



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,  
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

INFLUENCIA TOPOLÓGICA Y MORFOLÓGICA EN LA  
PLANIFICACIÓN RADIOELÉCTRICA DE REDES DE  
SENSORES EN ENTORNOS AGROPECUARIOS

Guillermo Gil Lapuente

Francisco Javier Falcone Lanas

Pamplona, Junio 2012



## RESUMEN

La agricultura ha sido desde siempre imperfecta aunque ciertos productos, como el vino, muevan grandes cantidades de dinero. Dado que el tratamiento del suelo y de los productos afecta de manera directa a la calidad, se puede implantar una red de sensores inalámbricos para mejorar el proceso. En este proyecto se va a analizar la influencia topológica y morfológica en viñedos. Los resultados de simulación se han obtenido con un código de trazado de rayos y las medidas mediante la colocación de sensores de ZigBee sobre el terreno.

El conocimiento de la influencia topológica ayudará en la colocación óptima de la red de sensores inalámbricos y en el ahorro de consumo energético.



## AGRADECIMIENTOS

Es mucha la gente que me ha apoyado en el transcurso de este proyecto y por su dedicación y paciencia se merecen aparecer en estas líneas pues sin ellos no habría sido posible.

Gracias a Francisco Falcone, mi tutor del proyecto, por su infinita paciencia, a Leire Azpilicueta y a José Javier Rodríguez por echar una mano cuando hacía falta. A mi familia, padres, hermano y en especial a mi abuelo por tanta ayuda prestada.

Este éxito también es vuestro. Sinceramente, gracias.



## ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>XV</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Justificación del proyecto .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Premisas del proyecto .....</b>	<b>1</b>
<b>1.3. Descripción del proyecto.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3.1. Código de simulación.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3.2. CST.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.3. Medidas analíticas.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Restricciones .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5. Supuestos.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Antecedentes y estado del arte .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Historia de la agricultura .....</b>	<b>7</b>

---

2.1.1.	Del arado al presente, pasando por el vapor .....	7
2.1.2.	La "revolución verde" y la crisis del petróleo.....	11
2.1.3.	Las ciencias aplicadas a la agricultura.....	11
2.1.4.	La nueva era de la agricultura.....	12
2.1.5.	Futuro de la agricultura .....	13
2.2.	Tecnologías inalámbricas .....	14
2.2.1.	WiFi.....	14
2.2.2.	Bluetooth.....	20
2.2.3.	ZigBee.....	27
2.2.3.1.	Usos y aplicaciones .....	29
2.2.3.2.	Comparativa de tecnologías .....	31
2.2.3.3.	Pros / Contras .....	32
2.2.3.4.	Conclusiones .....	35
2.3.	Métodos de radiopropagación.....	36
2.4.	Predecesores.....	44
2.4.1.	Tiempo de vida de los sensores .....	44
2.4.2.	Redes de sensores .....	47

---

<b>3. Documento de objetivos del proyecto.....</b>	<b>49</b>
<b>3.1. Justificación y objetivos del proyecto .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.1. Justificación del proyecto .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.2. Objetivos del proyecto .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.3. Entregables del proyecto .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2. Estructura de descomposición del proyecto.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3. Lista de actividades .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4. Recursos .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.1. Grupo de proyecto .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.2. Recursos hardware y software.....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.2.1. Recursos hardware.....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.2.2. Recursos software.....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.3. Motas Libellium .....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.4. Capacidades de los recursos.....</b>	<b>58</b>
<b>3.5. Estimación de duración de las actividades.....</b>	<b>58</b>
<b>3.5.1. Bases de estimación.....</b>	<b>60</b>
<b>3.6. Diagrama Gantt.....</b>	<b>61</b>

---

3.7.	Programa del proyecto.....	62
4.	Desarrollo del proyecto.....	65
4.1.	Trazado de rayos .....	65
4.2.	Descripción del escenario.....	67
4.3.	Modelo de vid.....	68
4.3.1.	Datos sobre las uvas .....	70
4.3.2.	Variedades de uvas .....	72
4.4.	Transmisores.....	75
4.5.	Resultados de las mediciones analíticas .....	77
4.6.	Resultados de simulación.....	77
4.7.	Analizador de protocolos .....	84
4.8.	Diferencias entre modelos.....	89
4.9.	Modelo de vid avanzado .....	90
4.9.1.	Simulaciones .....	92
4.10.	Conclusiones y diseño de la red .....	94
5.	Resultados de la gestión.....	97
5.1.	Control de cambios.....	97

---

<b>5.2. Actualización del programa .....</b>	<b>102</b>
<b>5.3. Actualización de la lista de actividades .....</b>	<b>102</b>
<b>5.4. Actualización del programa del proyecto .....</b>	<b>103</b>
<b>6. Conclusiones y líneas de trabajo futuras .....</b>	<b>109</b>
<b>6.1. Concordancia entre los objetivos y los resultados .....</b>	<b>109</b>
<b>6.2. Lecciones aprendidas .....</b>	<b>110</b>
<b>6.3. Conclusiones .....</b>	<b>111</b>
<b>6.4. Posibles líneas de trabajo futuras .....</b>	<b>112</b>
<b>6.4.1. Ampliación.....</b>	<b>112</b>
<b>6.4.1.1. Ampliación directa .....</b>	<b>112</b>
<b>6.4.1.2. Extrapolación.....</b>	<b>112</b>
<b>6.4.2. Otros ámbitos .....</b>	<b>113</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>115</b>
<b>Anexo A: Waspote de Libellium.....</b>	<b>119</b>
<b>Anexo B: ANALIZADOR RF FIELD FOX N9912A.....</b>	<b>127</b>
<b>Anexo C: Publicación en URSI.....</b>	<b>139</b>



## Lista de figuras

<b>Figura 2.1: Sembradora de Jethro Tull.....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 2.2: Arado de Jhon Deere.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 2.3: Ejemplo de parcelación.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 2.4: Máquina de vapor aplicada a las labores agrícolas.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 2.5: Logotipo WiFi.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2.6: Distribución de las aplicaciones WiFi.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2.7: Detalle Hotspot WiFi para la vía pública.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2.8: Logotipo Bluetooth.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2.9: Detalle de un chip Bluetooth.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 2.10: Usos del Bluetooth.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 2.11: Scatternet.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 2.12: Logotipo ZigBee.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 2.13: Chip XBee.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2.14: Aplicaciones de ZigBee.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 2.15: Comparativa entre tecnologías.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 2.16: Comparativa inalámbrica.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 2.17: Topologías ZigBee.....</b>	<b>34</b>

---

<b>Figura 2.18: Predicción de mercado.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 2.19: Vista en 3D de los rayos lanzados mediante el algoritmo.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 2.20: Ilustración del método de las imágenes.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 2.21: Evolución del tiempo de vida esperado (en años) a medida que el tamaño de paquete (en bits) decrece.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 2.22: Evolución del tiempo de vida esperado (en años) en función del intervalo de tiempo (en minutos) entre dos paquetes enviados.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 2.23: Evolución del tiempo de vida esperado (en años) en función del número de sensores.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 2.24: Esquema de recogida de datos.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 2.25: Esquema de una red de sensores en un viñedo.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 3.1: Detalle de la mota.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 3.2: Vista de la mota utilizada con la antena montada.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 3.3: Diagrama Gantt.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 4.1: Esquema del trazado de rayos.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 4.2: Vista aérea y representación esquemática del escenario de simulación de los viñedos.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 4.3: Base y detalle de las vides.....</b>	<b>69</b>

<b>Figura 4.4: Representación de potencia recibida en un plano de corte bidimensional de altura 1.88m.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 4.5: Representación de potencia recibida en un plano de corte bidimensional de altura 0.88m.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 4.6: Estimación de niveles de potencia recibidos considerando el emisor a diferentes alturas sobre el nivel del suelo.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 4.7: Estimación de niveles de potencia recibidos considerando operativo el transceptor número 1.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 4.8: Estimación del Perfil de Retardo Potencia obtenido en el punto (71.06m, 5.26m, 4.38m (a una altura efectiva del sensor de 1.88m del nivel del suelo)) en las dos frecuencias de trabajo.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 4.9: Vista aérea de la finca y ubicación de las motas.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 4.10: Mensajes perdidos para distintos periodos de transmisión. ....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 4.11: Desviación en el número de mensajes perdidos para distintos periodos entre mensajes. ....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 4.12: Pérdidas de mensajes por nodo para un periodo de 65 ms.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 4.13: Pérdidas de mensajes por nodo para un periodo de 75 ms.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 4.14: Pérdidas de mensajes por nodo para un periodo de 500 ms.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 4.15: Error medio entre los diversos tipos de medidas.....</b>	<b>90</b>

---

<b>Figura 4.16: Modelo avanzado de uva.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.17: Pseudo-racimo y uvas.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.18: Resultados de simulación con CST.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 4.19: Resultados de la evolución del campo eléctrico al modificar la posición de las sondas .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 4.20: Red de sensores.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 4.21: Orden de la red.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 5.1: Resumen de las horas invertidas.....</b>	<b>107</b>

---

## Lista de tablas

<b>Tabla 2.1: Nuevos estándares WiFi.....</b>	<b>16</b>
<b>Tabla 2.2: Comparación entre los diferentes métodos de cálculo de la propagación.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 4.1: Constante dieléctrica y conductividad de los diferentes materiales utilizados.....</b>	<b>76</b>
<b>Tabla 4.2: Resultados medidas analíticas .....</b>	<b>77</b>
<b>Tabla 4.3: Parámetros de simulación en el algoritmo de Lanzado de Rayos en 3D.....</b>	<b>78</b>
<b>Tabla 4.4: Niveles de RSSI obtenidos .....</b>	<b>88</b>
<b>Tabla 4.5: Potencia recibida (dBm) en el punto (56.94, 5.26, 1.88) emitiendo el transmisor 1.....</b>	<b>89</b>
<b>Tabla 4.6: Potencia recibida (dBm) en el punto (78.12, 5.26, 1.88) emitiendo el transmisor 4.....</b>	<b>89</b>



## **1. Introducción**

En la siguiente memoria se realiza una descripción temática del proyecto, su planificación y desarrollo. Se analiza así mismo el alcance del proyecto y se realiza una valoración de los resultados obtenidos y de los objetivos alcanzados una vez concluido el desarrollo del proyecto.

### **1.1. Justificación del proyecto**

El mundo de la agricultura se ha caracterizado por su labor artesanal, hasta el punto de que el uso de maquinas en el mismo fue muy tardío, siendo una mejora necesaria para abaratar los costes de un producto básico. El trabajador tiene que decidir si se riega, si se poda, si se recoge..., además siempre está presente el error humano o puede darse el caso de que un dispositivo ponga en marcha el riego aunque esté lloviendo; todo esto repercute directamente en la calidad del producto.

De aquí la idea de implantar una red de sensores inalámbricos, de intentar automatizar un proceso simple pero lento y, desde luego, costoso.

### **1.2. Premisas del proyecto**

Se han definido una serie de soluciones basadas en diversas tecnologías inalámbricas, tanto de redes móviles como de redes WLAN/WPAN, con el fin de minimizar el error humano y aumentar la eficiencia tanto en la recogida de datos por telemetría, como

por la posibilidad de telecontrol sobre los diversos elementos presentes en las huertas, así como con el fin de analizar la duración de los elementos constitutivos de las redes inalámbricas bajo análisis.

Para implementar la red inalámbrica disponemos de muchas tecnologías: WiFi, bluetooth, ZigBee, etc. Así que se han fijado una serie de premisas:

- Dado que los sensores funcionan a pilas, se intentará conseguir el máximo ahorro energético.
- Los viñedos suelen ser terrenos muy grandes y hay mucha superficie que cubrir, por lo tanto hay que colocar muchos sensores.
- Por último, pero no por ello menos importante, se intentará abaratar costes.

Hace falta llegar a un punto intermedio porque si reducimos el número de dispositivos, reducimos los costes pero hace falta aumentar la potencia de emisión y eso repercutirá en la vida de la pila.

Hay que tener en cuenta el funcionamiento de los sensores: están dormidos hasta que se activan y mandan una pequeña cadena de datos; por lo tanto no hace falta una gran velocidad de transmisión. Finalmente influirá el terreno en el que se coloquen los sensores para la elección de antenas y potencias de transmisión, ya que a menor potencia emitida menor consumo.

### 1.3. Descripción del proyecto

Una vez vistas las premisas, se ha optado por utilizar sensores de ZigBee, a 868MHz y a 2435MHz, dada la gran duración de las pilas: si tenemos un viñedo muy grande hacen falta muchos sensores y a más sensores, más pilas. Siguiendo una topología estándar, la vida de estos sensores alcanza una media de 5-6 años; además hay posibilidad de alimentarlos con energía solar.

#### 1.3.1. Código de simulación

Para evaluar nuestros complejos escenarios no nos sirve un método empírico normal, así que se ha escogido un sistema mucho más real como es un software basado en el trazado de rayos 3D en formato Ray Launching implementado en Matlab por la Universidad Pública de Navarra. Al ser un método desarrollado por la universidad se ha podido acceder al código y modificarlo para que se asemeje a nuestro caso mediante un código de creación de elementos y materiales, ya que cada objeto tiene unas características distintas. Una vez lanzado el simulador, nos almacena el campo eléctrico, la potencia recibida y los retardos de potencia en una tabla para su posterior análisis [ESPA09].

Los resultados nos aportan una visión bastante realista de la propagación radioeléctrica de las señales. El código puede tener un error máximo de 5dB, mientras que un modelo empírico puede alcanzar los 12dB de diferencia con la realidad.

### **1.3.2. CST**

Con el fin de poder realizar una caracterización más detallada del comportamiento de elementos concretos dentro de una viña (por ejemplo, de la composición y morfología de las vides), resulta adecuado el empleo de técnicas de simulación de onda completa. En este sentido, se ha empleado el software de simulación Computer Simulation Technology (CST), para realizar cálculos de onda completa tridimensionales, basado tanto en integración finita en el dominio temporal como en cálculo de elementos finitos en el dominio frecuencial.

### **1.3.3. Medidas analíticas**

Posteriormente se compararán los resultados de simulación con una serie de medidas analíticas con el fin de optimizar la red inalámbrica de sensores. Para ello se utilizarán una serie de emisores ZigBee [LIBE], un receptor de paquetes de datos y un analizador de espectro.

Con estas herramientas se pretende crear y optimizar una red de sensores inalámbrica en terrenos vinícolas.

## **1.4. Restricciones**

El proyecto debe realizarse en el curso académico 2011/2012. El periodo previsto son 5 meses, desde Febrero hasta Junio de 2012.

No se poseen conocimientos previos en las herramientas que se van a utilizar para su desarrollo.

## **1.5. Supuestos**

Se supone que:

- Se dispone de una dedicación diaria al proyecto.
- Se asume una alta probabilidad de lograr los objetivos.
- La comunicación con el tutor del proyecto es semanal y constante, comentando siempre el estado del proyecto.



## **2. Antecedentes y estado del arte**

En este apartado se realiza un estudio sobre la evolución y el estado actual de las redes de sensores inalámbricos implementadas en terrenos de agricultura y viñedos, así como de los métodos de cálculo de propagación posible y de diversas tecnologías inalámbricas.

### **2.1. Historia de la agricultura**

No es posible decir la fecha del comienzo de la revolución científica en la agricultura, pequeños acontecimientos han ido surgiendo y favoreciendo el desarrollo de determinados aspectos científicos y técnicos aislados, que cuajarían más tarde en la refundación de ciencias como la biología [FITO].

La agricultura tradicional no sufrió apenas modificaciones durante la Edad Media, salvo con la introducción de las nuevas especies desde el Nuevo Mundo en el siglo XVI como el maíz, la patata o el tabaco.

#### **2.1.1. Del arado al presente, pasando por el vapor**

A mediados del siglo XVII se empezó a mejorar el arado tradicional gracias al fortalecimiento de las láminas de madera mediante la fijación de puntas de hierro.

A comienzos del siglo XVIII se empezó a seleccionar la cría de ganado, y a finales ya se usaba la cal como medio para corregir la acidez de los campos. En esta época también apareció un invento muy importante para la agricultura,

como fue la sembradora del inglés Jethro Tull, que fue progresivamente mejorada durante todo el siglo siguiente.

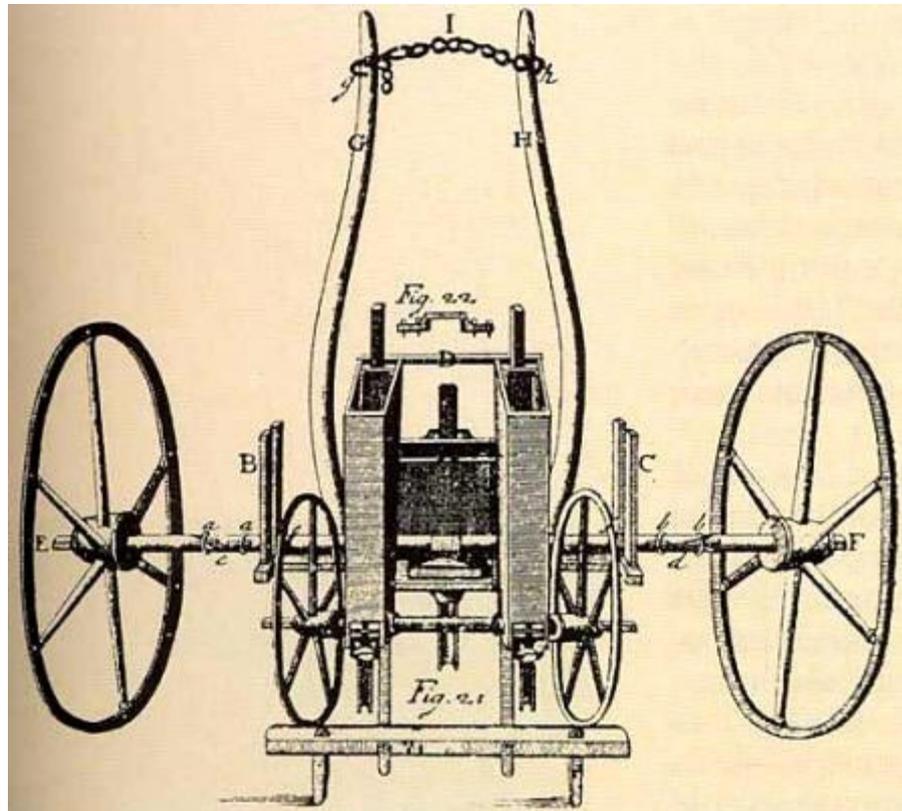


Figura 2.1: Sembradora de Jethro Tull

A finales del siglo XVIII Charles Newbold introdujo la reja de hierro fundido al arado, más tarde en 1830 fue mejorado con la reja de acero por Jhon Deere. Hoy en día sigue siendo básicamente el sistema de arado más utilizado, a pesar de las mejoras introducidas.



Figura 2.2: Arado de Jhon Deere

El siglo XVIII se distinguen una serie de circunstancias que favorecieron las actividades agrícolas, y un mayor entusiasmo de los agricultores por extraer el máximo rendimiento de sus tierras. Se trata del proceso de parcelación, donde los propietarios podían establecer la disposición de los terrenos comunitarios.



Figura 2.3: Ejemplo de parcelación

A partir del este proceso de parcelación se comenzó a practicar con mayor frecuencia la rotación de cultivos, y la alternancia entre cereales y legumbres, al no verse sometidos al sistema de franjas que imperaba en los feudos.

En pleno siglo XIX se dio a conocer la segadora del norteamericano Cyrus McCormick, y con ella multitud de máquinas para la agricultura, tales como trilladoras, desgranadoras de maíz, rastrilladoras, cultivadoras, etc. Con la revolución industrial se comenzó a utilizar el vapor como fuerza de tracción de las máquinas en lugar de la fuerza animal.



Figura 2.4: Máquina de vapor aplicada a las labores agrícolas

Posteriormente comenzó a manifestarse una verdadera revolución científica en la agricultura, impulsada por el avance de varias ciencias biológicas. Gran parte de los avances en esta época nacieron inspirados por la ciencia ecológica y las teorías de la evolución, en que Charles Darwin y Lamarck fueron precursores.

Los transportes, junto con los canales y carreteras, adquirieron en el siglo XIX una importancia capital para la agricultura. El ferrocarril permitió a los

agricultores comercializar sus productos en mercados más amplios, además de obtener todos los suministros que necesitaban para sus explotaciones agrícolas.

A finales del siglo XIX y principios del XX, los buques y los avances producidos en los sistemas de refrigeración especializaron los transportes hasta el extremo de que muchos proveedores agrícolas cambiaban de localización.

### **2.1.2. La "revolución verde" y la crisis del petróleo**

En el siglo XX, tras la II Guerra Mundial, se manifestó una explosión demográfica con la consiguiente demanda de alimentos, esto dio lugar a la llamada "revolución verde", que supuso el cultivo selectivo de determinadas especies tradicionales con objeto de obtener el máximo rendimiento; los métodos de cultivo intensivo se generalizaron y se desarrollaron nuevos híbridos. No obstante, la crisis mundial del petróleo de la década de 1970, y simultáneamente un conjunto de fenómenos naturales como sequías e inundaciones, causaron una reducción importante de las cosechas en todo el mundo. Todos estos factores fueron determinantes para el cambio y desarrollo agrícolas.

### **2.1.3. Las ciencias aplicadas a la agricultura**

Se manifestó un gran progreso en todas las técnicas agrícolas y los procesos en que se ven inmersos. Se pudo conocer por primera vez como actuaba la química

del suelo, los diferentes procesos que se manifiestan en él, sus necesidades en cuanto a nutrientes y las específicas de cada planta. Los grandes rendimientos obtenidos en cosechas consecutivas permitió que las tierras pudieran trabajarse de forma intensiva e industrial, identificándose con precisión el tipo de elemento químico que cada planta necesita para crecer, aportándose así al suelo todos aquellos nutrientes consumidos y facilitando la producción continua.

Con el conocimiento profundo de la química del suelo, los rendimientos agrícolas se incrementaron notablemente, permitiendo cultivos de forma intensiva e industrial.

Durante el siglo XIX se produjo una reestructuración del comercio mundial tras la demanda de alimentos para las zonas urbanas, motivado por el desplazamiento de trabajadores hacia los núcleos de población industrializados, así como la necesidad de materias primas para la industria. De esta forma comenzó a desarrollarse la ciencia y la tecnología industrial aplicadas a la agricultura, dando lugar al nacimiento de la industria agrícola a mediados del siglo XX.

#### **2.1.4. La nueva era de la agricultura**

Los progresos obtenidos durante la revolución científica se vieron no obstante condicionados por nuevas cuestiones, mayormente ajenas a los temas puramente científicos. La mecanización y profundos cambios producidos en la

organización de la economía agrícola trajeron consigo una serie de problemas, tanto políticos como sociológicos.

Las reformas agrarias, el nacimiento de sindicatos para defender los derechos colectivos de los trabajadores, la despoblación del medio rural, etc., generó una nueva era de la agricultura marcada por movimientos sociales importantes; en definitiva una fisonomía de la agricultura totalmente diferente a los tiempos precedentes.

### **2.1.5. Futuro de la agricultura**

Una vez que se conoce las maneras de trabajo y crecimiento óptimas, ¿por qué no automatizar todo el proceso? La agricultura desde siempre ha sido un trabajo totalmente artesano, manual, con la entrada de maquinaria se ahorraron grandes cantidades de trabajo, sin embargo aún hay una persona que toma todas las decisiones.

Con una red de sensores se podría ahorrar la duda, el error humano y eso afectaría directamente a la calidad del producto final, ya sea mejorando la calidad del producto o reduciendo los precios finales.

## 2.2. Tecnologías inalámbricas

En este apartado vamos a estudiar las diferentes tecnologías inalámbricas posibles para realizar el proyecto, haciendo hincapié en la seleccionada, ZigBee [FARA08] [PARS00] [ZIGB].

### 2.2.1. WiFi



Figura 2.5: Logotipo WiFi

La tecnología inalámbrica está conviviendo con nosotros desde principios de los 90, aunque parezca algo novedoso [REDE].

A finales de los años 90, compañías como Lucent, Nokia o Symbol Technologies, se reunieron para crear una asociación conocida como WECA (Wireless Ethernet Compatibility). En 2003 pasó a llamarse Wi-Fi Alliance, cuyo objetivo era fomentar la tecnología WiFi y establecer estándares para que los equipos dotados de esta tecnología inalámbrica fueran compatibles entre sí.

En abril de 2000 se establece la primera norma: WiFi 802.11b, que utilizaba la banda de los 2.4Ghz y podía alcanzar una velocidad de 11Mbps. Posteriormente llegó la especificación 802.11a, que generó algunos problemas entre Estados Unidos y Europa por utilizar la banda de 5Ghz. En Estados Unidos esta banda estaba libre, sin embargo, en Europa estaba reservada para fines militares. Esta situación ralentizó el crecimiento de esta tecnología inalámbrica, dado que la mayoría de los fabricantes de dispositivos tardaron en reaccionar ante la imposibilidad de vender sus productos en el viejo continente.

Tras muchos debates se aprobó una nueva especificación, 802.11g, que al igual que la norma 802.11b utilizaba la banda de los 2,4GHz pero aumentaba la velocidad hasta los 54Mbps.

Llegado el punto en el que 3 especificaciones fueron incompatibles entre ellas se habilitó la banda de los 5GHz para usos civiles, lo que fue un gran adelanto, no sólo porque ofrecía la mayor velocidad, sino porque no existían otras tecnologías inalámbricas, como Bluetooth o ZigBee que utilizan la misma frecuencia.

A día de hoy estamos inmersos en la especificación 802.11n, que trabaja a 2,4GHz a una velocidad de 108 Mbps.

Actualmente hay nuevos estándares en evolución:

<b>Estándar</b>	<b>Funcionalidad Principal</b>
802.11e: MAC Enhancements (QoS)	Mejoras en capa MAC
802.11k: Radio Resource Measurement	Mediciones y registros de rendimiento
802.11n: High Throughput	Alta velocidad de transmisión
802.11p: Wireless Access for the Vehicular Environment	WiFi en vehículos
802.11r: Fast Roaming	Transiciones entre puntos de acceso
802.11s: ESS Mesh Networking	Redes Mesh 802.11
802.11u: InterWorking with External Networks	Interoperabilidad con otras redes

Tabla 2.1: Nuevos estándares WiFi

Ámbitos de aplicación de la tecnología WiFi:

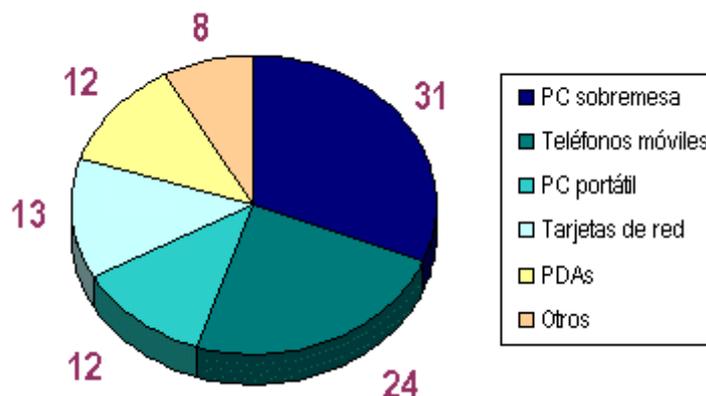


Figura 2.6: Distribución de las aplicaciones WiFi

En el hogar:

WiFi aparece en el hogar como una alternativa para el Home Networking, es decir, su utilización permite la interconexión de diferentes dispositivos de forma inalámbrica de una forma sencilla y económica.

A medida que el acceso a Internet en banda ancha se desarrolla, el hogar se presenta como un espacio de ocio y trabajo.

De esta forma, el acceso a Internet se hace más necesario y la posibilidad de compartir el mismo acceso entre varios ordenadores y de forma simultánea será una necesidad creciente.

En la empresa:

WiFi aparece como una extensión inalámbrica de las Redes de Área Local en las empresas. En la empresa, una solución de Office Networking basada en WiFi presenta ventajas e inconvenientes. Las ventajas son claras:

- Movilidad de equipos
- Ausencia de cableado
- Libertad en los cambios organizativos
- Acceso a la red independientemente del puesto de trabajo

En el ambiente público:

La aparición de los PWLAN (Public Wireless Local Area Network) representa una oportunidad de negocio tanto para los fabricantes como para aquellas empresas que desarrollan un servicio de acceso a Internet en lugares de uso público.



Figura 2.7: Detalle Hotspot WiFi para la vía pública

En cuanto a las topologías de red, se dispone de dos métodos de funcionamiento:

#### Modo Infraestructura:

La configuración típica requiere de un punto de acceso conectado a un segmento cableado de red, bien sea Ethernet, token ring, coaxial, cable óptico... A veces la conexión acaba en un módem router para conexión con un operador de cable o ADSL.

### Modo Ad Hoc:

Las redes “Ad hoc”, no requieren un punto de acceso. En este modo de funcionamiento los dispositivos interactúan unos con otros, permitiéndose una comunicación directa entre dispositivos. En algunas ocasiones se las denomina redes “peer to peer” inalámbricas

### 2.2.2. Bluetooth



Figura 2.8: Logotipo Bluetooth

La historia de Bluetooth se remonta a mediados de la década del 90', cuando Ericsson se encontraba desarrollando una tecnología que permitiera comunicaciones a corto alcance y con un bajo consumo energético, ya que inicialmente estaba destinado a dispositivos móviles [SEGU].

Con el paso del tiempo los grandes de la tecnología mostraron interés por el producto y formaron una SIG (Special Interest Group), eso en el campo de la tecnología corresponde a una especie de grupo de trabajo conformado por diferentes empresas, quienes aportan capital monetario y humano. Entre esos

grandes está: Apple, Ericsson, Intel, Lenovo, Microsoft, Motorola, Nokia, Nordic Semiconductor y Toshiba.

Obviamente Bluetooth no se llamó así desde un comienzo, de hecho Bluetooth era una de las tantas betas del proyecto. Al SIG le pareció un buen nombre, y lo adoptaron. La palabra Bluetooth proviene del rey danés Herald Blåtand, cuya traducción del apellido a inglés sería “Bluetooth”, personaje de notable relevancia escandinava en la época feudal.

En 1998, cuando Bluetooth vio la luz, WiFi (el estándar 802.11) era muy comentado por el público y muchos llegaron a pensar que Bluetooth era la competencia del WiFi. Sin embargo esto no era así, Bluetooth tiene una finalidad muy definida y se basa en ser una tecnología que:

- Establece conexiones con poco gasto de energía.
- Establece enlaces por lo general de corta duración.
- Otorga seguridad mediante diversas maneras de cifrado de datos, además de exigir el uso de un PIN para establecer conexiones entre equipos.
- Soporta voz y datos
- Tiene un bajo costo de producción e implementación

En 1999 fue lanzada la primera versión de Bluetooth que permitía una velocidad de hasta 0.8 ~ 1Mbps a una distancia menor de 10 metros. Obviamente todo lo

anterior era teórico y nunca se alcanzaba esa cifra. Al poco tiempo esa primera versión fue sustituida por la 1.1 y más tarde por la 1.2, la cual fue la más popular.

La especificación de Bluetooth define un canal de comunicación de máximo de 720Kb/s con rango óptimo de 10 metros.

La frecuencia de radio con la que trabaja está en el rango de 2.4 a 2.48 GHz con amplio espectro y saltos de frecuencia con posibilidad de transmitir en Full Duplex con un máximo de 1600 saltos/s. Los saltos de frecuencia se dan entre un total de 79 frecuencias con intervalos de 1Mhz; esto permite dar seguridad y robustez.

La potencia de salida para transmitir a una distancia máxima de 10 metros es de 0 dBm (1 mW), mientras que la versión de largo alcance transmite entre 20 y 30 dBm (entre 100 mW y 1 W).

Para lograr alcanzar el objetivo de bajo consumo y bajo costo, se ideó una solución que se puede implementar en un solo chip utilizando circuitos CMOS. De esta manera, se logró crear una solución de 9x9mm y que consume aproximadamente 97% menos energía que un teléfono celular común.



Figura 2.9: Detalle de un chip Bluetooth

### Usos y aplicaciones

Las aplicaciones Bluetooth permiten una gran variedad de usos, pero los principales son:

- Eliminación de la necesidad de conexiones por cable entre los productos y accesorios electrónicos.
- Intercambio de archivos, tarjetas de visita, citas del calendario, etc. entre usuarios de Bluetooth.
- Sincronización y transferencia de archivos entre dispositivos.
- Conexión a determinados contenidos en áreas públicas.

- Como mandos a distancia funcionan como llaves, entradas y control remoto.

Todas estas aplicaciones son procesos de corto alcance y baja capacidad de transmisión.

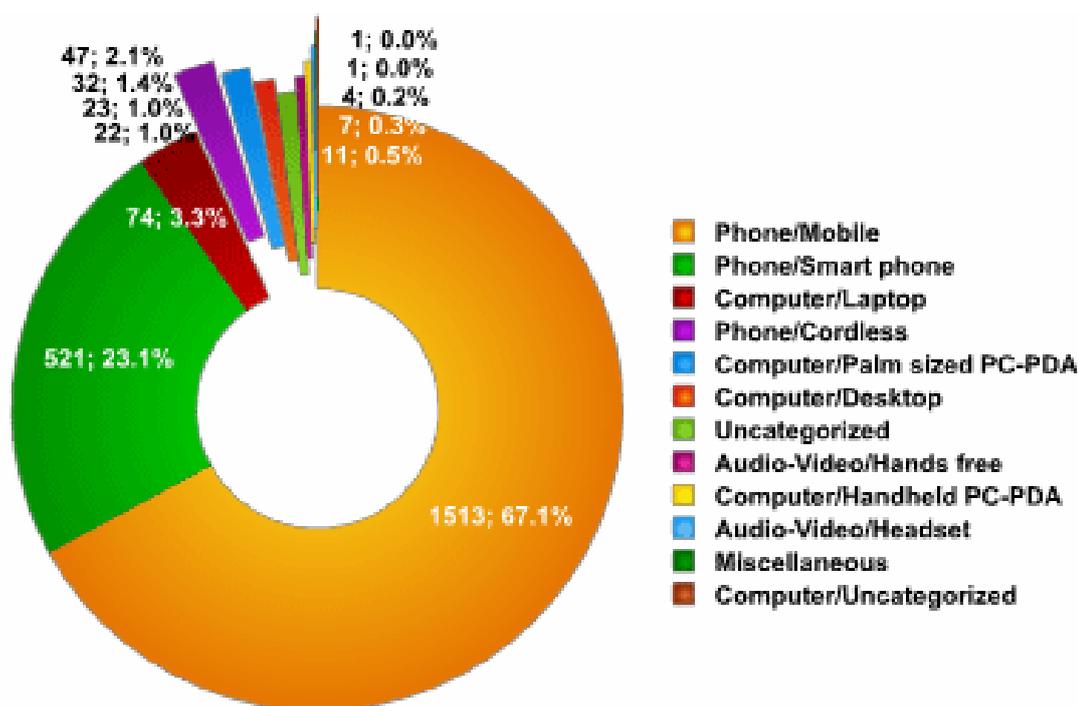


Figura 2.10: Usos del Bluetooth

### Tipología

A diferencia de otras tecnologías LAN inalámbricas, como IEEE 802.11 (WiFi), diseñadas para dispositivos que se hallen dentro o en los alrededores de un

mismo edificio, los dispositivos que utilicen las redes PAN inalámbricas IEEE 802.15, incluyendo Bluetooth, podrán comunicarse en cualquier parte del mundo de forma stand-alone, incluso a bordo de un barco o avión y sin necesidad de utilizar equipo hardware adicional, como puntos de acceso.

