. Modelo de tabla de surf y posición del transmisor.

Tras la introducción al método utilizado, es importante conocer los parámetros con los que se han simulado todos los escenarios y que se enumeran aquí:

- Potencia de transmisión de 10mW.
- Frecuencias de operación de 2,4GHz o 868MHz.
- Una única antena omnidireccional con polarización lineal vertical y ganancia de 0.82dBi (para  $f = 2,4\text{GHz}$ ) o 2dBi (para  $f = 868\text{MHz}$ ).
- Tamaño de los cuboides de 5cm.
- Número de rebotes de los rayos igual a 6.
- Incremento de  $\theta$  y  $\phi$  del lanzamiento de rayos de la antena cada  $\pi/180$ .
- Materiales y propiedades eléctricas:

Objeto y material	Constante dieléctrica relativa, $\epsilon_r$	Conductividad, $\sigma$ (S/m)
Aire	1	0
Dos paredes y techo de hormigón	25	0,02
Una pared y ventana de cristal	6,06	0,11
Una pared de pladur	2,02	0
Suelo de ladrillo	4,44	0,11
Estanterías de aluminio	6,1546E+07	3,78E+7
Mesas de madera	2,88	0,21
Tabla de surf de poliestireno	2,5	1E-16
Tabla de surf de poliuretano	3	1E-10
Agua dulce	80	1 (2,4GHz) 0,13 (868MHz)
Agua salada	80	6 (2,4GHz) 5 (868MHz)

## 5.3.2. Escenario 1

### 4.3.2.1. Planos bidimensionales:

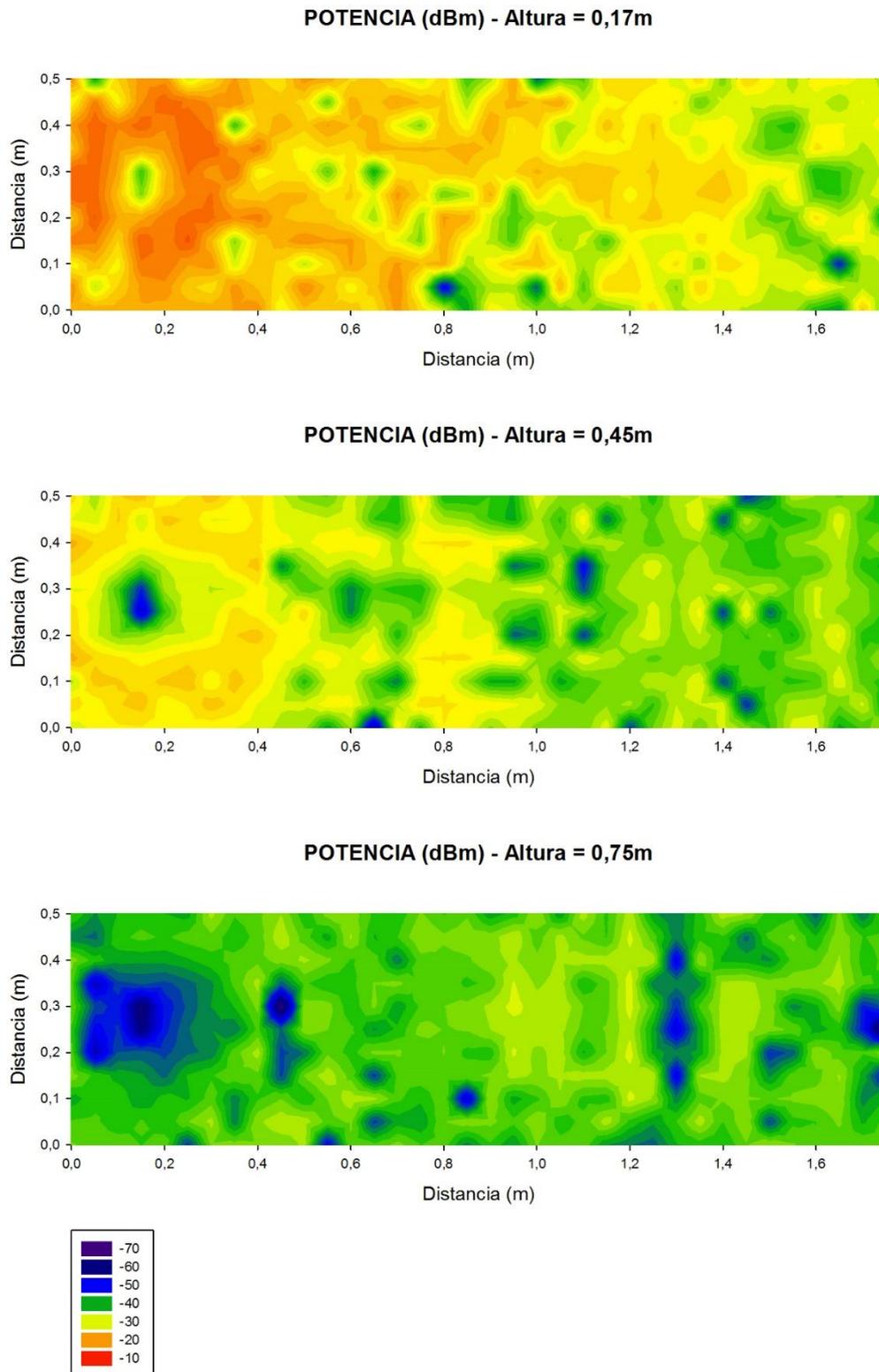
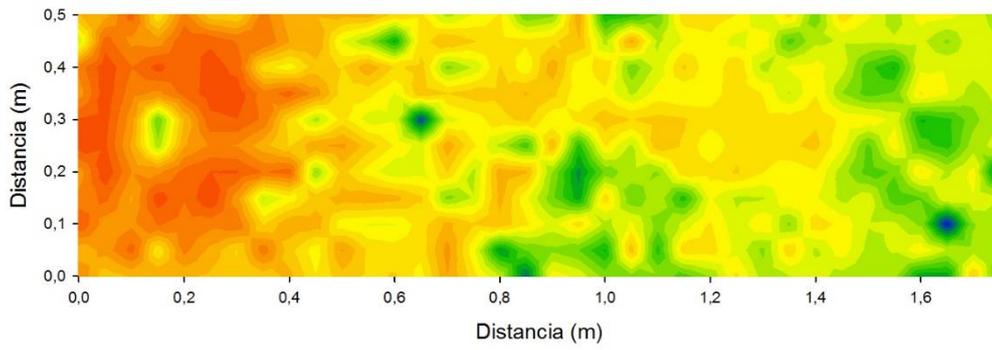
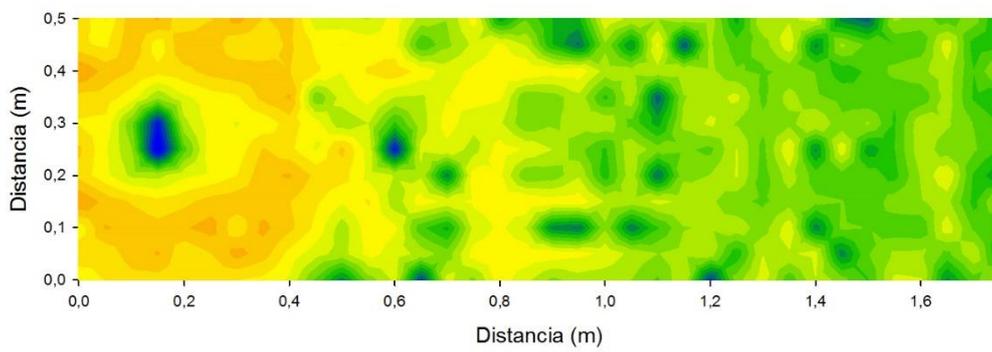


Figura 5.9. Mapas a 2,4GHz para la tabla de poliestireno.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,17m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,45m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,75m

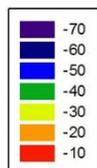
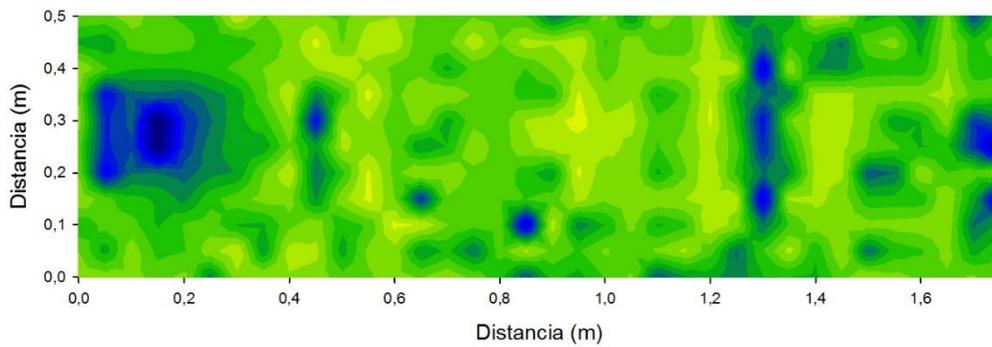
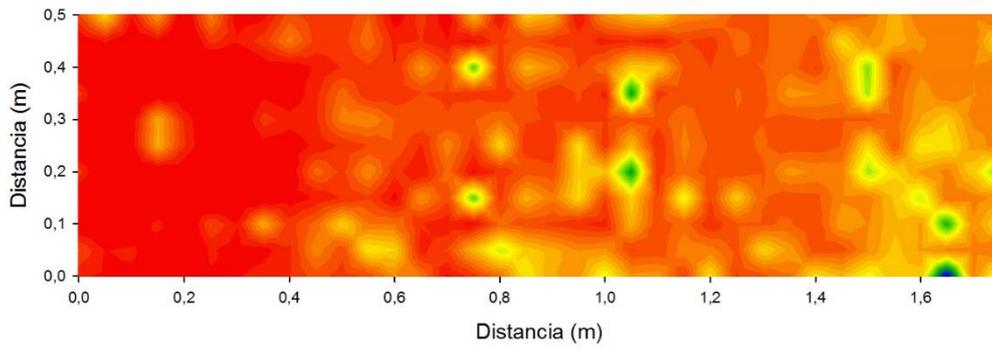
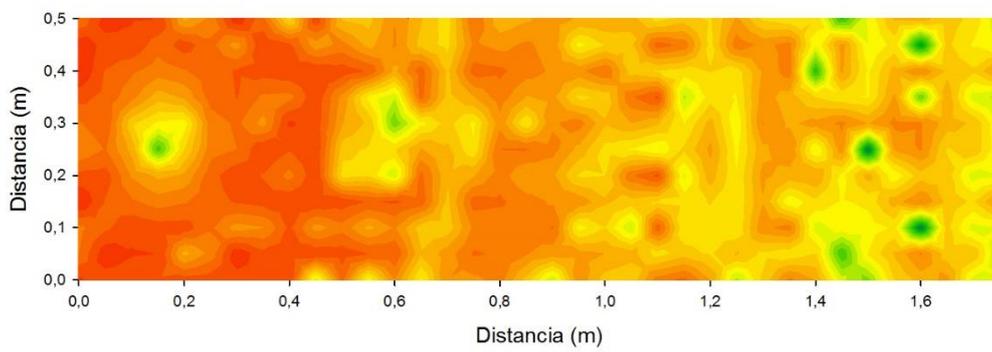


Figura 5.10. Mapas a 2,4GHz para la tabla de poliuretano.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,17m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,45m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,75m

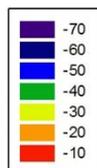
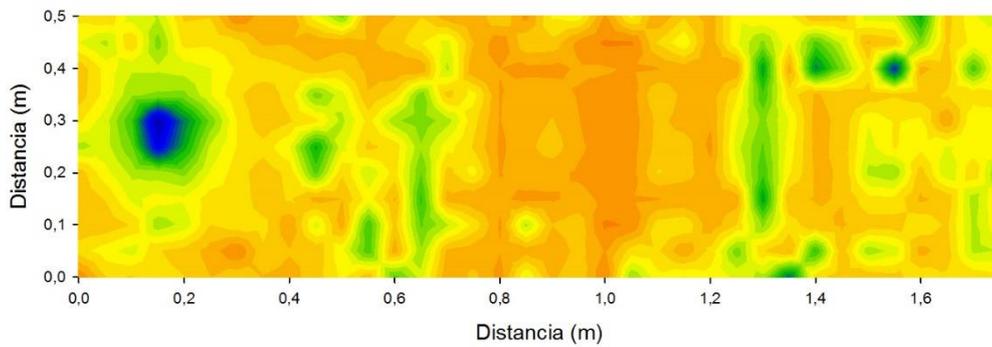
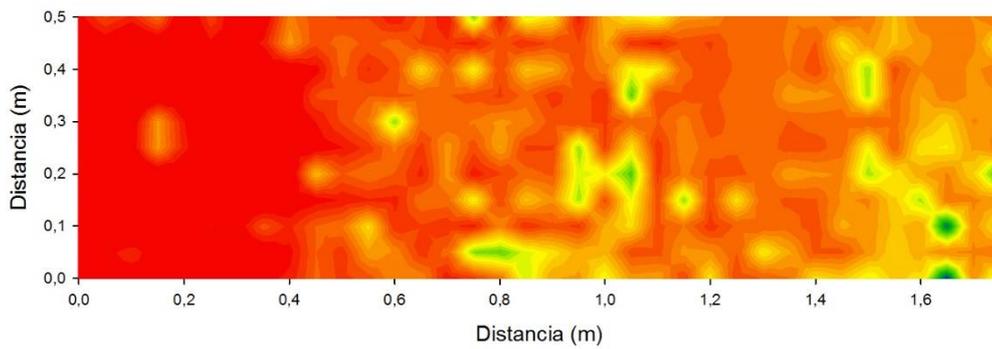
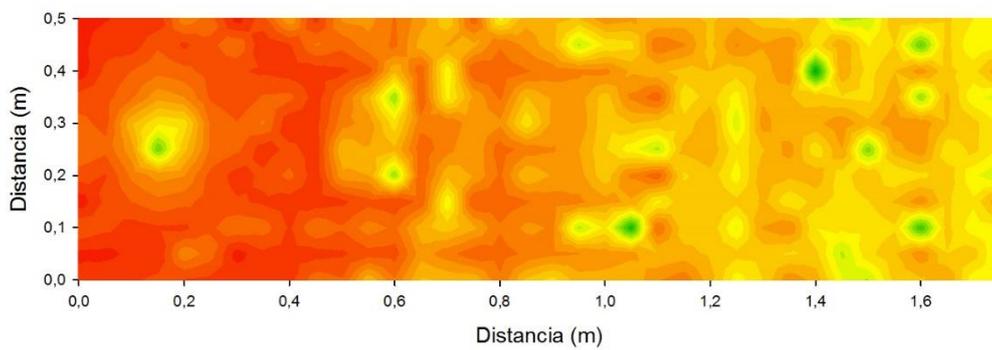


Figura 5.11. Mapas a 868MHz para la tabla de poliestireno.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,17m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,45m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,75m

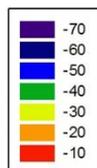
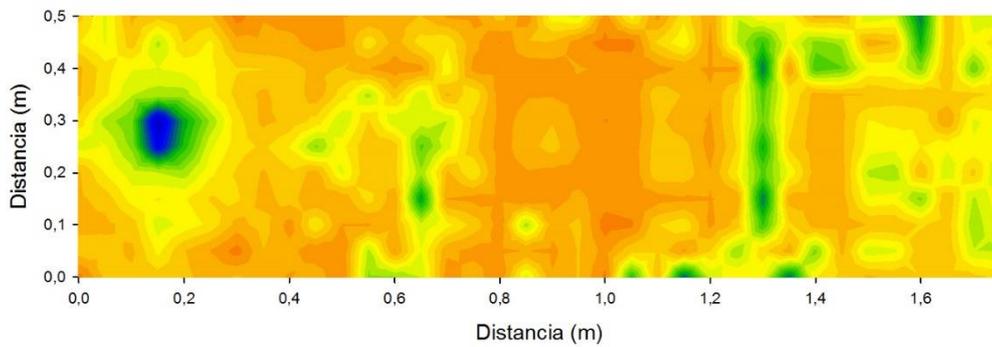


Figura 5.12. Mapas a 868MHz para la tabla de poliuretano.

Como se puede observar, tanto para 2,4GHz como para 868MHz los dos materiales se comportan de manera similar, lo cual era de esperar si tenemos en cuenta que ambos son dieléctricos con propiedades muy parecidas. Por ésta razón, a partir de aquí se

mostrarán los resultados obtenidos para la tabla hecha a base de espuma de poliestireno, aunque por si pudiera ser de interés, el resto de resultados se presenta en el anexo 9.1.

Otra de las particularidades que se observan es que la potencia recibida a 868MHz varía bastante respecto a 2,4GHz. Esto también era previsible porque al aumentar en frecuencia las señales electromagnéticas se ven más afectadas por el canal de comunicaciones y los materiales que lo forman, aumentando las pérdidas de propagación y disminuyendo la potencia recibida.

Por último se puede concluir de este escenario que, como no podía ser de otra forma, tanto al aumentar la altura sobre la tabla, como al alejarse horizontalmente del transmisor, las potencias disminuyen por el simple hecho de que la amplitud de la señal recibida decae con la distancia.

En ésta línea y siendo un poco más detallista, se puede ver que si dividimos la tabla en dos partes, en la mitad donde se sitúa la antena transmisora, la potencia recibida decrece más rápidamente con la altura que en la otra mitad. Esto tiene su explicación en que la primera mitad está más cerca del transmisor y por lo tanto la cantidad de rayos que atraviesan los cuboides será mayor, haciendo que los problemas de reflexión, refracción y difracción sean más evidentes. Además hay que decir que justo donde está el transmisor es donde más decae la potencia al elevar el plano (a excepción de lo dicho antes) pero esto se debe al diagrama de radiación de la antena que, como cualquier dipolo con polarización lineal, tiene un mínimo en su eje vertical.

### 5.3.3. Escenario 2

#### 5.3.3.1. Planos bidimensionales

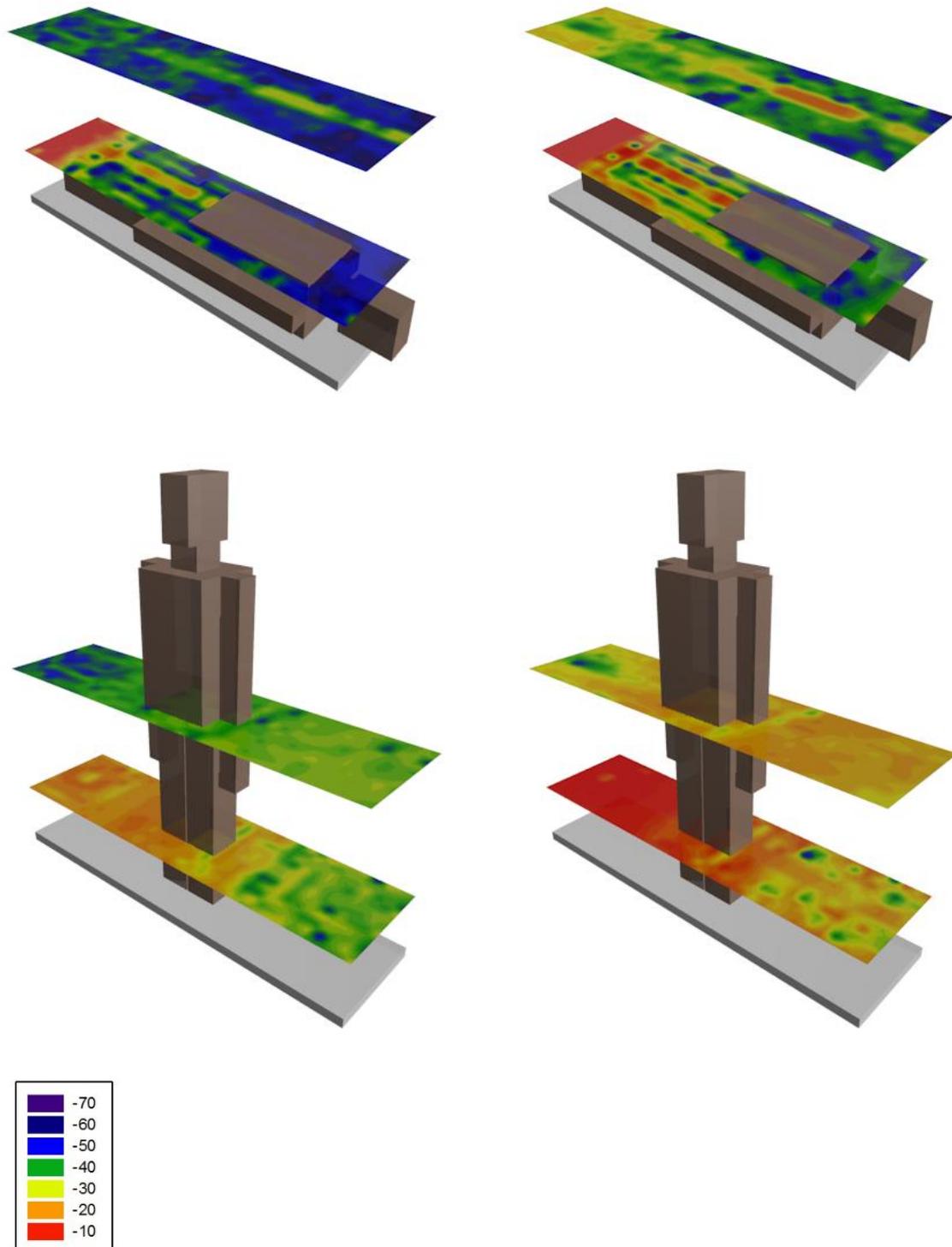


Figura 5.13. Integración tridimensional de los mapas con la persona tumbada y de pie para 2,4GHz (izquierda) y 868MHz (derecha).

De la figura anterior se puede ver cómo afecta la introducción de una persona al estudio de potencias.

Si se compara con el escenario 1, la distribución de potencias es similar en zonas cercanas al transmisor, pero decrece considerablemente y de un modo bastante rápido a partir de la ubicación de la persona, lo que da una idea de la importante influencia del cuerpo humano en la propagación de las ondas a estas frecuencias, absorbiendo parte de la energía que transportan.

Del mismo modo se puede ver que cuando la persona está tumbada, las potencias son inferiores que cuando está de pie y puede afectar más a la comunicación. A menor frecuencia la cosa mejora, como ocurría en el caso anterior.

También conviene recordar que si incluso las zonas cercanas al transmisor disponen de potencias menores que en el escenario 1 es porque las simulaciones están hechas en este caso directamente sobre suelo de ladrillo.

### 5.3.4. Escenario 3

#### 5.3.4.1. Planos bidimensionales

La primera comparación que hay que realizar, evidentemente, es la que hace referencia a un escenario con agua respecto a otro sin agua. Para ello la figura muestra la situación con ambas superficies (agua y ladrillo).

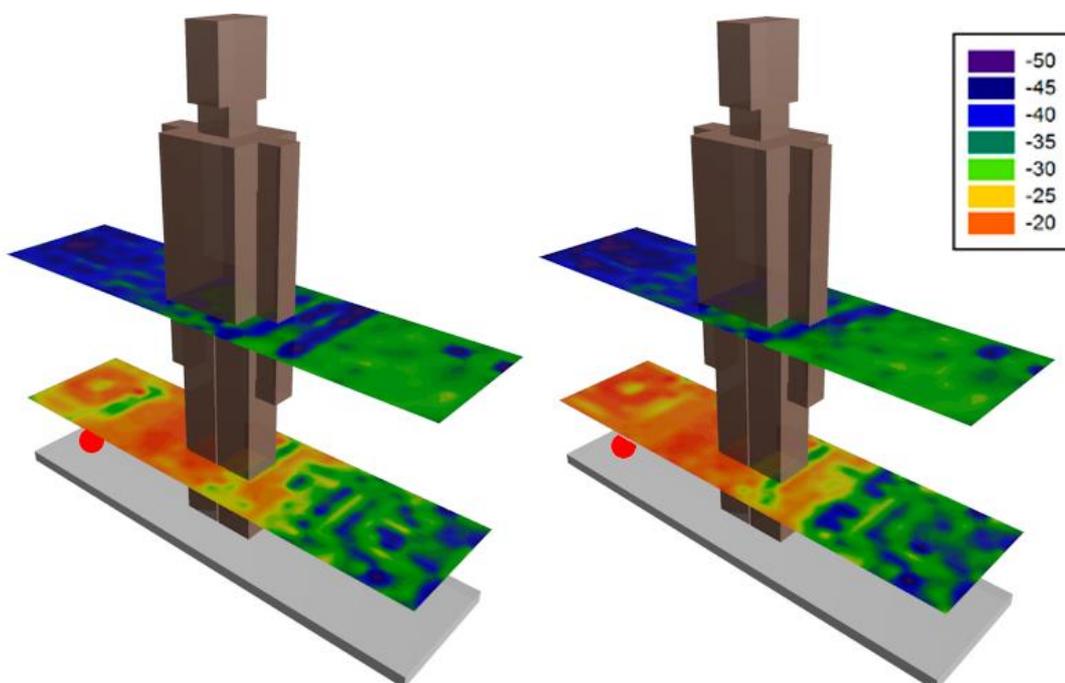


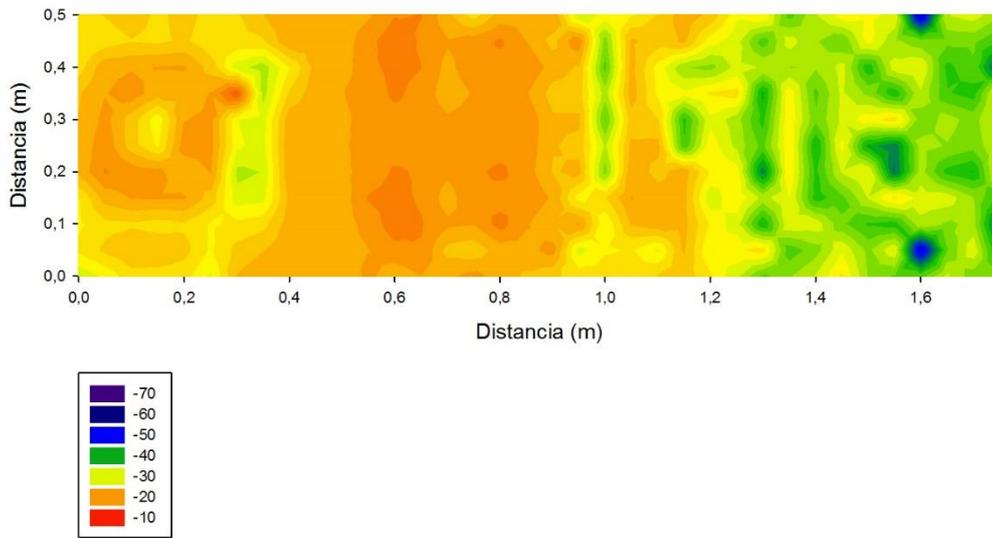
Figura 5.14. Comparativa a 2,4GHz de un escenario con superficie de agua (izquierda) respecto a otro de ladrillo (derecha).

Cómo es sabido, el agua es un elemento que afecta fuertemente a las señales de alta frecuencia. Esto se aprecia en la imagen anterior donde además, aunque no de manera muy destacable, se puede ver la disminución de los niveles de potencia respecto al suelo de ladrillo.

En segundo lugar, hay que observar cómo difiere un escenario con agua dulce de otro con agua salada. Aquí hay que considerar que sus propiedades eléctricas dependen de otras variables, además de la frecuencia, como son el nivel de salinidad que contiene o la temperatura a la que se encuentra. En este proyecto se supuso un nivel de salinidad medio y una temperatura de unos 20°C.

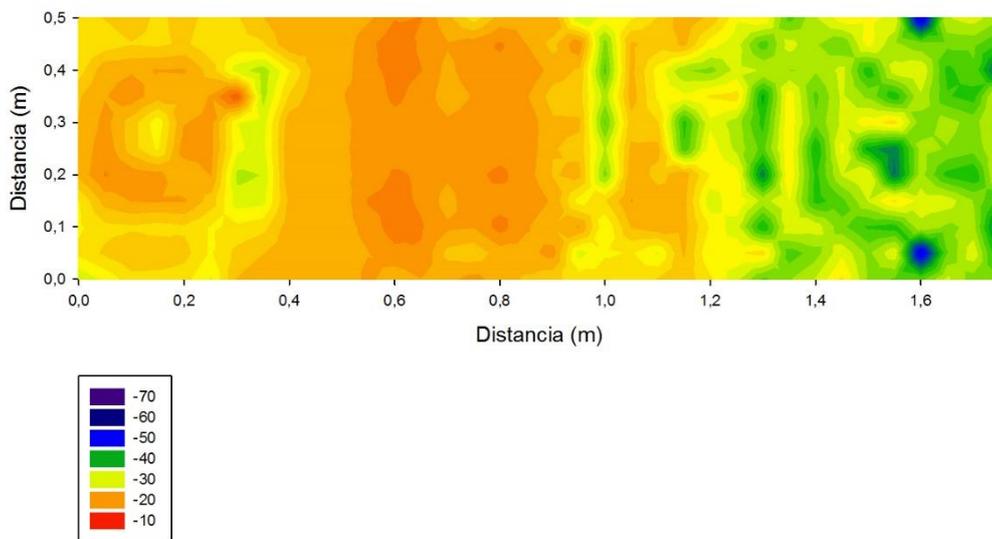
Para ver las diferencias entre cada uno de ellos, se escoge la situación con la persona de pie, para que influya menos, y el plano a 30cm de la tabla.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



(a)

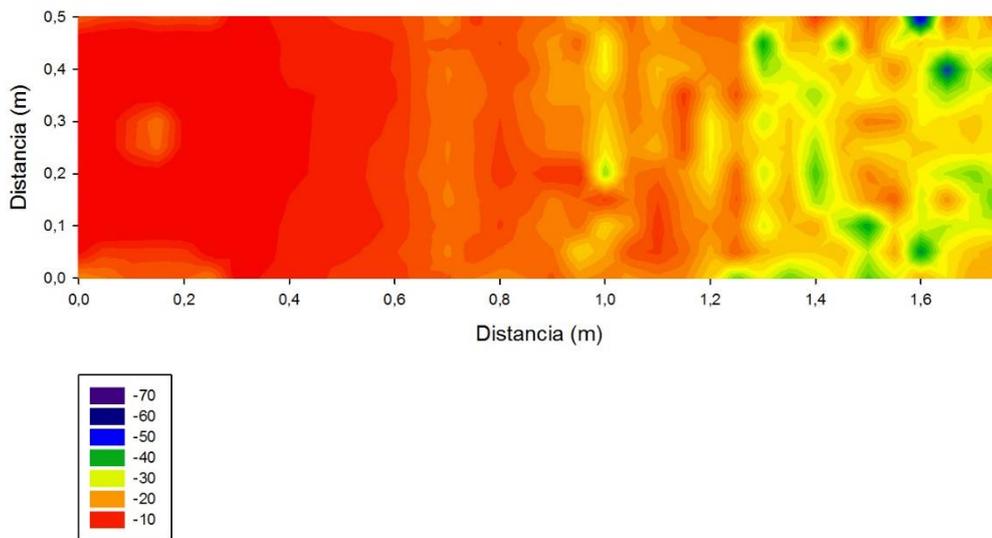
POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



(b)

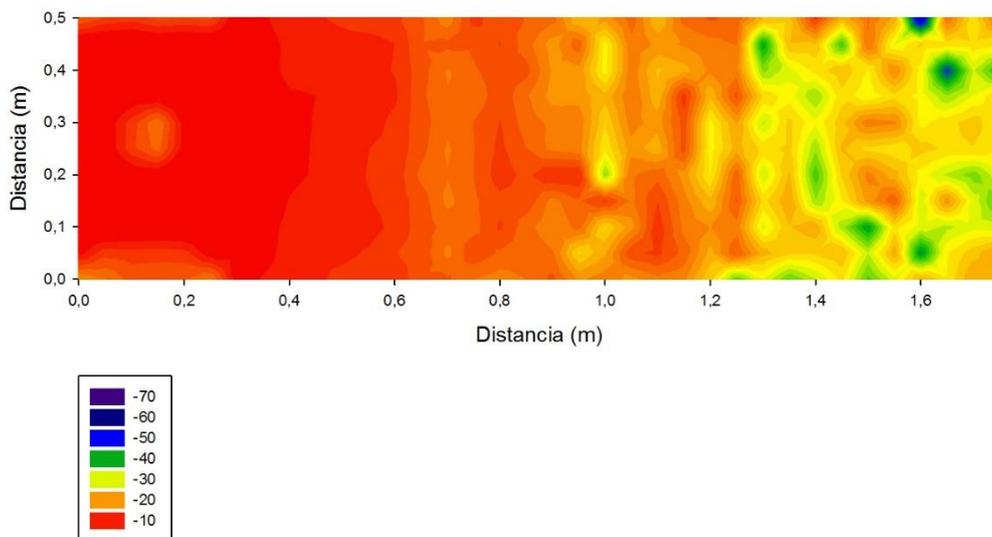
Figura 5.15. Mapas a 2,4GHz para la persona de pie encima de la tabla de poliestireno con superficie de (a) agua dulce y (b) agua salada.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



(a)

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



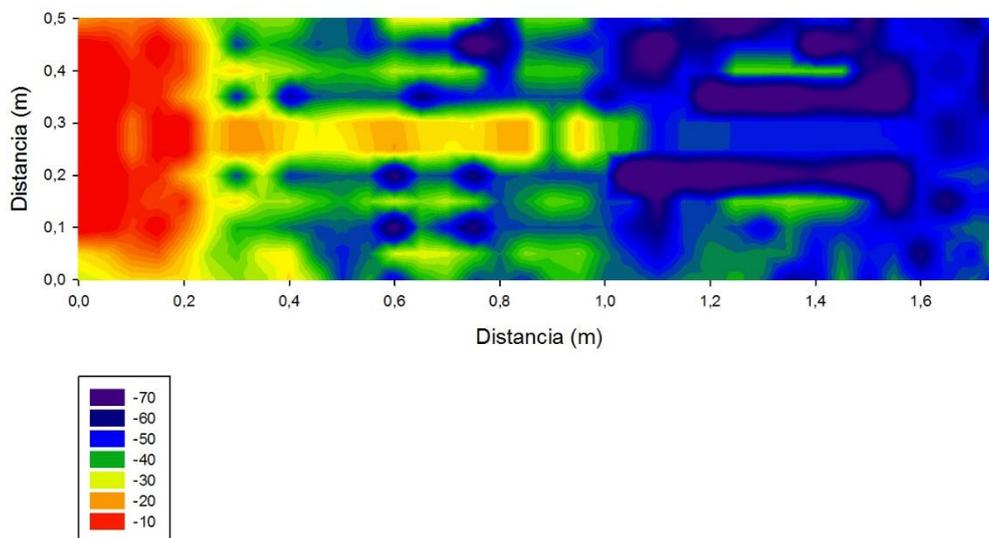
(b)

Figura 5.16. Mapas a 868MHz para la persona de pie encima de la tabla de poliestireno con superficie de (a) agua dulce y (b) agua salada.

En estos planos bidimensionales difícilmente se aprecian variaciones, quizá se podría decir que para el agua salada los colores parecen más difuminados (menores potencias), lo cual es lógico si se piensa que la conductividad de esta es superior a la del agua dulce. Así pues, de las imágenes anteriores se concluye que la influencia del tipo de agua es despreciable.

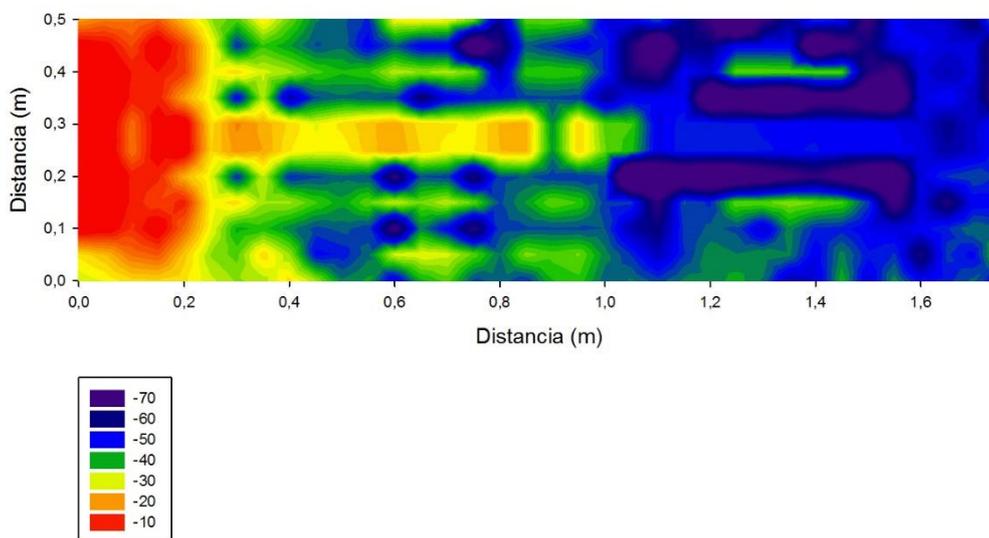
Por último queda comprobar la dependencia con el estado de la piel de la persona, si está seca o mojada. Para ello se utilizará el plano a 30cm para el caso en el que la persona está tumbada en la tabla de poliestireno sobre una superficie de agua dulce.

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



(a)

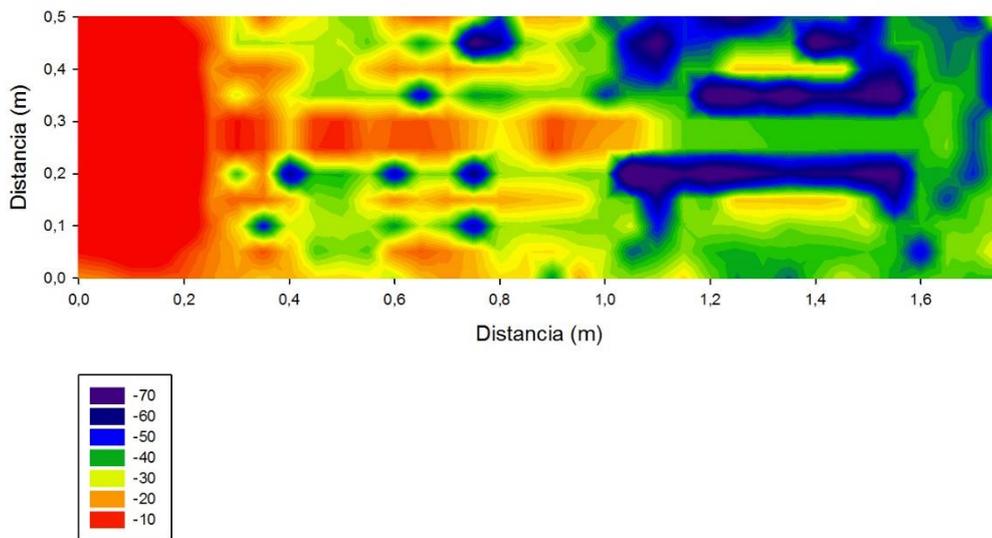
**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



(b)

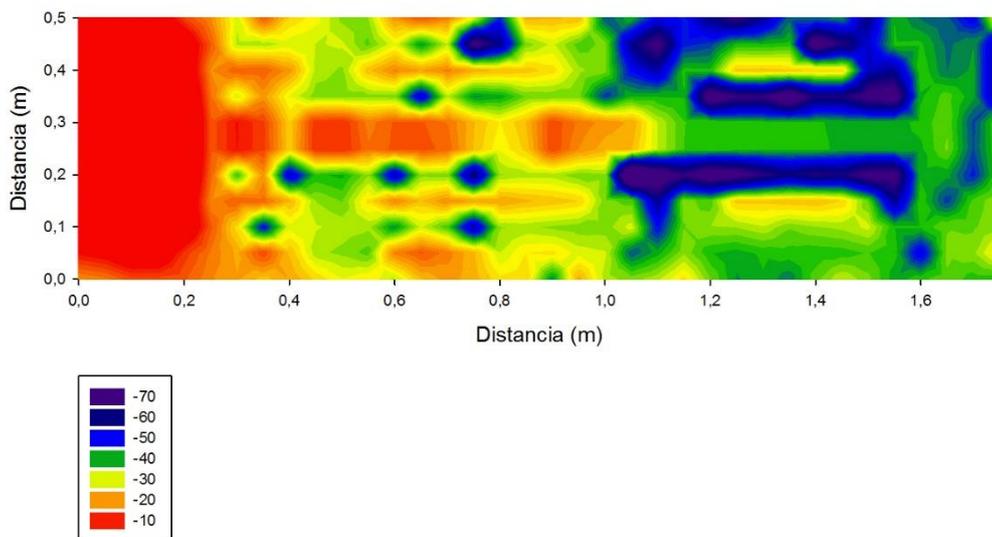
Figura 5.17. Mapas a 2,4GHz para la persona tumbada en la tabla de poliestireno con superficie de agua dulce y piel (a) seca o (b) mojada.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



(a)

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



(b)

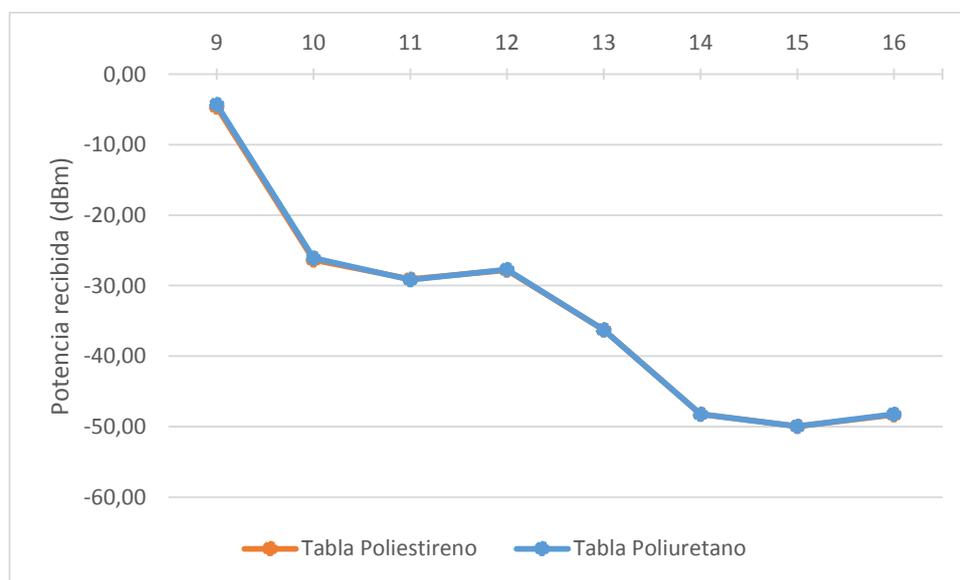
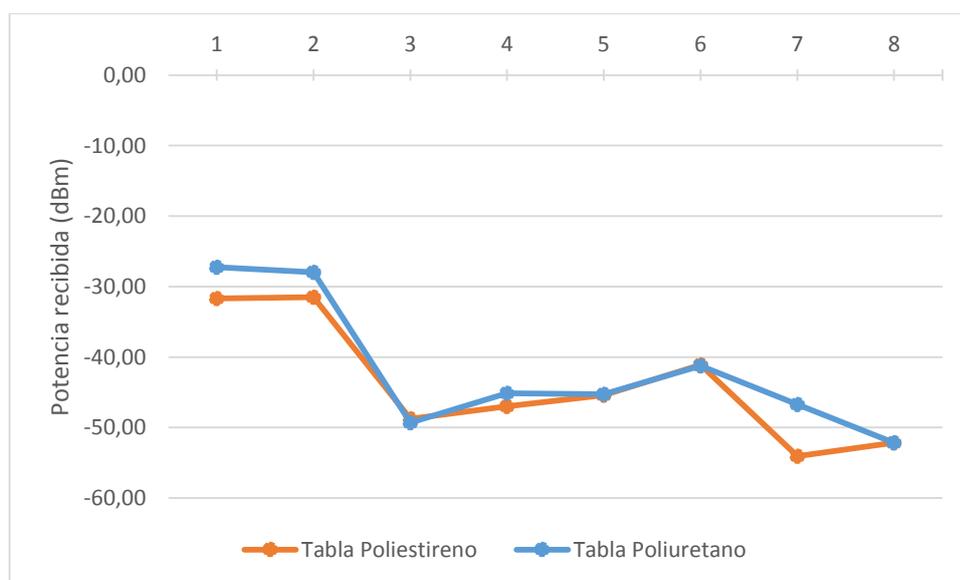
Figura 5.18. Mapas a 868MHz para la persona tumbada en la tabla de poliestireno con superficie de agua dulce y piel (a) seca o (b) mojada.

Como se puede ver, tampoco hay diferencias significativas al variar de piel seca a mojada, por lo que éste no es un factor agravante en la calidad de un sistema de comunicaciones.

### 5.3.4.2. Radiales de potencia

En esta parte se analizarán los resultados obtenidos de las radiales de potencia para el plano a 30cm en la situación donde la persona está tumbada, que es el peor caso para la comunicación entre transmisor y receptor. Los resultados de los demás planos se pueden ver en el anexo 9.1. Aunque esto se detalla en el siguiente apartado, conviene decir que se han establecido tres radiales que se desenvuelven a lo largo de la tabla, dos de ellas en los extremos y una en el eje central.

- Caso 1: Agua dulce y piel seca



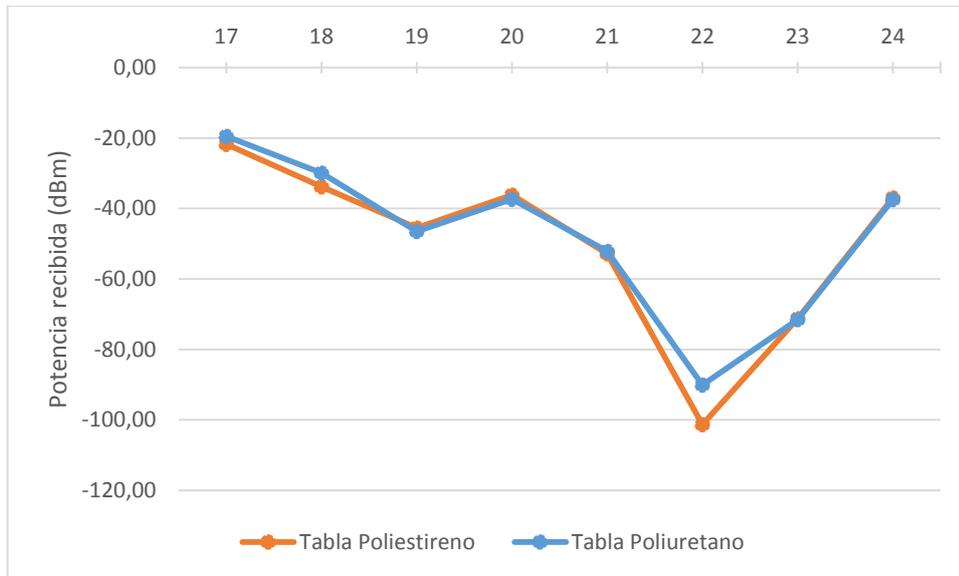
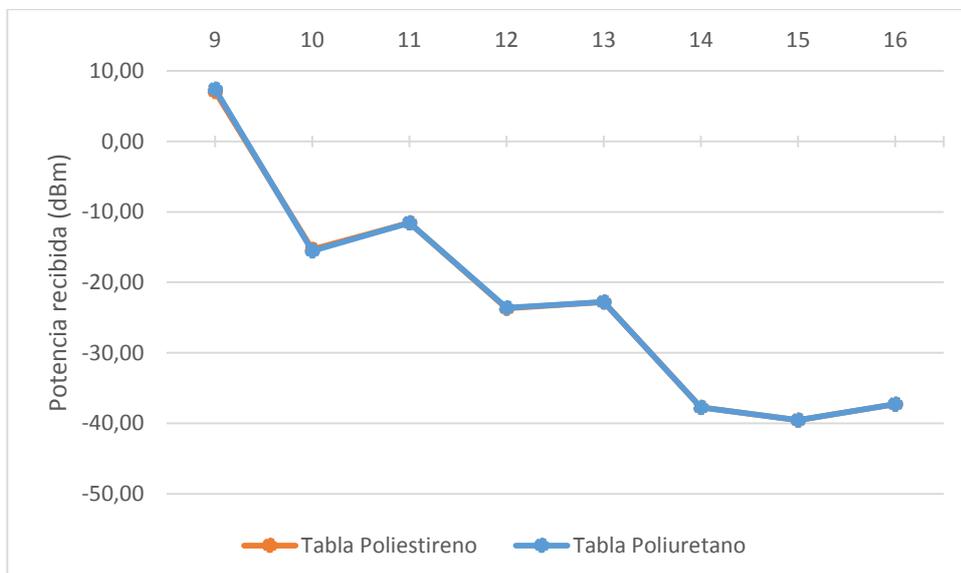
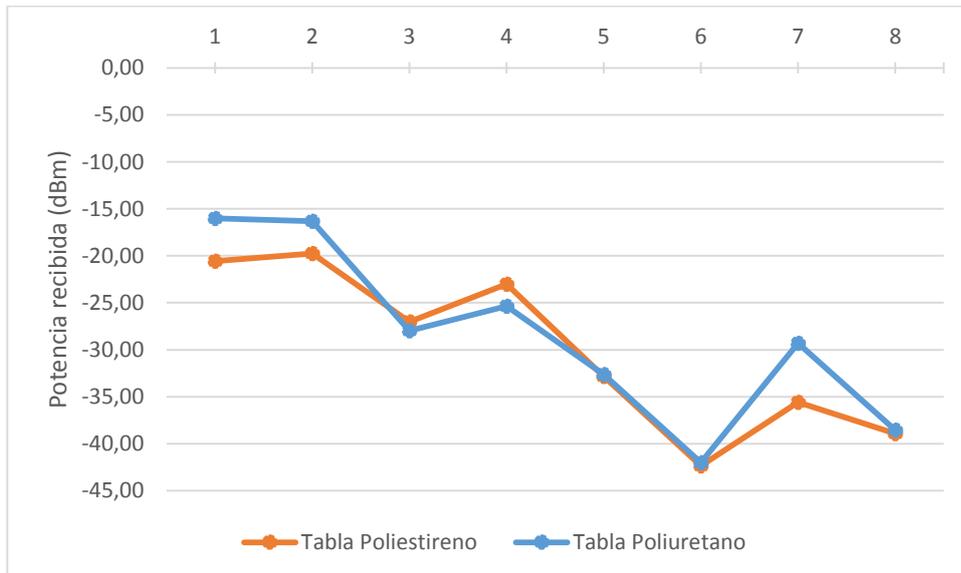


Figura 5.19. Radiales a 2,4GHz.



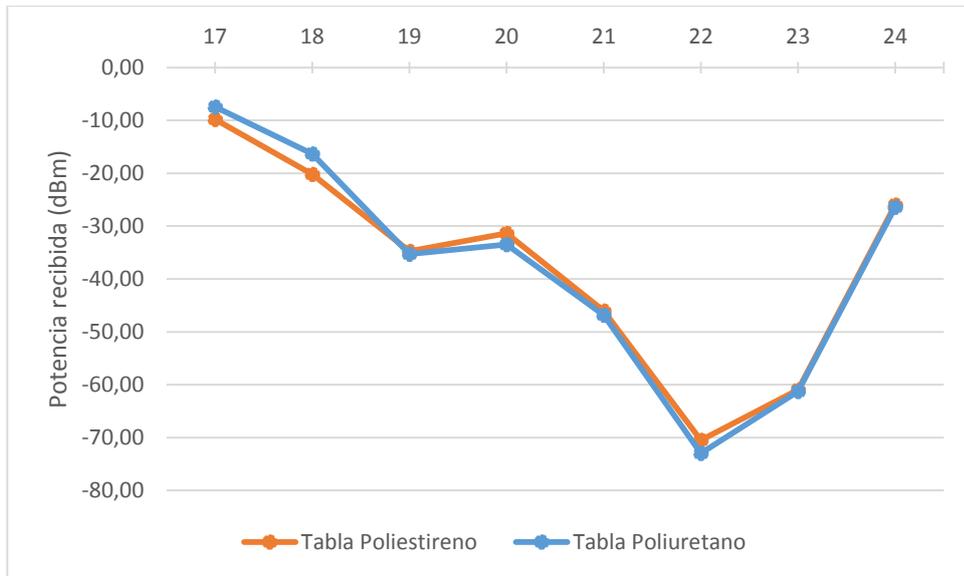
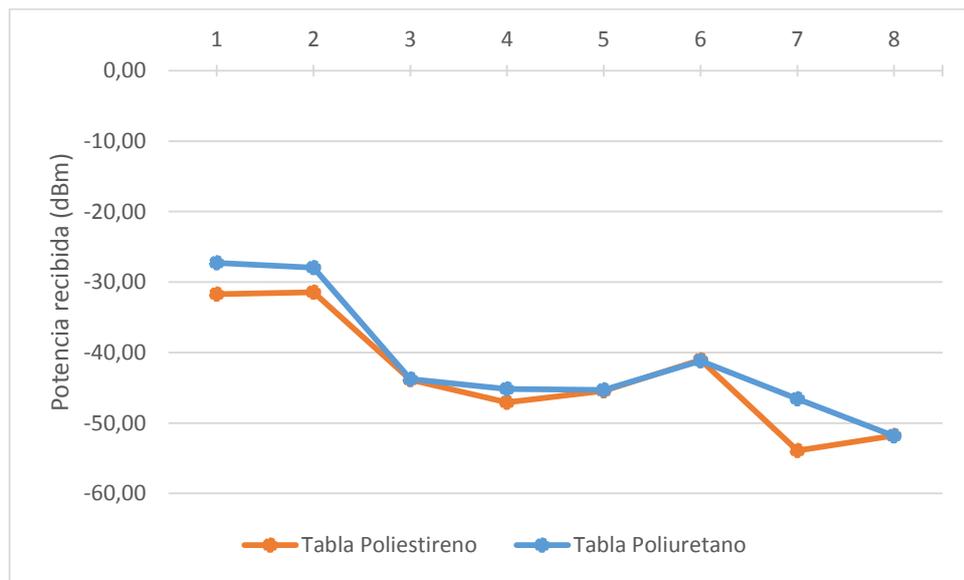


Figura 5.20. Radiales a 868MHz.

- Caso 2: Agua dulce y piel mojada



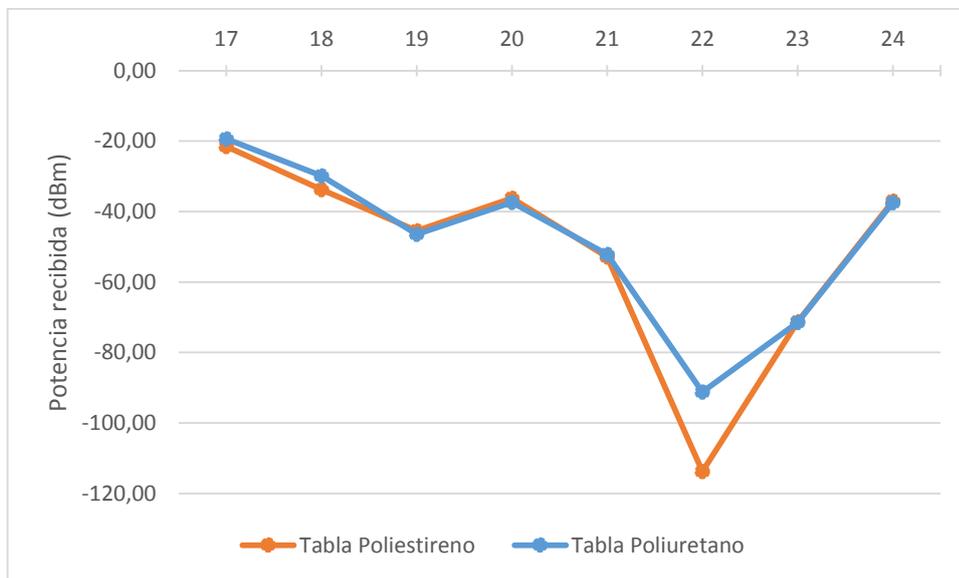
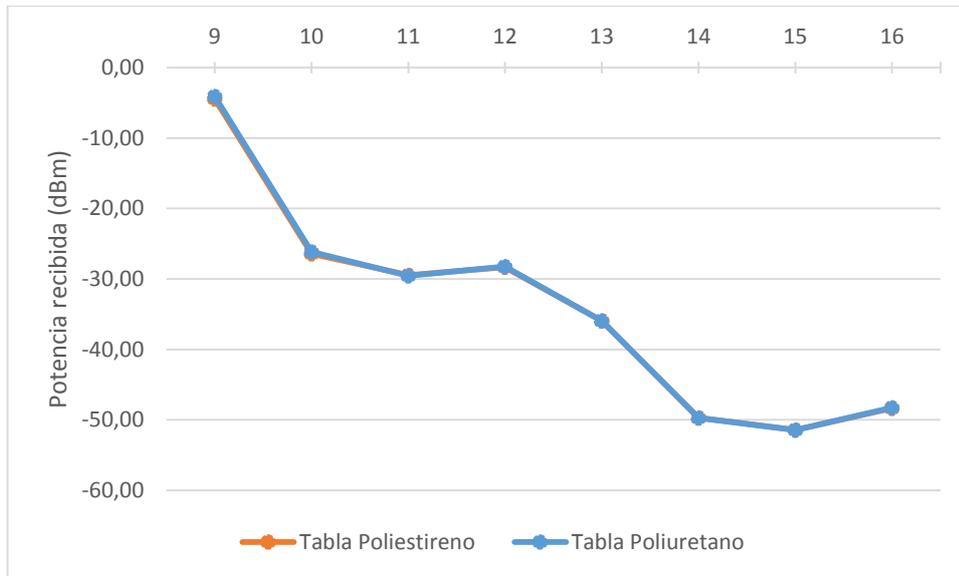
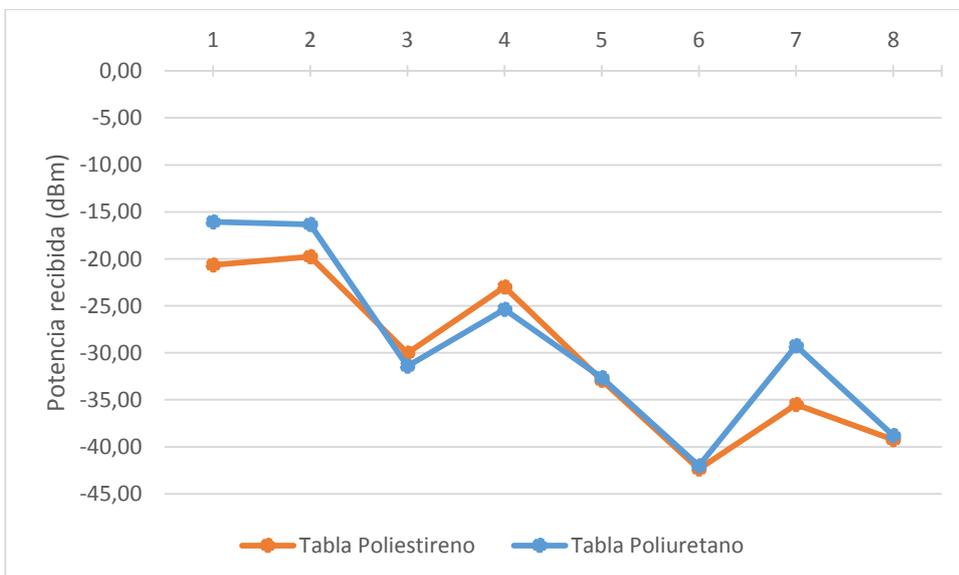


Figura 5.21. Radiales a 2,4GHz.



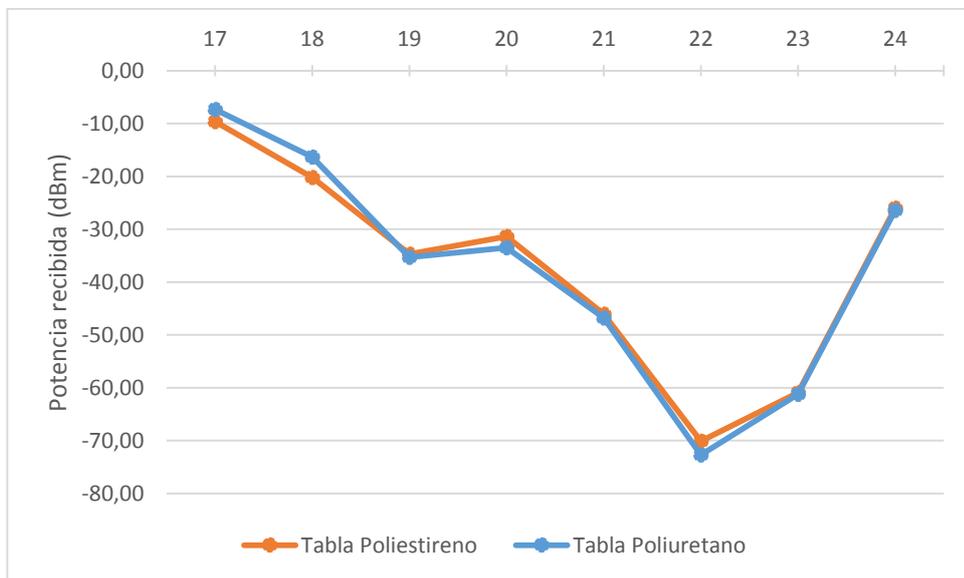
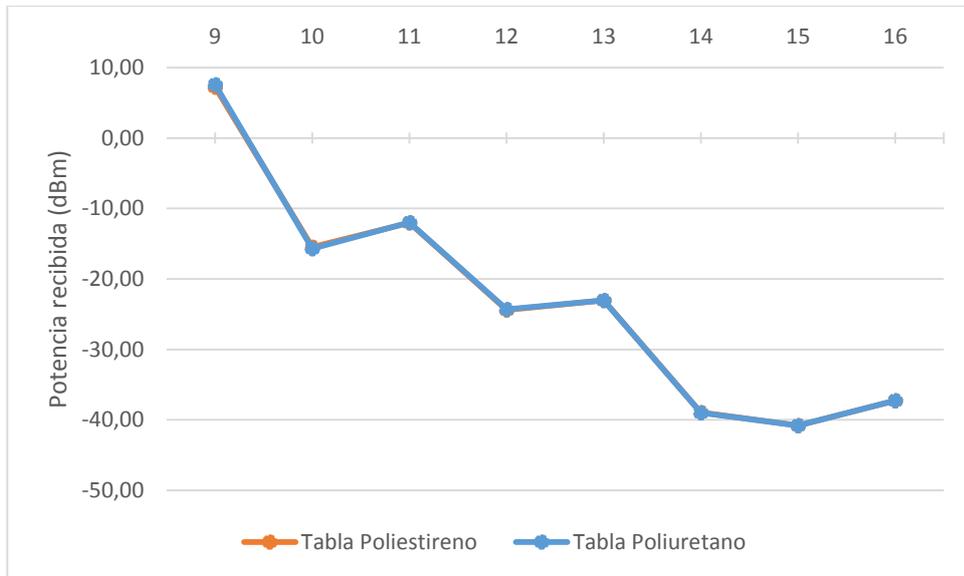


Figura 5.22. Radiales a 868MHz.

- Caso 3: Agua salada y piel seca

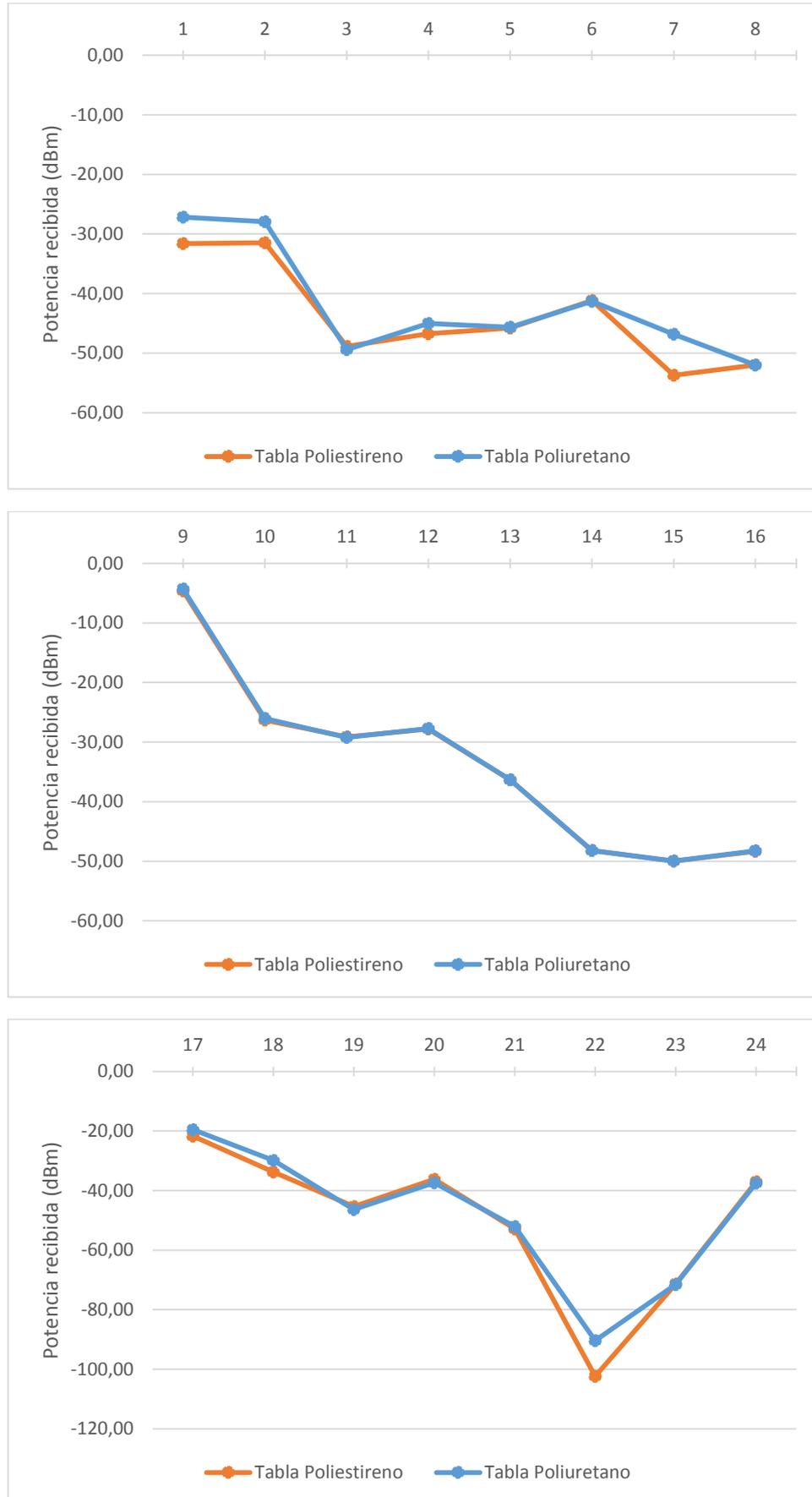


Figura 5.23. Radiales a 2,4GHz.