Cuando un dispositivo Bluetooth está dentro del radio de cobertura de otro, pueden establecer un enlace entre ellos. Hasta ocho unidades Bluetooth pueden comunicarse entre ellas y formar lo que se denomina una Piconet o Picorred.

La unión de varias piconets se denomina Scatternet o Red Dispersa.

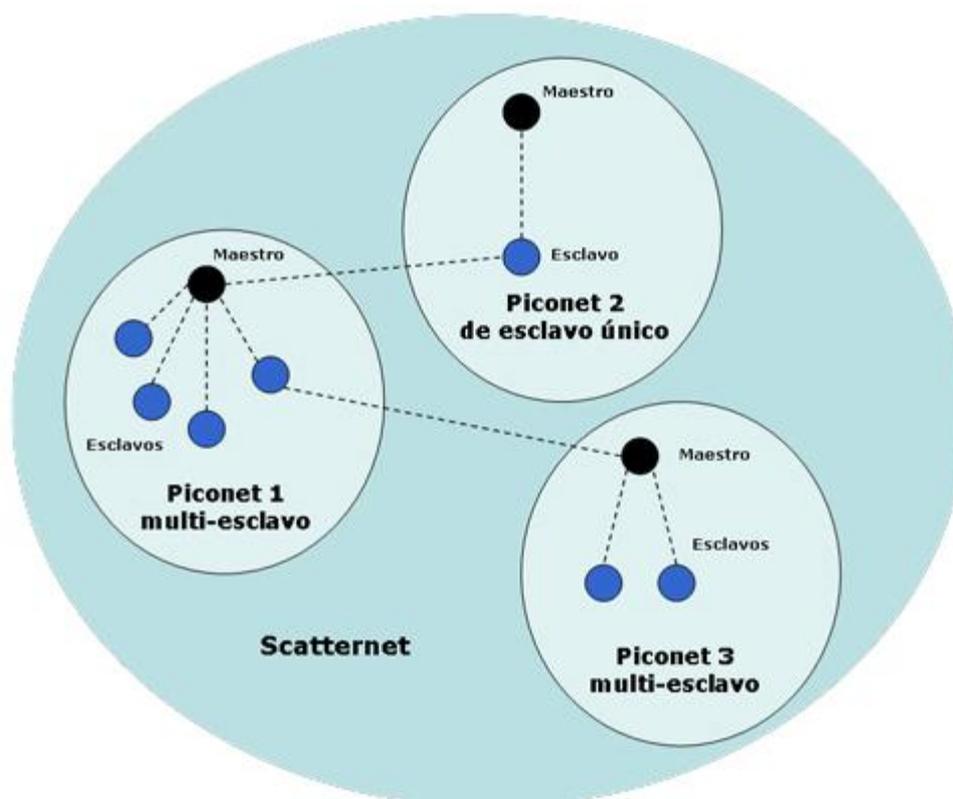


Figura 2.11: Scatternet

---

La topología Bluetooth se puede describir como una estructura de piconets múltiples. Dado que la especificación Bluetooth soporta tanto conexiones punto a punto como punto a multipunto, se pueden establecer y enlazar varias piconets en forma de scatternet. Las piconets pertenecientes a una misma scatternet no están coordinadas y los saltos de frecuencia suceden de forma independiente, es decir, todos los dispositivos que participan en la misma piconet se sincronizan con su correspondiente tiempo de reloj y patrón de saltos determinado. El resto de piconets utilizarán diferentes patrones de saltos y frecuencias de relojes distintas, lo que supone distintas velocidades de salto entre canales. Aunque no se permite la sincronización de diferentes piconets, los dispositivos pueden participar en diferentes piconets gracias a una multiplexación por división de tiempo (TDM). Esto permite a un dispositivo participar de forma secuencial en diferentes piconets, estando activo en sólo una piconet cada vez.

### 2.2.3. ZigBee



Figura 2.12: Logotipo ZigBee

El nombre "ZigBee" se deriva de los patrones erráticos comunicativos que hacen muchas abejas entre las flores durante la recogida de polen. Esto es evocador de las redes invisibles de las conexiones existentes en un entorno totalmente inalámbrico.

Las especificaciones de ZigBee se hicieron públicas y disponibles (sin propósito comercial) para universidades, centros de desarrollo e individuales en San Ramón, California, por parte de la ZigBee Alliance a mediados de 2005.

El 5 de Noviembre de 2007, se anunció la finalización de la aplicación pública ZigBee Home Automation (HA) y su disponibilidad inmediata al público de forma gratuita. Con la ZigBee HA se ofrece a los fabricantes, integradores,

desarrolladores, etc., la opción de trabajar bajo un enfoque basado en estándares a la hora de introducir los nuevos productos dedicados a la domótica o automatización del hogar, eliminando así la necesidad de hacerlo sobre tecnología patentada.



Figura 2.13: Chip XBee

ZigBee es un estándar que define un conjunto de protocolos de comunicación de baja velocidad de datos de corto alcance de redes inalámbricas. Los dispositivos inalámbricos basados en ZigBee funcionan a 868 MHz, 915 MHz y 2,4 GHz. La velocidad de datos máxima es de 250 Kbps. Está dirigido principalmente para aplicaciones a pilas con baja tasa de datos, de bajo coste y con batería de larga duración. En muchas aplicaciones de ZigBee el tiempo total que el dispositivo móvil está involucrado en cualquier tipo de actividad es muy limitado: Pasa la mayor parte de su tiempo en un modo de ahorro de energía, también conocido como el modo de suspensión. Como resultado, los dispositivos son capaces de estar operativos durante varios años antes de que sus baterías necesiten ser reemplazadas.

Es un sistema ideal para redes domóticas, específicamente diseñado para reemplazar la proliferación de sensores/actuadores individuales. ZigBee fue creado para cubrir la necesidad del mercado de un sistema a bajo costo, un estándar para redes Wireless de pequeños paquetes de información, bajo consumo, seguro y fiable.

### **2.2.3.1. Usos y aplicaciones**

Los protocolos ZigBee están definidos para su uso en aplicaciones embebidas con requerimientos muy bajos de transmisión de datos y consumo energético. Se pretende su uso en aplicaciones de propósito general con características auto organizativas y bajo coste (redes en malla, en concreto). Puede utilizarse para realizar control industrial, albergar sensores empotrados, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo o intrusos o domótica. La red en su conjunto utilizará una cantidad muy pequeña de energía de forma que cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación.



Figura 2.14: Aplicaciones de ZigBee

Podemos comprobar que no son procesos largos ni de mucha transferencia de datos, suelen ser sensores o sistemas domóticos; de ahí que sea una de las maneras más efectivas y baratas de dar soporte a estos sistemas.

### 2.2.3.2. Comparativa de tecnologías

Comparación de Tecnologías Inalámbricas			
	Wi-fi	Bluetooth	ZigBee
<b>Bandas de Frecuencias</b>	2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz, 868 / 915 MHz
<b>Tamaño de Pila</b>	~ 1Mb	~ 1Mb	~ 20kb
<b>Tasa de Transferencia</b>	11Mbps	1Mbps	250kbps (2.4GHz) 40kbps (915MHz) 20kbps (868MHz)
<b>Números de Canales</b>	11 - - 14	79	16 (2.4GHz) 10 (915MHz) 1 (868MHz)
<b>Tipos de Datos</b>	Digital	Digital, Audio	Digital (Texto)
<b>Rango de Nodos Internos</b>	100m	10m - 100m	10m - 100m
<b>Números de Dispositivos</b>	32	8	255 / 65535
<b>Requisitos de Alimentación</b>	Media - Horas de Batería	Media - Días de Batería	Muy Baja - Años de Batería
<b>Introducción al Mercado</b>	Alta	Media	Baja
<b>Arquitecturas</b>	Estrella	Estrella	Estrella, Árbol, Punto a Punto y Malla
<b>Mejores de Aplicaciones</b>	Edificio con Internet Adentro	Computadoras y Teléfonos	Control de Bajo Costo y Monitoreo
<b>Consumo de Potencia</b>	400ma transmitiendo, 20ma en reposo	40ma transmitiendo, 0.2ma en reposo	30ma transmitiendo, 3ma en reposo
<b>Precio</b>	Costoso	Accesible	Bajo
<b>Complejidad</b>	Complejo	Complejo	Simple

Figura 2.15: Comparativa entre tecnologías

Echando un vistazo a la tabla podemos ver claramente que ZigBee consume muchísimo menos que los demás, pero también envía datos más pequeños; de aquí se deduce inmediatamente que su uso para transmisión de la información de sensores es muy bueno. Los sensores están mucho tiempo dormidos y envían

flags en los cambios de estado o cada cierto tiempo una cadena de texto con su estado. También permite muchos más dispositivos y esto unido a los tipos de arquitectura que soporta es lo que hace que sea muchísimo más efectivo ZigBee, frente a otras tecnologías inalámbricas, a la hora de analizar grandes superficies

### 2.2.3.3. Pros / Contras

Si echamos un vistazo en la clase de comunicaciones que se producen en una red de sensores o actuadores, podemos encontrar que muchas de estas comunicaciones se realizan con pequeños paquetes de datos: para enviar información de un sensor (por Ej., activado = detecta humo), o simplemente para controlar el estado de los sensores. Además de ser paquetes pequeños de información, la gran mayoría de los dispositivos pueden estar ‘dormidos’ hasta que envíen la información (porque no ocurre nada) y activarse al detectar algo.

Las principales características de estos sensores son:

- Consumo de potencia extremadamente bajo
- La posibilidad de estar ‘dormidos’ durante grandes periodos de tiempo
- Su sencillez
- Su bajo costo

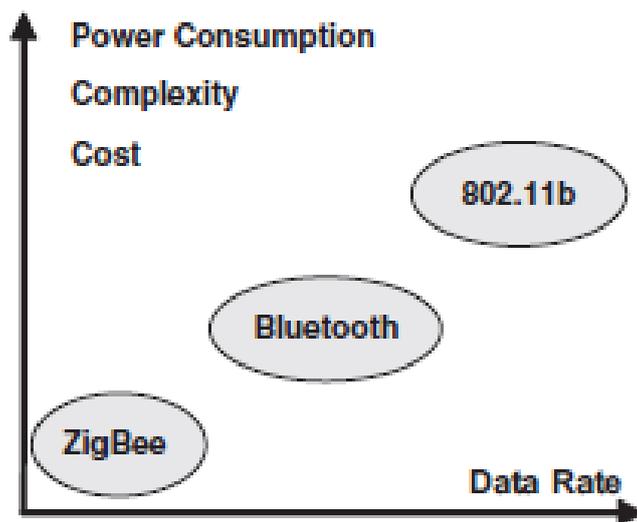


Figura 2.16: Comparativa inalámbrica

- Ideal para conexiones punto a punto y punto a multipunto
- Diseñado para el direccionamiento de información y el refrescamiento de la red.
- Opera en la banda libre de ISM 2.4 GHz para conexiones inalámbricas.
- Óptimo para redes de baja tasa de transferencia de datos.
- Alojamiento de 16 bits a 64 bits de dirección extendida.
- Reduce tiempos de espera en el envío y recepción de paquetes.
- Detección de Energía (ED).
- Baja ciclo de trabajo - Proporciona larga duración de la batería.
- Soporte para múltiples topologías de red: Árbol, estrella y malla.

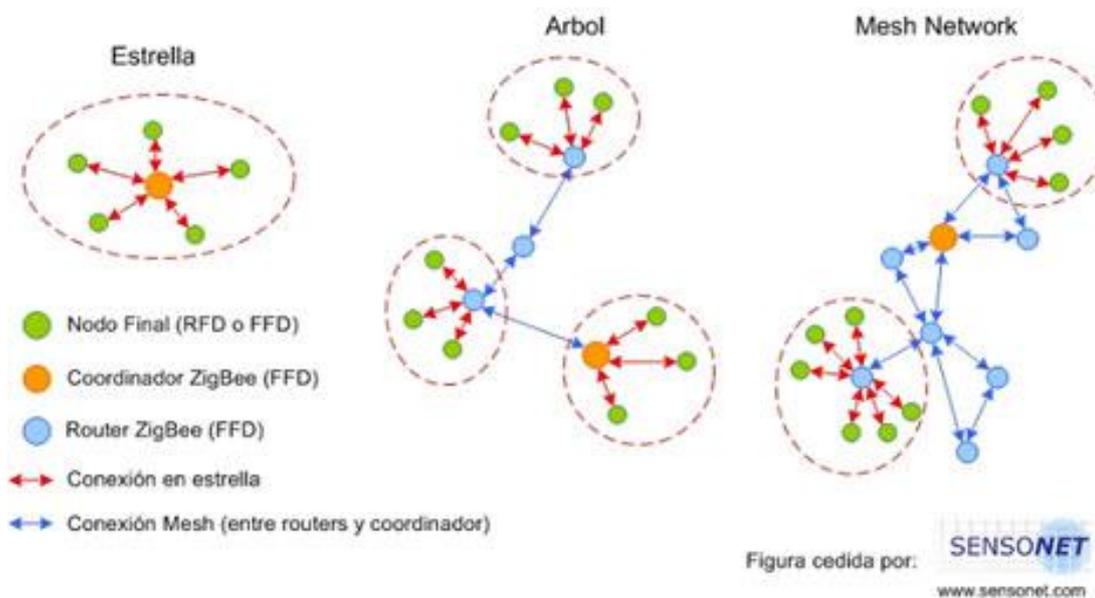


Figura 2.17: Topologías ZigBee

- Hasta 65.000 nodos en una red.
- 128-bit AES de cifrado - Provee conexiones seguras entre dispositivos.

Por otro lado, tenemos alguna desventaja:

- La tasa de transferencia es muy baja.
- Solo manipula textos pequeños comparados con otras tecnologías.
- ZigBee trabaja de manera que no puede ser compatible con bluetooth en todos sus aspectos porque no llegan a tener las mismas tasas de transferencia, ni la misma capacidad de soporte para nodos.
- Tiene menor cobertura porque pertenece a redes inalámbricas de tipo WPAN.

Se espera que los módulos ZigBee sean los transmisores inalámbricos más baratos de la historia, y además producidos de forma masiva. Tendrán un coste aproximado de alrededor de los 6 euros y dispondrán de una antena integrada, control de frecuencia y una pequeña batería. Ofrecerán una solución tan económica porque la radio se puede fabricar con muchos menos circuitos analógicos de los que se necesitan habitualmente.

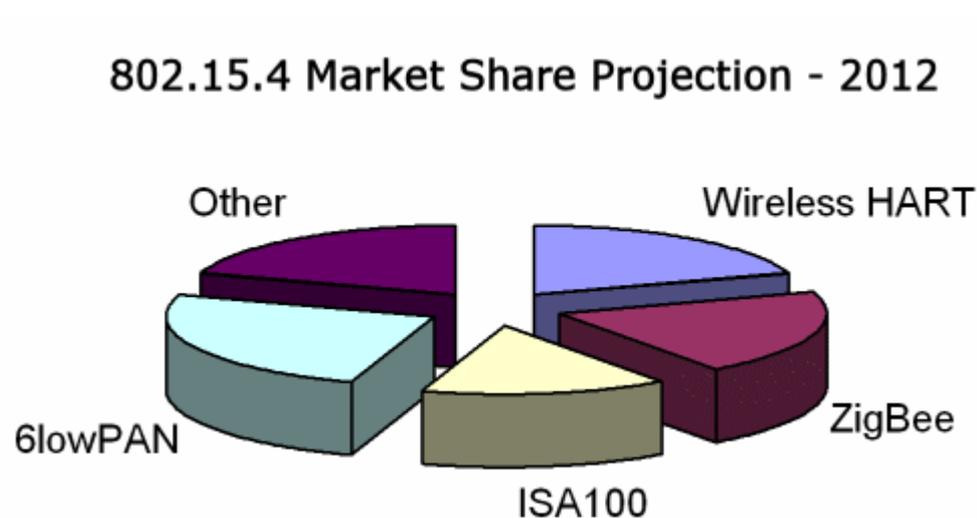


Figura 2.18: Predicción de mercado

#### 2.2.3.4. Conclusiones

Una vez vistas las tecnologías inalámbricas se puede comprobar que ZigBee es la que mejor encaja con nuestro proyecto. Si se miran las premisas de ahorro energético, gran cantidad de sensores y bajo coste, ZigBee es el más útil, dado que permite mayor cantidad de sensores y un menor consumo energético.

## 2.3. Métodos de radiopropagación

### Modelos empíricos

Los métodos empíricos proporcionan una estimación rápida de la pérdida básica de propagación, o de la intensidad de campo en cualquier punto en torno a un transmisor. Estos métodos son rápidos y sencillos, pero poco exactos. La media cuadrática del error entre el valor estimado por estos métodos y el valor medio puede ser del orden de 10 a 14 dB. [HERN08] [ESPA09]

En este apartado se presentaran algunos de los métodos más utilizados.

- Modelo de Okumura

Uno de los modelos más utilizados para la predicción de nivel de señal en macrocélulas para entornos urbanos es el método de Okumura.

Este modelo se puede aplicar en distancias de 1 a 100Km a frecuencias comprendidas entre los 150 y 1500MHz. Para conseguir definir las curvas de atenuación de este modelo, Okumura realizó en Tokio muchas mediciones de la atenuación que sufrían las señales emitidas desde estaciones base al llegar a los dispositivos móviles. Para estas medidas, fueron utilizadas estaciones base a alturas de entre 30 y 100 metros, las cuales estaban a una mayor altura que la que se suelen utilizar hoy en día.

Existen también factores correctores dependiendo del terreno que pueden mejorar la exactitud. Este modelo tiene una desviación estándar de 10 a 14 dB entre las pérdidas predichas por este y las medidas reales que se realizaron para desarrollarlo.

- Modelo de Hata

El modelo de Hata es una fórmula para las gráficas de pérdidas en espacio libre de Okumura y es válida para el mismo rango de frecuencias (150-1500 MHz).

El modelo Hata es una buena aproximación para el modelo de Okumura cuando  $d > 1\text{Km}$ , es un buen modelo para la primera generación de móviles, pero no funciona bien con las tecnologías actuales con menos tamaños de células y mayores frecuencias.

- Método COST 231 (Extensión del modelo Hata)

El modelo de Hata fue extendido por la EURO-COST para frecuencias de 2 GHz.

Este modelo se conoce como la extensión de Hata COST 231 y se puede usar cuando:

- $1,5\text{GHz} < f_c < 2\text{GHz}$
- $30\text{m} < h_t < 200\text{m}$
- $1\text{m} < h_r < 10\text{m}$
- $1\text{Km} < d < 20\text{Km}$

- Método Anderson 2D

Para la estimación del nivel de señal en el receptor, el modelo Anderson 2D diferencia los casos en los que hay visión directa entre transmisor y receptor y aquellos en los que no la hay. De esta forma, se pueden distinguir dos casos fundamentales y excluyentes en funcionamiento:

- Modo LOS (Line Of Sight). Cuando existe visión directa entre emisor y receptor, y se usa un modelo de dos rayos con correcciones.
- Modo NLOS (No Line Of Sight) Cuando no existe visión directa entre emisor y receptor.

Se calculan las pérdidas por difracción en múltiples obstáculos.

A las pérdidas previstas por cada modo se añaden posteriormente las correcciones por la morfología que se hayan definido.

### **Métodos determinísticos de predicción de propagación**

Estos métodos están basados en la teoría de la propagación de ondas electromagnéticas. A diferencia de los métodos estadísticos, los métodos determinísticos necesitan un gran detalle en la descripción del entorno, dando así unas predicciones mucho más precisas de la propagación de la señal. En teoría, las características de la propagación electromagnética podrían ser calculadas resolviendo las ecuaciones de Maxwell, desafortunadamente, esto requiere unas operaciones matemáticas muy complejas y por tanto, un coste computacional extremadamente alto.

Por ello, existen otras técnicas, como el trazado de rayos que no resuelven exactamente las ecuaciones de Maxwell, pero dan un muy buen resultado con un coste computacional sostenible.

- Técnicas de trazado de rayos

### Algoritmo de lanzamiento de rayos

El procedimiento básico en un método de trazado de rayos (figura 2.19) es el algoritmo de lanzamiento de rayos. En primer lugar, un rayo es lanzado desde la antena de transmisión, después, el rayo es trazado para ver si choca con algún objeto o con la antena receptora.

Cuando el rayo es interceptado por un objeto, sucede alguno de los fenómenos de propagación como la reflexión, la transmisión, la difracción o el scattering dependiendo de la geometría y las propiedades eléctricas del objeto. Cuando un rayo es recibido por una antena, el campo eléctrico asociado a ese rayo es calculado.

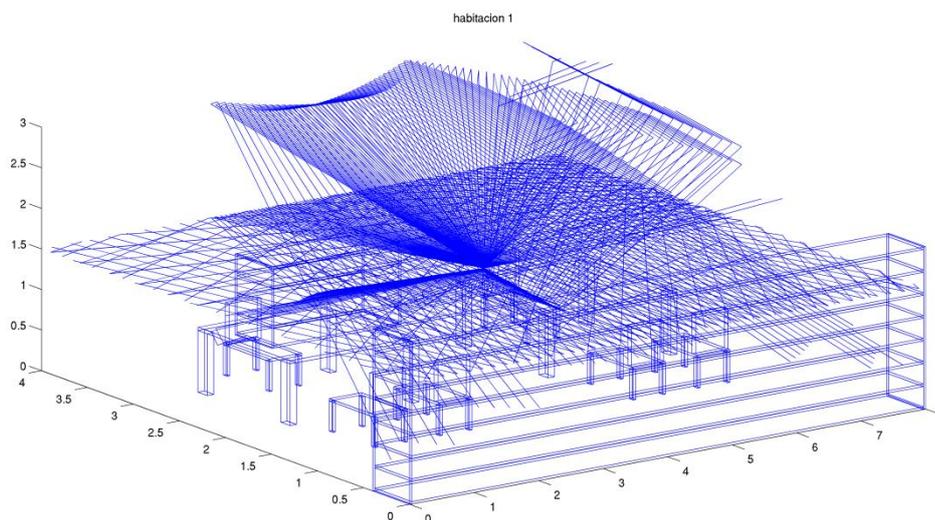


Figura 2.19: Vista en 3D de los rayos lanzados mediante el algoritmo [ESPA09]

Este algoritmo tiene una serie de problemas que deben ser resueltos como por ejemplo:

- ¿Cómo lanzar un rayo?

- ¿Cómo determinar si un rayo impacta con un objeto?
- ¿Con que objeto?
- ¿Cómo determinar cuando un rayo es recibido por una antena receptora?

### El método de las imágenes

El método de las imágenes es un método simple y preciso para determinar la trayectoria del rayo entre el transmisor y el receptor. En la figura 2.20 se puede ver la idea básica de este método.

En este caso, el primer lugar se determina la imagen de Tx por W1. Después se determina la imagen de Tx1 por W2 y conectando Rx con Tx2 se puede encontrar el punto de reflexión P2 en W2. Otro punto de reflexión (P1) es el punto de intersección de la línea que conecta P2 con Tx1.

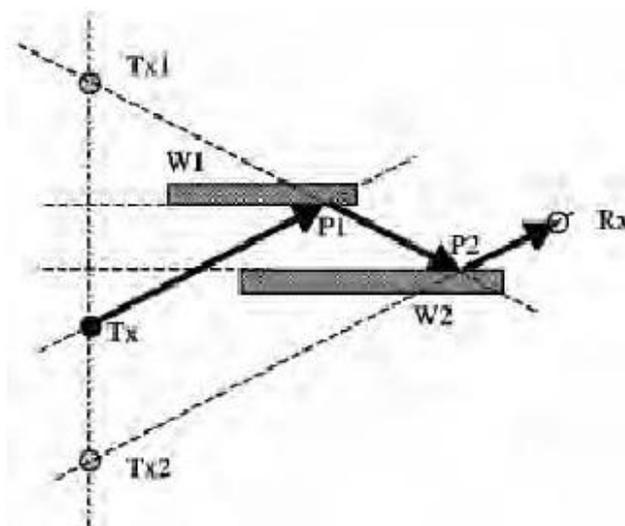


Figura 2.20: Ilustración del método de las imágenes [ESPA09]

El método de las imágenes es preciso, pero es muy ineficiente cuando el número de muros es alto. Para aplicaciones realistas, se usan métodos híbridos para reducir el tiempo computacional.

### Métodos Híbridos

Los métodos híbridos combinan los métodos de lanzamiento de rayos y de las imágenes. El método de lanzamiento de rayos es utilizado para identificar rápidamente posibles trayectorias entre Tx y Rx. Cuando se encuentra una trayectoria, los muros que están envueltos en ella se determinan, y los puntos de reflexión exactos se determinan por el método de las imágenes.

Las ventajas de estos métodos híbridos es que combinan la eficiencia del lanzamiento de rayos, y la exactitud del método de las imágenes.

- Método FDTD

Para estructuras complejas con dimensiones finitas, las técnicas de trazado de rayos no consiguen exactitud en los campos dispersados (scattered). En un sistema de comunicaciones complejo, las antenas de transmisión y recepción se instalan cerca de estructuras con unas propiedades materiales complejas. Estos problemas se pueden resolver numéricamente por las ecuaciones de Maxwell. En particular, el método Finite-Difference Time-Domain (FDTD) es una alternativa.

Las ventajas del método FDTD son la exactitud de este, y que se consigue una solución completa para cada punto del espacio, lo cual da información sobre la cobertura de señal en todo área de estudio. Como FDTD es un método numérico, requiere de mucha memoria y coste computacional para conseguir una solución, y es por esto por lo que es inviable para calcular las coberturas en áreas grandes.

- Método de los Momentos

Aunque los métodos de trazado de rayos pueden ser usados con suficiente precisión para calcular las coberturas en edificios grandes con un gran número de muros, el método de los momentos (MoM) es mejor cuando se necesita más precisión en entornos más pequeños. Es posible también utilizar una combinación de ambos métodos, usándolos cada uno en sus entornos óptimos.

Las soluciones determinadas por el modelo MoM son exactas mientras los objetos estén suficientemente caracterizados. Debido a la limitación de memoria de los ordenadores, y del coste computacional de este método, éste se usa en estructuras del orden de varias veces la longitud de onda de la señal. De esta forma, se puede usar este método para comprobar la exactitud del trazado de rayos en estos casos.

- Resumen de los modelos de pérdidas por propagación

En la tabla 2.2 se puede ver una comparación entre los modelos que se han explicado en este capítulo. Los modelos de propagación para comunicaciones móviles han sido

abordados usando dos aproximaciones diferentes. Por un lado, los modelos empíricos, donde alguno de los parámetros utilizados esta sacado de medidas empíricas. La segunda aproximación es de métodos específicos del entorno, en los que el lanzamiento de rayos es el método principal.

Cada una de estas aproximaciones tiene un compromiso diferente entre exactitud y complejidad.

Los modelos estadísticos son extremadamente simples, pero inexactos, mientras que los modelos deterministas son mucho más exactos, pero también son mucho más complejos.

<b>Modelo</b>	<b>Entorno</b>	<b>Complejidad</b>	<b>Basado en datos empíricos</b>	<b>Usa detalles del entorno</b>	<b>Exactitud</b>	<b>Tiempo de cálculo</b>
Okumura	Macro célula	Simple	Si	No	Buena	Poco
Hata	Macro célula	Simple	No	No	Buena	Poco
COST-231	Macro célula	Simple	No	No	Buena	Poco
Anderson 2D	Macro célula	Simple	No	No	Buena	Poco
Trazado de rayos	Exteriores Interiores	Complejo	No	Detallado	Muy buena	Mucho
FDTD	Interiores	Complejo	No	Muy detallado	La mejor	Excesivo
MoM	Interiores	Complejo	No	Muy detallado	La mejor	Excesivo

Tabla 2.2: Comparación entre los diferentes métodos de cálculo de la propagación

## 2.4. Predecesores

A lo largo de la última década se han realizado muchos avances tanto en tecnologías inalámbricas como en la utilización de redes de sensores con el fin de dar facilidades y quitar trabajo y posibles errores; sin embargo, la mayoría de las veces suelen ser datos teóricos, no prácticos, de ahí el avance de este proyecto, con una gran carga experimental y una serie de modelos avanzados de escenario y vides.

### 2.4.1. Tiempo de vida de los sensores

En el 2006 Sebastià Galmés [GALM06] de la Universidad de las Islas Baleares realizó un estudio acerca del tiempo de vida de los sensores en una red inalámbrica en viñedos, gracias a ello se pudo llevar a cabo en este proyecto una correcta implementación de nuestra red de sensores con el fin de poder optimizar al máximo la principal premisa: ahorro energético.

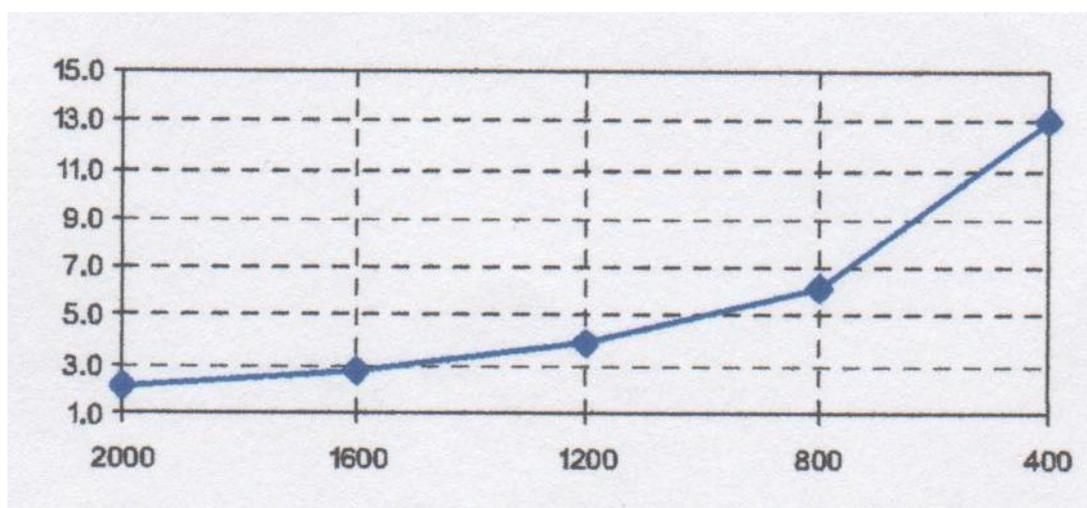


Figura 2.21: Evolución del tiempo de vida esperado (en años) a medida que el tamaño de paquete (en bits) decrece [GALM06]

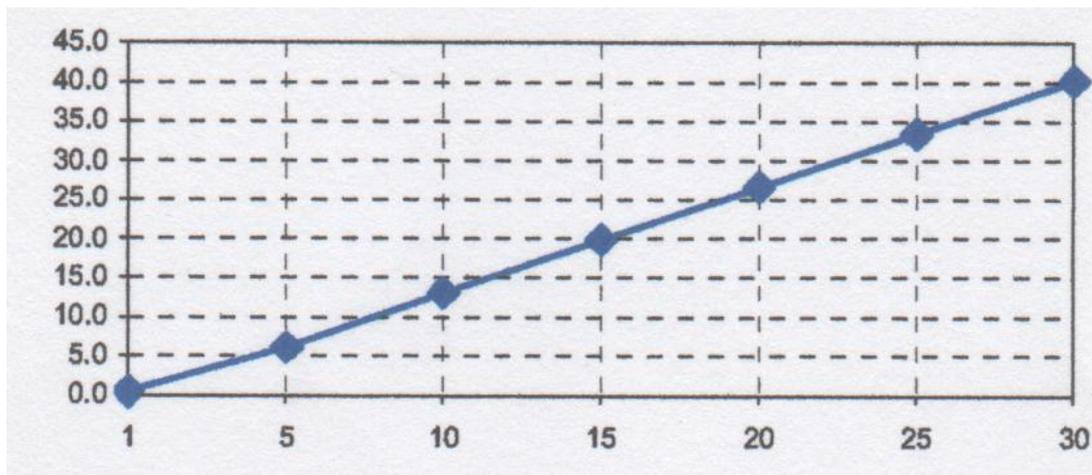


Figura 2.22: Evolución del tiempo de vida esperado (en años) en función del intervalo de tiempo (en minutos) entre dos paquetes enviados [GALM06]

En la Figura 2.22 se puede apreciar el tiempo de vida de los sensores en función del tiempo de trabajo de los mismos. En nuestro caso, tenemos una serie de sensores ZigBee que están dormidos y en función de la frecuencia de análisis elegida se despertarán y mandarán la información; de esta manera se ve claramente la relación del tiempo de vida de los sensores en función del intervalo de tiempo de trabajo.

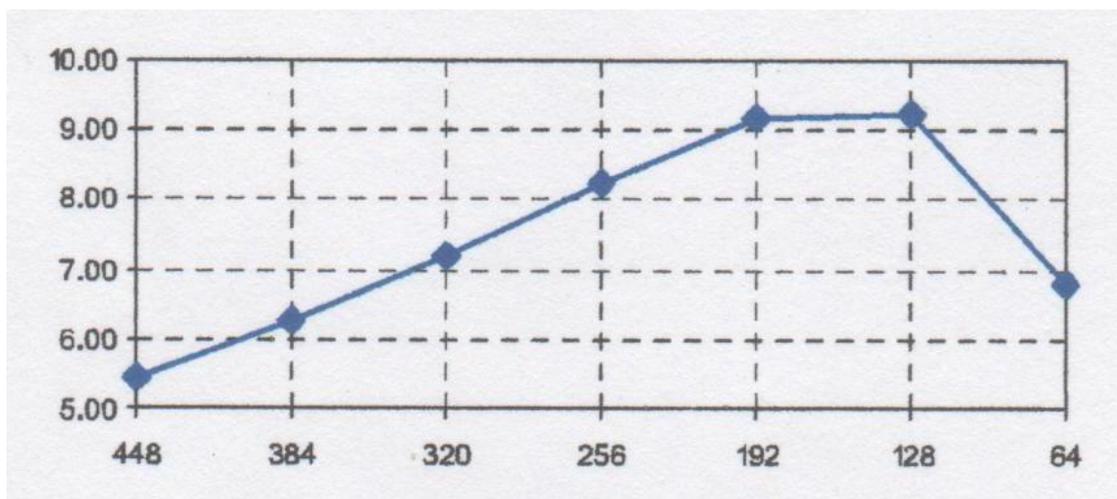


Figura 2.23: Evolución del tiempo de vida esperado (en años) en función del número de sensores [GALM06]

En la última gráfica se observa cómo hay un punto de corte muy claro, esto es muy importante debido a que los terrenos que se manejan son muy grandes lo que trae consigo que haya que comprar un número mayor de sensores para evitar la poca dura ración de las baterías. La otra manera de solucionarlo sería añadirles una placa solar para poder recargar los sensores y con pocos sensores emitiendo a una gran potencia se puede cubrir un gran espacio; todo esto tiene un inconveniente, hace subir enormemente el precio final, algo que no interesa en este proyecto.

### 2.4.2. Redes de sensores

Entrando ya en las redes de sensores aplicadas a agricultura y especialmente a viñedos aparecen algunas publicaciones en las cuales se ha apoyado este proyecto.

Se ha encontrado algún tipo de red inalámbrica de sensores muy interesante, como por ejemplo [BURR04]:

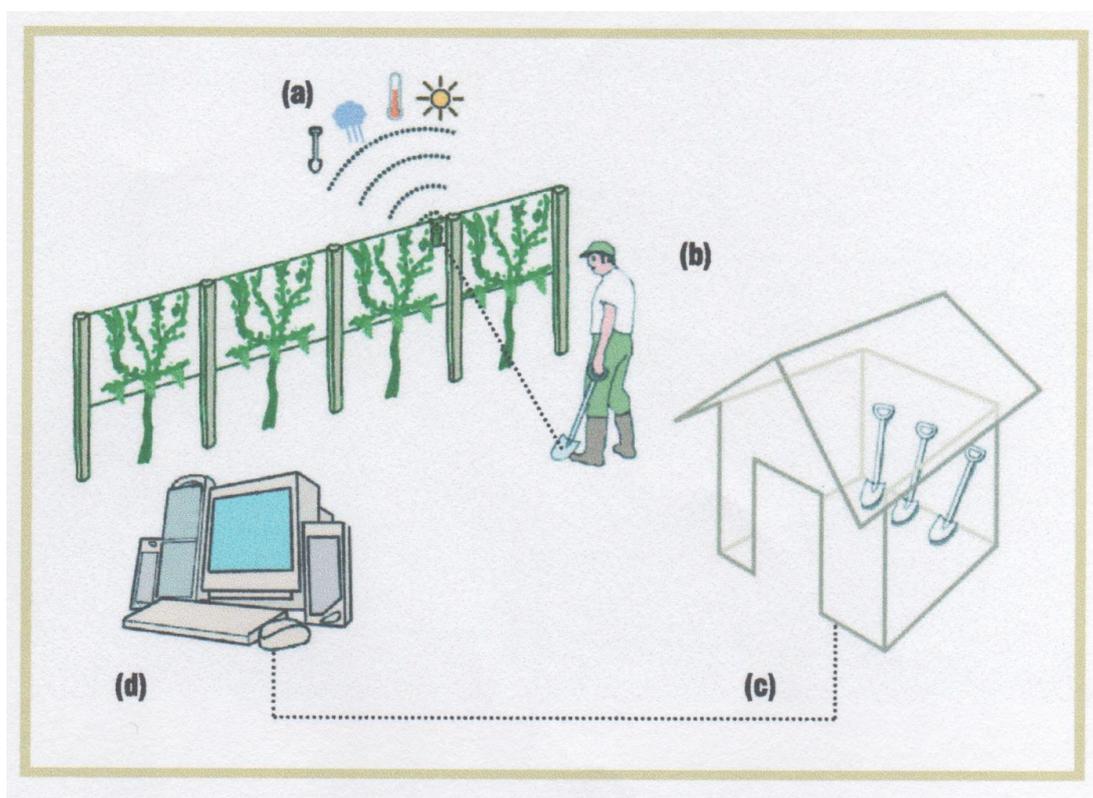


Figura 2.24: Esquema de recogida de datos [BURR04]

Las motas (a) recogen la información de humedad, temperatura. La pala (b) a lo largo del día va recogiendo información y una vez son llevadas al cobertizo (c) envían la información al ordenador (d). Todo esto desde el punto de vista teórico pero con los avances de hoy en día aún se puede llegar más lejos.

Automatizando todos los procesos de un terrero y analizándolo con una red de sensores se puede llegar a generar una huerta totalmente autosuficiente con pocos trabajadores y una gran calidad del producto.

Ya en el 2011 se diseñaron redes inalámbricas de sensores parecidas al objetivo de este proyecto [BENC09] [SUN11] [TOGA11]:

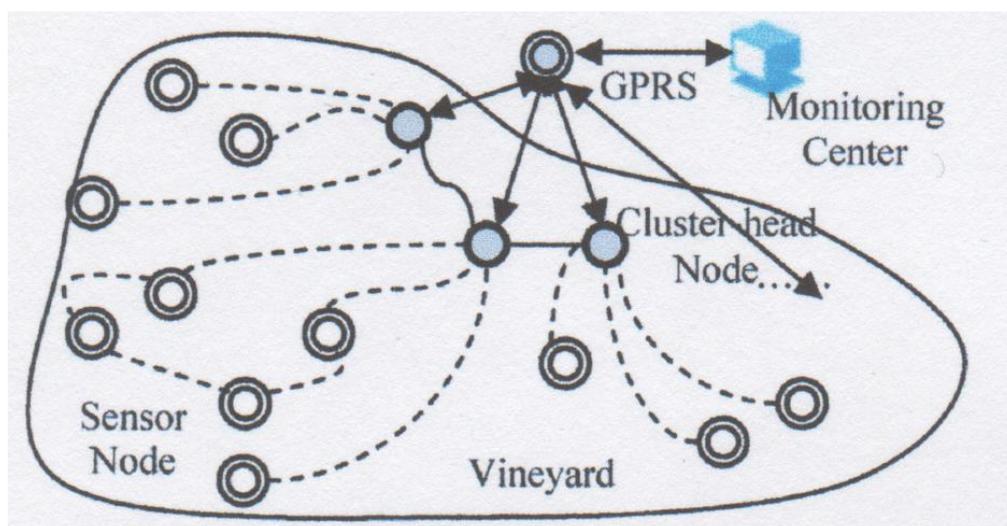


Figura 2.25: Esquema de una red de sensores en un viñedo [SUN11]

Se dan diagramas, resúmenes, datos varios e, incluso, como y donde colocar los sensores con el fin de lograr una buena comunicación entre ellos. A su vez también exponen el envío de información de los sensores a través de GPRS hasta el ordenador encargado de la monitorización.

Como he dicho anteriormente, en ningún momento se entra al detalle, se analiza, se crea físicamente una red, siendo este el punto fuerte del proyecto.

### **3. Documento de objetivos del proyecto**

En este apartado se detallan los objetivos que se quieren alcanzar con el proyecto y la definición de alcance del mismo. Se presenta la estructura de descomposición del producto, identificando las principales fases y entregas y los recursos necesarios, y se hace una estimación del tiempo de desarrollo.

#### **3.1. Justificación y objetivos del proyecto**

##### **3.1.1. Justificación del proyecto**

Como se ha mencionado antes, la agricultura ha sido desde siempre muy artesanal siendo un producto de primera necesidad, de aquí viene la idea de intentar automatizar todos los procesos e, incluso, controlarlos de manera remota.

Se pretende poder mejorar la calidad del producto manteniendo un análisis constante y a su vez poder abaratar los costes del proceso.

##### **3.1.2. Objetivos del proyecto**

Al inicio del proyecto se definen los objetivos que se quieren alcanzar. Dichos objetivos son los siguientes:

- Aprendizaje del sistema de simulación basado en el trazado de rayos creado en Matlab.

- Diseño de una red de sensores inalámbrica basada en ZigBee en un viñedo.
- Optimización de la red mediante las simulaciones del escenario y las mediciones “in situ” teniendo en cuenta las premisas anteriormente citadas.
- Adecuación de la red de sensores inalámbrica a diversas condiciones de la finca.
- Ofrecer información importante relativa a los datos obtenidos para una posible continuación o ampliación.

### **3.1.3. Entregables del proyecto**

Este proyecto tiene como entregables esta memoria.

## **3.2. Estructura de descomposición del proyecto**

- I. Gestión del proyecto
  
- II. Estudio y conocimiento del proyecto
  - a. Captura de requisitos
  
  - b. Análisis y estudio

### III. Recopilación de información

- a. Búsqueda de información relacionada con el proyecto
- b. Búsqueda de proyectos similares

### IV. Formación

- a. Aprendizaje en el uso del código
- b. Aprendizaje en el uso de la función de generación de objetos

### V. Desarrollo

- a. Diseño del escenario
  - i. Generación de un escenario con vides
  - ii. Colocación de transmisores
    - 1. Potencia de emisión
    - 2. Diagrama de emisión
- b. Simulación del escenario
  - i. Generación de tablas
  - ii. Optimización

c. Mediciones analíticas

i. Comparación

VI. Pruebas globales

a. Validación de resultados obtenidos

b. Optimización

VII. Documentación

a. Documentación del proyecto

b. Memoria del proyecto

### 3.3. Lista de actividades

1.- Gestión del proyecto: La gestión del proyecto consiste en organizar y planificar el desarrollo del proyecto: la estimación de los recursos a utilizar, el alcance del proyecto, duración de cada tarea, los objetivos...

II.a.- Captura de requisitos: En este apartado se identificarán los distintos requisitos del proyecto y con ellos se diseñará el sistema que se va a utilizar.

II.b.- Análisis y estudio: Estudio de los recursos y herramientas requeridas para llevar a cabo el proyecto.

III.a.- Búsqueda de información relacionada con el proyecto: Recopilación de datos a través de distintas fuentes de información contrastadas que sean de utilidad y que aporten la ayuda y conocimientos necesarios para llevar a cabo el proyecto.

III.b.- Búsqueda de proyectos similares: Recopilación de información basada en proyectos similares con el fin de aportar nuevos datos.

IV.a.- Aprendizaje en el uso del código: Estudio del código proporcionado por la Universidad Pública de Navarra ya que, al ser un código de la universidad es muy práctico pero no demasiado intuitivo, además se puede modificar para que se ajuste a las necesidades del proyecto.

IV.b.- Aprendizaje de la función de generación de objetos: Estudio de la función de creación de objetos necesaria para la creación y modificación del escenario del proyecto.

V.a.- Diseño del escenario: Se va a generar un escenario que emule a la finca a analizar, tanto en dimensiones, objetos y materiales.

V.a.i.- Generación de un escenario con vides: Se pretende generar otro escenario de simulación con la finca llena de vides para poder apreciar las diferencias de

propagación de un escenario a otro; con el fin de poder llegar a una configuración óptima para todos los escenarios.

V.a.ii.- Colocación de transmisores: Se realizará un estudio de posición de los emisores para encontrar la ubicación más efectiva.

V.a.ii.1.- Potencia de emisión: Se elegirá la potencia máxima de las motas utilizadas y posteriormente se ajustará para intentar conseguir el máximo ahorro energético posible.

V.a.ii.2.- Diagrama de emisión: Se optará por el diagrama de emisión de las motas y se valorará el precio de las antenas para tomar una decisión.

V.b.- Simulación del escenario: Una vez realizado el estudio previo se procederá a simular el escenario en *MATLAB* seleccionando una resolución óptima para no generar demasiada carga computacional.

V.b.i.- Generación de tablas: Se generarán una serie de tablas con el fin de facilitar el análisis de los resultados obtenidos de la simulación.

V.b.ii.- Optimización: Una vez visto los primeros resultados se procederá a optimizar la red de sensores modificando parámetros básicos como posición o potencia de emisión.

V.c.- Mediciones analíticas: Se procederá a ir a la finca y a tomar las medidas con las motas y un analizador de espectros.

V.c.1.- Comparación: Una vez estén hechas las mediciones y las simulaciones se realizará una comparación con el fin de que los resultados sean lo más parecidos posible.

VI.a.- Validación de resultados obtenidos: Comprobación de que todos los datos concuerdan con la realidad y son factibles.

VI.b.- Optimización: En el caso de que haya algún error o posibilidad de mejora se procederá a una optimización de la red inalámbrica de sensores.

VII.a.- Documentación del proyecto: Se realizará la documentación de los resultados obtenidos tanto por la simulación como por las medidas, así como de las tablas comparativas.

VII.b.- Memoria del proyecto: Realización de la memoria del proyecto que incluye la documentación obtenida en las distintas fases del proyecto, así como los resultados obtenidos.

### **3.4. Recursos**

En este apartado se detallan los recursos de los que se dispone para la correcta realización del proyecto.

#### **3.4.1. Grupo de proyecto**

El grupo de proyecto lo constituye la persona que desarrolla el proyecto, el tutor académico y un asesor del código de simulación. La persona que desarrolla el proyecto es la que gestiona y planifica el proyecto y estará supervisada por el tutor académico.

#### **3.4.2. Recursos hardware y software**

Para el desarrollo del proyecto la universidad ha dispuesto los recursos hardware y software necesarios.

##### **3.4.2.1. Recursos hardware**

Equipo Lenovo ThinkStation con 2 procesadores Xeon 2.6GHz de 6 núcleos cada uno, 64Gb de RAM y Tarjeta gráfica NVIDIA GeForce de 1Gb.

### 3.4.2.2. Recursos software

Se han proporcionado las siguientes herramientas software:

- MATLAB
- Código de trazado de rayos desarrollado por la Universidad Pública de Navarra
- Microsoft Office 2003
- CST Studio Suite

### 3.4.3. Motas Libellium

La universidad dispone de 7 sensores de ZigBee, más concretamente, 7 Wasp mote con emisor XBee de Libellium, para la realización de las medidas analíticas. También se empleará el analizador de espectros N9912A y un analizador de protocolos.

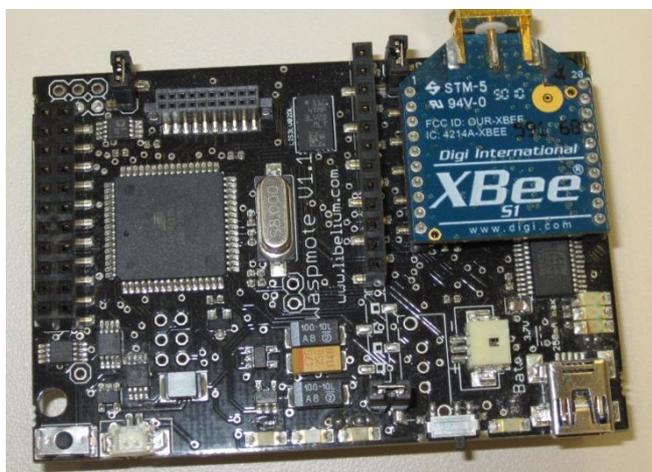


Figura 3.1: Detalle de la mota

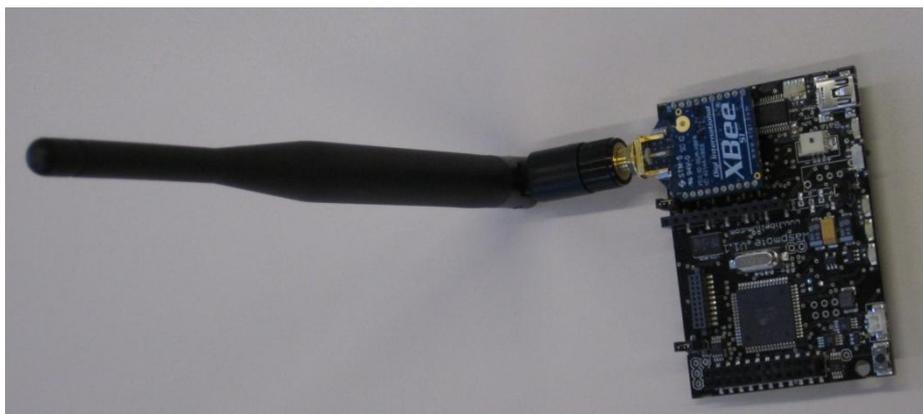


Figura 3.2: Vista de la mota utilizada con la antena montada

#### 3.4.4. Capacidades de los recursos

La persona encargada del desarrollo del proyecto posee la capacidad necesaria para afrontar un proyecto de esta envergadura, con las dificultades que puedan surgir en el proceso. Se posee experiencia previa en el software utilizado y en conocimientos de propagación de ondas electromagnéticas.

#### 3.5. Estimación de duración de las actividades

La estimación de la duración de las actividades se ha realizado a partir del juicio de la persona que desarrolla el proyecto. Se han tomado como referencia proyectos anteriores. La duración de las tareas en un proyecto es difícil de estimar, ya que intervienen un número elevado de factores e imprevistos que pueden influir en ellas y que son difíciles de identificar en una primera fase.

Fases del proyecto:	Horas estimadas
<b>I. Gestión del proyecto</b>	<b>Total 36</b>
<b>II. Estudio y conocimiento del proyecto</b>	
a. Captura de requisitos	12
b. Análisis y estudio	18
	<b>Total 30</b>
<b>III. Recopilación de información</b>	
a. Búsqueda de información relacionada con el proyecto	16 8
b. Búsqueda de proyectos similares	<b>Total 24</b>
<b>IV. Formación</b>	24
a. Aprendizaje en el uso del código	10
b. Aprendizaje de la función de generación de objetos	
	<b>Total 34</b>
<b>V. Desarrollo</b>	
a. Diseño del escenario	15
i. Generación de un escenario con vides	15
ii. Colocación de transmisores	5
1. Potencia de emisión	1
2. Diagrama de emisión	1
b. Simulación del escenario	180
i. Generación de tablas	12
ii. Optimización	24
c. Mediciones analíticas	20
i. Comparación	5
	<b>Total 278</b>
<b>VI. Pruebas globales</b>	
a. Validación de resultados obtenidos	12
b. Optimización	30
	<b>Total 42</b>

**VII. Documentación**

- |                               |     |
|-------------------------------|-----|
| a. Documentación del proyecto | 15  |
| b. Memoria del proyecto       | 135 |

**Total 150**

---

**Total proyecto****594****3.5.1. Bases de estimación**

Para realizar la estimación, se han tenido en cuenta los recursos de los que se dispone y sus capacidades.

- Desarrolladores: 1 persona.
- Dedicación semanal: 5 días/semana.
- Dedicación diaria: 8 horas

### 3.6. Diagrama Gantt

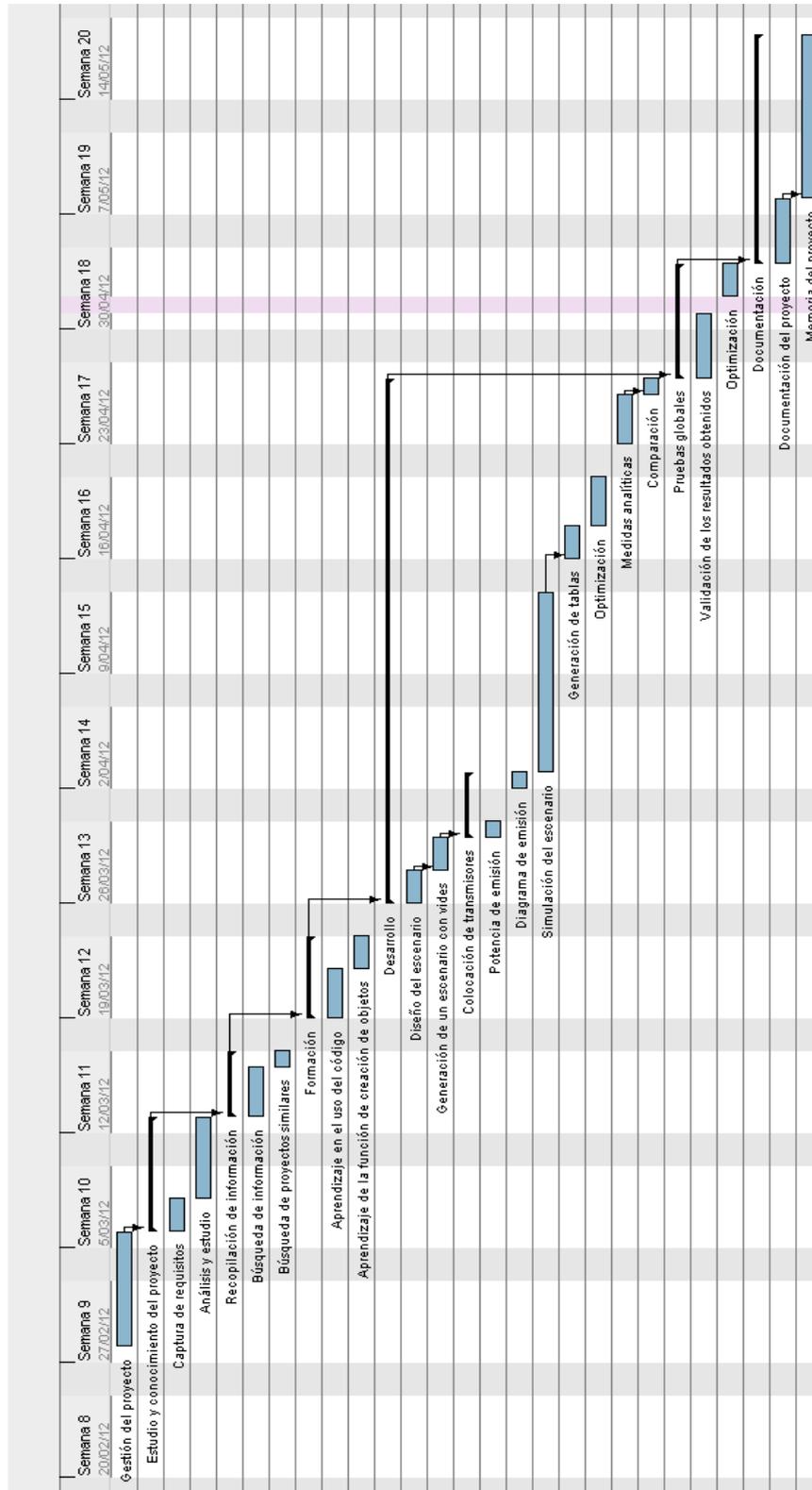


Figura 3.3: Diagrama Gantt

### 3.7. Programa del proyecto

Fases del proyecto	FPC	FPT
<b>I. Gestión del proyecto</b>	<b>28/02/2012</b>	<b>05/03/2012</b>
<b>II. Estudio y conocimiento del proyecto</b>	<b>06/03/2012</b>	<b>12/03/2012</b>
a. Captura de requisitos	06/03/2012	07/03/2012
b. Análisis y estudio	08/03/2012	12/03/2012
<b>III. Recopilación de información</b>	<b>13/03/2012</b>	<b>16/03/2012</b>
a. Búsqueda de información relacionada con el proyecto	13/03/2012	15/03/2012
b. Búsqueda de proyectos similares	16/03/2012	16/03/2012
<b>IV. Formación</b>	<b>19/03/2012</b>	<b>23/03/2012</b>
a. Aprendizaje en el uso del código	19/03/2012	21/03/2012
b. Aprendizaje de la función de generación de objetos	22/03/2012	23/03/2012
<b>V. Desarrollo</b>	<b>26/03/2012</b>	<b>26/04/2012</b>
a. Diseño del escenario	26/03/2012	27/03/2012
i. Generación de un escenario con vides	28/03/2012	29/03/2012
ii. Colocación de transmisores	30/03/2012	02/04/2012
1. Potencia de emisión	30/03/2012	30/03/2012
2. Diagrama de emisión	02/04/2012	02/04/2012
b. Simulación del escenario	03/04/2012	13/04/2012
i. Generación de tablas	16/04/2012	17/04/2012
ii. Optimización	18/04/2012	20/04/2012
c. Mediciones analíticas	23/04/2012	25/04/2012
i. Comparación	26/04/2012	26/04/2012

---

<b>VI. Pruebas globales</b>	<b>27/04/2012</b>	<b>03/05/2012</b>
a. Validación de resultados obtenidos	27/04/2012	30/04/2012
b. Optimización	02/05/2012	03/05/2012
<b>VII. Documentación</b>	<b>04/05/2012</b>	<b>17/05/2012</b>
a. Documentación del proyecto	04/05/2012	07/05/2012
b. Memoria del proyecto	08/05/2012	17/05/2012

**FPC: Fecha prevista de comienzo**

**FPT: Fecha prevista de terminación**



## 4. Desarrollo del proyecto

### 4.1. Trazado de rayos

Es importante escoger un método de la predicción de la propagación electromagnética adecuado por la complejidad de los escenarios a analizar. Tradicionalmente se usaban los métodos empíricos, que son eficientes y fáciles de usar, pero sólo son válidos cuando el entorno posee las mismas características donde se han realizado las medidas para obtener las ecuaciones (algunos ejemplos son COST-231, Okumura-Hata, Anderson 2D, etc.). Por otro lado, están los métodos deterministas basados en métodos numéricos como el método de trazado de rayos, el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) o el método de los Momentos (MoM). Estos métodos son mucho más precisos, pero la desventaja es su coste computacional, que puede llegar a ser muy elevado para entornos complejos. Como punto medio, están los métodos deterministas basados en técnicas de trazado de rayos, en los que se adquiere un compromiso entre precisión y tiempos de simulación. Existen varias técnicas dentro de estos métodos, como son el método de las imágenes, lanzado de rayos, métodos híbridos, etc.

El modelo de propagación que se utiliza en este trabajo está basado en el método determinista de lanzado de rayos en 3D para analizar el entorno exterior de una finca vinícola [SAEZ00] [ISKA02] [KOUY71]. El procedimiento básico de este método consiste en lanzar rayos desde la antena transmisora (Tx) y trazar los rayos en el escenario para ver si chocan con algún obstáculo o si se reciben por alguna antena receptora (Rx). Cuando chocan con algún obstáculo, se analizan los fenómenos de la reflexión, transmisión y difracción, dependiendo de la geometría y las propiedades

eléctricas de los obstáculos, teniendo en cuenta la constante dieléctrica del material y la tangente de pérdidas. El algoritmo de lanzamiento de rayos en 3D está implementado en Matlab<sup>TM</sup>. Se pueden colocar varias antenas transmisoras en un escenario, y la potencia transmitida por cada una de ellas se convierte en un número finito de rayos que se lanzan en un ángulo sólido que se puede definir. Los parámetros que se pueden variar en el algoritmo son: la frecuencia de operación, el diagrama de radiación de las antenas, el número de reflexiones, la separación entre ángulos en los rayos lanzados y la dimensión de los cuboides en los que dividimos el escenario.

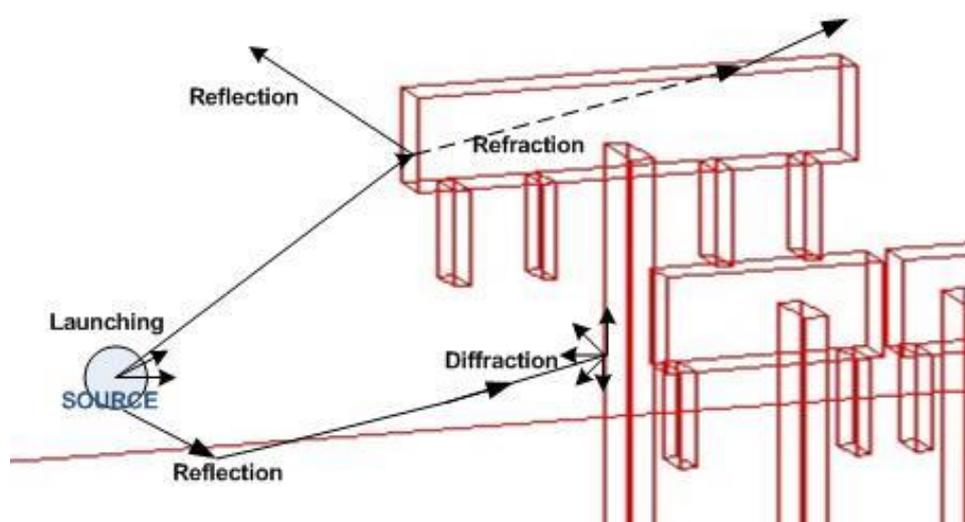


Figura 4.1: Esquema del trazado de rayos

En la Figura 4.1 se puede observar el principio del método de lanzamiento de rayos. La antena transmisora lanza los rayos en diferentes direcciones, y estos rayos lanzados constituyen el diagrama de radiación de la antena. Los coeficientes de reflexión y refracción se calculan utilizando las ecuaciones de Fresnel, y los coeficientes de dispersión para la difracción se calculan mediante la teoría geométrica de la difracción. Mediante el número de rayos lanzados y el tamaño escogido para los

cuboides en el escenario se adquiere el compromiso existente entre precisión de los resultados y tiempo de simulación.

## 4.2. Descripción del escenario

Se va a analizar el comportamiento de la propagación electromagnética en una finca vinícola con una superficie de 100m x 30m. A su vez, por rigor de los datos, se ha considerado 2,5m de suelo húmedo y 7,5m de aire, quedando un ortoedro de 100m x 30m x 10m. En la finca se han colocado los soportes metálicos sobre los que crecerán las vides: son una serie de picas de metal de 1,88m de altura con tres hilos metálicos que unen cada fila, situados a 0,7m, 1,115m y 1,88m de altura sobre el nivel del suelo. Las picas de la misma fila están separadas 7,06m y la distancia entre dos filas es de 2,95m. Se trata de una viña emparrada de aproximadamente un año de vida, por lo que todavía no alcanza una altura ni una frondosidad relevante. Estos datos se han metido a las funciones de creación de objetos de Matlab para generar la siguiente figura.

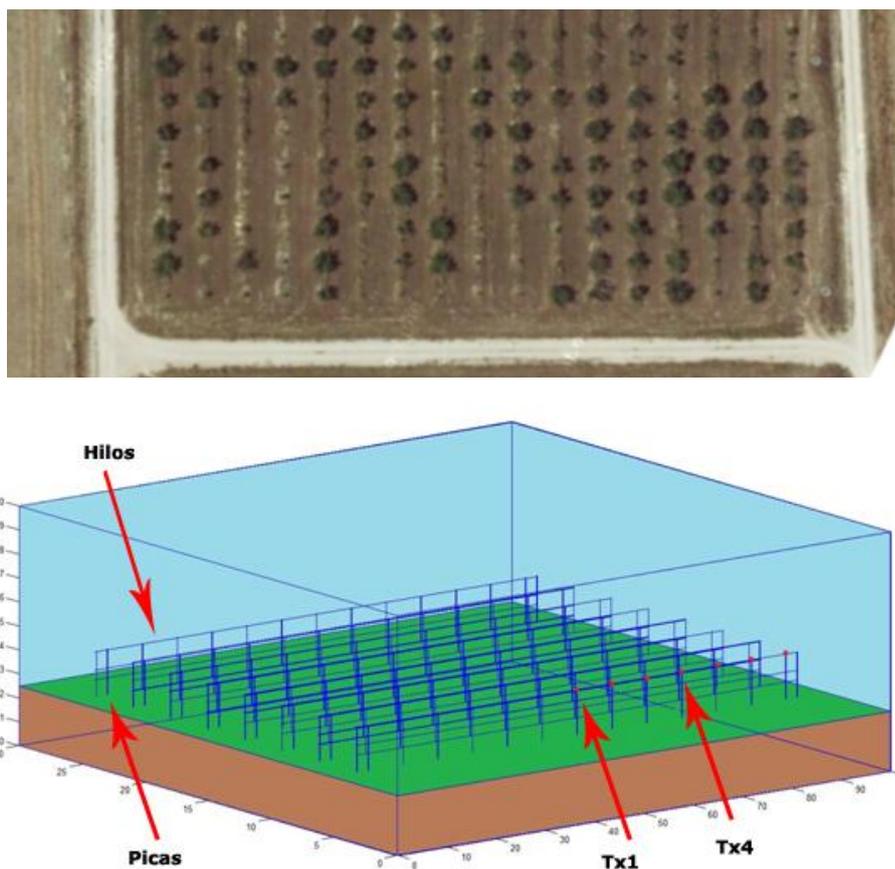


Figura 4.2: Vista aérea y representación esquemática del escenario de simulación de los viñedos

### 4.3. Modelo de vid

Se ha realizado otro escenario con un diseño simplificado, de un terreno sembrado con vides; gracias a este segundo diseño se pueden apreciar las diversas condiciones de la finca, así como las diferencias de propagación en cada caso. Se ha basado en el crecimiento y plantación habitual de las vides destinadas a vino: tienen que tener más de 1,5m de separación entre vides y no sobrepasar los 1,2m de altura. Se han creado con diseño en “T” de tal manera que el tronco sube y las ramas se apoyan en el hilo de metal. Se han generado 2 tipos de vides distintas, cada una a una altura distinta (0,7m y 1,15m) para poder abarcar el máximo espacio posible. Para acabar se añadieron una

serie de racimos basados en la consideración de un volumen unitario en el cual se ha promediado el valor de la constante dieléctrica y de la tangente de pérdidas de las uvas con el volumen de aire. A dicho elemento se le añade el efecto de la madera, emulando las ramas y el tronco de las vides. Una vez terminado el diseño se replicó por toda la finca generando así el viñedo completo.

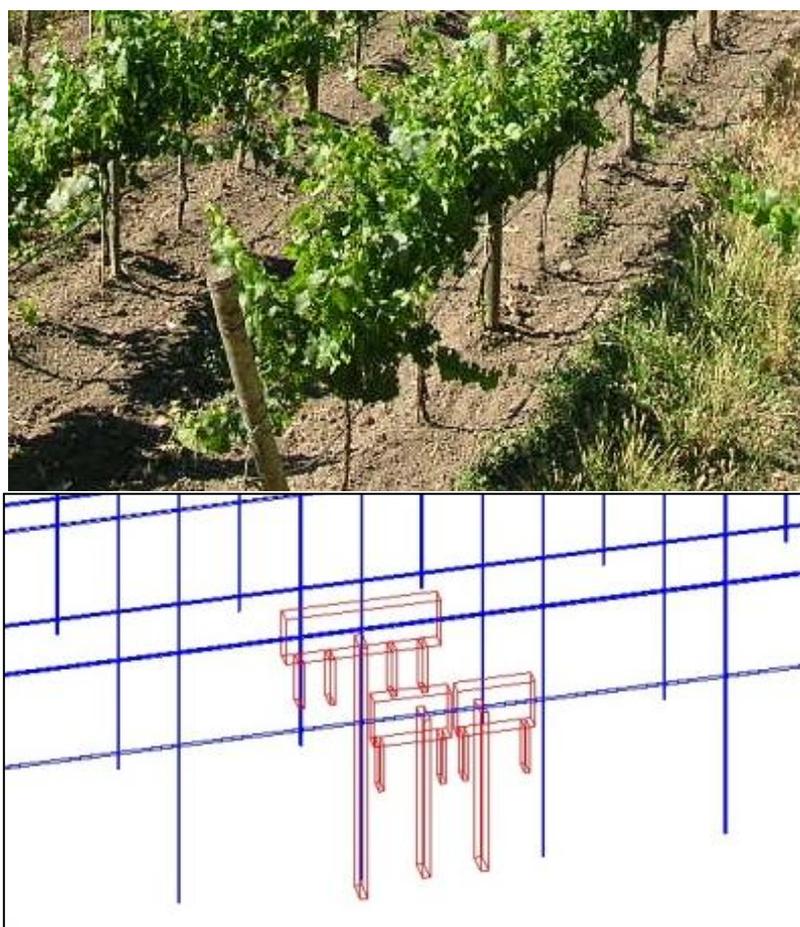


Figura 4.3: Base y detalle de las vides

### 4.3.1. Datos sobre las uvas

Para hacer una mejor interpretación de las propiedades dieléctricas de las uvas y los racimos se ha realizado un estudio acerca de las partes por las que están compuestas [VIVE].

Las partes del racimo de uva son:

- Raspón, escobajo o rapa (2,5%)
- Bayas o granos (95-98%)

Los granos, unidos al raspón por el peciolo, están formados por:

- Hollejo (6% a 12%)
- Semillas o pepitas (2% a 5%)
- Pulpa (83% a 92%)

Composición química:

Raspón:

- Taninos (3%). Es la sustancia responsable del color, el gusto amargo, la astringencia, la capacidad de envejecer y el cuerpo del vino.
- Materias minerales Ca y K (2-3%)
- Agua (80%)

## La piel:

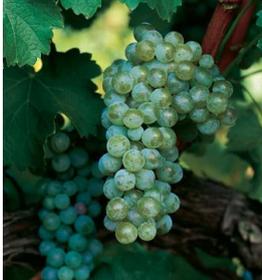
- Materias colorantes:
- Antocianatos (rojo) (Blancas y tintas)
- Flavonoides (amarillo) (sólo tintas)
- Aromas varietales: Propios de cada variedad de uva.
- Sustancias pépticas: polisacáridos que a veces presentan problemas en la vinificación.
- Taninos.
- Enzimas.