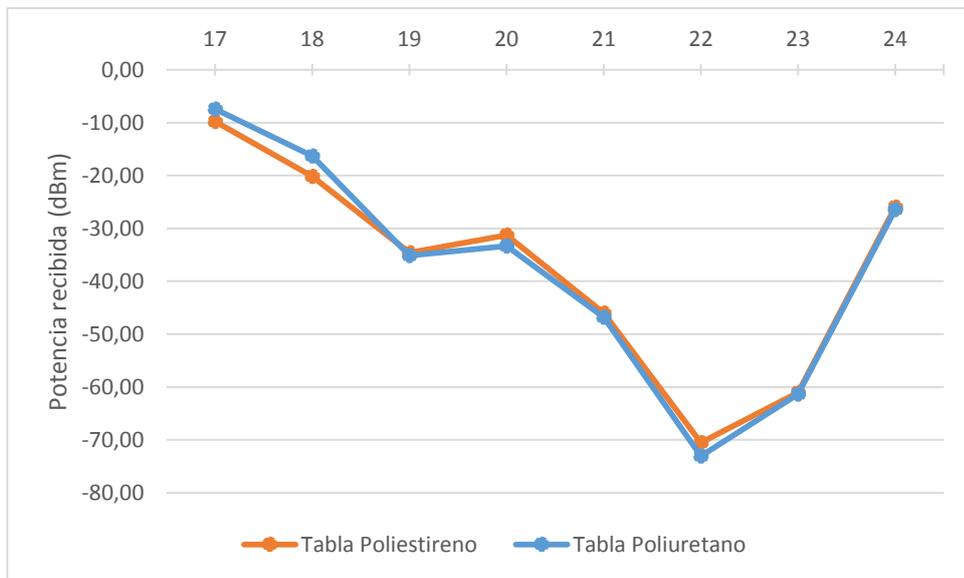
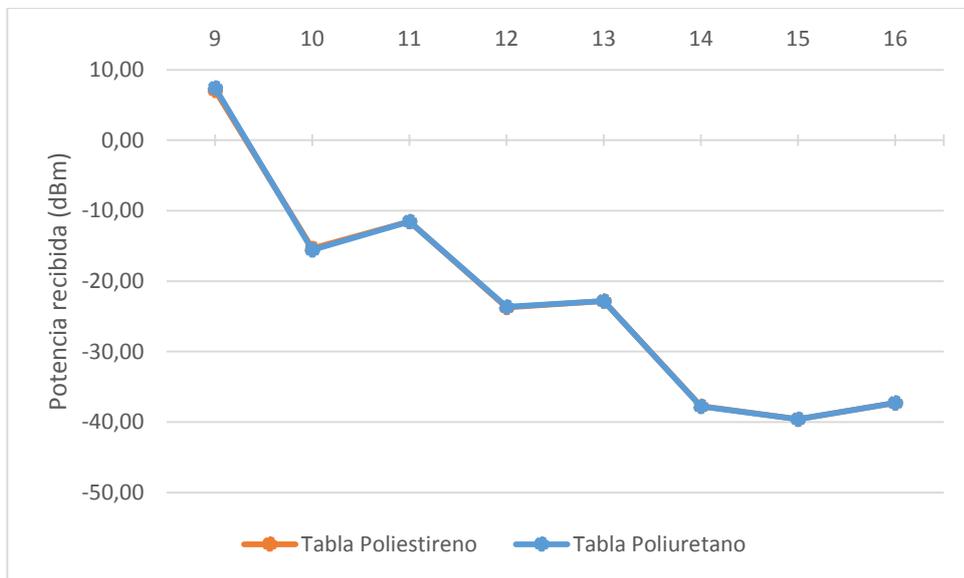
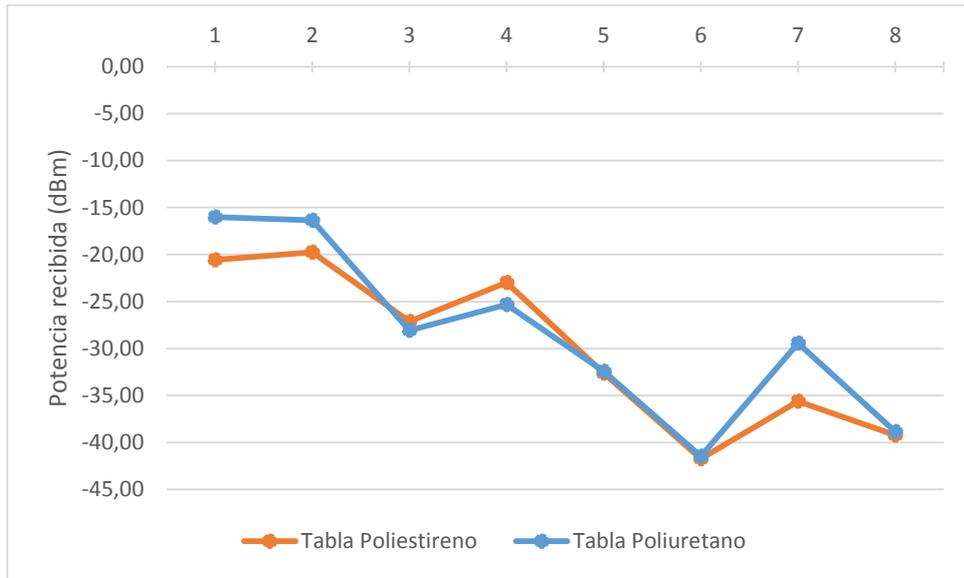


Figura 5.24. Radiales a 868MHz.

- Caso 4: Agua salada y piel mojada

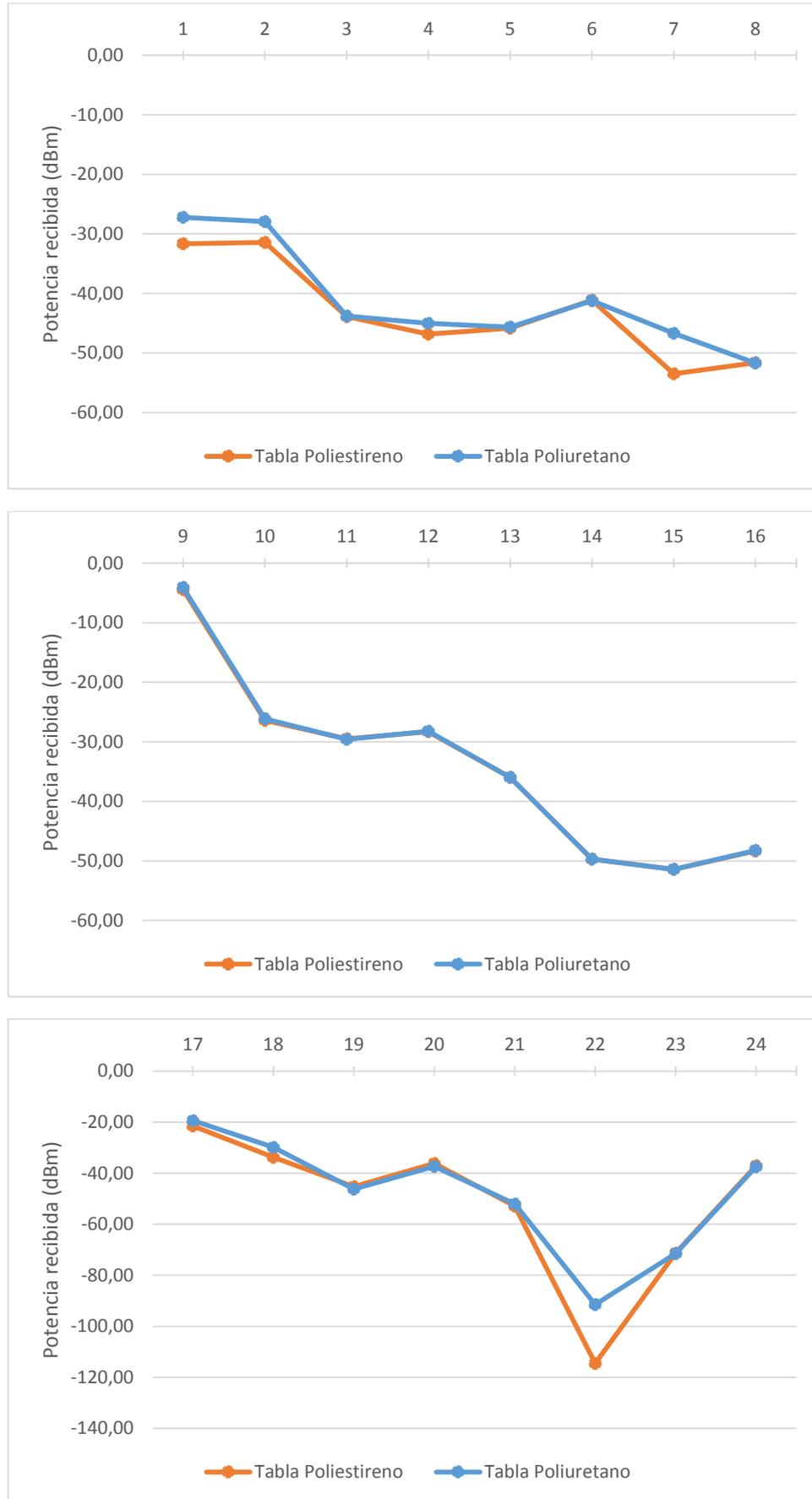


Figura 5.25. Radiales a 2,4GHz.

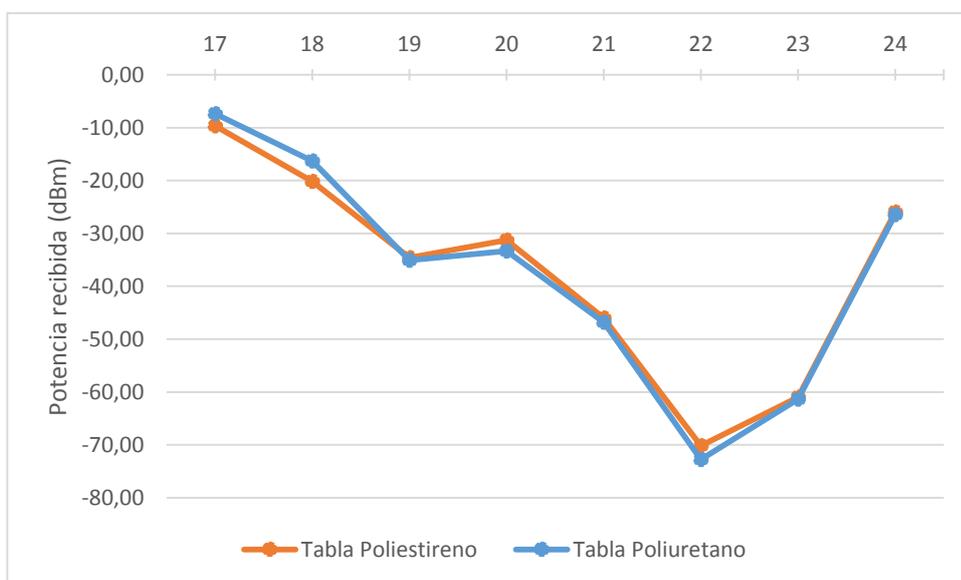
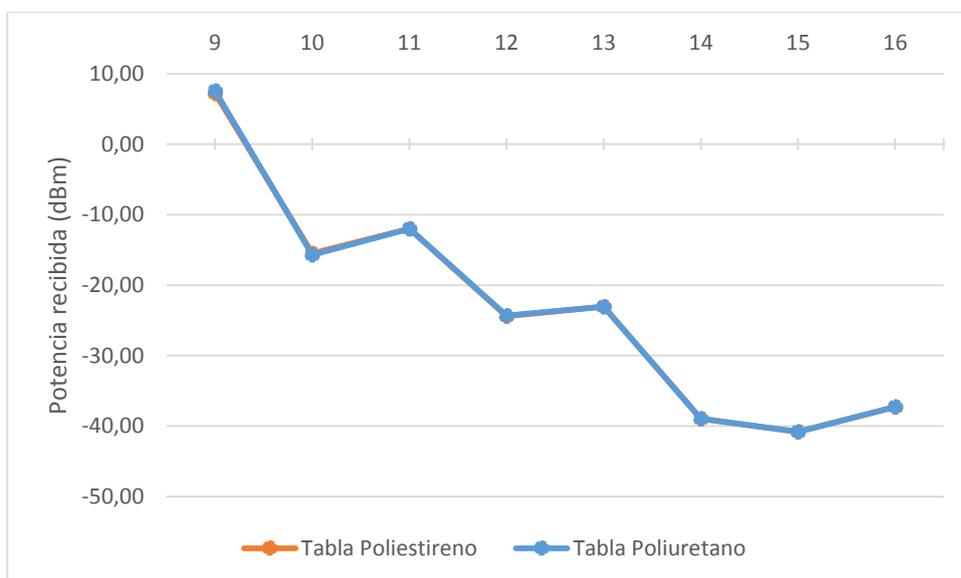
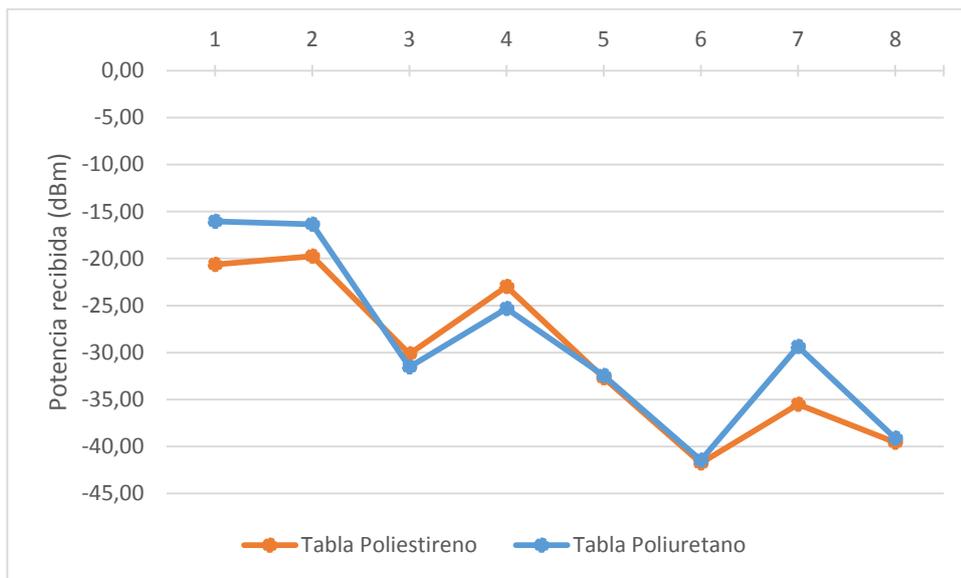


Figura 5.26. Radiales a 868MHz.

A la vista de los resultados, y teniendo en cuenta una sensibilidad de -70dBm para Bluetooth, de -85 ó -92dBm para ZigBee y de -80dBm para RFID/NFC, se puede decir que, en general, las potencias recibidas serán superiores a la mínima exigida. Si bien es cierto que aprecia un pico negativo en la tercera radial para todos los casos, lo cual puede provocar desvanecimientos en la comunicación. Esto se puede solucionar, por ejemplo, con transceptores que dispongan de unas mejores características de sensibilidad.

## 5.4. Medidas

### 5.4.1. Metodología y parámetros

En éste estudio se realizaron dos tipos de medidas, por un lado, se hicieron medidas de potencia recibida o RSSI (Received Signal Strength Indicator), y por el otro, de calidad del enlace o PER (Packet Error Rate). Además cabe recordar que los escenarios 1 y 2 eran los únicos viables de medir empíricamente.

Para ello se hizo uso de la siguiente instrumentación, cuyos principales datos serán comentados brevemente, aunque todas sus características se pueden ver más detalladamente en el anexo 8.3:

- Marconi 2041 Low Noise Generator:
  - 10 kHz to 2,7 GHz
  - Low residual FM noise: 0,3Hz RMS at 1GHz
  - Low spurious signals: -90dBc non-harmonics
  - Low phase noise: -140dBc/Hz at 1GHz
  - Comprehensive modulation modes
  - +13dBm output (+19dBm optional)
  - 0,1Hz to 500kHz modulation oscillator
  - Comprehensive frequency and amplitude sweep capabilities



Figura 5.27. Marconi 2041 Low Noise Generator.

- Analizador de espectros Agilent FieldFox N9912A:
  - Sensibilidad: -148dBm
  - Rango de frecuencia: 9KHz a 6GHz
  - Conectores: 2xUSB 2.0, 1xminiUSB, 1xLAN, 1xminiSD slot
  - Calibración en el Puerto de salida RF: Sí

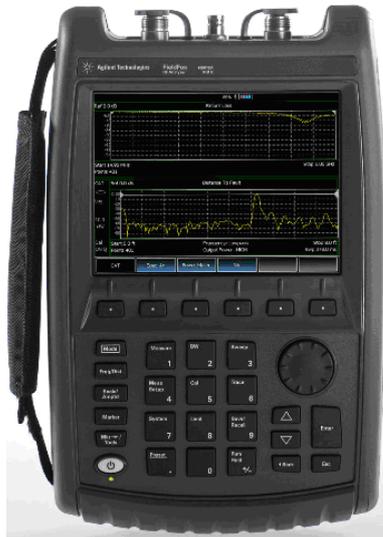


Figura 5.28. Agilent FieldFox N9912A.

- Antena Titanis 2.4 GHz Swivel SMA Antenna:
  - Frecuencia: 2,4-2,5GHz
  - Ganancia: 0,82dBi medida en cámara anecoica
  - Polarización: Lineal
  - Impedancia: 50Ω



Figura 5.29. Antena Titanis 2.4 GHz Swivel SMA Antenna.

- Antenna Factor ANT-868-CW-HWR-xxx:
  - Frecuencia central: 868MHz
  - Ancho de banda: 30MHz
  - Ganancia: 2dBi
  - Polarización: Lineal
  - Impedancia: 50Ω



que se configuró para que emitiese un pulso con una potencia de 10dBm y a una frecuencia de trabajo de 2,4GHz o 868MHz, según cada caso.

Por otro lado, se creó el receptor conectando otra antena, igual a la del transmisor, con el analizador de espectros, donde se podía ver la señal recibida y se tomaba el dato de la potencia de pico. La antena transmisora se fijó sobre la tabla y la receptora sobre una caja de cartón, proporcionando una cierta movilidad para situarla en los puntos que se quería.

La siguiente figura muestra las diferentes posiciones en las que se situó el receptor, dentro de cada plano (a distintas alturas) y el lugar donde estaba colocado el transmisor sobre la tabla.

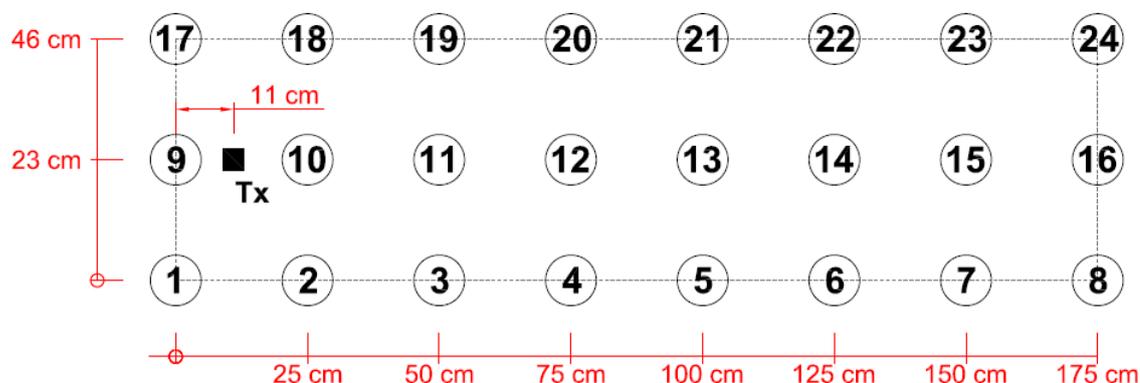


Figura 5.32. Plan de medidas RSSI y posición del transmisor.

### **Medidas PER**

Estas medidas se hicieron con el objetivo de comprobar la calidad del enlace en este tipo de condiciones. Para ello se conectaron dos dispositivos ZigBee a sendos ordenadores portátiles mediante cable USB, estando uno de ellos ubicado sobre la tabla, en la misma posición que en las medidas anteriores, y el otro, colocado en distintas partes de una persona que está de pie encima de la tabla.

En primer lugar, se configura el dispositivo de la persona como receptor, a través del programa ZigBeePERReceiver, y se pone a escuchar, a la espera de que le llegue la información. Posteriormente se configura el dispositivo de la tabla como transmisor, mediante el programa ZigBeePERSender, que es similar al anterior, y se pone a emitir paquetes.

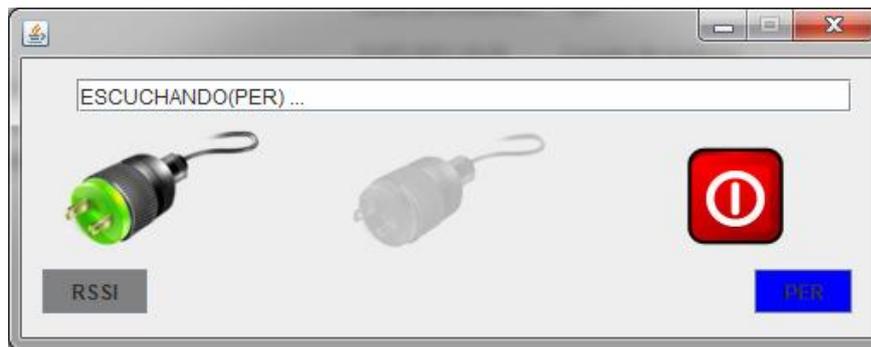


Figura 5.33. Captura del programa ZigBeePERReceiver.

Los parámetros que se utilizaron para desarrollar el experimento se describen a continuación:

- Potencia de transmisión: 18dBm
- Frecuencia: 2,4GHz
- Ganancia de la antena: 2dBi
- Velocidad de transmisión: 9600Kbps
- Número de paquetes transmitidos: 10000

En cuanto al plan de medidas, la figura xx muestra claramente todos los lugares donde se situó el receptor.

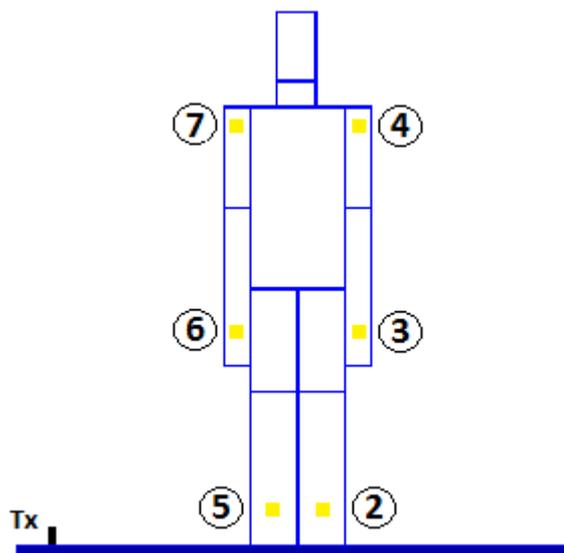


Figura 5.34. Plan de medidas PER.

Hay que tener en cuenta que la persona de la figura está de espaldas al observador y que como medida 1 se ha considerado el caso en el que transmisor y receptor están juntos. De este modo, se observa como es la calidad de la transmisión en el mejor de los casos y se toma de referencia para el resto de medidas.

## 5.4.2. Escenario 1

### 5.4.2.1. Medidas RSSI

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la frecuencia de operación de 2,4GHz.

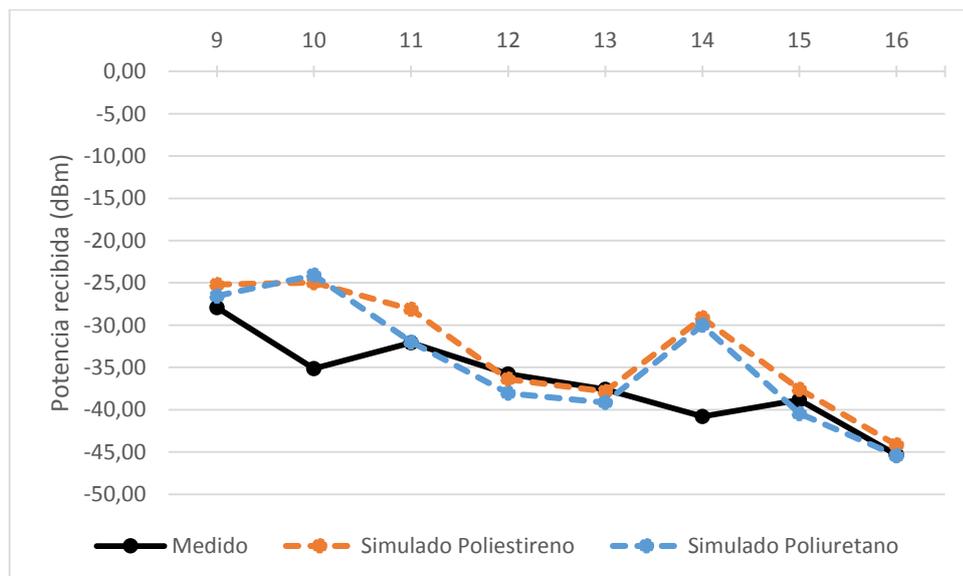
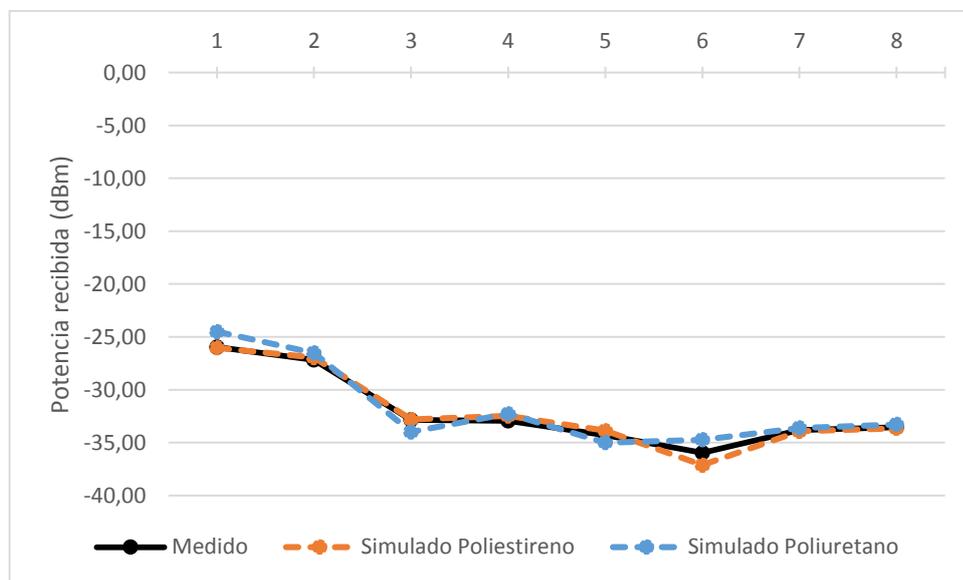
#### **Plano a 17 cm**

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-25,96	-26,04	0,08	-24,51	1,45
2	-27,18	-26,96	0,22	-26,52	0,66
3	-32,86	-32,81	0,05	-33,99	1,13
4	-32,95	-32,48	0,47	-32,27	0,68
5	-34,30	-33,87	0,43	-35,01	0,71
6	-35,96	-37,14	1,18	-34,73	1,23
7	-33,81	-33,94	0,13	-33,61	0,20
8	-33,56	-33,65	0,09	-33,28	0,28
9	-27,94	-25,21	2,73	-26,57	1,37
10	-35,14	-24,98	10,16	-24,09	11,05
11	-32,07	-28,13	3,94	-31,99	0,08
12	-35,77	-36,40	0,63	-38,06	2,29
13	-37,61	-37,85	0,24	-39,15	1,54
14	-40,81	-29,15	11,66	-30,02	10,79
15	-38,85	-37,59	1,26	-40,45	1,60
16	-45,35	-44,18	1,17	-45,43	0,08
17	-31,04	-30,08	0,96	-32,03	0,99
18	-32,10	-31,52	0,58	-27,69	4,41
19	-31,36	-30,05	1,31	-30,52	0,84

<b>20</b>	-40,11	-41,95	1,84	-44,81	4,70
<b>21</b>	-38,12	-38,20	0,08	-38,12	0,00
<b>22</b>	-37,93	-36,46	1,47	-37,19	0,74
<b>23</b>	-43,26	-39,46	3,80	-40,47	2,79
<b>24</b>	-39,14	-34,54	4,60	-39,78	0,64

- Error medio poliestireno = 2.05
- Error medio poliuretano = 2.09



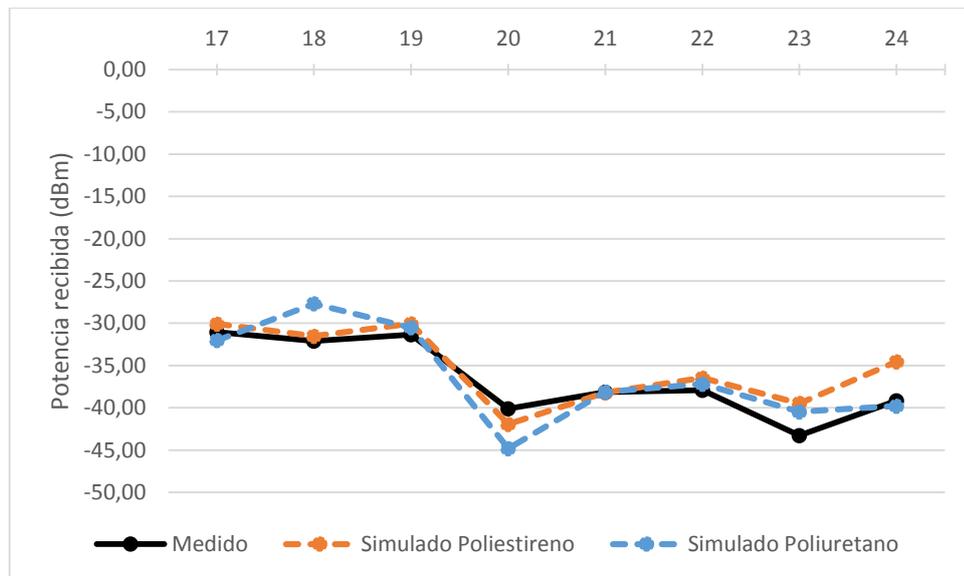


Figura 5.35. Radiales de potencia.

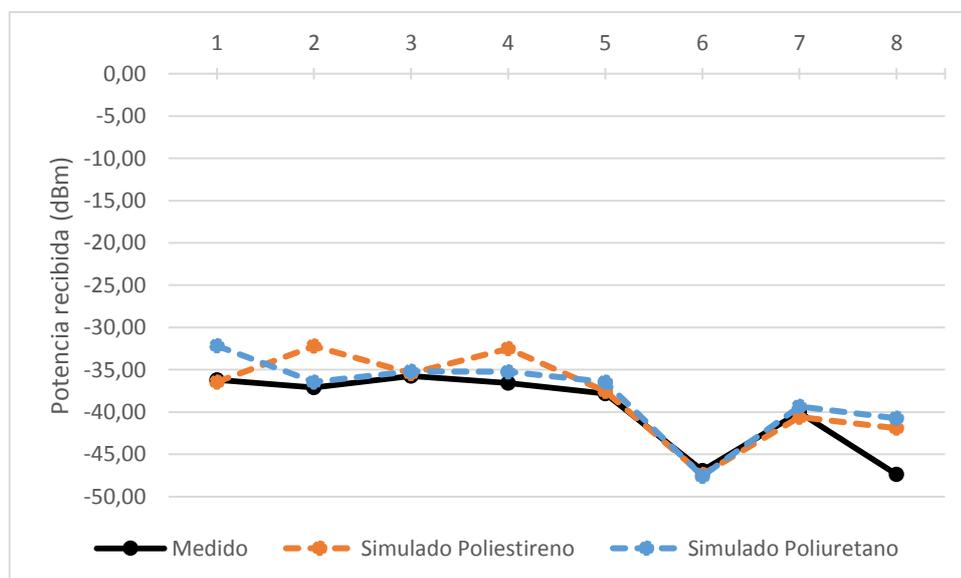
### Plano a 45 cm

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-36,20	-36,45	0,25	-32,16	4,04
2	-37,11	-32,20	4,91	-36,44	0,67
3	-35,74	-35,43	0,31	-35,18	0,56
4	-36,58	-32,51	4,07	-35,24	1,34
5	-37,80	-37,54	0,26	-36,44	1,36
6	-46,92	-47,38	0,46	-47,58	0,66
7	-40,06	-40,61	0,55	-39,33	0,73
8	-47,38	-41,91	5,47	-40,73	6,65
9	-27,55	-27,03	0,52	-26,83	0,72
10	-33,67	-33,65	0,02	-32,68	0,99
11	-36,34	-35,91	0,43	-38,53	2,19
12	-35,71	-34,50	1,21	-35,89	0,18
13	-41,29	-39,51	1,78	-41,10	0,19
14	-38,37	-36,00	2,37	-37,17	1,20

<b>15</b>	-41,09	-40,44	0,65	-38,89	2,20
<b>16</b>	-46,89	-42,47	4,42	-42,03	4,86
<b>17</b>	-30,30	-30,20	0,10	-30,19	0,11
<b>18</b>	-37,45	-30,30	7,15	-28,07	9,38
<b>19</b>	-37,25	-36,32	0,93	-35,13	2,12
<b>20</b>	-38,81	-38,95	0,14	-41,73	2,92
<b>21</b>	-41,45	-41,28	0,17	-40,71	0,74
<b>22</b>	-40,77	-39,49	1,28	-41,01	0,24
<b>23</b>	-40,61	-40,62	0,01	-39,99	0,62
<b>24</b>	-45,20	-44,26	0,94	-44,38	0,82

- Error medio poliestireno = 1.60
- Error medio poliuretano = 1.90



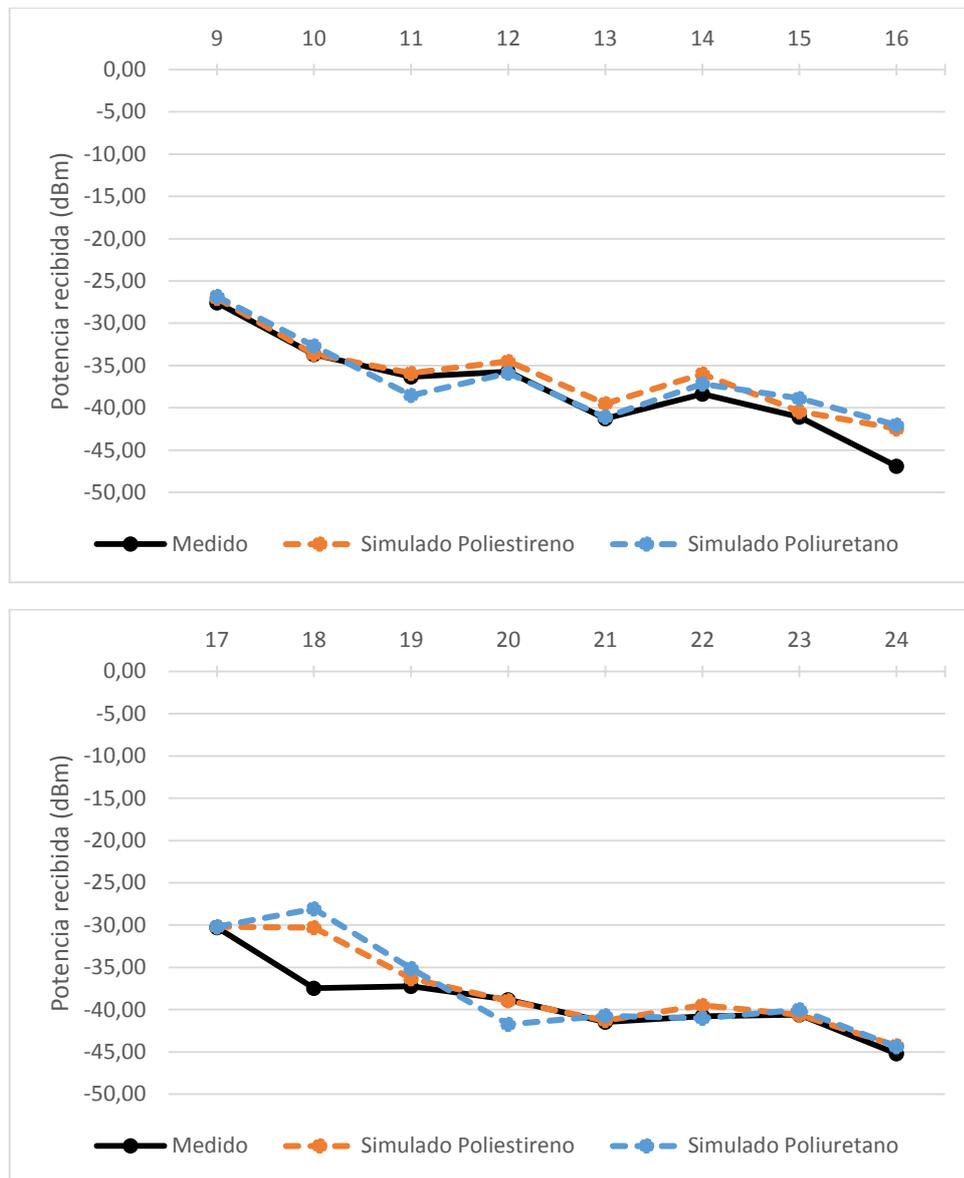


Figura 5.36. Radiales de potencia.

**Plano a 75 cm**

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-36,81	-36,85	0,04	-36,18	0,63
2	-41,80	-40,28	1,52	-41,95	0,15
3	-43,81	-40,74	3,07	-41,19	2,62
4	-46,75	-43,10	3,65	-44,10	2,65
5	-36,98	-36,89	0,09	-37,65	0,67

<b>6</b>	-44,60	-45,28	0,68	-44,58	0,02
<b>7</b>	-41,25	-42,04	0,79	-40,57	0,68
<b>8</b>	-41,40	-41,27	0,13	-41,18	0,22
<b>9</b>	-41,15	-40,59	0,56	-38,96	2,19
<b>10</b>	-45,02	-45,60	0,58	-45,08	0,06
<b>11</b>	-42,63	-44,05	1,42	-41,91	0,72
<b>12</b>	-40,08	-39,69	0,39	-40,04	0,04
<b>13</b>	-41,59	-40,55	1,04	-40,65	0,94
<b>14</b>	-42,38	-41,43	0,95	-42,56	0,18
<b>15</b>	-38,13	-36,39	1,74	-37,61	0,52
<b>16</b>	-44,95	-45,82	0,87	-44,63	0,32
<b>17</b>	-48,38	-49,57	1,19	-45,26	3,12
<b>18</b>	-42,10	-41,46	0,64	-40,06	2,04
<b>19</b>	-38,14	-38,23	0,09	-36,76	1,38
<b>20</b>	-43,66	-43,72	0,06	-40,81	2,85
<b>21</b>	-41,46	-41,86	0,40	-42,31	0,85
<b>22</b>	-41,75	-41,69	0,06	-41,47	0,28
<b>23</b>	-39,64	-39,52	0,12	-39,65	0,01
<b>24</b>	-39,17	-39,35	0,18	-39,15	0,02

- Error medio poliestireno = 0.84
- Error medio poliuretano = 0.97

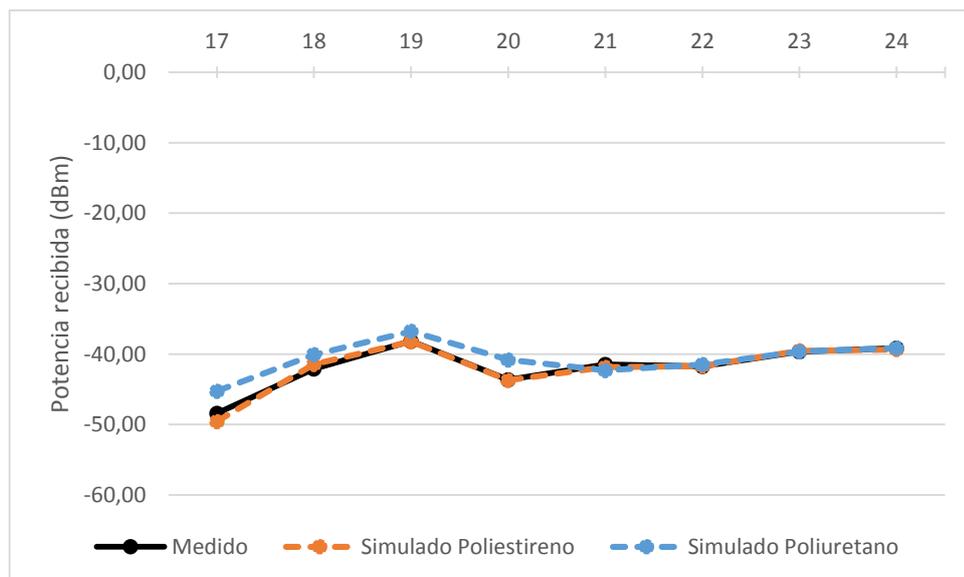
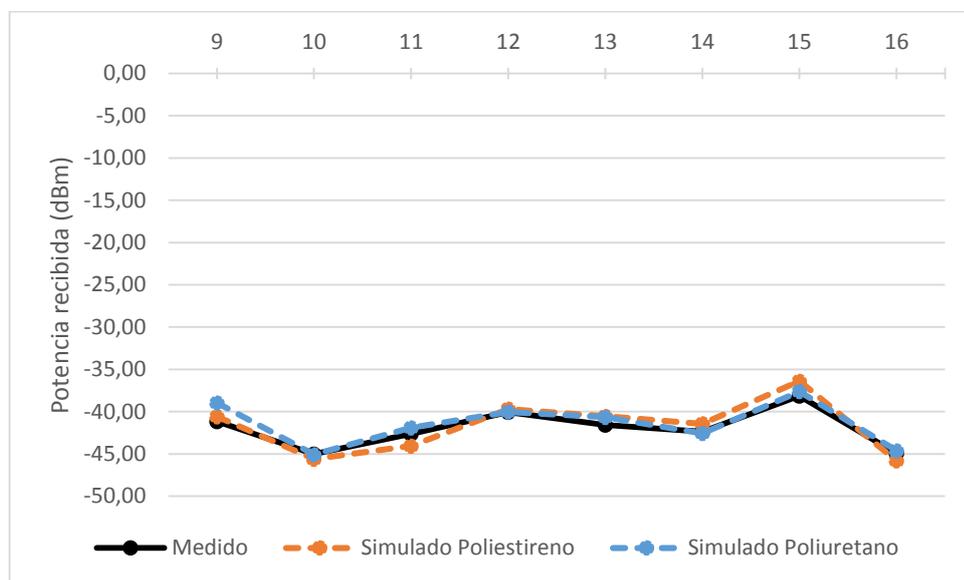
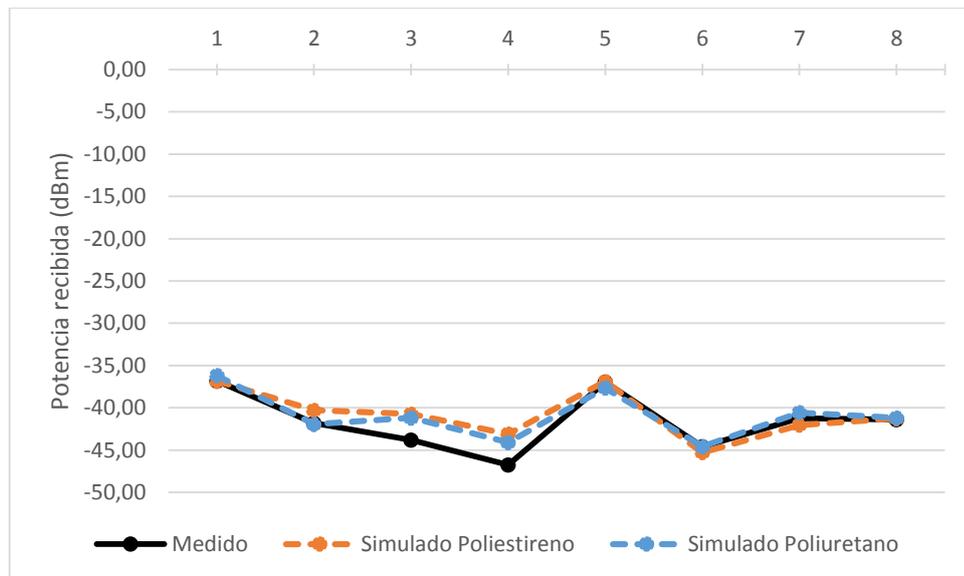


Figura 5.37. Radiales de potencia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la frecuencia de operación de 868MHz.

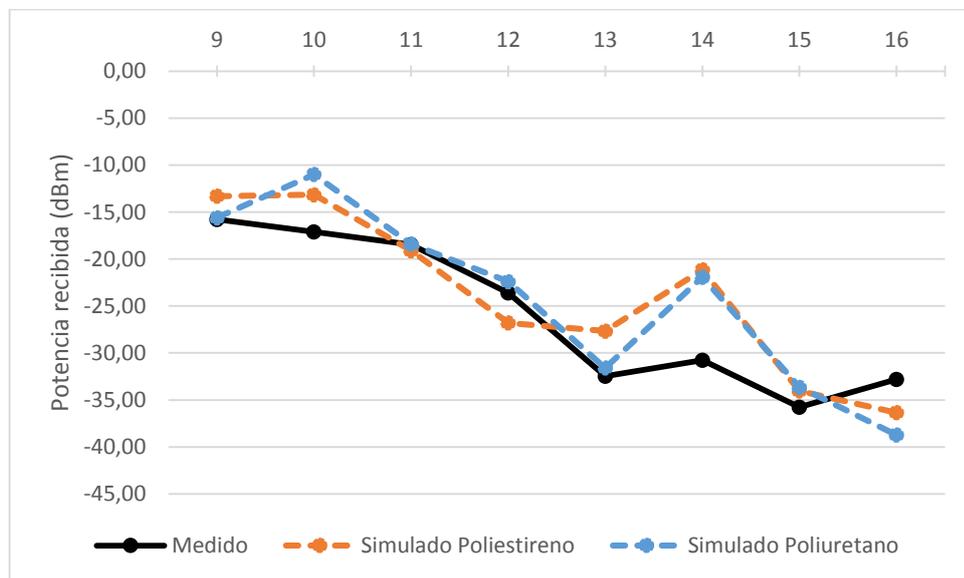
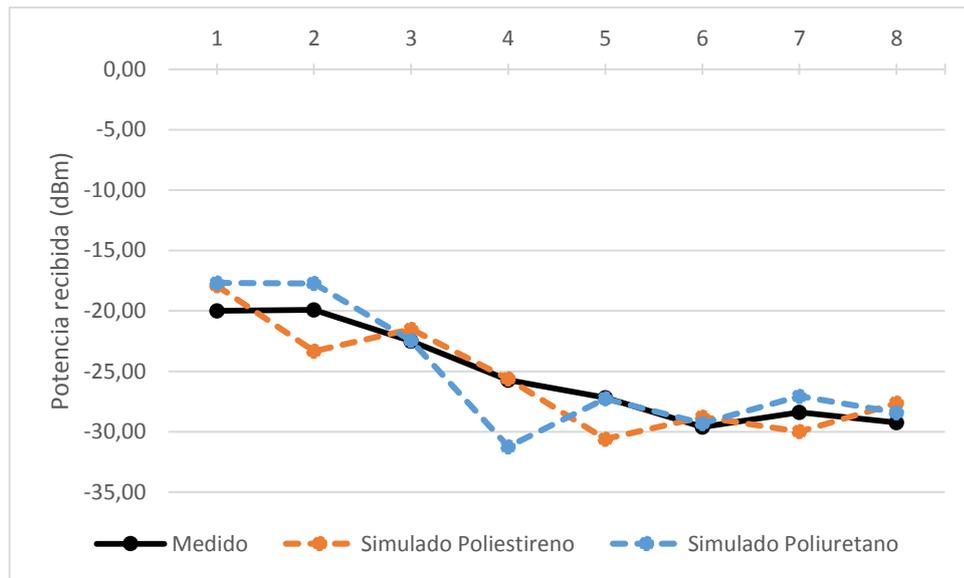
**Plano a 17 cm**

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-19,98	-17,91	2,07	-17,68	2,30
2	-19,91	-23,32	3,41	-17,72	2,19
3	-22,50	-21,52	0,98	-22,46	0,04
4	-25,72	-25,62	0,10	-31,24	5,52
5	-27,19	-30,61	3,42	-27,27	0,08
6	-29,62	-28,78	0,84	-29,31	0,31
7	-28,40	-29,99	1,59	-27,06	1,34
8	-29,23	-27,63	1,60	-28,41	0,82
9	-15,77	-13,31	2,46	-15,60	0,17
10	-17,12	-13,16	3,96	-11,00	6,12
11	-18,47	-19,11	0,64	-18,40	0,07
12	-23,58	-26,80	3,22	-22,40	1,18
13	-32,46	-27,67	4,79	-31,59	0,87
14	-30,78	-21,16	9,62	-21,92	8,86
15	-35,77	-34,04	1,73	-33,65	2,12
16	-32,81	-36,35	3,54	-38,73	5,92
17	-18,89	-15,50	3,39	-17,59	1,30
18	-19,62	-19,57	0,05	-13,94	5,68
19	-22,79	-20,28	2,51	-20,10	2,69
20	-22,94	-22,71	0,23	-23,02	0,08
21	-25,43	-25,24	0,19	-23,68	1,75
22	-29,68	-27,49	2,19	-27,80	1,88

<b>23</b>	-35,04	-35,23	0,19	-34,37	0,67
<b>24</b>	-32,57	-27,68	4,89	-28,42	4,15

- Error medio poliestireno = 2.40
- Error medio poliuretano = 2.34



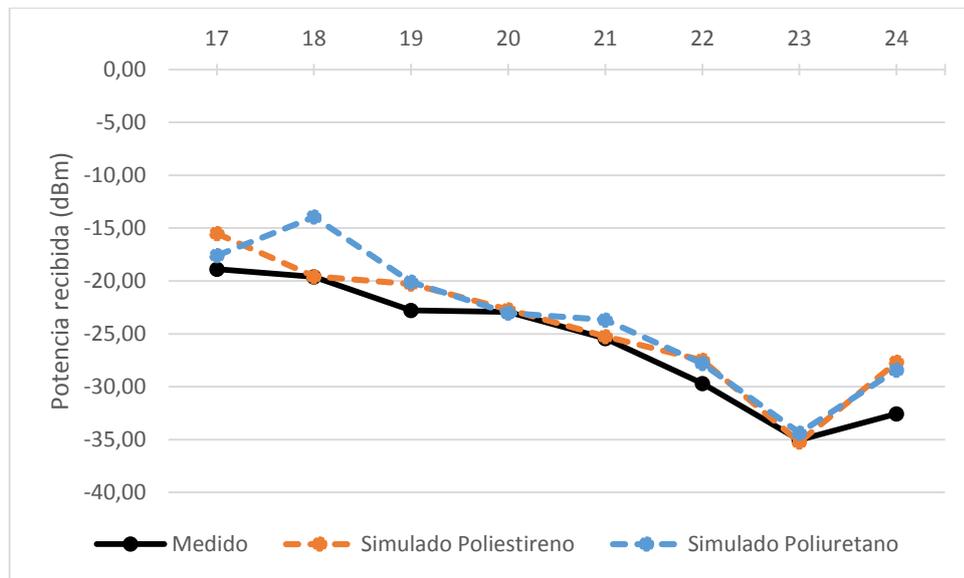


Figura 5.38. Radiales de potencia.

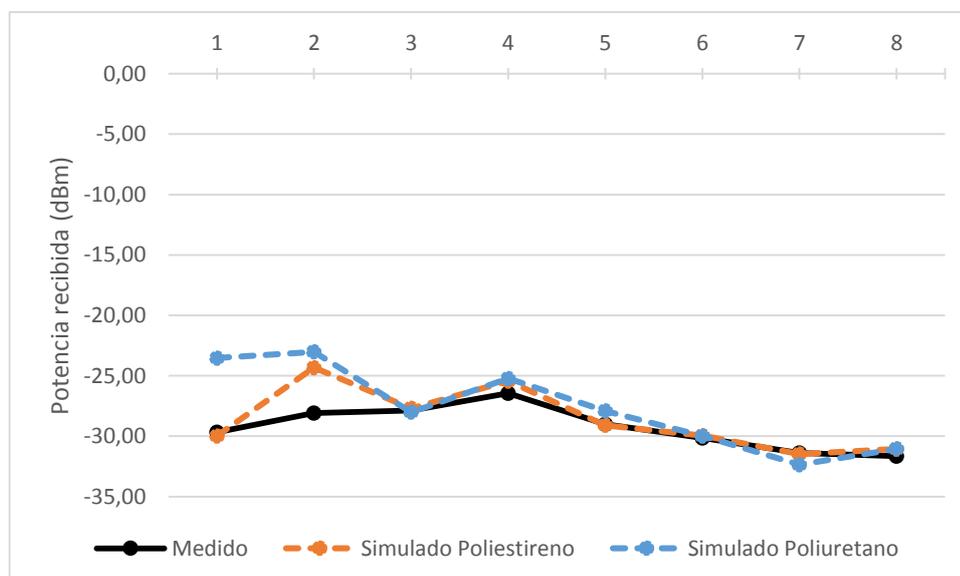
### Plano a 45 cm

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-29,67	-29,98	0,31	-23,53	6,14
2	-28,09	-24,33	3,76	-23,02	5,07
3	-27,86	-27,69	0,17	-28,01	0,15
4	-26,44	-25,43	1,01	-25,23	1,21
5	-29,02	-29,09	0,07	-27,90	1,12
6	-30,15	-29,96	0,19	-29,98	0,17
7	-31,40	-31,48	0,08	-32,36	0,96
8	-31,65	-31,07	0,58	-31,05	0,60
9	-29,34	-25,79	3,55	-23,86	5,48
10	-37,03	-29,31	7,72	-27,40	9,63
11	-29,60	-32,07	2,47	-27,31	2,29
12	-30,35	-28,52	1,83	-27,76	2,59
13	-29,33	-30,18	0,85	-29,38	0,05
14	-26,68	-27,98	1,30	-27,61	0,93

<b>15</b>	-31,08	-29,85	1,23	-28,16	2,92
<b>16</b>	-35,30	-35,30	0,00	-32,73	2,57
<b>17</b>	-27,78	-18,12	9,66	-20,50	7,28
<b>18</b>	-28,73	-22,65	6,08	-19,53	9,20
<b>19</b>	-30,22	-30,04	0,18	-23,98	6,24
<b>20</b>	-30,41	-27,20	3,21	-30,07	0,34
<b>21</b>	-29,53	-28,95	0,58	-27,91	1,62
<b>22</b>	-28,41	-27,62	0,79	-26,41	2,00
<b>23</b>	-33,87	-34,81	0,94	-32,93	0,94
<b>24</b>	-34,07	-33,65	0,42	-32,19	1,88

- Error medio poliestireno = 1.96
- Error medio poliuretano = 2.97



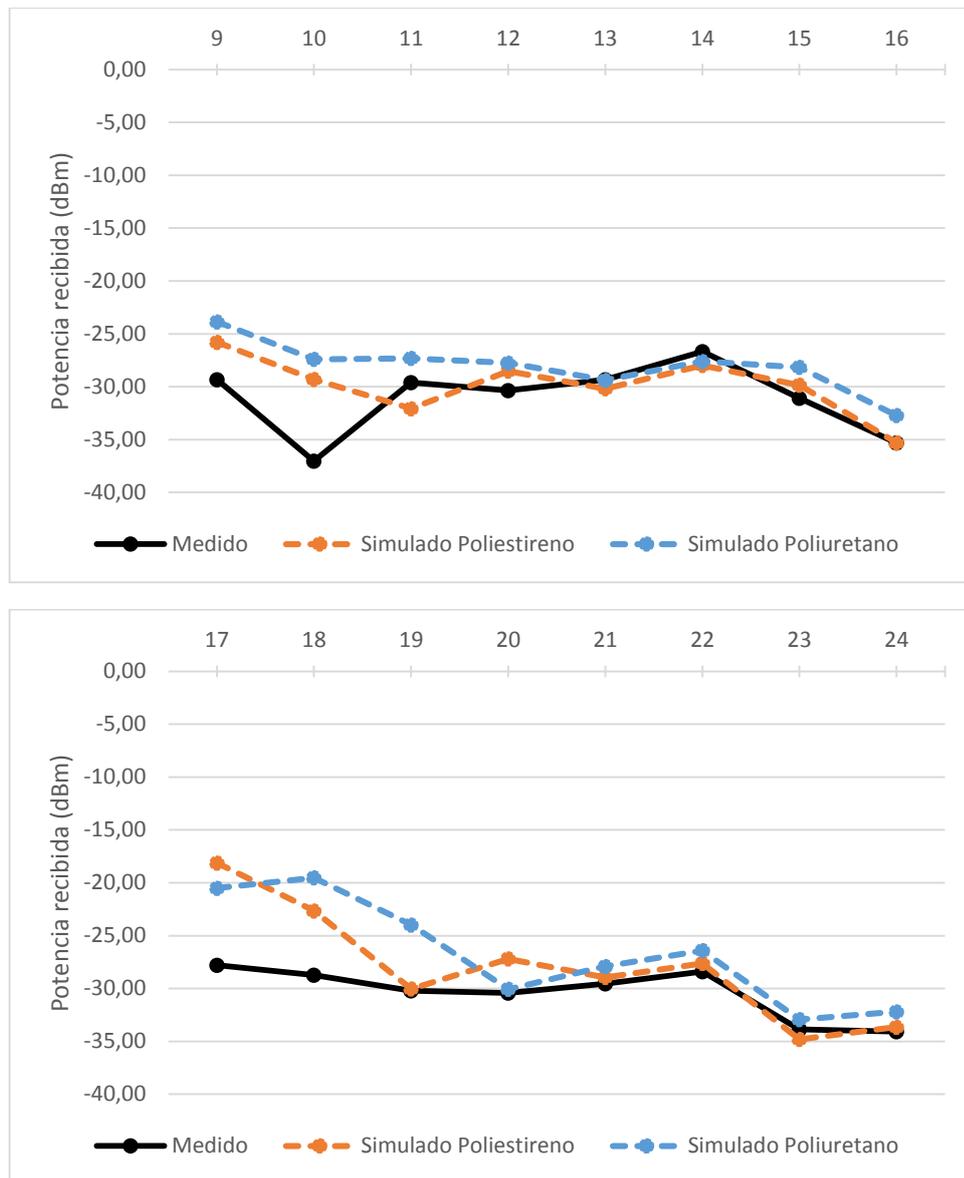


Figura 5.39. Radiales de potencia.

**Plano a 75 cm**

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-38,39	-31,11	7,28	-25,33	13,06
2	-33,32	-31,44	1,88	-29,47	3,85
3	-36,50	-37,08	0,58	-34,67	1,83
4	-28,46	-27,55	0,91	-28,87	0,41
5	-31,69	-34,39	2,70	-26,04	5,65

<b>6</b>	-32,35	-32,87	0,52	-31,68	0,67
<b>7</b>	-33,75	-33,71	0,04	-33,96	0,21
<b>8</b>	-32,07	-31,95	0,12	-31,96	0,11
<b>9</b>	-29,33	-29,47	0,14	-29,88	0,55
<b>10</b>	-34,11	-34,79	0,68	-33,83	0,28
<b>11</b>	-33,93	-33,71	0,22	-32,29	1,64
<b>12</b>	-30,00	-28,95	1,05	-30,94	0,94
<b>13</b>	-29,60	-26,26	3,34	-25,55	4,05
<b>14</b>	-35,64	-36,42	0,78	-36,31	0,67
<b>15</b>	-32,94	-32,70	0,24	-32,53	0,41
<b>16</b>	-34,17	-35,30	1,13	-32,93	1,24
<b>17</b>	-36,53	-32,76	3,77	-30,54	5,99
<b>18</b>	-36,51	-31,12	5,39	-29,53	6,98
<b>19</b>	-31,59	-29,46	2,13	-34,00	2,41
<b>20</b>	-36,98	-36,87	0,11	-29,56	7,42
<b>21</b>	-35,70	-32,28	3,42	-30,81	4,89
<b>22</b>	-38,62	-42,17	3,55	-38,64	0,02
<b>23</b>	-38,66	-41,28	2,62	-40,90	2,24
<b>24</b>	-39,21	-37,89	1,32	-38,00	1,21

- Error medio poliestireno = 1.83
- Error medio poliuretano = 2.78

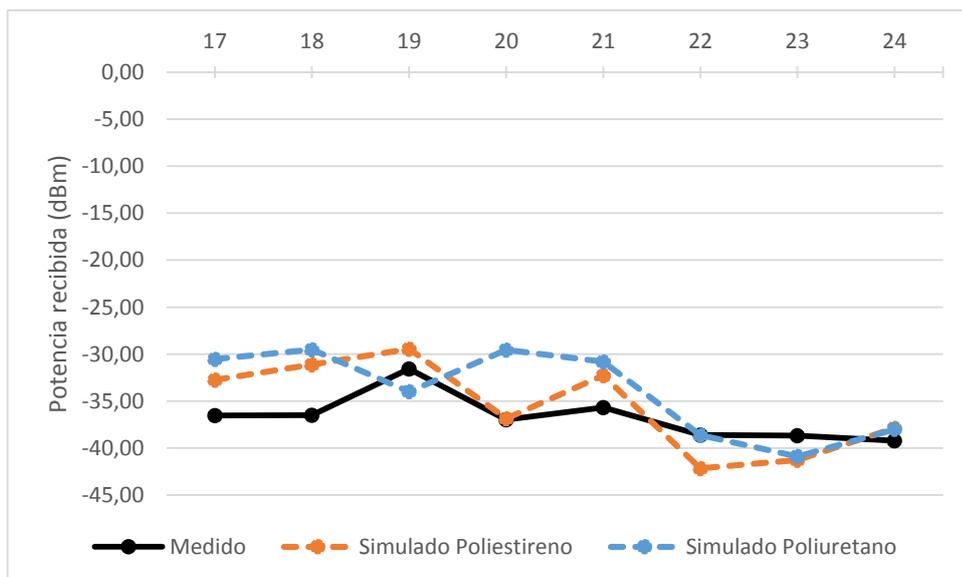
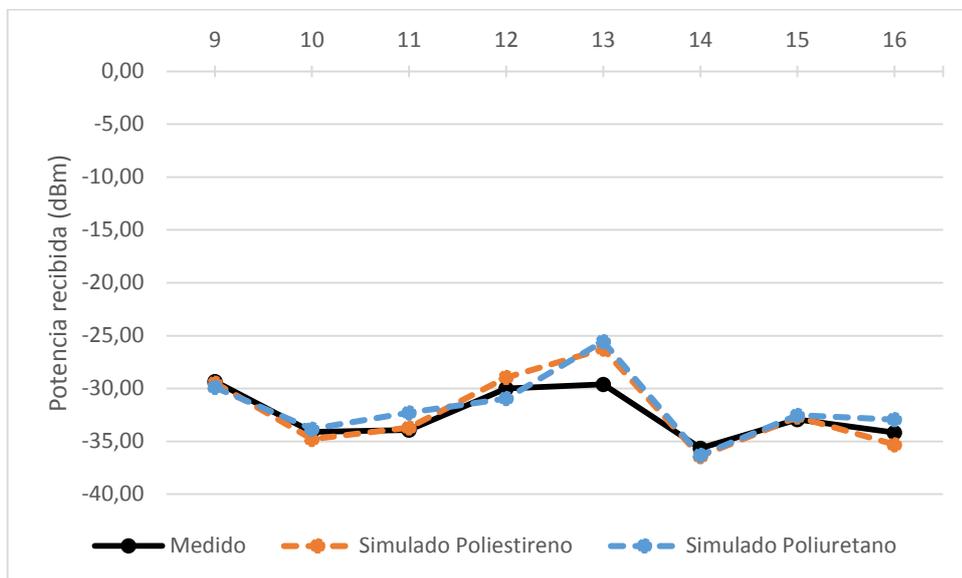
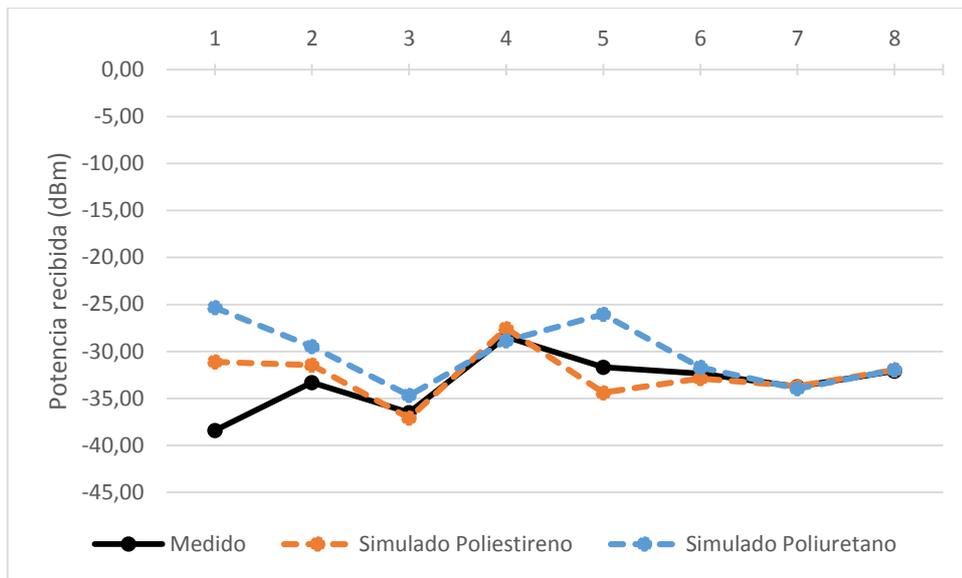


Figura 5.40. Radiales de potencia.

Al analizar los resultados anteriores se observa que los valores obtenidos de las simulaciones son muy parecidos a los medidos. Quizás se podría decir que a 2,4GHz los valores convergen más que 868MHz. Pero en cualquier se consiguen unos errores medios muy pequeños. Esto significa que, para casos de este tipo, el simulador de trazado de rayos proporciona una aproximación verdaderamente buena a la realidad.

### 5.4.3. Escenario 2

#### 5.4.3.1. Medidas RSSI

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el escenario 2 para la frecuencia 2,4GHz.

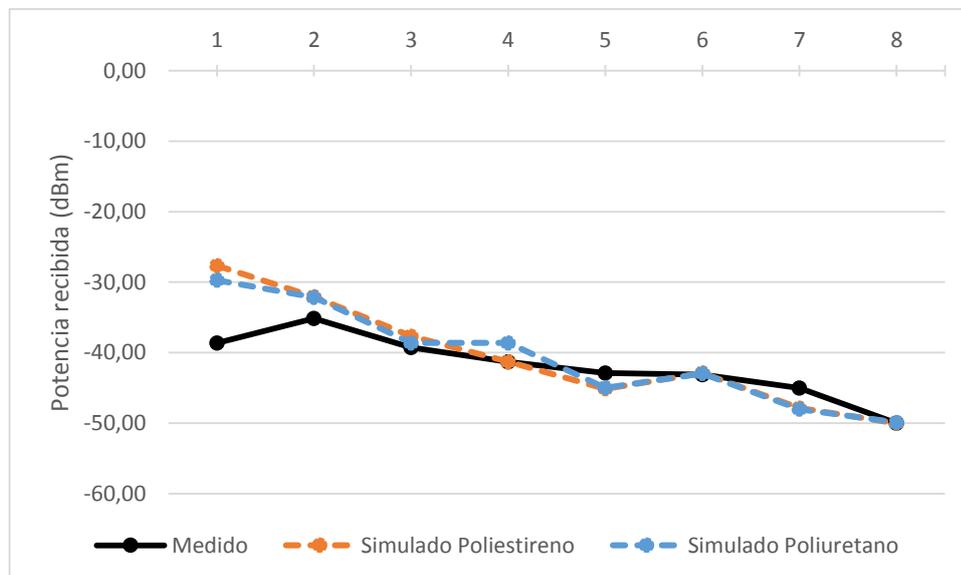
#### **Plano a 30 cm con la persona tumbada**

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
<b>1</b>	-38,64	-27,66	10,98	-29,71	8,93
<b>2</b>	-35,13	-32,07	3,06	-32,15	2,98
<b>3</b>	-39,28	-37,66	1,62	-38,63	0,65
<b>4</b>	-41,31	-41,30	0,01	-38,61	2,70
<b>5</b>	-42,88	-45,12	2,24	-44,98	2,10
<b>6</b>	-43,12	-42,89	0,23	-42,95	0,17
<b>7</b>	-45,00	-47,87	2,87	-48,02	3,02
<b>8</b>	-49,99	-50,02	0,03	-49,89	0,10
<b>9</b>	-33,93	-6,90	27,03	-7,43	26,50
<b>10</b>	-33,63	-29,12	4,51	-28,28	5,35
<b>11</b>	-35,63	-31,62	4,01	-31,73	3,90
<b>12</b>	-33,84	-27,81	6,03	-27,61	6,23
<b>13</b>	-39,12	-39,13	0,01	-39,12	0,00
<b>14</b>	-41,57	-47,44	5,87	-47,44	5,87

<b>15</b>	-45,03	-49,50	4,47	-49,55	4,52
<b>16</b>	-44,27	-48,05	3,78	-48,07	3,80
<b>17</b>	-33,87	-22,09	11,78	-26,29	7,58
<b>18</b>	-20,83	-21,07	0,24	-22,82	1,99
<b>19</b>	-30,04	-32,95	2,91	-31,48	1,44
<b>20</b>	-33,01	-33,56	0,55	-32,23	0,78
<b>21</b>	-45,01	-41,61	3,40	-41,27	3,74
<b>22</b>	-37,92	-37,29	0,63	-36,59	1,33
<b>23</b>	-44,10	-38,35	5,75	-48,78	4,68
<b>24</b>	-41,37	-37,84	3,53	-37,40	3,97

- Error medio poliestireno = 4.40
- Error medio poliuretano = 4.26



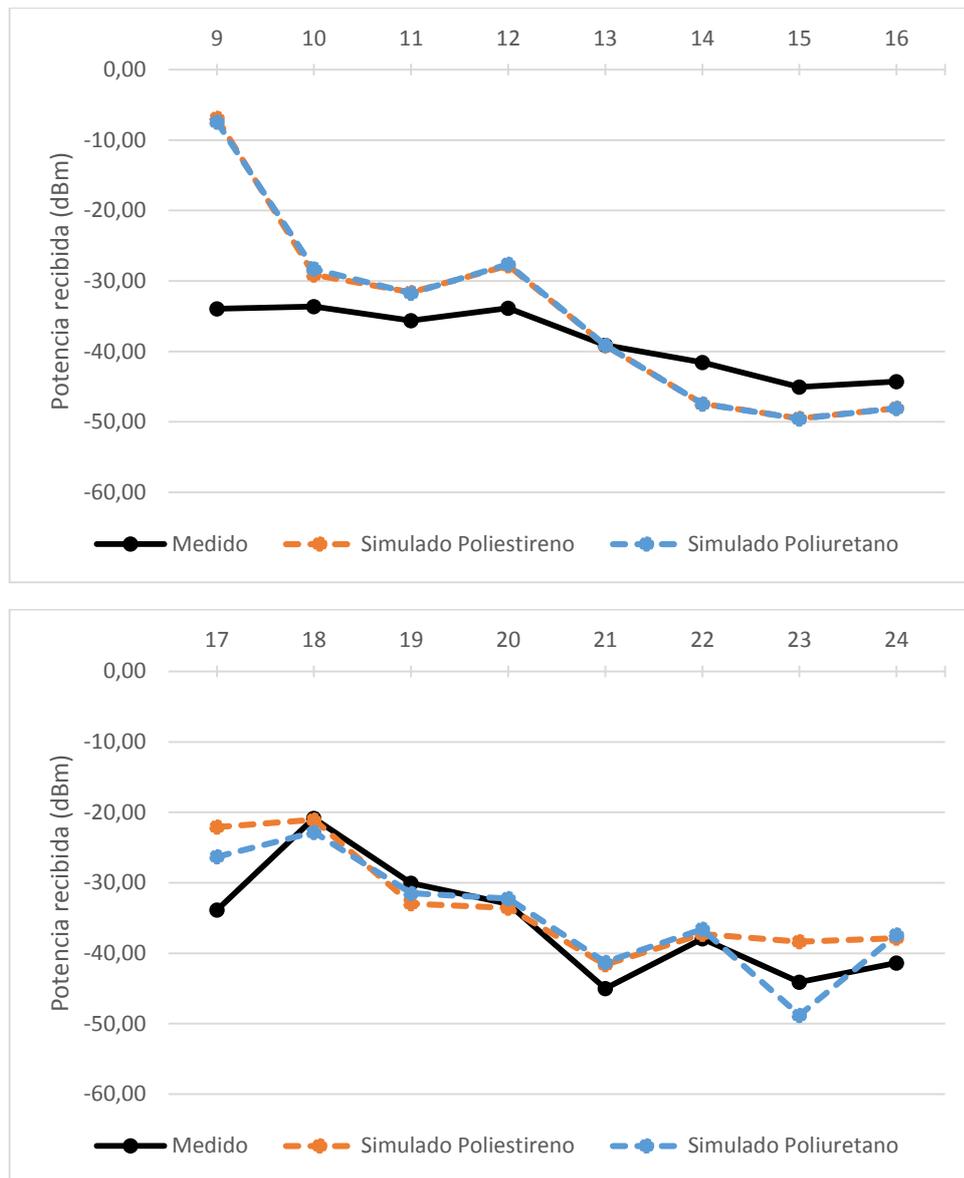


Figura 5.41. Radiales de potencia.

**Plano a 90 cm con la persona tumbada**

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-44,08	-43,69	0,39	-42,12	1,96
2	-40,89	-41,16	0,27	-40,23	0,66
3	-43,47	-43,85	0,38	-42,89	0,58
4	-39,17	-42,92	3,75	-43,20	4,03
5	-46,05	-45,69	0,36	-46,35	0,30

<b>6</b>	-43,87	-43,83	0,04	-43,91	0,04
<b>7</b>	-47,13	-46,47	0,66	-46,72	0,41
<b>8</b>	-44,95	-45,79	0,84	-47,47	2,52
<b>9</b>	-42,09	-41,68	0,41	-40,81	1,28
<b>10</b>	-41,09	-40,76	0,33	-41,16	0,07
<b>11</b>	-38,45	-38,22	0,23	-38,47	0,02
<b>12</b>	-39,00	-39,70	0,70	-38,98	0,02
<b>13</b>	-45,08	-49,28	4,20	-44,62	0,46
<b>14</b>	-43,39	-45,88	2,49	-46,03	2,64
<b>15</b>	-42,01	-41,16	0,85	-40,30	1,71
<b>16</b>	-41,81	-33,31	8,50	-33,39	8,42
<b>17</b>	-31,87	-28,44	3,43	-34,74	2,87
<b>18</b>	-35,55	-36,66	1,11	-36,10	0,55
<b>19</b>	-36,15	-38,84	2,69	-38,75	2,60
<b>20</b>	-40,50	-44,77	4,27	-44,05	3,55
<b>21</b>	-36,45	-41,95	5,50	-38,92	2,47
<b>22</b>	-42,43	-43,20	0,77	-43,21	0,78
<b>23</b>	-41,13	-42,83	1,70	-42,99	1,86
<b>24</b>	-41,61	-51,58	9,97	-51,57	9,96

- Error medio poliestireno = 2.24
- Error medio poliuretano = 2.07

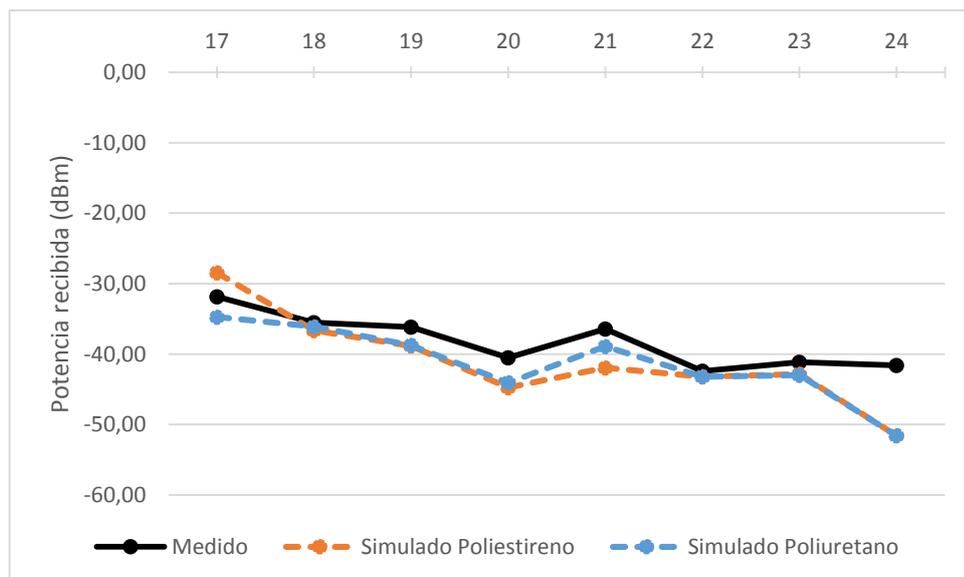
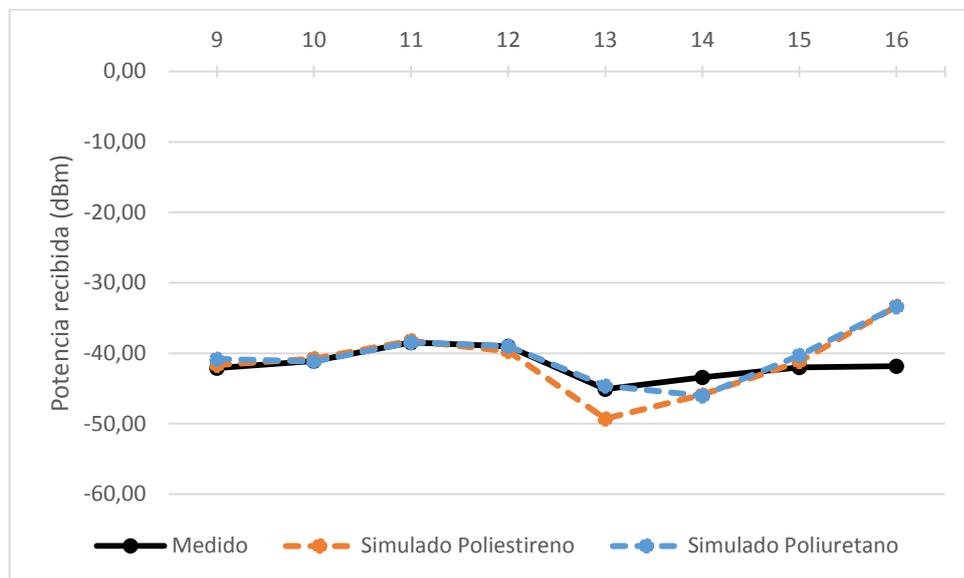
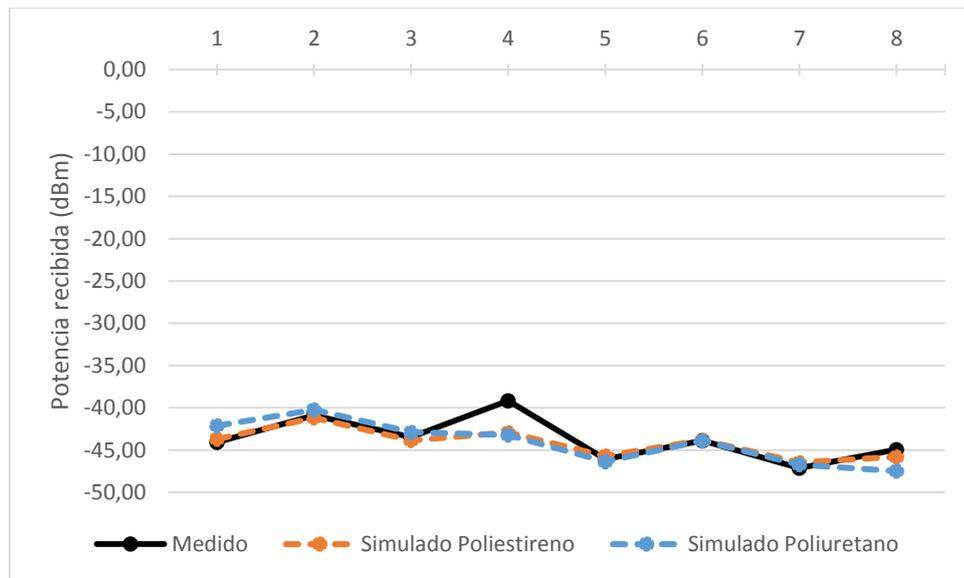


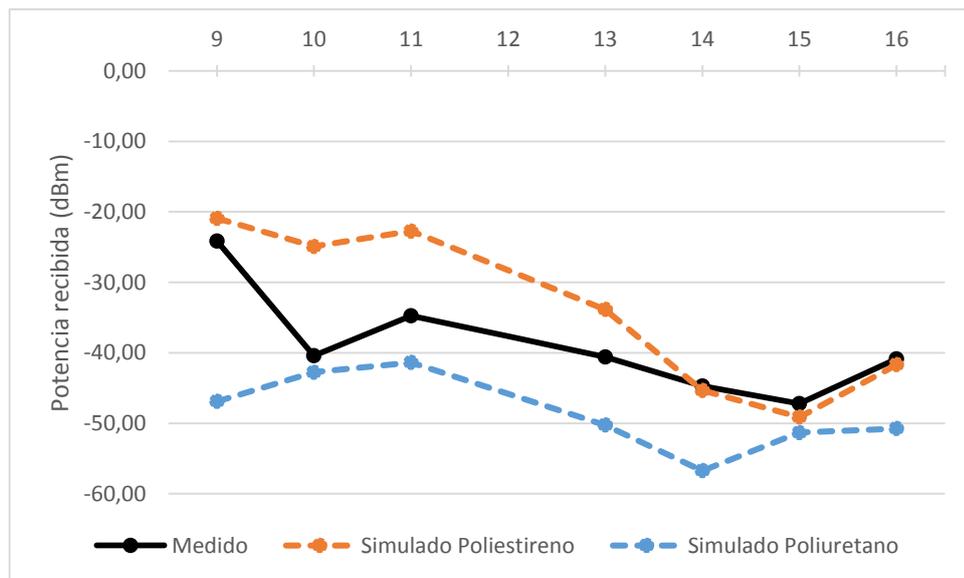
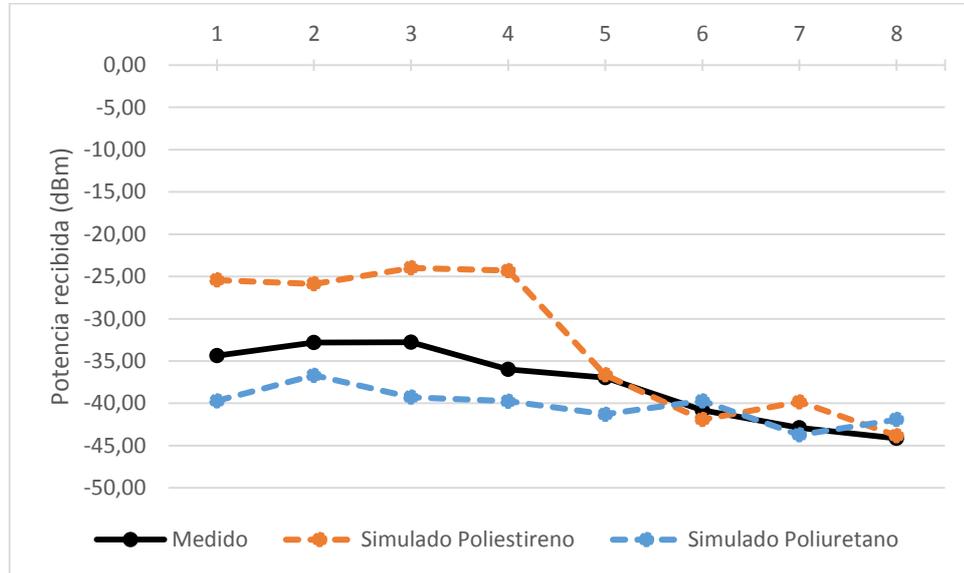
Figura 5.42. Radiales de potencia.

## Plano a 30 cm con la persona de pie

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-34,35	-25,42	8,93	-39,71	5,36
2	-32,81	-25,88	6,93	-36,68	3,87
3	-32,78	-23,99	8,79	-39,28	6,50
4	-35,97	-24,31	11,66	-39,75	3,78
5	-36,95	-36,63	0,32	-41,30	4,35
6	-40,83	-41,92	1,09	-39,71	1,12
7	-42,87	-39,82	3,05	-43,73	0,86
8	-44,12	-43,82	0,30	-41,91	2,21
9	-24,16	-20,91	3,25	-46,91	22,75
10	-40,43	-24,91	15,52	-42,75	2,32
11	-34,73	-22,74	11,99	-41,38	6,65
12					
13	-40,58	-33,86	6,72	-50,26	9,68
14	-44,73	-45,34	0,61	-56,74	12,01
15	-47,23	-49,13	1,90	-51,31	4,08
16	-40,87	-41,69	0,82	-50,76	9,89
17	-28,84	-25,34	3,50	-44,88	16,04
18	-37,81	-32,38	5,43	-42,80	4,99
19	-33,31	-32,18	1,13	-42,04	8,73
20	-34,06	-41,72	7,66	-57,69	23,63
21	-40,74	-36,60	4,14	-52,34	11,60
22	-42,54	-39,90	2,64	-43,59	1,05
23	-37,77	-36,44	1,33	-40,17	2,40
24	-43,52	-41,68	1,84	-44,98	1,46

- Error medio poliestireno = 4.56
- Error medio poliuretano = 6.89



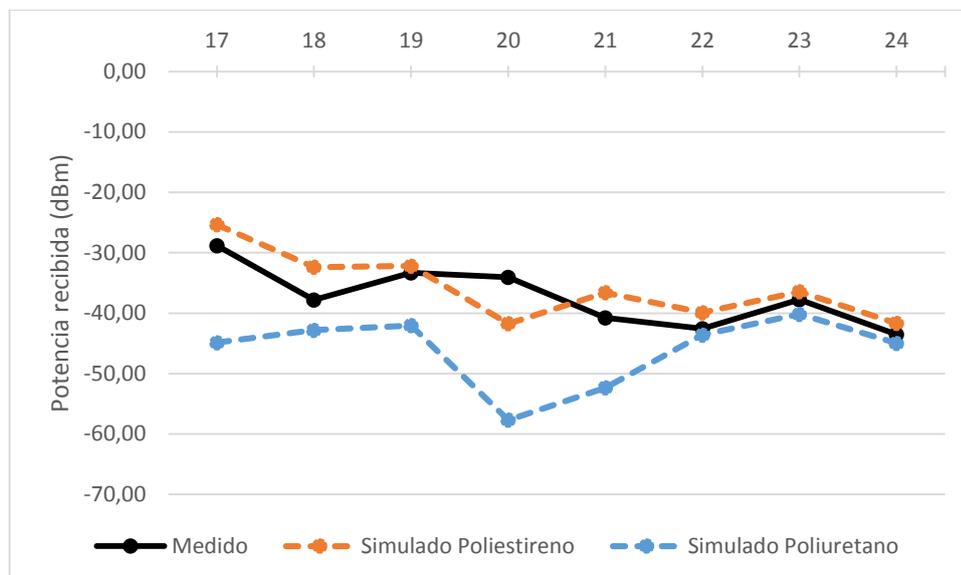


Figura 5.43. Radiales de potencia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el escenario 2 para la frecuencia 868MHz.

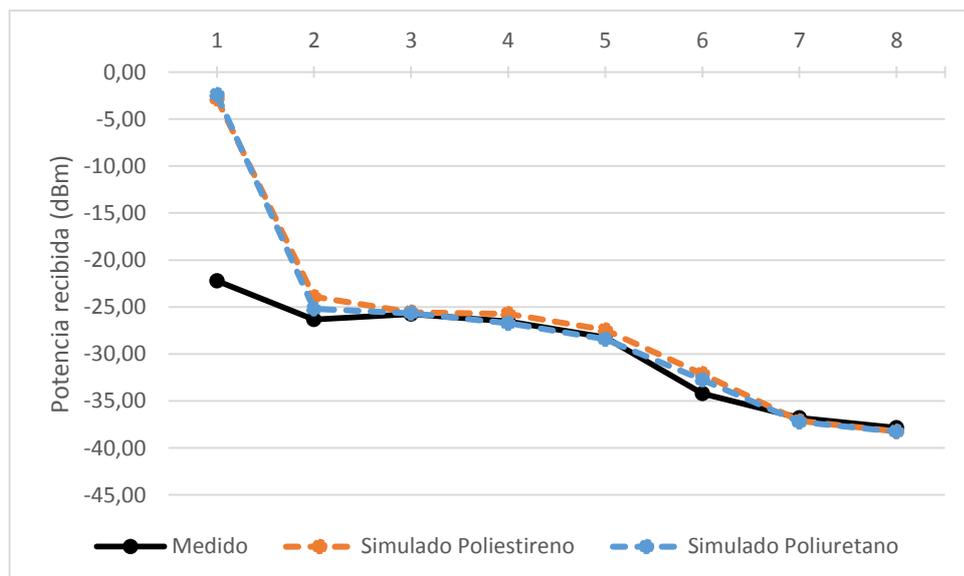
**Plano a 30 cm con la persona tumbada**

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliuretano		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-22,22	-2,84	19,38	-2,40	19,82
2	-26,32	-23,92	2,40	-25,21	1,11
3	-25,75	-25,57	0,18	-25,67	0,08
4	-26,54	-25,74	0,80	-26,73	0,19
5	-28,23	-27,45	0,78	-28,43	0,20
6	-34,22	-32,12	2,10	-32,74	1,48
7	-36,80	-37,14	0,34	-37,24	0,44
8	-37,85	-38,26	0,41	-38,27	0,42
9	-30,20	5,63	35,83	6,14	36,34
10	-31,73	-18,63	13,10	-17,86	13,87
11	-28,03	-19,56	8,47	-19,49	8,54

<b>12</b>	-30,58	-26,67	3,91	-27,18	3,40
<b>13</b>	-31,17	-24,06	7,11	-24,06	7,11
<b>14</b>	-31,79	-37,06	5,27	-37,06	5,27
<b>15</b>	-30,14	-39,34	9,20	-39,22	9,08
<b>16</b>	-32,13	-36,76	4,63	-36,74	4,61
<b>17</b>	-23,29	-1,69	21,60	-1,26	22,03
<b>18</b>	-23,33	-20,74	2,59	-17,20	6,13
<b>19</b>	-25,16	-25,36	0,20	-24,71	0,45
<b>20</b>	-31,99	-31,49	0,50	-32,93	0,94
<b>21</b>	-32,64	-32,79	0,15	-33,47	0,83
<b>22</b>	-34,82	-27,50	7,32	-28,24	6,58
<b>23</b>	-38,80	-38,68	0,12	-39,36	0,56
<b>24</b>	-38,64	-40,67	2,03	-40,57	1,93

- Error medio poliestireno = 6.18
- Error medio poliuretano = 6.31



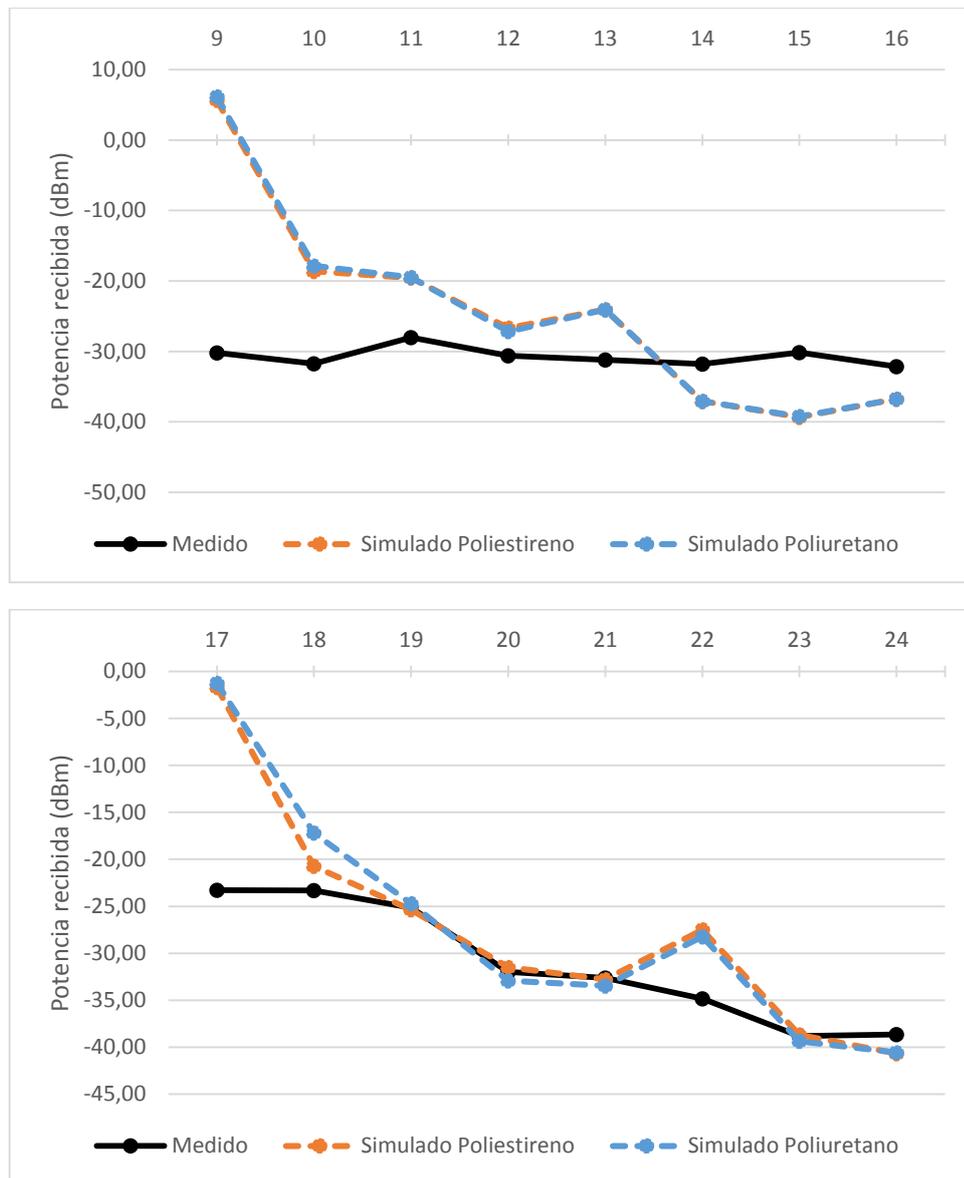


Figura 5.44. Radiales de potencia.

**Plano a 90 cm con la persona tumbada**

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliéstireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-33,21	-29,83	3,38	-27,72	5,49
2	-35,11	-34,02	1,09	-31,21	3,90
3	-30,37	-30,76	0,39	-30,82	0,45
4	-32,06	-34,10	2,04	-31,00	1,06
5	-32,71	-32,12	0,59	-33,10	0,39

<b>6</b>	-32,05	-32,45	0,40	-32,46	0,41
<b>7</b>	-34,25	-36,34	2,09	-36,39	2,14
<b>8</b>	-35,33	-35,18	0,15	-35,26	0,07
<b>9</b>	-28,07	-30,52	2,45	-29,19	1,12
<b>10</b>	-32,82	-32,95	0,13	-32,54	0,28
<b>11</b>	-32,53	-31,61	0,92	-33,42	0,89
<b>12</b>	-44,24	-45,40	1,16	-40,08	4,16
<b>13</b>	-33,61	-28,53	5,08	-33,94	0,33
<b>14</b>	-36,80	-37,70	0,90	-37,64	0,84
<b>15</b>	-33,87	-33,89	0,02	-32,98	0,89
<b>16</b>	-31,59	-29,70	1,89	-29,40	2,19
<b>17</b>	-37,77	-27,91	9,86	-26,30	11,47
<b>18</b>	-31,80	-30,05	1,75	-28,42	3,38
<b>19</b>	-34,58	-32,16	2,42	-36,85	2,27
<b>20</b>	-33,47	-33,24	0,23	-33,23	0,24
<b>21</b>	-39,08	-38,67	0,41	-38,32	0,76
<b>22</b>	-34,76	-35,21	0,45	-35,08	0,32
<b>23</b>	-37,21	-37,28	0,07	-37,14	0,07
<b>24</b>	-32,35	-37,95	5,60	-38,10	5,75

- Error medio poliestireno = 1.81
- Error medio poliuretano = 2.04

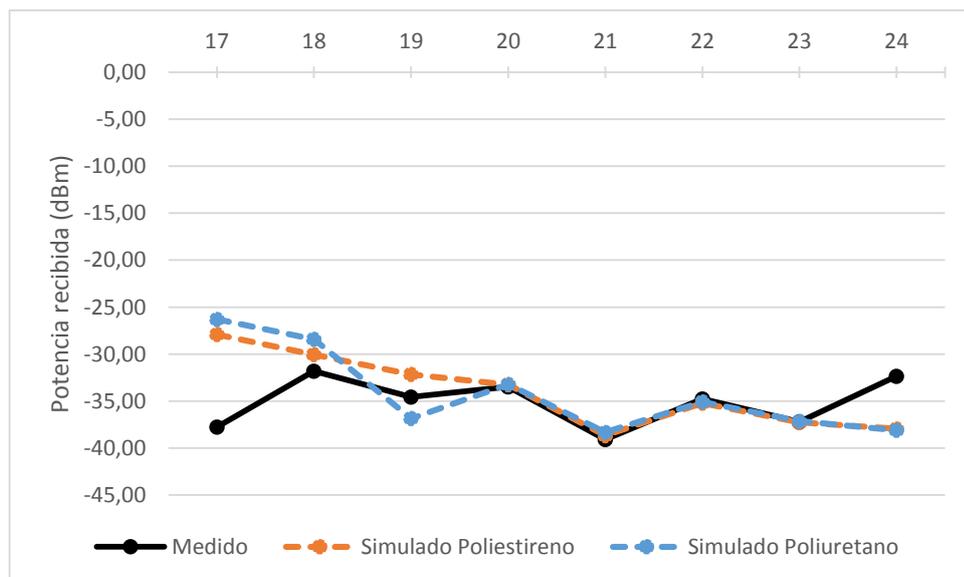
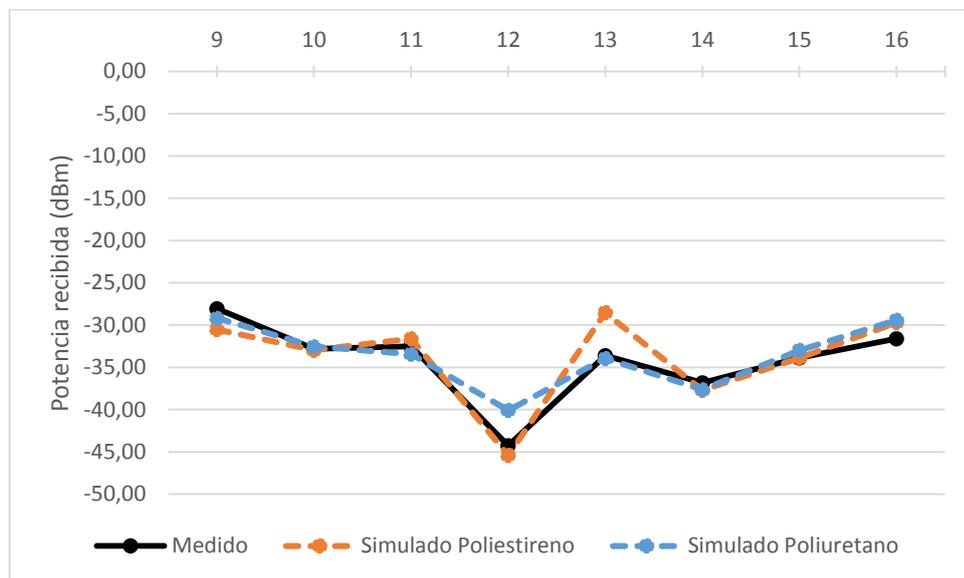
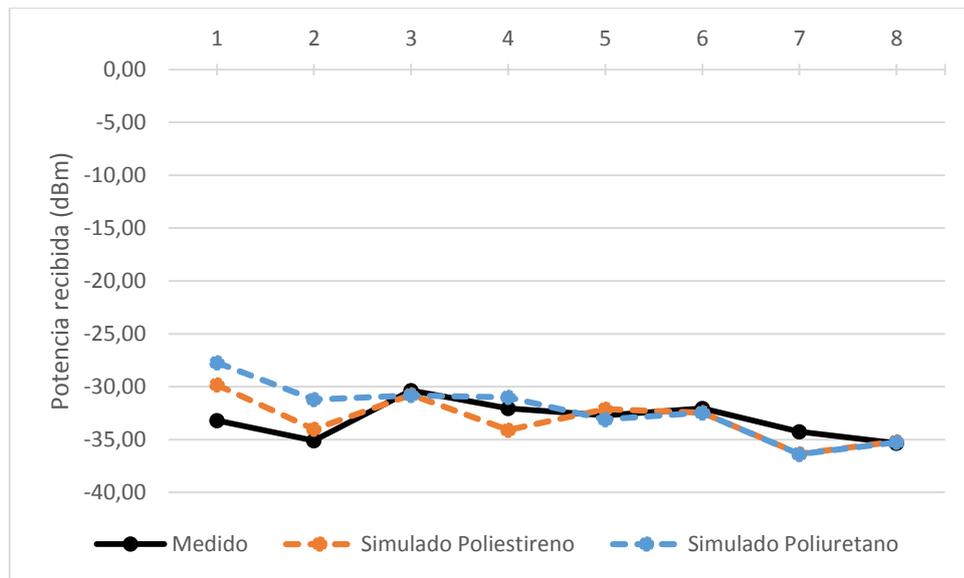


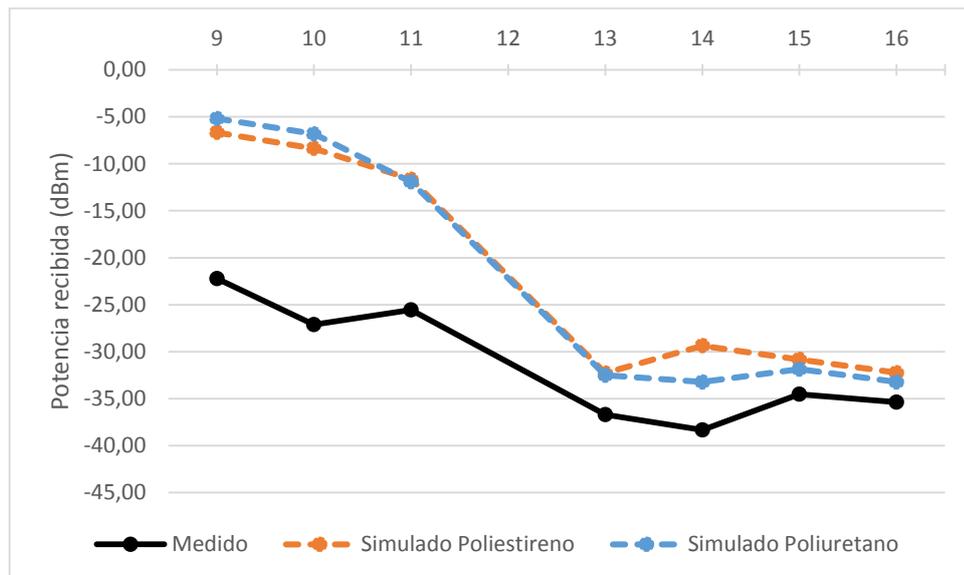
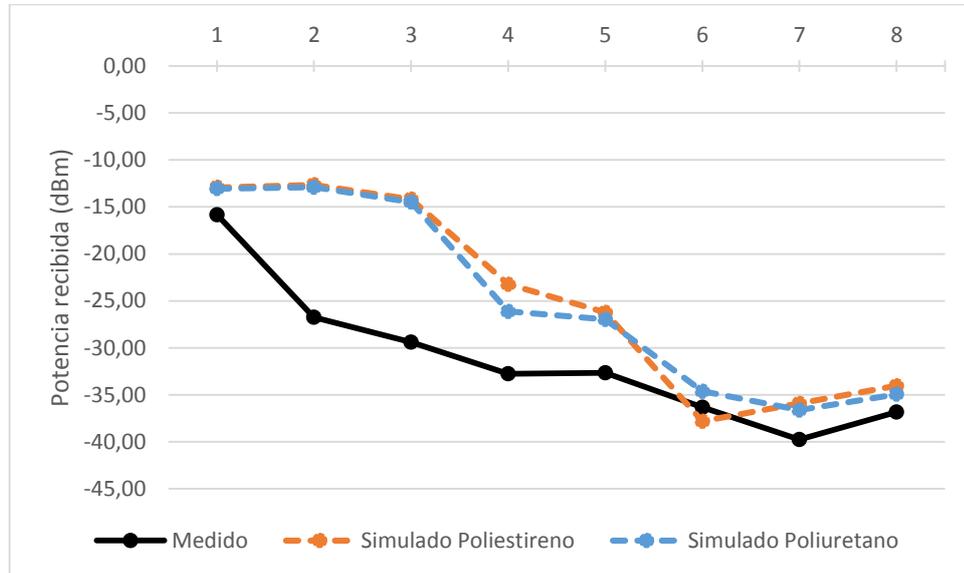
Figura 5.45. Radiales de potencia.

## Plano a 30 cm con la persona de pie

Tabla con los datos:

Posición	Medido	Poliestireno		Poliuretano	
		Simulado	Error	Simulado	Error
1	-15,85	-12,92	2,93	-13,05	2,80
2	-26,75	-12,65	14,10	-12,91	13,84
3	-29,39	-14,18	15,21	-14,49	14,90
4	-32,75	-23,23	9,52	-26,13	6,62
5	-32,65	-26,23	6,42	-26,97	5,68
6	-36,31	-37,81	1,50	-34,61	1,70
7	-39,74	-35,90	3,84	-36,62	3,12
8	-36,84	-34,04	2,80	-34,94	1,90
9	-22,22	-6,67	15,55	-5,20	17,02
10	-27,12	-8,37	18,75	-6,83	20,29
11	-25,54	-11,65	13,89	-11,93	13,61
12					
13	-36,71	-32,27	4,44	-32,51	4,20
14	-38,33	-29,36	8,97	-33,22	5,11
15	-34,51	-30,83	3,68	-31,87	2,64
16	-35,36	-32,24	3,12	-33,22	2,14
17	-26,24	-13,09	13,15	-12,70	13,54
18	-24,98	-15,54	9,44	-11,34	13,64
19	-22,36	-23,17	0,81	-20,96	1,40
20	-25,56	-18,08	7,48	-17,92	7,64
21	-27,77	-29,35	1,58	-27,46	0,31
22	-28,90	-31,73	2,83	-29,93	1,03
23	-32,45	-29,23	3,22	-28,36	4,09
24	-31,46	-32,03	0,57	-32,33	0,87

- Error medio poliestireno = 6.83
- Error medio poliuretano = 6.59



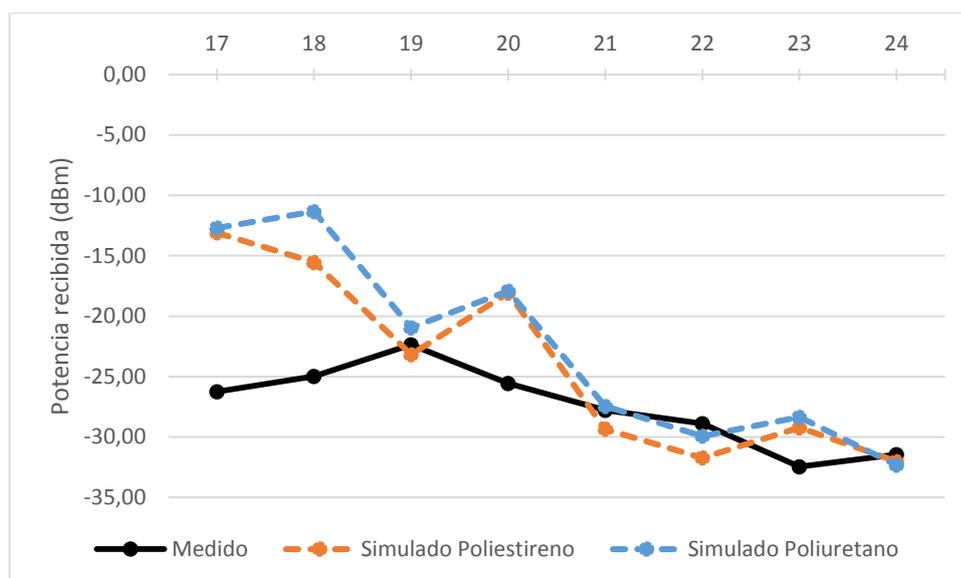


Figura 5.46. Radiales de potencia.

Antes de nada se debe comentar que en las tablas con los resultados de cuando la persona está de pie, la posición 12 aparece en blanco porque se corresponde con un punto del interior de la persona, el cual es imposible medir.

En cuanto a los resultados, hay que decir que, al igual que ocurría en el escenario 1, la aproximación hecha por el simulador es bastante buena, con errores medios pequeños, siendo mejor para la frecuencia de 2,4GHz que para 868MHz. Aunque en este caso, los valores obtenidos del simulador no convergen muy bien cuando la persona está de pie.

Por otro lado, recordando que la sensibilidad de un receptor Bluetooth debe ser de al menos -70dBm, de uno ZigBee, -85 ó -92dBm, dependiendo de si se trabaja a 2,4GHz ó 868MHz, respectivamente, y cogiendo un valor conservador de -80dBm para RFID/NFC, en todas las radiales de potencia se supera ese nivel mínimo de señal necesario para establecer un sistema de comunicaciones sin que surjan problemas.

#### 5.4.3.2. Medidas PER

Al realizar este experimento en las condiciones comentadas y según el plan de medidas visto antes, se obtuvieron los siguientes resultados:

Posición	Paquetes recibidos	RSSI medio (dBm)	PER (%)
1	9515	-38,62	4,85
2	9515	-38,91	4,85
3	9515	-39,52	4,85
4	9515	-41,32	4,85
5	9509	-38,63	4,91
6	9515	-39,14	4,85
7	9515	-38,88	4,85

Relativizando los resultados al mejor de los casos (transmisor y receptor juntos), donde se pierden el 4,85% de los paquetes, se obtiene que para el resto de posiciones no se pierden prácticamente ningún paquete. Esto se podía esperar ya que entre transmisor y receptor hay distancias pequeñas, en comparación con lo permitido por la tecnología ZigBee.

La única excepción es la posición 5, en la que se tiene un incremento de las pérdidas del 0,06% (4 paquetes). Su explicación se encuentra en que, tal como se colocaban los dispositivos, la antena del transmisor estaba polarizada verticalmente mientras que la del receptor lo estaba horizontalmente, es decir, las polarizaciones eran contrarias. Esto, aunque mínimo, sólo tuvo su efecto en la calidad de la transmisión de la posición 5, donde las dos motas se acercaban más.

## 6. CONCLUSIONES

---

Una vez expuesto todo el trabajo realizado en el proyecto y después de analizar los resultados, se detallarán a continuación las conclusiones y valoraciones que se han obtenido.

La primera es que la propagación de señales electromagnéticas se ve afectada en gran medida por la existencia de agua como superficie y la presencia de una persona en el entorno. Además, la posición de la persona también influye de manera notoria.

La segunda es que para desarrollar un sistema de comunicaciones inalámbricas de este tipo y en un entorno tan complejo es importante tener en cuenta parámetros como la frecuencia de operación o la posición del transceptor, ambas dependientes de la aplicación a implementar. Asimismo y aunque en menor medida, se debe conocer el tipo de agua utilizada (dulce, salada, temperatura, porcentaje de salinidad, etc.) y el material del que está hecho la tabla de surf. Por contra, la influencia del estado de la piel de la persona (seca o mojada) es prácticamente despreciable.

Otra conclusión hace referencia al software de trazado de rayos, que una vez ajustado y calibrado de forma óptima, ofrece una muy buena aproximación a la realidad para distancias entre transmisor y receptor pequeñas.

También se ha comprobado que existe una amplia variedad de tecnologías aplicables en este campo, de las cuales por sus especificaciones técnicas y posibilidades ofrecidas, resultan idóneas la tecnología RFID/NFC, ZigBee y Bluetooth.

## 7. LÍNEAS FUTURAS

---

En este apartado se enumerarán las futuras líneas de trabajo que sería de gran interés llevar a cabo:

- Realizar las simulaciones con CST (Computer Simulation Technology), que es un simulador electromagnético más eficiente y preciso que el código de lanzamiento de rayos utilizado, y con un modelo de tabla de surf más real.
- Realizar medidas empíricas con tags RFID/NFC y con dispositivos Bluetooth de uso normalizado.
- Realizar medidas empíricas en un entorno acuático real.
- Analizar el comportamiento del sistema teniendo en cuenta la rugosidad del agua y el efecto que puede producir el oleaje, sobre todo el momento de la práctica del surf en el que el surfista se encuentra dentro de las olas.
- Analizar el comportamiento del sistema teniendo en cuenta otros factores, como por ejemplo, unas condiciones climatológicas adversas.
- Extender el análisis a otros deportes acuáticos con un contexto similar.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] T. Tuikka and M. Isomursu (eds.), “Touch the Future with a Smart Touch”. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2009.
- [2] Y. Xiao, Y. Pan, “Emerging Wireless LAN’s, Wireless PAN’s, and Wireless MAN’s, IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, Wireless Standard Family”, John Wiley & Sons, 2009
- [3] H. H. Chen, M. Guizani, “Next Generation Wireless Systems and Networks”, John Wiley, 2006.
- [4] M. Ur Rehman, Y. Gao, Z. Wang, J. Zhang, Y. Alfadhl, X. Chen, C.G. Parini, Z. Ying, T. Bolin, “Investigation of on-body Bluetooth transmission”, IET Microw. Antennas Propag., Vol. 4, Iss. 7, pp. 871–880, 2010.
- [5] D. D. Bona, G. S. Ferreira, L. Schwarz, “Sensoriamento Remoto em Pranchas de Surfe utilizando Tecnologia ZigBee” in 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON’10), Sao Paulo, Brazil, 2010.
- [6] D. A. James, A. Galehar, David V. Thiel, “Mobile sensor communications in aquatic environments for sporting applications” in 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA), 2010.
- [7] F. D. Hastings, J. B. Schneider, S. L. Broschat, E. I. Thorsos, “An FDTD Method for Analysis of Scattering from Rough Fluid–Fluid Interfaces”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, No. 1, January 2001.
- [8] J. C. West, Z. Zhao, “Electromagnetic Modeling of Multipath Scattering From Breaking Water Waves With Rough Faces”, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 40, No. 3, pp. 583-592, March 2002.
- [9] M. A. Aziz, S. C. Reising, W. E. Asher, L. Allen Rose, P. W. Gaiser, K. A. Horgan, “Effects of Air–Sea Interaction Parameters on Ocean Surface Microwave Emission at 10 and 37 GHz”, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 43, No. 8, pp. 1763-1774, August 2005.
- [10] M. Jiang, Z. Guo, F. Hong, Y. Ma, H. Luo, “OceanSense: A Practical Wireless Sensor Network on the Surface of the Sea” IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2009.
- [11] M. Zhu, X. Zhao, Y. Zhang, “Study on a Sea Radio-wave Propagation Loss Model” in International Conference on Communications and Mobile Computing, 2010.
- [12] S. Sendra, J. V. Lamparero, J. Lloret, M. Ardid, “Underwater Communications in Wireless Sensor Networks using WLAN at 2.4 GHz” in 8th IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems, 2011.

- [13] A. A. Abdou, A. Shaw, A. Mason, A. Al-Shamma'a, J. Cullen and S.Wylie, "Electromagnetic (EM) wave propagation for the development of an Underwater Wireless Sensor Network (WSN)", IEEE Sensors, pp. 1571-1574, 2011.
- [14] M. Gong, L. Zhang, Z. Ding, F. Dong, L. Wang, "Research and Development of Swimming Training Information System Based on ZigBee Technology" in International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012), 2012.
- [15] S. Sendra, J. Lloret, J. J. P. C. Rodrigues, J. M. Aguiar, "Underwater Wireless Communications in Freshwater at 2.4 GHz", IEEE Communications Letters, Vol. 17, No. 9, pp. 1794-1797, September 2013.
- [16] <http://www.bluetooth.com>
- [17] <http://www.zigbee.org>
- [18] <http://nfc-forum.org/>
- [19] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/3812357.stm>
- [20] <http://www.activereplay.com>
- [21] [http://www.inesport.es/socios/documentacion-publica/doc\\_download/30-.html](http://www.inesport.es/socios/documentacion-publica/doc_download/30-.html)

## 9. ANEXOS

---

### 9.1. Resultados adicionales

Dada la gran cantidad de información generada durante éste proyecto, se tomó la decisión de mostrar en el apartado 5 únicamente los resultados de mayor interés que nos permitan analizar los diferentes aspectos del sistema, e incluir en este anexo el resto de los datos que se han obtenido.

## 9.1.1. Simulaciones

### 9.1.1.1. Escenario 2

#### Mapas bidimensionales

- Tabla de poliestireno
  - Persona tumbada

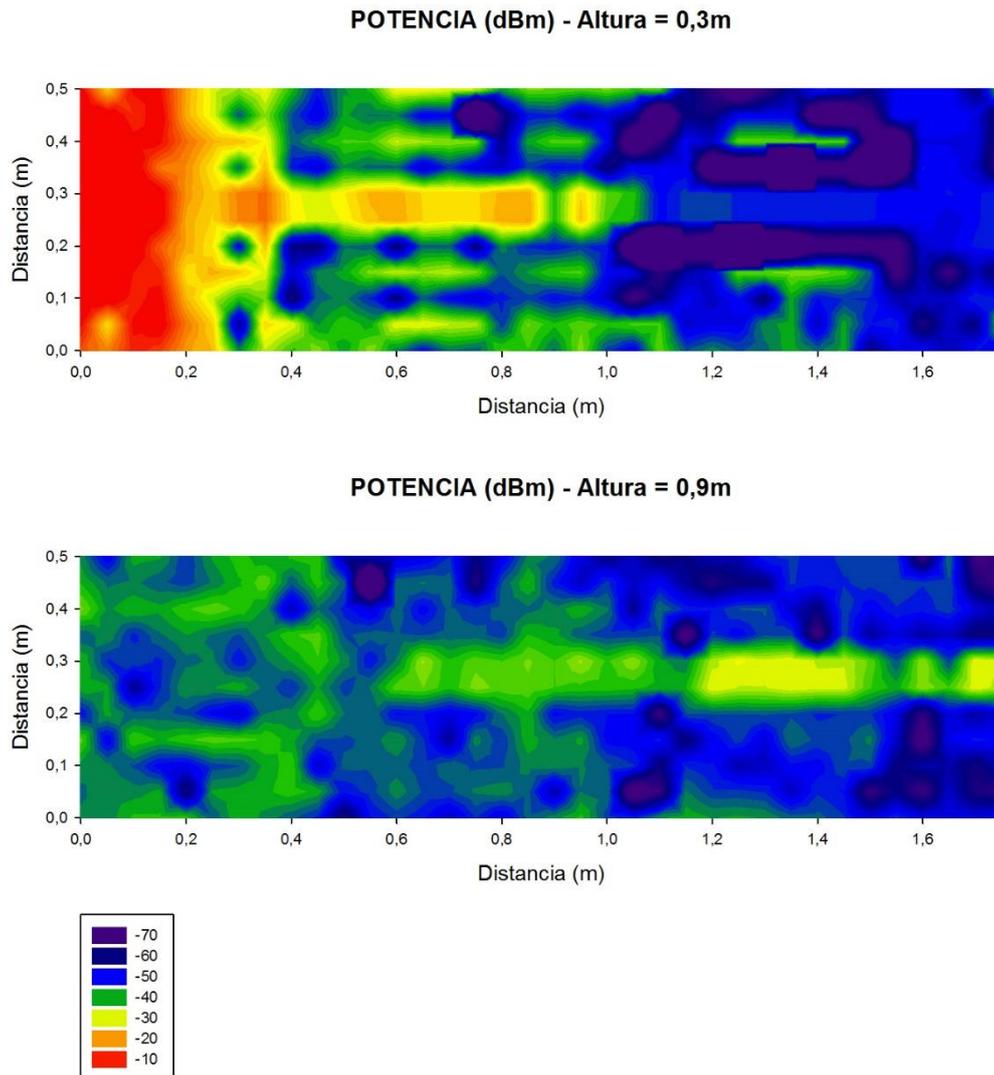
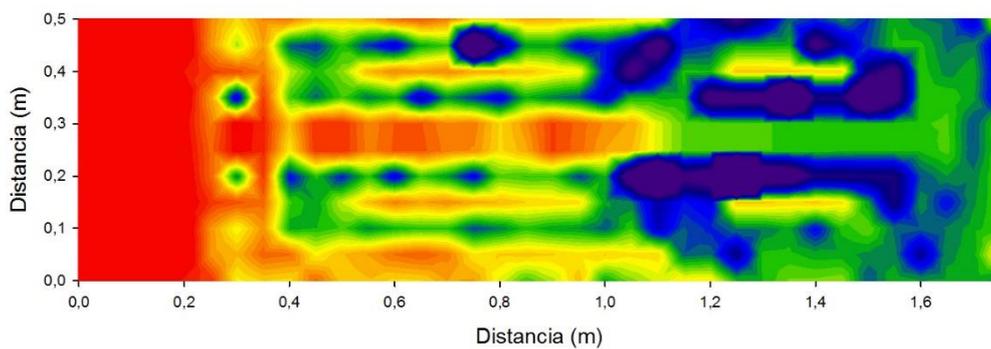


Figura 9.1. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

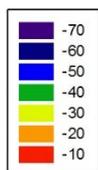
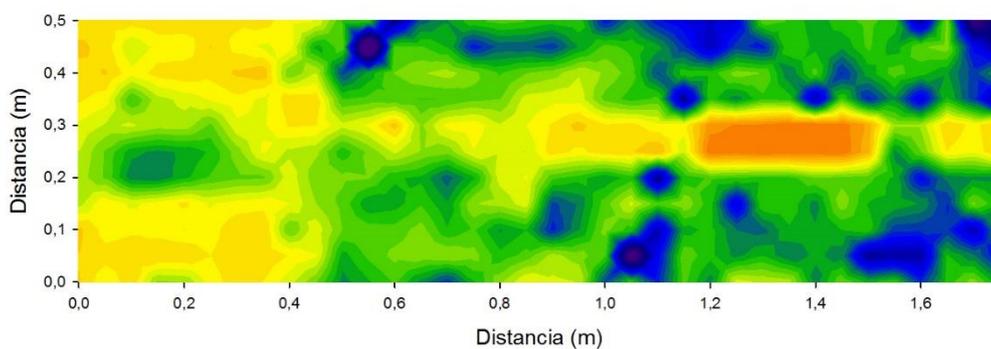
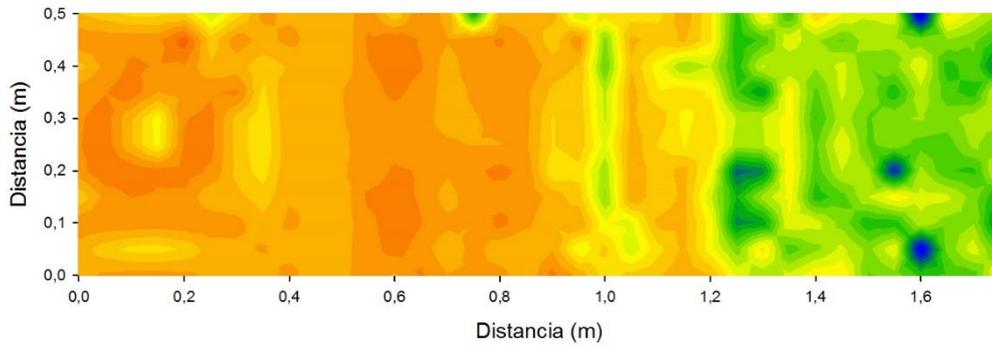


Figura 9.2. Planos a 868MHz.

— Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

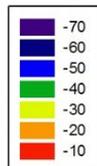
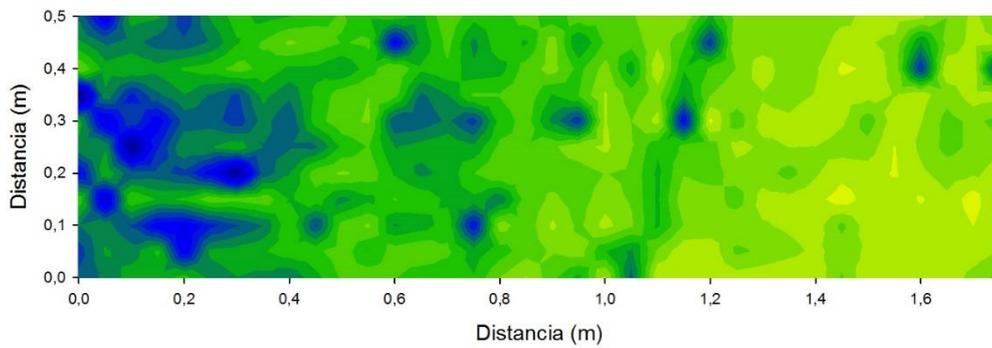
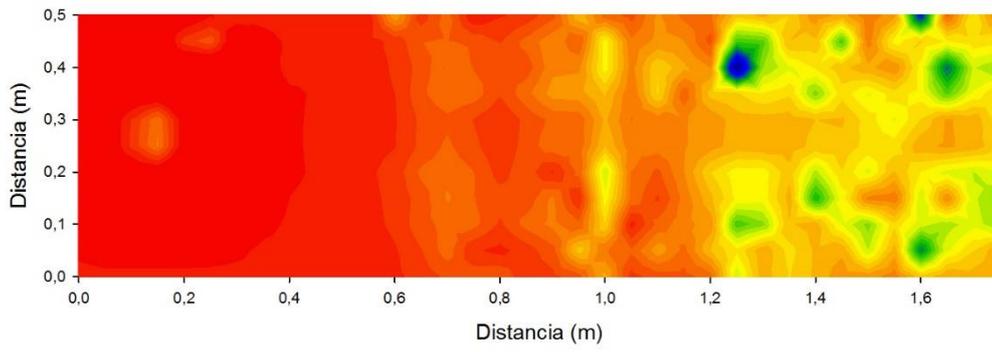


Figura 9.3. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

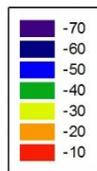
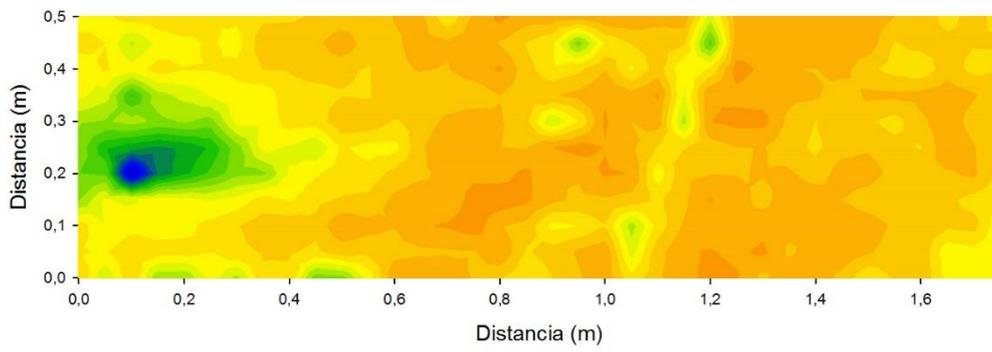
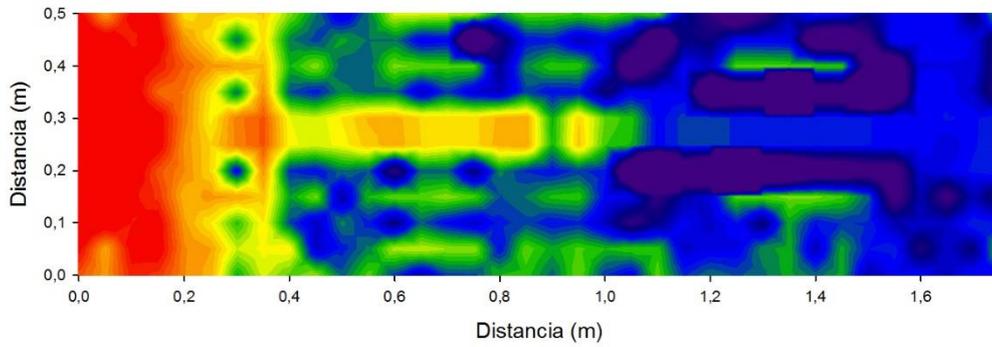


Figura 9.4. Planos a 868MHz.