## La pulpa:

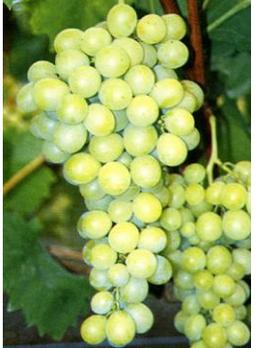
- Agua : 700-800 g/l
- Azúcares : 200-250 g/l
- glucosa : 50%
- fructosa : 50%
- pentosas <2 g/l
- Sales minerales : 2-3 >g/l (fosfatos, K, Na)
- Sustancias nitrogenadas : 0.5-1 g/l (ácidos, péptidos, sales de amonio)
- Ácidos libres : 2.5 g/l
- Ácidos combinados : 3-10 g/l

### 4.3.2. Variedades de uvas

A su vez, se ha realizado un estudio sobre las diferentes variedades de vid para comprobar si la forma geométrica de las uvas y racimos influyen en gran medida.

Variedad	Racimo	Tipo de grano	Tamaño de Grano	Foto
<b>Albariño</b>	Tamaño de racimo pequeño, cilíndrico, a veces con un ala	Esférico	Diámetro 12-13mm	
<b>Godello</b>	Racimo medio y compacto con un ala	Ovalado	Ancho 12-14mm Alto 15-16mm	
<b>Sauvignon Blanc</b>	Racimo pequeño cilíndrico, con un ala pequeña	Esférico	Diámetro 13-15mm	
<b>Treixadura</b>	Racimo de tamaño medio, cónico con granos apiñados	Elipsoidal	Ancho 14-16mm Alto 17-19mm	

<b>Viura</b>	Racimo grande y poblado	Esférico	Diámetro 13-15mm	
<b>Cabernet Sauvignon</b>	Racimo Medio – Pequeño, piramidal	Esférico	Diámetro 12-13mm	
<b>Garnacha</b>	Racimos compactos medio-grandes	Esférico	Diámetro 13-15mm	
<b>Graciano</b>	Racimo mediano, piramidal y denso.	Esférico	Diámetro 12-13mm	
<b>Syrah</b>	Racimos medianos compactos y cilíndricos	Esférico	Diámetro 12-13mm	

<b>Tempranillo</b>	Racimo medio – grande, con un ala, piramidal	Ovalado	Ancho 12-14mm Alto 15-16mm	
<b>Cardinal</b>	Racimo cilindro-cónico, piramidal, voluminoso	Esférico	Diámetro 18-20mm	
<b>Alphonse Lavallée</b>	Racimo medio-grande, alado, cónico-cilíndrico, suelto	Esférico	Diámetro 25-30mm	
<b>Italia</b>	Racimo medio – grande y granos sueltos	Ovalado	Ancho 15-17mm Alto 18-19mm	

<b>Moscatel Romano</b>	Racimo grande, suelto, alado y cilindro-cónico	Elipsoidal	Ancho 14-16mm Alto 21-23mm
------------------------	--	------------	-------------------------------------



<b>Rosaki</b>	Racimos bastante grandes, cónicos	Elipsoidal	Ancho 13-15mm Alto 19-21mm
---------------	-----------------------------------	------------	-------------------------------------



<b>Sultanina-c</b>	Racimo grande, cónico y poblado	Elipsoidal	Ancho 11-13mm Alto 17-19mm
--------------------	---------------------------------	------------	-------------------------------------



Cabe destacar que el tamaño y la densidad del racimo dependen del pie en el que están injertadas.

#### 4.4. Transmisores

Se ha colocado un transmisor con un esquema de radiación esférico en el punto [49.88m, 5.26m, 1.88m (sobre el nivel del suelo)], justo encima de la octava pica de

metal en la primera fila; en la Figura 4.2 se aprecia con un círculo rojo la localización del emisor. Se ha elegido este punto para que tenga línea de visión con todo el escenario; mas adelante entraremos en detalle. El transmisor irradia a una potencia de -19dBm, dado que es la potencia máxima del Waspote de Libellium. La antena es omnidireccional y tiene una ganancia de 5dBi. Dicha fuente emite un rayo por cada grado y desaparece una vez haya realizado 7 rebotes, se absorbe por algún objeto o se pierde fuera del entorno del escenario, ya que al ser un espacio al aire libre no tenemos rebotes con las paredes. Para obtener los resultados se ha dividido el escenario en cubos de 0,2m creando un total de 3,75 millones de cubos. Se trata de una resolución lo suficientemente grande como para simular el código a una velocidad aceptable y que genere unos correctos resultados. Se ha tenido en cuenta la constante dieléctrica y de conductividad de cada elemento del escenario; dependen del material del que está fabricado y que producen alteraciones diferentes en el trazado de rayos [DEV09] [KAYE].

<b>Material</b>	$\epsilon_r$	<b>Conductividad</b>
Suelo húmedo	30	0.01
Madera	3	0.20319
Uva	32	4.572
Picas e hilo	61546000	37800000
Aire	1	0

Tabla 4.1: Constante dieléctrica y conductividad de los diferentes materiales utilizados.

## 4.5. Resultados de las mediciones analíticas

Para realizar las medidas se fue a la finca a analizar y lo primero que se comprobó era que no había señales que pudieran generarnos algún tipo de ruido. Para ello, con el analizador de espectros se comprobó la banda de 2,4GHz.

Se configuró el transmisor con una potencia de salida de 0dBm, sin embargo por pérdidas internas del circuito el valor de potencia emitida bajó hasta los -19dBm. La antena era omnidireccional con una ganancia de 5dBi.

Colocando el sensor encima de la pica (Tx1) y con el analizador de espectros en la pica adyacente (7,06m de distancia), se midió la potencia recibida: -49,52dBm. Posteriormente se repitió el proceso en las picas siguientes de tal manera que el Tx2 emitía al Rx3, el Tx3 al Rx4 y así sucesivamente.

	RX2	RX3	RX4	RX5	RX6	RX7
Analizador (dBm)	-49,52	-46,73	-43,66	-45,17	-49,35	-47,02

Tabla 4.2: Resultados medidas analíticas

## 4.6. Resultados de simulación

Una vez definido el escenario de simulación, se han obtenido resultados para el modelado del canal radioeléctrico mediante el empleo de código de simulación basado en lanzamiento de rayos tridimensional. En la Figura 4.4 se muestran los resultados

obtenidos para la estimación de niveles de recepción de señal en un plano de corte bidimensional a la altura efectiva de 1,88 metros sobre el nivel del suelo. Las diferencias en la distribución de potencia que se observa en las imágenes vienen dadas por el hecho de considerar el modelo de vid en la simulación.

Frecuencias	868MHz
	2435MHz
Potencia de emisión	-19dBm
Ganancia antena	5dBi
Diagrama de emisión	Esférico
Resolución Angular ( $\Delta\Phi$ )	1°
Resolución Angular ( $\Delta\theta$ )	1°
Número máximo reflexiones	7
Dimensiones Cuboide	20cm*20cm*20cm

Tabla 4.3: Parámetros de simulación en el algoritmo de Lanzado de Rayos en 3D

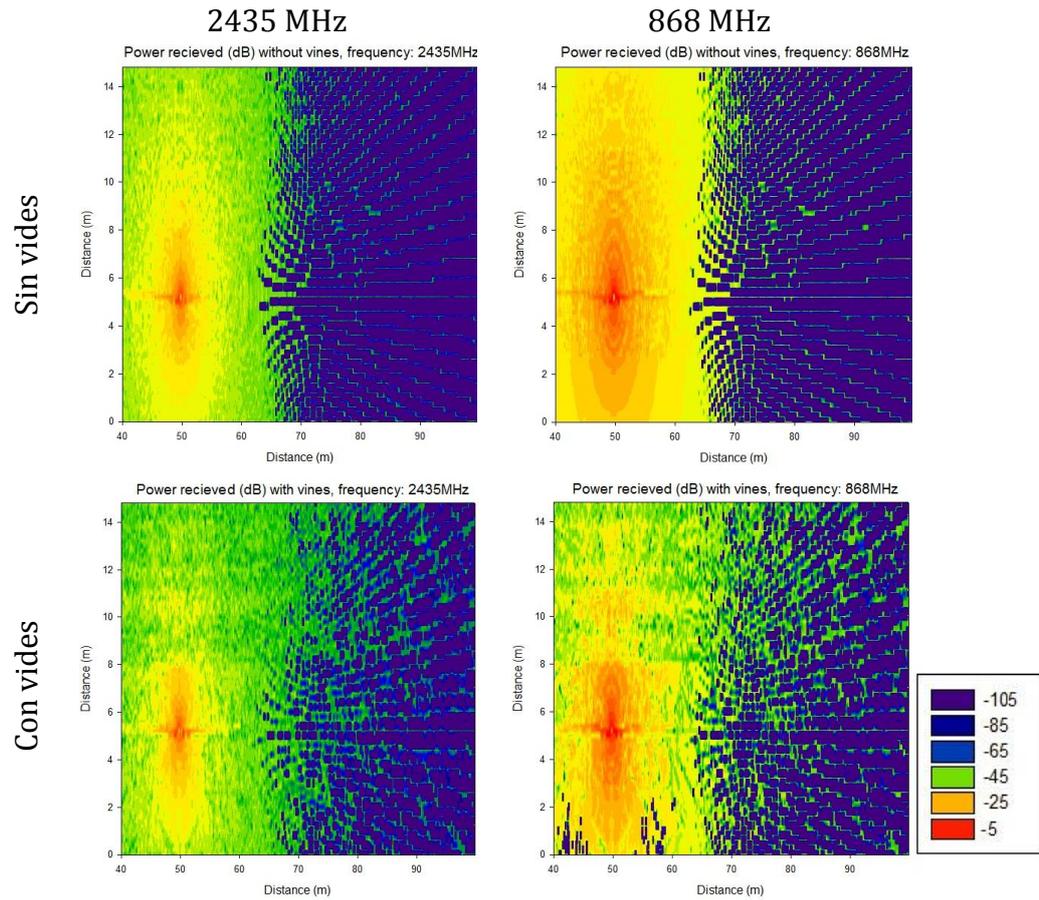


Figura 4.4: Representación de potencia recibida en un plano de corte bidimensional de altura 1.88m. Se muestra el caso sin vides y con el modelo simplificado de vid en las dos frecuencias de trabajo

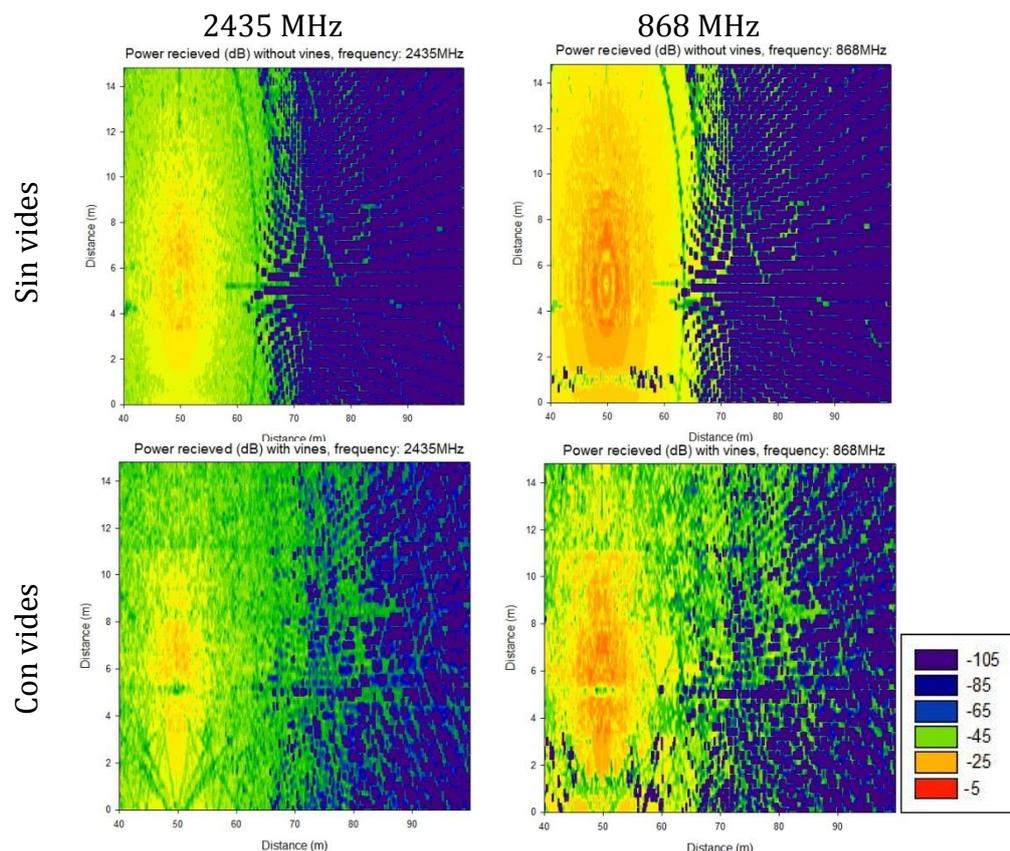


Figura 4.5: Representación de potencia recibida en un plano de corte bidimensional de altura 0.88m. Se muestra el caso sin vides y con el modelo simplificado de vid en las dos frecuencias de trabajo

Con el fin de poder planificar de manera óptima la ubicación de los sensores, se han obtenido resultados de simulación considerando diferentes alturas, siempre en las posiciones en las cuales existen barras para poder colocar los potenciales transeptores. Dicha comparativa se muestra en la Figura 4.6, en la cual se observa que la elección de la altura juega un papel relevante en el valor final de pérdidas de radiopropagación.

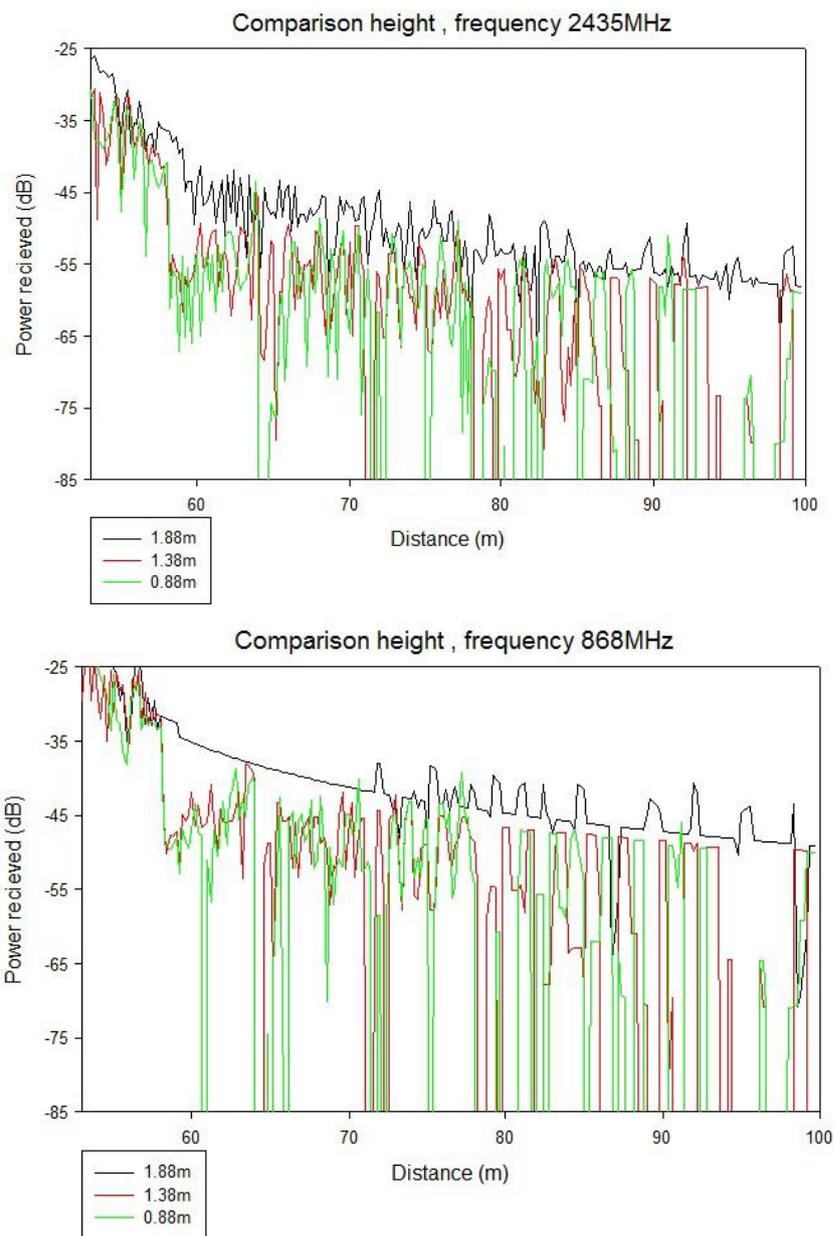


Figura 4.6: Estimación de niveles de potencia recibidos considerando el emisor a diferentes alturas sobre el nivel del suelo, para el caso sin vides en las dos frecuencias de trabajo

La comparativa en los niveles de potencia recibida en función de la distancia, para el caso con y sin vides se puede observar de manera cuantitativa en la Figura 4.7. La inclusión de las vides tiene como efecto un aumento en las pérdidas de propagación. A

su vez se ha estudiado la colocación de receptores en filas de picas distintas a la del emisor para intentar abarcar el máximo espacio posible.

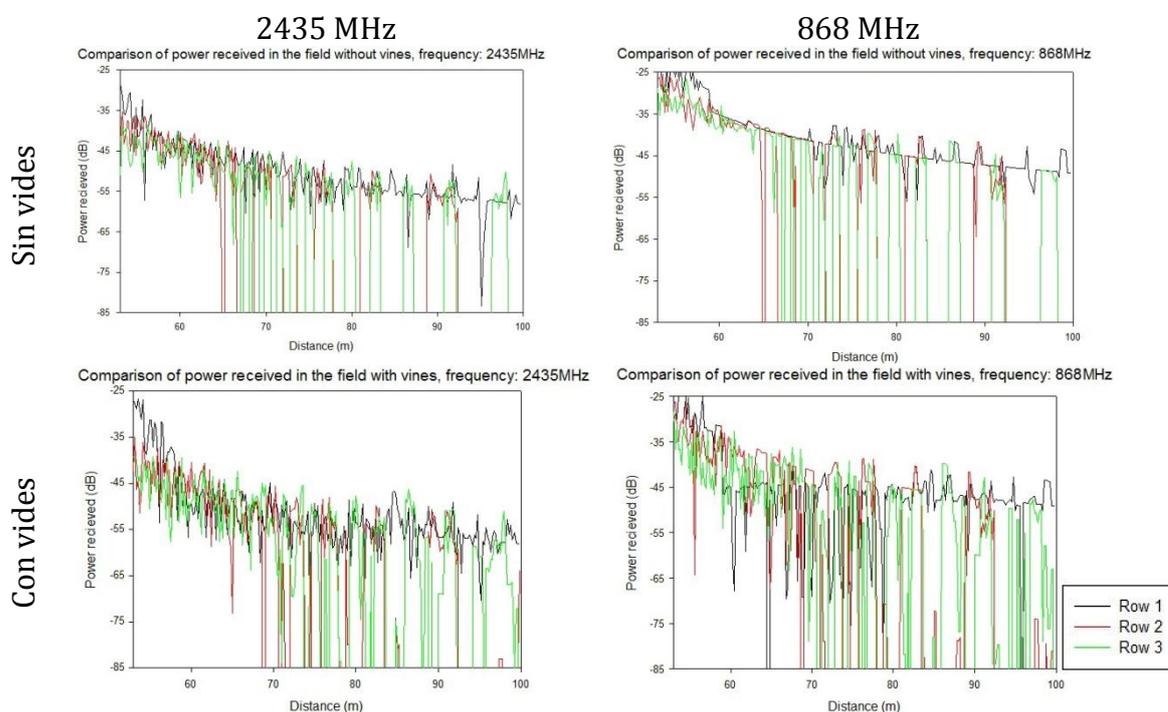


Figura 4.7: Estimación de niveles de potencia recibidos considerando operativo el transceptor número 1. Se muestra el caso con vides y sin vides en las dos frecuencias de trabajo

El escenario de simulación presenta una dependencia relevante con la topología del mismo, fundamentalmente debido a la estructura metálica de los soportes. Este hecho se puede observar de manera clara al obtener los valores de los perfiles de retardo potencia para un punto concreto del escenario, tal y como se muestra en la Figura 4.8. En dicha figura se muestran los resultados obtenidos tanto con el modelo de vides como en ausencia de las mismas, mostrando nuevamente el impacto al considerar el efecto realista del material en el modelado del canal radioeléctrico.

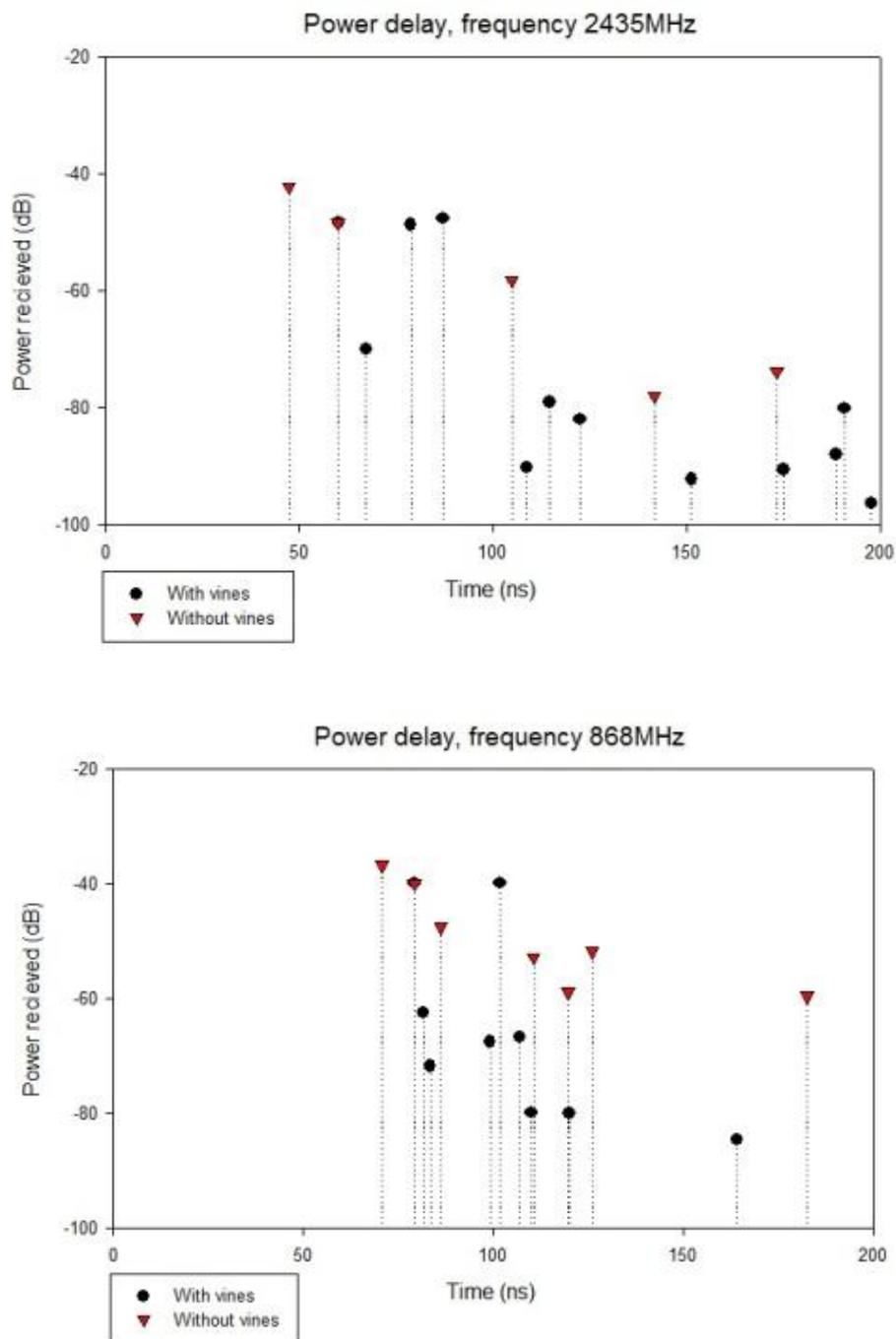


Figura 4.8: Estimación del Perfil de Retardo Potencia obtenido en el punto (71.06m, 5.26m, 4.38m (a una altura efectiva del sensor de 1.88m del nivel del suelo)) en las dos frecuencias de trabajo

## 4.7. Analizador de protocolos

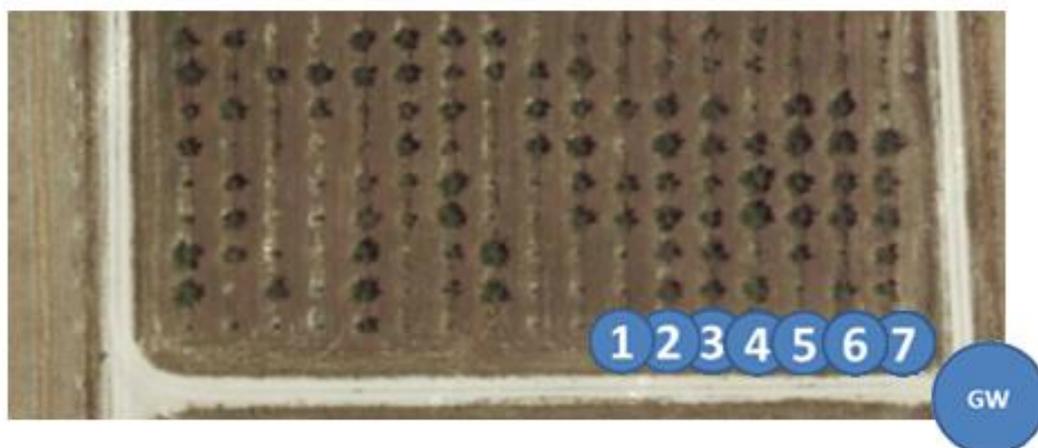


Figura 4.9: Vista aérea de la finca y ubicación de las motas

El análisis experimental se ha completado con la ayuda de ocho sensores Waspnote 802.15.4 que se han emplazado linealmente, a razón de un nodo poste, a una altura de 1,88 m (ver figura 4.9). Los sensores se distribuyen uniformemente desde el nodo #1 hasta el nodo GW. El nodo GW está conectado a un PC portátil que se encarga de almacenar las trazas de los mensajes para su posterior análisis. El nodo #1 es el encargado de iniciar el envío de los mensajes, que se van propagando de un nodo a su sucesor (en orden creciente) hasta llegar al GW. Se trata de una comunicación secuencial entre nodos con identificadores consecutivos cuyo objetivo es minimizar el número de posibles colisiones. El periodo de envío de mensajes está prefijado para cada tanda de experimentación, que consta de 10.000 envíos consecutivos, y se analizan distintos periodos desde 65 ms a 10.000 ms. Se han realizado 25 tandas de experimentación para cada periodo, hasta totalizar 36 periodos distintos, lo que hace un total de 9 millones de mensajes enviados por el nodo #1. La Figura 4.10 ilustra (en escala logarítmica) las pérdidas de mensajes observadas para cada uno de los periodos

estudiados y la figura 4.11 muestra la desviación en mensajes perdidos en función del periodo entre mensajes.

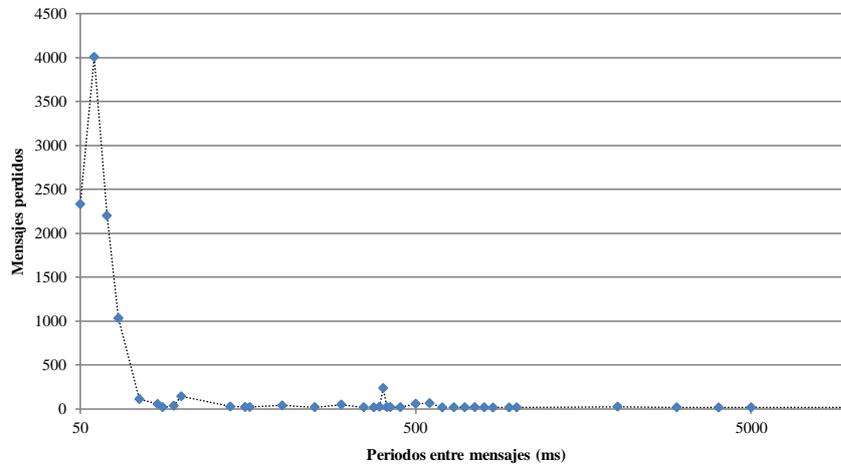


Figura 4.10: Mensajes perdidos para distintos periodos de transmisión.

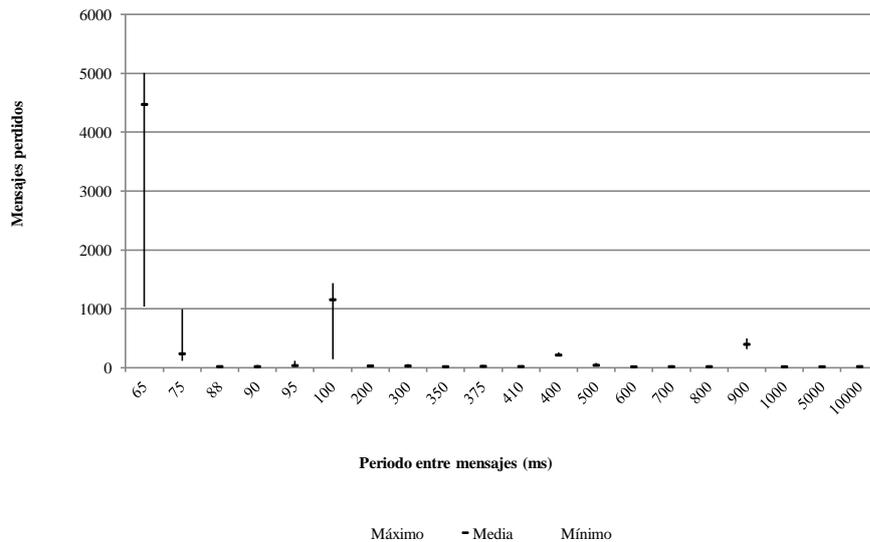


Figura 4.11: Desviación en el número de mensajes perdidos para distintos periodos entre mensajes.

Al analizar distintos periodos, se aprecia que a menor intervalo entre mensajes, mayor es la pérdida de mensajes. Esto se explica de modo muy sencillo por las limitaciones del buffer de recepción de los dispositivos que es incapaz de albergar todos los mensajes recibidos. Los dispositivos no son capaces de procesar todos los mensajes recibidos y se produce un considerable número de pérdidas. La Figura 4.12 muestra cómo para un periodo de 65 ms el primer nodo receptor (#2, ya que el #1 es el emisor iniciador) actúa como filtro y es él quien sufre la mayor parte de las pérdidas. El nodo #2 no es capaz de almacenar todos los mensajes enviados por el nodo #1, y por tanto, una buena parte de dichos mensajes no son procesados y reenviados al nodo #3. Los mensajes restantes son reenviados y el nodo #5 sufre una pequeña congestión. Se trata de una contención en el flujo de transmisión debida a la imposibilidad del nodo #2 para cursar el tráfico requerido. Para poder analizar este aspecto se han realizado 27 tandas de 10.000 envíos. Conforme va creciendo el intervalo de transmisión, la mayor pérdida de paquetes no se produce en el primer nodo retransmisor (#2) sino en la parte central de la cadena, tal y como se aprecia en la Figura 4.13. La Figura 4.14 muestra el contraste experimentado por el sistema cuando el periodo de transmisión es mucho mayor (500 ms). En este caso las pérdidas descienden drásticamente, observándose que ya no existe una relación de contención, puesto que todos los nodos presentan unas pérdidas similares y muy escasas.

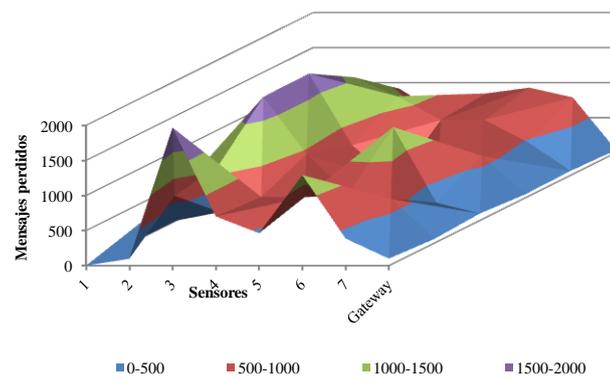


Figura 4.12: Pérdidas de mensajes por nodo para un periodo de 65 ms

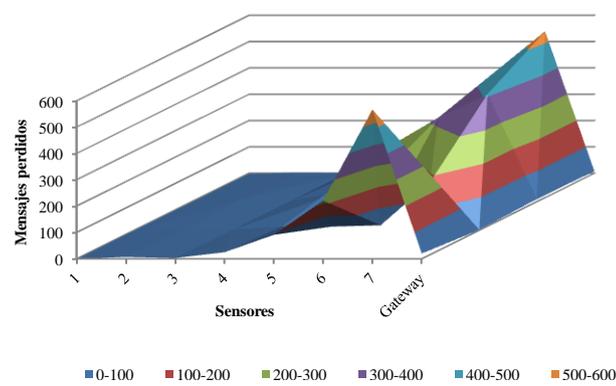


Figura 4.13: Pérdidas de mensajes por nodo para un periodo de 75 ms

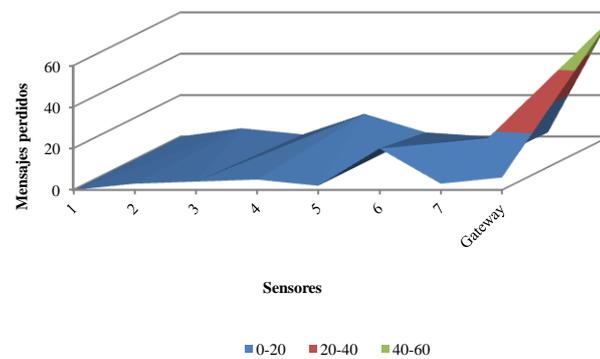


Figura 4.14: Pérdidas de mensajes por nodo para un periodo de 500 ms

Con el fin de contrastar los datos de nivel de señal obtenidos con la simulación por trazado de rayos, se ha medido el nivel de RSSI obtenido por los nodos pudiéndose comprobar que, como era previsible, el nivel de RSSI no se ve afectado por el intervalo de transmisión, y que las pequeñas variaciones que se producen se encuentran dentro del margen de tolerancia del circuito de medida. La Tabla 1 muestra los valores obtenidos para los intervalos de 65 y 500 ms. Estos intervalos se corresponden con el extremo inicial (65 ms) de la curva de pérdida de mensajes de la Figura 7 y con una zona de la misma en la que el número de mensajes perdidos se ha estabilizado completamente (500 ms). Para el resto de intervalos se mantiene la misma tendencia.

		Nodo						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
<b>RSSI (dBm)</b>	<b>Media</b>	0,0000	-45,7855	-44,9031	-50,3483	-46,4190	-48,0113	-44,0960
	<b>Desviación</b>	0,0000	0,3955	0,2646	0,1699	0,1210	0,2819	0,1079
	<b>Moda</b>	0,0000	-45,6667	-44,8333	-50,3333	-46,5000	-48,0000	-44,1667
<b>65ms</b>	<b>Mediana</b>	0,0000	-45,6667	-44,8333	-50,3333	-46,5000	-48,0000	-44,1667
<b>RSSI (dBm)</b>	<b>Media</b>	0,0000	-44,6797	-43,6459	-47,8440	-45,9994	-48,2219	-44,0120
	<b>Desviación</b>	0,0000	0,4334	0,3199	0,4302	0,0231	0,3104	0,0828
	<b>Moda</b>	0,0000	-44,5000	-43,5000	-47,5000	-46,0000	-48,0000	-44,0000
<b>500ms</b>	<b>Mediana</b>	0,0000	-44,5000	-43,5000	-48,0000	-46,0000	-48,0000	-44,0000

Tabla 4.4: Niveles de RSSI obtenidos para dos intervalos de transmisión.