- Tabla de poliuretano
  - Persona tumbada

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

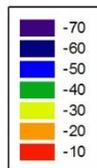
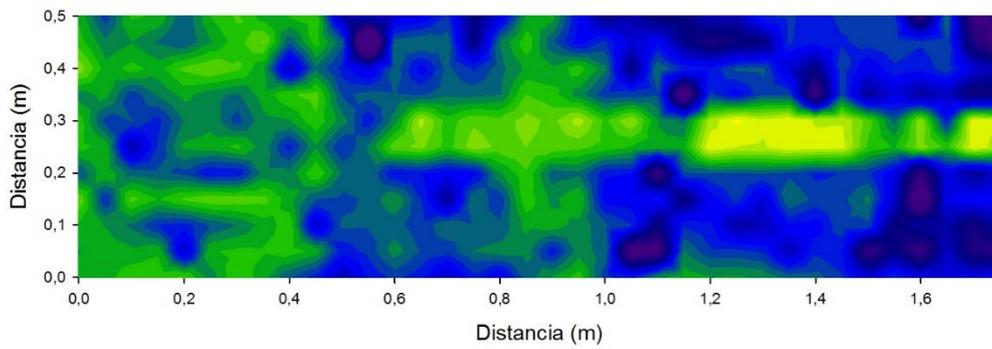
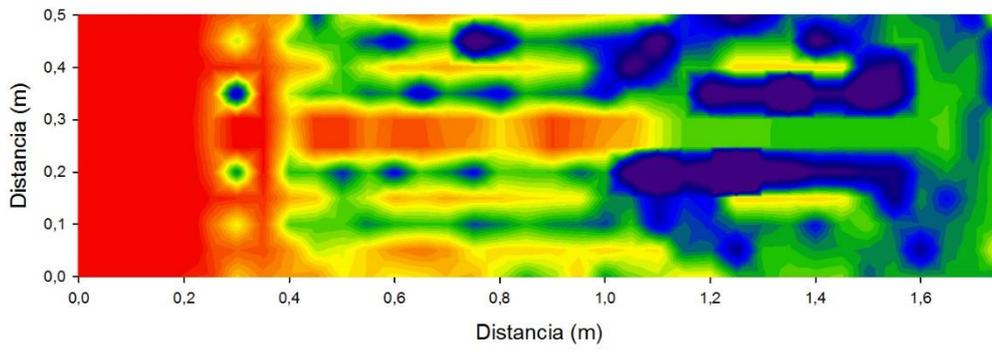


Figura 9.5. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

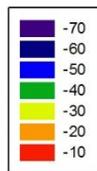
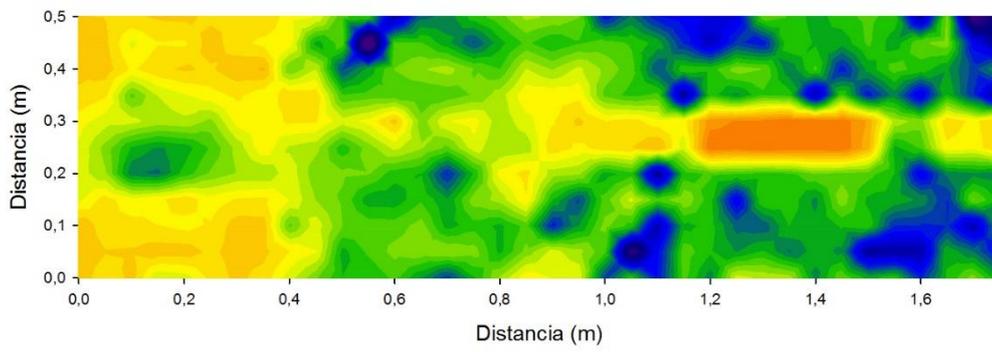
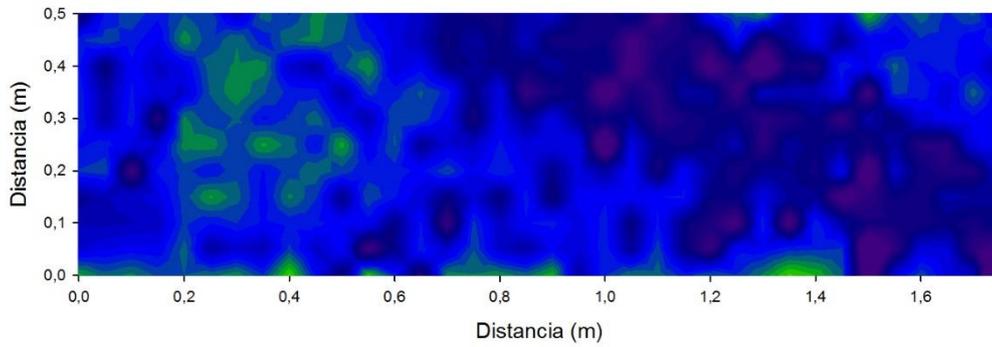


Figura 9.6. Planos a 868MHz.

— Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

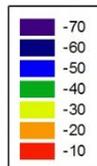
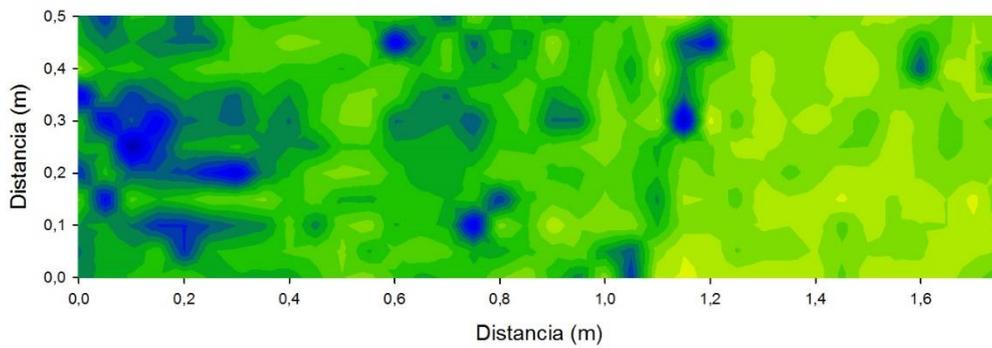
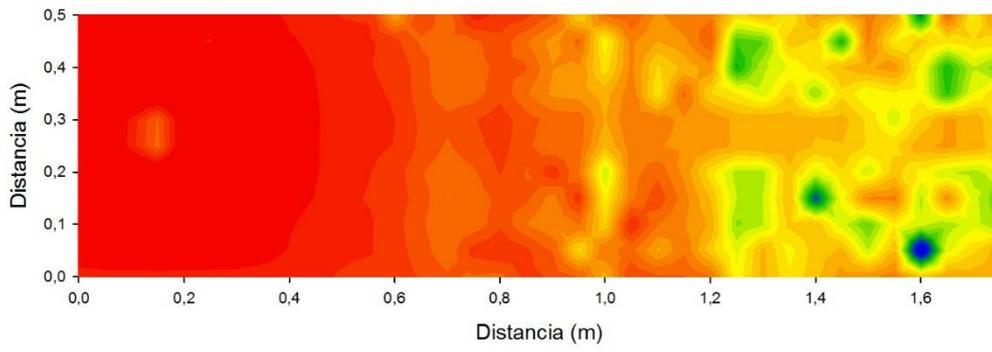


Figura 9.7. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

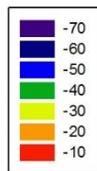
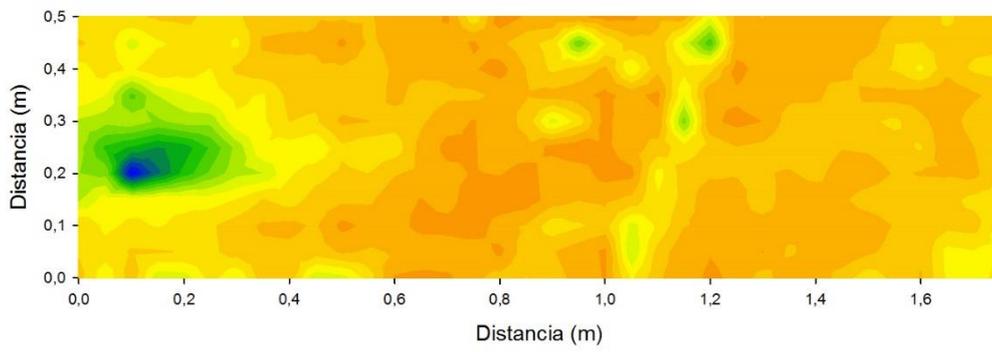


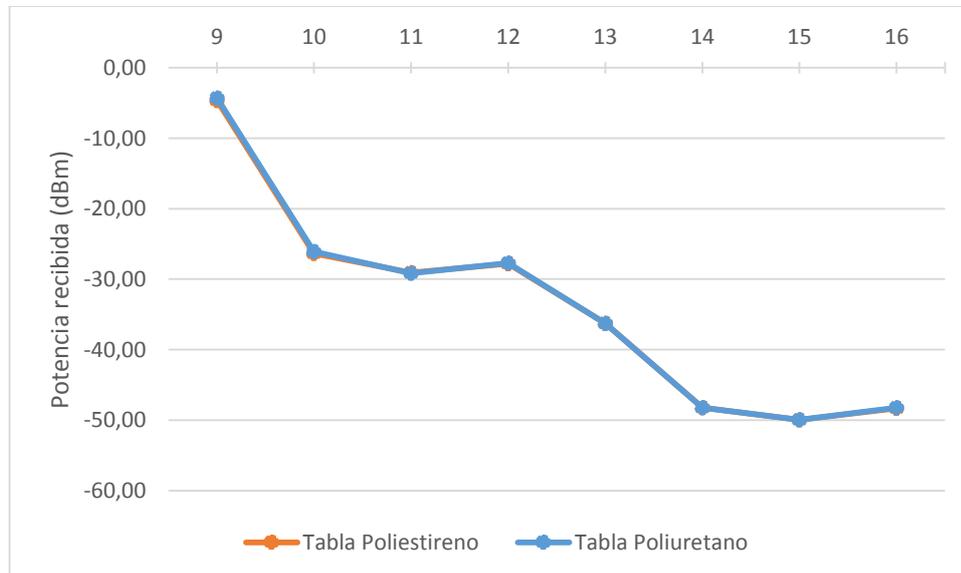
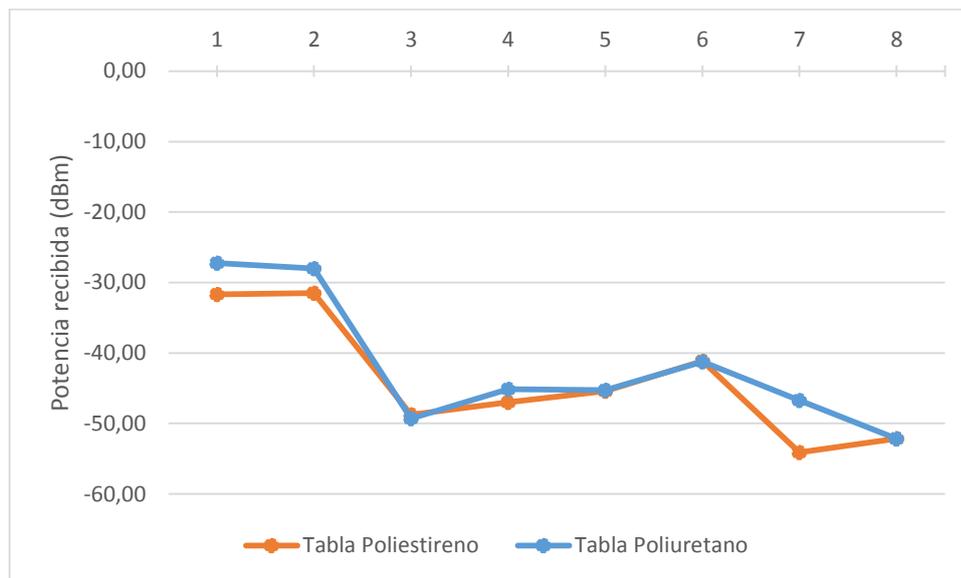
Figura 9.8. Planos a 868MHz.

### 9.1.1.2. Escenario 3

#### 9.1.1.2.1. Caso 1: Agua dulce y piel seca

#### **Radiales de potencia**

- Plano a 30 cm con la persona tumbada



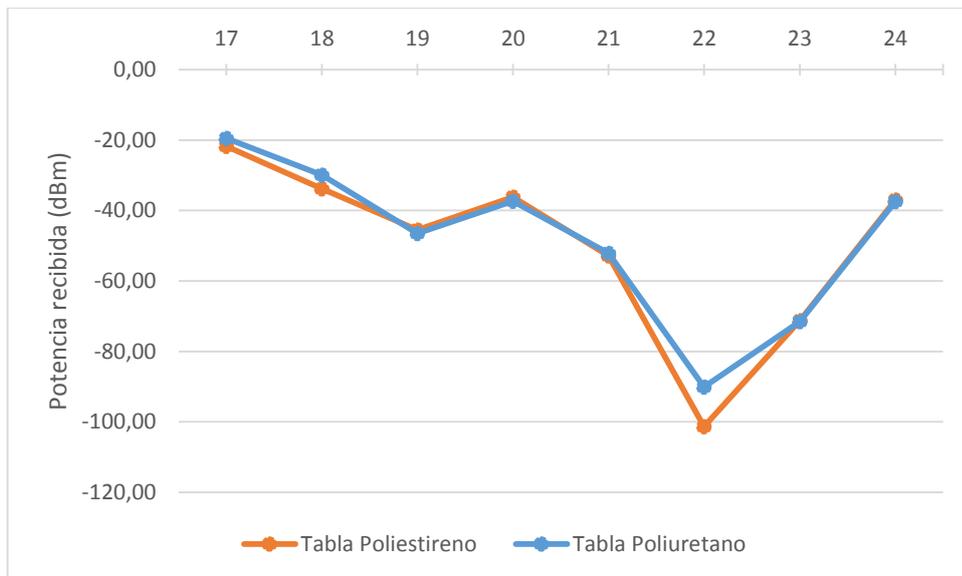
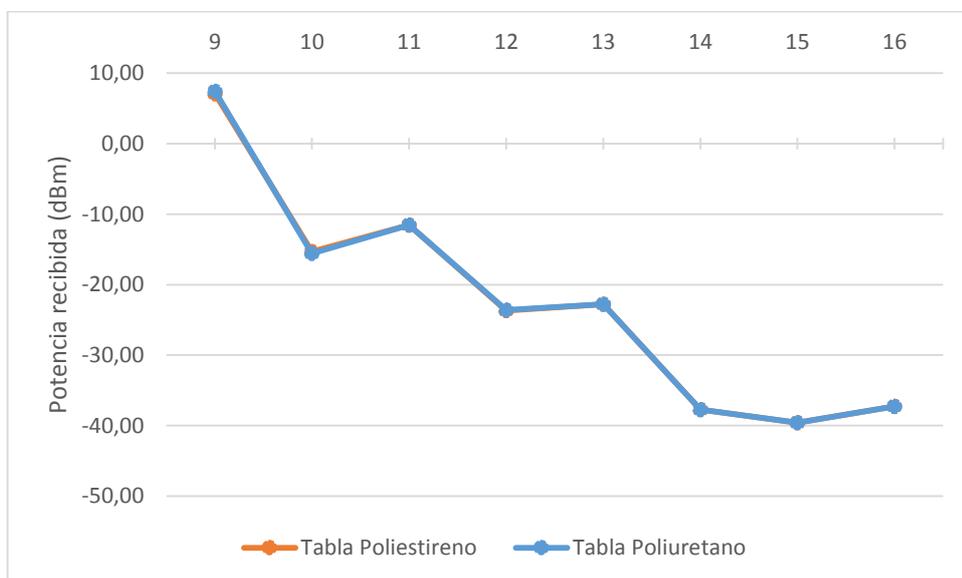
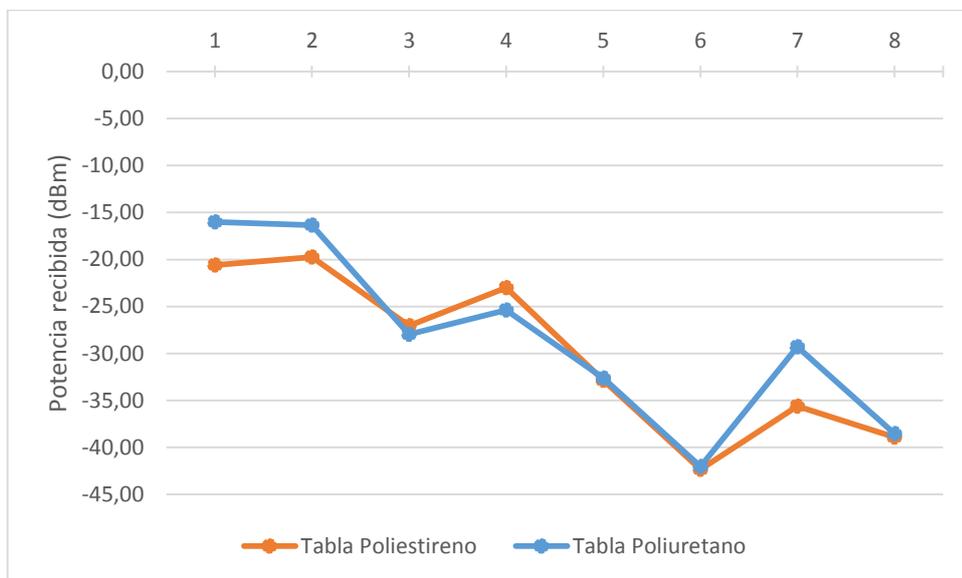


Figura 9.9. Radiales a 2,4GHz.



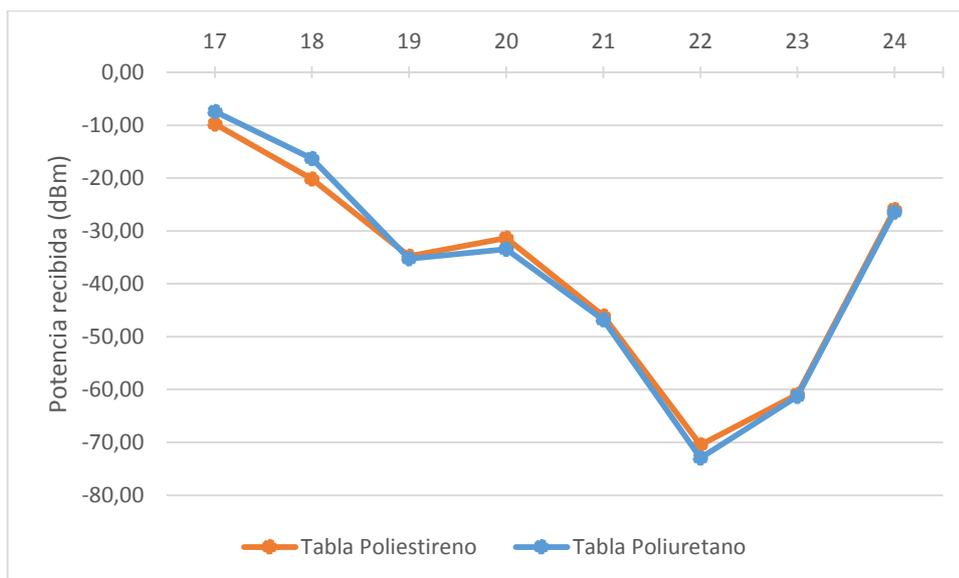
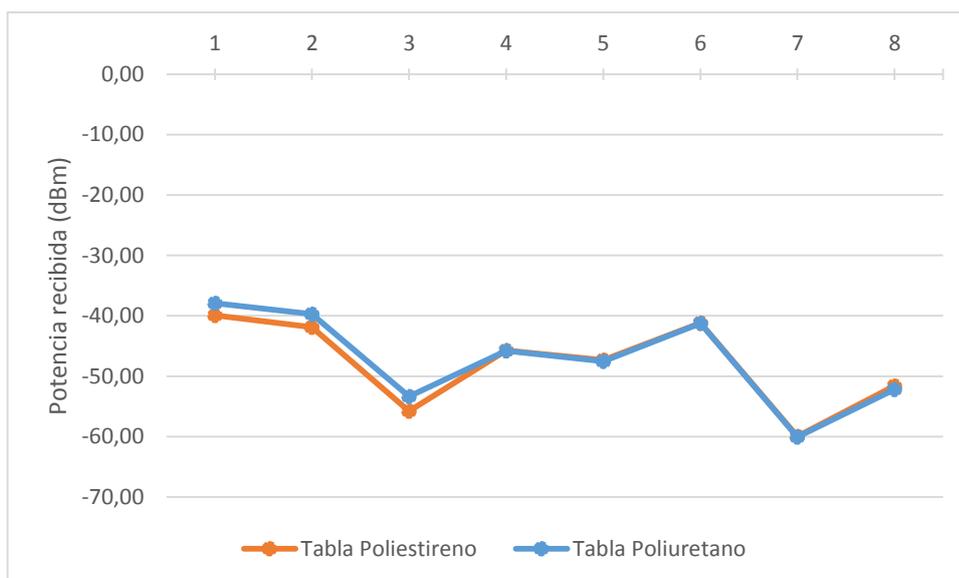


Figura 9.10. Radiales a 868MHz.

– Plano a 90 cm con la persona tumbada



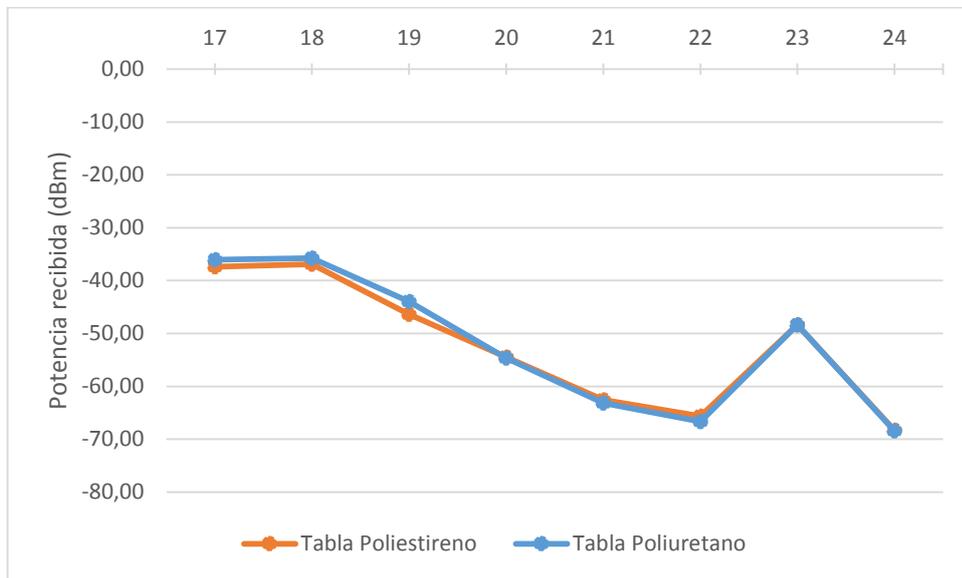
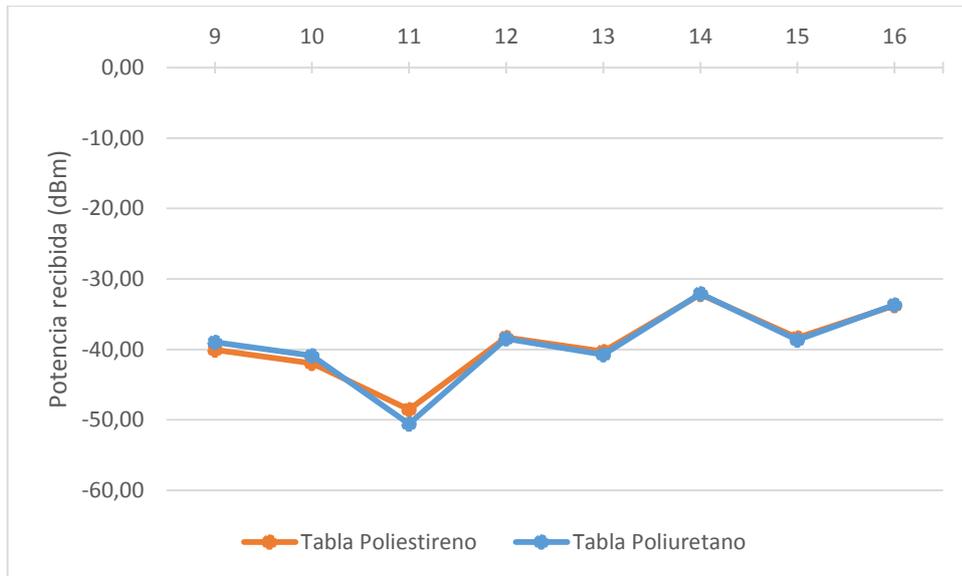
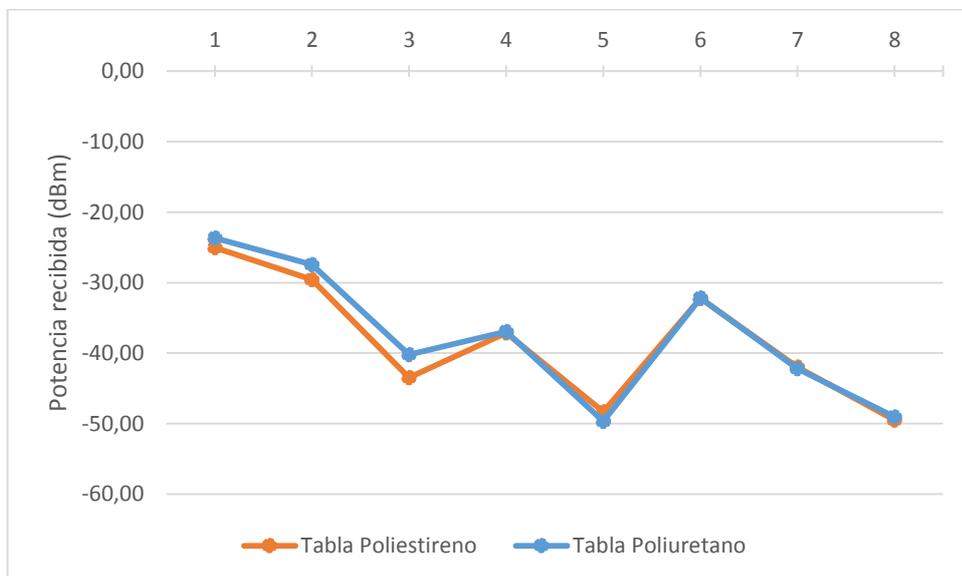


Figura 9.11. Radiales a 2,4GHz.



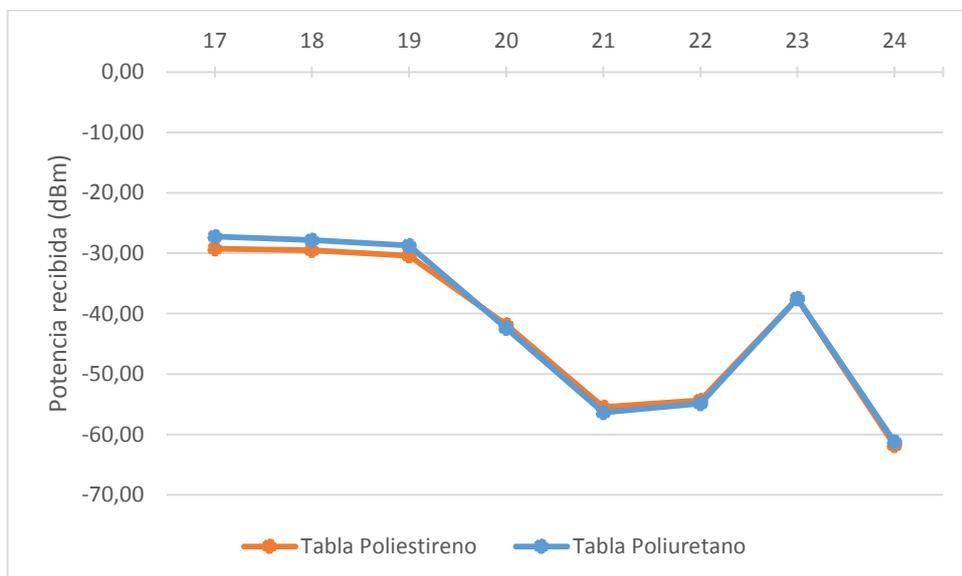
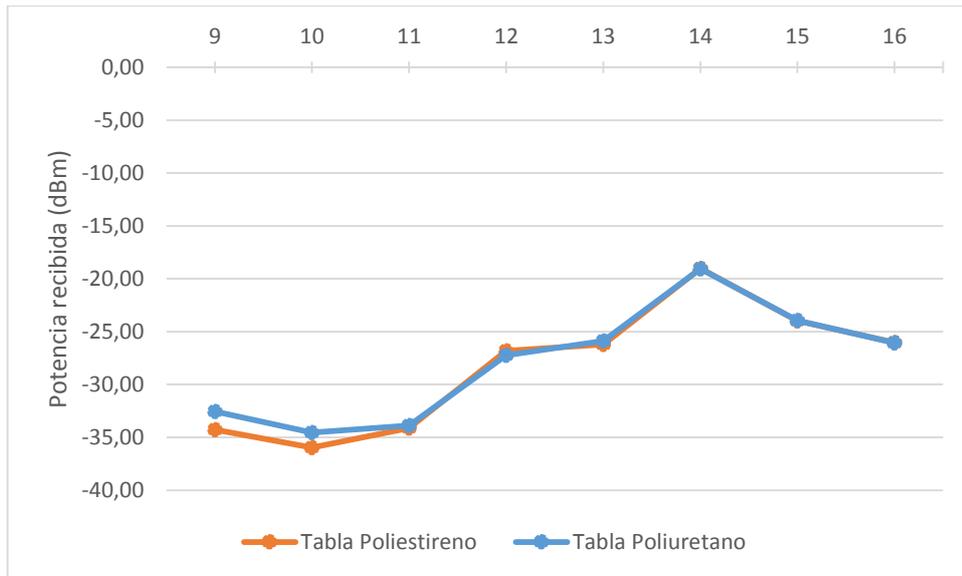


Figura 9.12. Radiales a 868MHz.

– Plano a 30 cm con la persona de pie

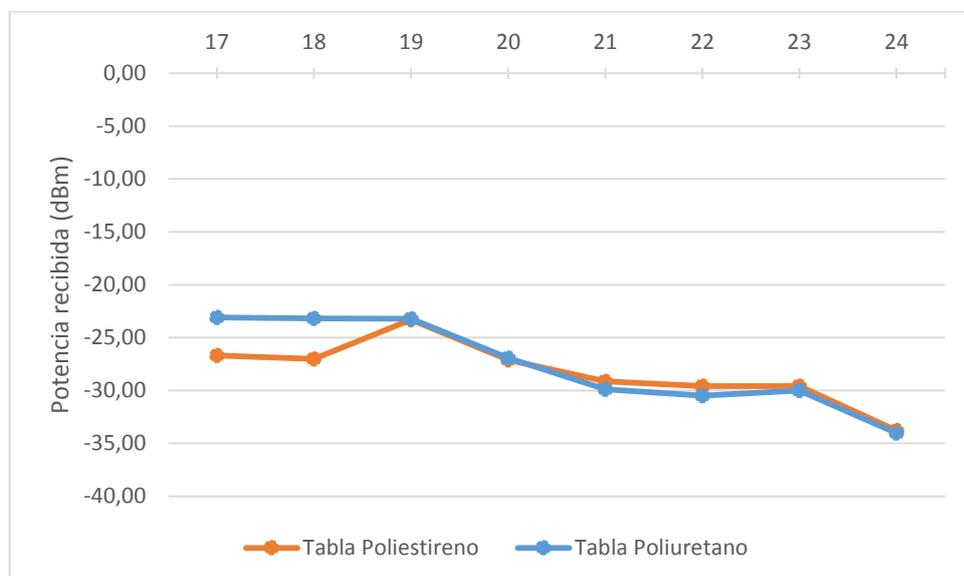
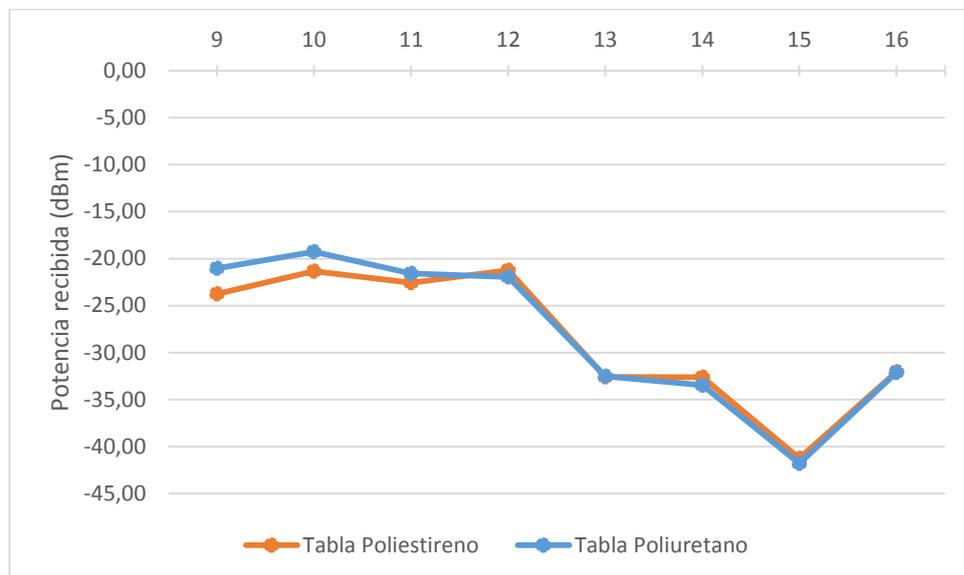
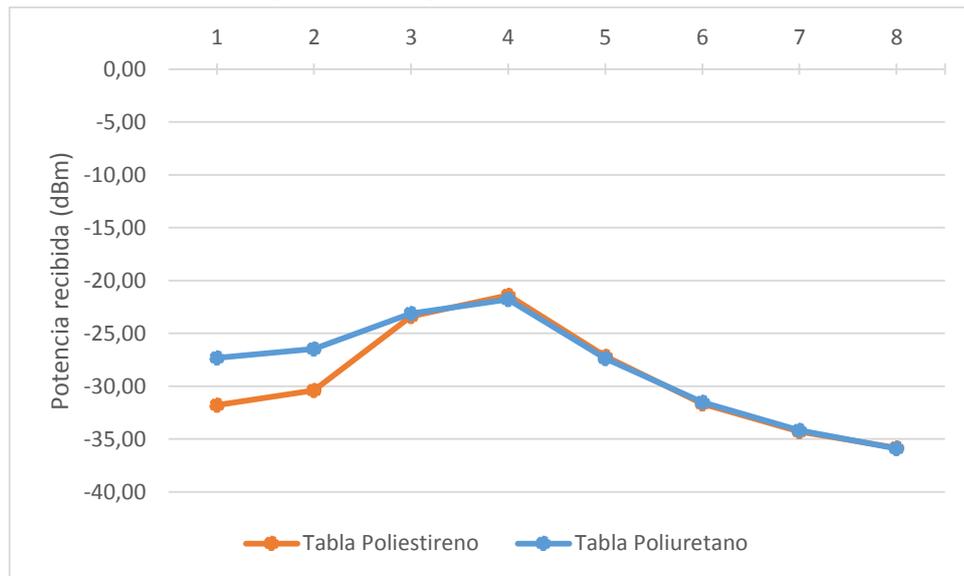


Figura 9.13. Radiales a 2,4GHz.

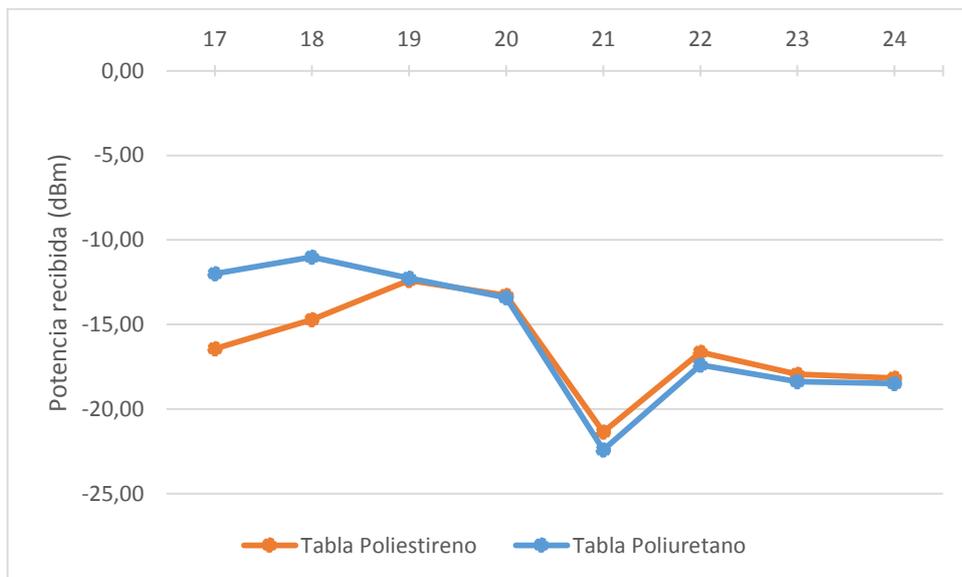
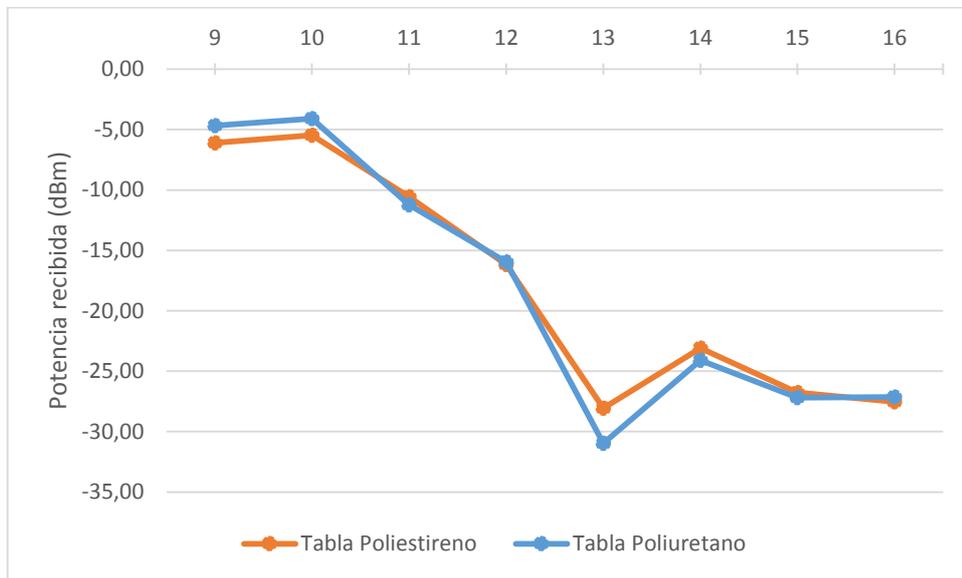
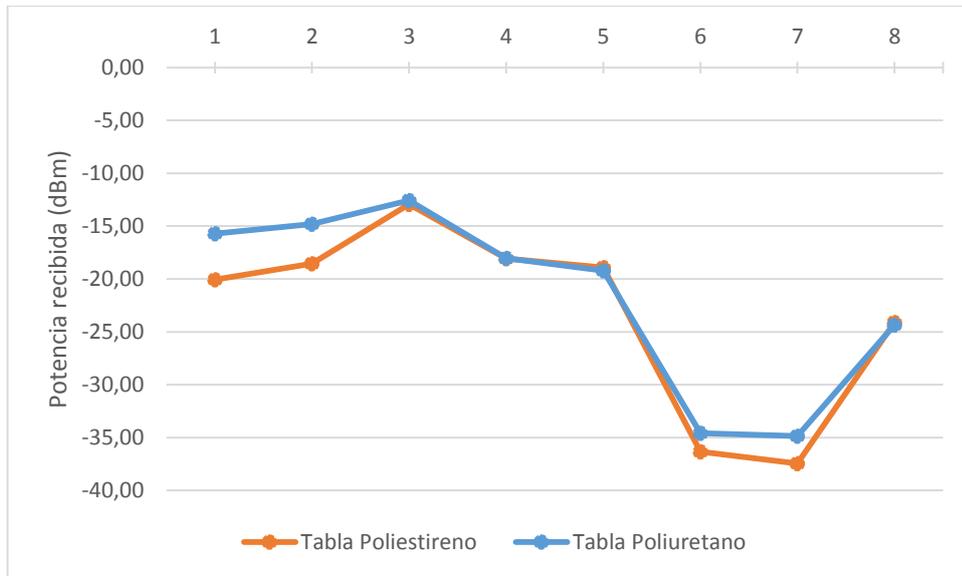


Figura 9.14. Radiales a 868MHz.

– Plano a 90 cm con la persona de pie

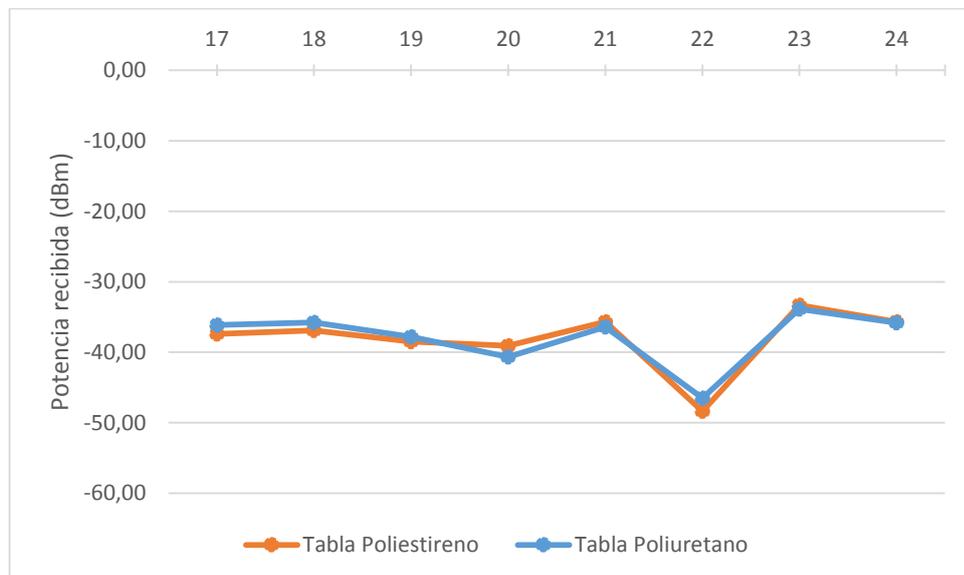
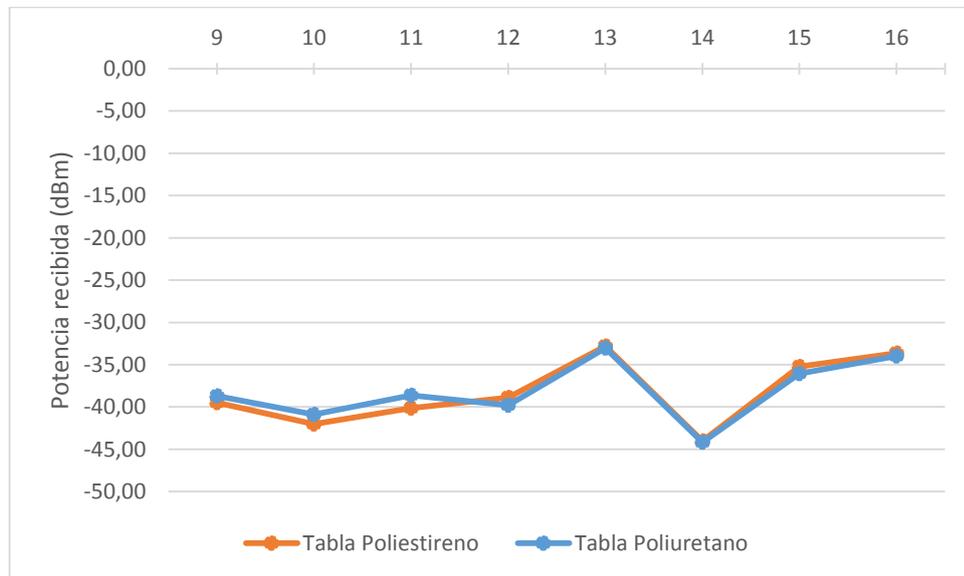
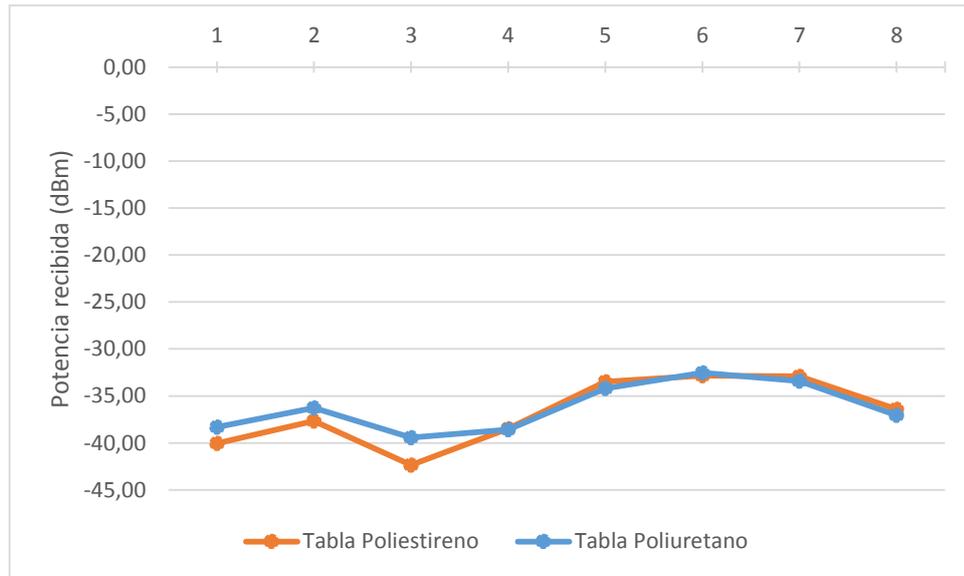


Figura 9.15. Radiales a 2,4GHz.

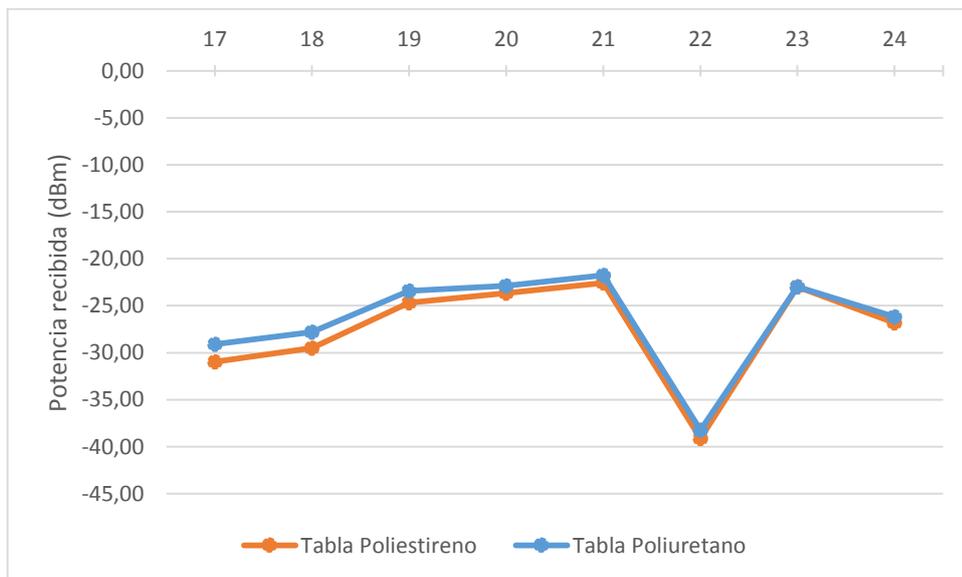
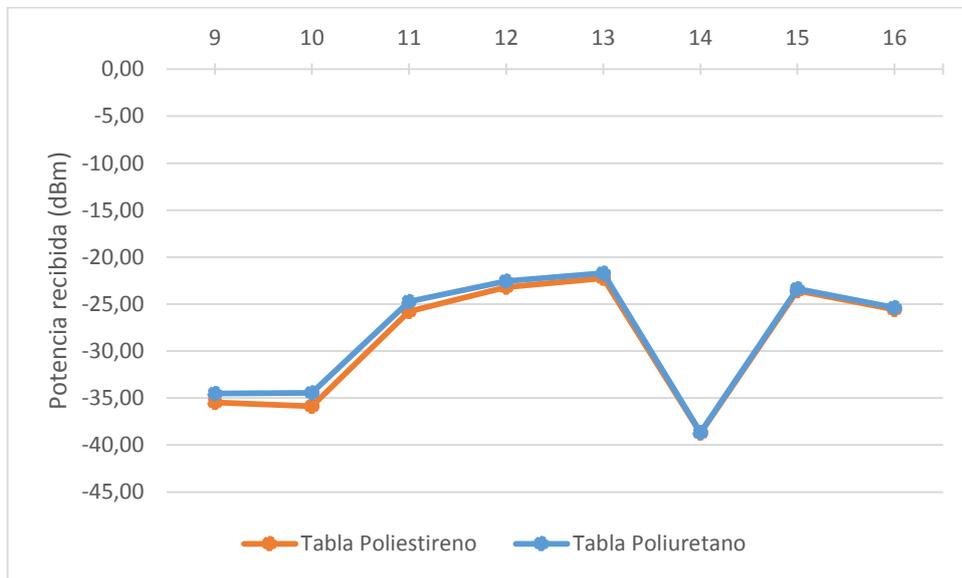
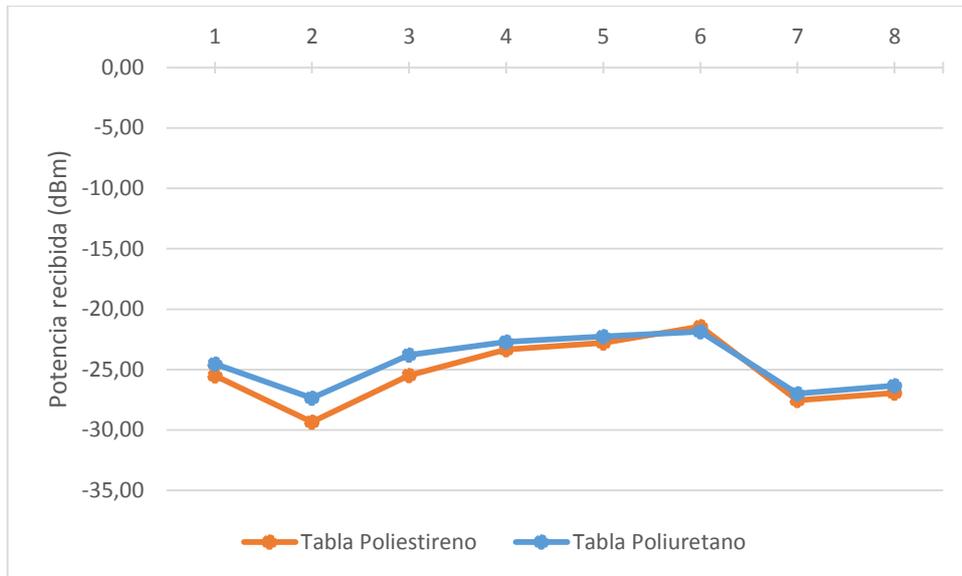
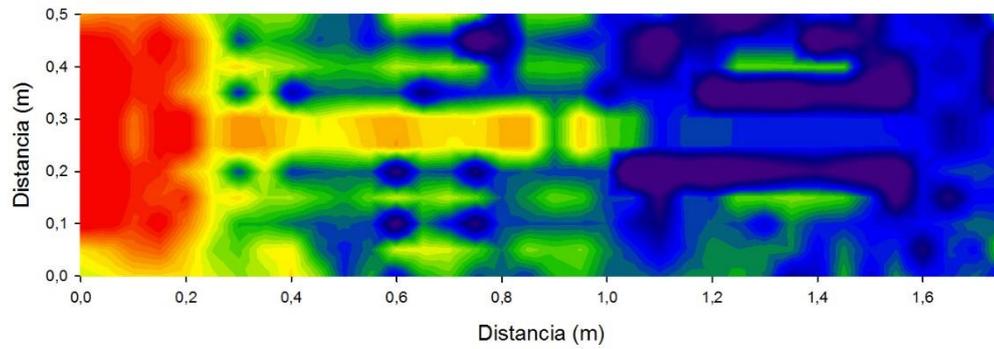


Figura 9.16. Radiales a 868MHz.

## Mapas bidimensionales

- Tabla de poliestireno
  - Persona tumbada

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

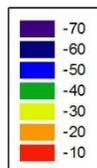
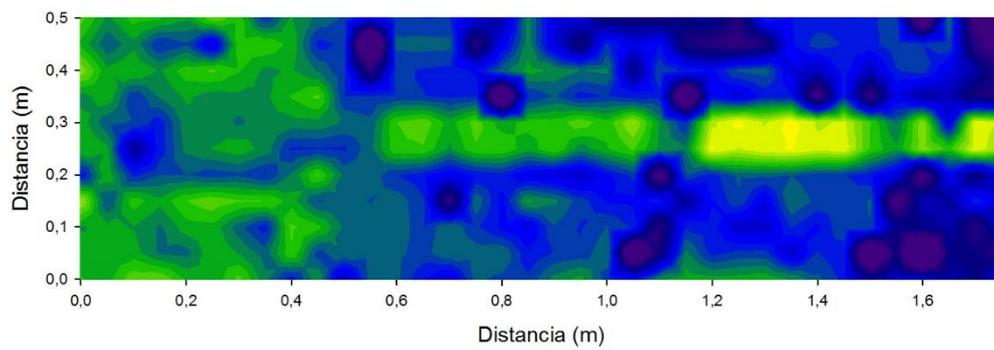
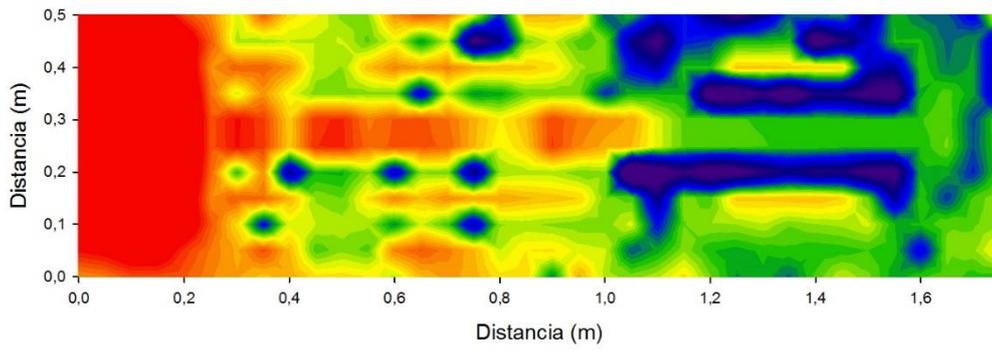


Figura 9.17. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

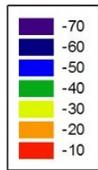
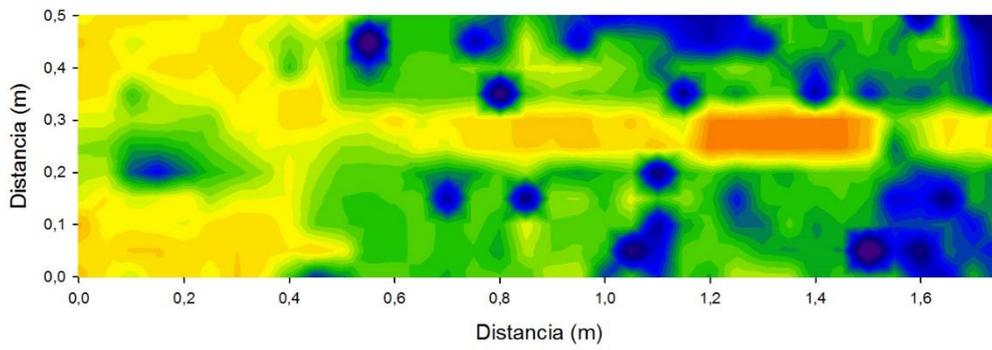
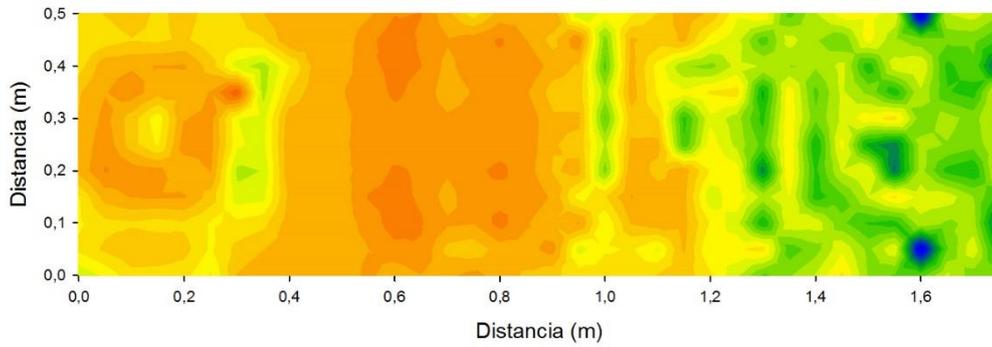


Figura 9.18. Planos a 868MHz.

— Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

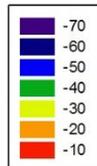
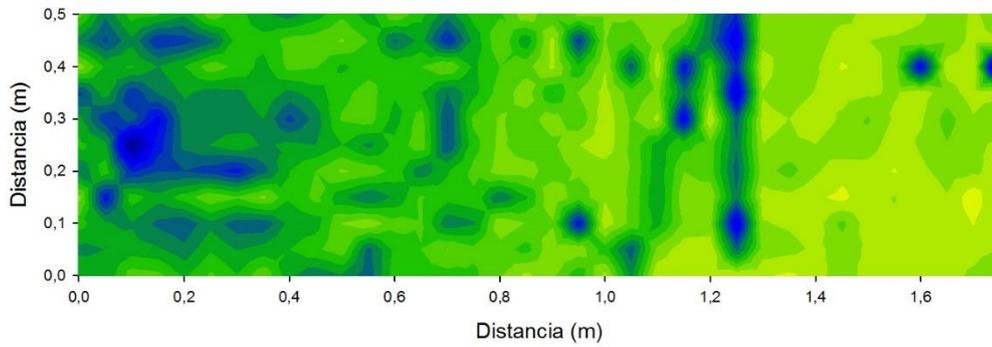
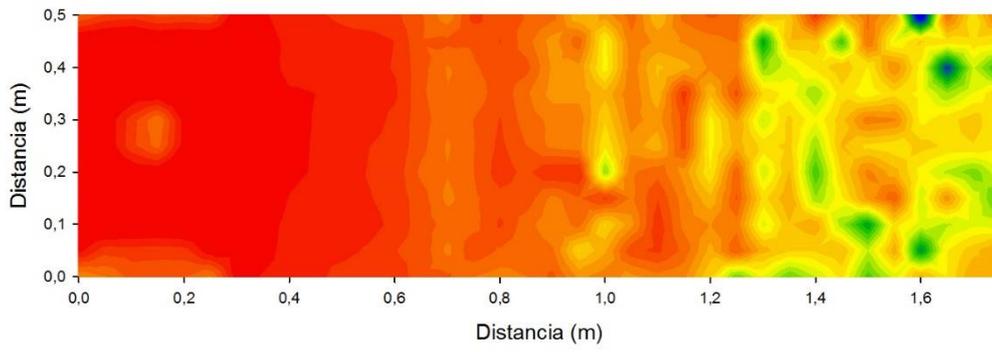


Figura 9.19. Planos a 2,4GHz.

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

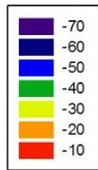
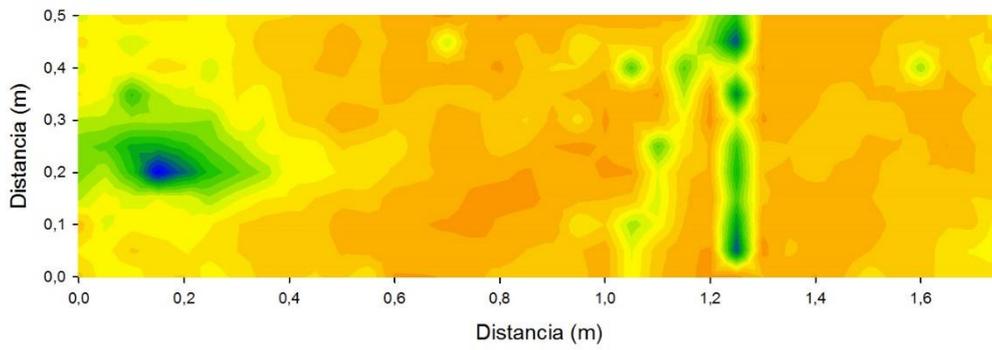


Figura 9.20. Planos a 868MHz.

- Tabla de poliuretano
  - Persona tumbada

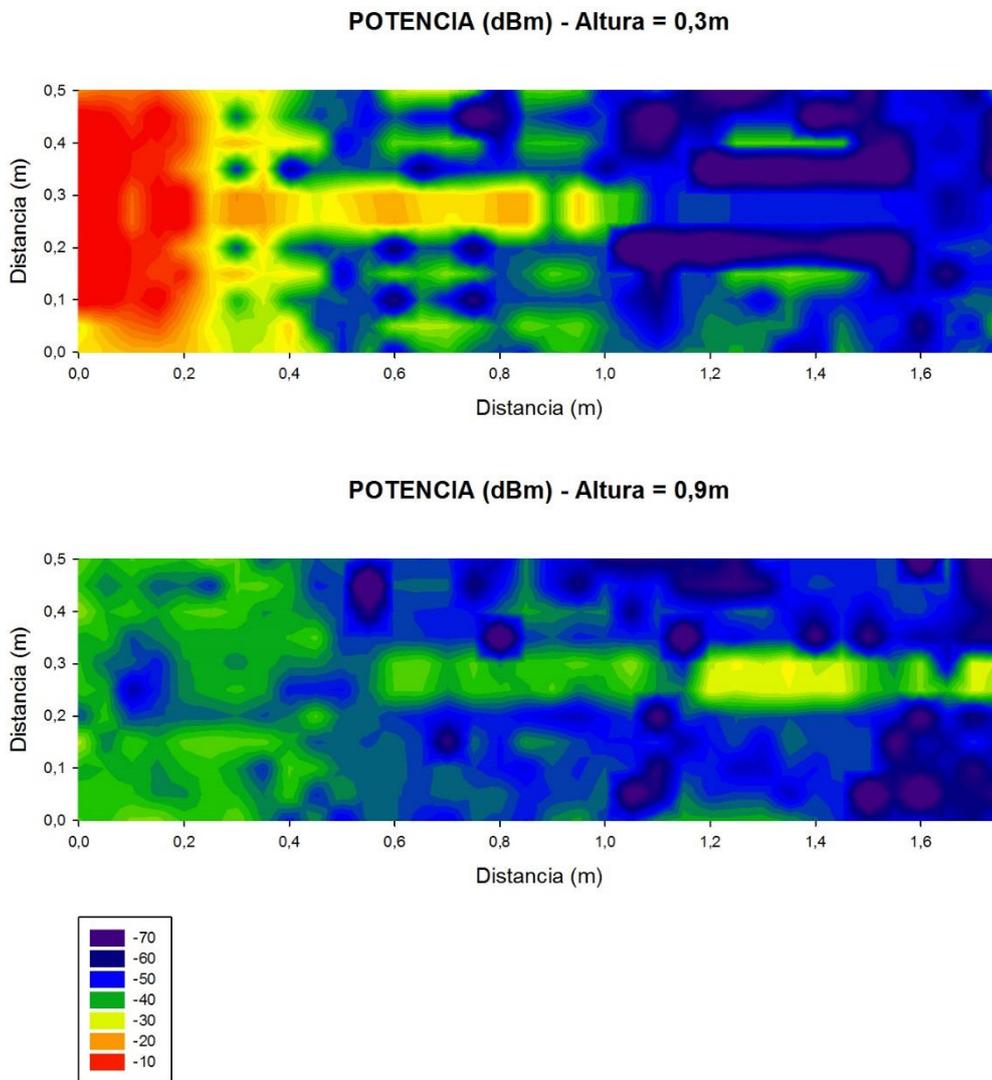
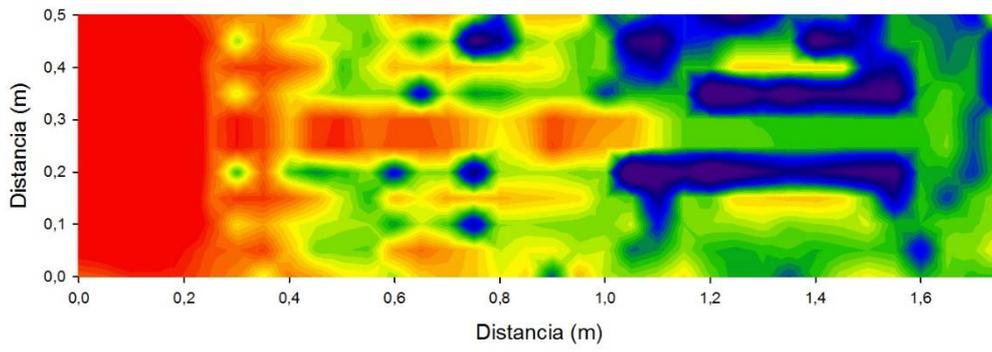


Figura 9.21. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

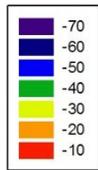
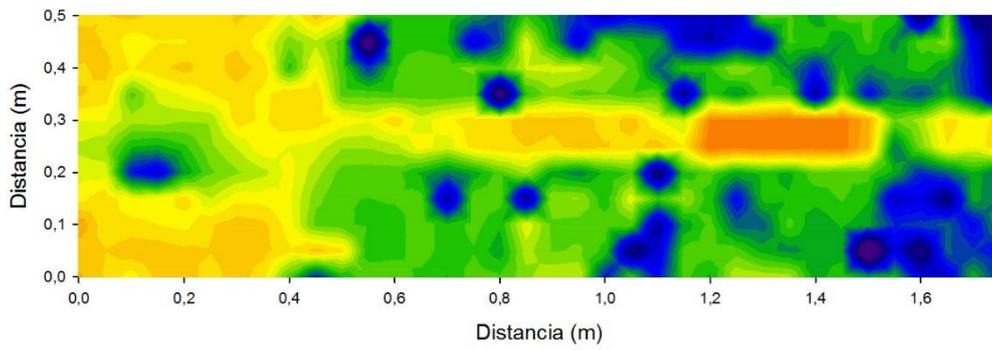
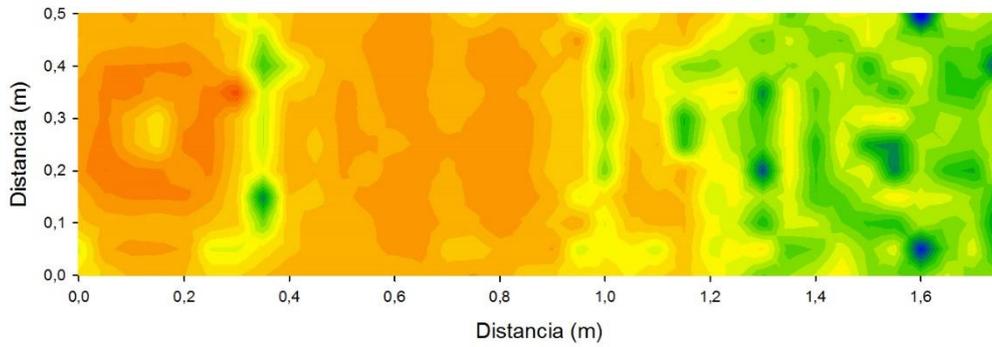


Figura 9.22. Planos a 868MHz.

— Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

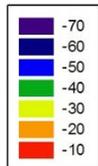
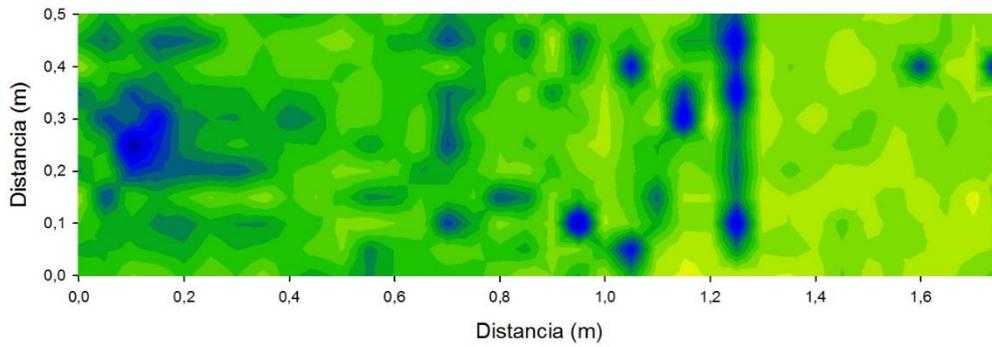
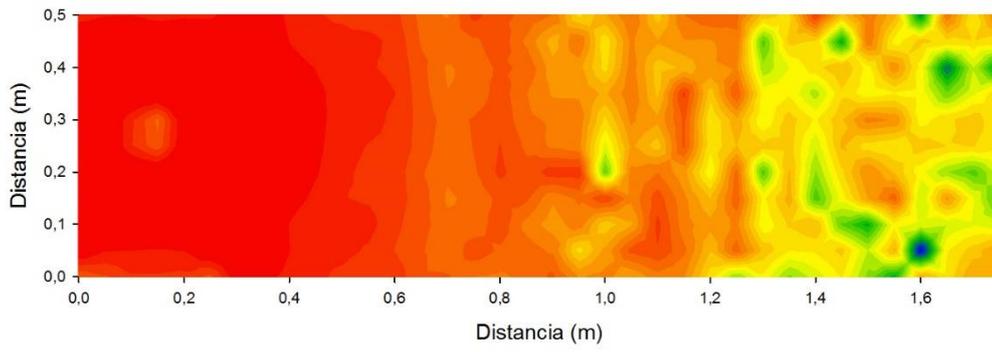


Figura 9.23. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

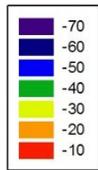
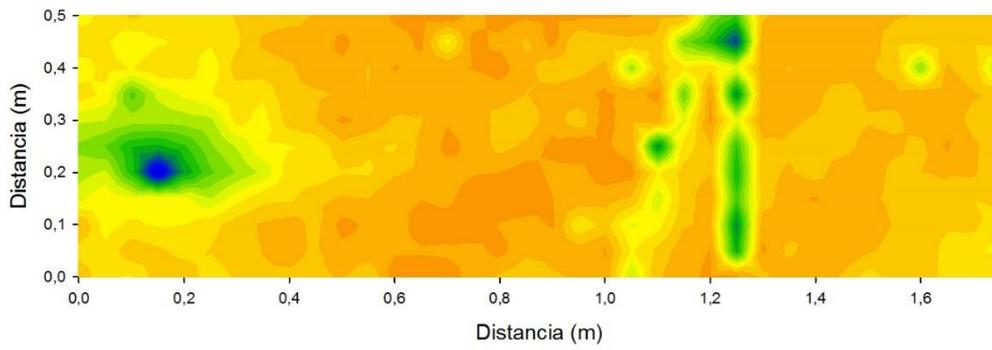
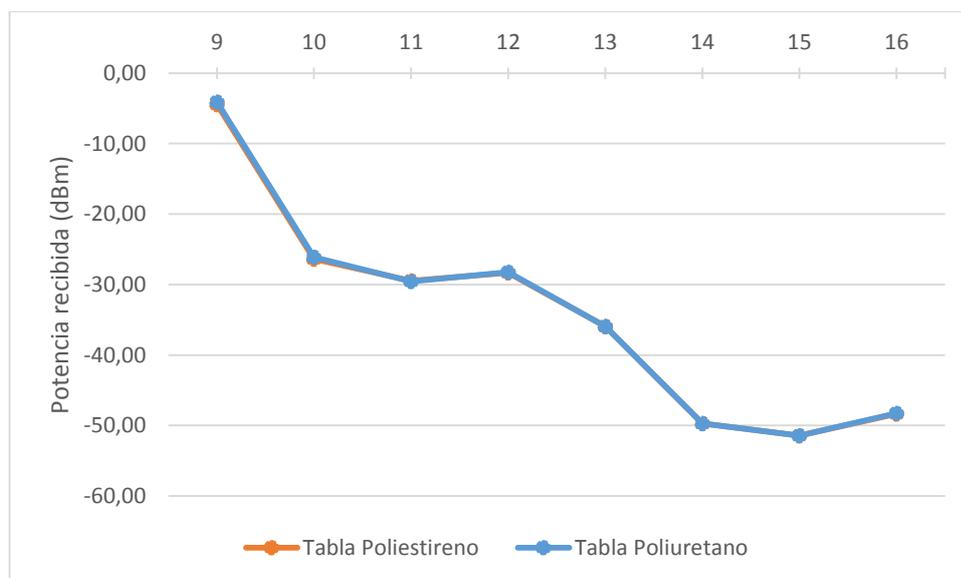
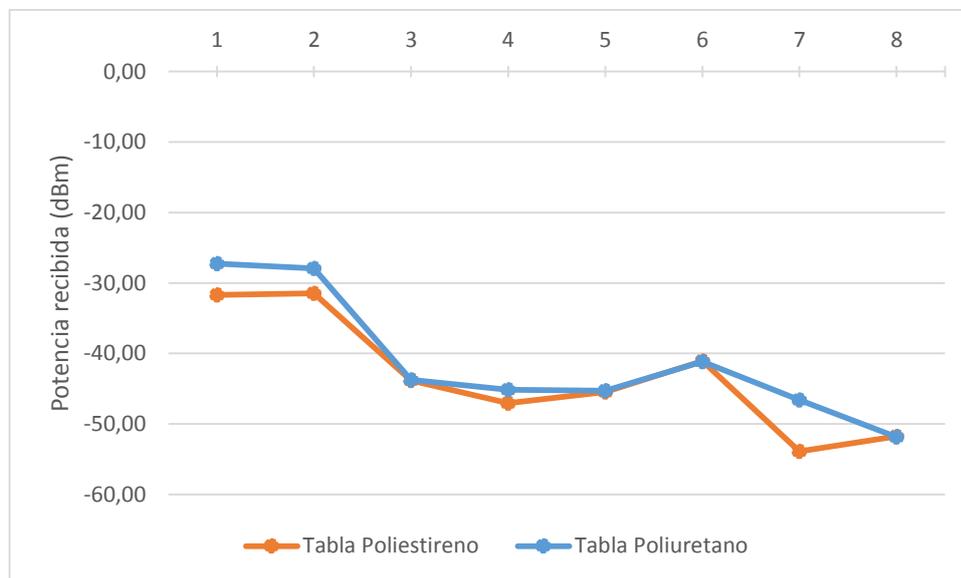


Figura 9.24. Planos a 868MHz.

### 9.1.1.2.2. Caso 2: Agua dulce y piel mojada

#### Radiales de potencia

- Plano a 30 cm con la persona tumbada



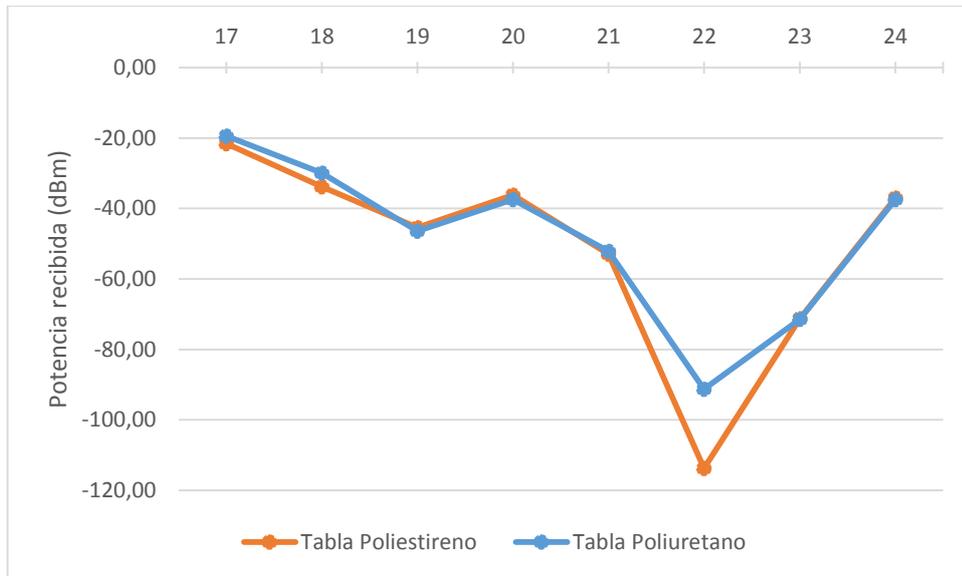
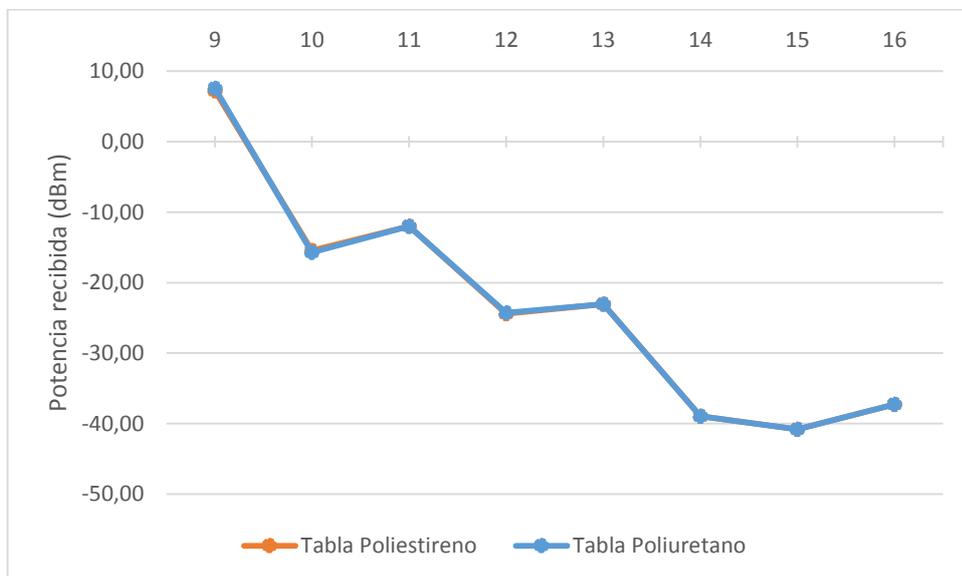
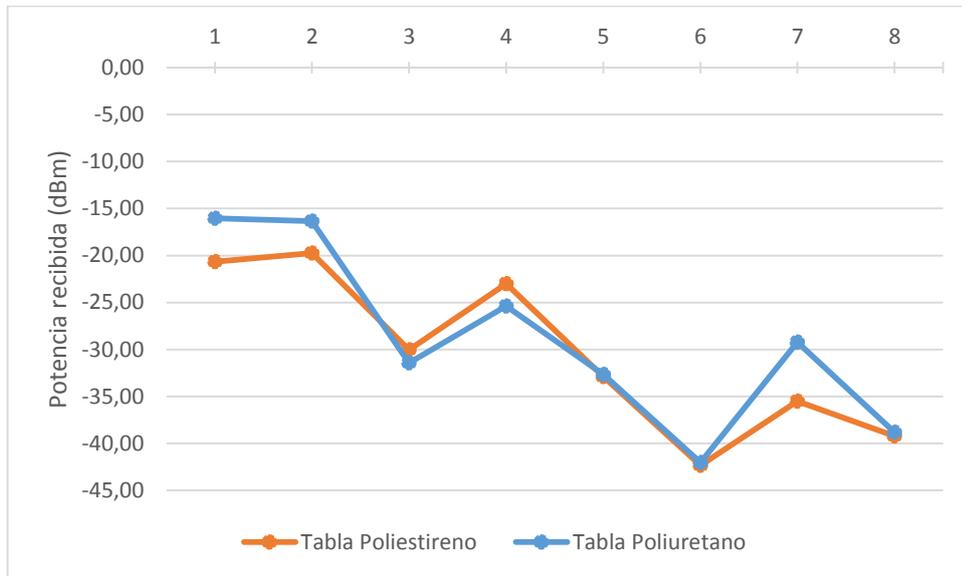


Figura 9.25. Radiales a 2,4GHz.



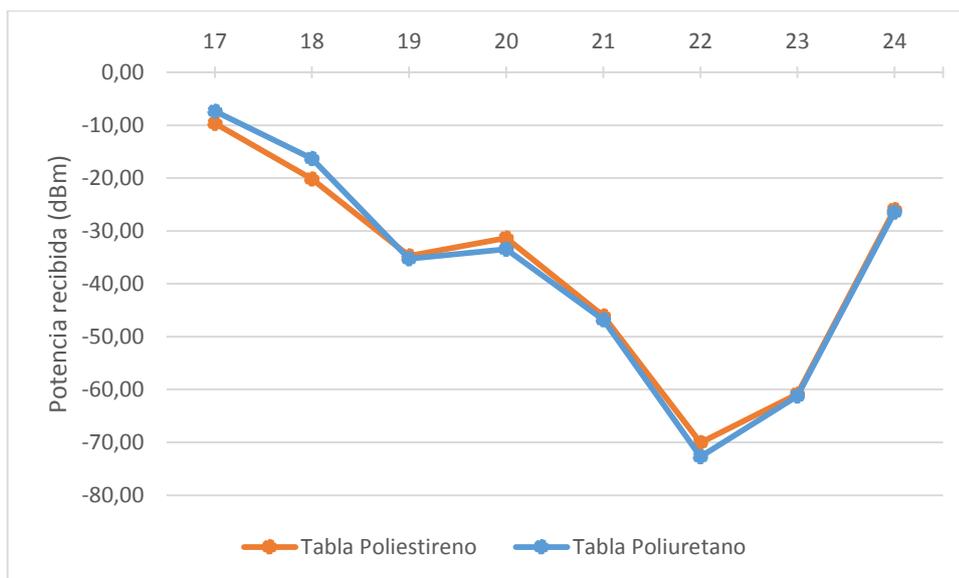
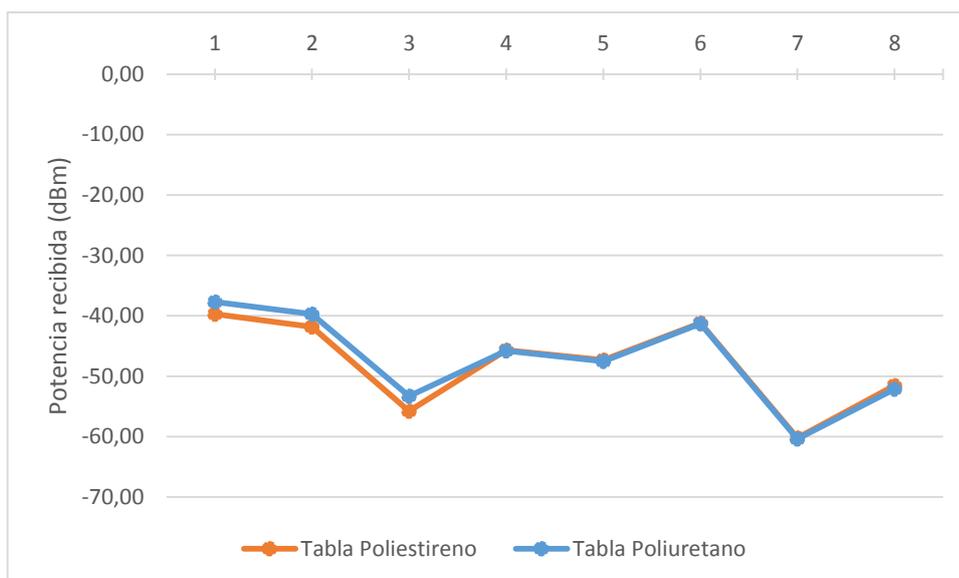


Figura 9.26. Radiales a 868MHz.

– Plano a 90 cm con la persona tumbada



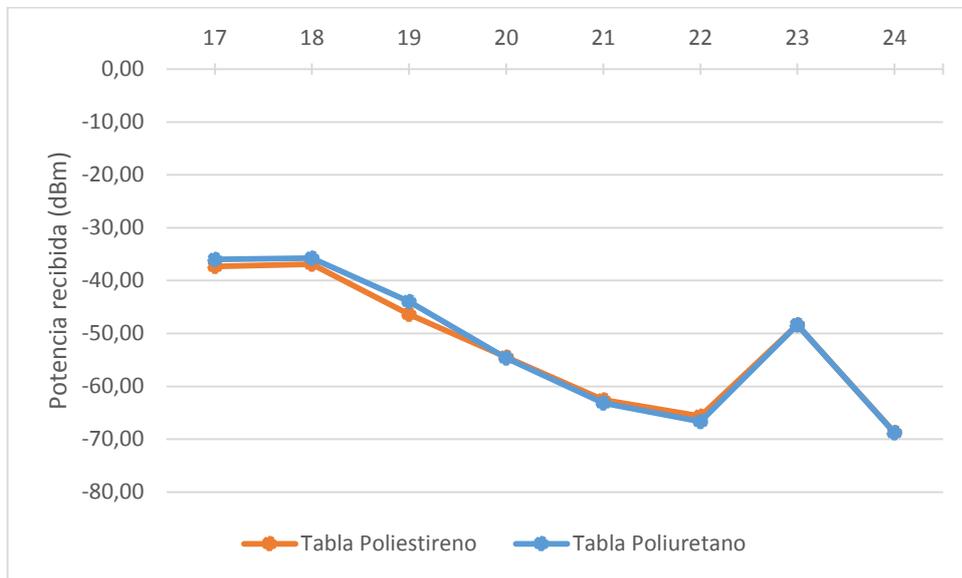
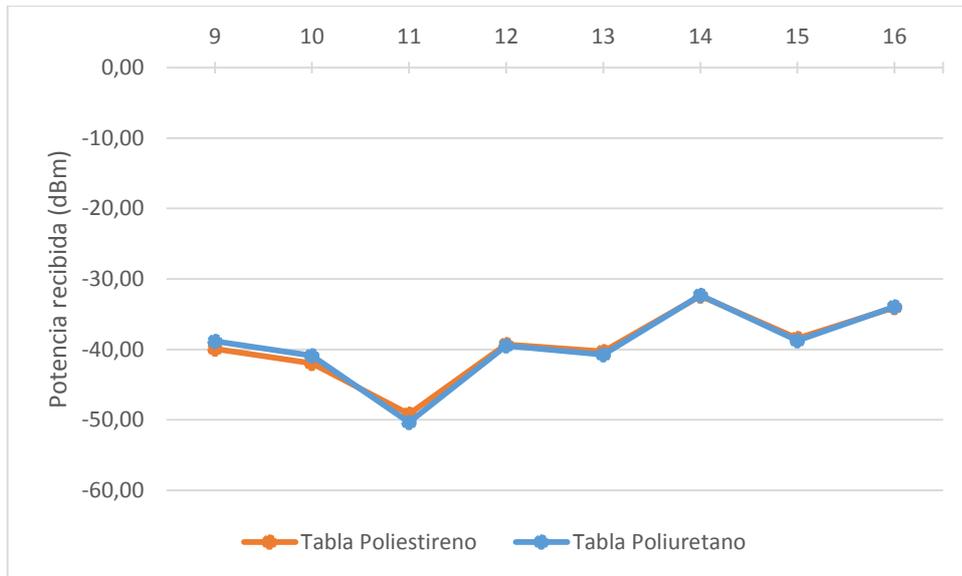
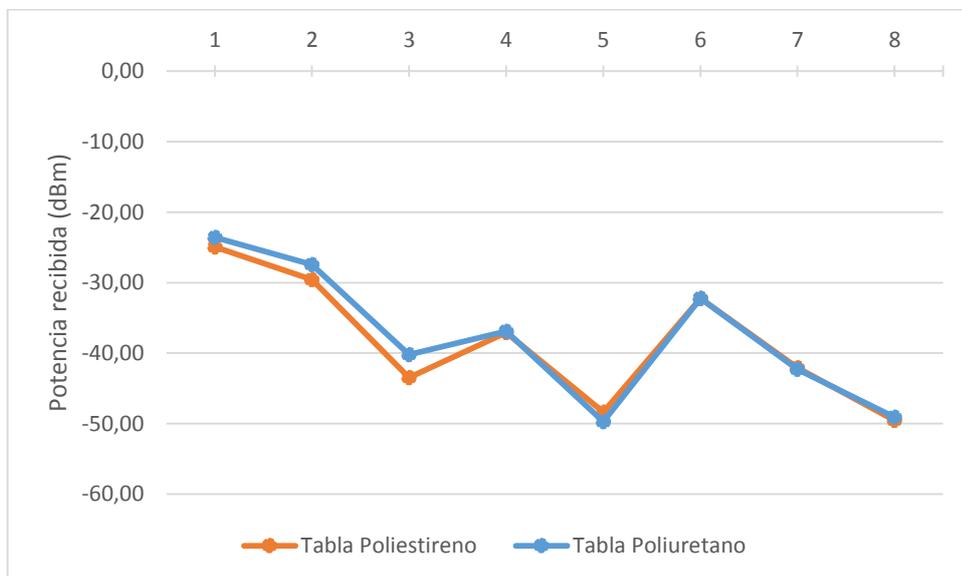


Figura 9.27. Radiales a 2,4GHz.



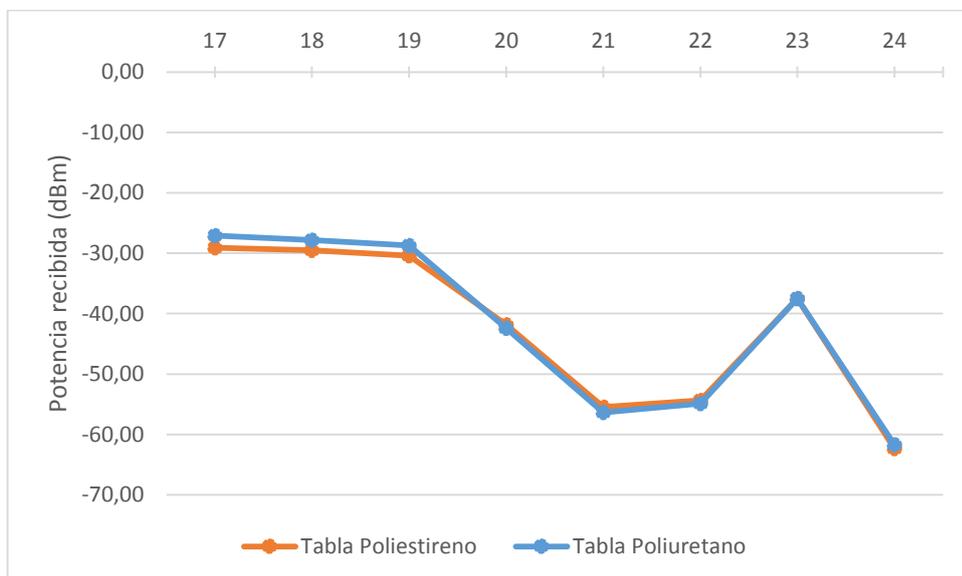
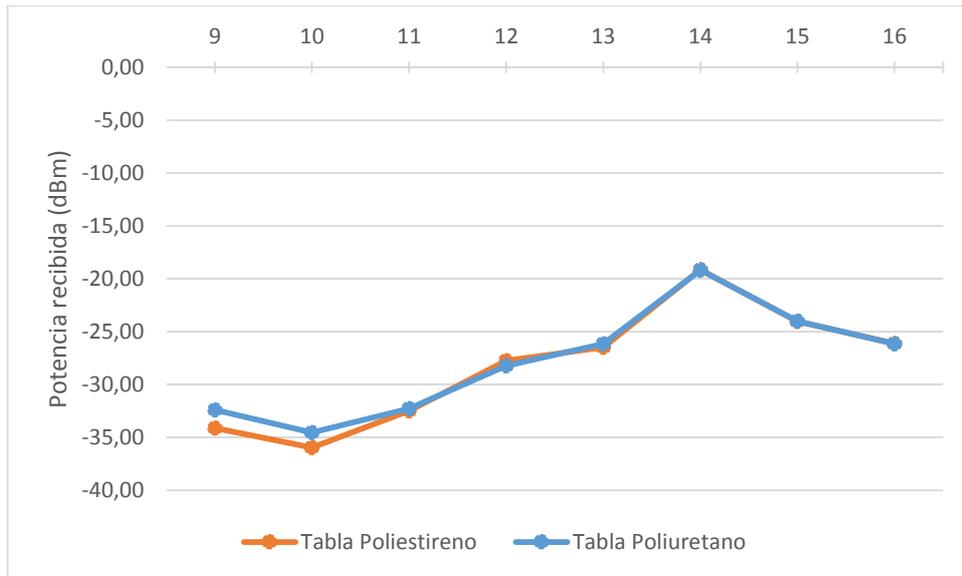


Figura 9.28. Radiales a 868MHz.

– Plano a 30 cm con la persona de pie

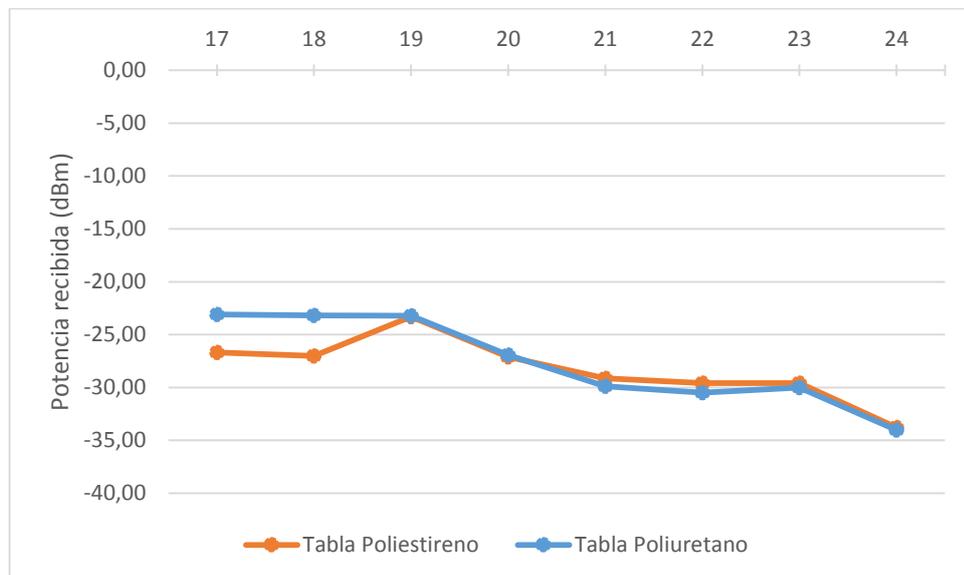
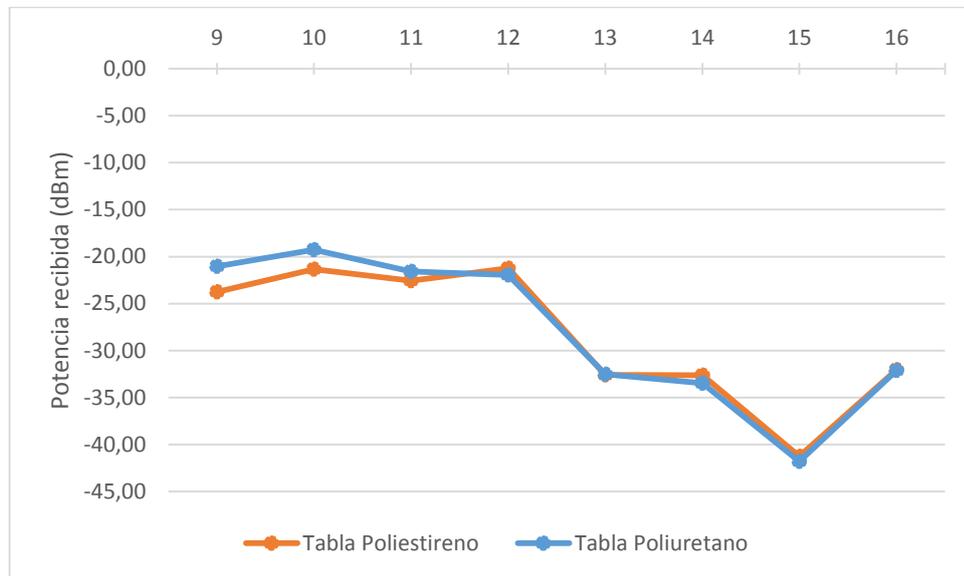
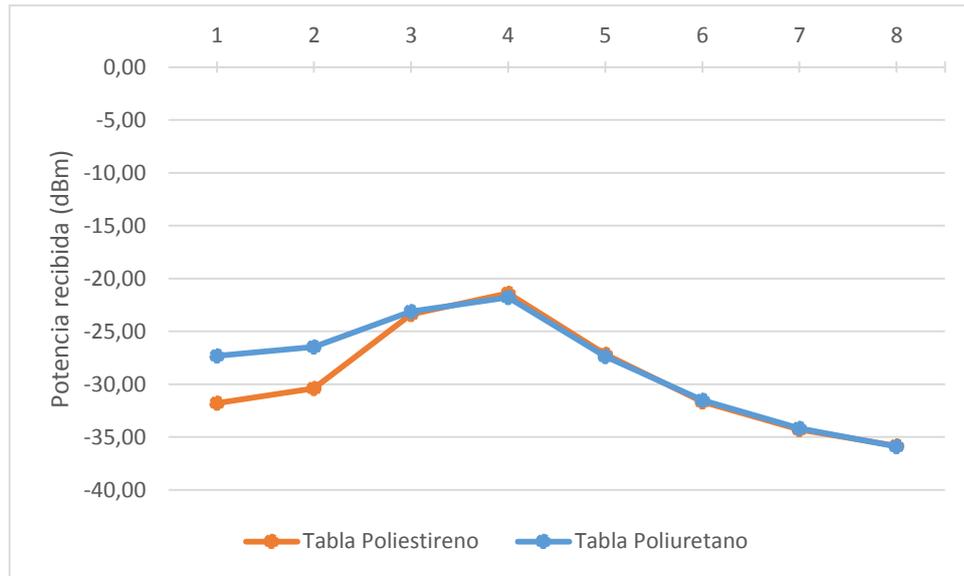


Figura 9.29. Radiales a 2,4GHz.

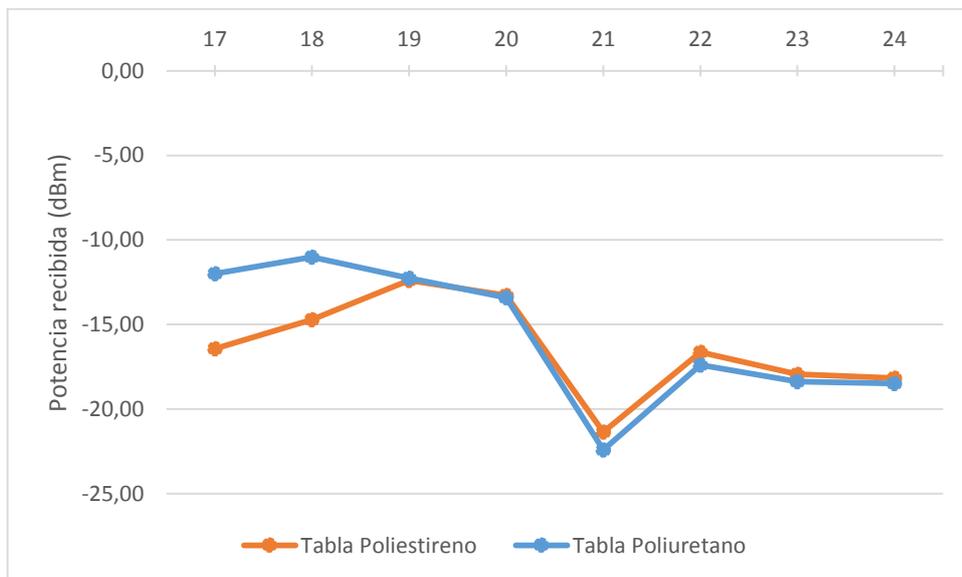
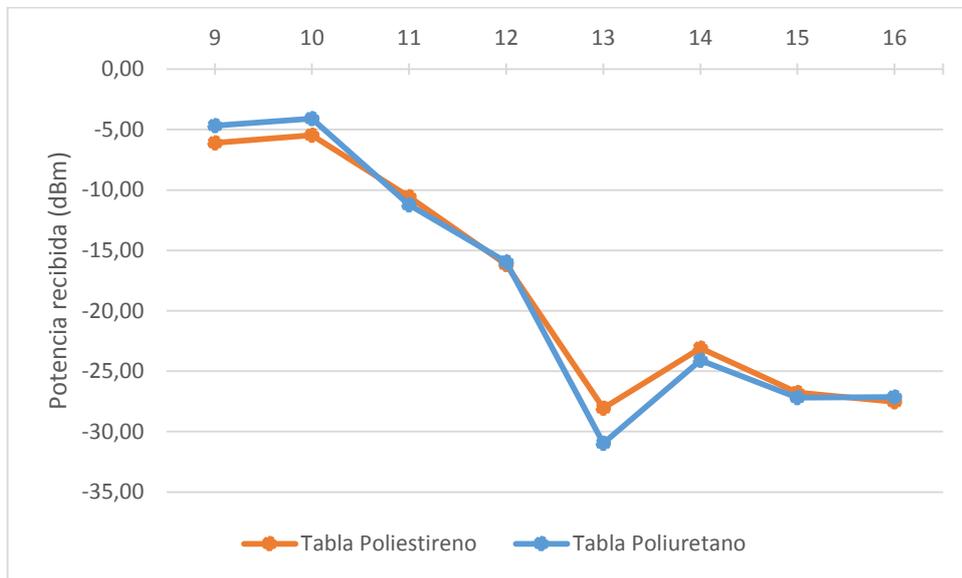
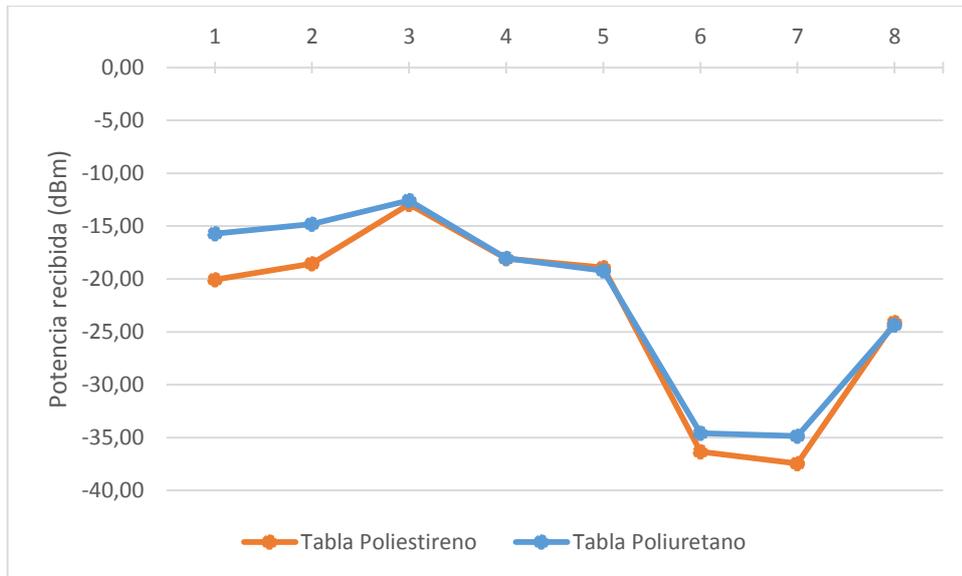


Figura 9.30. Radiales a 868MHz.

– Plano a 90 cm con la persona de pie

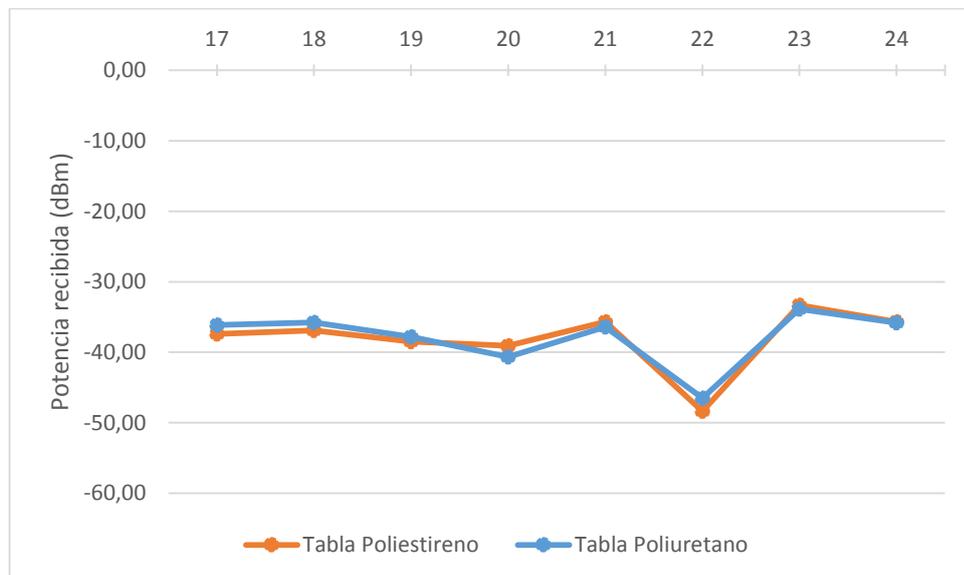
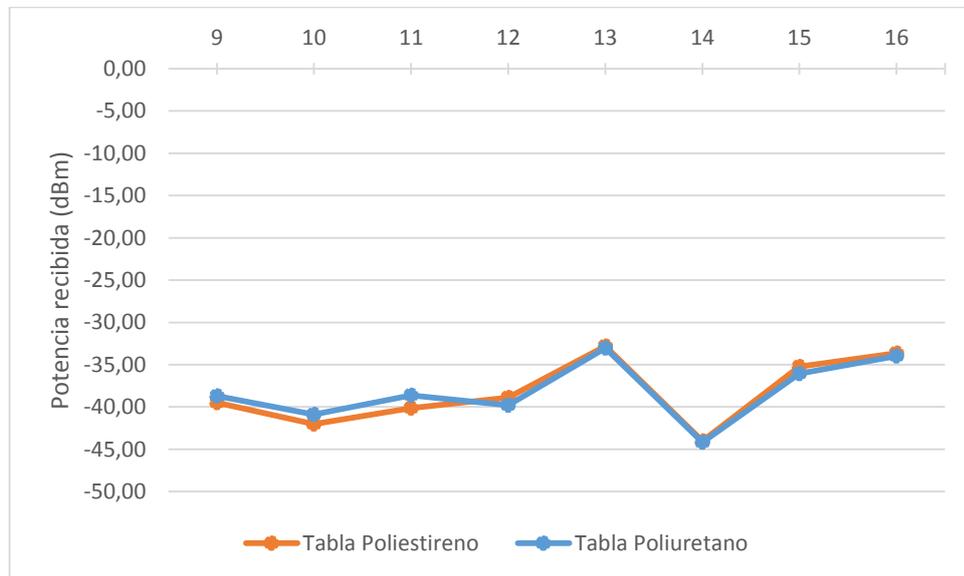
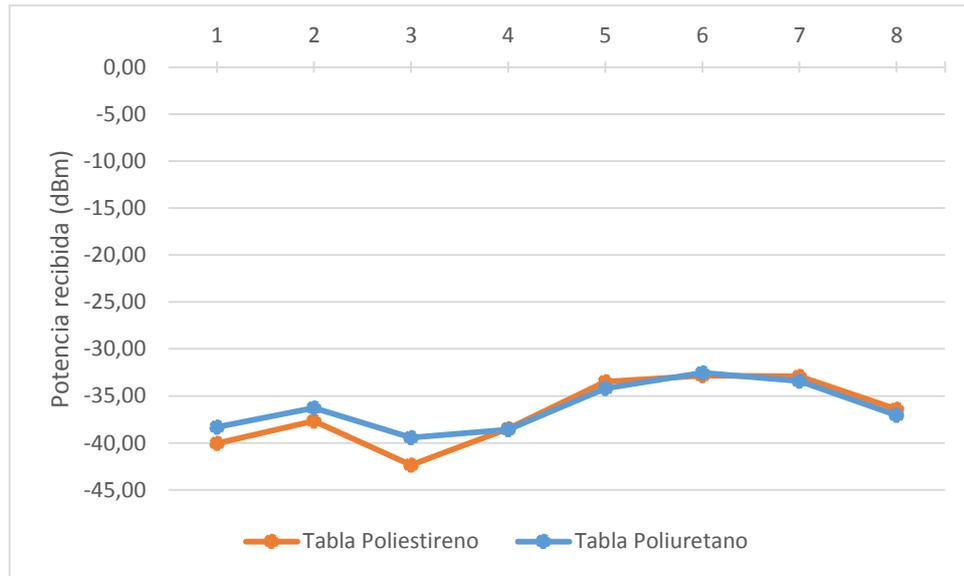


Figura 9.31. Radiales a 2,4GHz.

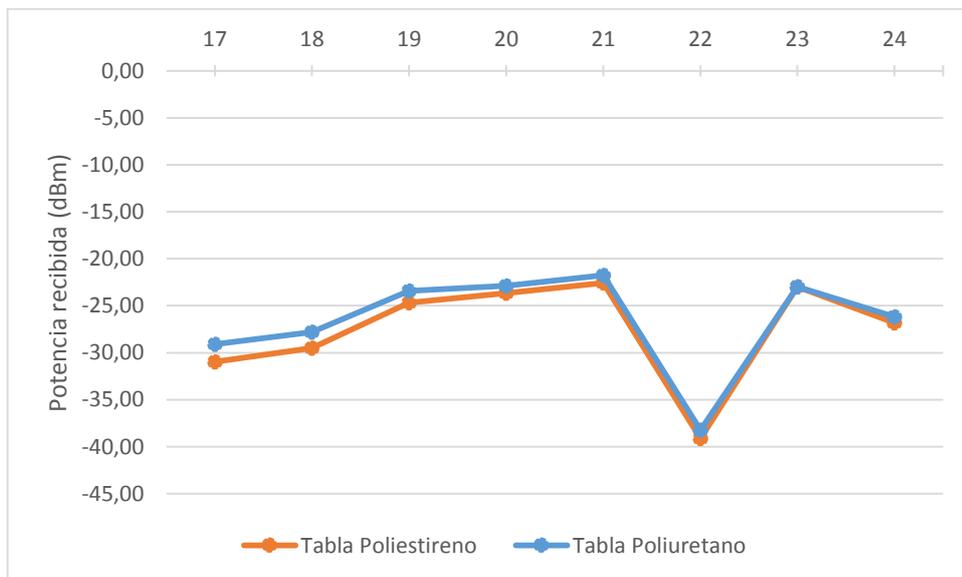
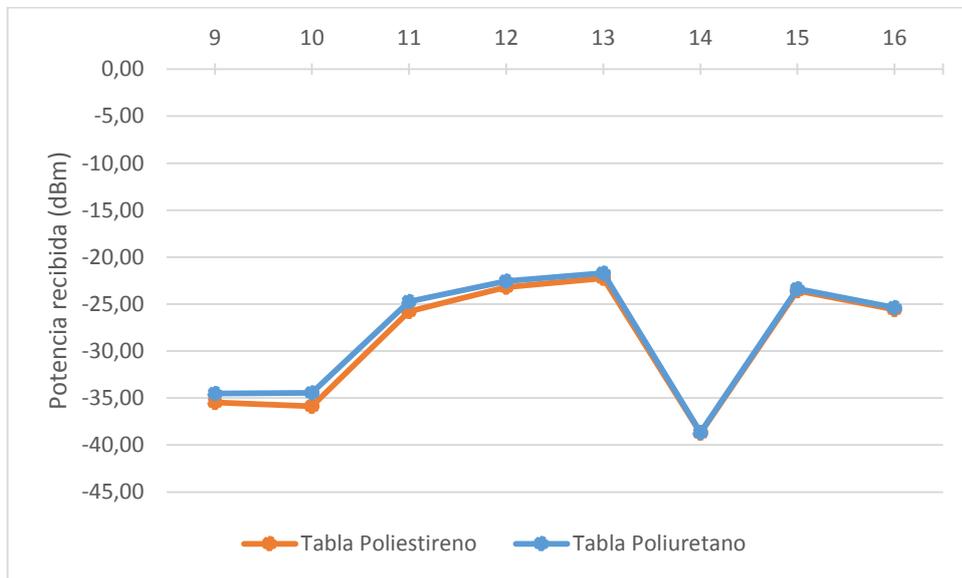
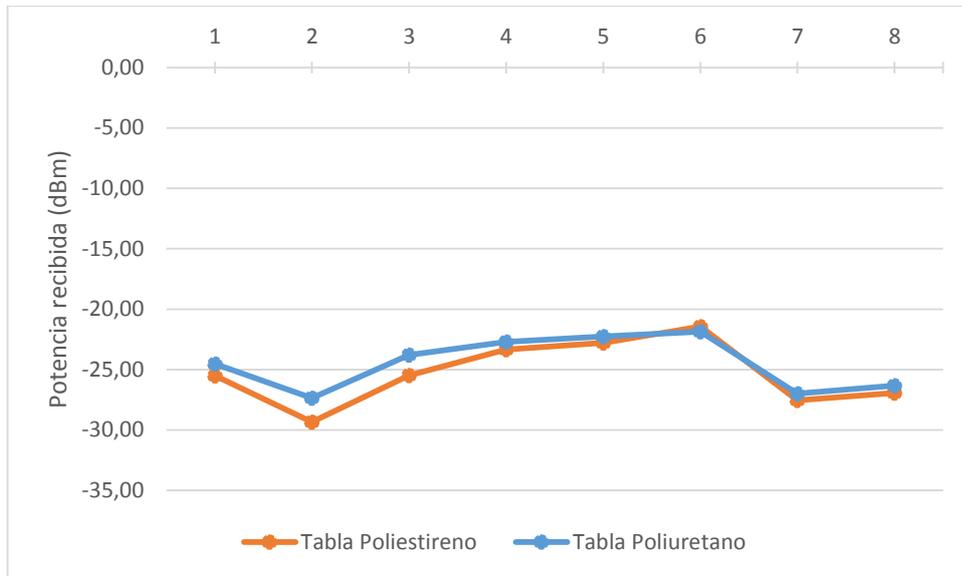
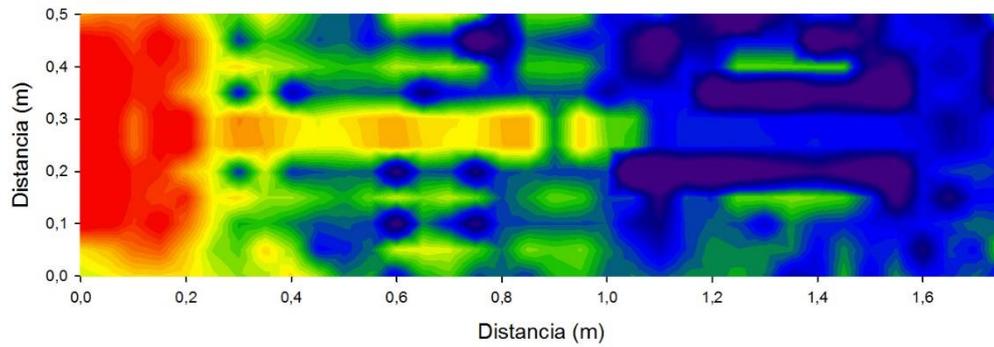


Figura 9.32. Radiales a 868MHz.

## Mapas bidimensionales

- Tabla de poliestireno
  - Persona tumbada

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

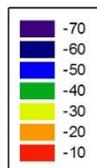
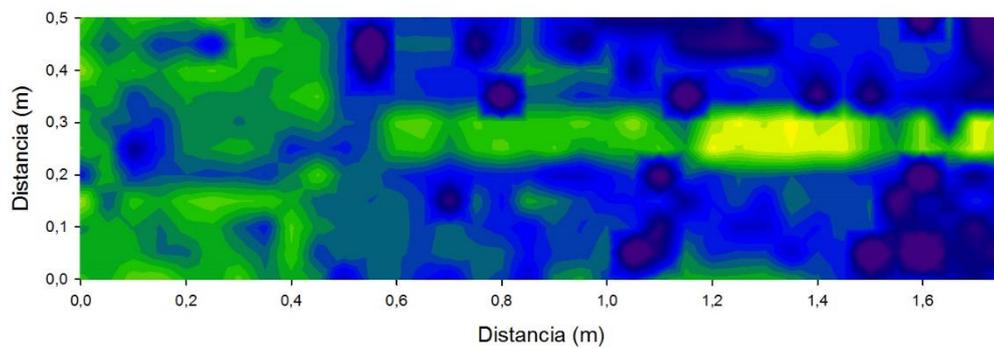
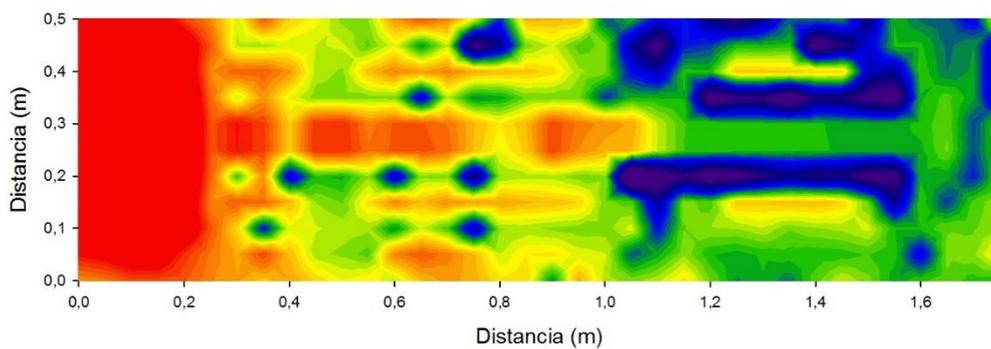


Figura 9.33. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

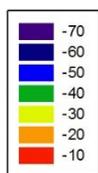
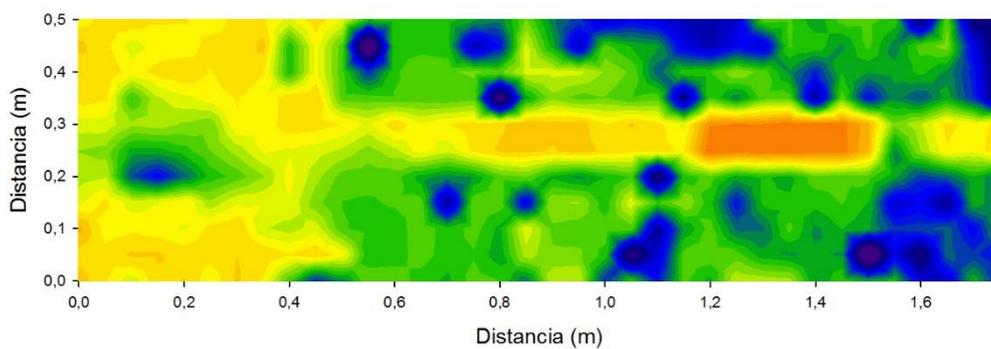
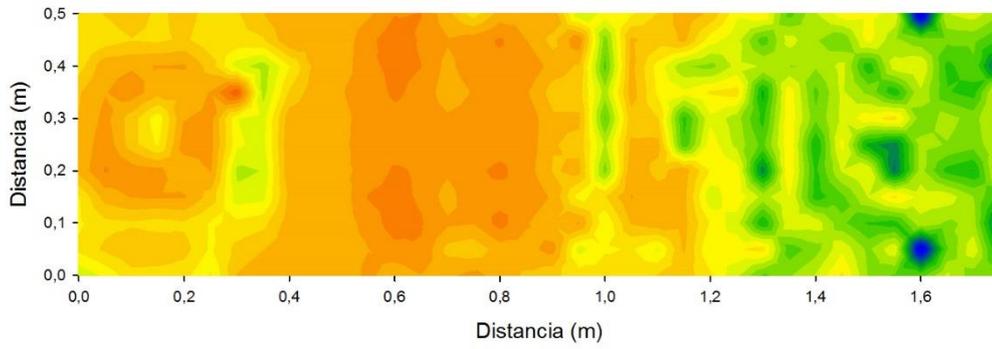


Figura 9.34. Planos a 868MHz.

— Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

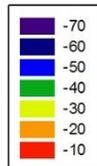
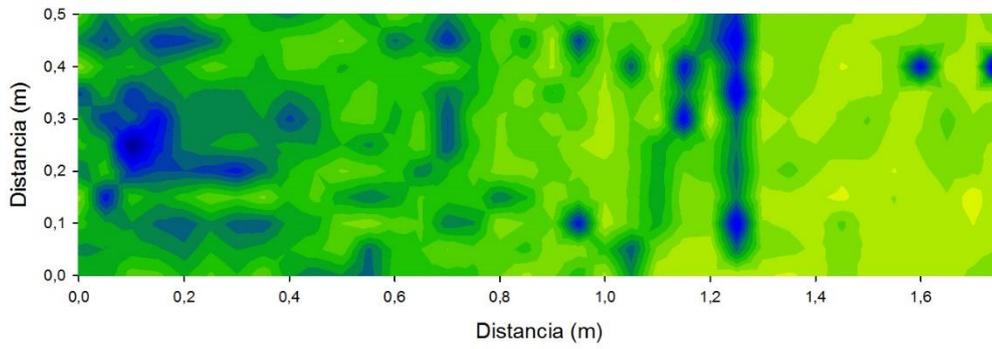
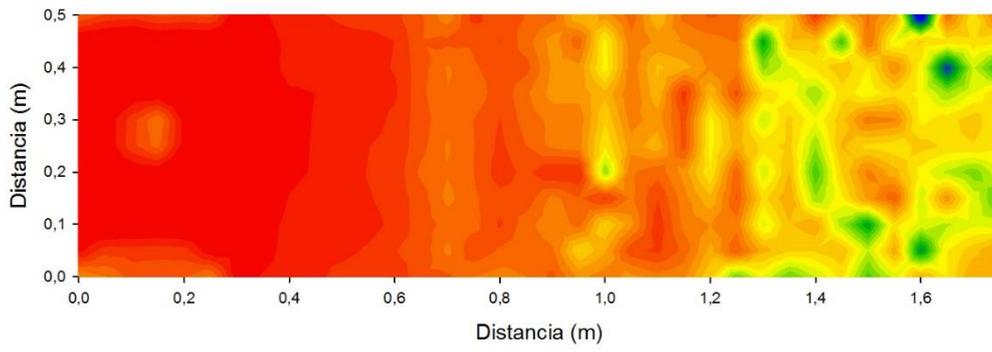


Figura 9.35. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

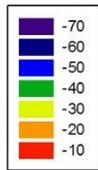
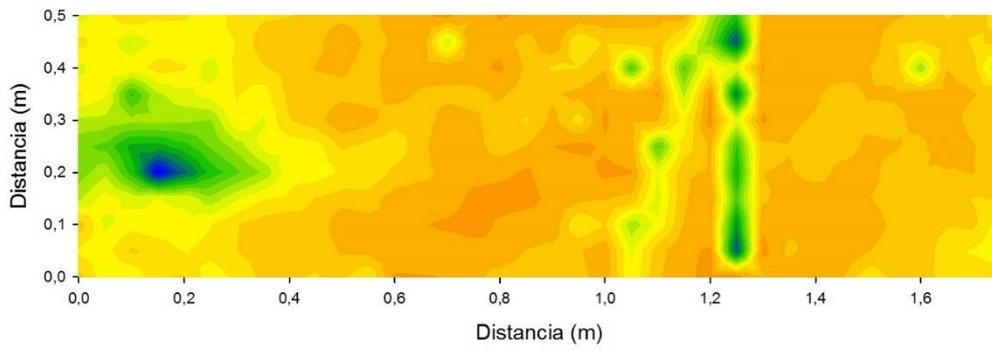


Figura 9.36. Planos a 868MHz.

- Tabla de poliestireno
  - Persona tumbada

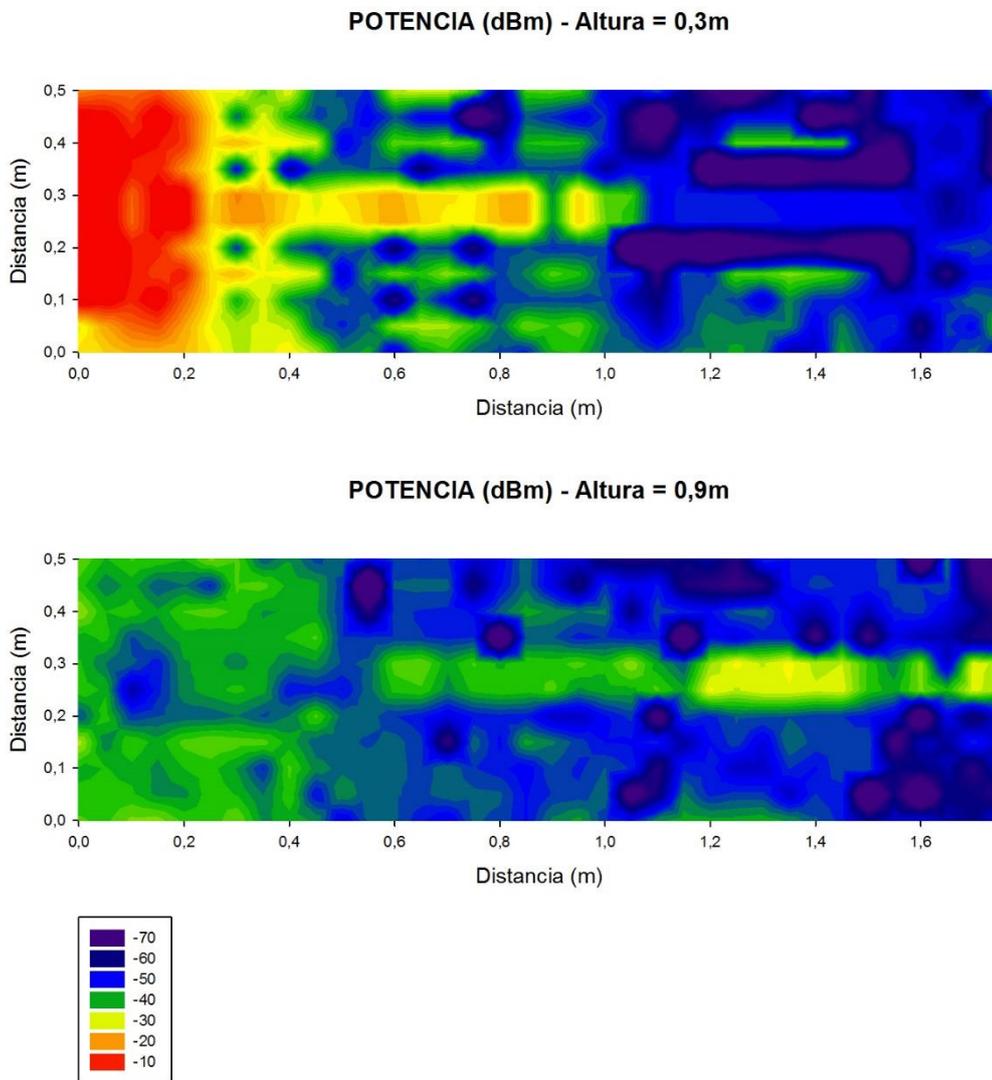
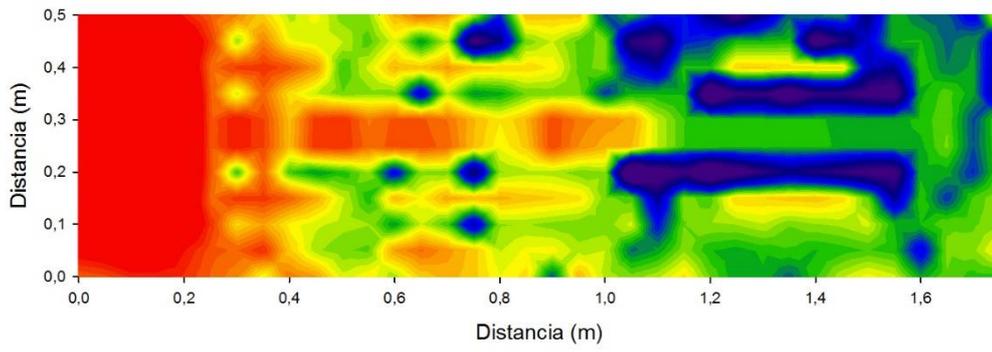


Figura 9.37. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

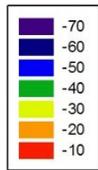
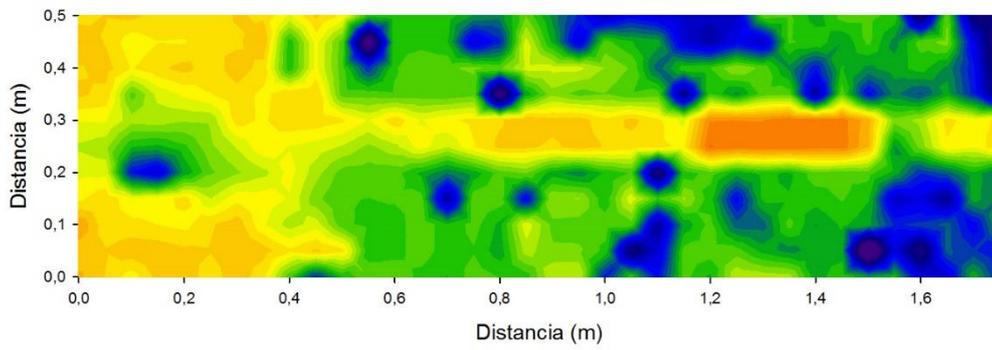
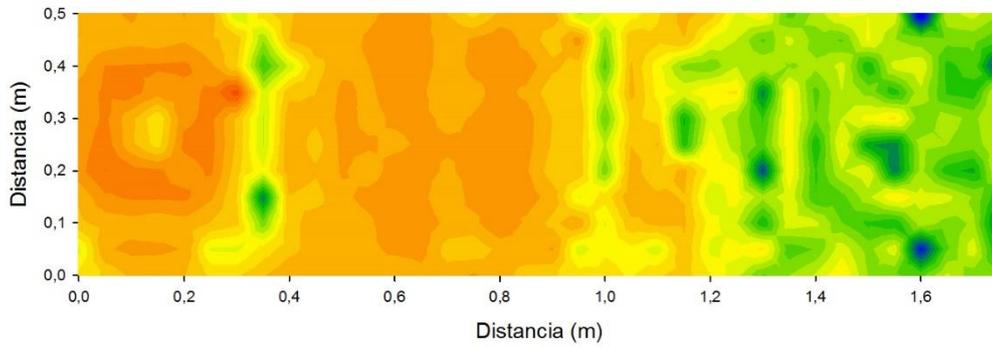


Figura 9.38. Planos a 868MHz.

— Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

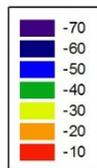
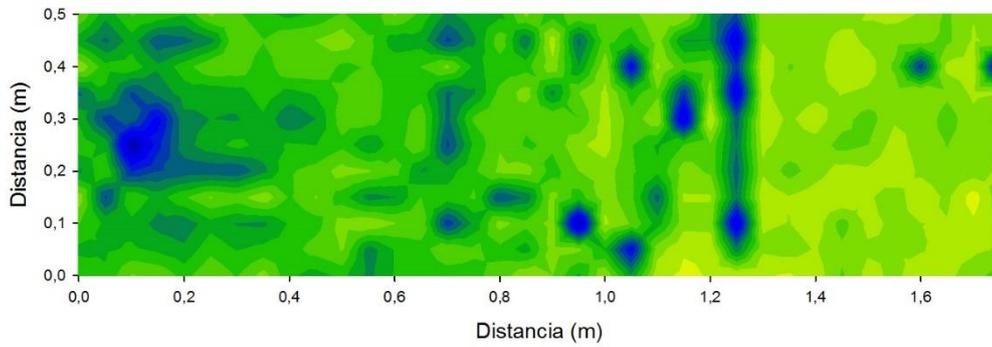
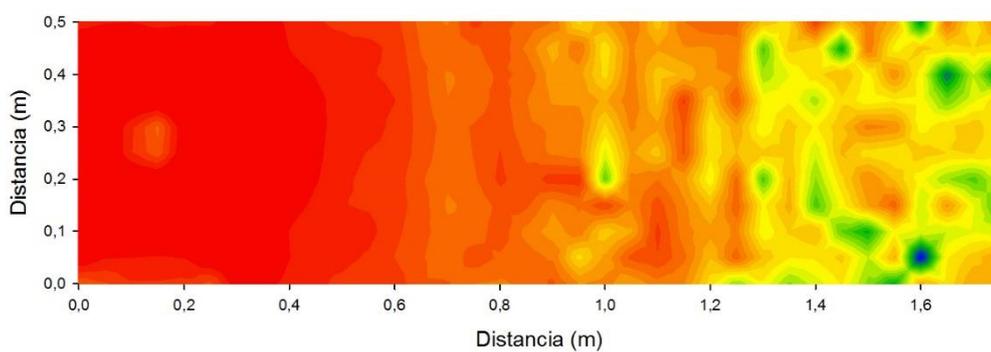


Figura 9.39. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

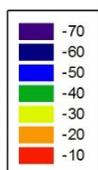
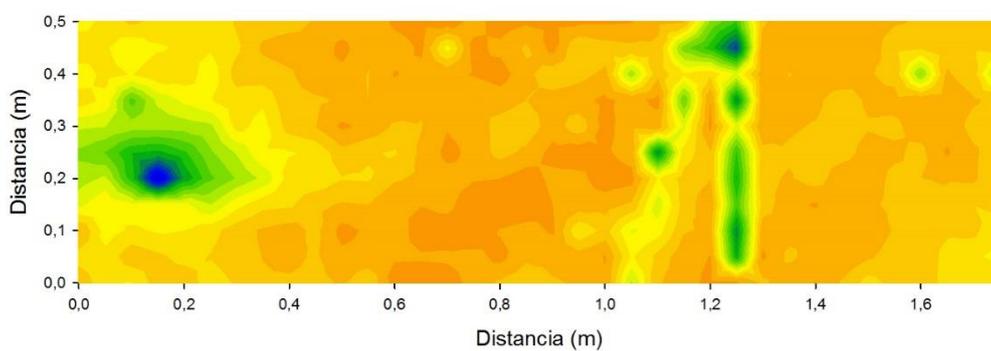
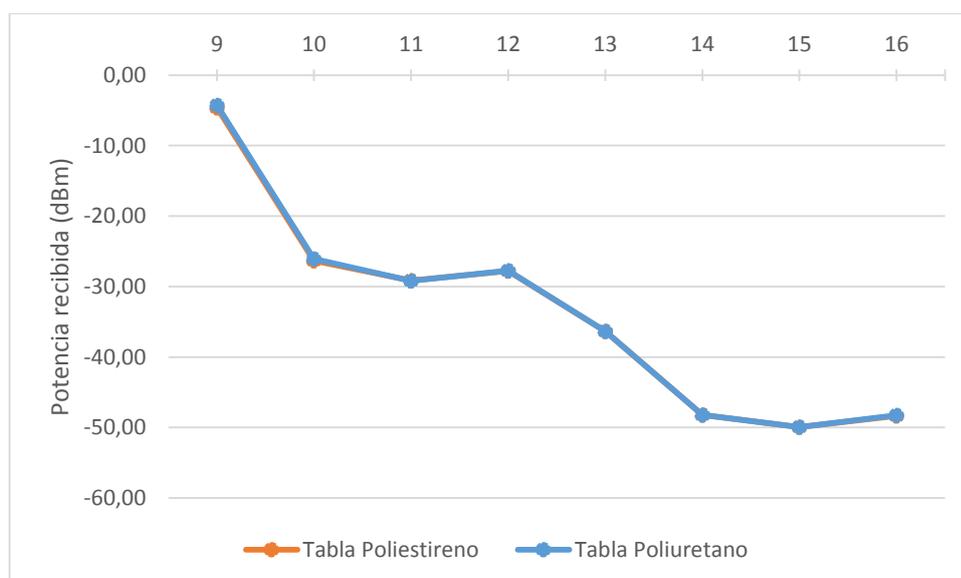
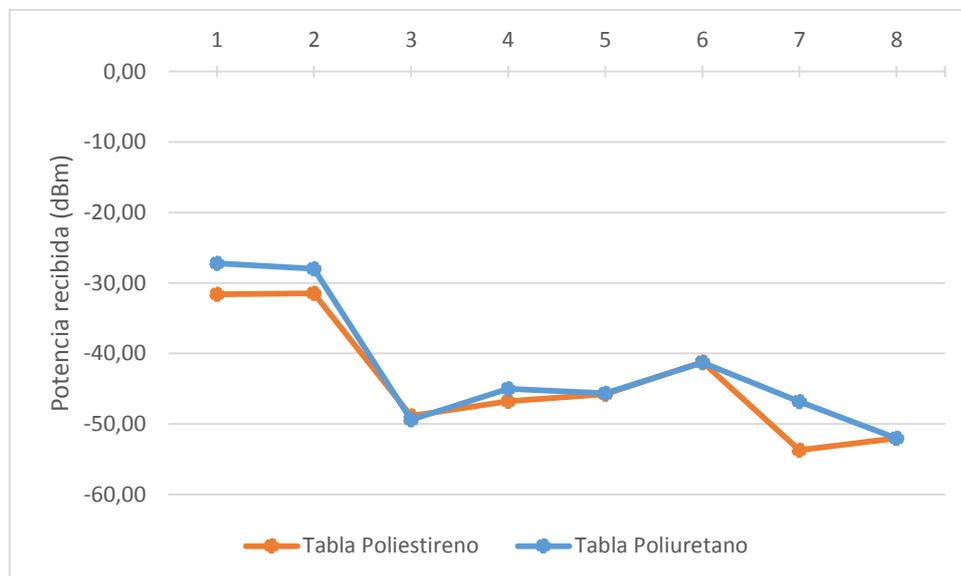


Figura 9.40. Planos a 868MHz.

### 9.1.1.2.3. Caso 3: Agua salada y piel seca

#### Radiales de potencia

- Plano a 30 cm con la persona tumbada



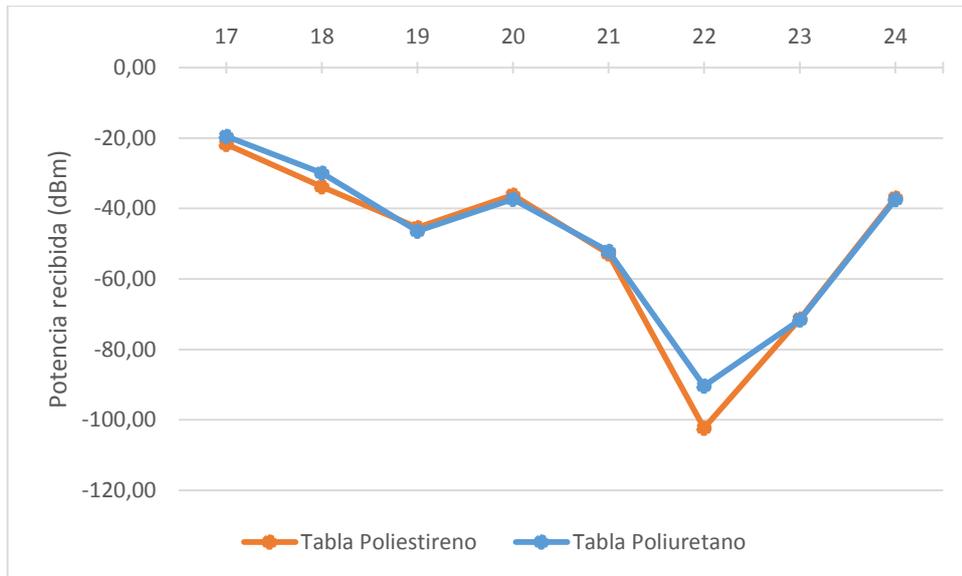
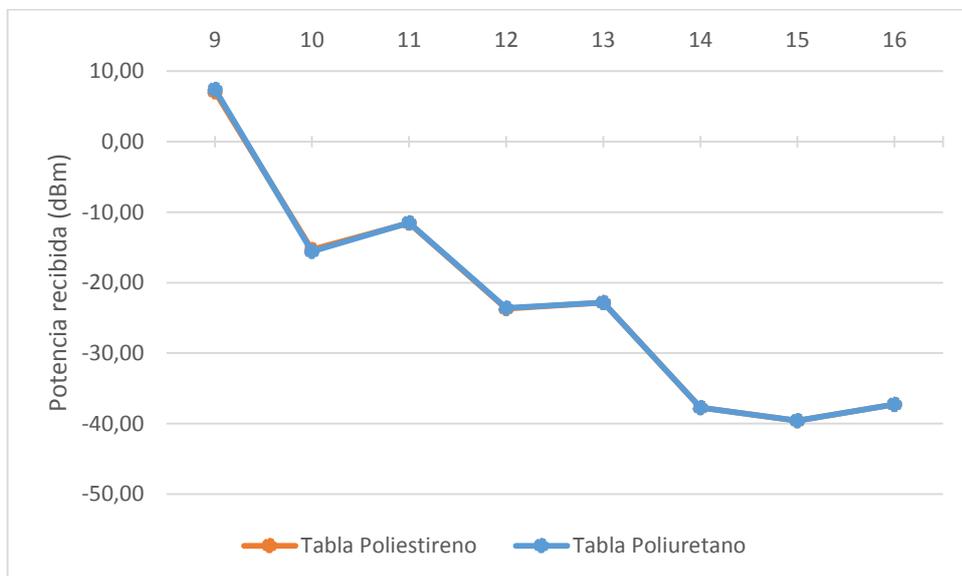
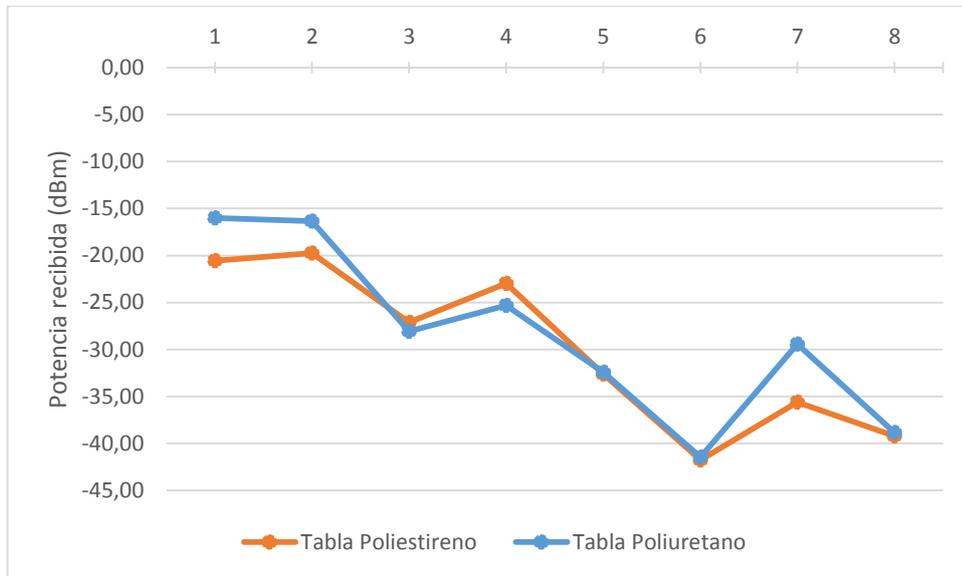


Figura 9.41. Radiales a 2,4GHz.



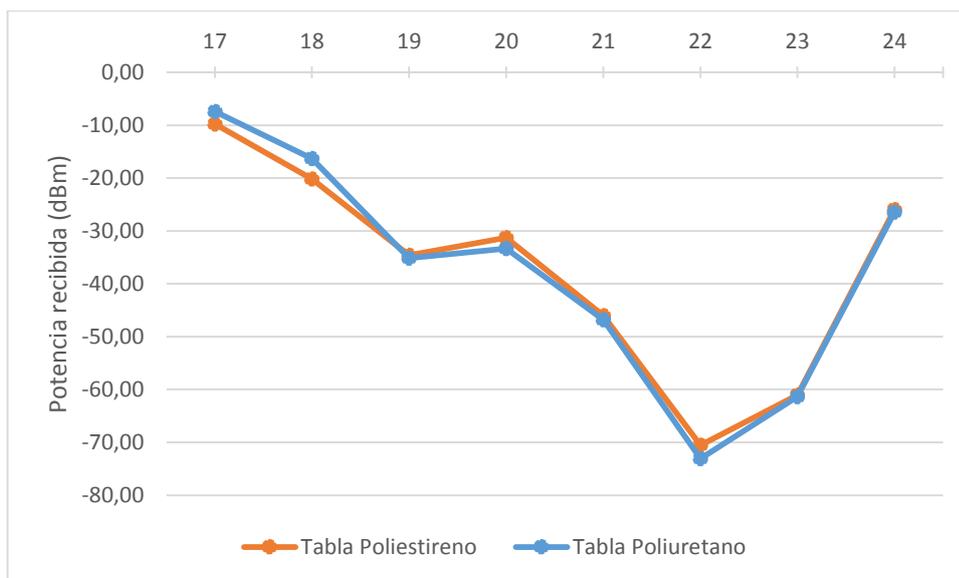
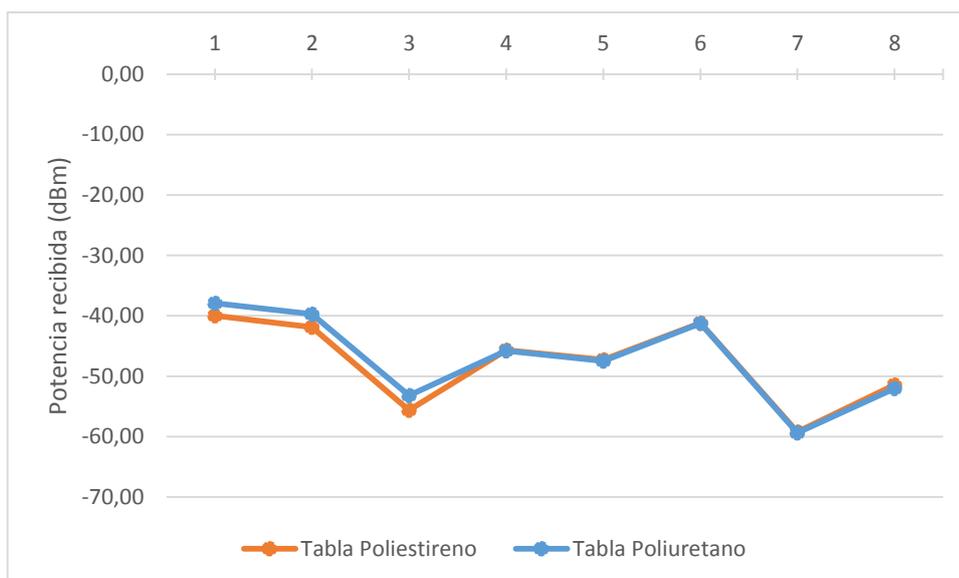


Figura 9.42. Radiales a 868MHz.

– Plano a 90cm con la persona tumbada



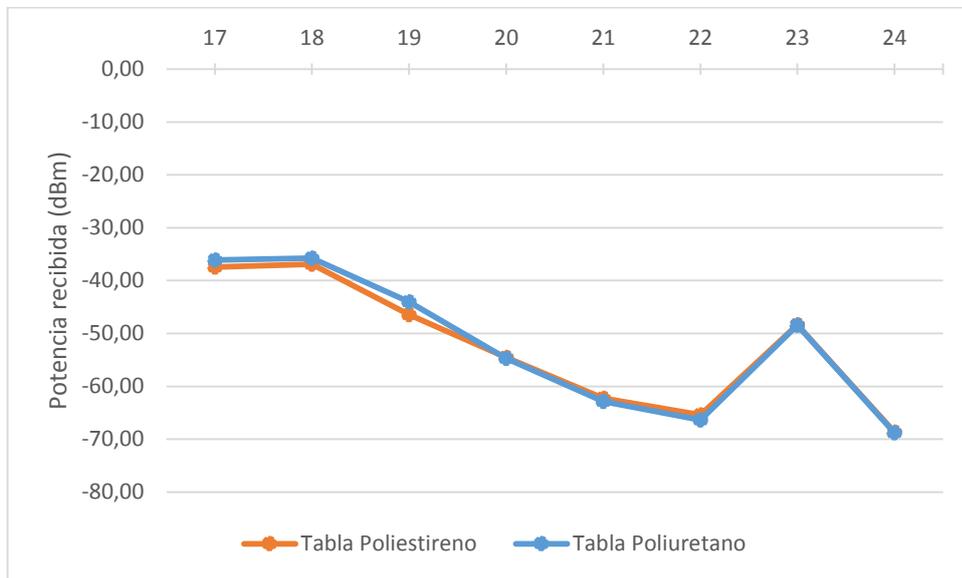
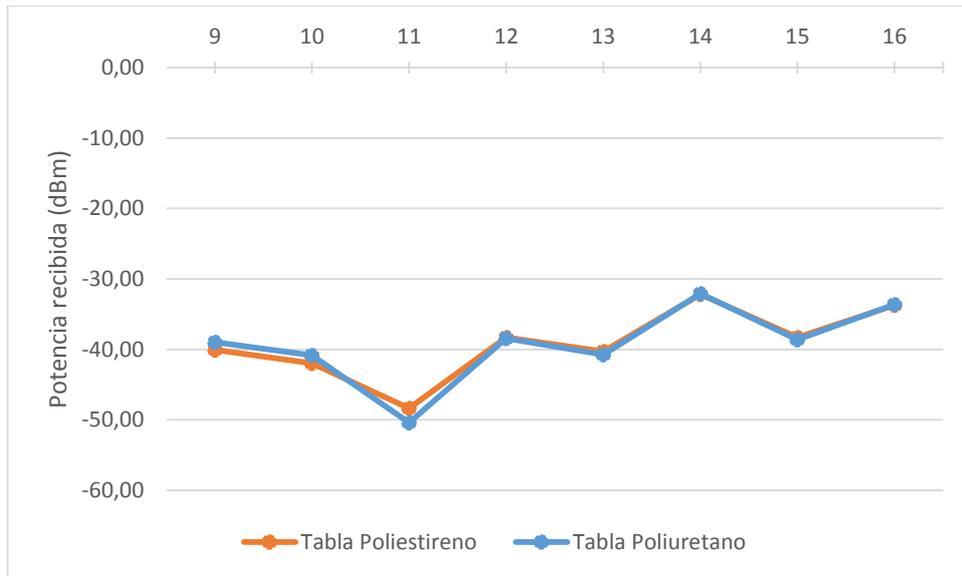
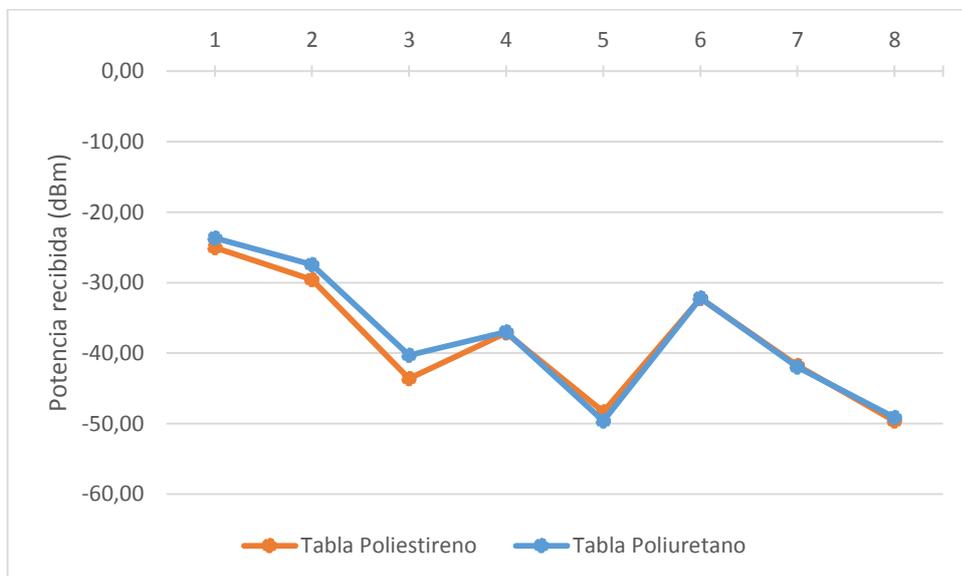


Figura 9.43. Radiales a 2,4GHz.



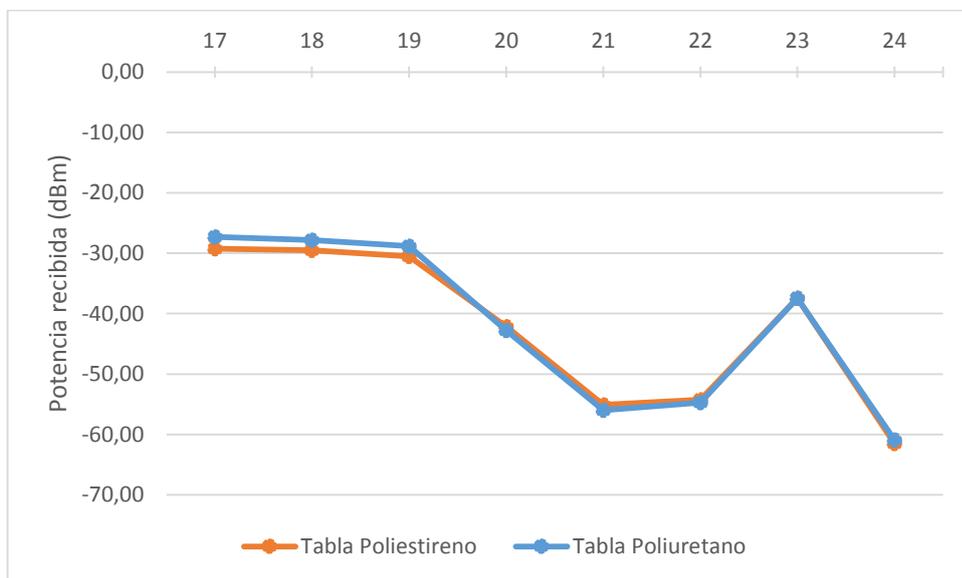
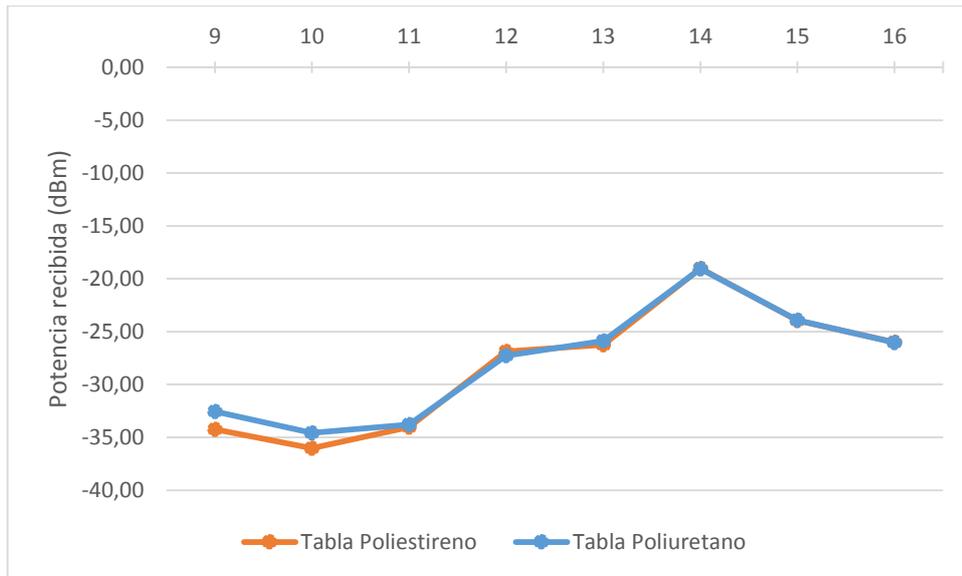


Figura 9.44. Radiales a 868MHz.

– Plano a 30cm con la persona de pie

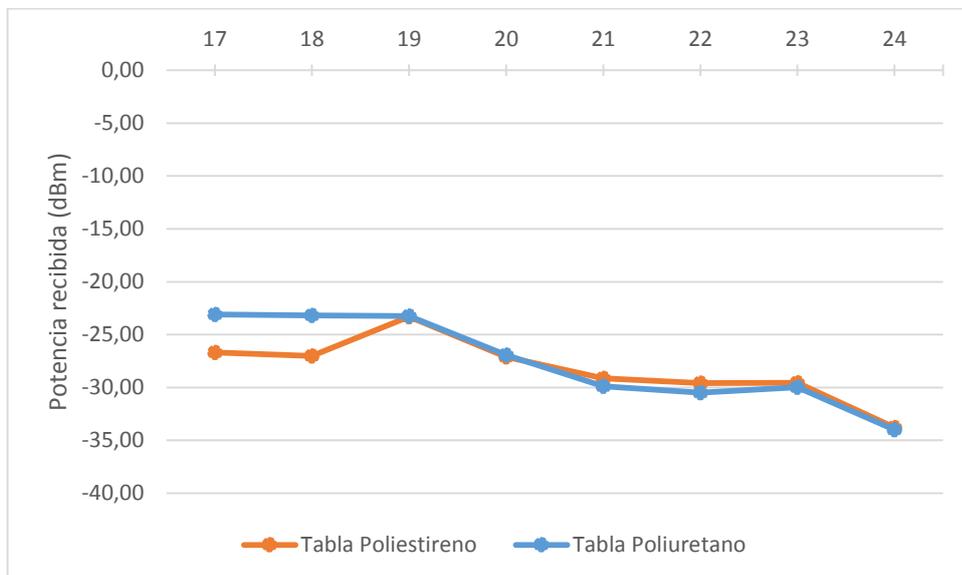
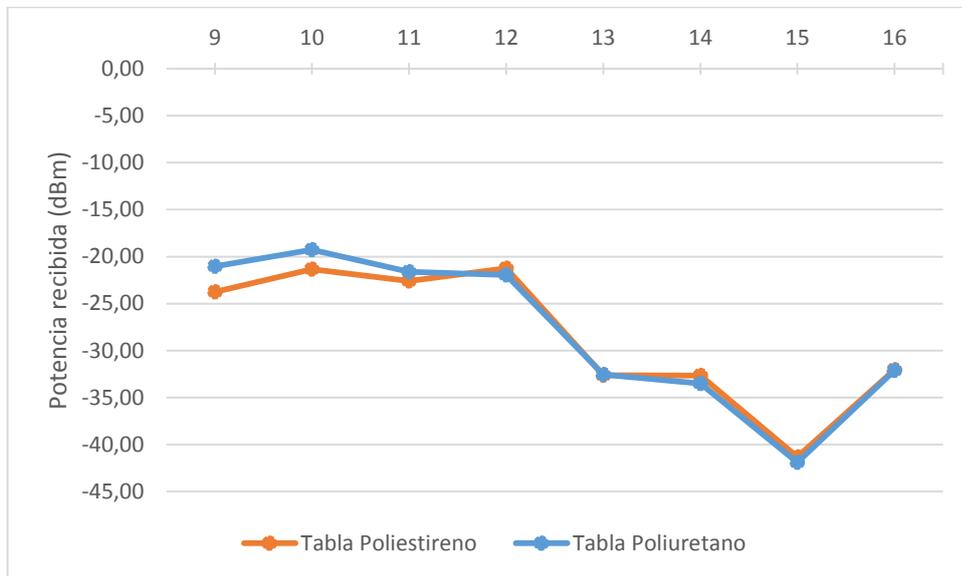
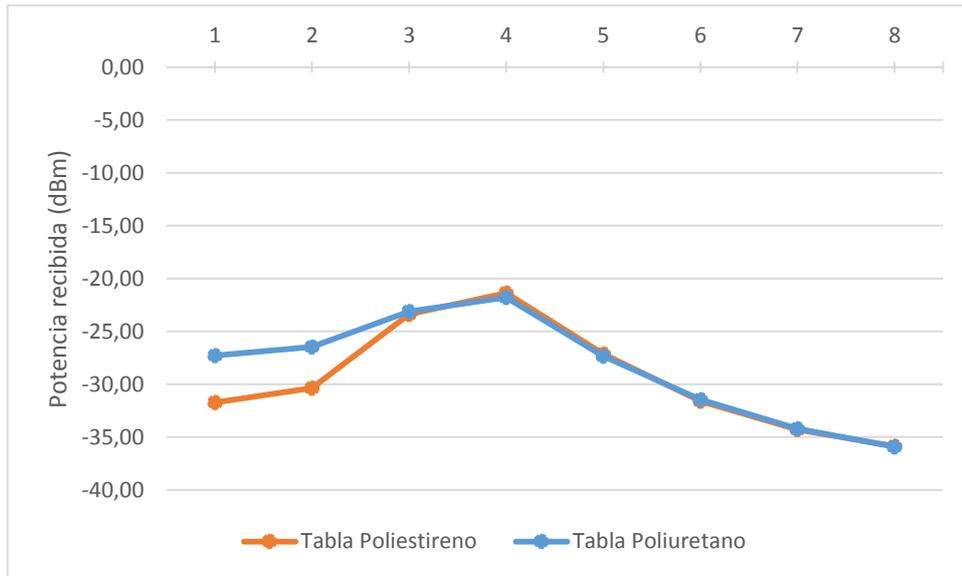


Figura 9.45. Radiales a 2,4GHz.

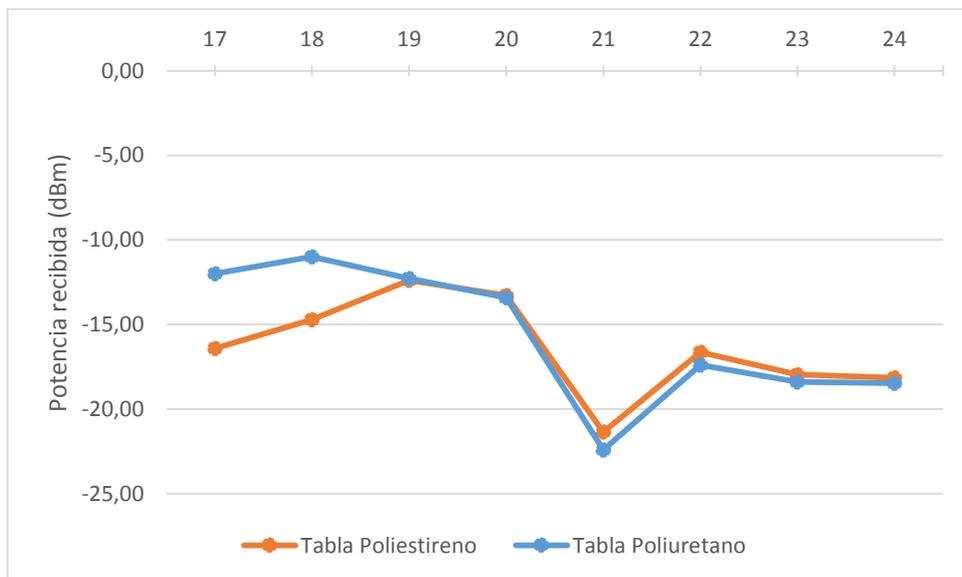
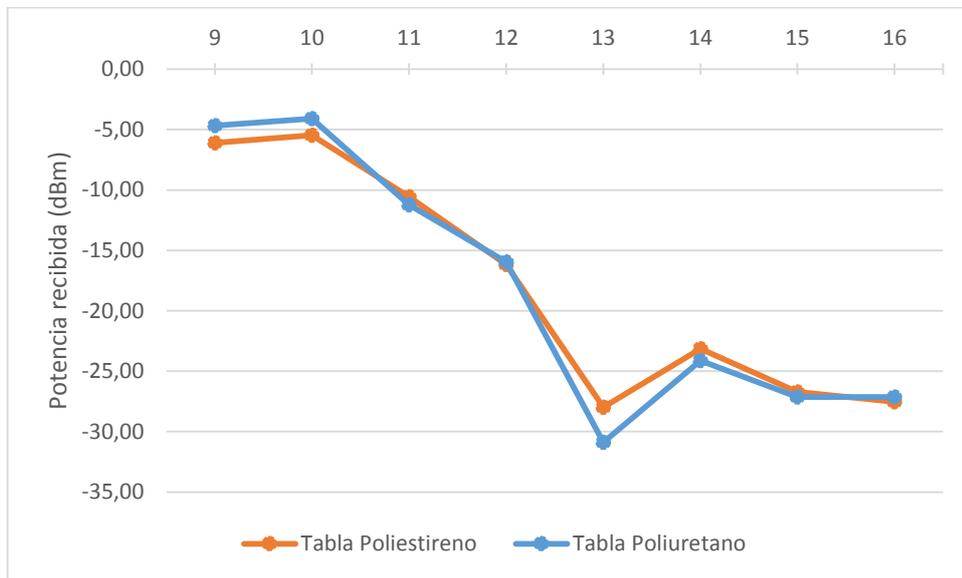
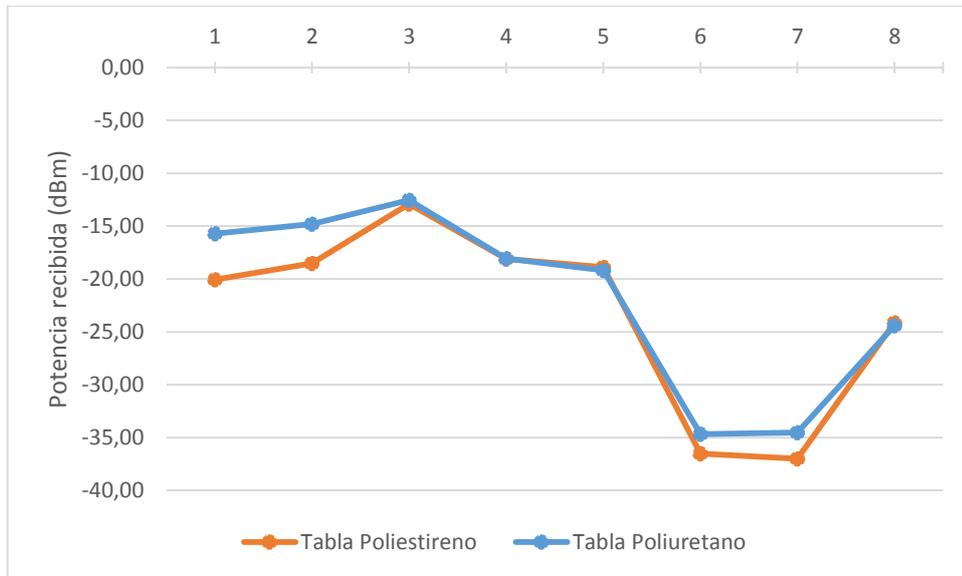


Figura 9.46. Radiales a 868MHz.

– Plano a 90cm con la persona de pie

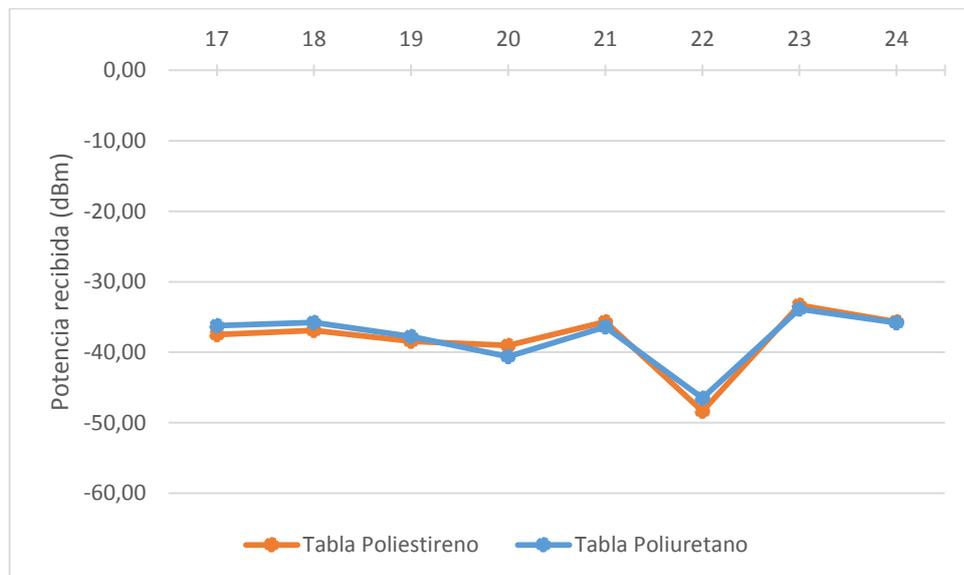
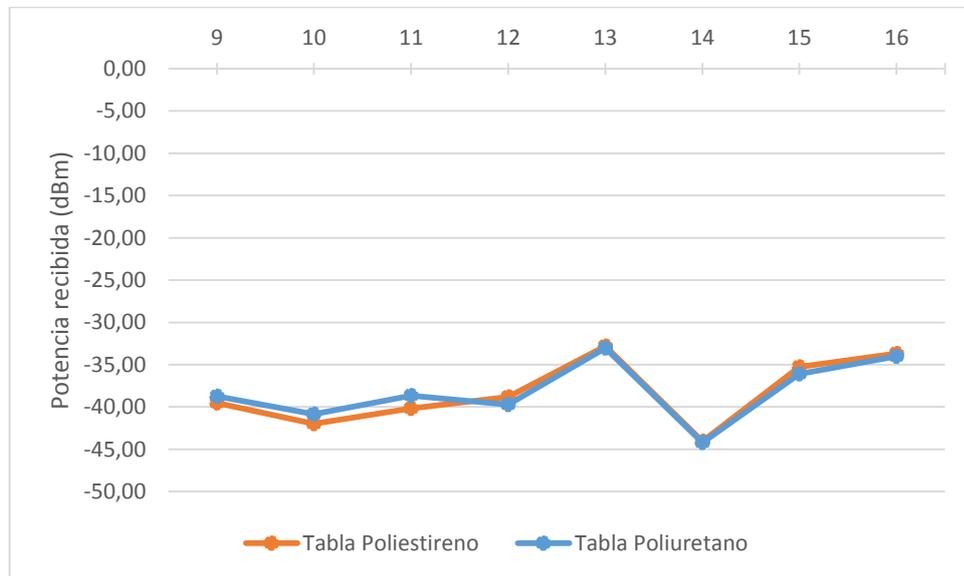
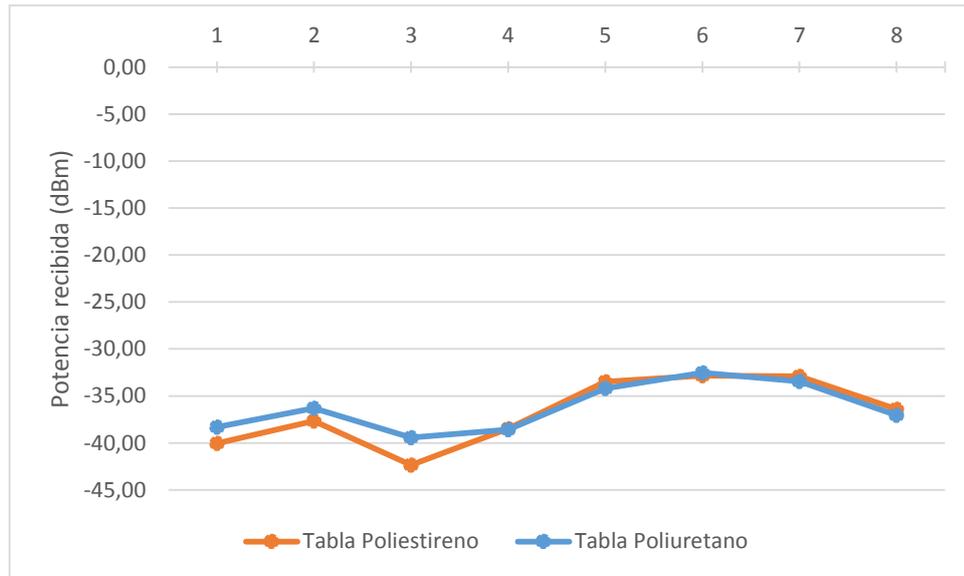


Figura 9.47. Radiales a 2,4GHz.

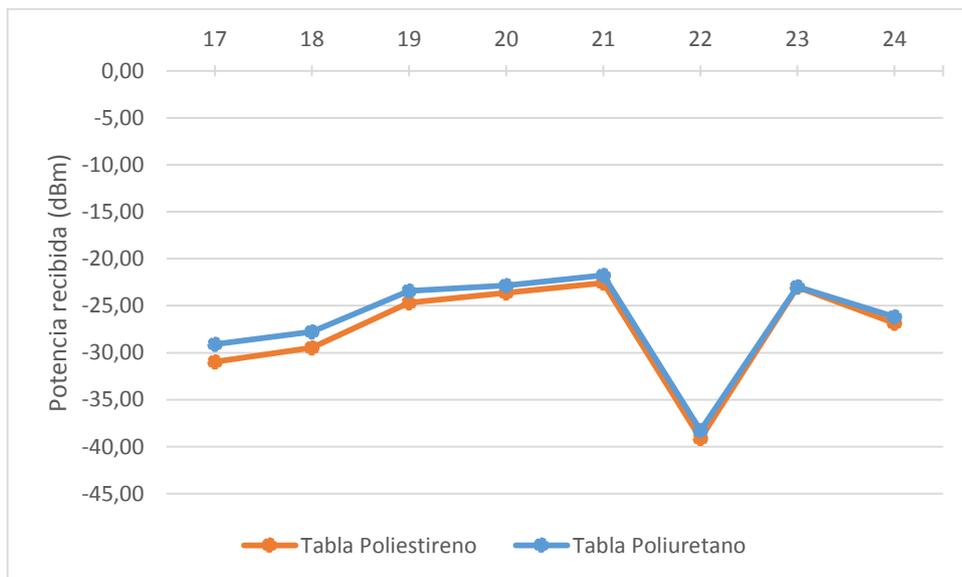
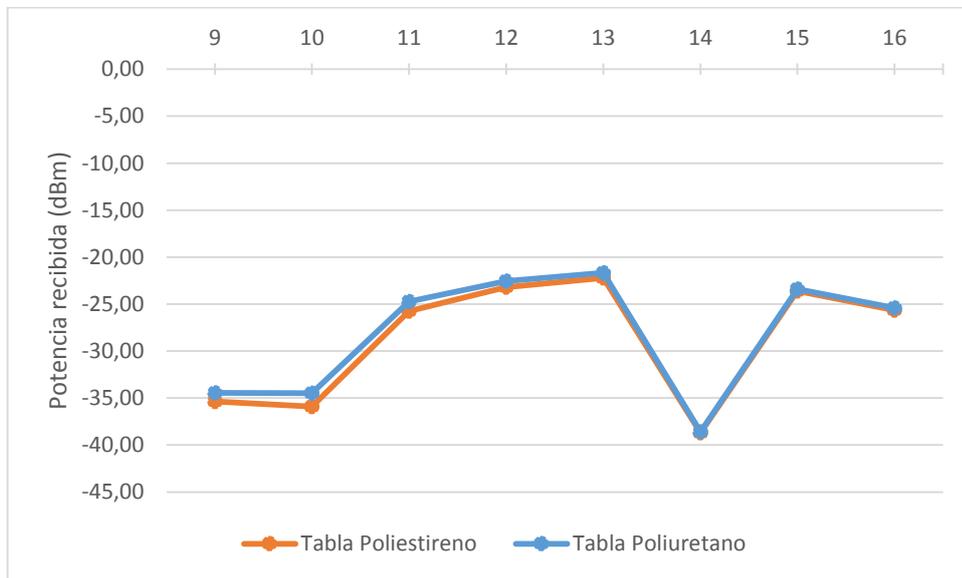
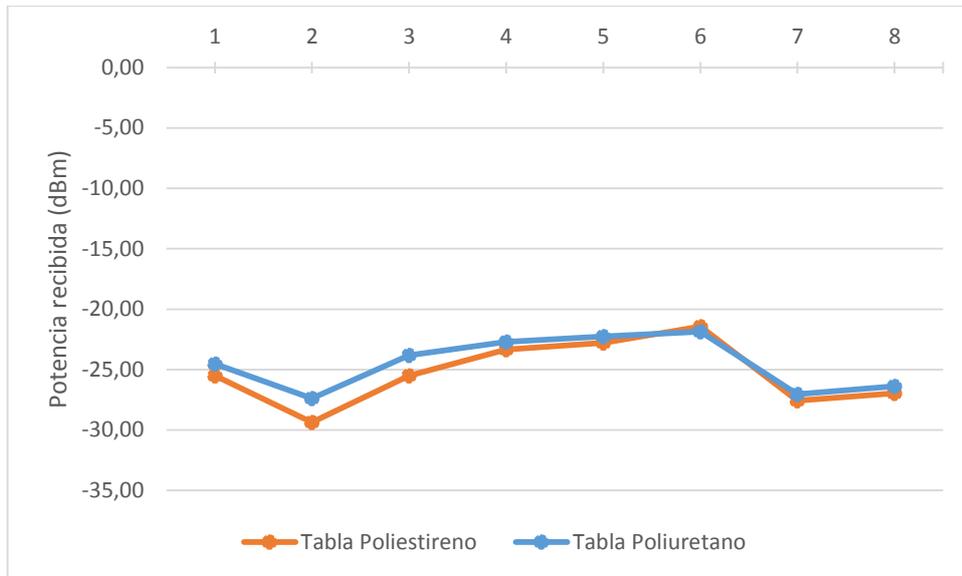
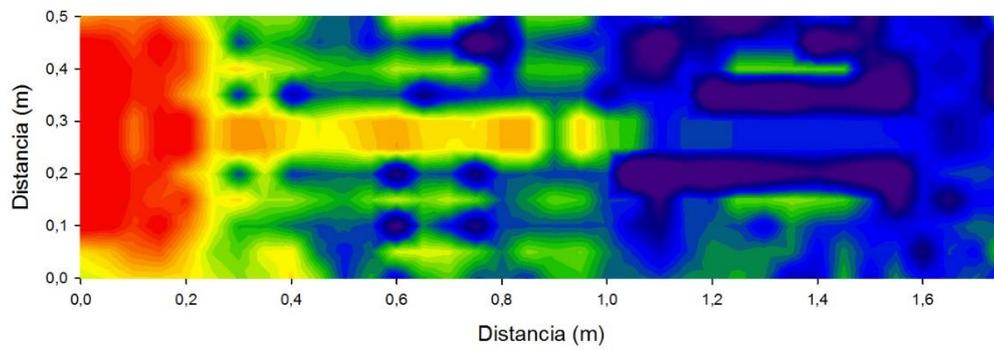


Figura 9.48. Radiales a 868MHz.

## Mapas bidimensionales

- Tabla de poliestireno
  - Persona tumbada

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

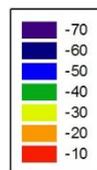
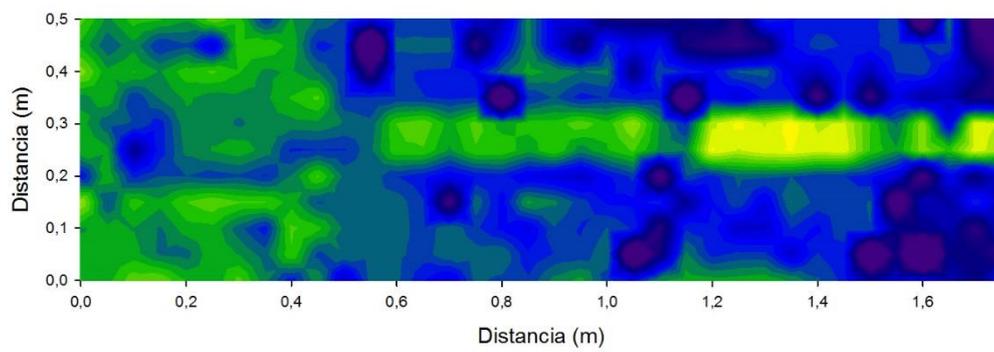
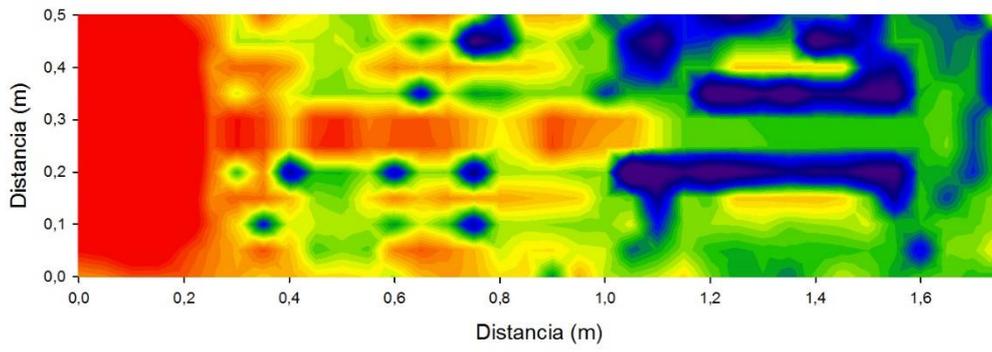


Figura 9.49. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

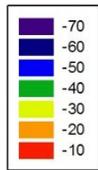
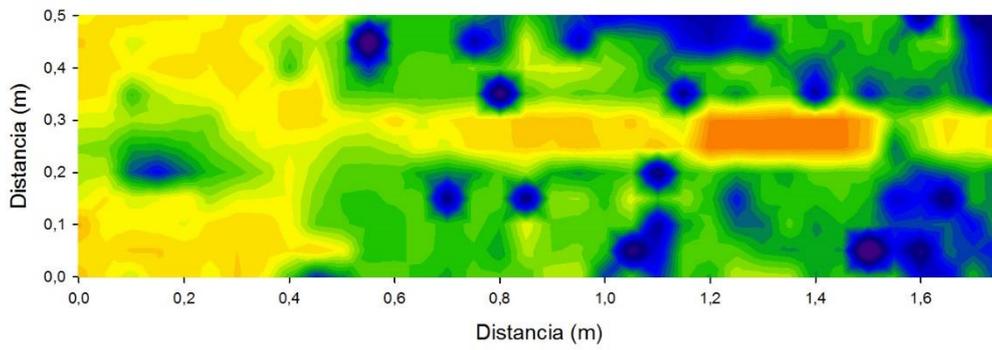
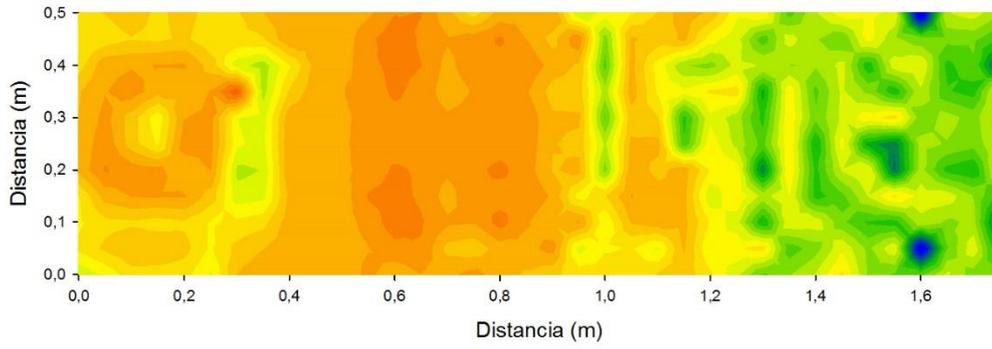


Figura 9.50. Planos a 868MHz.

– Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

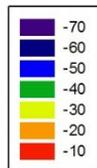
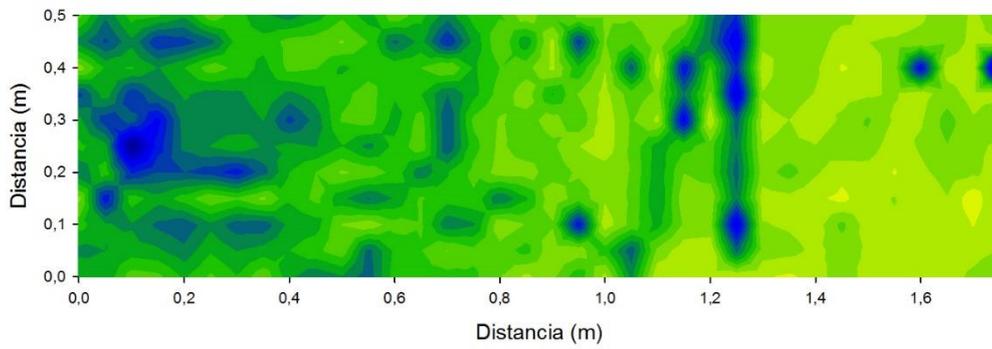
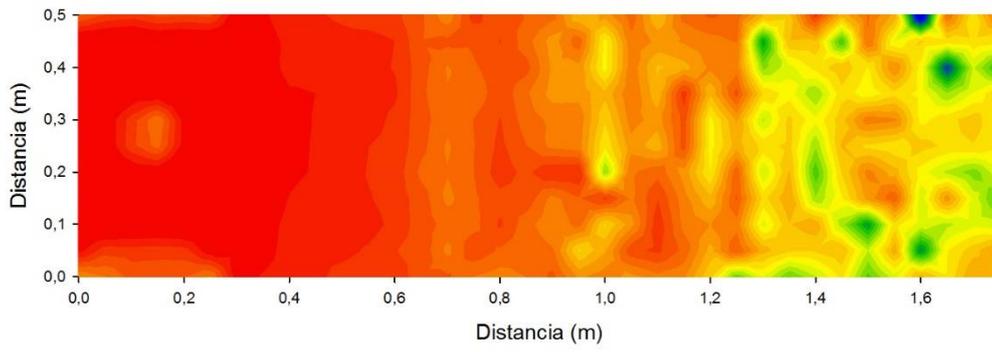


Figura 9.51. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

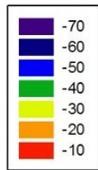
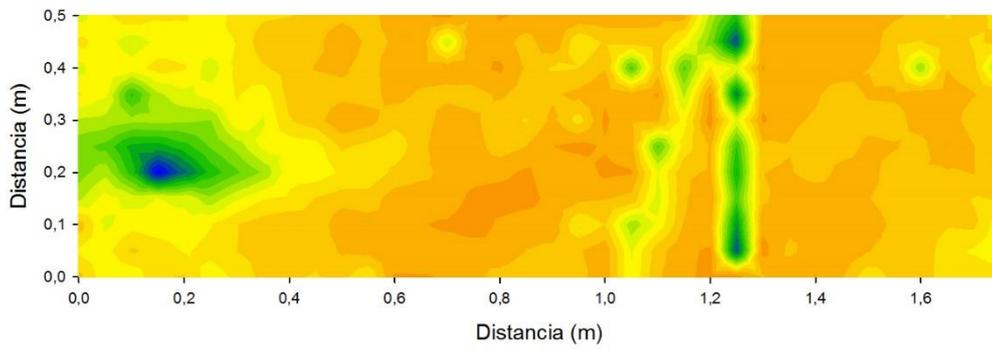
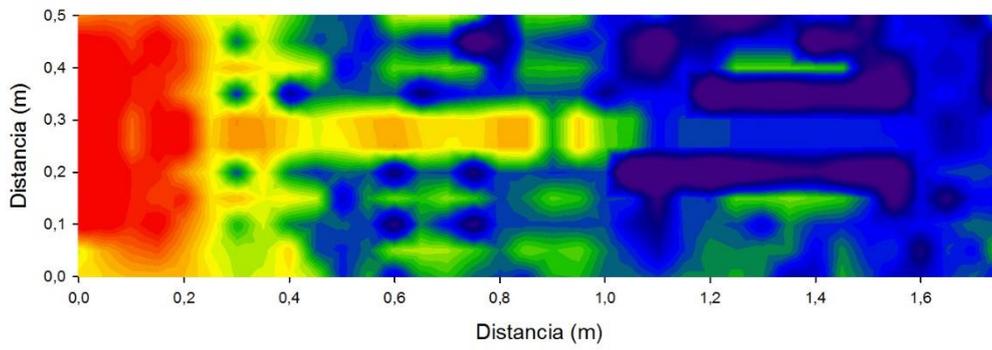


Figura 9.52. Planos a 868MHz.

- Tabla de poliuretano
  - Persona tumbada

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

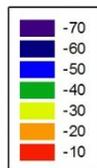
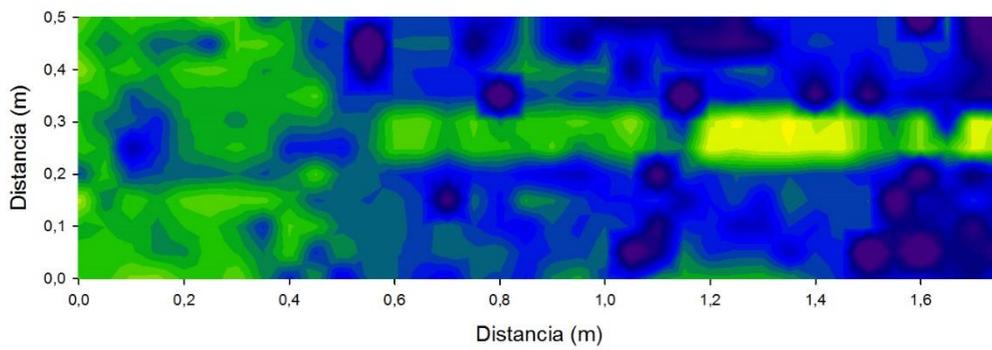
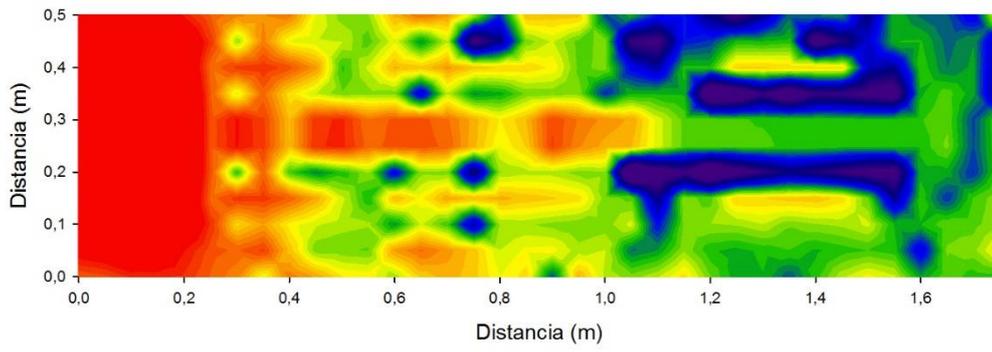


Figura 9.53. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

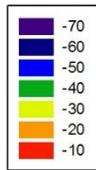
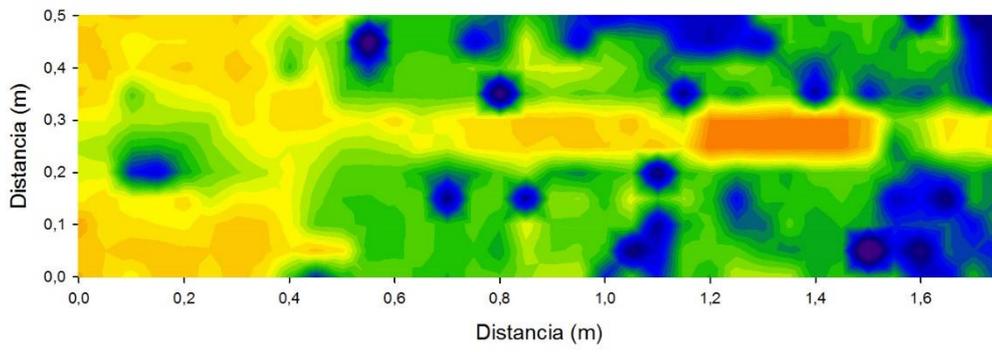
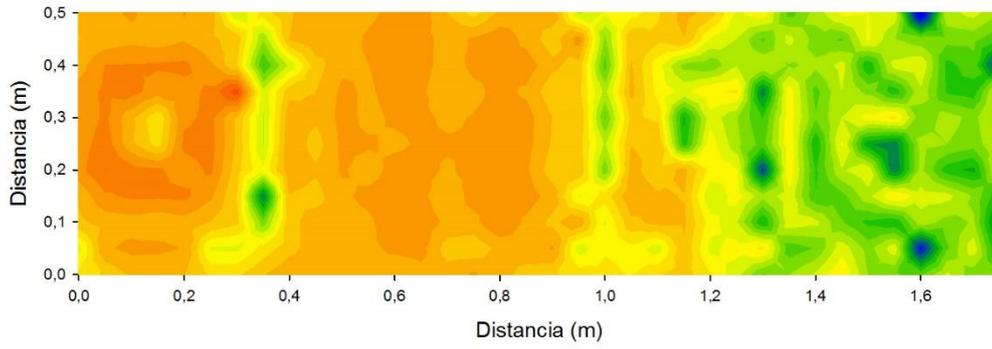


Figura 9.54. Planos a 868MHz.

– Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

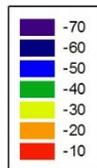
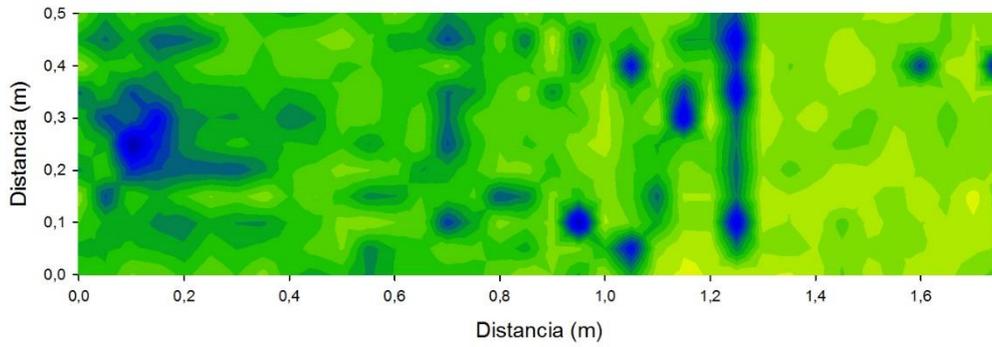
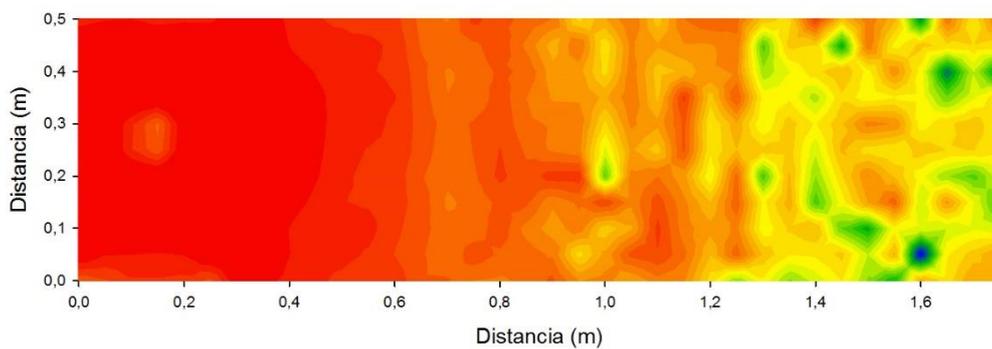


Figura 9.55. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

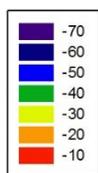
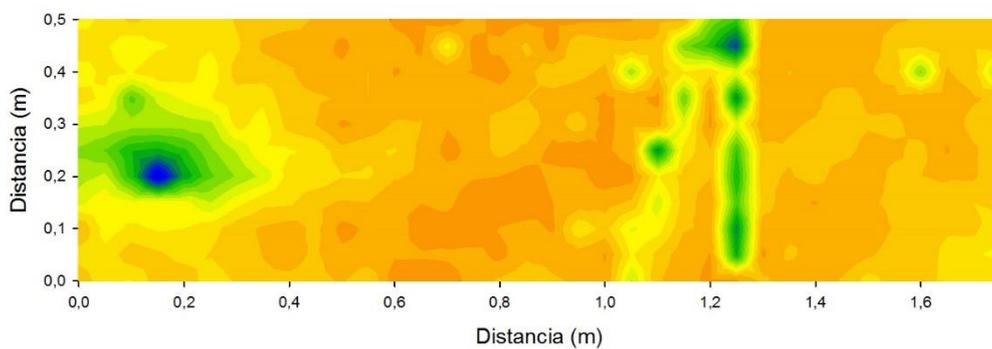
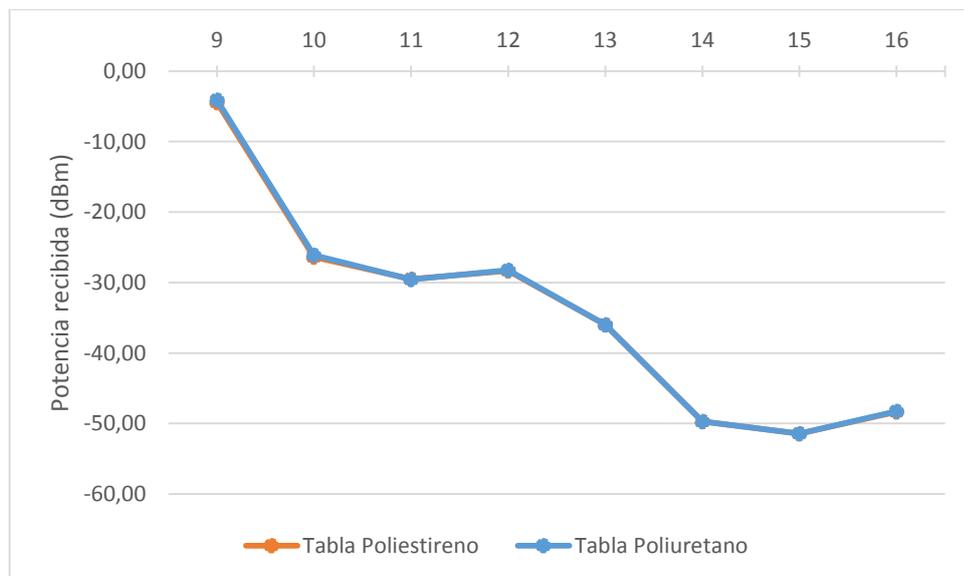
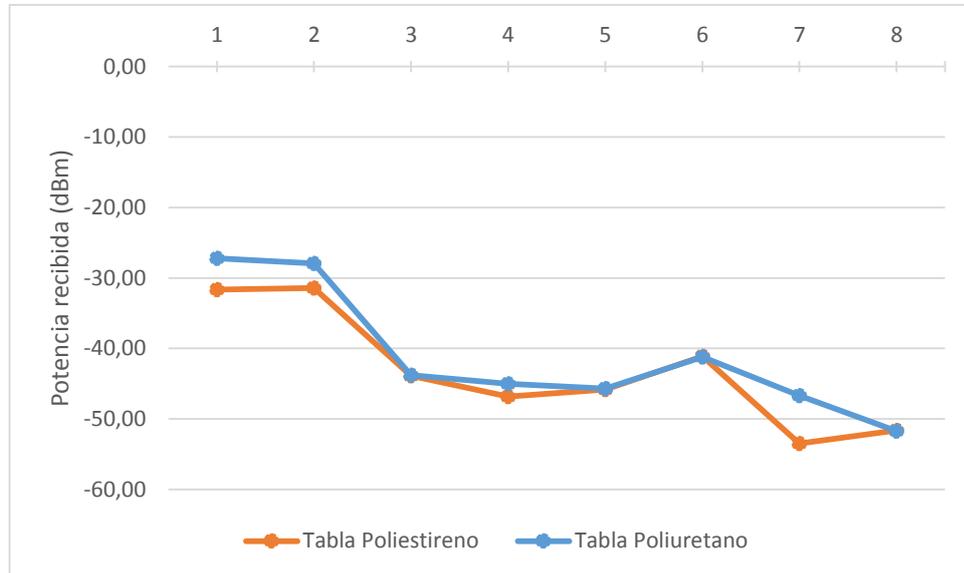


Figura 9.56. Planos a 868MHz.

#### 9.1.1.2.4. Caso 4: Agua salada y piel mojada

### Radiales de potencia

- Plano a 30 cm con la persona tumbada



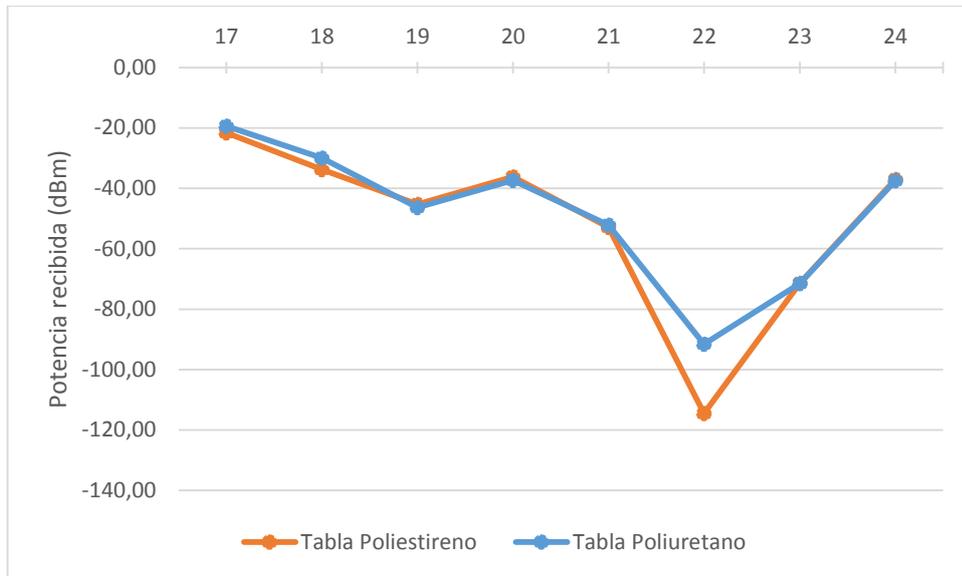
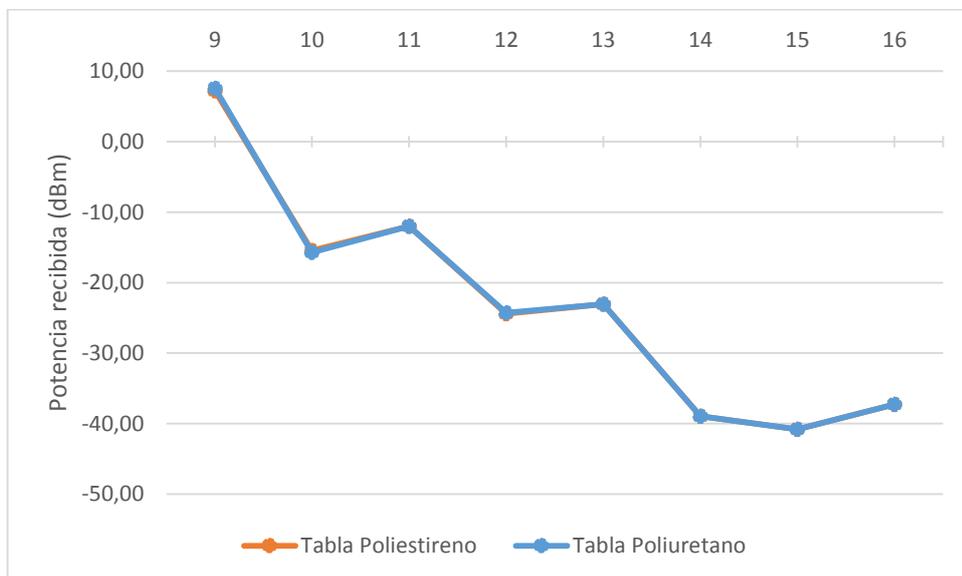
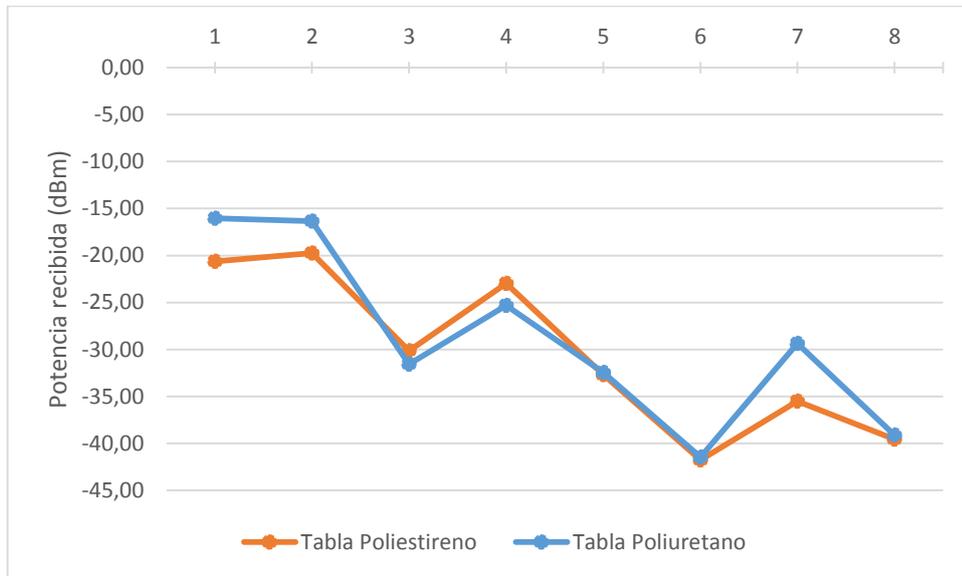


Figura 9.57. Radiales a 2,4GHz.



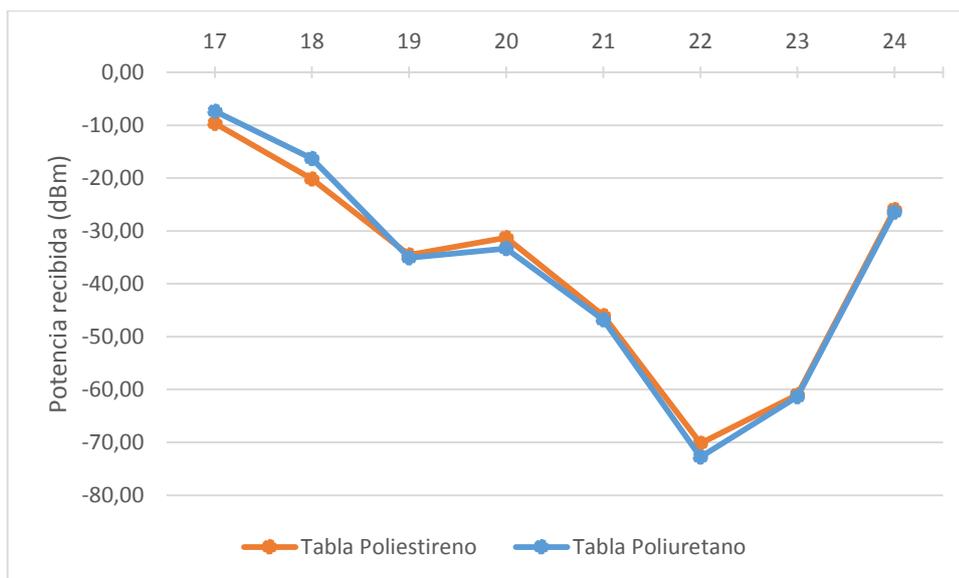
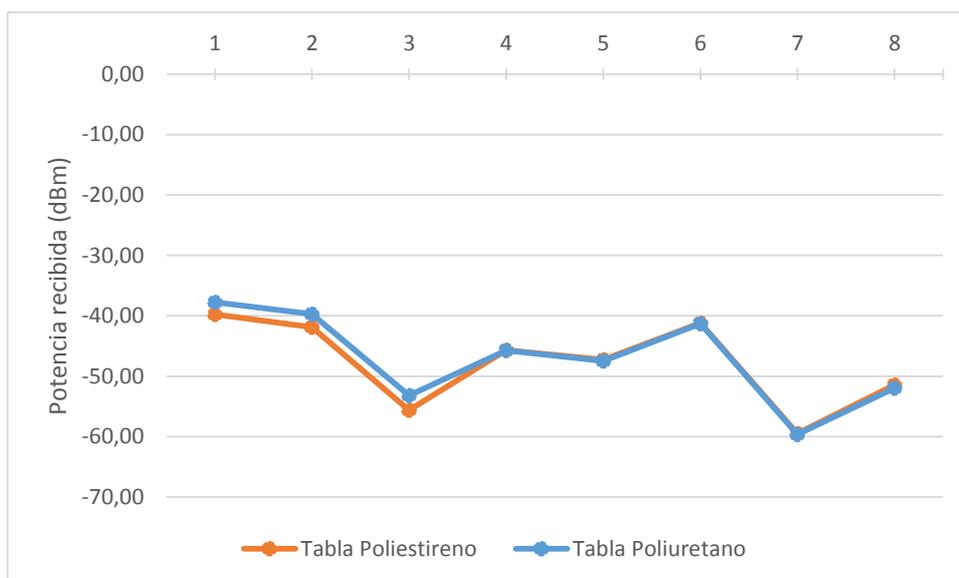


Figura 9.58. Radiales a 868MHz.

– Plano a 90 cm con la persona tumbada



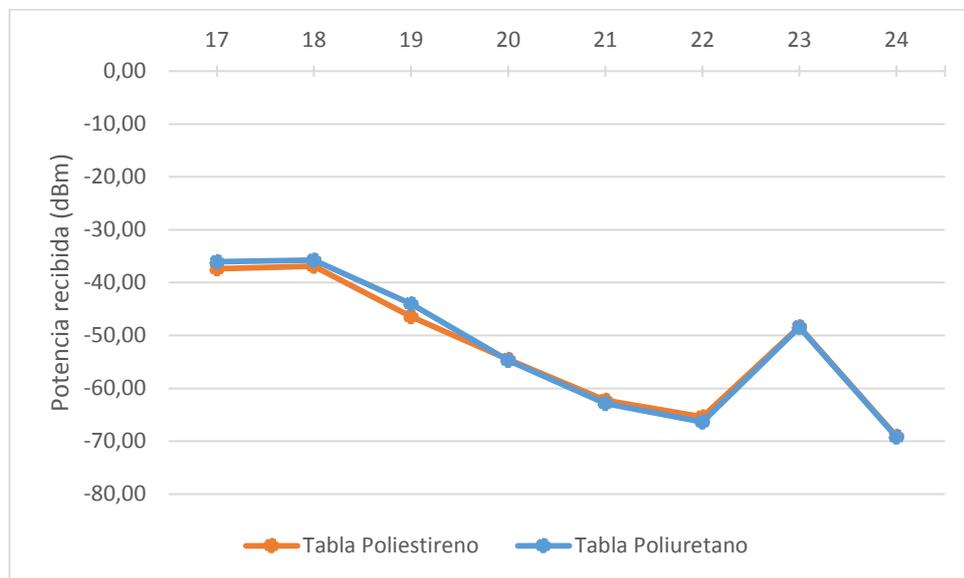
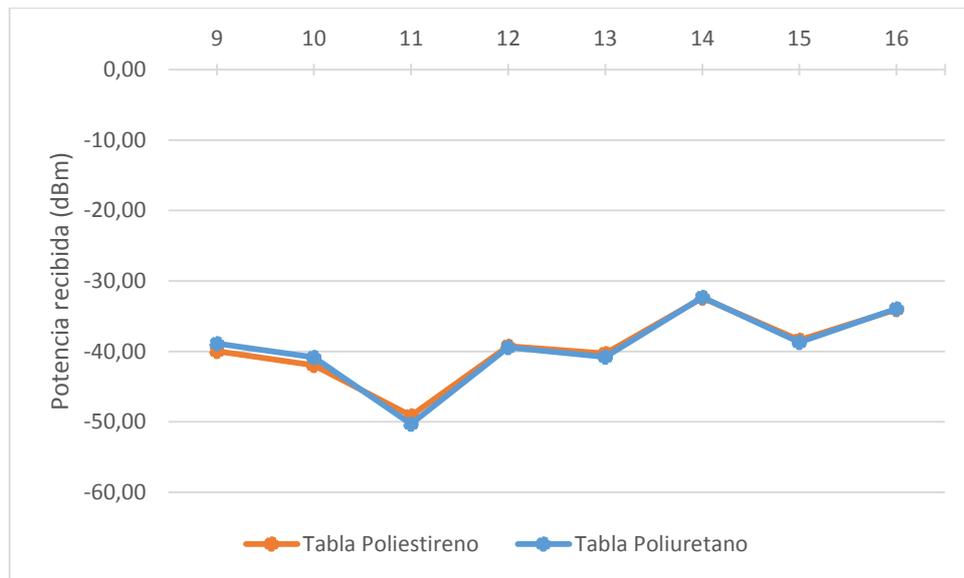


Figura 9.59. Radiales a 2,4GHz.

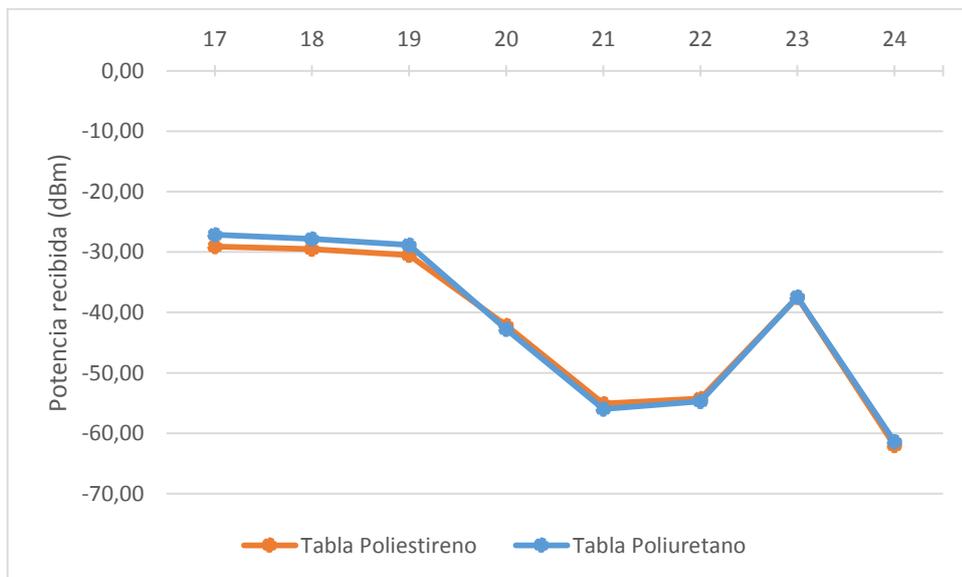
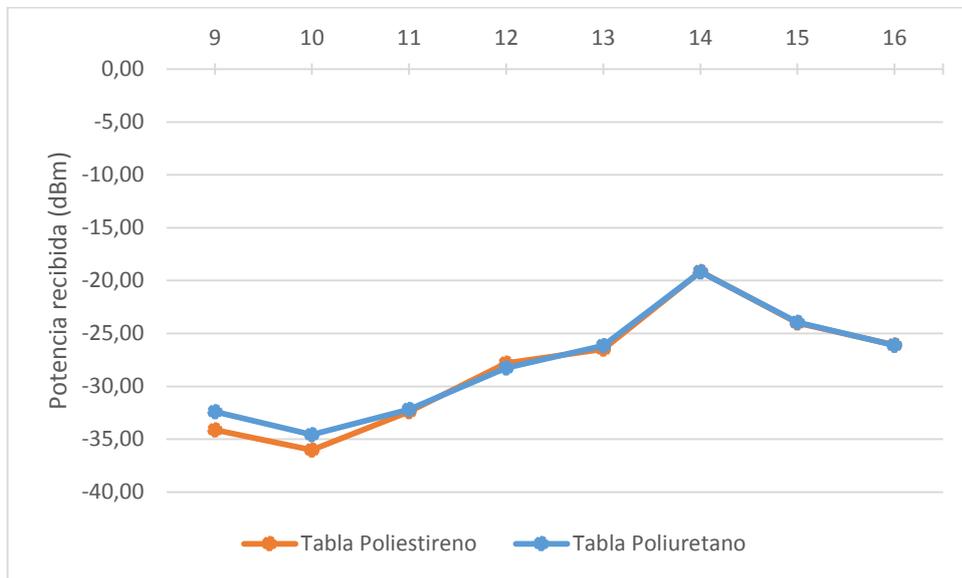
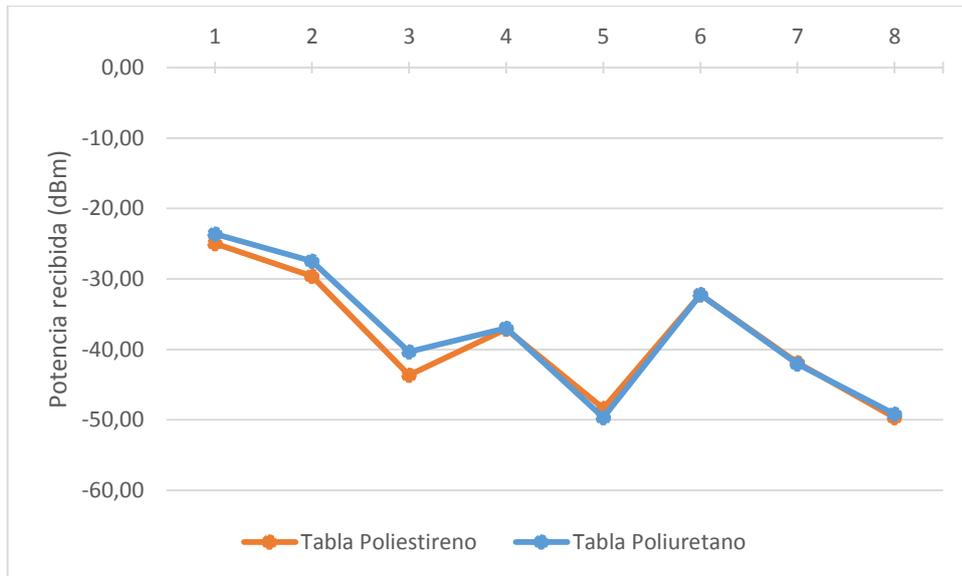


Figura 9.60. Radiales a 868MHz.

– Plano a 30 cm con la persona de pie

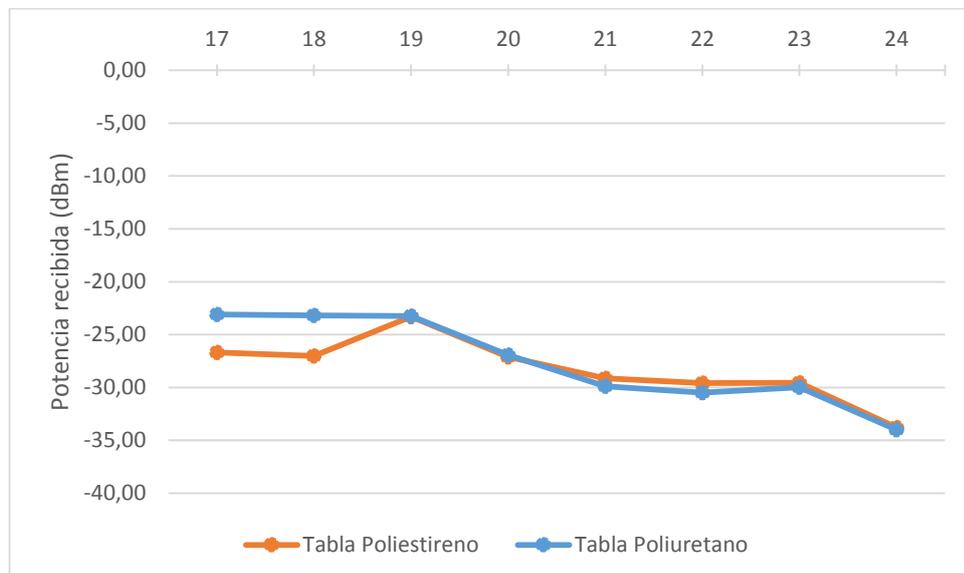
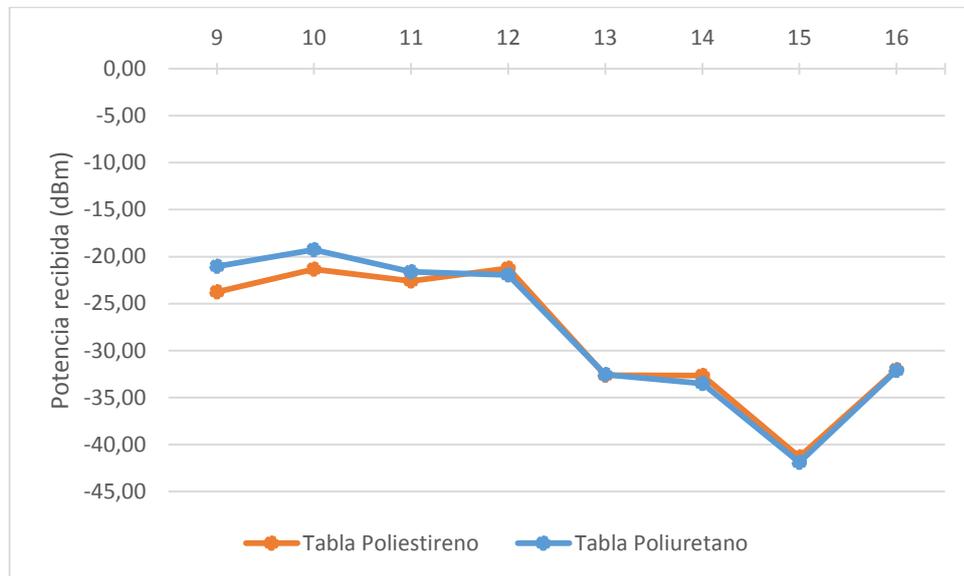
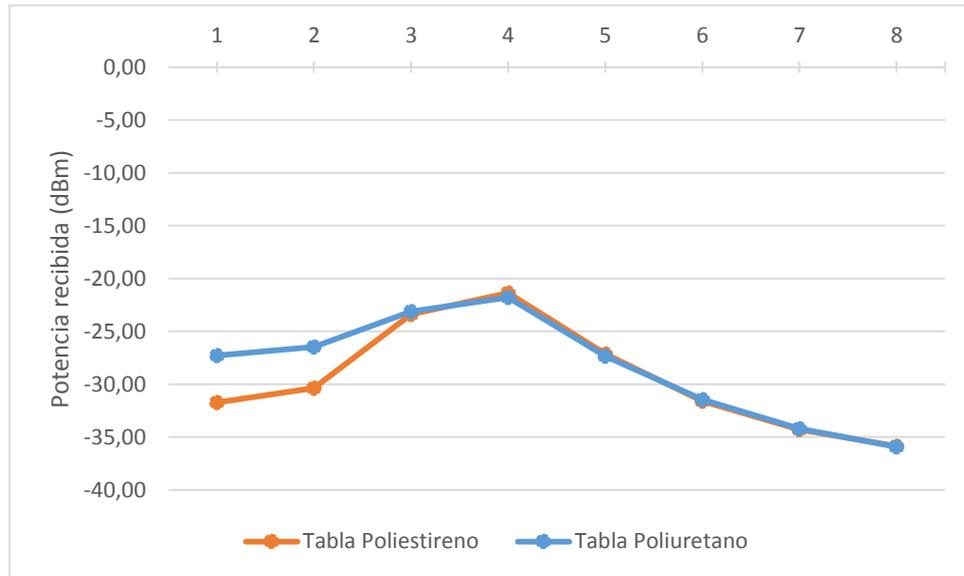


Figura 9.61. Radiales a 2,4GHz.

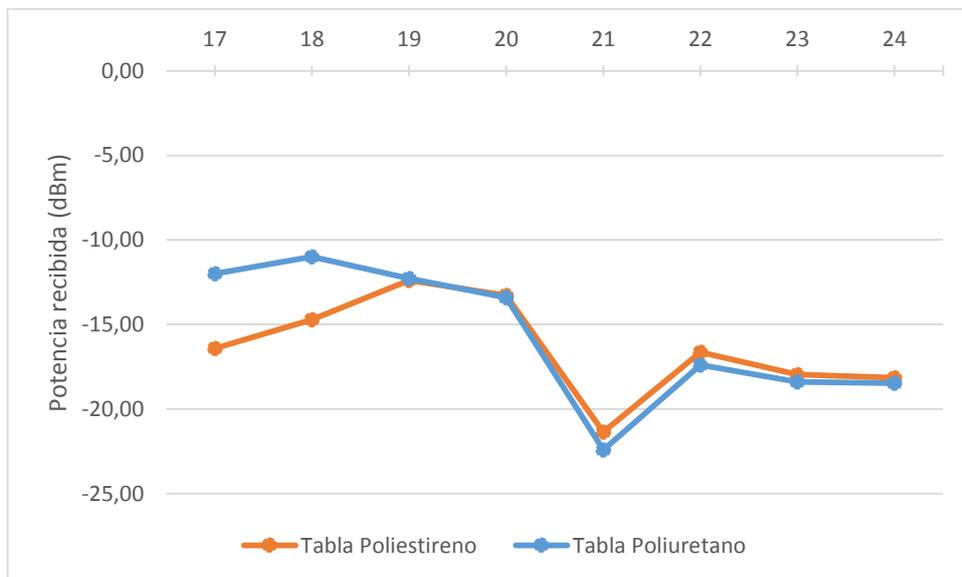
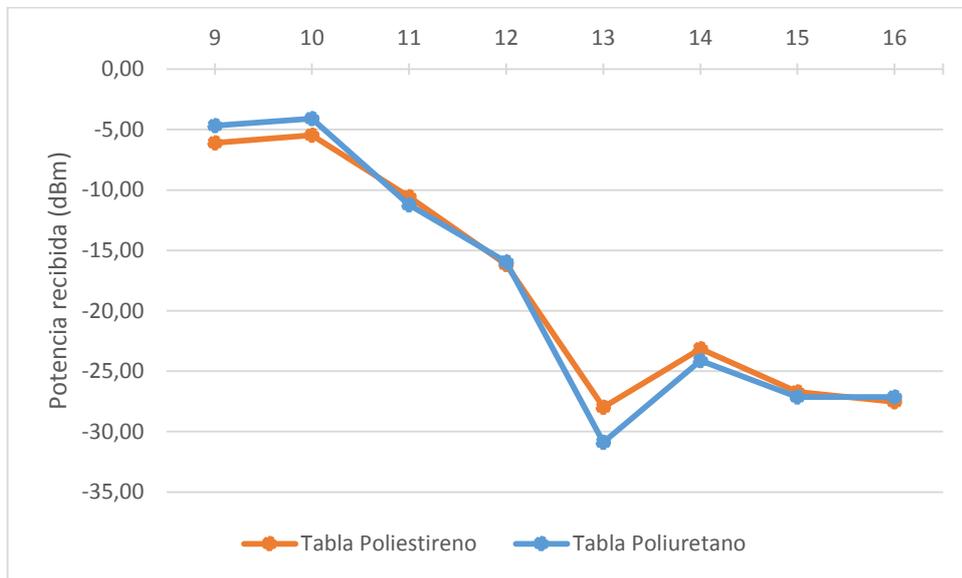
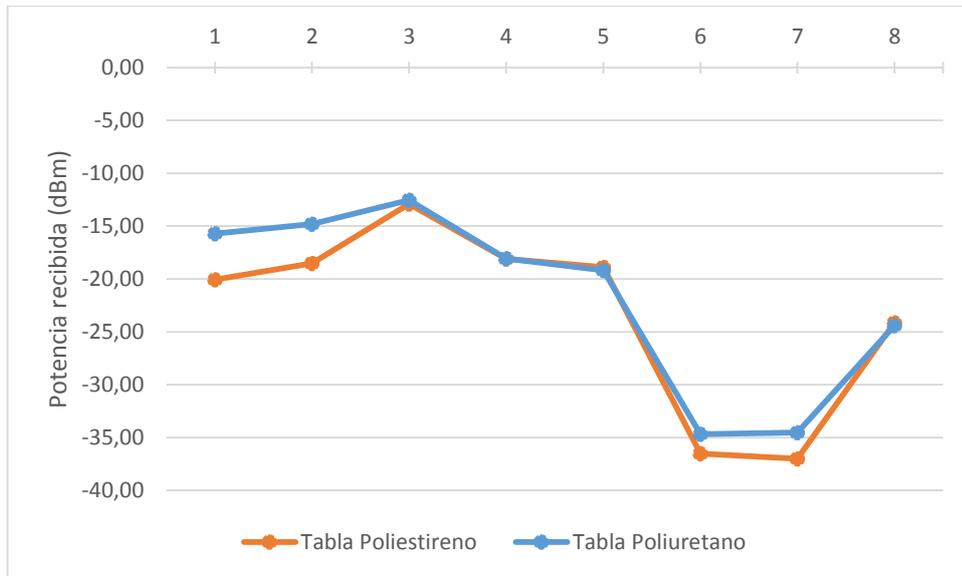


Figura 9.62. Radiales a 868MHz.

– Plano a 90 cm con la persona de pie

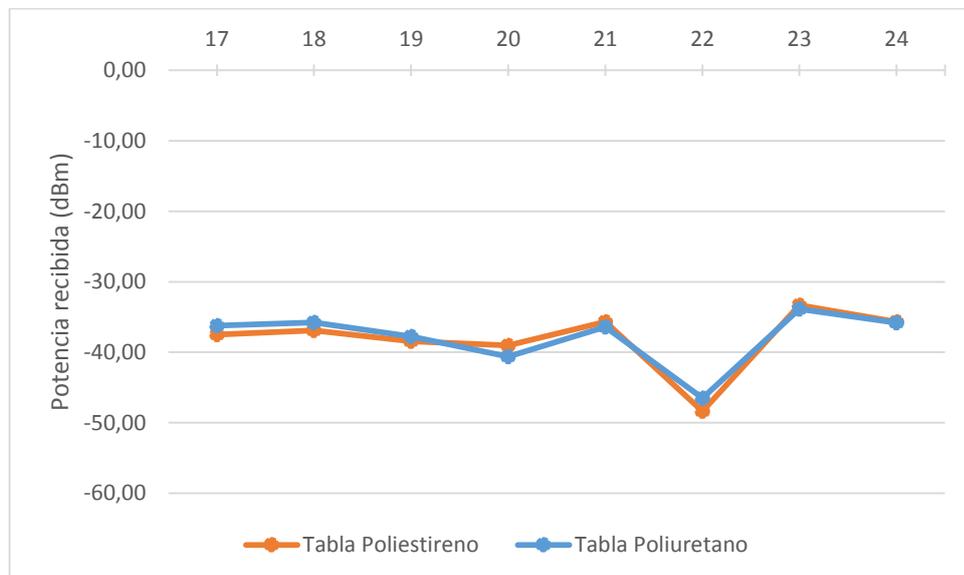
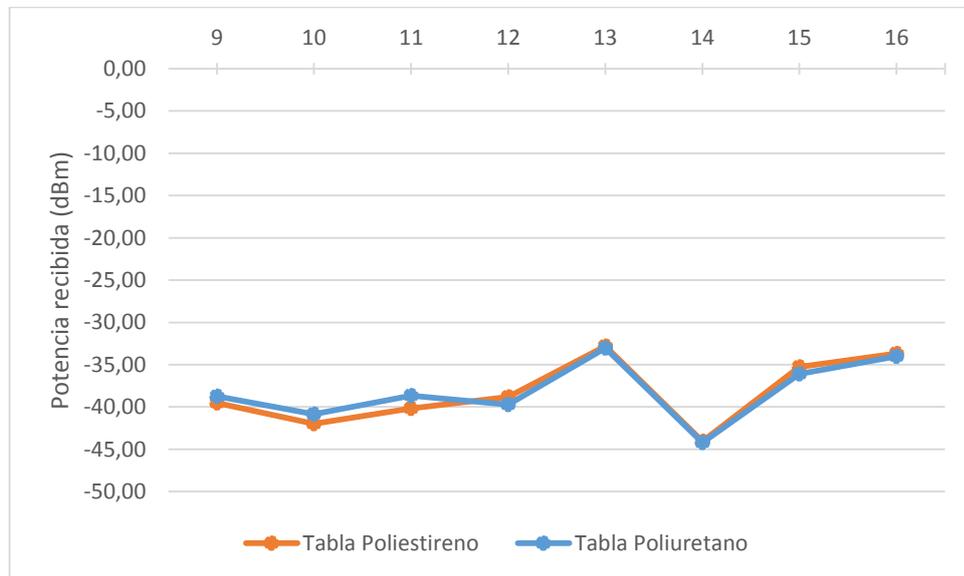
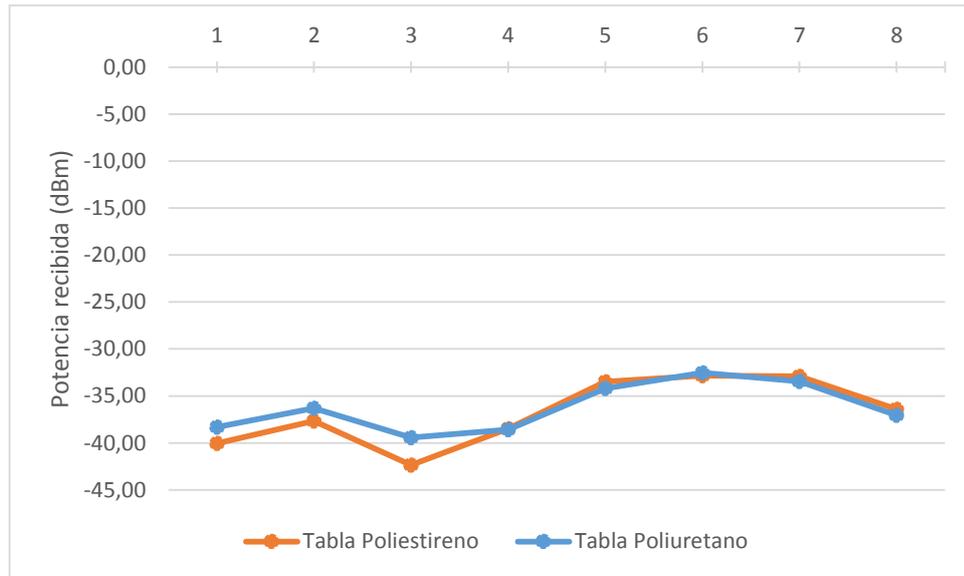


Figura 9.63. Radiales a 2,4GHz.

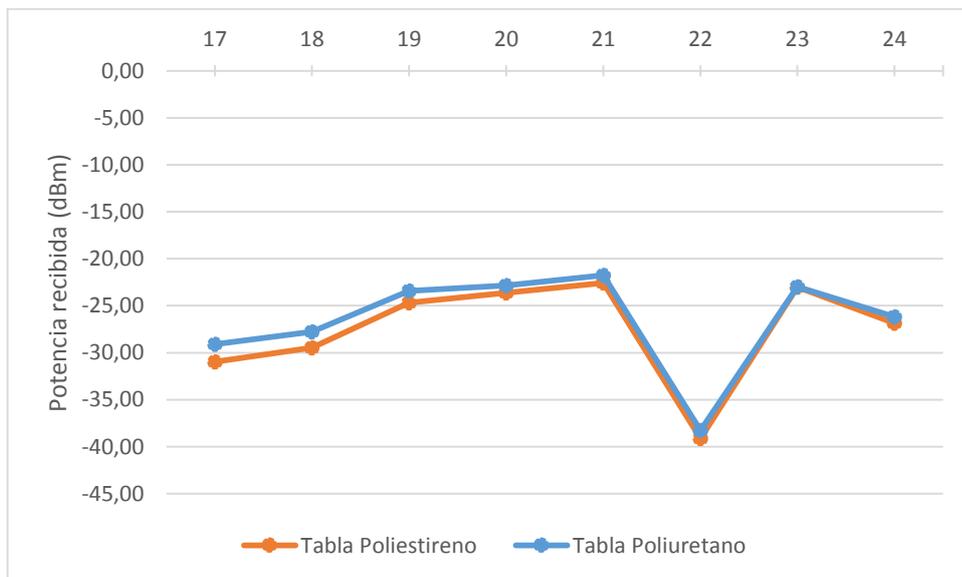
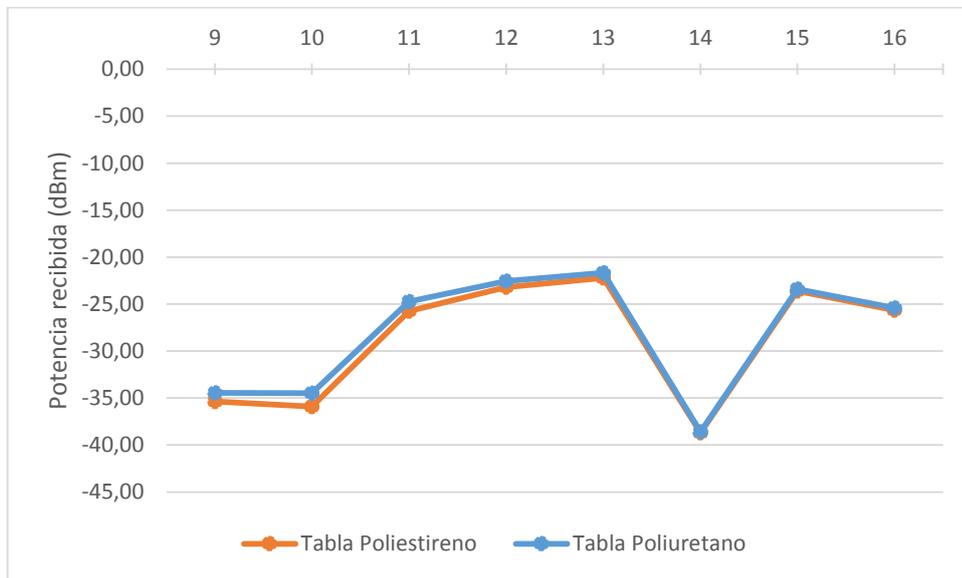
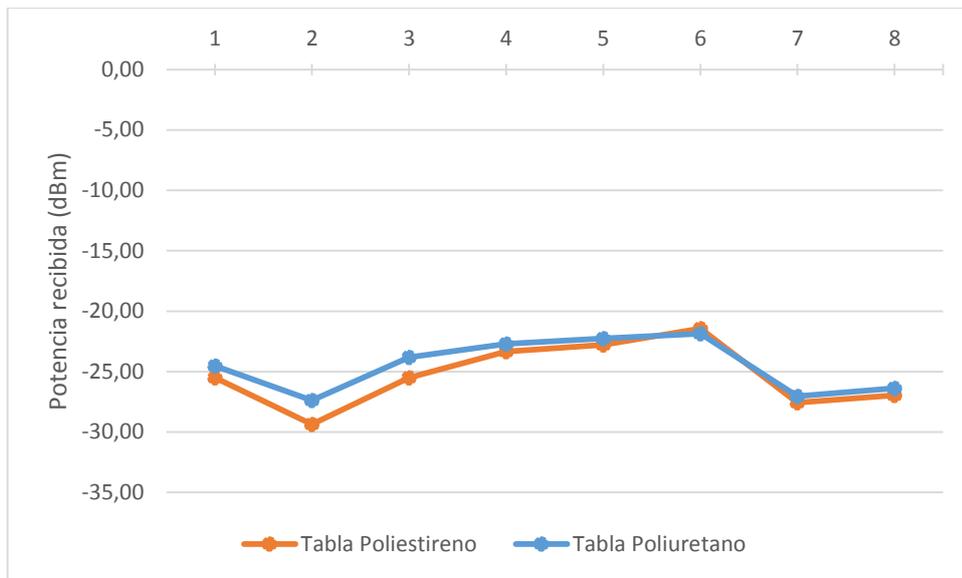
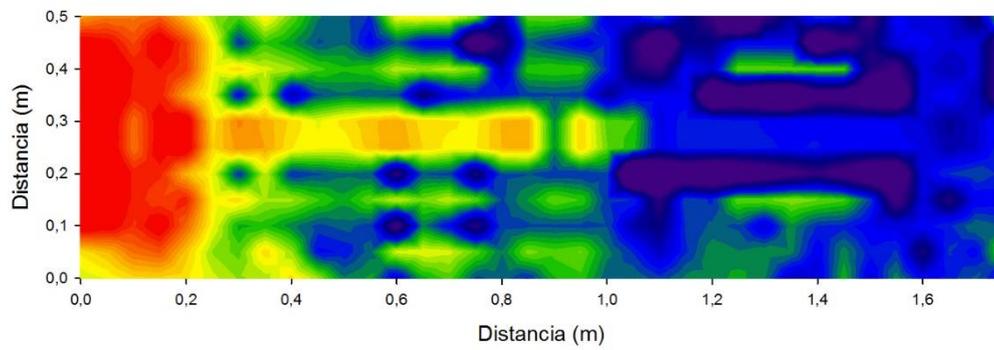


Figura 9.64. Radiales a 868MHz.

## Mapas bidimensionales

- Tabla de poliestireno
  - Persona tumbada

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

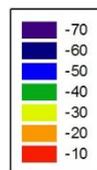
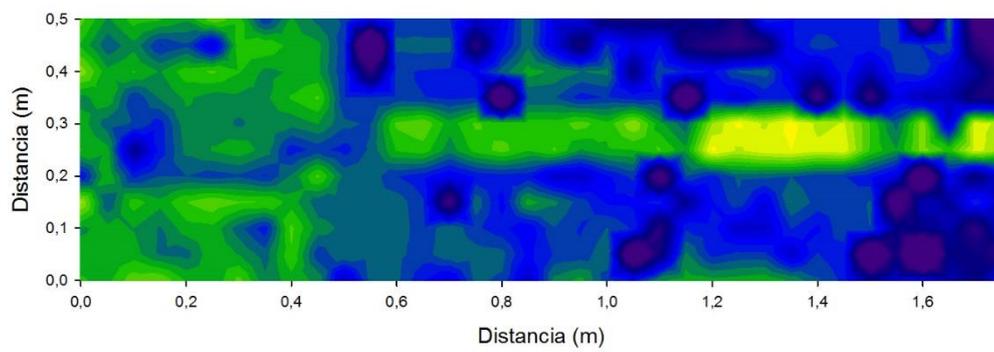
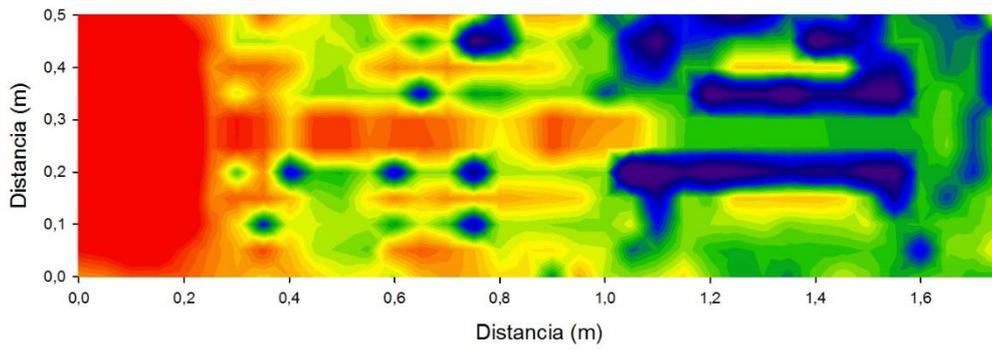


Figura 9.65. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

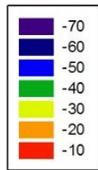
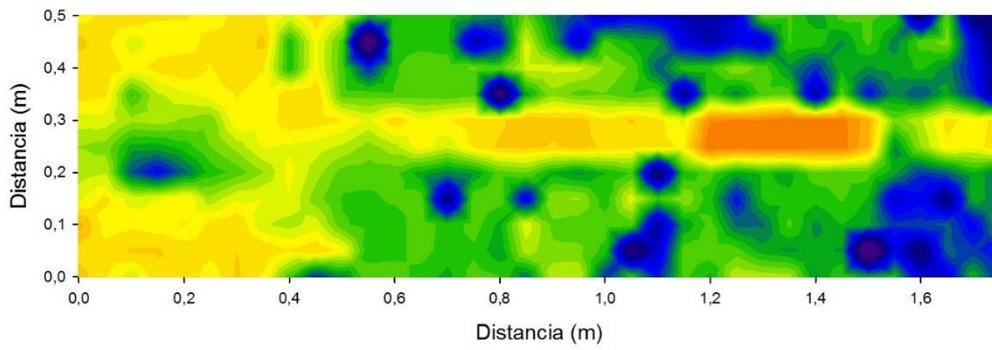
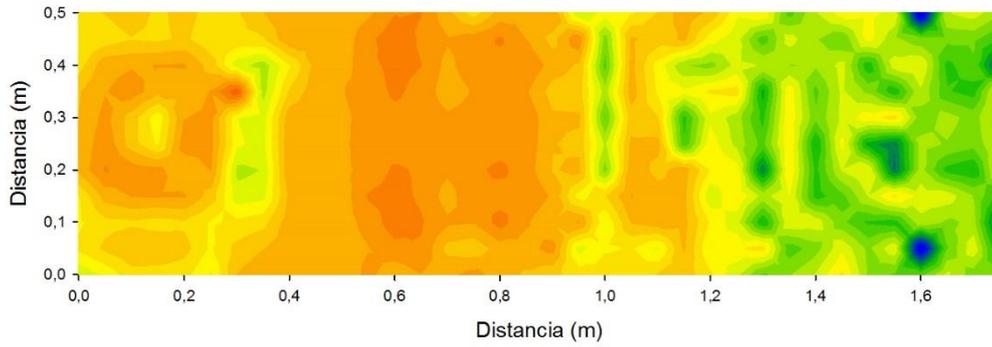


Figura 9.66. Planos a 868MHz.

– Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

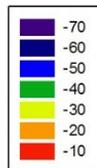
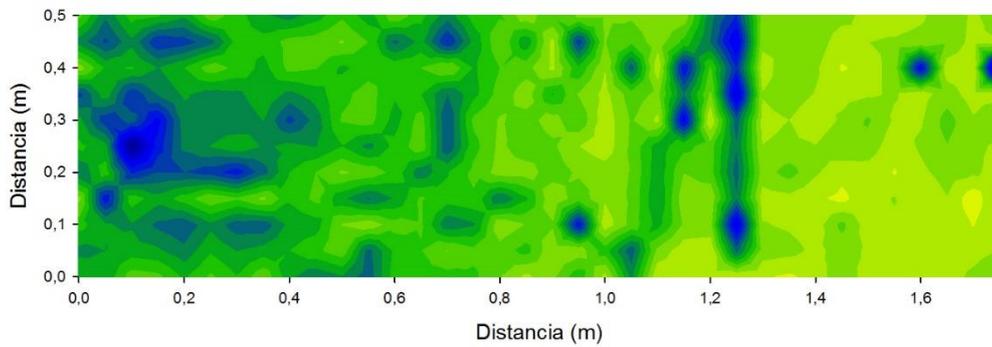
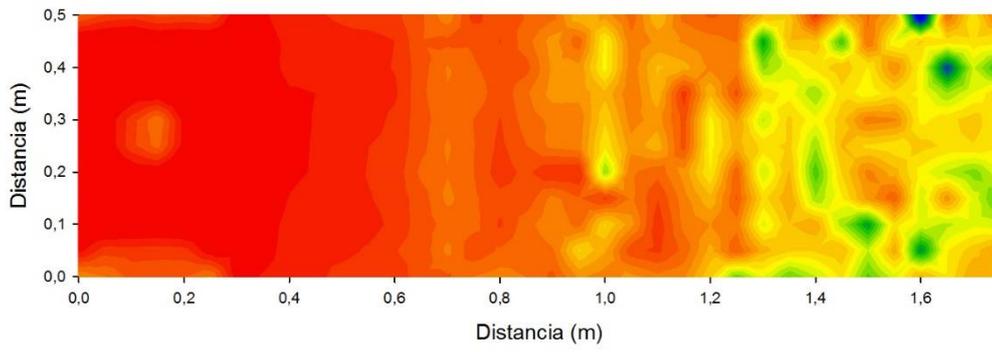


Figura 9.67. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

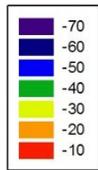
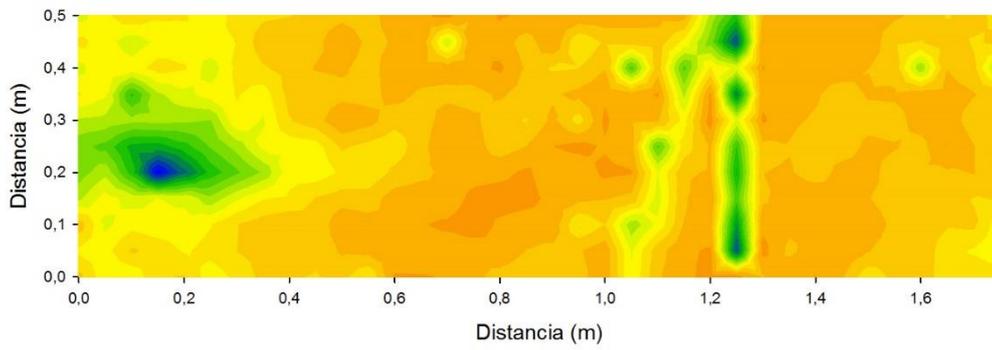
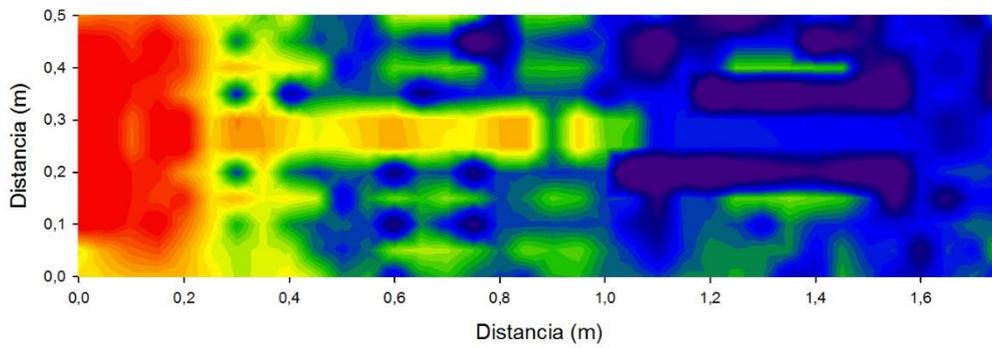


Figura 9.68. Planos a 868MHz.

- Tabla de poliuretano
  - Persona tumbada

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

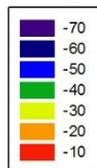
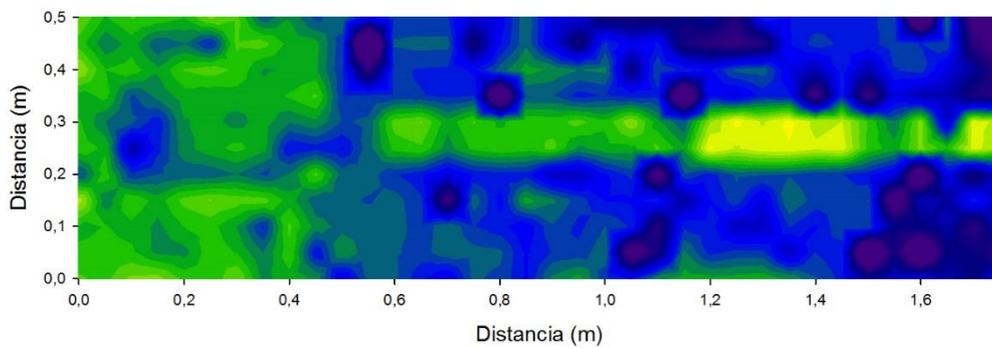
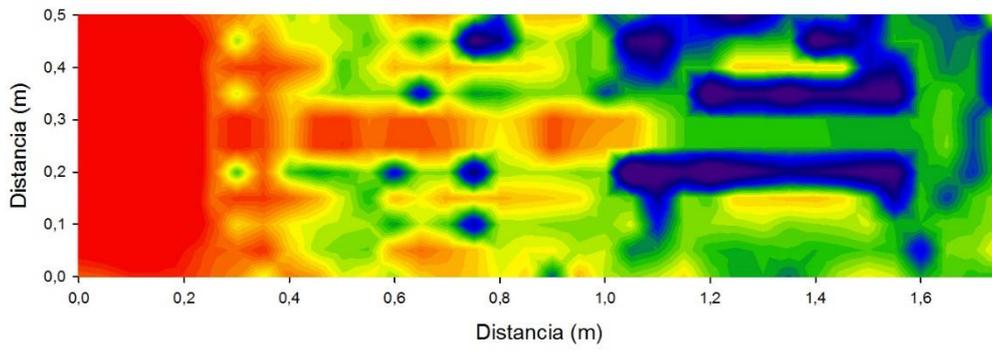


Figura 9.69. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

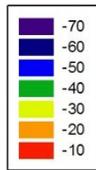
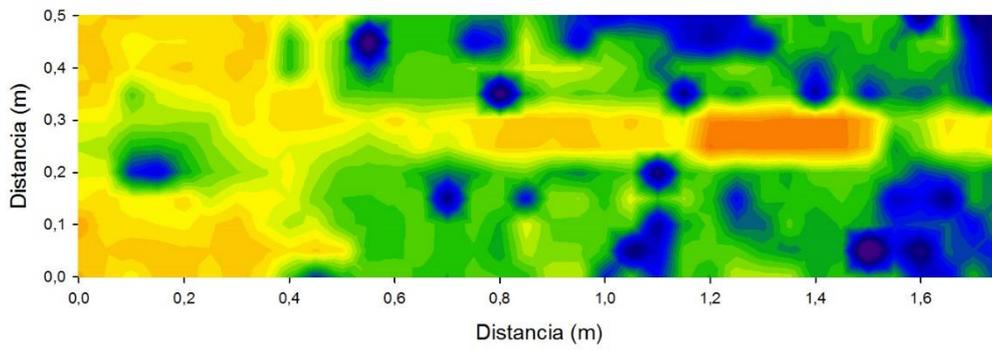
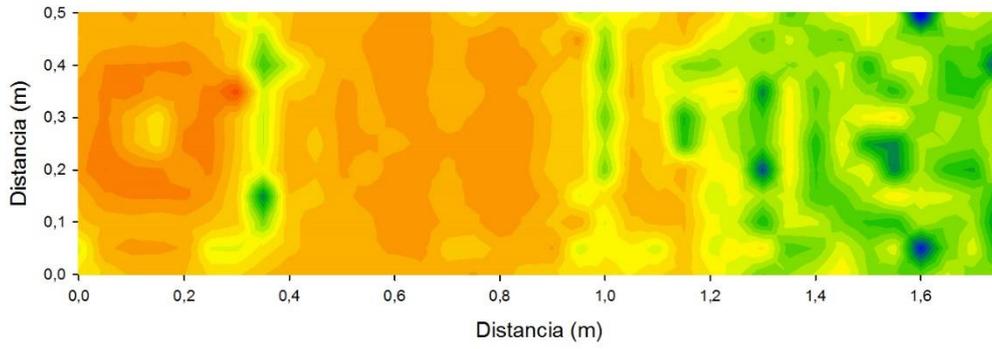


Figura 9.70. Planos a 868MHz.

– Persona de pie

**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m**



**POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m**

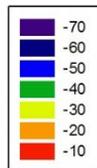
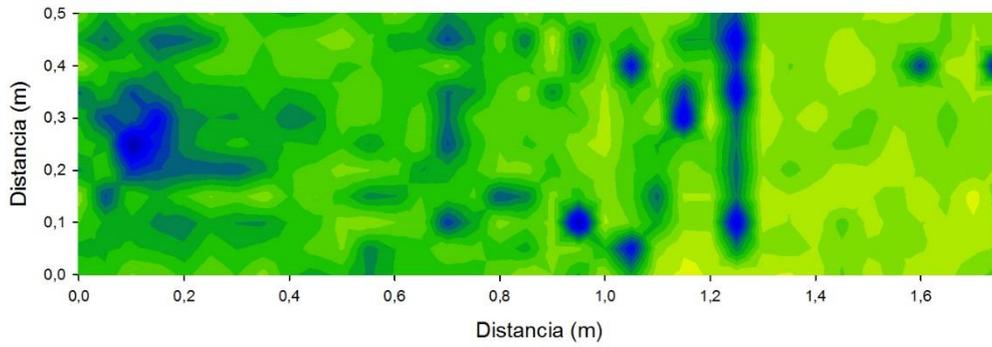
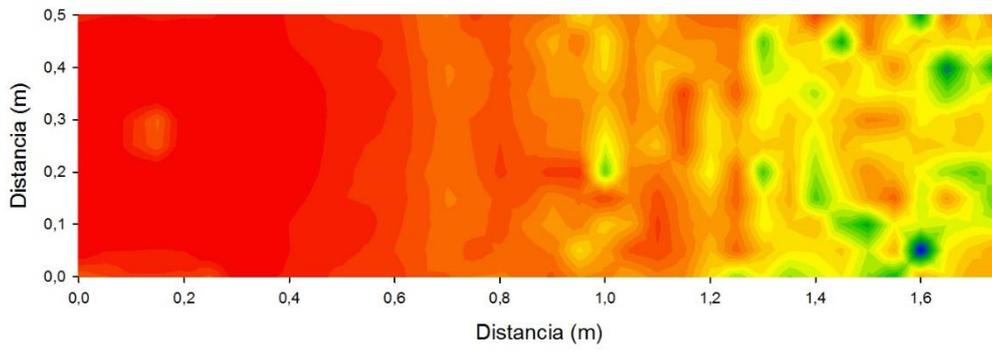


Figura 9.71. Planos a 2,4GHz.

POTENCIA (dBm) - Altura = 0,3m



POTENCIA (dBm) - Altura = 0,9m

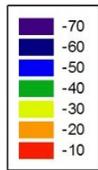
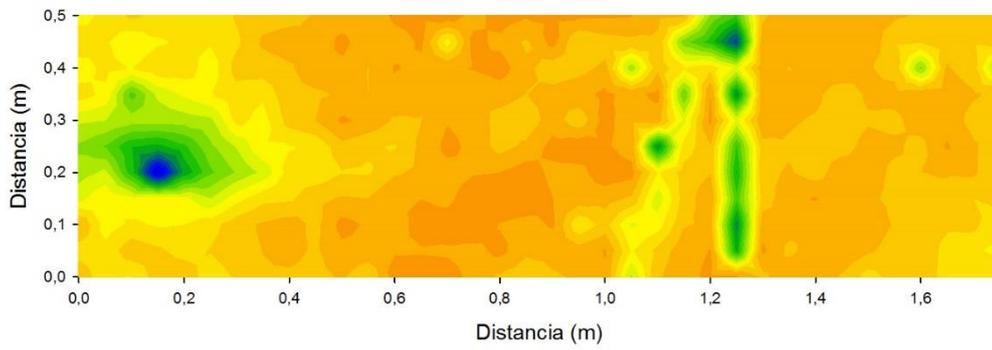


Figura 9.72. Planos a 868MHz.





```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

antenasrx=[1,3.975-(1.75/2)+0.11,1.75,0.045+0.05+sumagua,0,pi/180,2*pi-
pi/180,0,pi/180,pi,6,inf,1,0,0,0,0,0,0,2400000000,0]; %ojo que teta solo
va de 0 a pi como max
plot3(3.975-(1.75/2)+0.11,1.75,0.045+0.05+sumagua,'or'); % primer pto del
tx
% plot3(3.01,2.75,0.9,'or'); % segundo pto del tx
% plot3(1.81,0.41,0.9,'or'); % tercer pto del tx
% plot3(4.41,2.61,0.9,'or'); %cuarto pto del tx
% plot3(0.4,3.5,0.9,'or'); %rx

```

```

%numeroderayos=length(antenasrx(5):antenasrx(6):antenasrx(7))*length(ante
nastx(8):antenasrx(9):antenasrx(10)) %numero de rayos
% antenasrx [ numerohabitacion, x,y,z,phii,Aphi,phif,
tethai,Atheta,thetaf,nrebotes,taumaxima,numerodeantena,
esficticiaporrefraccion,thetao,phio,tau0,reflexion0, frecuencia] 20
movidas

```

```

antenasrx=zeros(1,8); %no pones antena tx y luego ves lo que captaría si
pusiesemos omnidireccionales en todos los cubos a la hora de sacar
parámetros
%antenasrx=[1,6,5.1,1,0,2*pi,0,2*pi];
%plot3(6,5.1,1,'xr');
%antenasrx=[3,0.2,4,2.9,0,2*pi,0,pi;1,2.5,2.5,0.95,0,2*pi,0,pi;1,6.5,3.3,
0.3,0,2*pi,0,pi;2,5.5,2.5,0.95,0,2*pi,0,pi;2,2.5,3.3,0.3,0,2*pi,0,pi];

```

## 9.2.2. guardoroom.m

```

%%%Para subdividir la variable room%%%
nhabitaciones=1;
al=8; %largo en x
bl=8; %ancho en y
cl=4; %alto en z
Resx1=ceil(al/0.05); %resoluciones
Resy1=ceil(bl/0.05);
Resz1=ceil(cl/0.05);
m1=0; %material interior

```

```

%%%CUIDADO HABRÁ QUE CAMBIAR RESZ DEPENDIENDO DEL ESCENARIO

```

```

%Guardo el tiempo que tarda en simular el escenario
save('/Users/Leyre2/Desktop/Hisham/Resultados13/tiempo.mat','tiempo');

```

```

for habitacion=1:nhabitaciones

```

```

%Primero guardo en una sola variable las tres primeras celdas de room
inforoom{habitacion}=cell(1,3);

```

```

for i=1:3
    inforoom{1,i}=room{1,habitacion}{1,i};
end;

save(sprintf('/Users/Leyre2/Desktop/Hisham/Resultados13/Habitacion%d/info
room%d.mat',habitacion,habitacion), 'inforoom');

%Para la celda 4 de room, voy a guardar un archivo .mat por cada una
de las
%Resz
if habitacion==1
    Resx=Resx1;
    Resy=Resy1;
    Resz=Resz1;
elseif habitacion==2
    Resx=Resx2;
    Resy=Resy2;
    Resz=Resz2;
elseif habitacion==3
    Resx=Resx3;
    Resy=Resy3;
    Resz=Resz3;
elseif habitacion==4
    Resx=Resx4;
    Resy=Resy4;
    Resz=Resz4;
elseif habitacion==5
    Resx=Resx5;
    Resy=Resy5;
    Resz=Resz5;
elseif habitacion==6
    Resx=Resx6;
    Resy=Resy6;
    Resz=Resz6;
elseif habitacion==7
    Resx=Resx7;
    Resy=Resy7;
    Resz=Resz7;
end;

for indicez=1:Resz
    roomcelda4Resz=cell(1,1);

        roomcelda4Resz{1,1}=room{1,habitacion}{1,4}(:, :, indicez);

save(sprintf('/Users/Leyre2/Desktop/Hisham/Resultados13/Habitacion%d/room
celda4Resz%d.mat',habitacion,indicez), 'roomcelda4Resz');

end;

end;

cd ..