Los valores de RSSI obtenidos se corresponden con los obtenidos mediante simulación lo que permite validar la bondad de los resultados de simulación y permite minimizar el número de medidas físicas a realizar que, además de ser muy laboriosas, suponen un mayor coste temporal.

#### 4.8. Diferencias entre modelos

	<b>Mediciones</b>	<b>Simulador</b>	<b>RSSI</b>
Tx1	-49,52	-44,6951	-45,2326

Tabla 4.5: Potencia recibida (dBm) en el punto (56.94, 5.26, 1.88) emitiendo el transmisor 1

	<b>Mediciones</b>	<b>Simulador</b>	<b>RSSI</b>
Tx4	-45,17	-40,3667	-46,2092

Tabla 4.6: Potencia recibida (dBm) en el punto (78.12, 5.26, 1.88) emitiendo el transmisor 4

Podemos comprobar que los valores de potencia recibida en los tres casos son muy parecidos. Todas las medidas están realizadas en el escenario sin vides a 2,435GHz.

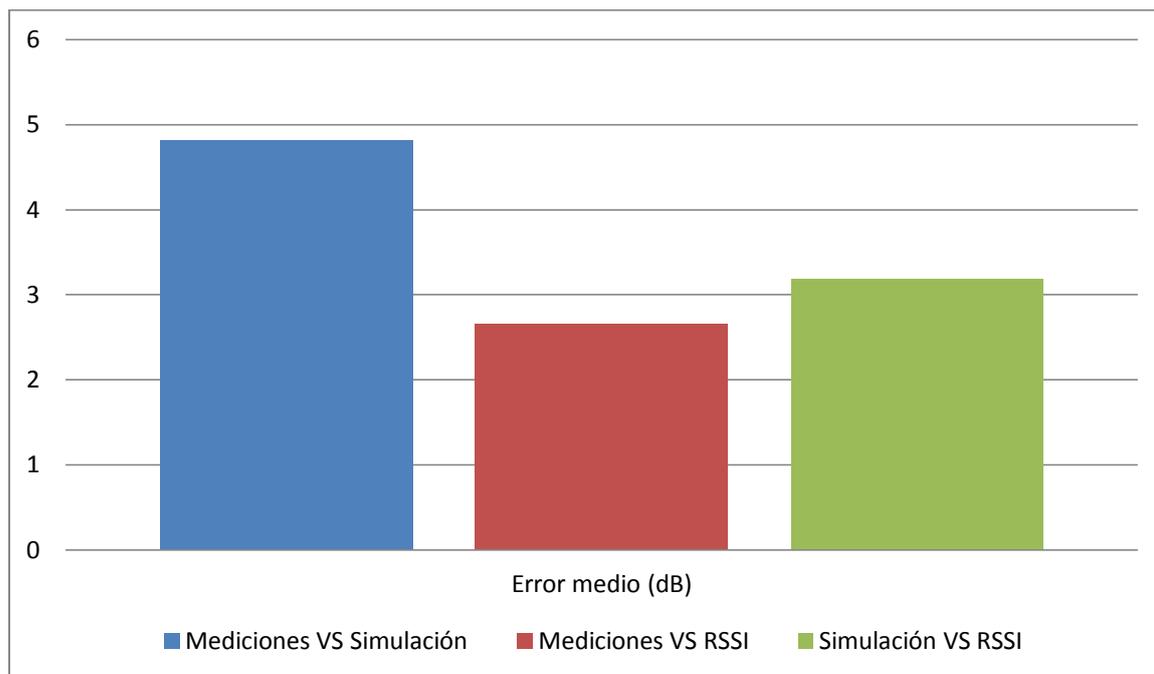


Figura 4.15: Error medio entre los diversos tipos de medidas

#### 4.9. Modelo de vid avanzado

Para acabar, se realiza una simulación electromagnética completa empleando el simulador CST MW Studio, basado en Integración Finita en Dominio Temporal, con el fin de conseguir un modelo más exacto de vid que el introducido en Matlab. Como se ha explicado anteriormente, los racimos se han introducido como un prisma rectangular con las componentes dieléctricas del aire y la uva (ver apartado 4.3), sin embargo, ahora generamos los granos de uva de manera individual, además, viendo el análisis realizado de variedades de vid se puede tener cualquier grado de precisión con la planta utilizada.

Se ha introducido un modelo 3D de una uva de radio  $r$ , considerando el material dispersivo visto anteriormente [DEV09].

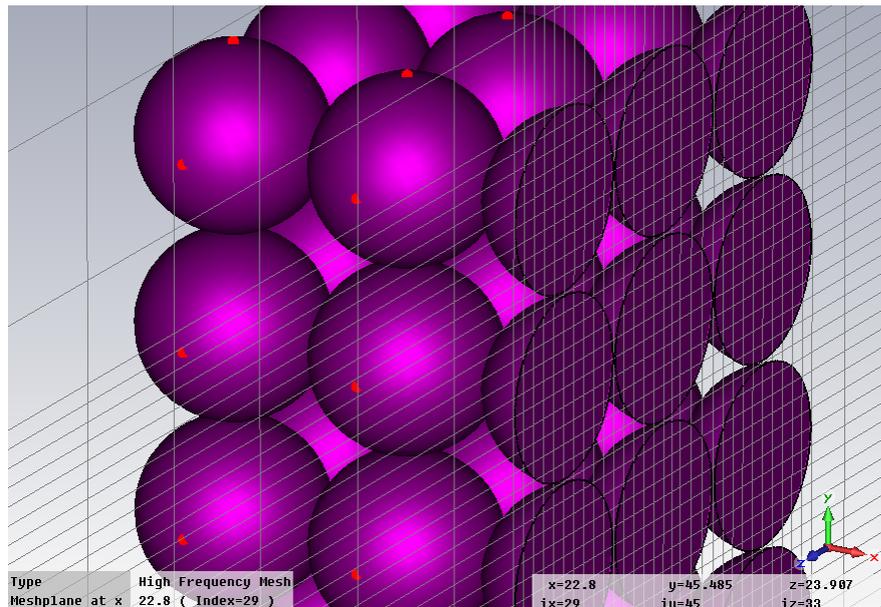


Figura 4.16: Modelo avanzado de uva

Con el fin de entender correctamente el comportamiento electromagnético de las uvas se ha realizado una simulación de onda plana, analizando los valores de campo a diferentes ubicaciones de las sondas de campo eléctrico.

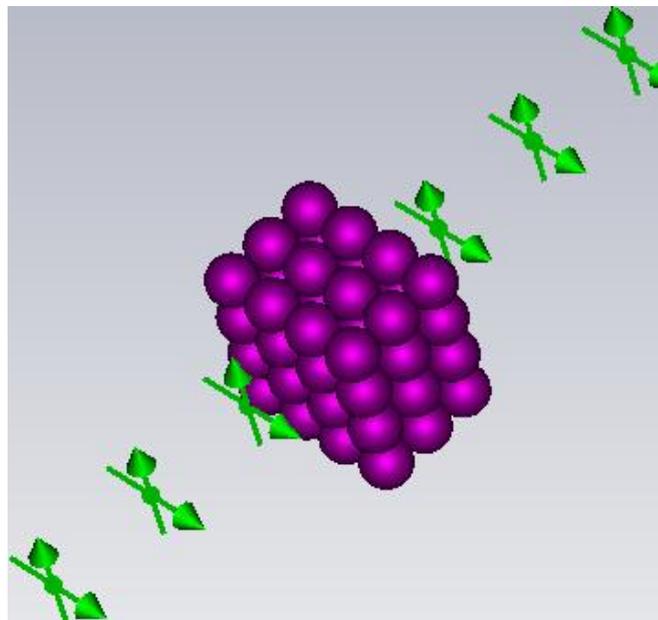


Figura 4.17: Pseudo-racimo y uvas

### 4.9.1. Simulaciones

Una vez definido el racimo se hace pasar un campo eléctrico a través de él, dando como resultado las siguientes figuras:

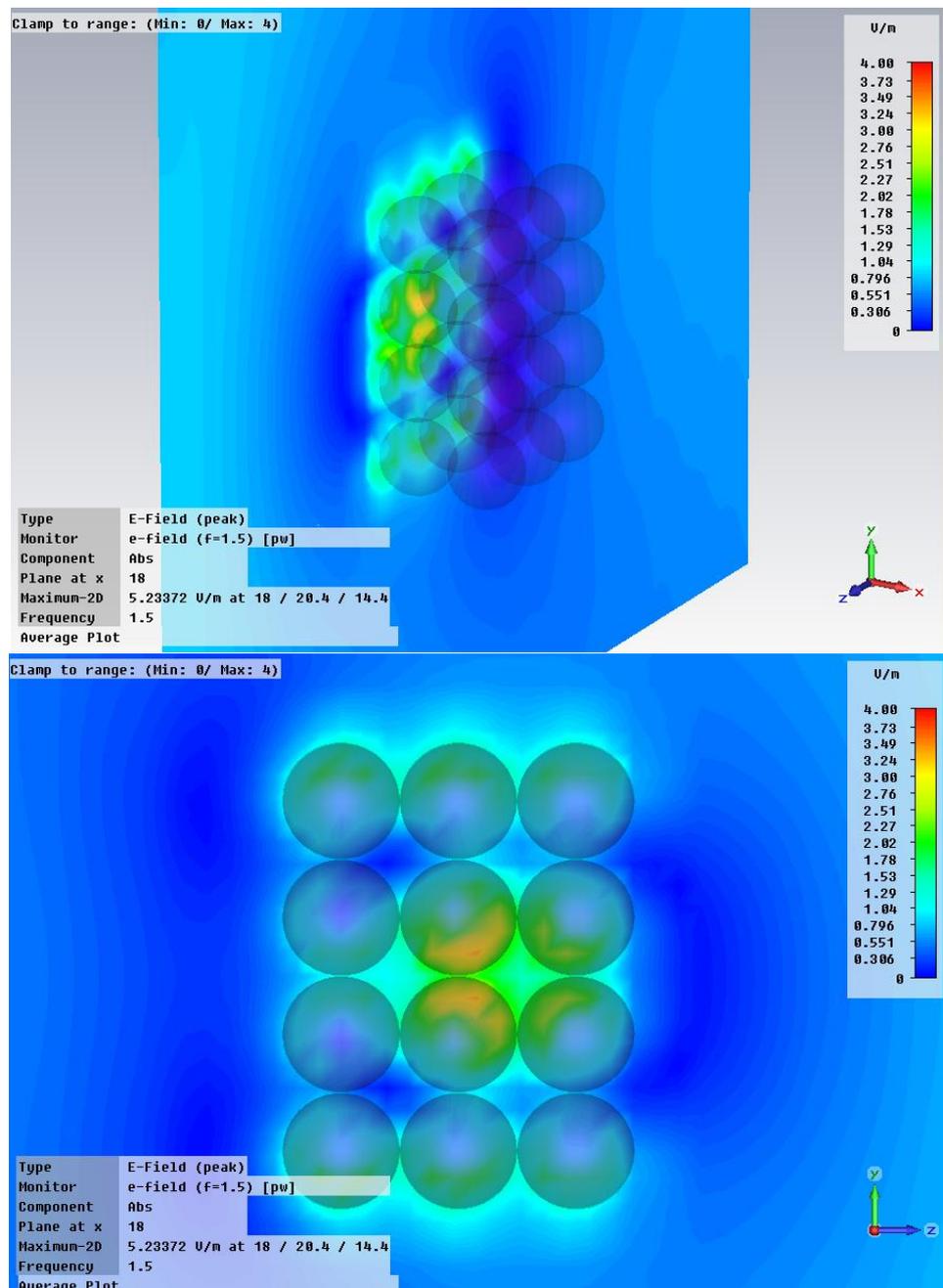


Figura 4.18: Resultados de simulación con CST

En las simulaciones de campo eléctrico, se observa el efecto que las uvas tienen sobre la radiopropagación, modificando su trayectoria y su amplitud. En función de la ubicación de las sondas y de la frecuencia podemos comprobar las grandes variaciones de campo eléctrico recibidas.

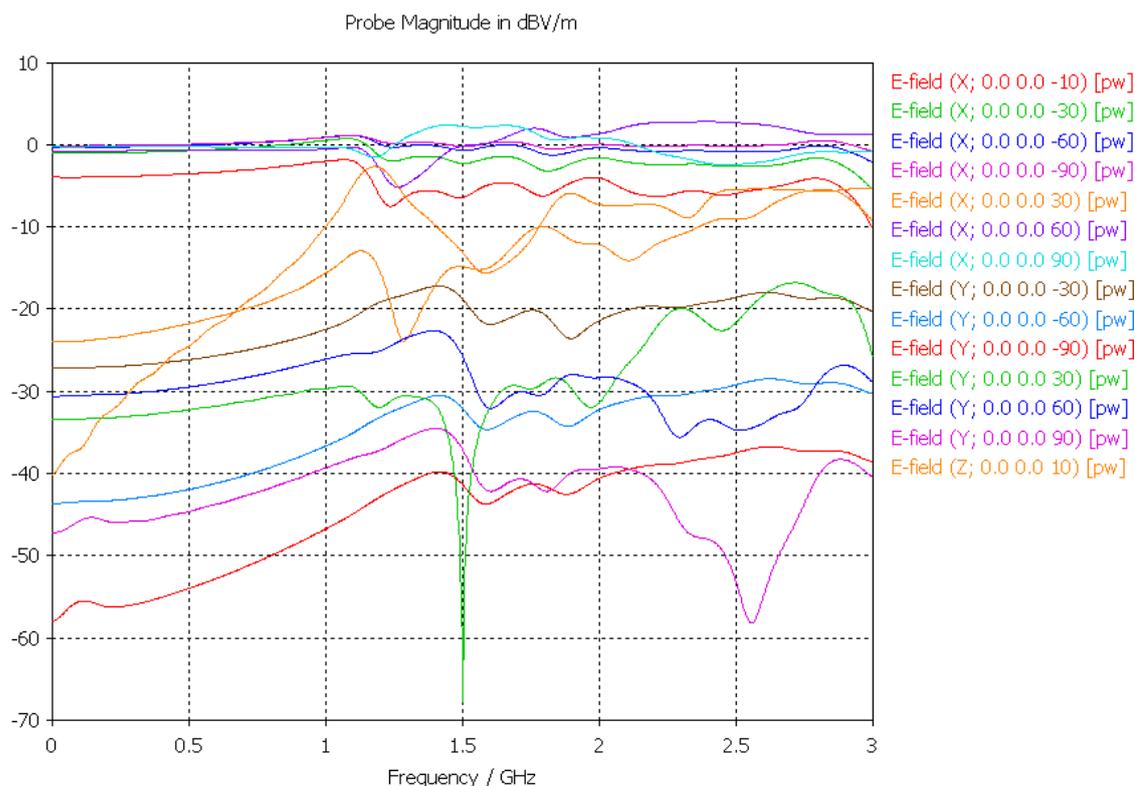


Figura 4.19: Resultados de la evolución del campo eléctrico al modificar la posición de las sondas

Cabe destacar que los resultados anteriores se pueden combinar con la técnica de lanzamiento de rayos con el fin de poder obtener un modelo más preciso de caracterización radioeléctrica de las viñas y, como he dicho anteriormente, si esto se une a poder elegir la variedad de vid usada, se puede llegar a un alto grado de precisión.

#### 4.10. Conclusiones y diseño de la red

Una vez visto los resultados de la propagación podemos comprobar que los escenarios con vides provocan una mayor pérdida en el escenario, así que conforme vayan creciendo las vides de la finca irá empeorando nuestra red.

Los sensores irán de manera obligatoria encima de las picas ya que si no se producirán muchísimas sombras en la propagación y eso conllevará que se pierda algún paquete. La otra opción sería que las picas no fueran de metal, de esta manera el rayo emitido atravesaría la pica en vez de reflejarse en su totalidad.

Sabiendo que van a estar encima de las picas tenemos que contar con ello para diseñar la red, la distancia entre dos picas de la misma fila es de 7,06m y entre dos filas adyacentes, 2,95m. Viendo como cae la potencia recibida en función de la distancia se puede colocar sin ningún problema de pérdida de paquetes dos sensores a 14,12m (-53,123dB recibidos, sin vides a 2435MHz), es decir, con una pica entre medio. Y en el otro eje separarlas 11,8m (-46,4954B recibidos, sin vides a 2435MHz).

Se puede reducir la potencia emitida, sin embargo al mínimo ruido se empezaría a perder la calidad de la señal, para ello lo que se puede hacer es cambiar las antenas, de tal manera que cada sensor sea totalmente direccional apuntando al siguiente en la red, sin embargo esto conlleva un mayor gasto en las antenas para reducir directamente la potencia y así aumentar la vida de las baterías; por otro lado ganaríamos en evitar interferencias entre los sensores.

Una vez visto los puntos anteriores, la red quedaría de la siguiente manera:

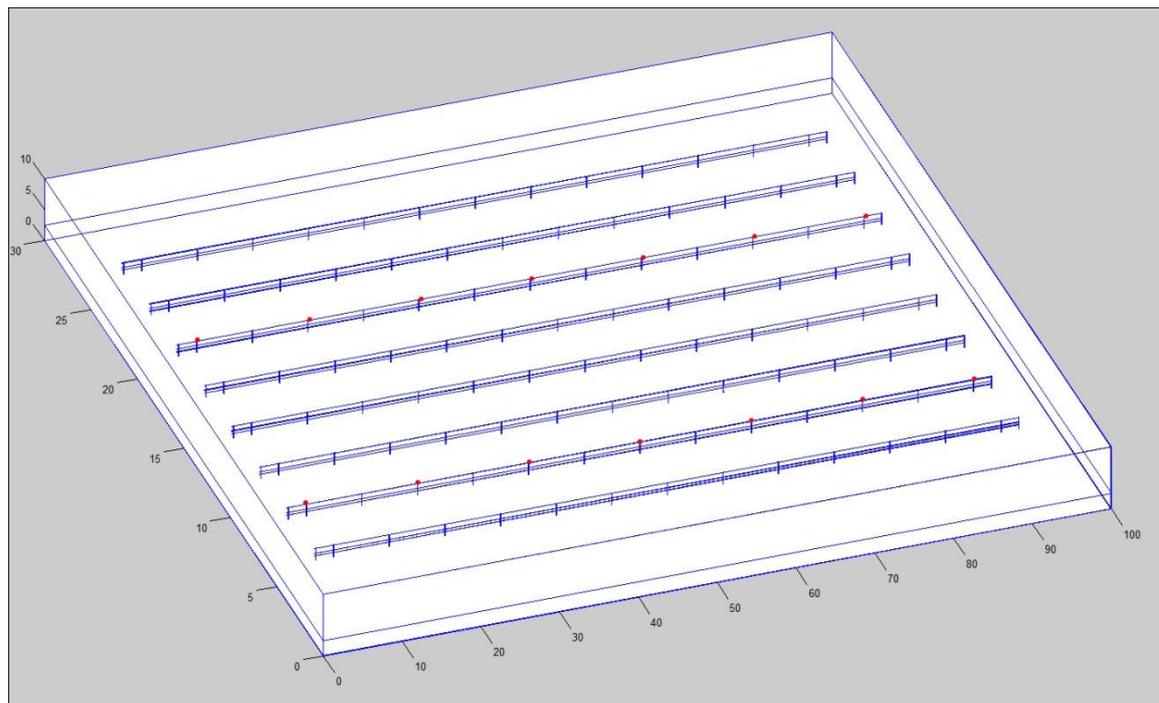


Figura 4.20: Red de sensores

Con este diseño se cumplirían los objetivos, se consigue que la información salte de un sensor a otro correctamente y que se cubra toda la superficie con la red de sensores.

Para acabar sólo queda decir el orden de emisión, para ello se selecciona el mínimo camino posible quedando así:

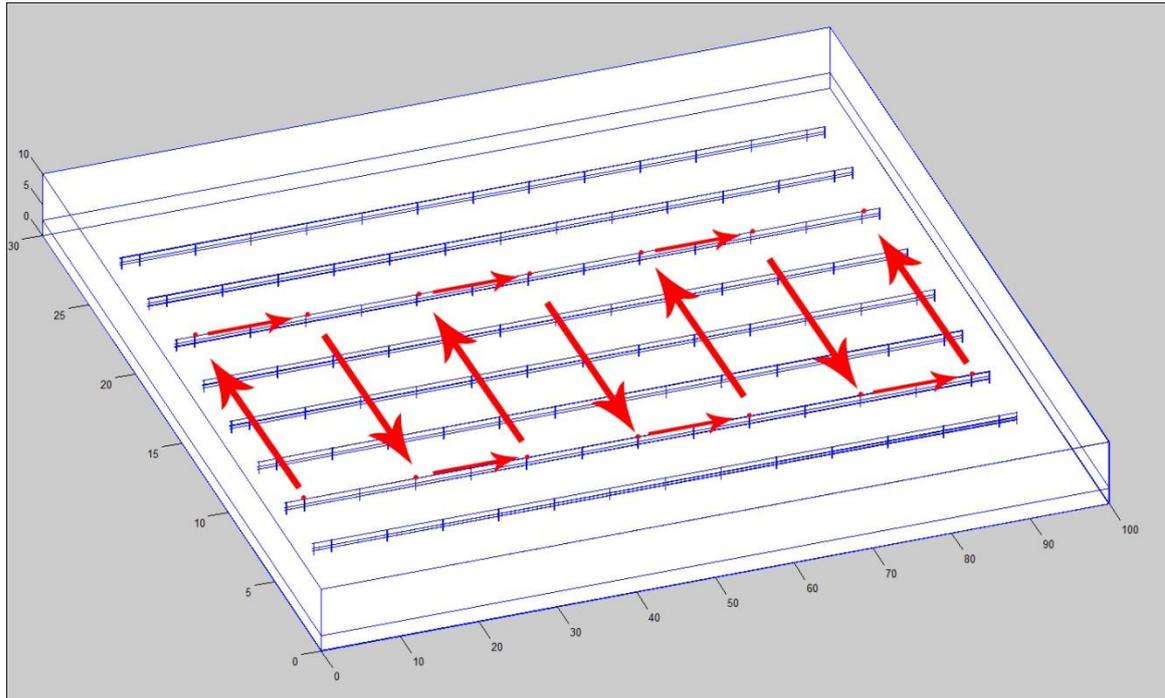


Figura 4.21: Orden de la red

Para concluir, sólo decir que el último sensor debe llevar un sistema de emisión, ya sea WiFi o GSM o estar conectado a un ordenador, para enviar los datos o almacenarlos.

## 5. Resultados de la gestión

### 5.1. Control de cambios

- Documento con el análisis inicial de requisitos y funcionalidades

De esta fase de desarrollo se han obtenido como resultado los documentos con el análisis del proyecto. En esta fase se ha producido una desviación con respecto al plan de programa establecido que se presenta a continuación.

<b>II. Estudio y conocimiento del proyecto</b>	Horas estimadas	Horas reales
II.a. Captura de requisitos	12	10
II.b. Análisis y estudio	18	14
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>24</b>

Se han invertido 2 horas menos en la captura de requisitos debido a las reuniones semanales con el tutor del proyecto. También se han invertido 4 horas menos en el análisis y estudio, ya que se había invertido tiempo previo al proyecto en el estudio de la tecnología ZigBee.

- Desarrollo del proyecto

Se ha identificado una variación del tiempo de diseño del escenario respecto a la estimación inicial. Se han invertido 10 horas más de las estimadas en el apartado V.a. - Diseño del escenario.

	Horas estimadas	Horas reales
V.a. Diseño del escenario	15	25

Con el objetivo de hacer frente a esta situación se ha realizado una actualización sobre el programa del proyecto retrasando la finalización del mismo. Se produjo el imprevisto a raíz de un fallo en el código del escenario, que daba como resultado unos valores erróneos. Se solucionó una vez identificado y encontrado el problema, posteriormente se repitieron las simulaciones para comprobar que estaba todo correcto.

- Generación de un nuevo modelo de vides

A mitad del proyecto se decidió ampliar las simulaciones con un sistema más fiable de modelo de vid.

	Horas estimadas	Horas reales
V.a.ii. Modelo de vid avanzado	-	15

De esta manera se ha añadido un nuevo apartado a las fases del proyecto y amplió en 15 horas el tiempo total del proyecto.

- Estudio de transmisores

En este apartado se subestimó el tiempo de estudio y desarrollo de la colocación de transmisores, también fue debido a los nuevos casos de simulación y alguna prueba para ver la fiabilidad de las emisiones en diversos casos.

	Horas estimadas	Horas reales
V.b. Colocación de transmisores	5	20
V.b.i. Potencia de emisión	1	8
V.b.ii. Diagrama de emisión	1	1
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>29</b>

Se han realizado muchas pruebas de transmisores esto ha conllevado un gran estudio de los mismos tanto en potencia como en ubicación; para el caso del diagrama de emisión, en todos los casos, ha sido omnidireccional dado que es lo más barato tanto en tiempo de estudio y colocación como en dinero de antenas. El tiempo de la colocación de transmisores se ha visto incrementado en 15 horas, el del estudio de la potencia en 7 mientras que el del diagrama de emisión se ha visto inalterado.

- Simulaciones

A raíz de los cambios de programa hubo que realizar más simulaciones lo que ha conllevado un incremento de horas de simulación.

	Horas estimadas	Horas reales
V.b. Simulación del escenario	180	200

Con los nuevos modelos de simulación se ha ampliado en 20 horas el tiempo del proyecto dado que hubo que realizar nuevas pruebas, así como verificaciones del escenario.

- Mediciones analíticas

Se ha producido una variación de horario con respecto a la previsión inicial con respecto a la realización de medidas analíticas.

	Horas estimadas	Horas reales
V.c. Mediciones analíticas	20	10
V.c.i. Comparación	5	10
	<b>Total</b>	<b>25</b>
		<b>20</b>

Se ha reducido en 10 horas el tiempo de medición debido a que los resultados fueron correctos desde el principio, así que no fue necesario repetirlos o rehacerlos. Por otro lado el tiempo de comparación de datos fue superior ya que con lo entrada del nuevo modelo de vid y los problemas encontrados se tuvo que comprar muchas más mediciones.

- Documentación

En este apartado se subestimó el tiempo estimado dando como resultado una ampliación de las horas resultantes con respecto a las estimadas.

<b>VII. Documentación</b>	Horas estimadas	Horas reales
VII.a. Documentación del proyecto	15	25
VII.b. Memoria del proyecto	135	150
<b>Total</b>	<b>150</b>	<b>175</b>

El tiempo de escritura se vio incrementado en 15 horas debido a la ampliación del proyecto con el nuevo modelo de vid, lo mismo ha ocurrido con la documentación que se incrementó en 10 horas.

## 5.2. Actualización del programa

Las actualizaciones del programa se han especificado en el apartado anterior, habiéndose realizado actualizaciones en aquellos puntos en los que ha habido alguna variación de tiempo o estructura.

## 5.3. Actualización de la lista de actividades

Se ha realizado un cambio en La Lista de Actividades para poder cumplir con los requisitos definidos para este proyecto. En concreto, se ha añadido el modelo de vid avanzado desplazando los apartados posteriores. Dicho cambio se contempla en el apartado Actualización del Programa del Proyecto.

## 5.4. Actualización del programa del proyecto

<b>Fases del proyecto</b>	<b>FPC</b>	<b>FPT</b>	<b>FRC</b>	<b>FRT</b>
<b>I. Gestión del proyecto</b>	<b>28/02/2012</b>	<b>05/03/2012</b>	<b>28/02/2012</b>	<b>05/03/2012</b>
<b>II. Estudio y conocimiento del proyecto</b>	<b>06/03/2012</b>	<b>12/03/2012</b>	<b>06/03/2012</b>	<b>12/03/2012</b>
a. Captura de requisitos	06/03/2012	07/03/2012	06/03/2012	07/03/2012
b. Análisis y estudio	08/03/2012	12/03/2012	08/03/2012	12/03/2012
<b>III. Recopilación de información</b>	<b>13/03/2012</b>	<b>16/03/2012</b>	<b>13/03/2012</b>	<b>16/03/2012</b>
a. Búsqueda de información relacionada con el proyecto	13/03/2012	15/03/2012	13/03/2012	15/03/2012
b. Búsqueda de proyectos similares	16/03/2012	16/03/2012	16/03/2012	16/03/2012
<b>IV. Formación</b>	<b>19/03/2012</b>	<b>23/03/2012</b>	<b>19/03/2012</b>	<b>23/03/2012</b>
a. Aprendizaje en el uso del código	19/03/2012	21/03/2012	19/03/2012	21/03/2012
b. Aprendizaje de la función de generación de objetos	22/03/2012	23/03/2012	22/03/2012	23/03/2012

<b>V. Desarrollo</b>	<b>26/03/2012</b>	<b>26/04/2012</b>	<b>26/02/2012</b>	<b>04/05/2012</b>
a. Diseño del escenario	26/03/2012	27/03/2012	26/03/2012	30/03/2012
i. Generación de un escenario con vides	28/03/2012	29/03/2012	30/03/2012	03/04/2012
ii. Modelo avanzado	-	-	14/05/2012	17/05/2012
iii. Colocación de trasmisores	30/03/2012	02/04/2012	08/04/2012	10/04/2012
1. Potencia de emisión	30/03/2012	30/03/2012	11/04/2012	13/04/2012
2. Diagrama de emisión	02/04/2012	02/04/2012	13/04/2012	13/04/2012
b. Simulación del escenario	03/04/2012	13/04/2012	16/04/2012	30/04/2012
i. Generación de tablas	16/04/2012	17/04/2012	01/05/2012	02/05/2012
ii. Optimización	18/04/2012	20/04/2012	03/05/2012	04/05/2012
c. Mediciones analíticas	23/04/2012	25/04/2012	26/02/2012	27/02/2012
i. Comparación	26/04/2012	26/04/2012	04/05/2012	04/05/2012
<b>VI. Pruebas globales</b>	<b>27/04/2012</b>	<b>03/05/2012</b>	<b>04/05/2012</b>	<b>10/05/2012</b>
a. Validación de resultados obtenidos	27/04/2012	30/04/2012	04/05/2012	08/05/2012
b. Optimización	02/05/2012	03/05/2012	09/05/2012	10/05/2012
<b>VII. Documentación</b>	<b>04/05/2012</b>	<b>17/05/2012</b>	<b>10/05/2012</b>	<b>28/05/2012</b>
a. Documentación del proyecto	04/05/2012	07/05/2012	10/05/2012	13/05/2012
b. Memoria del proyecto	08/05/2012	17/05/2012	14/05/2012	28/05/2012

**FPC: Fecha prevista de comienzo**  
**FPT: Fecha prevista de terminación**  
**FRC: Fecha real de comienzo**  
**FRT: Fecha real de terminación**

Fases del proyecto:	Horas estimadas	Horas reales
<b>I. Gestión del proyecto</b>	<b>Total 36</b>	<b>Total 36</b>
<b>II. Estudio y conocimiento del proyecto</b>		
a. Captura de requisitos	12	10
b. Análisis y estudio	18	14
	<b>Total 30</b>	<b>Total 24</b>
<b>III. Recopilación de información</b>		
a. Búsqueda de información relacionada con el proyecto	16	16
b. Búsqueda de proyectos similares	8	8
	<b>Total 24</b>	<b>Total 24</b>
<b>IV. Formación</b>		
a. Aprendizaje en el uso del código	24	24
b. Aprendizaje de la función de generación de objetos	10	10
	<b>Total 34</b>	<b>Total 34</b>
<b>V. Desarrollo</b>		
a. Diseño del escenario	15	25
i. Generación de un escenario con vides	15	15
ii. Modelo avanzado de vid	-	15
iii. Colocación de transmisores	5	20
1. Potencia de emisión	1	8
2. Diagrama de emisión	1	1
b. Simulación del escenario	180	200
i. Generación de tablas	12	12
ii. Optimización	24	24
c. Mediciones analíticas	20	10
i. Comparación	5	10
	<b>Total 278</b>	<b>Total 340</b>

**VI. Pruebas globales**

a. Validación de resultados obtenidos	12	12
b. Optimización	30	30
	<b>Total 42</b>	<b>Total 42</b>

**VII. Documentación**

a. Documentación del proyecto	15	25
b. Memoria del proyecto	135	150
	<b>Total 150</b>	<b>Total 175</b>

---

<b>Total proyecto</b>	<b>Total proyecto</b>
<b>594</b>	<b>651</b>

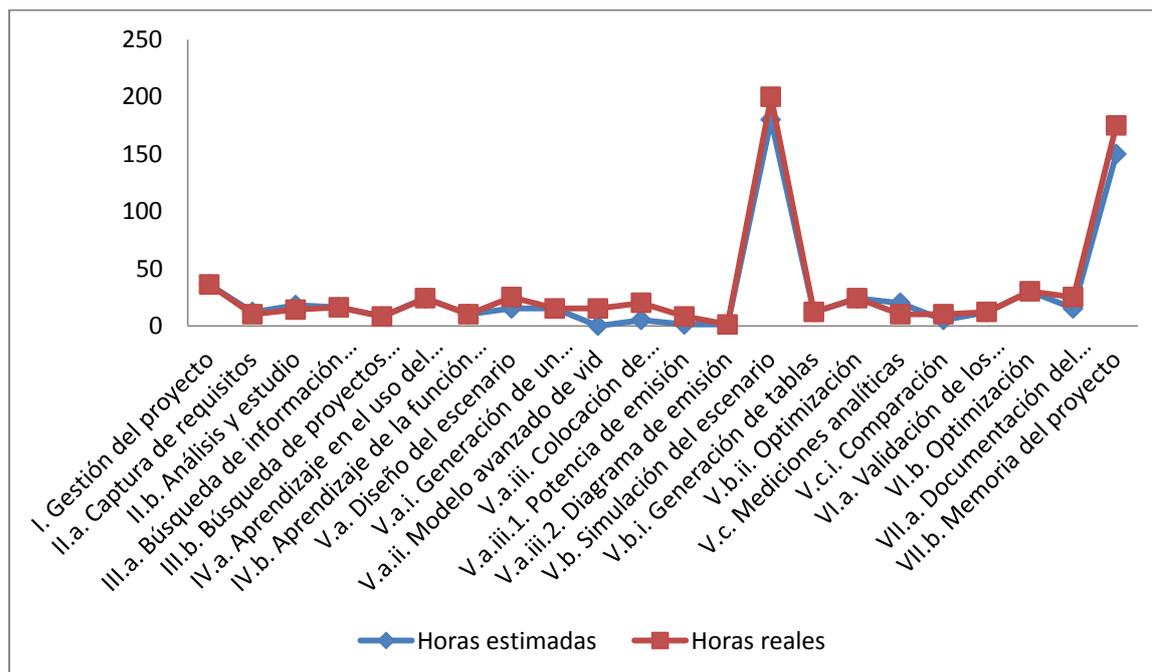


Figura 5.1: Resumen de las horas invertidas

Han sido más las horas invertidas en el desarrollo del proyecto que las estimadas inicialmente. En concreto, los paquetes de trabajo en los que más diferencia se detecta son aquellos que tienen que ver con el escenario o simulación del mismo, como el apartado V.a. Diseño de un escenario.

Se han empleado 62 horas más en el apartado V. Desarrollo del proyecto ya que ha sido más costoso de lo esperado y entre los problemas encontrados y que se decidió ampliar el alcance del proyecto la cifra de horas se disparó.



## 6. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

En este apartado se detallan los objetivos y conocimientos adquiridos así como las posibles continuaciones del proyecto.

### 6.1. Concordancia entre los objetivos y los resultados

- Aprendizaje del sistema de simulación basado en el trazado de rayos creado en Matlab.