```

### 9.2.3. parametromaterial.m

```

function [n,alfa,beta]=parametromaterial(m,f)

epsilon0=8.854*10^-12;

```

```

mu0=4*pi*10^-7;

if m==0 %aire
    epsilon_r=1;
    conductivity=0;

elseif m==10 %aire
    epsilon_r=1.01;
    conductivity=0;

elseif m==1 %madera Contrachapado
%   n=1.448;
%   n=1.697;
%   dBmetro=30;
    epsilon_r=2.88;
    conductivity=0.21;

elseif m==2 %pared BrickWall
%   n=1.68;
    epsilon_r=4.44;
    conductivity=0.11;

elseif m==3 %pared Pladur

    epsilon_r=2.02;
    conductivity=0;

elseif m==4 %puertas

    epsilon_r=5.84;
    conductivity=0.06;

elseif m==5 % cristal

    epsilon_r=6.06;
    conductivity=0.11;

elseif m==6 % metal (aluminio)

    epsilon_r=37.8*10^6/(2*pi*2.4*10^9*epsilon_0*4.6); %tgperdidas 4.6
    conductivity=37.8*10^6;

elseif m==7 % hormigon

    epsilon_r=25;
    conductivity=0.02;

elseif (m>=10) && (m<=46) % cuerpo humano

    [epsilon_r,conductivity]=calculo_dielectrico_cuerpo_humano(f,m-9);

    %%9 es la diferencia con los valores internos en el *.m del material

elseif m==47 % poliestireno

    epsilon_r=2.5;
    conductivity=10^-16;

```

```

elseif m==48 % polyuretano

    epsilon_r=3;
    conductivity=10^-10;

elseif m==49 % agua dulce

    epsilon_r=81;
    conductivity=1;

elseif m==50 % agua salada

    epsilon_r=71;
    conductivity=6;

end

epsilon=epsilon0*epsilon_r;
mu=mu0;
alfa=2*pi*f*sqrt(mu*epsilon)*sqrt(1/2*(-
1+sqrt(1+(conductivity/(2*pi*f*epsilon))^2)));
beta=2*pi*f*sqrt(mu*epsilon)*sqrt(1/2*(1+sqrt(1+(conductivity/(2*pi*f*eps
ilon))^2)));
n=sqrt(epsilon_r);

```

## 9.2.4. extraeparametros.m

```

tic

Pr=0.01; % W
Tc=4E-6; %%%Tc=4E-6;Rb=250Kbps;F=2.4GHz (Zigbee)%%%%Para
calcular Tc es la inversa de Rb
%%Tc=9E-9;Rb=106Kbps;F=860-960MHz%%%%
%%Tc=1E-8;Rb=100Mbps;F=2GHz%%%%

Fc=2400000000;
Cptx=[0,1];
Cprx=[0,1];
DirectividadTx=1; %tipo
DirectividadRx=1; %tipo
Atheta=pi/180;
Rebmax=6;

parametros =
calculaparametros(room,Pr,Tc,Fc,Cptx,Cprx,DirectividadTx,DirectividadRx,A
theta,Rebmax);

numerohabitaciones = length(room);

ModuloCampoE=cell(1,numerohabitaciones); %supuesto isotrópica
for i=1:numerohabitaciones
ModuloCampoE{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
for k2=1:room{i}{1}(5)
for k3=1:room{i}{1}(6)
ModuloCampoE{i}(k1,k2,k3)=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{4}(2);

```

```

        end
    end
end
end

PotenciaTc=cell(1,numerohabitaciones); %supuesto isotrópica
for i=1:numerohabitaciones
PotenciaTc{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            PotenciaTc{i}(k1,k2,k3)=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{2}(1);
        end
    end
end
end
end

PotenciaTcdB = cell(1,numerohabitaciones); %supuesto isotrópica
for i=1:numerohabitaciones
PotenciaTcdB{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            if PotenciaTc{i}(k1,k2,k3) == 0
                PotenciaTcdB{i}(k1,k2,k3) = -100;
            else
PotenciaTcdB{i}(k1,k2,k3)=10*log10(PotenciaTc{i}(k1,k2,k3)/1E-3); %son
dBm
            end
        end
    end
end
end
end

RetardoPotencia=cell(1,numerohabitaciones); %supuesto isotrópica
for i=1:numerohabitaciones
RetardoPotencia{i}=cell(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            RetardoPotencia{i}{k1,k2,k3}=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{3};
        end
    end
end
end
end

PotenciaTcRX=cell(1,numerohabitaciones); %supuesto antena en rx
for i=1:numerohabitaciones
PotenciaTcRX{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            PotenciaTcRX{i}(k1,k2,k3)=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{4}(1);
        end
    end
end
end
end
end

```

```

PotenciaTcdBRX = cell(1,numerohabitaciones); %supuesto antena en rx
for i=1:numerohabitaciones
PotenciaTcdBRX{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            if PotenciaTcRX{i}(k1,k2,k3) == 0
                PotenciaTcdBRX{i}(k1,k2,k3) = -200;
            else
PotenciaTcdBRX{i}(k1,k2,k3)=10*log10(PotenciaTcRX{i}(k1,k2,k3)/1E-3);
                end
            end
        end
    end
end
end

RetardoPotenciaRX=cell(1,numerohabitaciones); %supuesto antena en rx
for i=1:numerohabitaciones
RetardoPotenciaRX{i}=cell(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{5};
        end
    end
end
end

RetardoPotenciadBRX = RetardoPotenciaRX;
for i=1:numerohabitaciones
    PotenciaTcdB{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            for j=1:length(RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,:))
                if RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,j) == 0
                    RetardoPotenciadBRX{i}{k1,k2,k3}(1,j) = -200;
                else
RetardoPotenciadBRX{i}{k1,k2,k3}(1,j)=10*log10(RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,j)/1E-3);
                end
            end
        end
    end
end
end

TiempoExtraeParametros=toc
% save
/home/min/Escritorio/PFC/SIMULACIONES/SENSORES/SINANTENASRX/parametrossac
ados8.mat campoE PotenciaTc PotenciaTcdB RetardoPotencia PotenciaTcRX
PotenciaTcdBRX RetardoPotenciaRX

```

## 9.3. Herramientas utilizadas

En este anexo se enumeran todos los elementos utilizados durante la realización del proyecto. Se hablará en primer lugar del hardware empleado, donde se incluyen, tanto los equipos que se usaron para lanzar las simulaciones o procesar los datos obtenidos, como la instrumentación utilizada durante las medidas. Después se comentará brevemente el software utilizado.

### 9.3.1. Hardware

#### 9.3.1.1. Marconi 2041 Low Noise Generator



Figura 9.73. Marconi 2041 Low Noise Generator.

of output level making it ideal for use as a local oscillator or in testing passive components.

#### Option 6 - Avionics

This optional facility provides for the internal generation of modulation waveforms suitable for the testing of Instrument Landing Systems (ILS) and VHF Omni Range (VOR) beacons. Additional modes of operation support the testing of ADF, Marker Beacons and the SELCAL signaling system.

#### Option 8 - RF Profiles and Complex Sweep

The RF Profile facility allows the signal generator to compensate for frequency dependent level errors introduced by cables, amplifiers and signal combiners. The Complex Sweep facility allows for the generation of sweeps whose step size, step time and RF level changes while the sweep is in progress. These features are particularly useful for EMC, Tempest and ATE applications.

#### Option 11 - Electronic Attenuator

An electronic attenuator option is available to meet demanding extended life requirements for repetitive switching, found in high volume production applications

## SPECIFICATION

### GENERAL DESCRIPTION

2040 series signal generators cover the frequency ranges 10 kHz to 1.35 GHz, 10 kHz to 2.7 GHz and 10 kHz to 5.4 GHz. A large screen dot matrix display with soft key function selection allows flexibility of operation and ease of use. The output may be amplitude, phase or frequency modulated with pulse modulation available as an option. Modulation is available using a combination of an internal synthesized LF oscillator with up to two external signal inputs. A second internal source is available as an option.

### CARRIER FREQUENCY

#### Range

10 kHz to 1.35 GHz (2040).

10 kHz to 2.7 GHz (2041).

10 kHz to 5.4 GHz (2042).

#### Overrange

Selectable overrange mode allows uncalibrated levels up to +19 dBm to be generated (typically up to +25 dBm for 2030/40 with Option 003 fitted).

Selectable extended hysteresis provides for uncalibrated RF level control with up to 24 dB range without level interruption.

#### Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

#### Indication

11 digits with annunciators.

#### Resolution

0.1 Hz.

#### Accuracy

As frequency standard.

#### Phase Incrementing

The carrier phase can be advanced or retarded in steps of  $\pi/128$  radians (approximately 1.4°) using the rotary control.

### RF OUTPUT

#### Range

-144 dBm to +13 dBm.

When AM is selected the maximum output level reduces linearly with AM depth to +7 dBm at maximum AM depth.

#### Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control. Units may be  $\mu V$ , mV, V EMF or PD; dB relative to 1  $\mu V$ , 1 mV EMF or PD; dBm.

Conversion between dB and voltage units may be achieved by pressing the appropriate units key (dB, or V,  $\mu V$ , mV).

#### Indication

4 digits with unit annunciators.

#### Resolution

0.1 dB.

#### Accuracy At 22°C ±5°C

>0 dBm	<1.35 GHz	<2.7 GHz	<5.4 GHz
>-100 dBm	±0.5 dB	±0.7 dB	±1 dB
>-127 dBm	±0.85 dB	±1 dB	±1.5 dB
	±0.85 dB	±1 dB	-

Temperature stability dB/°C

±0.005	±0.01	±0.02
--------	-------	-------

#### VSWR

For output levels less than 0 dBm:

Less than 1.25:1 to 2.2 GHz.

Less than 1.4:1 to 2.7 GHz.

Less than 1.5:1 to 5.4 GHz.

#### Output Protection

Reverse power of 50 W from a source VSWR of up to 5:1.

### NOISE MODES

Three noise modes are offered with the following characteristics:

#### Low Noise Mode 1

Lowest phase noise with a restricted FM deviation capability and reduced AM bandwidth.

#### Low Noise Mode 2

Low phase noise with restricted FM deviation capability and full AM bandwidth.

#### Normal Mode

Full FM deviation capability and AM bandwidth.

## SPECTRAL PURITY

At RF levels up to +7 dBm:

### Harmonics

2040, 2041:

Better than -30 dBc to 1 GHz;

Better than -27 dBc above 1 GHz.

2042:

Better than -30 dBc to 1 GHz;

Better than -27 dBc to 1.35 GHz;

Better than -25 dBc above 1.35 GHz.

### Sub-Harmonics

Better than -90 dBc to 1.35 GHz.

Better than -40 dBc to 2.3 GHz.

Better than -30 dBc to 5.4 GHz.

### Non-Harmonics (offsets greater than 3 kHz)

In low noise modes:

Better than -70 dBc up to 21.09375 MHz.

Better than -90 dBc from 21.09375 MHz to 2.7 GHz.

Better than -84 dBc above 2.7 GHz.

In normal mode:

Better than -70 dBc.

### Residual FM (FM off)

Low noise mode: Less than 0.3 Hz RMS deviation in a 300 Hz to 3.4 kHz unweighted bandwidth at 1 GHz

Normal mode: Less than 7 Hz RMS deviation in a 300 Hz to 3.4 kHz unweighted bandwidth at 470 MHz.

### SSB $\Phi$ Noise

Carrier Frequency Range	SSB Phase Noise in dBc/Hz at offset frequencies of:		
	100 Hz	1 kHz	20 kHz & Above
<1.35 GHz	-75	-115	-140
<675 MHz	-81	-121	-140
<337.5 MHz	-87	-121	-140
<168.7 MHz	-92	-127	-143
<84.3 MHz	-96	-131	-143
<42.1 MHz	-96	-131	-143
<21 MHz	-82	-127	-140

### RF Leakage

Less than 0.5 mV PD at the carrier frequency in a two turn 25 mm loop 25 mm or more from any part of the case.

### FM on AM

Typically less than 100 Hz for 30% AM depth at a modulation frequency of 1 kHz and a carrier frequency of 500 MHz.

### $\Phi$ M on AM

Typically less than 0.1 radians at a carrier frequency of 500 MHz for 30% AM depth for modulation rates up to 10 kHz.

## MODULATION MODES

Four modulation modes are available:

### Single

FM, Wideband FM,  $\Phi$ M, AM or Pulse (optional).

### Dual

Two independent channels of differing modulation type (e.g. AM with FM).

### Composite

Two independent channels of the same modulation type (e.g. FM1 with FM2).

### Dual composite

A combination of Dual and Composite modes providing four independent channels (e.g. AM2 and FM1 with FM2).

## FREQUENCY MODULATION

### Deviation

Peak deviation available varies with carrier frequency and noise mode selected as follows:

Carrier Frequency Range	Maximum FM Deviation available:	
	Normal Mode	Low Noise Modes
2.7 to 5.4 GHz	27-54 MHz*	200 kHz
1.35 to 2.7 GHz	13.5-27 MHz*	100 kHz
675 to 1350 MHz	6.75-13.5 MHz*	50 kHz
337.5 to 675.0 MHz	3.375-6.75 MHz*	25 kHz
168.75 to 337.5 MHz	1.687-3.375 MHz*	12.5 kHz
84.375 to 168.75 MHz	843-1687 kHz*	6.25 kHz
42.1875 to 84.375 MHz	421-843 kHz*	3.125 kHz
21.09375 to 42.1875 MHz	210-421 kHz*	1.56 kHz
10 kHz to 21.09375 MHz	1 MHz	6.25 kHz

\*Maximum FM deviation available is 1% of carrier frequency value when in normal noise mode.

### Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

### Indication

3 digits with annunciators.

### Displayed Resolution

1 Hz or 1 least significant digit, whichever is greater.

### Accuracy at 1 kHz

In low noise modes:

$\pm 6\%$  of indication  $\pm 1$  Hz excluding residual FM.

In normal mode:

$\pm 5\%$  of indication  $\pm 10$  Hz excluding residual FM.

### Bandwidth (1 dB)

DC to 300 kHz (DC coupled).

10 Hz to 300 kHz (AC coupled).

Bandwidth is limited to 100 kHz in low noise modes.

Input is capable of accepting external sources of FSK signals. Typical 3 dB bandwidth in normal mode is greater than 1 MHz.

**Group delay**

Less than 1  $\mu$ s from 3 kHz to 500 kHz in normal mode.  
 Less than 3  $\mu$ s from 3 kHz to 250 kHz in low noise modes.

Carrier Frequency Offset

In DC FM mode less than  $\pm(1 \text{ Hz} + 0.1\%$  of set deviation) after using DC FM nulling facility.

**Distortion**

Using external modulation without ALC:

Less than 3% at maximum deviation for modulation frequencies up to 20 kHz.

Less than 0.3% at 10% of maximum deviation for modulation frequencies up to 20 kHz.

**Modulation Source**

Internal LF generator or external via front panel sockets.

**WIDEBAND FM****Deviation**

As FM.

**Indication**

3 digits with annunciators.

**Selection**

By keyboard entry of data. The sensitivity is controlled in 3 dB steps and the display will indicate the value of deviation nearest to the requested value.

**Input level**

1 V RMS to achieve indicated deviation.

**Accuracy**

As FM.

**3 dB Bandwidth**

In normal noise mode typically 10 MHz (DC or AC coupled).

In low noise modes typically 250 kHz

(DC or AC coupled).

**Group delay**

Less than 0.5  $\mu$ s from 3 kHz to 10 MHz in normal modes.

**Modulation Source**

External via rear panel socket (50  $\Omega$  impedance).

**PHASE MODULATION**

(Normal mode only)

**Deviation**

0 to 10 radians.

**Selection**

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

**Indication**

3 digits with annunciators.

**Resolution**

0.01 radians.

**Accuracy at 1 kHz**

$\pm 5\%$  of indicated deviation excluding residual phase modulation.

**3 dB Bandwidth**

100 Hz to 10 kHz.

**Distortion**

Less than 3% at maximum deviation at 1 kHz modulation rate.

**Modulation Source**

Internal LF generator or external via front panel sockets.

**AMPLITUDE MODULATION**

For Carrier Frequencies up to 1 GHz:

**Range**

0 to 99.9%.

**Selection**

By keyboard entry of data. Variation by up/down keys and by rotary control.

**Indication**

3 digits with annunciator.

**Resolution**

0.1%.

**Accuracy**

$\pm 4\%$  of setting +1%.

**1 dB Bandwidth**

In normal and low noise mode 2:

With Modulation ALC off; DC to 30 kHz in DC coupled mode and 10 Hz to 30 kHz in AC coupled mode.

Typical modulation bandwidth exceeds 50 kHz.

In low noise mode 1:

With Modulation ALC off; Useable from DC to 1.5 kHz in DC coupled mode and 10 Hz to 1.5 kHz in AC coupled mode.

**Distortion**

For a modulation rate of 1 kHz:

Less than 1% total harmonic distortion for depths up to 30%.

Less than 3% total harmonic distortion for depths up to 80%.

**Modulation Source**

Internal LF generator or external via front panel sockets.

**MODULATION OSCILLATOR****Frequency Range**

0.1 Hz to 500 kHz.

**Selection**

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

**Indication**

7 digits with annunciators.

**Resolution**

0.1 Hz.

#### Frequency Accuracy

As frequency standard.

#### Distortion

Less than 0.1% THD in sine wave mode at frequencies up to 20 kHz.

#### Alternative Waveform

A triangular wave is available for frequencies up to 100 kHz and a square wave up to 2 kHz.

#### Signaling Tones

The modulation oscillator can be used to generate sub-audible or sequential (up to 16 tones) signaling tones in accordance with EIA, ZVEI, DZVEI, CCIR, EURO 1, EEA, NATAL and DTMF\* standards. Facilities are also available for creating and storing user defined tone systems.

\* Requires second modulation oscillator (Option 001) to be fitted.

### EXTERNAL MODULATION

Two independent inputs on the front panel with BNC connectors, EXT MOD 1 and EXT MOD 2. The modulation is calibrated with 1 V RMS sine wave applied. Input impedance 100 k $\Omega$  nominal.

### MODULATION ALC

The EXT MOD 1 and EXT MOD 2 modulation inputs can each be levelled by an ALC system.

#### Level Range

0.7 V RMS to 1.4 V RMS sine wave.

#### Distortion

Less than 0.1% additional distortion for frequencies up to 20 kHz (typically less than 0.1% up to 50 kHz).

#### 1 dB Bandwidth

Typically 10 Hz to 500 kHz.

### LF OUTPUT

Front panel BNC connector. The output may be configured in the LF Generator Mode to give an output from the internal modulation oscillator and in the LF Monitor Mode to give an output from the internal modulation signal paths.

#### Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

#### Indication

7 digits with unit annunciators for frequency and 4 digits with unit annunciators for level.

Level

100  $\mu$ V to 5 V RMS with a load impedance of greater than 600  $\Omega$ .

100  $\mu$ V to 1.4 V RMS with a load impedance of greater than 50  $\Omega$ .

#### Common mode voltage

$\pm$ 0.5 V maximum.

#### Source impedance

5.6  $\Omega$  nominal.

#### Level Accuracy at 1 kHz

With a load impedance of greater than 10 k $\Omega$ :

+5% for levels above 50 mV and  $\pm$ 10% for levels from 500  $\mu$ V to

50 mV.

#### Frequency Response

Typically better than  $\pm$ 1 dB from 0.1 Hz to 300 kHz.

### SWEEP

Not available in low noise mode.

#### Control Modes

Start/stop values of selected parameter.

Number of steps.

Time per step.

#### Step Time

1 ms to 10 s per step.

#### Sweep Ramp

Synchronized analog ramp with an amplitude of nominally 0 to 10 V peak on rear panel BNC connector.

#### Markers

Five user selectable markers for frequency or level provide an indication when specified parameter values have been reached. Output 0 V to +5 V from 600  $\Omega$  on rear panel BNC socket.

#### Trigger

Rear panel BNC connector. Applying 0 V or a switch closure starts the sweep or steps from point to point on the sweep. Socket is internally connected via 10 k $\Omega$  pull-up resistor to +5 V.

### FREQUENCY STANDARD (OCXO)

#### Frequency

10 MHz.

#### Temperature Stability

Better than  $\pm$ 5 in  $10^6$  over the operating range of 0 to 50°C.

#### Warm up time

Within 2 in  $10^7$  of final frequency within 10 minutes from switch on at 20°C ambient.

#### Ageing Rate

Better than 2 in  $10^7$  per year.

#### Output

Rear panel BNC socket provides an output at frequencies of 1, 5 or 10 MHz with a nominal 2 V pk-pk level into 50  $\Omega$ .

#### External input

Rear panel BNC socket accepts an input at 1, 5 or 10 MHz with an input level in the range 220 mV to 1.8 V RMS into 1 k $\Omega$ .

### GENERAL

#### GP1B INTERFACE

A GP1B interface designed in accordance with IEEE 488.2 is fitted as standard.

#### Capabilities

Complies with the following subsets as defined in IEEE Std.488.1. SH1, AH1, T6, L4, SR1, RL1, PPO, DC1, DT1, CO, E2.

#### ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Conforms with the protection requirements of the EEC Council Directive

89/336/EEC. Conforms with the limits specified in the following standards:  
IEC/EN61326-1 : 1997, RF Emission Class B, Immunity Table 1, Performance Criteria B

#### SAFETY

Conforms with the requirements of EEC Council Directive 73/23 EEC (as amended) and the product safety standard IEC / EN 61010-1 : 2001 + C1 : 2002 + C2 : 2003 for class 1 portable equipment, for use in a Pollution Degree 2 environment. The instrument is designed to be operated from an Installation Category 2 supply.

#### RATED RANGE OF USE

(Over which full specification is met)

##### Temperature

0 to 55°C.

##### Humidity

Up to 93% at 40°C.

#### CONDITIONS OF STORAGE AND TRANSPORT

##### Temperature

-40 to +71°C.

##### Humidity

Up to 93% relative humidity at 40°C.

##### Altitude

Up to 4600 m (15,000 ft).

#### POWER REQUIREMENTS

##### AC supply

Four voltage settings covering:

100 V~ (Limit 90 - 115 V~)

120 V~ (Limit 105 - 132 V~)

220 V~ (Limit 188 - 242 V~)

240 V~ (Limit 216 - 264 V~)

Frequency: 50 - 400 Hz (Limit 45 - 440 Hz) 180 VA max

#### CALIBRATION INTERVAL

2 years.

#### DIMENSIONS AND WEIGHT

(Over projections but excluding front panel handles)

Height	Width	Depth	Weight
152 mm	425 mm	525 mm	21 kg
6 in	16.6 in	20.5 in	46 lb

#### OPTIONS

##### OPTION 1 - SECOND MODULATION OSCILLATOR OPTION

Specification as Modulation Oscillator.

##### OPTION 2 - PULSE MODULATION OPTION

##### Modulation Modes

Pulse modulation may be used alone or in conjunction with FM,  $\phi$ M or Wideband FM.

##### Rise Time

Less than 25 ns.

##### Control

0 to +1 V for carrier off, +3.5 to +5 V for carrier on.

##### ON/OFF Ratio

Better than 70 dB, typically exceeds 80 dB.

##### Additional level error

Less than  $\pm 0.5$  dB.

##### Propagation delay

Typically 80 ns from pulse input to RF pulse output.

##### Input Impedance

50  $\Omega$  nominal.

##### OPTION 105 - SLOW RISE TIME PULSE MODULATION

Modifies pulse modulation option for a typical rise and fall time of 2  $\mu$ s.

##### OPTION 3 - +19 dBm RF OUTPUT LEVEL OPTION

For 2040 model only.

##### RF Output Range

-144 dBm to +19 dBm. When AM is selected the maximum output level reduces linearly with AM depth to +13 dBm at maximum AM depth.

Overrange allows levels up to +25 dBm to be requested.

##### Harmonics

At RF levels up to +7 dBm: better than -27 dBc.

##### OPTION 6 - AVIONICS OPTION

See separate sheet.

##### OPTION 8 - RF PROFILE AND COMPLEX SWEEP

See separate sheet.

##### OPTION 12 - ELECTRONIC ATTENUATOR

Carrier Frequency Range

250 kHz\* to 1.35 GHz (2040),

250 kHz\* to 2.7 GHz (2041).

\* Useable to 10 kHz

##### RF Output Range

-138 dBm to +10 dBm. When AM is selected the maximum output level reduces linearly with AM depth to +4 dBm at maximum AM depth.

##### Accuracy

$\pm 1.2$  dB for output levels > -127 dBm at 22°C  $\pm 5^\circ$ C

##### Temperature Stability

$\pm 0.01$  dB/°C

##### VSWR

<1.5:1 for output levels less than 0 dBm.

##### Reverse Power Handling

1 W from a source VSWR of up to 5:1.

##### Amplitude Modulation

Standard specification applies for carrier frequencies above 50 MHz (Above 100 MHz for Option6)

### 9.3.1.2. Agilent Fieldfox RF Analyzer N9912A



Figura 9.74. Analizador de espectros Agilent Fieldfox N9912A.

### Specifications

Warranted performance. Specifications include guardbands to account for the expected statistical performance distribution, measurement uncertainties, and changes in performance due to environmental conditions. The following conditions must be met:

- FieldFox has been turned on at least 90 minutes
- FieldFox is within its calibration cycle
- Storage or operation at 25 °C ±5 °C range (unless otherwise stated)

### Typical:

Expected performance of an average unit over a 20 °C to 30 °C temperature range, unless otherwise indicated; does not include guardbands. It is not covered by the product warranty. The FieldFox must be within its calibration cycle.

### Nominal:

A general, descriptive term or design parameter. It is not tested, and not covered by the product warranty.

## Cable and antenna analyzer

<b>Frequency</b>	
<b>Frequency range</b>	2 MHz <sup>1</sup> to 4 GHz 2 MHz <sup>2</sup> to 6 GHz
<b>Frequency reference</b>	
<b>Accuracy</b>	±2 ppm
<b>Aging rate</b>	±1 ppm/yr
<b>Temperature stability</b>	±1 ppm over -10 to 55 °C
<b>Frequency resolution</b>	
<b>2 MHz to 1.6 GHz</b>	2.5 kHz
<b>&gt; 1.6 GHz to 3.2 GHz</b>	5 kHz
<b>&gt; 3.2 GHz to 6 GHz</b>	10 kHz
<b>Measurement speed</b>	
<b>Return loss</b>	1.5 ms/point (nominal)      1.75 GHz to 3.85 GHz, 1001 points, Cal ON
<b>Distance-to-fault</b>	2.4 ms/point (nominal)      0 to 500 ft, 601 points, Cal ON
<b>Data points</b>	
	101, 201, 401, 601, 801, 1001 (up to 10,001 using SCPI)
<b>Directivity</b>	
<b>Corrected</b>	> 42 dB
<b>QuickCal (Option 111)</b>	> 42 dB (typical) <sup>3</sup>
<b>Source match</b>	
<b>Corrected</b>	> 36 dB
<b>QuickCal (Option 111)</b>	≥ 35 dB (typical) <sup>3</sup>
<b>Reflection tracking</b>	
<b>Corrected</b>	± 0.06 dB
<b>QuickCal (Option 111)</b>	± 0.15 dB (typical) <sup>3</sup>

## Dynamic range

<b>Reflection (RF Out port)</b>	
2 MHz to 4 GHz	60 dB (typical)
> 4 GHz to 6 GHz	55 dB (typical)
<b>Transmission measurement</b>	
2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)
> 2 GHz to 3 GHz	67 dB (typical)
> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)
> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)
<b>Output power range</b>	
<b>High power</b>	
2 MHz to 4 GHz	< +8 dBm, +6 dBm (nominal)
> 4 GHz to 6 GHz	< +7 dBm, +2 dBm (nominal)
<b>Low power</b>	
2 MHz to 4 GHz	< -23 dBm, -25 dBm (nominal)
> 4 GHz to 6 GHz	< -24 dBm, -29 dBm (nominal)
<b>Immunity to interference</b>	
	+16 dBm (nominal)
<b>Maximum input level (RF Out port)</b>	
	+23 dBm
<b>Maximum input DC voltage (RF Out port)</b>	
	±50 VDC

## Cable and antenna measurements

<b>Return loss</b>	
<b>Display range</b>	0 to 100 dB
<b>Resolution</b>	0.01 dB
<b>VSWR</b>	
<b>Display range</b>	0 to 100
<b>Resolution</b>	0.01
<b>Distance to fault (DTF)</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Range</b> = (number of points - 1)/(span*2) x Vf (velocity factor in cable) x c (light speed)</li> <li>• <b>Resolution</b> = range/(number of points - 1)</li> <li>• <b>Number of points:</b> 101, 201, 401, 601, 801, 1001 (up to 10,001 using SCPI)</li> <li>• <b>Distance-to-fault display:</b> return loss, VSWR, reflection coefficient</li> </ul>
<b>Cable loss (1-port)</b>	
	Terminated cable under test with short
<b>Insertion loss (2-ports)</b>	
	Requires Option 110
<b>Transmission measurement</b>	
<b>Frequency range</b>	
<b>Option 104</b>	2 MHz to 4 GHz
<b>Option 106</b>	2 MHz to 6 GHz
<b>Dynamic range</b>	
2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)
2 GHz to 3 GHz	67 dB (typical)
> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)
> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)

## Network analysis

<b>S11</b>	Vector measurement, S11 magnitude and S11 phase. Specification is listed under Cable and antenna analyzer section (S11/Return loss).
<b>S21</b>	Scalar measurement, S21 magnitude. Specification is listed under transmission measurement. S21 requires Option 110 transmission measurement.
<b>A</b>	Reflected power
<b>R</b>	Source power
<b>Display</b>	Log, linear, phase, VSWR, Smith chart, polar, group delay, unwrapped phase
<b>Calibration types</b>	Mechanical cal <b>QuickCal</b> Normalization
<b>IF bandwidth selections</b>	300 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz and 30 kHz
<b>Data points</b>	101, 201, 401, 601, 801, 1001, 1601, 4001, 10,001 (custom number of points can be set using SCPI)

## Spectrum analyzer

### Frequency

<b>Frequency range</b>	
<b>Option 104</b>	100 kHz to 4 GHz, usable to 5 kHz
<b>Option 106</b>	100 kHz to 6 GHz, usable to 5 kHz, tunable to 6.1 GHz
<b>Frequency reference</b>	
<b>Accuracy</b>	±2 ppm
<b>Frequency aging</b>	±1 ppm/yr
<b>Frequency reference</b>	
<b>Temperature stability</b>	±1 ppm over -10 to 55 °C
<b>Frequency readout accuracy</b>	
± (readout frequency x frequency reference accuracy + RBW centering + 0.5 x horizontal resolution)	
<b>Frequency span</b>	
<b>Range</b>	0 Hz (zero span), 10 Hz to maximum frequency
<b>Span accuracy</b>	±(2 x RBW centering + horizontal resolution)
<b>Span resolution</b>	1 Hz
<b>Resolution bandwidth (RBW)</b>	
<b>Range (-3 dB bandwidth)</b>	
<b>Zero span</b>	300 Hz to 1 MHz in 1-3-10 sequence; 2 MHz
<b>Non-zero span</b>	10 Hz to 300 kHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence; 1 MHz, 2 MHz
<b>Accuracy</b>	1 kHz to 1 MHz: ±5% (nominal) 10 Hz to 100 KHz non-zero span: ±1% (nominal) 2 MHz: ±10% (nominal) 300 Hz zero span: ±10% (nominal)
<b>Selectivity (-60 dB/ -3 dB)</b>	4:1 (nominal)
<b>Video bandwidth (VBW)</b>	
<b>Range</b>	1 Hz to 2 MHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence
<b>Stability</b>	
<b>Noise sidebands, CF = 1 GHz</b>	10 kHz offset: -88 dBc/Hz ( typical) 30 kHz offset: -89 dBc/Hz, (typical) 100 kHz offset: -95 dBc/Hz, (typical) 1 MHz offset: -115 dBc/Hz, (typical)
<b>Sweep acquisition, span &gt; 0 Hz</b>	
<b>Range</b>	1 to 5000, number of data acquisitions per trace point; value is normalized to the minimum required to achieve amplitude accuracy with CW signals
<b>Resolution Readout</b>	1 Measured value representing time required to tune receiver, acquire data, and process trace
<b>Trace updates</b>	
<b>Span = 20 MHz, RBW = 3 kHz: 1.5 updates/second</b>	
<b>Span = 100 MHz, RBW auto coupled: 7 updates/second</b>	
<b>Span = 6 GHz, RBW auto coupled: 1 update/second</b>	
<b>Trace points</b>	
101, 201, 401, 601, 801, 1001 points, default is 401	

## Amplitude

<b>Measurement range</b>	Displayed average noise level (DANL) to +20 dBm	
<b>Input attenuator range</b>	0 to 31 dB, 1 dB steps	
<b>Maximum DC voltage at RF In port</b>	±50 VDC	
<b>Maximum input power at RF In port</b>	+27 dBm (0.5 W)	
<b>Displayed average noise level (DANL)</b>	10 Hz RBW, 10 Hz VBW, 50 ohm termination on input, 0 dB attenuation, average detector	
<b>Preamplifier OFF</b>	<b>20 to 30 °C</b>	
10 MHz to 2.4 GHz	-130 dBm (typical)	
> 2.4 GHz to 5.0 GHz	-125 dBm (typical)	
> 5.0 GHz to 6.0 GHz	-119 dBm (typical)	
<b>Preamplifier ON (Option 235)</b>	<b>20 to 30 °C</b>	
10 MHz to 2.4 GHz	-148 dBm (typical)	
> 2.4 GHz to 5.0 GHz	-145 dBm (typical)	
> 5.0 GHz to 6.0 GHz	-138 dBm (typical)	
	<b>-10 to 55 °C</b>	
10 MHz to 2.4 GHz	< -141 dBm	
> 2.4 GHz to 5 GHz	< -138 dBm	
> 5 GHz to 6 GHz	< -130 dBm	
<b>Total absolute amplitude accuracy<sup>1</sup></b>	Peak detector, 10 dB attenuation, preamplifier off, RBW < 2 MHz, input signal 0 dBm to -50 dBm, all settings auto-coupled	
	<b>20 to 30 °C</b>	
2 MHz to 10 MHz	±1.8 dB	±0.60 dB (typical)
> 10 MHz to 3.0 GHz	±1.5 dB	±0.50 dB (typical)
> 3.0 GHz to 5.0 GHz	±1.9 dB	±0.60 dB (typical)
> 5.0 GHz to 6.0 GHz	±2.1 dB	±0.60 dB (typical)
<b>Second harmonic distortion (SHI)</b>	-30 dBm signal at input mixer	
2 MHz to 1.35 GHz	< -70 dBc, +40 dBm SHI (nominal)	
1.35 GHz to 3.0 GHz	< -80 dBc, +50 dBm SHI (nominal)	

<b>Third order intermodulation distortion (TOI)</b>	
Two -30 dBm tones at input mixer	> 100 kHz tone separation < -96 dBc, +18 dBm TOI (nominal)
<b>Residual responses</b>	
Input terminated, 0 dB attenuation, preamplifier off, RBW ≤ 1 kHz, VBW auto-coupled	
20 MHz to 3 GHz	-90 dBm (nominal)
> 3 GHz to 6 GHz	-85 dBm (nominal)
<b>Spurious responses</b>	
<b>Input mixer level -30 dBm</b>	
RFsig = RFtune + 417 MHz	-70 dBc (nominal)
RFsig = RFtune + 1.716 GHz	-80 dBc (nominal)
<b>Input mixer level -10 dBm, first IF image response</b>	
RFsig = RFtune - 2 x 0.8346 GHz, for RFtune 5.7 to 6.0 GHz	-50 dBc (nominal)
<b>Sidebands</b>	-80 dBc (nominal) -80 dBc (nominal) when battery charging, 260 kHz offset
<b>Preamplifier</b>	
<b>Option 230</b>	100 kHz to 4 GHz
<b>Option 231</b>	100 kHz to 6 GHz
<b>Gain</b>	22 dB (nominal)
<b>Reference level</b>	
<b>Range</b>	-170 dBm to +30 dBm
<b>Resolution</b>	0.1 dB
<b>Accuracy</b>	0 dB (no error)
<b>Traces</b>	
	4 traces, data/max/average/min
<b>Detectors</b>	
	Normal, positive peak, negative peak, sample, average
<b>Markers</b>	
<b>Marker types</b>	Normal, noise marker, band/interval marker, frequency counter marker
<b>Number of markers or delta markers</b>	6
<b>Marker functions</b>	Peak, next peak, peak left, peak right, marker to center, minimum search
<b>RF In VSWR</b>	
	1.5:1 (50 ohm)
<b>Trigger</b>	
	External, video trigger, FFT gating with video (IF envelope) trigger

## General specifications

<b>Connector type</b>		Type-N (female)
<b>Input impedance</b>		50 ohm
<b>External reference</b>		
	<b>Input type</b>	BNC female
	<b>Reference frequency</b>	10 MHz
	<b>Required level</b>	-5 dBm to 10 dBm
<b>Display</b>		6.5" transfective, color VGA LED backlit 640 x 480 with anti-glare coating
<b>Speaker</b>		Built-in speaker
<b>Headphone jack</b>		Built-in headphone jack
<b>Connectivity</b>		2 x USB 2.0; 1 x mini USB; 1 x LAN
<b>GPS</b>		Latitude, longitude, elevation and accurate time are provided. The GPS information can be displayed on the screen, and saved as part of the image, data, or recording file. The GPS capability is standard with all N9912A FieldFox RF analyzers. An external USB GPS receiver is required. Agilent recommends the Microsoft Streets & Trips, or Microsoft AutoRoute with GPS locator.
<b>Internal storage</b>		Minimum 16 MB, up to 1000 traces
<b>External storage</b>		1 x micro SD slot and 2 x USB 2.0
<b>EMC</b>		Complies with European EMC Directive 2004/108/EC <ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC/EN 61326-2-1)</li> <li>• CISPR Pub 11 Group 1, Class A</li> <li>• AS/NZS CISPR 11</li> <li>• ICES/NMB-001</li> </ul>
<b>ESD</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC/EN 61000-4-2, functional up to 20 kV test</li> </ul>
<b>Safety</b>		Complies with European Low Voltage Directive 2006/95/EC <ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC/EN 61010-1 2nd Edition</li> <li>• Canada: CSA C22.2 No. 61010-1-04</li> <li>• USA: UL 61010-1 2nd Edition</li> </ul>
<b>Environmental</b>		
	<b>Humidity</b>	Meets MIL-PRF-28800F Class 2 specification 95% at 40 °C
	<b>Temperature</b>	
	<b>Operating</b>	-10 °C to +55 °C
	<b>Non-operating</b>	-51 °C to 71 °C
<b>Weight</b>		6.2 lbs / 2.8 kg including battery
<b>Dimensions (H x W x D)</b>		11.5" x 7.4" x 2.8" (292 x 188 x 72 mm)
<b>Power</b>		
	<b>Power supply</b>	<b>External DC input:</b> 15 to 19 VDC
	<b>External AC power adapter</b>	
	<b>Input</b>	100 to 250 VAC, 50 to 60 Hz; 1.25 to 0.56 A
	<b>Output</b>	15 VDC, 4 A
	<b>Power consumption</b>	12 W
	<b>Battery</b>	6 cell Lithium Ion, 10.8 V, 4.6 A-h
	<b>Battery operating time</b>	4 hours
<b>Languages</b>		English, Chinese, French, Spanish, Japanese, Russian, German, Italian, and Turkish

### N9912A FieldFox RF analyzer

FieldFox RF Analyzer base functions:	One port cable and antenna analyzer (4 GHz), broadband calibration, CalReady, standard mechanical cal kit support. Measurements include: return loss, distance-to-fault (DTF), one port cable loss and VSWR.
Standard accessories included N9912A:	AC/DC adapter; battery; soft carrying case comes with backpack and shoulder straps; Quick Reference Guide; User's Guide

### N9912A FieldFox Options

Option 104	4 GHz cable and antenna analyzer
Option 106	6 GHz cable and antenna analyzer
Option 110	Transmission measurement
Option 111	QuickCal
Option 230	4 GHz spectrum analyzer (requires Option 104)
Option 231	6 GHz spectrum analyzer (requires Option 106)
Option 235	Preamplifier for spectrum analyzer (requires Option 230 or 231)
Option 236	Interference analyzer
Option 302	External USB power sensor support
Option 303	Network analysis capability
Option 308	Vector voltmeter
Option 010	Network analyzer time domain
Option 311	Channel power meter

### 9.3.1.3. Antena Titanis 2.4 GHz Swivel SMA Antenna

Datos generales:

<b>Product name</b>	Titanis 2.4 GHz
<b>Part Number</b>	B4844 (Standard SMA – male) B4844-R (Reverse thread SMA – male)
<b>Frequency</b>	2.4 – 2.5 GHz
<b>Polarization</b>	Linear
<b>Operating temperature</b>	-40 °C to +85 °C
<b>Impedance</b>	50 $\Omega$
<b>Weight</b>	7.1 g
<b>Antenna type</b>	<sup>1</sup> Swivel external
<b>Dimensions</b>	20 x 19.5 x 62.5 [mm]

Características eléctricas:

	Typical performance	Conditions
<b>Peak gain</b>	2.2 dBi	Data given for the 2.4 – 2.5 GHz frequency range
<b>Average gain</b>	-1.0 dBi	
<b>Average efficiency</b>	80%	
<b>Maximum Return Loss</b>	-13 dB	
<b>Maximum VSWR</b>	1.6:1	

Rendimiento eléctrico:

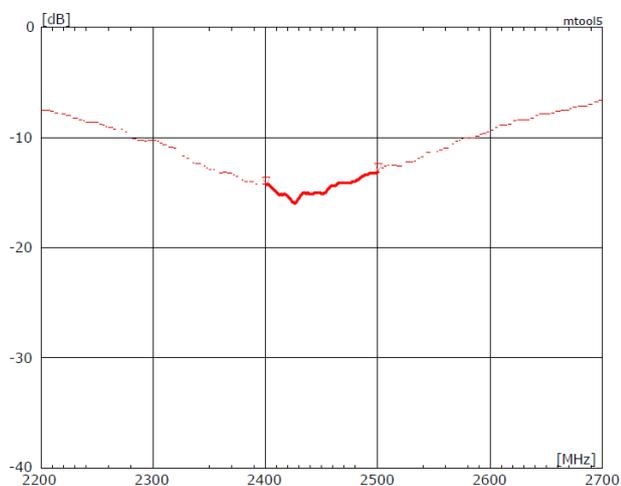


Figura 9.75. Pérdidas de retorno.

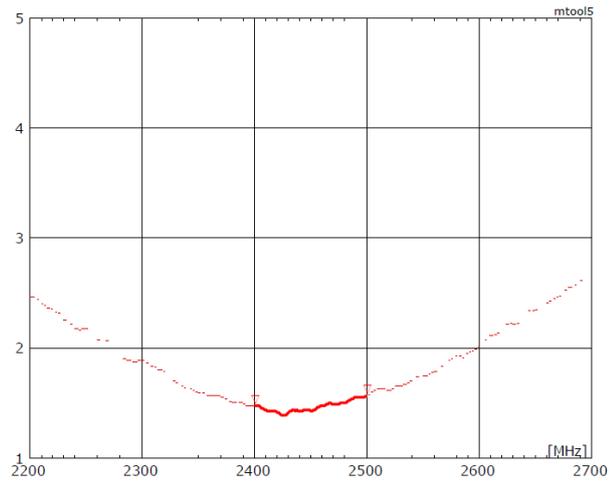


Figura 9.76. VSWR.

Diagrama de radiación:

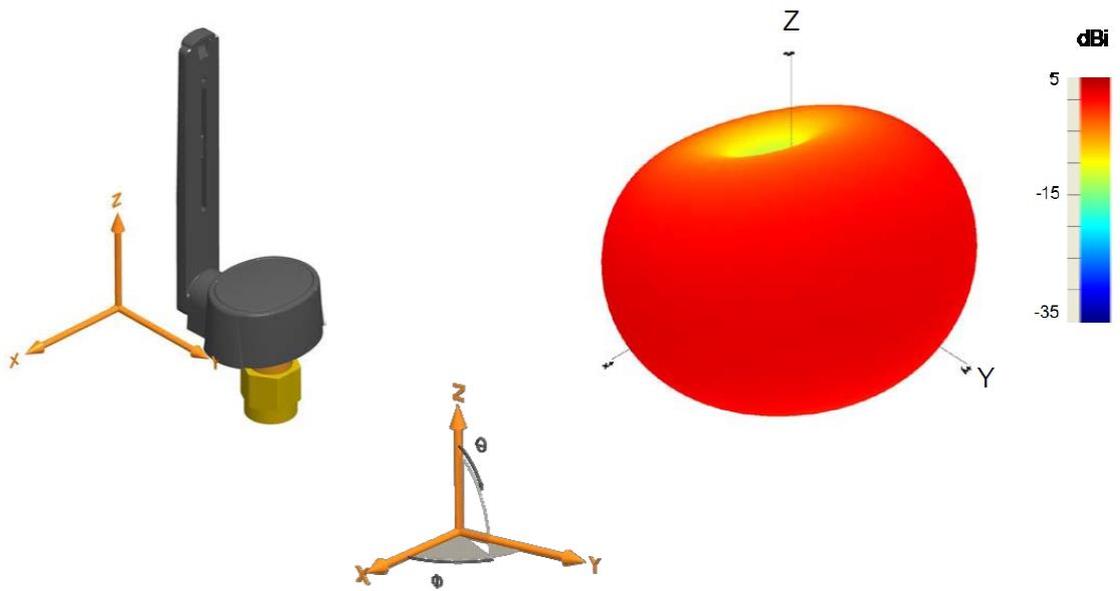


Figura 9.77. Diagrama de radiación tridimensional.

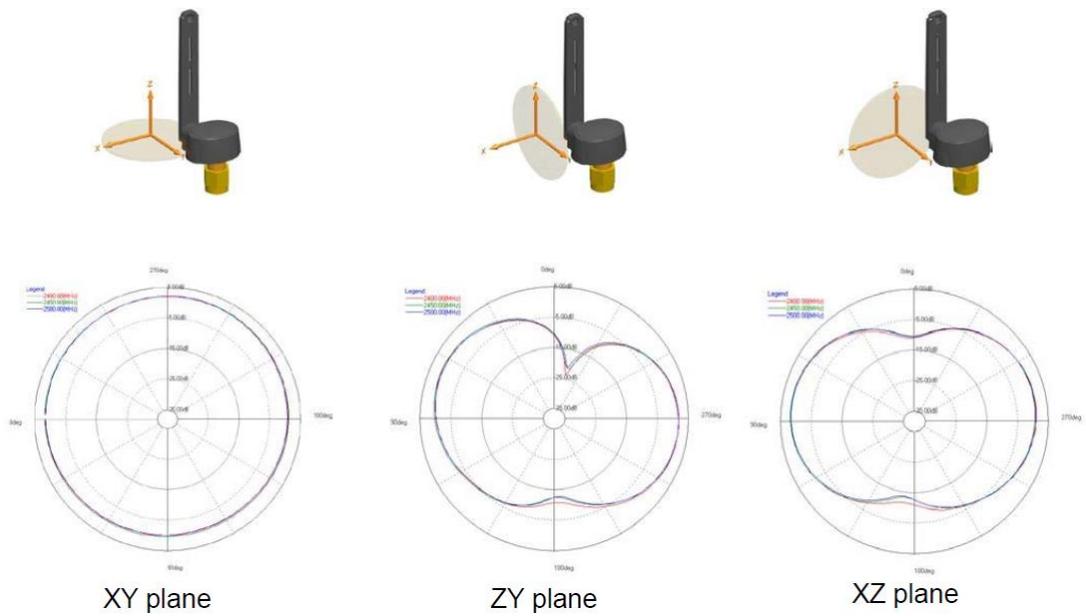


Figura 9.78. Cortes del diagrama de radiación.

#### 9.3.1.4. Antenna Factor ANT-868-CW-HWR-xxx

Especificaciones eléctricas:

Frecuencia central:	868MHz
Ancho de banda:	30MHz
Longitud de onda:	$\lambda/2$
VSWR:	<2.0 típico en el centro
Impedancia:	50 ohms
Ganancia:	2dBi
Conector:	RP-SMA or SMA

Dimensiones:

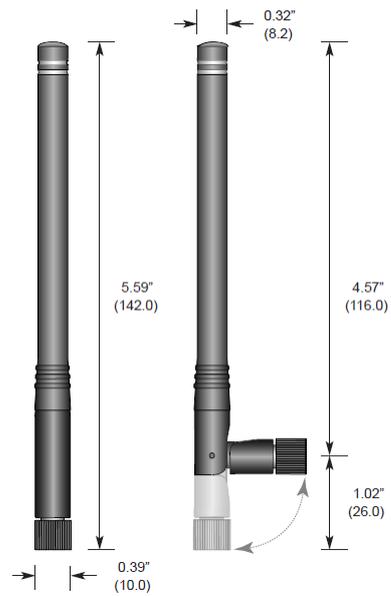


Figura 9.79. Dimensiones de la antena.

Gráfico VSWR:

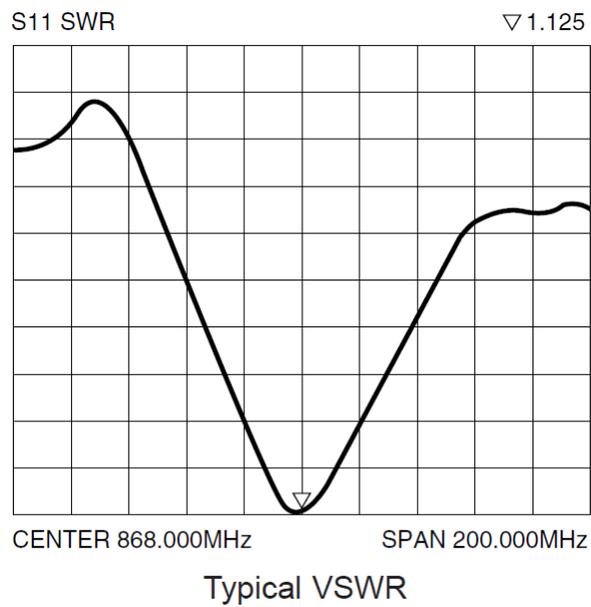


Figura 9.80. VSWR.

### 9.3.1.5. Motas ZigBee

## Wasmote

#### General data:

<b>Microcontroller:</b>	ATmega1281
<b>Frequency:</b>	8MHz
<b>SRAM:</b>	8KB
<b>EEPROM:</b>	4KB
<b>FLASH:</b>	128KB
<b>SD Card:</b>	2GB
<b>Weight:</b>	20gr
<b>Dimensions:</b>	73.5 x 51 x 13 mm
<b>Temperature Range:</b>	[-20°C, +65°C]
<b>Clock:</b>	RTC (32KHz)



#### Consumption:

<b>ON:</b>	9mA
<b>Sleep:</b>	62µA
<b>Deep Sleep:</b>	62µA
<b>Hibernate:</b>	0.7µA

**Operation without recharging:** 1 year \*

\* Time obtained using the Hibernate mode as the energy saving mode

#### Inputs/Outputs:

7 Analog (I), 8 Digital (I/O), 1 PWM, 2 UART, 1 I2C, 1 USB

#### Electrical data:

<b>Battery voltage:</b>	3.3 V - 4.2V
<b>USB charging:</b>	5 V - 100mA
<b>Solar panel charging:</b>	6 - 12 V - 280mA
<b>Auxiliary battery voltage:</b>	3V

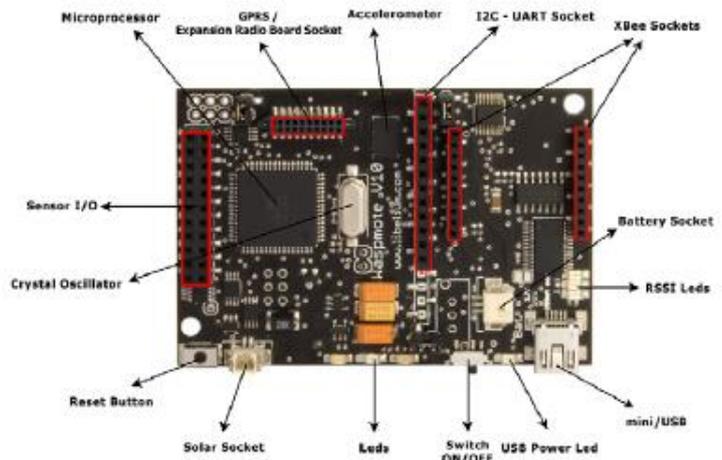
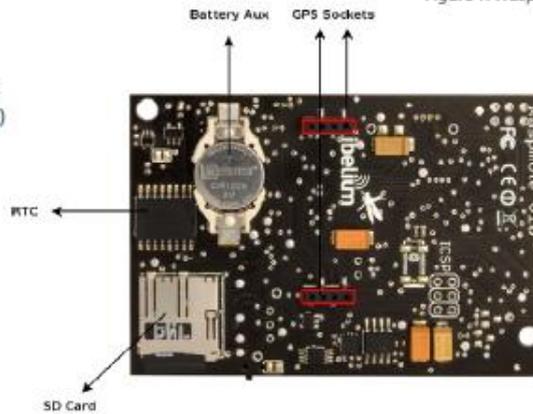


Figure 1: Wasmote Board Top

#### Built-in sensors on the board:

**Temperature (+/-):** -40°C, +85°C. Accuracy: 0.25°C  
**Accelerometer:** ±2g (1024 LSB/g) / ±6g (340LSB/g)  
 40Hz/160Hz/640Hz/2560Hz



## 802.15.4/ZigBee

Model	Protocol	Frequency	txPower	Sensitivity	Range *
XBee-802.15.4	802.15.4	2.4GHz	1mW	-92dB	500m
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2.4GHz	100mW	-100dBm	7000m
XBee-ZB	ZigBee-Pro	2.4GHz	2mW	-96dBm	500m
XBee-ZB-Pro	ZigBee-Pro	2.4GHz	50mW	-102dBm	7000m
XBee-868	RF	868MHz	315mW	-112dBm	12km
XBee-900	RF	900MHz	50mW	-100dBm	10km
XBee-XSC	RF	900MHz	100mW	-106dBm	12km

\* Line of sight and 5dBi dipole antenna

**Antennas:** 2.4GHz: 2dBi / 5dBi  
868/900MHz: 0dBi / 4.5dBi

**Connector:** RPSMA

**Encryption:** AES 128b

**Control Signal:** RSSI

**Standards:** XBee-802.15.4 - 802.15.4 Compliant / XBee-ZB - ZigBee-Pro v2007 Compliant

**Topologies:** star, tree, mesh



Figure 3: XBee

Over the Air Programming is also possible once the node has been installed. With this technique you can reprogram wirelessly one or more Wasp mote sensor nodes at the same time by using a laptop and the Wasp mote Gateway.



Figure 32: Typical OTA process

## Radio Interfaces

Model	Protocol	Frequency	txPower	Sensitivity	Range *
XBee-802.15.4	802.15.4	2.4GHz	1mW	-92dB	500m
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2.4GHz	100mW	-100dBm	7000m
XBee-ZB	ZigBee-Pro	2.4GHz	2mW	-96dBm	500m
XBee-ZB-Pro	ZigBee-Pro	2.4GHz	50mW	-102dBm	7000m
XBee-868	RF	868MHz	315mW	-112dBm	12km
XBee-900	RF	900MHz	50mW	-100dBm	10Km
XBee-XSC	RF	900MHz	100mW	-106dBm	12Km

\* Line of sight and Fresnel zone with 5dBi dipole antenna

### 9.3.1.6. Estación de trabajo Lenovo ThinkStation D20

Las principales características de este equipo son las siguientes:

- Procesador Intel® Xeon® x5650 de doble núcleo (2,66 GHz, Turbo Boost, caché de nivel 2 (L2) de 12 MB)
- Memoria SDRAM DDR2 de 64 GB
- Tarjeta gráfica nVidia Quadro 600 GS de 128 MB
- Disco duro de 1 TB a 7200 rpm



Figura 9.81. Ordenador Lenovo ThinkStation D20.

### 9.3.1.7. Ordenador portátil Lenovo U410

Algunas de sus características son:

- Procesador Intel® Core™ i5-3317U de cuatro núcleos a 1,7GHz
- Memoria DDR3 de 8 GB a 1.600 MHz
- Tarjeta gráfica NVIDIA® GeForce® 610M de 1 GB
- Disco duro de 500 GB a 5400 rpm y unidad SSD de 32 GB



Figura 9.82. Ordenador portátil Lenovo U410.

## 9.3.2. Software

### 9.3.2.1. Matlab

MATLAB (MATrix LABoratory) es un entorno de desarrollo integrado de computación numérica que utiliza el lenguaje de programación M desarrollado en 1984 por la empresa MathWorks.

La elección de usar Matlab para implementar el algoritmo en el lenguaje de programación M ha sido promovida por el hecho de que éste permite realizar operaciones matemáticas numéricas de un modo muy sencillo, gracias a la simplicidad de su sintaxis. Además, Matlab ofrece una gran facilidad a la hora de mostrar los resultados gracias a sus potentes herramientas gráficas.

Las características más importantes de Matlab son:

- Lenguaje de programación de alto nivel.
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos.
- Funciones matemáticas de álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización e integración numérica.
- Funciones para la visualización de datos gráficamente en 2 y 3 dimensiones.
- Herramientas para la creación de interfaces gráficas de usuario personalizadas.
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones externas, e idiomas, tales como C, C++, Fortran, Java, COM y Microsoft Excel.

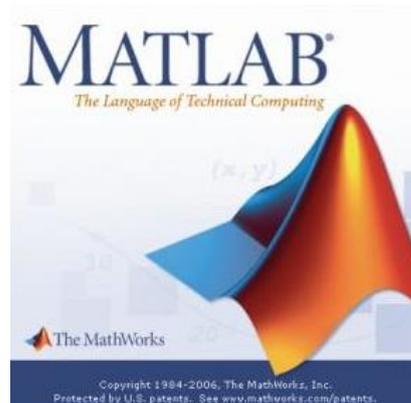


Figura 9.83. Matlab de MathWorks.

### 9.3.2.2. SigmaPlot

SigmaPlot es uno de los paquetes estadísticos más conocidos. A partir de una sencilla hoja de cálculo permite generar gráficas de alta calidad y efectuar análisis estadísticos complejos, de un modo rápido y sencillo.

SigmaPlot ha sido creado por la empresa SYSTAT® y cuenta con un gran reconocimiento a nivel mundial, además de haber sido premiado en varias ocasiones.

Sus principales características son:

- Gran flexibilidad.
- Compatibilidad con Microsoft Windows y Office.
- Más de 100 tipos de gráficos de 2-D y 3-D.
- Rápida representación gráfica desde plantillas.
- Posibilidad de combinación con las capacidades estadísticas de SPSS.
- Extensible a través de macros Visual Basic.
- Ayuda en línea.

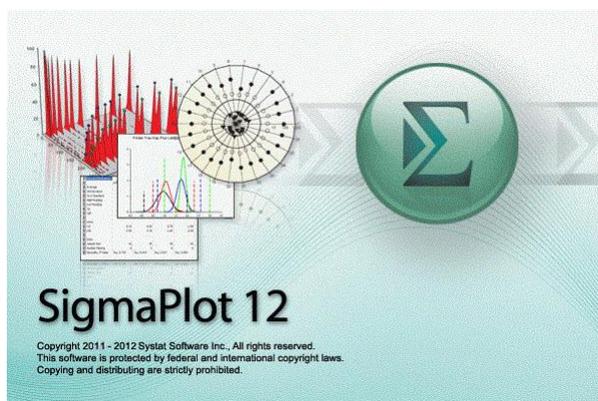


Figura 9.84. SigmaPlot 12.

### 9.3.2.3. Microsoft Word & Excel

Microsoft Word es el procesador de textos más conocido hoy en día, ya sea desde una página en blanco, o usando alguna de las plantillas de las que dispone, éste programa ayuda a crear, editar y enriquecer textos con una gran selección de herramientas y contenido complementario.

Las características más importantes de Microsoft Word son:

- Generar tablas y gráficas.
- Crear hiperenlaces a páginas web.
- Insertar imágenes y capturas de pantalla.
- Exportar a PDF.
- Herramientas de corrección y traducción - Macros para automatizar tareas.



Figura 9.85. Microsoft Word 2013.

Microsoft Excel es un software específico de hojas de cálculos que posee una interfaz práctica y funcional donde el usuario puede gestionar rápidamente su información y visualizar todos los datos de la mejor forma.

Las características más importantes de Microsoft Excel son:

- Rápida creación de tablas y gráficos.
- Gran cantidad de plantillas.
- Gráficos dinámicos y elegantes.
- Posibilidad de compartir documentos en línea.



Figura 9.86. Microsoft Excel 2013.

## 9.4. Congreso: 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting

### Analysis of Radiopropagation of Wireless Transceivers in Surfboards

Hisham Baghdadi<sup>(1)</sup>, Erik Aguirre<sup>(1)</sup>, Peio Lopez<sup>(1)</sup>, Leire Azpilicueta<sup>(1)</sup>, José Javier Astráin<sup>(2)</sup>, Jesús Villadangos<sup>(2)</sup>, Francisco Falcone<sup>(1)</sup>

(1) Dep. de Ing. Eléctrica y Electrónica, UPNA, Pamplona, Navarra, Spain

(2) Dep. de Ing. Matemática e Informática, UPNA, Pamplona, Navarra, Spain

The evolution of wireless technology and detection sensors allow the development of economical and wearable systems that can offer usable information like weather status or changes in person movements and their use can be interesting in some sports where the human body movements are crucial for the result of the competition. In surfing an accelerometer could provide information about all the movements of a contestant and transmit all the information using a wireless link, although the electromagnetic challenge of being surrounded by water must be considered. In this work this complexity is taken in account in order to determine the possible implementation of this kind of systems in this sport. Using a 3D ray launching method a surfboard including the presence of human body has been simulated for two scenarios, with water and with concrete under the board, in which the material properties of all materials have been considered. An antenna has been placed in the back side of the table emitting with an operation frequency of 2.4GHz and the results for the two scenarios are depicted in the Figure 1 using horizontal power level planes at 0.3m and 0.9m. As expected, lower power levels are received when the board is over water caused by the higher absorption of this material, but in two cases they are compatibles with the data transmission. In conclusion, a sensor system for taking and saving information about person movements or his vital signs that allows the downloading of the data once the activity is finished could be implemented in this kind of sports.

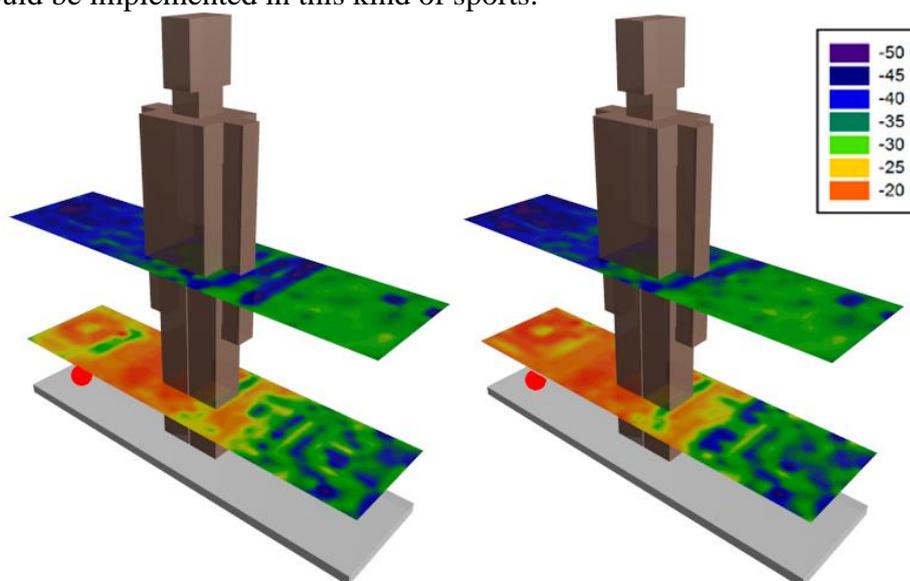


Figure 1 : Simulation results considering that surfboard is on water (Left) and on concrete(Right) with a emitting antenna in the back side(red point).