Se han conseguido los conocimientos necesarios del programa de simulación, gracias al estudio de las funciones del trazado de rayos como de la gran cantidad de pruebas realizadas para poder completar el proyecto

- Diseño de una red de sensores inalámbrica basada en ZigBee en un viñedo.

Se han dado los patrones necesarios para poder diseñar una red de sensores de ZigBee correctamente, ya sean valores de potencia o una correcta ubicación.

- Optimización de la red mediante las simulaciones del escenario y las mediciones “in situ” teniendo en cuenta las premisas anteriormente citadas.

Una vez se realizaron todas las simulaciones de compararon con las medidas realizadas en la finca y, con ello, se fueron estudiando las diferentes posibilidades:

ubicación, potencia, altura. Todo con el fin de poder diseñar una red de sensores con un gran ahorro energético.

- Adecuación de la red de sensores inalámbrica a diversas condiciones de la finca.

Se han generado dos tipos de diseños: uno con la finca vacía y otro con la finca llena de vides, a su vez se han hecho dos modelos distintos de vid, uno más preciso que el otro. Se ha logrado estimar una tipología general en los dos modelos para lograr conseguir la mayor optimización de la red inalámbrica de sensores.

- Ofrecer información importante relativa a los datos obtenidos para una posible continuación o ampliación.

En el apartado 4. Desarrollo del proyecto se recogen los datos obtenidos de las simulaciones y de las medidas in situ con el fin de poder generar una correcta red de sensores y, si es requerido, poder ampliar el proyecto.

## 6.2. Lecciones aprendidas

- El en desarrollo de este tipo de proyectos, es muy complejo hacer una estimación exacta del tiempo que se va a emplear en cada fase de proyecto. Aunque muchos proyectos guarden cierto grado de similitud, siempre existe algún requisito que puede marcar la diferencia. Debido a esto, para realizar la

estimación de tiempos, tomar la experiencia en proyectos similares como punto de partida puede conllevar un riesgo bastante alto.

- Debido a las razones expuestas en el punto anterior, es importante establecer puntos de control a lo largo de todo el proyecto. Esto posibilita realizar un seguimiento del mismo, y así detectar posibles desviaciones que se puedan dar sobre el plan inicial para poder controlar la situación. Se debe detallar en cada caso las acciones que se van a tomar frente a las situaciones que se puedan dar, para poder paliar el impacto que puedan causar.
- El trabajo en equipo es de vital importancia. La falta de comunicación o el hermetismo de algún componente del grupo pueden ser una razón decisiva a la hora de terminar un proyecto en el plazo de tiempo establecido. El hecho de no tener experiencia previa en proyectos similares juega en contra del proyectista, por lo que es muy importante poder aprender de las experiencias y conocimientos profesionales del grupo de trabajo

### 6.3. Conclusiones

En este proyecto se ha realizado el estudio de la propagación de los sensores inalámbricos con el fin de crear una red de sensores basada en alargar lo máximo posible la vida de los mismos.

## **6.4. Posibles líneas de trabajo futuras**

A continuación se detallan las líneas futuras de trabajo inmediatas y otras posibles líneas de trabajo que extenderían los datos actuales.

Existen dos líneas de trabajo principales.

### **6.4.1. Ampliación**

#### **6.4.1.1. Ampliación directa**

Una de las ideas iniciales del proyecto fue realizar una serie de estudios medioambientales, es decir, dar diversas condiciones ambientales al escenario: tener un suelo seco, húmedo, que esté lloviendo, etc. Todo esto con el fin de tener la máxima información para poder crear una red genérica que sirva en cualquier condición.

También se podría realizar el proyecto con otro tipo de tecnología inalámbrica siguiendo algún otro tipo de premisas o, incluso, la realización de una aplicación móvil con el fin de estar constantemente informado del estado de la finca o poder controlar los procesos de riego de la finca de manera remota gracias a la implantación de un chip GSM en la red de sensores.

#### **6.4.1.2. Extrapolación**

A su vez, este proyecto se puede extrapolar a cualquier tipo de finca agrícola mediante un estudio previo de los componentes y de la tipología del terreno. Se puede llevar perfectamente a un estudio de una finca de árboles frutales

siguiendo los pasos realizados en este proyecto, ya que sin ser un producto que nueva tantas cantidades de dinero como el vino, es un producto de primera necesidad.

#### **6.4.2. Otros ámbitos**

Toda la información generada a raíz de este proyecto puede ser usada para muchos ámbitos, a fin de cuentas, una red de sensores inalámbrica puede ser utilizada en una gran variedad de situaciones.

Una salida clara sería la domótica. Es una tecnología en auge, la implantación de sensores en el hogar con el fin de lograr un ahorro energético o aumentar la calidad de vida.



---

## Bibliografía

[BURR04] J. Burrell, T. Brooke, R. Beckwith, “Vineyard computing: sensor networks in agricultural production”, IEEE Perv. Comp, Vol. 3, p. 38-45, Enero 2004

[BENCI09] L. Bencini, F. Chiti, G. Collodi, D. Di Palma, R. Fantacci, A. Manes, G. Manes, “Agricultural monitoring based on wireless sensor network technology: real long life deployments for physiology and pathogens control”, University of Florence, Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2009

[SUN11] X. Sun; B. Wu; H. Wu; H. Zhu; Y. Liu; “Design of Vineyard Production Monitoring System based on Wireless Sensor Networks”, 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), Harbin, China, Agosto 2011

[GALM06] S. Galmés, “Lifetime issues in wireless sensor networks for vineyard monitoring”, IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 9-12 October 2006, Vancouver, Canada, 2006

[TOGA11] T. Togami, K. Yamamoto, A. Hashimoto, N. Watanabe, K. Takata, H. Nagai, T. Kameoka, “A Wireless Sensor Network in A Vineyard for Smart Viticultural Management”, Proceedings of SICE Annual Conference (SICE), Tokio, Japón, Sept. 2011

---

[SAEZ00] Saez de Adana, F. and Blanco, G. and Diego, G. and Arriaga, P. and Cátedra, M.F., “Propagation Model Based on Ray Tracing for the Design of Personal Communication Systems in Indoor Environments” Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 49, n° 6, pp. 2105-2112, November 2000.

[ISKA02] M.F. Iskander, Z. Yun, “Propagation Predictions Models for Wireless Communications Systems” Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 50, n° 3, pp. 662-673, March, 2002.

[KOUY71] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, “A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface,” Proc. IEEE, vol. 62, no. 11, pp. 1448-1461, Nov. 1971

[DEV09] S. Dev, Y. Gariépy, G. Raghavan, “Measurement of Dielectric Properties and Finite Element Simulation of Microwave Pretreatment for Convective Drying of Grapes”, PIERS ONLINE, Vol. 5, No. 7, p. 690-695, 2009

[KAYE] Tables of physical and chemical constants  
[http://www.kayelab.npl.co.uk/general\\_physics/2\\_6/2\\_6\\_5.html](http://www.kayelab.npl.co.uk/general_physics/2_6/2_6_5.html)

[HERN08] J. M. Hernando Rábanos, “Transmisión por radio”, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, edición 6, Marzo 2008

[ESPA09] F. Esparza Alfaro, F. Falcone Lanas, “Algoritmo de trazado de rayos en tres dimensiones para la caracterización de interiores”, Universidad Pública de Navarra, Noviembre 2009

[PARS00] J.D. Parsons, “The mobile radio propagation channel” John Wiley & Sons Ltd, Second edition, 2000

[FARA08] S. Farahani, “ZigBee wireless networks and transceivers”, Elseiver – Newnes, 2008

[FITO] Revista de fitoterapia <http://www.fitoterapia.net>

[SEGU] Blog no oficial de bluetooth <http://www.seguridadmobile.com/>

[VIVE] Catálogo de Viveros Lapuente

[LIBE] Web oficial de Libellium <http://www.libellium.com>

[REDE] Revista española de electrónica <http://www.redeweb.com/>

[ZIGB] Web oficial de ZigBee <http://www.zigbee.org/>



## **Anexo A: Wasmote de Libellium**

Libellium es una empreña nacida en 2006 como spin-off de la Universidad de Zaragoza. Se dedica a diseñar y fabricar tecnología de hardware para la implementación de redes sensoriales inalámbricas de forma que integradores de sistemas, ingenierías y consultorías puedan llevar a cabo soluciones fiables para Ciudades Inteligentes a usuarios finales, en el mínimo tiempo de salida al mercado.

Sus productos son modulares, horizontales y de rápido aprendizaje e incluyen una extensa documentación y soporte a través de una Comunidad de desarrolladores.

Sus principales líneas de investigación y desarrollo son:

- Wasmote: dispositivo sensorial de bajo consumo para la creación de redes sensoriales inalámbricas que integra más de 50 sensores diferentes.
- Meshlium: único router multitecnología que integra en una máquina las tecnologías WiFi mesh (2.4GHz - 5GHz), ZigBee, GPRS, GPS y Bluetooth.

Wasmote es el dispositivo utilizado en este proyecto para las medidas analíticas.



Figura A.1: Wasmote de Libellium

Wasmote es un dispositivo sensorial orientado especialmente a desarrolladores. Funciona con diferentes protocolos (ZigBee, Bluetooth y GPRS) y frecuencias (2.4GHz, 868MHz, 900MHz) alcanzando distancias de hasta 12Km. Gracias a su modo de funcionamiento hibernate de bajo consumo (0.7uA) puede ahorrar el máximo de batería cuando no está transmitiendo y estar funcionando incluso durante años. Es compatible con más de 50 sensores y su entorno de programación open source hace realmente fácil comenzar a trabajar con él.

<b>Microcontrolador</b>	ATmega1281	<b>Alimentación</b>	3.3V - 4.2V
<b>Frecuencia</b>	8MHz	<b>Entradas / Salidas</b>	7 x analógicas 8 x digitales (I/O) 1 x PWM 2 x UART 1 x I2C 1 x USB
<b>SRAM</b>	8KB		
<b>FLASH</b>	128KB		
<b>EEPROM</b>	4KB	<b>Consumo</b>	Hibernate → 0.7uA Sleep → 62uA Deep Sleep → 62uA ON → 9mA
<b>Tarjeta SD</b>	2GB		
<b>Sensores embebidos en Waspote</b>	Temperatura [-40°C, 85°C] Acelerómetro ± 2g (1024LSb/g) / ± 6g (340LSb/g)	<b>Rango de temperatura</b>	-20°C, +65°C
<b>Peso</b>	20g	<b>Dimensiones</b>	73.5 x 51 x 13mm

Figura A.2: Características del waspmote

El Waspote tiene 4 modos de funcionamiento.

- **ON:** modo normal de funcionamiento. El consumo en este estado es de 9mA.
- **Sleep:** El programa principal se detiene, el microcontrolador pasa a un estado de latencia, del que puede ser despertado por todas las interrupciones asíncronas y por la interrupción síncrona generada por el Watchdog. El intervalo de duración de este estado va de 32ms a 8s. El consumo en este estado es de 62μA.
- **Deep Sleep:** El programa principal se detiene, el microcontrolador pasa a un estado de latencia del que puede ser despertado por todas las interrupciones asíncronas y por la interrupción síncrona lanzada por el RTC. El intervalo de este ciclo puede ir de 8 segundos a minutos, horas, días. El consumo en este estado es de 62μA.

- **Hibernate:** El programa principal se detiene, el microcontrolador y todos los módulos de Wasp mote quedan completamente desconectados. La única forma de volver a activar el dispositivo es a través de la alarma previamente programada en el RTC (interrupción síncrona). El intervalo de este ciclo puede ir de 8 segundos a minutos, horas, días. Al quedar el dispositivo totalmente desconectado de la batería principal el RTC es alimentado a través de una batería auxiliar de la que consume  $0,7\mu\text{A}$ .

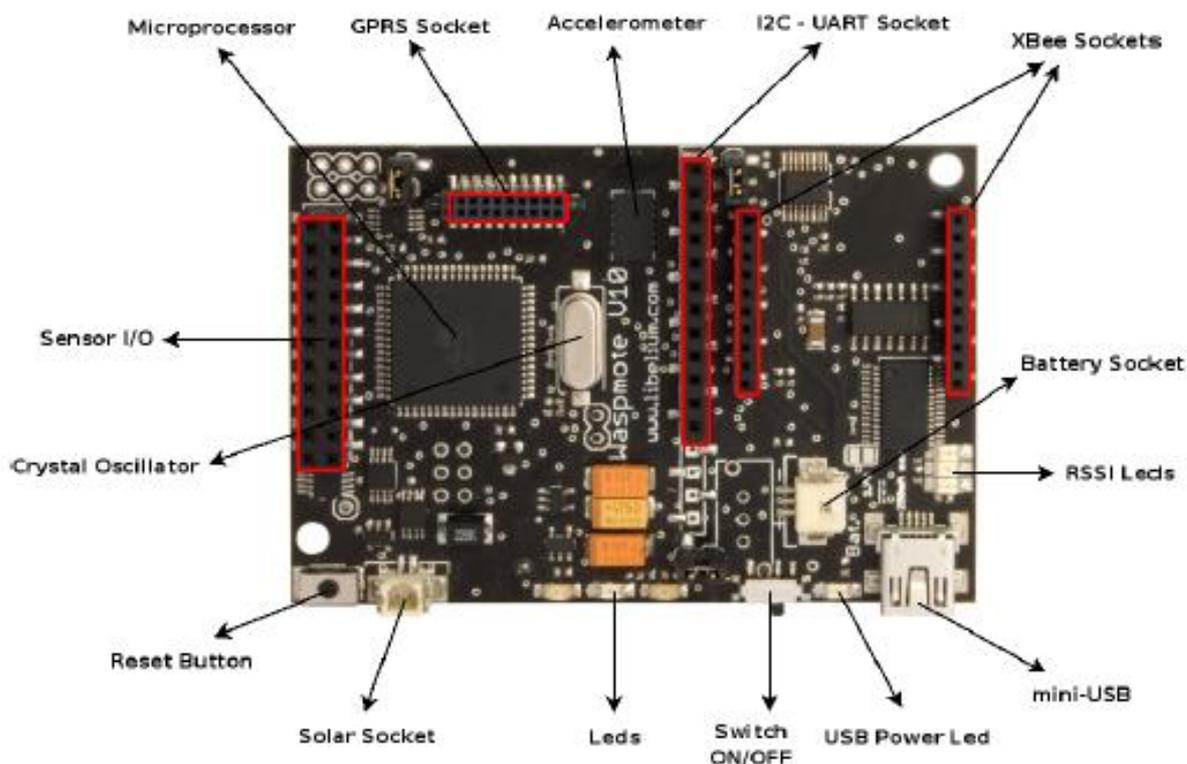


Figura A.3: Plano superior del Wasp mote

En la Figura A.3 podemos comprobar las conexiones que tiene, entre ellas destacar la conexión para alimentación solar externa. Gracias a esa conexión se puede hacer que la

batería de los sensores dure mucho más de 10 años. Se admiten placas solares de hasta 12V. La corriente máxima de carga a través de placa solar es de 240mA.

Vemos también los puntos de conexión del módulo XBee y los de los sensores. Esto tiene la utilidad de que se tiene la placa del waspmote y le puedes colocar tanto la tecnología inalámbrica que quieras (WiFi, Bluetooth, ZigBee, etc.) o los sensores, ya que funcionan independientemente del Waspote.

A través del mini-USB podemos establecer los parámetros configurables del waspmote, como, por ejemplo, la potencia de emisión o se puede cargar la batería. Las tres fuentes de alimentación del Waspote desde el USB son:

- Conexión USB a PC
- Conexión USB a 220V
- Conexión USB a Conector de Vehículo

La tensión de carga a través del USB ha de ser 5V. La corriente máxima de carga a través de USB es de 100mA. El conector mini USB ha de ser estándar mini USB modelo B.



Figura A.4: Sensores para la agricultura

Para la realización de las medidas de este proyecto se utilizarían unos sensores propios de agricultura y pueden tener hasta 14 sensores de manera simultánea. Estos miden: humedad y temperatura, tanto de suelo como de ambiente, diámetro de tronco, tallo y fruto, radiación solar - PAR, radiación ultravioleta - UV, humectación de hoja, velocidad y dirección de viento, precipitaciones y presión atmosférica. A su vez, el propio conector de la placa trae alimentación propia para los sensores, de esta manera no necesitan alimentación externa.

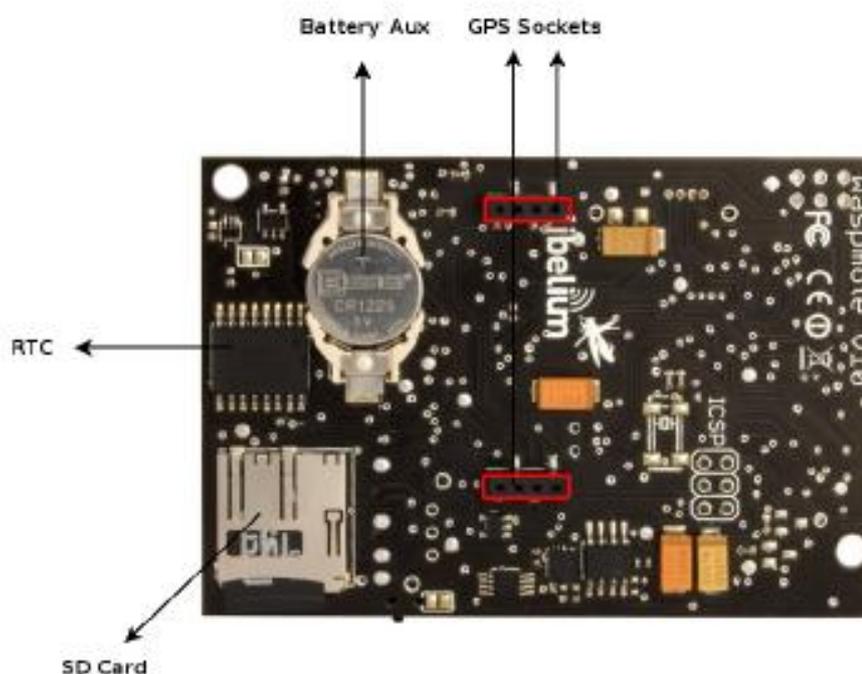


Figura A.5: Plano inferior del Waspmote

La batería incluida con Waspmote es una batería de Ion de Litio (Li-Ion) de tensión nominal 3.7V. En lo referente a la capacidad de la batería existen varias posibilidades: 1150mA, 2300mA y 6600mA Li-Ion recargables y 13000mAH no recargable. En la otra cara del Waspmote nos encontramos la batería auxiliar que entraría en funcionamiento cuando la batería principal se agotara.

Waspote dispone de un circuito de control y protección que se encarga de que la corriente de carga de batería sea la adecuada en todo momento.



Figura A.6: Módulo XBee 802.15.4

Se le pueden conectar diversos módulos de comunicación inalámbrica, sin embargo, para la realización del proyecto se ha optado por el XBee 802.15.4. Ofrecen varias gamas de antenas, pero para estas medidas se ha seleccionado una antena con una ganancia de 5dBi y omnidireccional.

Módulo	Frecuencia	Potencia TX	Sensibilidad	Canales	Distancia
Normal	2,40 – 2,48GHz	1mW	-92dBm	16	500m

Tabla A.1: Características del módulo XBee 802.15.4

---

<b>ON</b>	<b>Sleep</b>	<b>Off</b>	<b>Enviando</b>	<b>Recibiendo</b>
50,36mA	0,1mA	0 $\mu$ A	49,56mA	50,26mA

Tabla A.2: Consumo energético del módulo XBee 802.15.4

## **Anexo B: ANALIZADOR RF FIELD FOX N9912A**

With the proliferation of wireless communications, operating frequencies have soared from sub-GHz levels up to 5.8 GHz.

The Agilent FieldFox RF Analyzer is the tool to tackle today's increasingly complex networks in less time.

Key measurements:

- Cable and antenna test (distance to fault, return loss, etc.)
- Cable loss measurement
- Insertion loss and transmission measurement
- Spectrum analyzer
- Power meter with USB power sensor
- Vector network analysis with Smith chart display



Figura B.1: Vista frontal del analizador RF field fox N9912A



Figura B.2: Vista superior e inferior del analizador RF field fox 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  $\pm$ 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**

Frequency		
Frequency range	2 MHz to 4 GHz	
	2 MHz to 6 GHz	
Frequency reference	Accuracy $\pm 2$ ppm	
	Aging rate $\pm 1$ ppm/yr	
	Temperature stability $\pm 1$ ppm over -10 to 55 °C	
Frequency resolution	2 MHz to 1.6 GHz 2.5 kHz	
	> 1.6 GHz to 3.2 GHz 5 kHz	
	> 3.2 GHz to 6 GHz 10 kHz	
Measurement speed	Return loss	1.5 ms/point (nominal) 1.75 GHz to 3.85 GHz, 1001 points, Cal ON
	Distance to fault	2.4 ms/point (nominal) 0 to 500 ft, 601 points, Cal ON
Data points	101, 201, 401, 601, 801, 1001	
Directivity	Corrected	> 42 dB
	QuickCal	> 42 dB (typical)
Source match	Corrected	> 36 dB
	QuickCal	$\geq 35$ dB (typical)
Reflection tracking	Corrected $\pm$	0.06 dB
	QuickCal $\pm$	0.15 dB (typical)

Dynamic range		
Reflection (RF Out port)	2 MHz to 4 GHz	60 dB (typical)
	> 4 GHz to 6 GHz	55 dB (typical)
Transmission measurement	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)
Output power range	<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, -25 dBm (nominal)
Maximum input level (RF Out port)	+23 dBm	
Maximum input DC voltage (RF Out port)	±50 VDC	

Cable and antenna measurements			
Return loss	Display range	0 to 100 dB	
	Resolution	0.01 dB	
VSWR	Display range	0 to 100	
	Resolution	0.01	
Distance to fault (DTF)	• Range	$= (\text{number of points} - 1) / (\text{span}^2) \times V_f$ (velocity factor in cable) $\times c$ (light speed)	
	• Resolution	$= \text{range} / (\text{number of points} - 1)$	
	• Number of points	101, 201, 401, 601, 801, 1001, reflection coefficient	
	• Distance to fault display	Return loss, VSWR	
Transmission measurement	Frequency range	2 MHz to 4 GHz (Option 104)	
		2 MHz to 6 GHz (Option 106)	
	Dynamic range	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

Network análisis	
S11	Vector measurement, S11 magnitude and S11 phase. Specification is listed under Cable and antenna analyzer section (S11/Return loss).
S21	Scalar measurement, S21 magnitude. Specification is listed under transmission measurement. S21 requires Option 110 transmission measurement.
A	Reflected power
R	Source power
Display	Log, linear, phase, VSWR, Smith chart, polar, group delay
Calibration types	Mechanical cal, QuickCal, Normalization, Automatic cal update with frequency change or number of points change
IF bandwidth selections	300 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz and 30 kHz

## Spectrum analyzer

Frequency			
Frequency range	Option 104	100 kHz to 4 GHz, usable to 5 kHz	
	Option 106	100 kHz to 6 GHz, usable to 5 kHz, tunable to 6.1 GHz	
Frequency reference	Accuracy	$\pm 2$ ppm	
	Frequency aging	$\pm 1$ ppm/yr	
	Frequency reference Temperature stability	$\pm 1$ ppm over -10 to 55 °C	
Frequency readout accuracy	$\pm$ (readout frequency x frequency reference accuracy + RBW centering + 0.5 x horizontal resolution)		
Frequency span	Range	0 Hz (zero span), 10 Hz to maximum frequency	
	Span accuracy	$\pm(2 \times \text{RBW centering} + \text{horizontal resolution})$	
	Span resolution	1 Hz	
Resolution bandwidth (RBW)	Range (-3 dB bandwidth)	Zero span	300 Hz to 1 MHz in 1-3-10 sequence; 2 MHz
		Non-zero span	10 Hz to 300 kHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence; 1 MHz, 2 MHz
	Accuracy	1 kHz to 1 MHz: $\pm 5\%$ (nominal)	
		10 Hz to 100 KHz non-zero span: $\pm 1\%$ (nominal)	
		2 MHz: $\pm 10\%$ (nominal)	
		300 Hz zero span: $\pm 10\%$ (nominal)	
Selectivity (-60 dB/ -3 dB)	4:1 (nominal)		

<b>Video bandwidth (VBW)</b>	<b>Range</b>	<b>1 Hz to 2 MHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence</b>
<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</b>	1
	<b>Readout</b>	Measured value representing time required to tune receiver, acquire data, and process trace
<b>Trace updates</b>	Span = 20 MHz, RBW = 3 kHz	1.5 updates/second
	Span = 100 MHz, RBW auto coupled	7 updates/second
	Span = 6 GHz, RBW auto coupled	1 update/second
<b>Trace points</b>	101, 201, 401, 601, 801, 1001 points, default is 401	

Amplitude				
Measurement range	Displayed average noise level (DANL) to +20 dBm			
Input attenuator range	0 to 31 dB, 1 dB stops			
Maximum DC voltage at RF In port	±50 VDC			
Maximum input power at RF In port	+27 dBm (0.5 W)			
Displayed average noise level (DANL)	Preamplifier OFF	20 to 30 °C	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)
	Preamplifier ON	20 to 30 °C	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)
		-10 to 55 °C	10 MHz to 2.4 GHz	< -141 dBm
			> 2.4 GHz to 5 GHz	< -138 dBm
> 5 GHz to 6 GHz	< -130 dBm			
Total absolute amplitude accuracy	20 to 30 °C	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)	
Second harmonic distortion (SHI)	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)	
Residual responses	20 MHz to 3 GHz		-90 dBm (nominal)	
	> 3 GHz to 6 GHz		-85 dBm (nominal)	
Spurious responses	Input mixer level -30 dBm	RFsig = RFtune + 417 MHz -70 dBc (nominal)		
		RFsig = RFtune + 1.716 GHz -80 dBc (nominal)		
	Input mixer level -10 dBm, first IF image response	RFsig = RFtune - 2 x 0.8346 GHz, for RFtune 5.7 to 6.0 GHz		-50 dBc (nominal)
	Sidebands	-80 dBc (nominal)		
-60 dBc (nominal) when battery charging, 260 kHz Offset				
Reference level	Range	-170 dBm to +30 dBm		
	Resolution	0.1 dB		
	Accuracy	0 dB (no error)		
Traces	4 traces, data/max/average/min			
Trigger	External, video trigger, FFT gating with video (IF envelope) trigger			

Independent signal source						
Frequency range	2 MHz to 4 GHz (Option 230) or 2 MHz to 6 GHz (Option 231)					
Amplitude	High power	2 MHz to 4 GHz	< +8 dBm, +6 dBm (nominal) dBm (nominal)	Low power	2 MHz to 4 GHz	<-23 dBm, -25 dBm (nominal)
		>4 GHz to 6 GHz	<+7 dBm, +2 dBm (nominal)		>4 GHz to 6 GHz	< -24 dBm, -29 dBm (nominal)
	Attenuation		0 to 31 dB			
	Functions		Continuous wave, stimulus / response			

Power meter measurement	
Frequency range	9 kHz to 24 GHz (sensor dependent)
USB power sensor	9 kHz to 24 GHz

General specifications			
Connector type	Type-N (female)		
Input impedance	50 ohm		
External reference	Input type	BNC female	
	Reference frequency	10 MHz	
	Required level	-5 dBm to 10 dBm	
Display	6.5" transfl ictive, color VGA LED backlit 640 x 480 with anti-glare coating		
Speaker	Built-in speaker		
Headphone jack	Built-in headphone jack		
Connectivity	2 x USB 2.0; 1 x mini USB; 1 x LAN		
Internal storage	Minimum 16 MB, up to 1000 traces		
External storage	1 x mini SD slot and 2 x USB 2.0		
EMC	Complies with European EMC Directive 2004/108/EC IEC/EN 61326-2-1), CISPR Pub 11 Group 1, Class A , AS/NZS CISPR 11, ICES/NMB-001		
ESD	IEC/EN 61000-4-2, functional up to 20 kV test		
Safety	Complies with European Low Voltage Directive 2006/95/EC: IEC/EN 61010-1 2nd Edition, Canada: CSA C22.2 No. 61010-1-04, USA: UL 61010-1 2nd Edition		
Environmental	Humidity	95% at 40 °C	
	Temperature	Operating	-10 °C to +55 °C
Non-operating		-51 °C to 71 °C	
Weight	6.2 lbs / 2.8 kg including battery		
Dimensions(H x W x D)	11.5" x 7.4" x 2.8" (292 x 188 x 72 mm)		
Power	Power supply	External DC input	15 to 19 VDC

		External AC power adapter	Input	100 to 250 VAC, 50 to 60 Hz; 1.25 to 0.56 A
			Output	15 VDC, 4 A
	Power consumption	12 W		
	Battery	6 cell Lithium Ion, 10.8 V, 4.6 A-h		
Battery operating time	4 hours			



## Anexo C: Publicación en URSI

# Análisis de la Influencia Topológica en la Implantación de Redes de Sensores Vitivinícolas

Guillermo Gil<sup>1</sup>, José Javier Rodríguez<sup>1</sup>, Leire Azpilicueta<sup>1</sup>, José Javier Astrain<sup>2</sup>, Jesús Villadangos<sup>2</sup>,  
Francisco Falcone<sup>1</sup>

guillermo.gil.lapuente@gmail.com, josejavier.rodriiguez@unavarra.es, leyre.azpilicueta@unavarra.es,  
josej.astrain@unavarra.es, jesusv@unavarra.es, francisco.falcone@unavarra.es

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

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

**Abstract.** In this work, the influence of topology as well as morphology in the deployment of wireless sensor networks in vineyards is analyzed. Simulation results obtained by in-house 3D ray launching code as well as measurement results from deployed ZigBee sensors are presented. The knowledge of the topological influence can aid in the deployment of the optimal wireless sensor network in terms of capacity as well as energy consumption.

#### INTRODUCCIÓN

El mundo de la agricultura se ha caracterizado por su labor artesanal hasta el punto de que el uso de máquinas en el mismo fue muy tardío, siendo una mejora necesaria para abaratar los costes de un producto básico. El trabajador tiene que decidir si se riega, si se poda, si se recoge..., además, siempre está presente el error humano o, incluso, puede darse el caso de que un dispositivo ponga en marcha el riego aunque esté lloviendo; todo esto repercute directamente en la calidad del producto. De aquí la idea de implantar una red de sensores inalámbricos, de intentar automatizar un proceso simple pero lento y, desde luego, costoso. En este sentido se han definido una serie de soluciones basadas en diversas tecnologías inalámbricas, tanto de redes móviles como de redes WLAN/WPAN, con el fin de minimizar el error humano y aumentar la eficiencia tanto en la recogida de datos por telemetría, como por la posibilidad de telecontrol sobre los diversos elementos presentes en las huertas, así como con el fin de analizar la duración de los elementos constitutivos de las redes inalámbricas bajo análisis [1-3]. Dentro del abanico de tecnologías inalámbricas disponibles, el empleo de redes WPAN basadas en ZigBee es una alternativa atractiva, por el reducido coste por mota, la disponibilidad de sensores integrables en la placa de desarrollo de aplicabilidad en el entorno agrícola y la elevada duración de batería que se puede lograr. La idoneidad de este tipo de solución viene complementada por el hecho de que, para aplicaciones de telemetría y telecontrol, el ancho de banda necesario es moderado.

En este trabajo, se analizará el canal radioeléctrico con el fin de implementar una red de telemetría y potencial telecontrol en un viñedo. Dicho análisis se realizará mediante la simulación del escenario aplicando técnicas deterministas de lanzamiento de rayos 3D, lo que permite obtener información tanto de potencia recibida como de las características en dominio temporal del canal. Se realizarán pruebas de

medida empleando sensores ZigBee, con el de mostrar la viabilidad práctica de esta solución.

#### DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN

El escenario de simulación es una finca vinícola con una superficie de 100m x 30m. A su vez, por rigor de los datos, se ha considerado 2,5m de suelo húmedo y 7,5m de aire, quedando un ortoedro de 100m x 30m x 10m. En la finca se han colocado los soportes metálicos sobre los que crecerán las vides: son una serie de picas de metal (Figura 1) de 1,88m de altura con tres hilos metálicos que unen cada fila, situados a 0,7m, 1,115m y 1,88m de altura sobre el nivel del suelo. Se trata de una viña emparrada de aproximadamente un año de vida, por lo que todavía no alcanza una altura ni una frondosidad relevante.

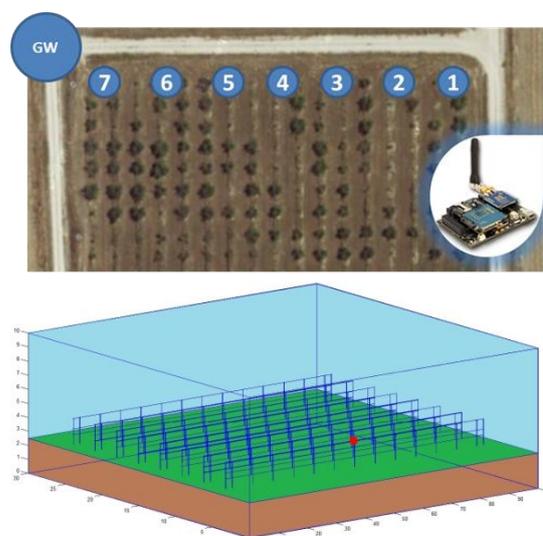


Figura 1. Vista aérea de la viña y representación esquemática del escenario de simulación de los viñedos

También se ha realizado otro escenario con un diseño simplificado, de un terreno sembrado con vides (Figura 2); gracias a este segundo diseño se pueden apreciar las diversas condiciones de la finca, así como las diferencias de propagación en cada caso. Dicho diseño se basa en la consideración de un volumen unitario en el cual se ha promediado el valor de la constante dieléctrica y de la tangente de pérdidas de las uvas con el volumen de aire. A dicho elemento se le añade el efecto de la madera, emulando las ramas de las vides [4].

Con el fin de poder modelar el comportamiento del canal radioeléctrico, se ha empleado un simulador implementado ad-hoc basado en lanzamiento de rayos 3D. Dicho simulador mapea el escenario de simulación en cuboides en

los cuales se analizan los procesos de reflexión, refracción y difracción, considerando la interacción con los diversos elementos incluidos en dicho escenario. La resolución así como el tiempo de cálculo vienen fijados por el número de reflexiones hasta extinción, resolución angular del lanzamiento de rayos en el espacio y el tamaño de los cuboides resultantes.

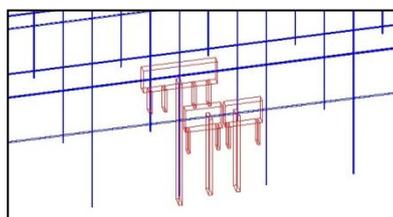


Figura 2. Detalle de las vides

Se ha colocado un transmisor con un esquema de radiación esférico en el punto [49.88m, 5.26m, 1.88m (sobre el nivel del suelo)], justo encima de la pica de metal; en la Fig. 1 se aprecia con un círculo rojo la localización del emisor. Se ha elegido este punto para que tenga línea de visión con todo el escenario; mas adelante entraremos en detalle. El transmisor irradia a una potencia de -15dBm, y la antena omnidireccional tiene una ganancia de 5dBi. Dicha fuente emite un rayo por cada grado y desaparece una vez haya realizado 7 rebotes, se absorbe por algún objeto o se pierde fuera del entorno del escenario, ya que al ser un espacio al aire libre no tenemos rebotes con las paredes. Para obtener los resultados se ha dividido el escenario en cubos de 0,2m creando un total de 3,75 millones de cubos. Se trata de una resolución lo suficientemente grande como para simular el código a una velocidad aceptable y que genere unos correctos resultados. Se ha tenido en cuenta la constante dieléctrica y de conductividad de cada elemento del escenario; dependen del material del que está fabricado y que producen alteraciones diferentes en el trazado de rayos.

## RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN LA VIÑA

Una vez definido el escenario de simulación, se han obtenido resultados para el modelado del canal radioeléctrico mediante el empleo de código de simulación basado en lanzamiento de rayos tridimensional. En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos para la estimación de niveles de recepción de señal en un plano de corte bidimensional a la altura efectiva de 1,88

metros sobre el nivel del suelo. Las diferencias en la distribución de potencia que se observa en ambas imágenes vienen dadas por el hecho de considerar el modelo de vid en la simulación.

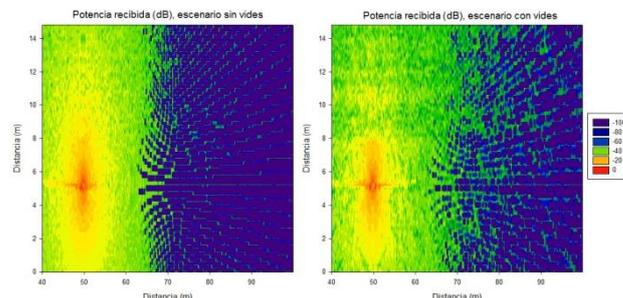


Figura 3. Representación de potencia recibida en un plano de corte bidimensional de altura 1.88m. Se muestra el caso sin vides (izquierda) y con el modelo simplificado de vid (derecha)

La comparativa en los niveles de potencia recibida en función de la distancia, para el caso con y sin vides se puede observar de manera cuantitativa en la Figura 4. La inclusión de las vides tiene como efecto un aumento en las pérdidas de propagación.

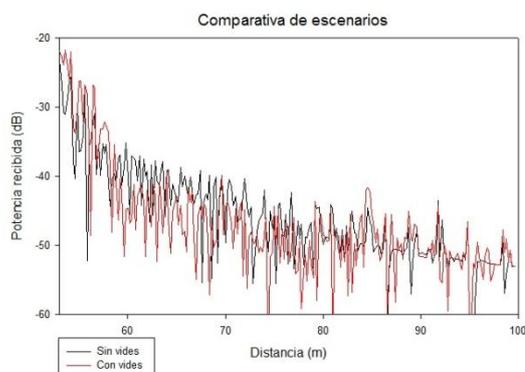


Figura 4. Estimación de niveles de potencia recibidos considerando operativo el transceptor número 1. Se muestra el caso con vides y sin vides.

Con el fin de poder planificar de manera óptima la ubicación de los sensores, se han obtenido resultados de simulación considerando diferentes alturas, siempre en las posiciones en las cuales existen barras para poder colocar los potenciales transceptores. Dicha comparativa se muestra en la Figura 5, en la cual se observa que la elección de la altura juega un papel relevante en el valor final de pérdidas de radiopropagación.

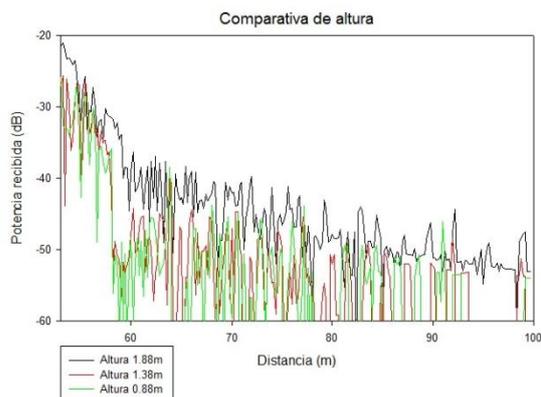


Figura 5. Estimación de niveles de potencia recibidos considerando diferentes alturas sobre el nivel del suelo, para el caso sin vides.

El escenario de simulación presenta una dependencia relevante con la topología del mismo, fundamentalmente debido a la estructura metálica de los soportes. Este hecho se puede observar de manera clara al obtener los valores de los perfiles de retardo potencia para un punto concreto del escenario, tal y como se muestra en la Figura 6. En dicha figura se muestran los resultados obtenidos tanto con el modelo de vides como en ausencia de las mismas, mostrando nuevamente el impacto al considerar el efecto realista del material en el modelado del canal radioeléctrico.

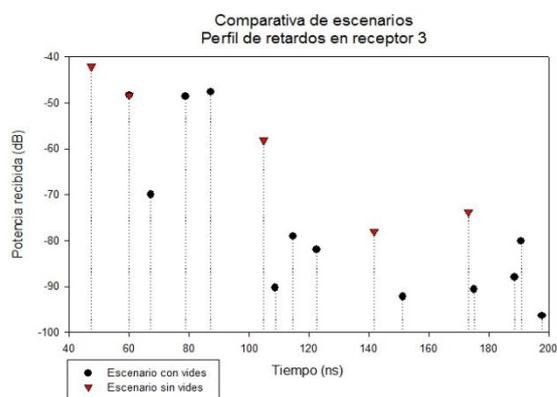


Figura 6. Estimación del Perfil de Retardo Potencia obtenido en el punto (71.06m, 5.26m, 4.38m (a una altura efectiva del sensor de 1.88m del nivel del suelo)).

### RESULTADOS DE MEDIDA

El análisis experimental se ha completado con la ayuda de ocho sensores Waspote 802.15.4 [5] que se han emplazado linealmente, a razón de un nodo cada poste, a una altura de 1,88 m. El extremo más alejado de la primera hilera de postes alberga el sensor número 1 (#1)

y el más cercano al camino de acceso hace lo propio con el nodo Gateway (GW). El resto de sensores (#2 a #7) se distribuyen uniformemente desde el nodo #1 hasta el nodo GW (ver Figura 1 superior). El nodo GW está conectado a un PC portátil que se encarga de almacenar las trazas de los mensajes para su posterior análisis. El nodo #1 es el encargado de iniciar el envío de los mensajes, que se van propagando de un nodo a su sucesor (en orden creciente) hasta llegar al GW. Se trata de una comunicación secuencial entre nodos con identificadores consecutivos cuyo objetivo es minimizar el número de posibles colisiones. El periodo de envío de mensajes está prefijado para cada tanda de experimentación, que consta de 10.000 envíos consecutivos, y se analizan distintos periodos desde 65 ms a 10.000 ms. Se han realizado 25 tandas de experimentación para cada periodo, hasta totalizar 36 periodos distintos, lo que hace un total de 9 millones de mensajes enviados por el nodo #1. La Figura 7 ilustra (en escala logarítmica) las pérdidas de mensajes observadas para cada uno de los periodos estudiados y la figura 8 muestra la desviación en mensajes perdidos en función del periodo entre mensajes.

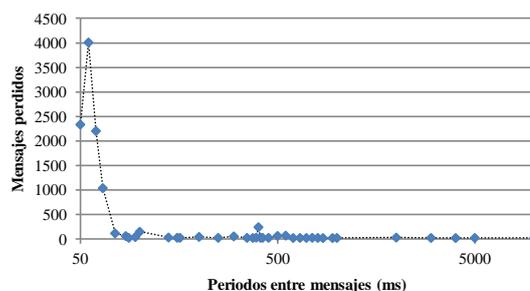


Figura 7. Mensajes perdidos para distintos periodos de transmisión.

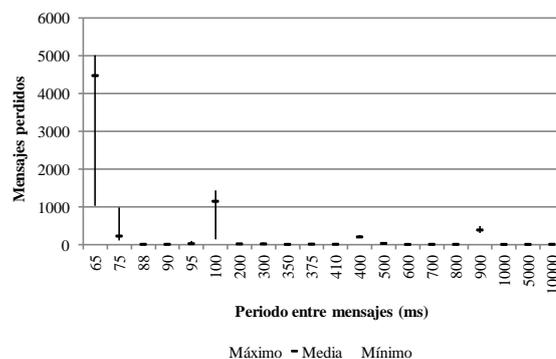


Figura 8. Desviación en el número de mensajes perdidos para distintos periodos entre mensajes.

Al analizar distintos periodos, se aprecia que a menor intervalo entre mensajes, mayor es la pérdida de mensajes. Esto se explica de modo muy sencillo por las limitaciones del buffer de recepción de los dispositivos que es incapaz de albergar todos los mensajes recibidos. Los dispositivos no son capaces de procesar todos los mensajes recibidos y se produce un considerable número de pérdidas. La Figura 9 muestra cómo para un periodo de 65 ms el primer nodo receptor (#2, ya que el #1 es el emisor iniciador) actúa como filtro y es él quien sufre la mayor parte de las pérdidas. El nodo #2 no es capaz de almacenar todos los mensajes enviados por el nodo #1, y por tanto, una buena parte de dichos mensajes no son procesados y reenviados al nodo #3. Los mensajes restantes son reenviados y el nodo #5 sufre una pequeña congestión. Se trata de una contención en el flujo de transmisión debida a la imposibilidad del nodo #2 para cursar el tráfico requerido. Para poder analizar este aspecto se han realizado 27 tandas de 10.000 envíos. Conforme va creciendo el intervalo de transmisión, la mayor pérdida de paquetes no se produce en el primer nodo retransmisor (#2) sino en la parte central de la cadena, tal y como se aprecia en la Figura 10. La Figura 11 muestra el contraste experimentado por el sistema cuando el periodo de transmisión es mucho mayor (500 ms). En este caso las pérdidas descienden drásticamente, observándose que ya no existe una relación de contención, puesto que todos los nodos presentan unas pérdidas similares y muy escasas.

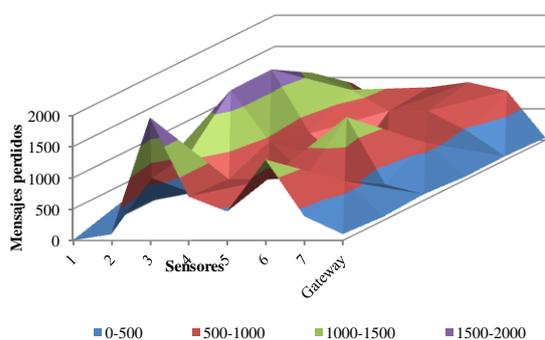


Figura 9. Pérdidas de mensajes por nodo para un periodo de 65 ms.

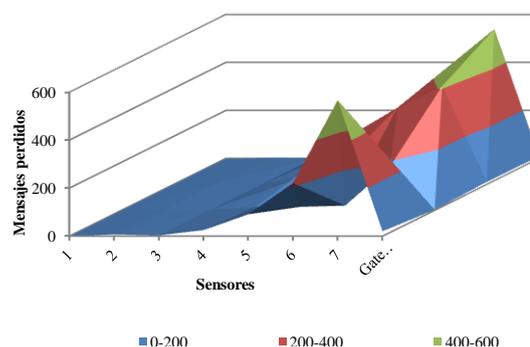


Figura 10. Pérdidas de mensajes por nodo para un periodo de 75 ms.

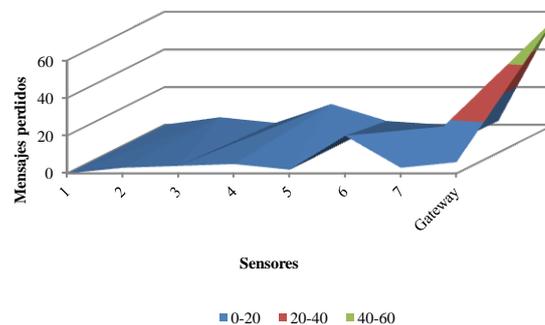


Figura 11. Pérdidas de mensajes por nodo para un periodo de 500 ms.

Con el fin de contrastar los datos de nivel de señal obtenidos con la simulación por trazado de rayos, se ha medido el nivel de RSSI obtenido por los nodos pudiéndose comprobar que, como era previsible, el nivel de RSSI no se ve afectado por el intervalo de transmisión, y que las pequeñas variaciones que se producen se encuentran dentro del margen de tolerancia del circuito de medida. La Tabla 1 muestra los valores obtenidos para los intervalos de 65 y 500 ms. Estos intervalos se corresponden con el extremo inicial (65 ms) de la curva de pérdida de mensajes de la Figura 7 y con una zona de la misma en la que el número de mensajes perdidos se ha estabilizado completamente (500 ms). Para el resto de intervalos se mantiene la misma tendencia.

		Nodo						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
RSSI (dBm)	Media	0,000	-45,785	-44,903	-50,348	-46,419	-48,011	-44,096
	Desviación	0,000	0,395	0,264	0,169	0,121	0,281	0,107
	Moda	0,000	-45,666	-44,833	-50,333	-46,500	-48,000	-44,166
65ms	Mediana	0,000	-45,666	-44,833	-50,333	-46,500	-48,000	-44,166
RSSI (dBm)	Media	0,000	-44,679	-43,645	-47,844	-45,999	-48,221	-44,012
	Desviación	0,000	0,433	0,319	0,430	0,023	0,310	0,082
	Moda	0,000	-44,500	-43,500	-47,500	-46,000	-48,000	-44,000
500ms	Mediana	0,000	-44,500	-43,500	-48,000	-46,000	-48,000	-44,000

Tabla 1. Niveles de RSSI obtenidos para dos intervalos de transmisión.

Los valores de RSSI obtenidos se corresponden con los obtenidos mediante simulación (ver Figuras 4 y 5) lo que permite validar la bondad de los resultados de simulación y permite minimizar el número de medidas físicas a realizar que, además de ser muy laboriosas, suponen un mayor coste temporal.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la influencia de la topología y de la morfología de un viñedo en las propiedades del canal radioeléctrico. Se ha estimado dicho efecto mediante el empleo de algoritmos de lanzamiento de rayos 3D, obteniendo la distribución de potencia, tanto en el caso de no tener viñas y considerando un modelo simplificado de las mismas, considerando los parámetros materiales tanto de las uvas como del contenido en madera de la parra. Se observa que cambios en la disposición de los elementos que conforman la red de sensores tienen un impacto notable en el comportamiento de los mismos, lo que sirve como base para la colocación de los mismos. Se han efectuado medidas empleando sensores ZigBee con el fin de validar los resultados de simulación, mostrando un buen acuerdo entre ambos. Estos resultados pueden servir para la correcta implantación de este tipo de redes de sensores, obteniendo la configuración de red óptima con el fin de garantizar la captura de datos y garantizar la calidad de servicio en la red de telemetría y telecontrol sobre la viña.

## REFERENCIAS

- [1] J. Burrell, T. Brooke, R. Beckwith, "Vineyard computing: sensor networks in agricultural production", IEEE Perv. Comp, Vol. 3, p. 38-45, Enero 2004
- [2] X. Sun; B. Wu; H. Wu; H. Zhu; Y. Liu; "Design of Vineyard Production Monitoring

System based on Wireless Sensor Networks", 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), Harbin, China, Agosto 2011

[3] T. Togami, K. Yamamoto, A. Hashimoto, N. Watanabe, K. Takata, H. Nagai, T. Kameoka, "A Wireless Sensor Network in A Vineyard for Smart Viticultural Management", Proceedings of SICE Annual Conference (SICE), Tokio, Japón, Sept. 2011

[4] S. Dev, Y. Gariépy, G. Raghavan, "Measurement of Dielectric Properties and Finite Element Simulation of Microwave Pretreatment for Convective Drying of Grapes", PIERS ONLINE, Vol. 5, No. 7, p. 690-695, 2009

[5]

<http://www.libelium.com/products/waspmote>.



# PROYECTO FIN DE CARRERA

## INFLUENCIA TOPOLÓGICA Y MORFOLÓGICA EN LA PLANIFICACIÓN RADIOELÉCTRICA DE REDES DE SENSORES EN ENTORNOS AGROPECUARIOS

Ingeniero Técnico de Telecomunicación  
Pamplona, Junio 2012



Guillermo Gil Lapuente  
Tutor: Francisco Javier Falcone Lanas



# CONTENIDOS

1

Objetivos

2

Antecedentes

3

Desarrollo

4

Conclusiones



# OBJETIVOS

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

# Justificación

# Objetivo del proyecto



# OBJETIVOS

## Objetivos

### Premisas

#### Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

#### Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

#### Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

## Premisas:

- Ahorro energético
- Muchos sensores a utilizar
- Abaratar costes



# ANTECEDENTES

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

# Antecedentes



# ANTECEDENTES

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

**Tecnologías inalámbricas**

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



**ZigBee®**  
Control your world

# ANTECEDENTES

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

	WiFi	Bluetooth	ZigBee
Banda de Frecuencias	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz 868/915MHz
Tamaño de Pila	≈1Mb	≈1Mb	≈20kb
Tasa de Transferencia	54Mbps	1Mbps	250kbps (2,4GHz) 40kbps (915MHz) 20kbps (868MHz)
Número de Canales	11 - - 14	79	16 (2,4GHz) 10 (915MHz) 1 (868MHz)
Tipos de Datos	Digital	Digital, Audio	Digital (texto)
Rango de Nodos Internos	100m	10m – 100m	10m – 100m
Números de Dispositivos	32	8	255/65535
Requisitos de Alimentación	Media – Horas de batería	Media – Días de batería	Muy baja – Años de batería
Introducción al Mercado	Alta	Media	Baja
Arquitecturas	Estrella	Estrella	Estrella, árbol, punto a punto y malla
Mejores Aplicaciones	Edificio con internet	Ordenadores y teléfonos	Control de bajo coste y monitoreo
Consumo de Potencia	400mA transmitiendo 20mA en reposo	40mA transmitiendo 0,2mA en reposo	30mA transmitiendo 3µA en reposo
Precio	Costoso	Accesible	Bajo
Complejidad	Complejo	Complejo	Simple

# ANTECEDENTES

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

	WiFi	Bluetooth	ZigBee
Banda de Frecuencias	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz 868/915MHz
Tamaño de Pila	≈1Mb	≈1Mb	≈20kb
Tasa de Transferencia	54Mbps	1Mbps	250kbps (2,4GHz) 40kbps (915MHz) 20kbps (868MHz)
Número de Canales	11 - - 14	79	16 (2,4GHz) 10 (915MHz) 1 (868MHz)
Tipos de Datos	Digital	Digital, Audio	Digital (texto)
Rango de Nodos Internos	100m	10m - 100m	10m - 100m
Números de Dispositivos	32	8	255/65535
Requisitos de Alimentación	Media - Horas de batería	Media - Días de batería	Muy baja - Años de batería
Introducción al Mercado	Alta	Media	Baja
Arquitecturas	Estrella	Estrella	Estrella, árbol, punto a punto y malla
Mejores Aplicaciones	Edificio con internet	Ordenadores y teléfonos	Control de bajo coste y monitoreo
Consumo de Potencia	400mA transmitiendo 20mA en reposo	40mA transmitiendo 0,2mA en reposo	30mA transmitiendo 3µA en reposo
Precio	Costoso	Accesible	Bajo
Complejidad	Complejo	Complejo	Simple

# ANTECEDENTES

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

	WiFi	Bluetooth	ZigBee
Banda de Frecuencias	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz 868/915MHz
Tamaño de Pila	≈1Mb	≈1Mb	≈20kb
Tasa de Transferencia	54Mbps	1Mbps	250kbps (2,4GHz) 40kbps (915MHz) 20kbps (868MHz)
Número de Canales	11 - - 14	79	16 (2,4GHz) 10 (915MHz) 1 (868MHz)
Tipos de Datos	Digital	Digital, Audio	Digital (texto)
Rango de Nodos Internos	100m	10m - 100m	10m - 100m
Números de Dispositivos	32	8	255/65535
Requisitos de Alimentación	Media - Horas de batería	Media - Días de batería	Muy baja - Años de batería
Introducción al Mercado	Alta	Media	Baja
Arquitecturas	Estrella	Estrella	Estrella, árbol, punto a punto y malla
Mejores Aplicaciones	Edificio con internet	Ordenadores y teléfonos	Control de bajo coste y monitoreo
Consumo de Potencia	400mA transmitiendo 20mA en reposo	40mA transmitiendo 0,2mA en reposo	30mA transmitiendo 3µA en reposo
Precio	Costoso	Accesible	Bajo
Complejidad	Complejo	Complejo	Simple

# ANTECEDENTES

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

	WiFi	Bluetooth	ZigBee
Banda de Frecuencias	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz 868/915MHz
Tamaño de Pila	≈1Mb	≈1Mb	≈20kb
Tasa de Transferencia	54Mbps	1Mbps	250kbps (2,4GHz) 40kbps (915MHz) 20kbps (868MHz)
Número de Canales	11 - - 14	79	16 (2,4GHz) 10 (915MHz) 1 (868MHz)
Tipos de Datos	Digital	Digital, Audio	Digital (texto)
Rango de Nodos Internos	100m	10m - 100m	10m - 100m
Números de Dispositivos	32	8	255/65535
Requisitos de Alimentación	Media - Horas de batería	Media - Días de batería	Muy baja - Años de batería
Introducción al Mercado	Alta	Media	Baja
Arquitecturas	Estrella	Estrella	Estrella, árbol, punto a punto y malla
Mejores Aplicaciones	Edificio con internet	Ordenadores y teléfonos	Control de bajo coste y monitoreo
Consumo de Potencia	400mA transmitiendo 20mA en reposo	40mA transmitiendo 0,2mA en reposo	30mA transmitiendo 3µA en reposo
Precio	Costoso	Accesible	Bajo
Complejidad	Complejo	Complejo	Simple

# ANTECEDENTES

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

	WiFi	Bluetooth	ZigBee
Banda de Frecuencias	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz 868/915MHz
Tamaño de Pila	≈1Mb	≈1Mb	≈20kb
Tasa de Transferencia	54Mbps	1Mbps	250kbps (2,4GHz) 40kbps (915MHz) 20kbps (868MHz)
Número de Canales	11 - - 14	79	16 (2,4GHz) 10 (915MHz) 1 (868MHz)
Tipos de Datos	Digital	Digital, Audio	Digital (texto)
Rango de Nodos Internos	100m	10m - 100m	10m - 100m
Números de Dispositivos	32	8	255/65535
Requisitos de Alimentación	Media - Horas de batería	Media - Días de batería	Muy baja - Años de batería
Introducción al Mercado	Alta	Media	Baja
Arquitecturas	Estrella	Estrella	Estrella, árbol, punto a punto y malla
Mejores Aplicaciones	Edificio con internet	Ordenadores y teléfonos	Control de bajo coste y monitoreo
Consumo de Potencia	400mA transmitiendo 20mA en reposo	40mA transmitiendo 0,2mA en reposo	30mA transmitiendo 3µA en reposo
Precio	Costoso	Accesible	Bajo
Complejidad	Complejo	Complejo	Simple

# ANTECEDENTES

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

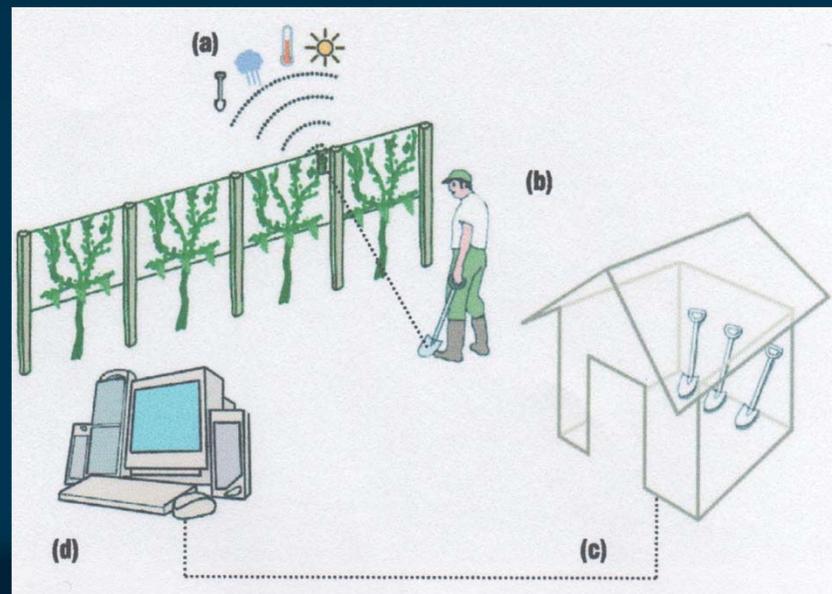
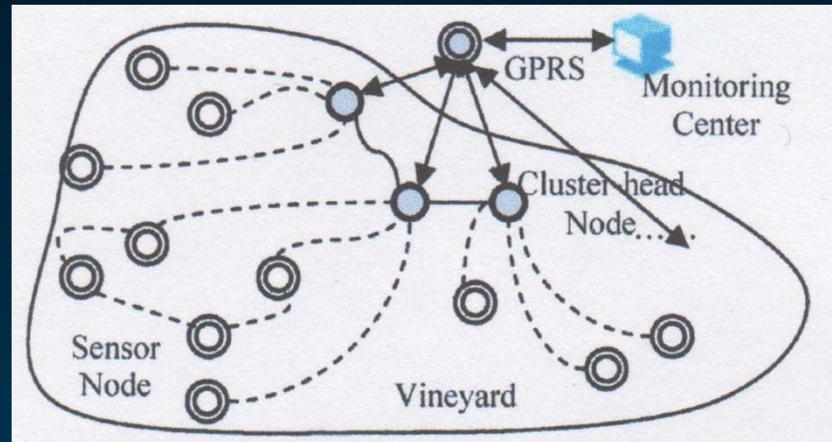
Modelo avanzado

Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



1. Los sensores de las viñas recogen los datos.
2. Las palas almacenan información.
3. Se envía la información a un centro de monitoreo.



# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

# Desarrollo



# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

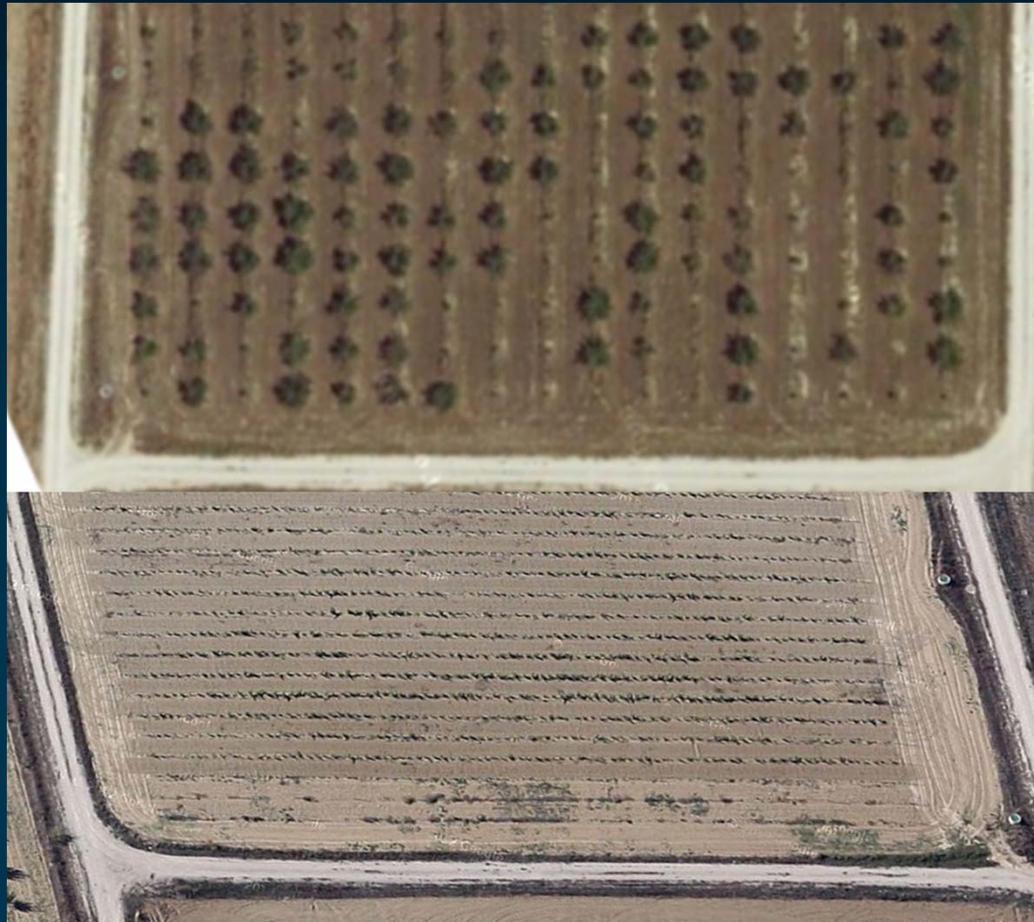
Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



## Vistas aéreas de la finca



# DESARROLLO

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

**Desarrollo**

Escenario

**Medidas analíticas**

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



**Motas de Libellium**



**Analizador de espectros**

Potencia TX	Sensibilidad	Canales	Distancia
1mW	-92dBm	16	500m



# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

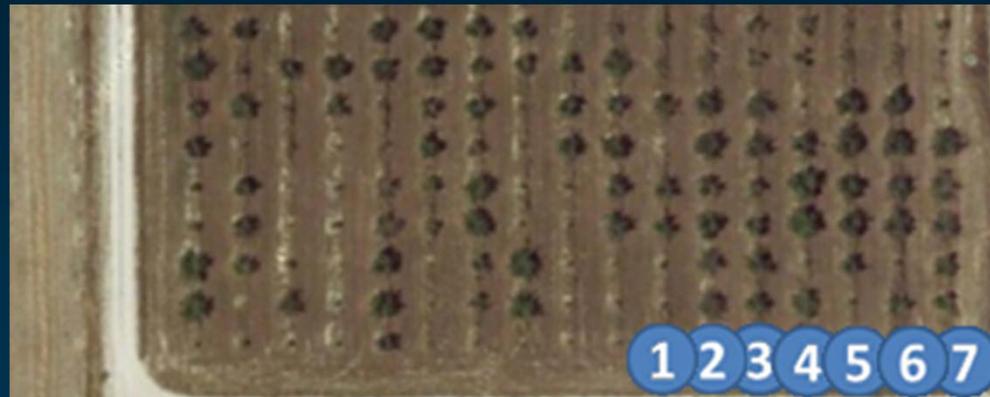
Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



## Potencia recibida (dBm)

RX2	RX3	RX4	RX5	RX6	RX7
-49,52	-46,73	-43,66	-45,17	-49,35	-47,02



# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

## Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

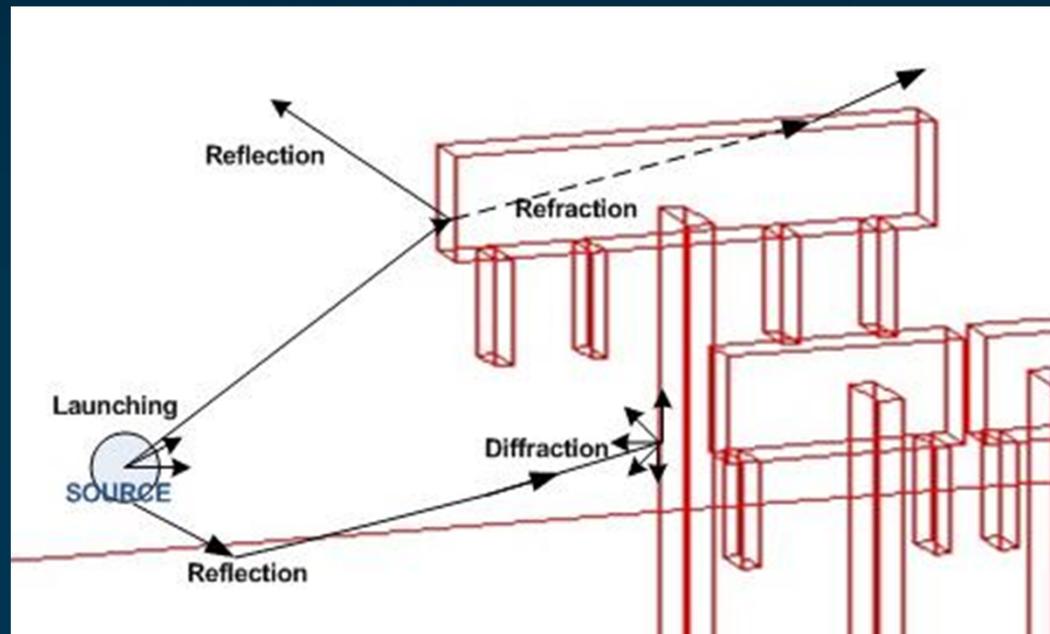
## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

# Método de radiopropagación: Trazado de rayos





# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

## Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

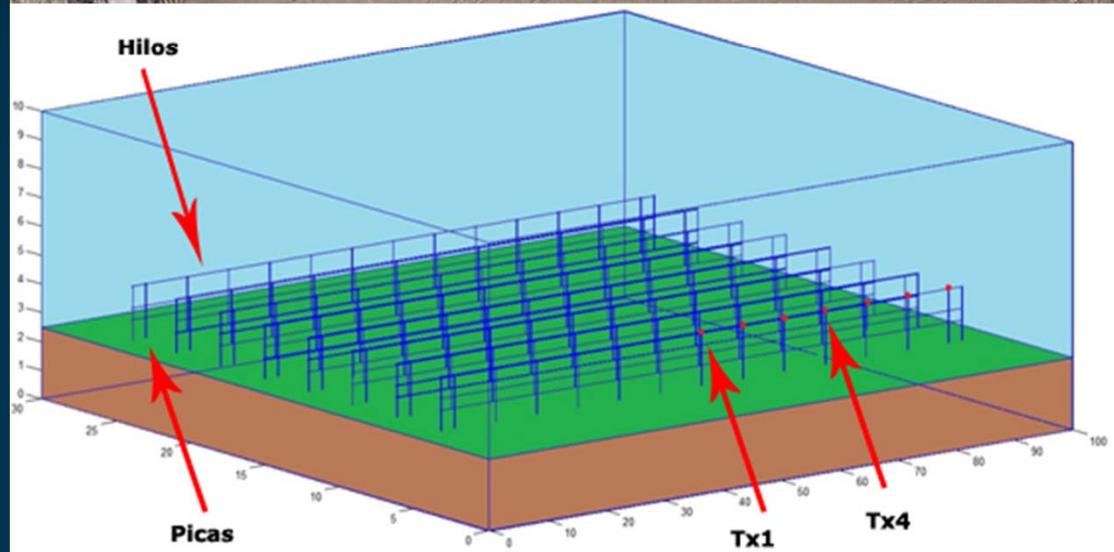
Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas





# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

## Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

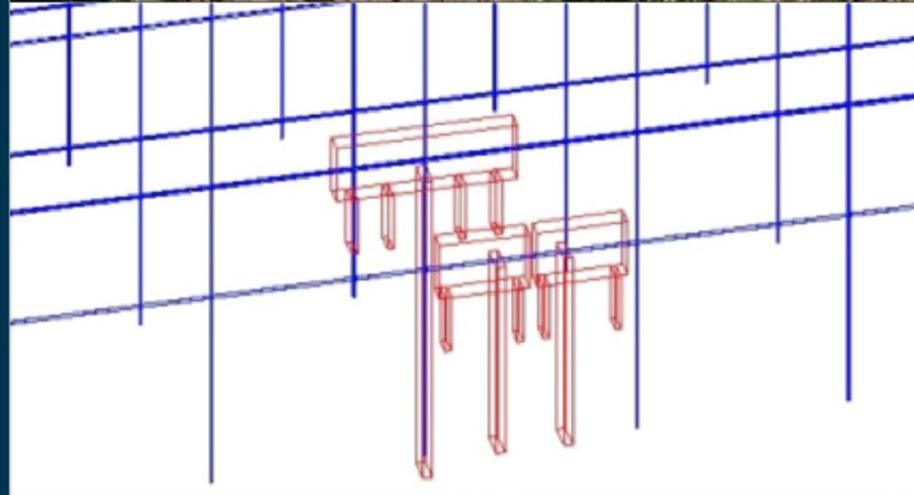
Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



## Modelo de vid



# DESARROLLO

## Objetivos

### Premisas

## Antecedentes

### Tecnologías inalámbricas

### Redes de sensores

## Desarrollo

### Escenario

### Medidas analíticas

## Simulación

### Analizador de protocolos

### Comparaciones

### Modelo avanzado

## Conclusiones

### Red completa

### Líneas de trabajo futuras

### Resumen de horas

Material	$\epsilon_r$	Conductividad
Suelo húmedo	30	0.01
Madera	3	0.20319
Uva	32	4.572
Picas e hilo	61546000	37800000
Aire	1	0



# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

## Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

<b>Frecuencias</b>	<b>868MHz</b> <b>2435MHz</b>
<b>Potencia de emisión</b>	<b>-19dBm</b>
<b>Ganancia antena</b>	<b>5dBi</b>
<b>Diagrama de emisión</b>	<b>Esférico</b>
<b>Resolución Angular (<math>\Delta\Phi</math>)</b>	<b>1°</b>
<b>Resolución Angular (<math>\Delta\theta</math>)</b>	<b>1°</b>
<b>Número máximo reflexiones</b>	<b>7</b>
<b>Dimensiones Cuboide</b>	<b>20cm*20cm*20cm</b>

# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

**Simulación**

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

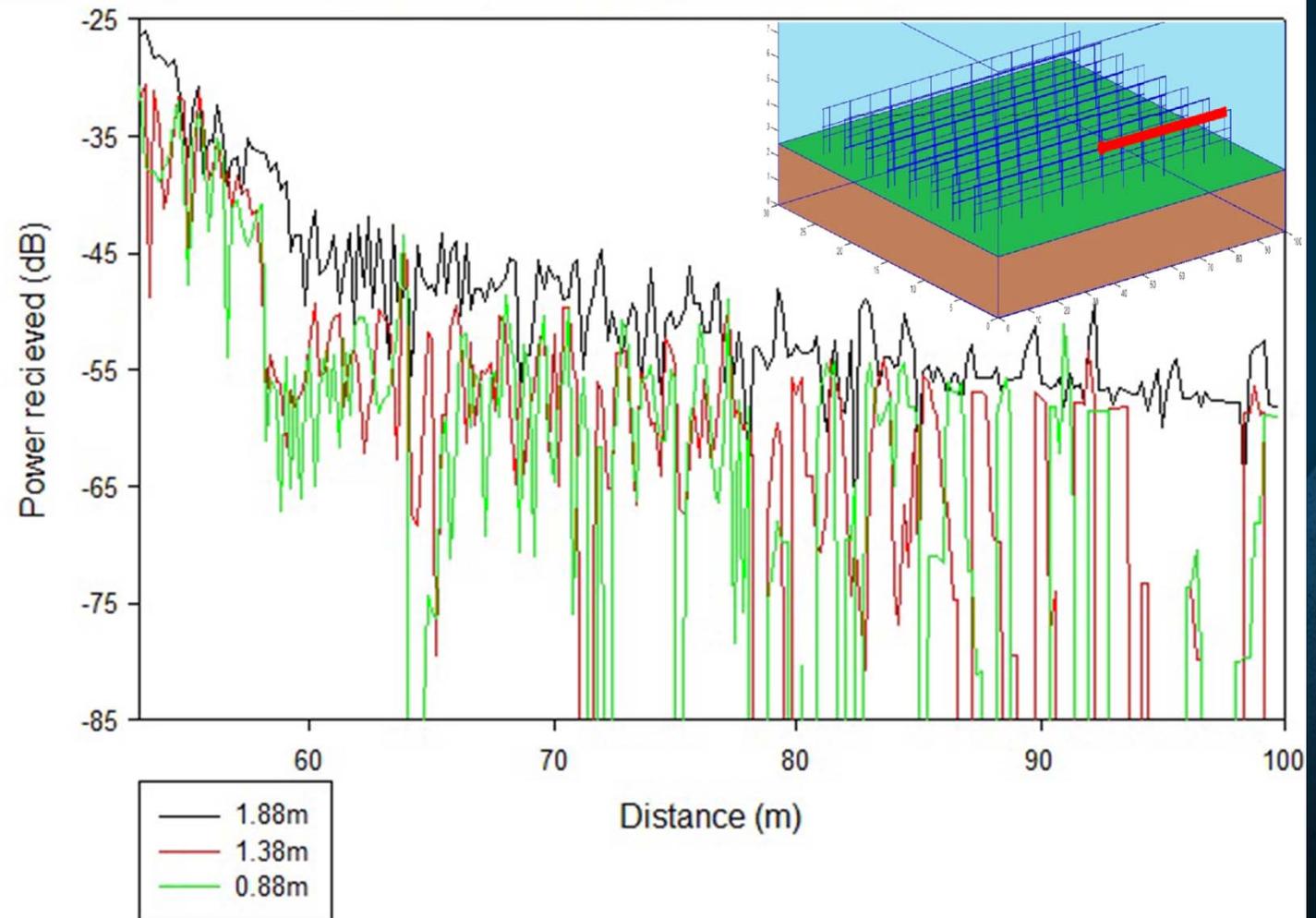
## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

## Comparison height , frequency 2435MHz



# DESARROLLO

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

**Desarrollo**

Escenario

Medidas analíticas

**Simulación**

Analizador de protocolos

Comparaciones

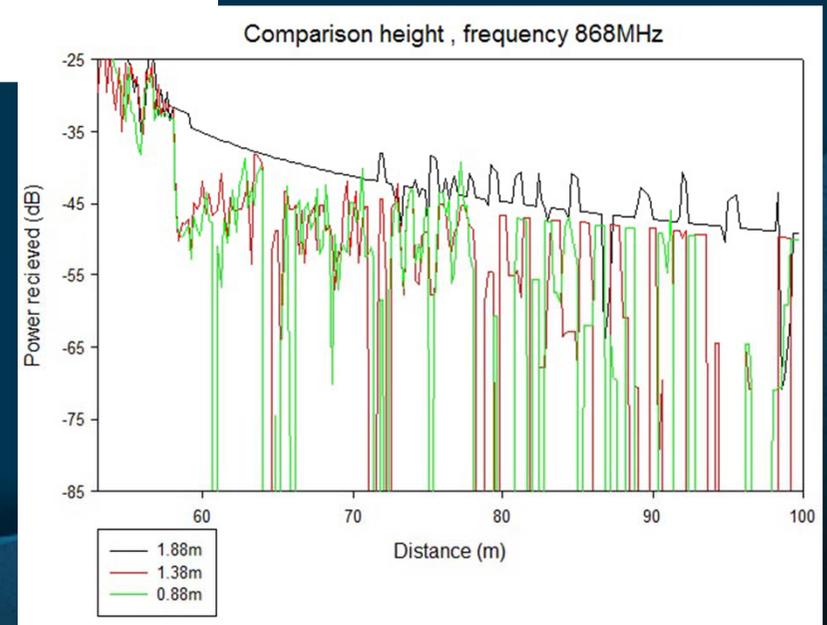
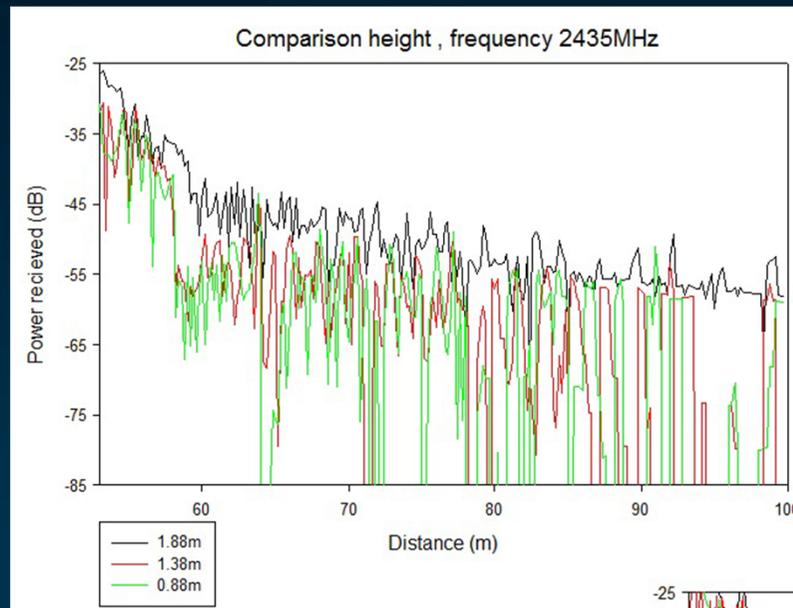
Modelo avanzado

Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas





# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

## Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

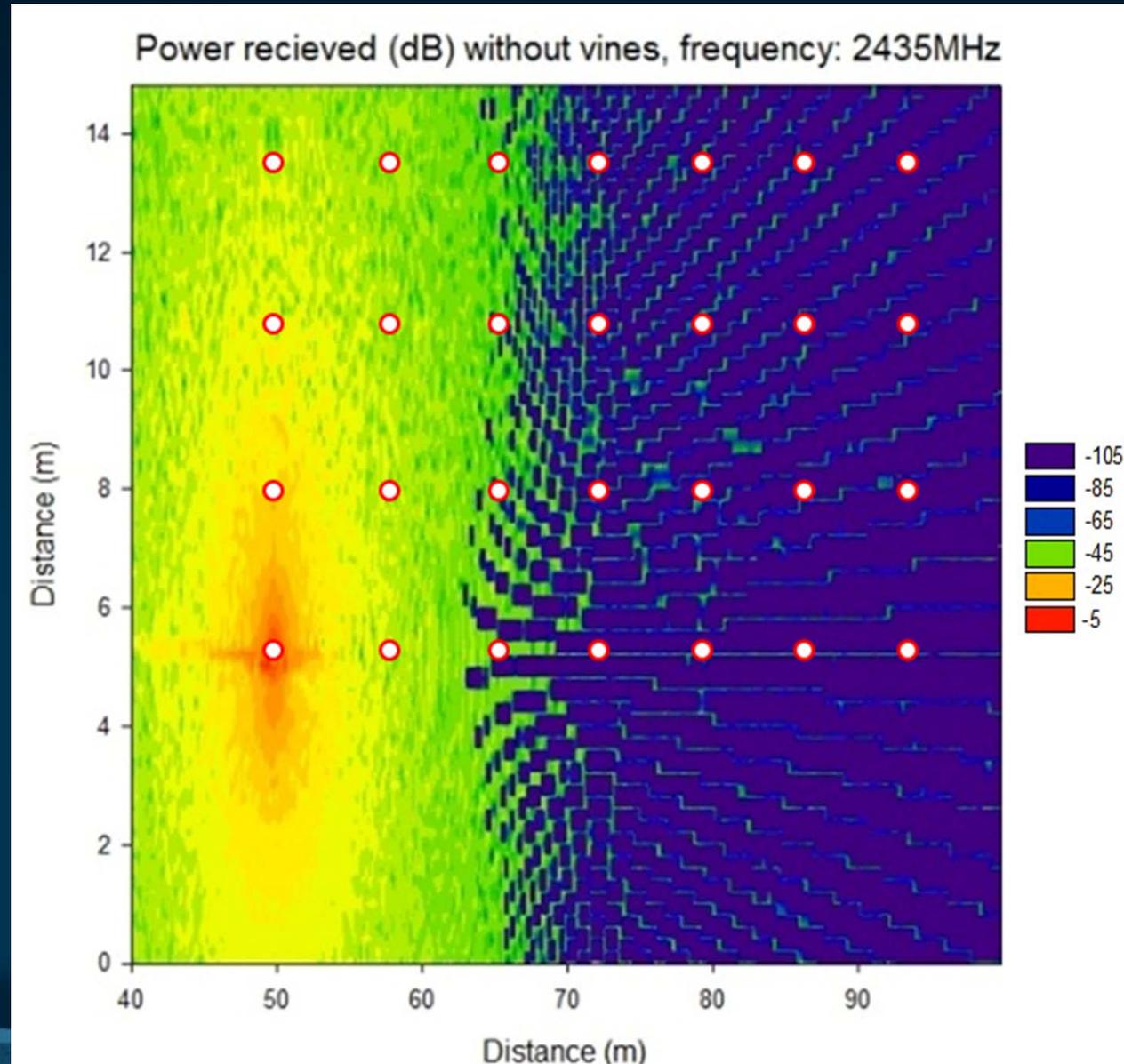
Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas







# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

## Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

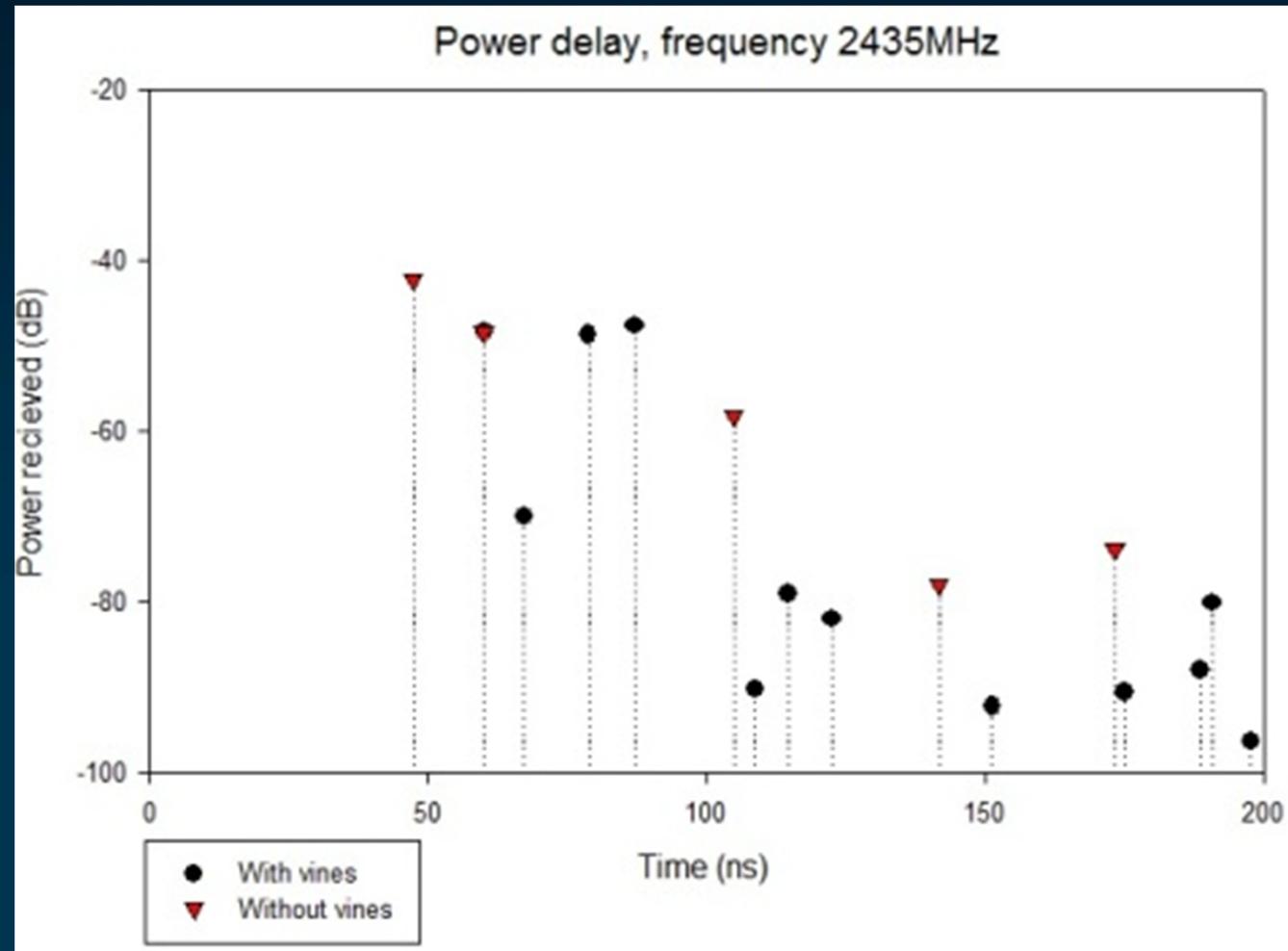
Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



# DESARROLLO

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

**Desarrollo**

Escenario

Medidas analíticas

**Simulación**

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

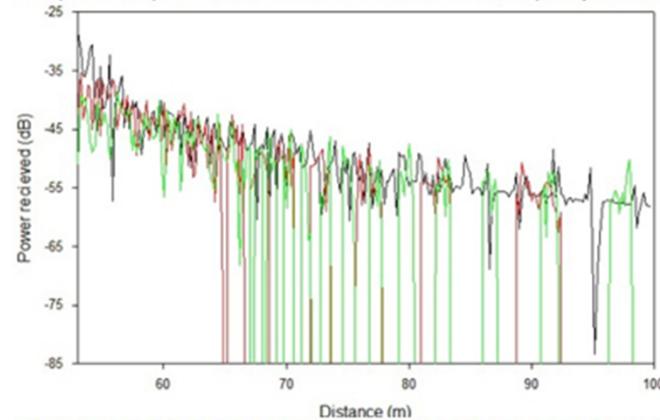
Conclusiones

Red completa

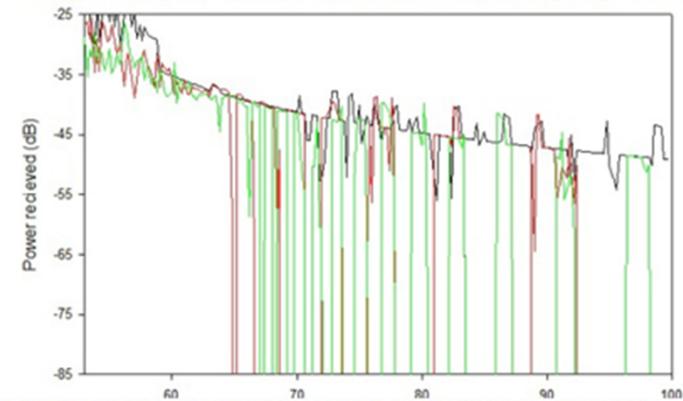
Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

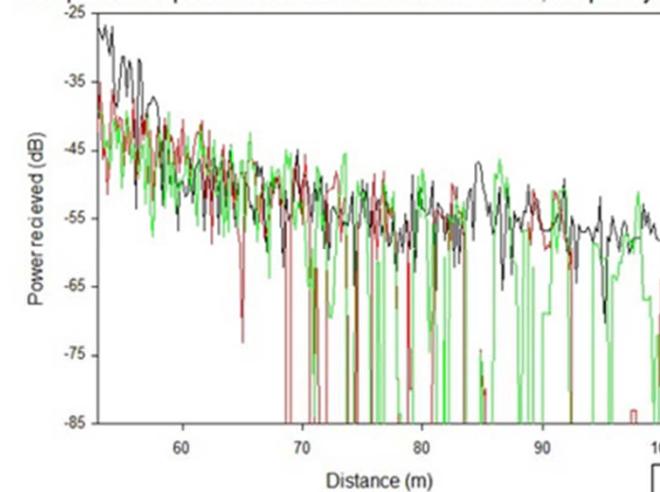
Comparison of power received in the field without vines, frequency: 2435MHz



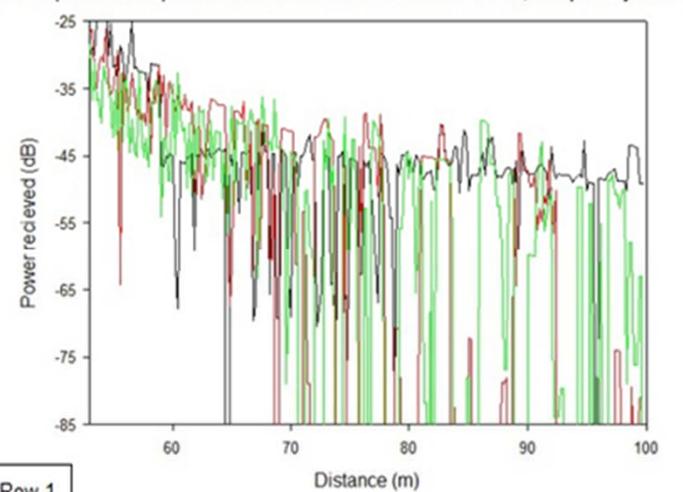
Comparison of power received in the field without vines, frequency: 868MHz



Comparison of power received in the field with vines, frequency: 2435MHz



Comparison of power received in the field with vines, frequency: 868MHz



— Row 1  
— Row 2  
— Row 3



# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

**Analizador de protocolos**

Comparaciones

Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



## RSSI (dBm)

RX2	RX3	RX4	RX5	RX6	RX7
-45,232	-44,274	-49,096	-46,209	-48,116	-44,054



# DESARROLLO

## Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

## Comparaciones

Modelo avanzado

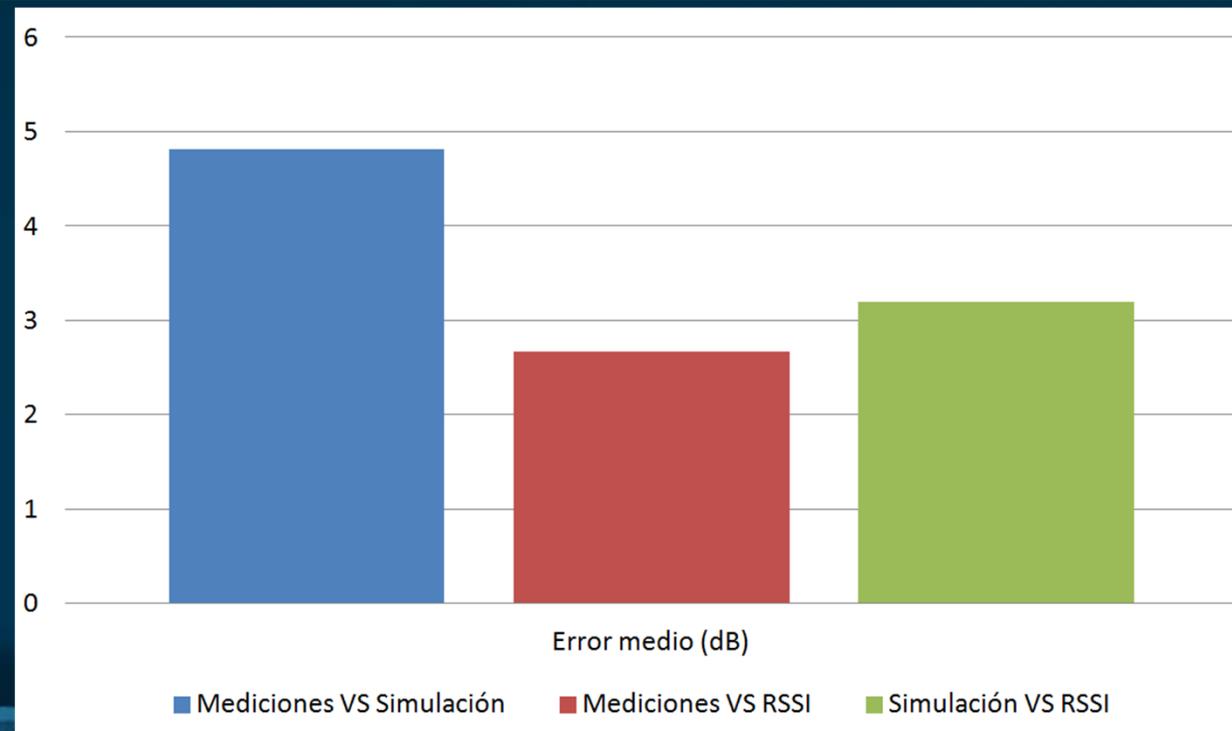
Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

	Mediciones	Simulador	RSSI
Tx1	-49,52 dBm	-44,6951 dBm	-45,2326dBm
Tx4	-45,17 dBm	-40,3667 dBm	-46,2092dBm



# DESARROLLO

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

**Desarrollo**

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

**Modelo avanzado**

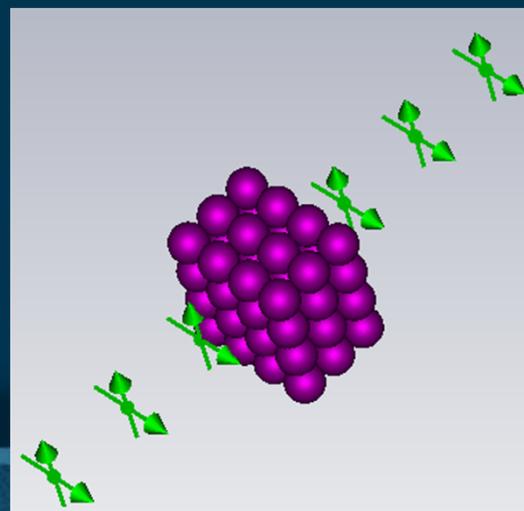
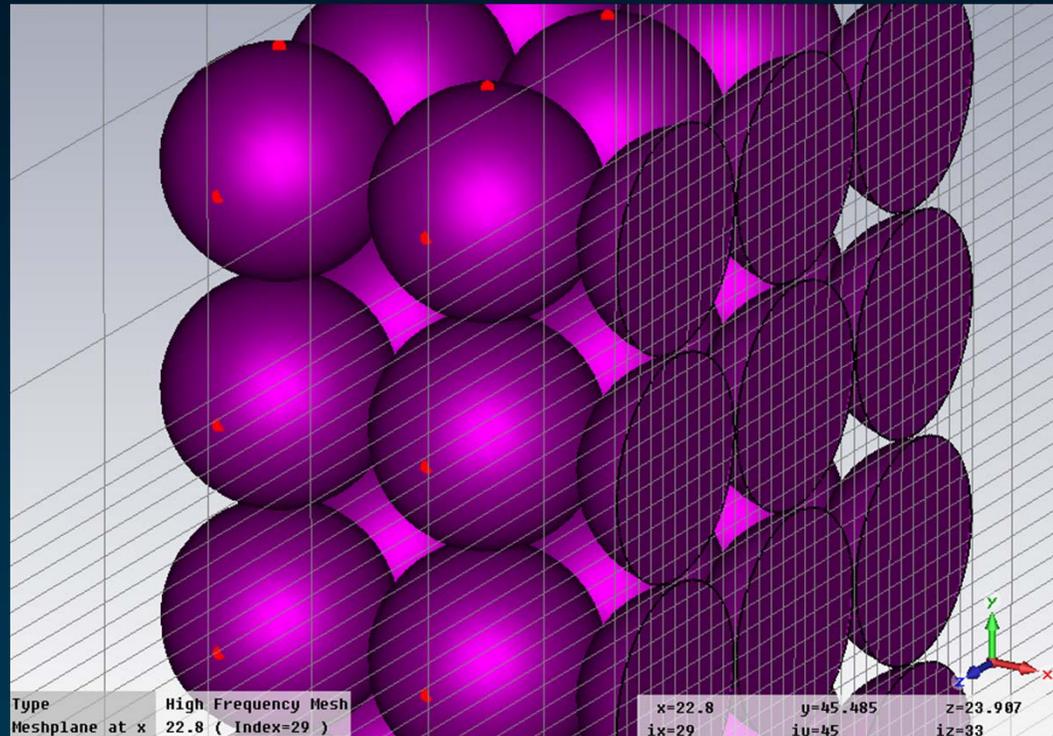
Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

Modelo 3D  
de uva



Ubicación de  
las sondas



# DESARROLLO

## Objetivos

### Premisas

## Antecedentes

### Tecnologías inalámbricas

### Redes de sensores

## Desarrollo

### Escenario

### Medidas analíticas

### Simulación

### Analizador de protocolos

### Comparaciones

### Modelo avanzado

## Conclusiones

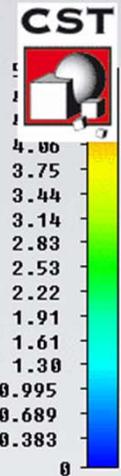
### Red completa

### Líneas de trabajo futuras

### Resumen de horas

Clamp to range: (Min: 0/ Max: 5)

Type	E-Field (peak)
Monitor	e-field (f=1.5) [pw]
Component	Abs
Plane at x	18
Maximum-2D	6.14561 V/m at 18.5 / 14.2 / 1.1
Frequency	1.5
Phase	0 degrees



# DESARROLLO

Objetivos

Premisas

Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

**Desarrollo**

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

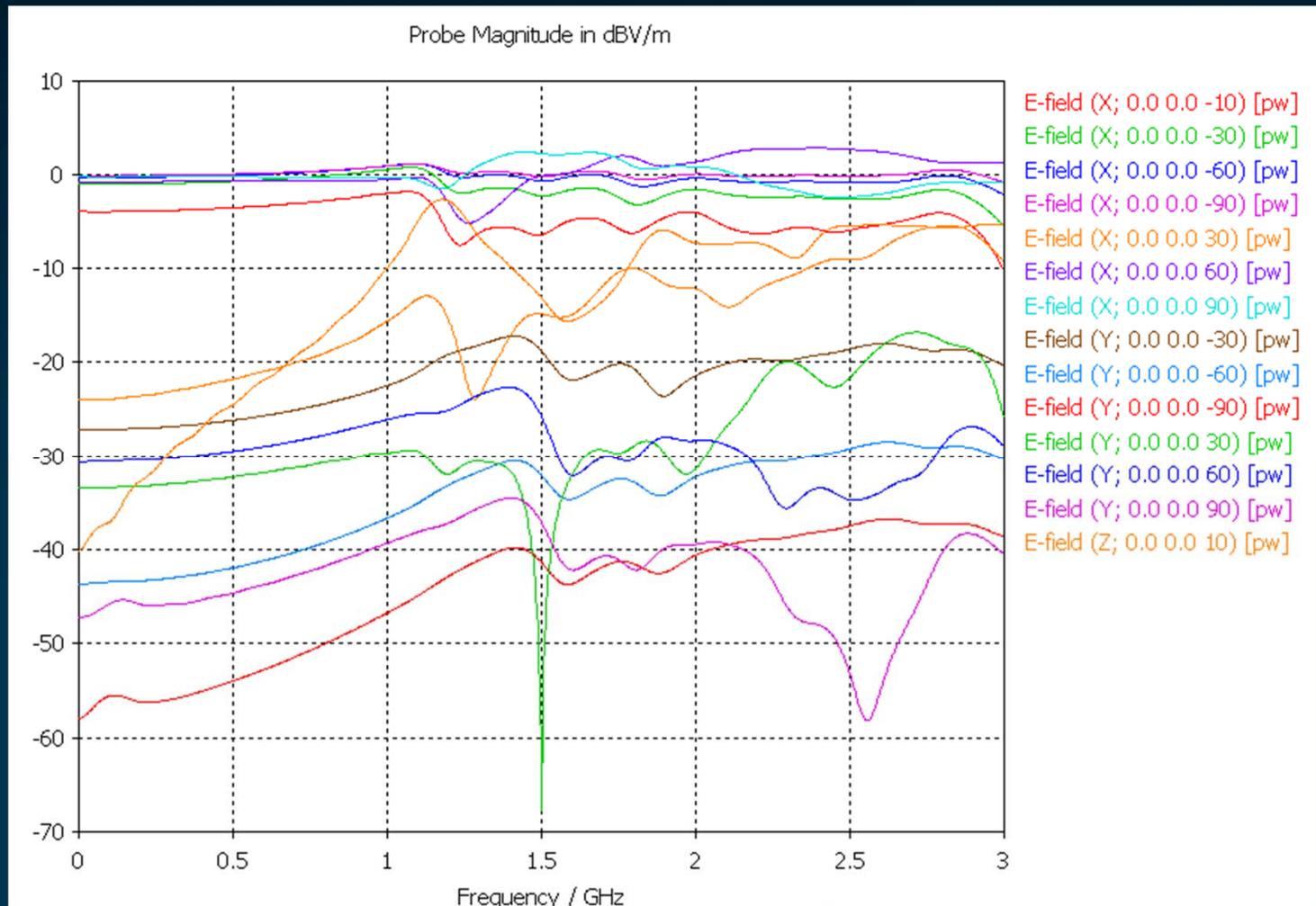
**Modelo avanzado**

Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



## Evolución del campo eléctrico



# CONCLUSIONES

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

# Conclusiones



# CONCLUSIONES

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

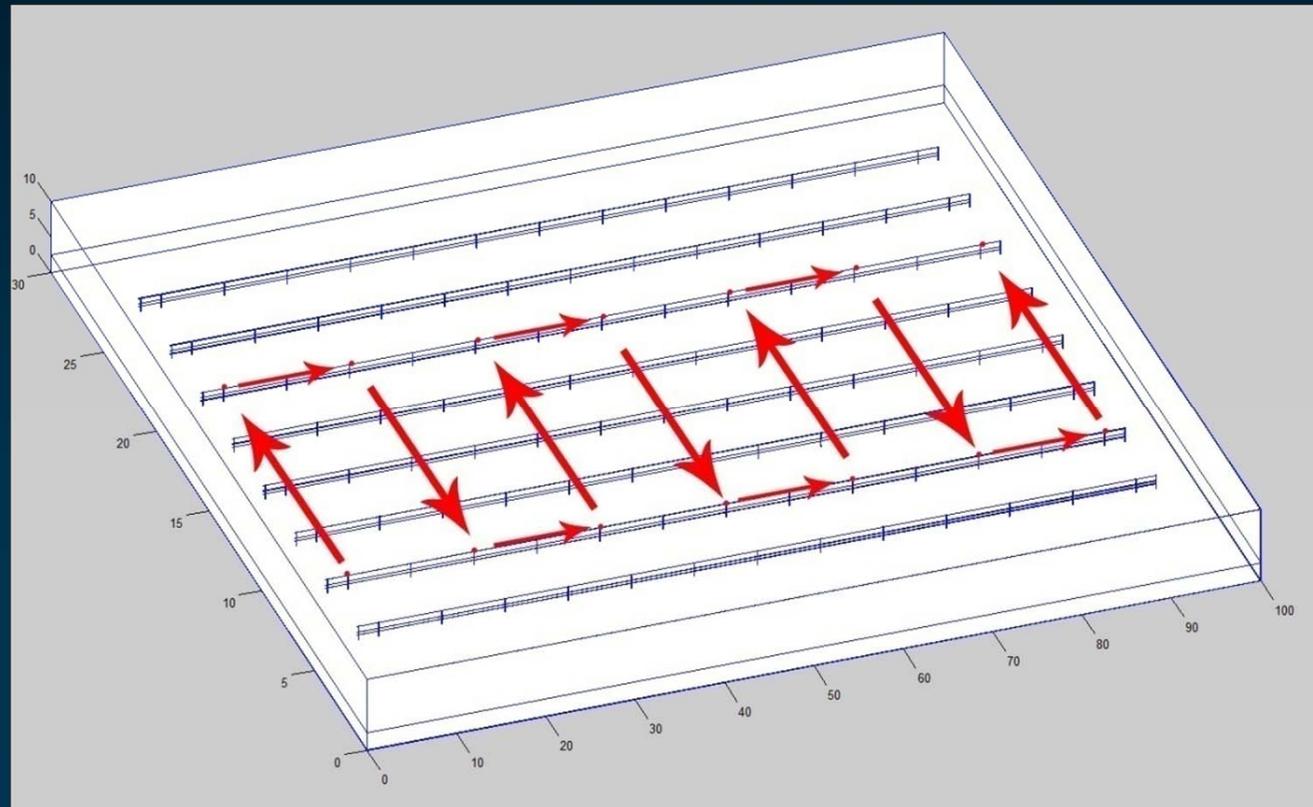
Modelo avanzado

## Conclusiones

**Red completa**

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas



## Red de sensores completa



# CONCLUSIONES

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

• Ampliación

• Extrapolación



# CONCLUSIONES

## Objetivos

Premisas

## Antecedentes

Tecnologías inalámbricas

Redes de sensores

## Desarrollo

Escenario

Medidas analíticas

Simulación

Analizador de protocolos

Comparaciones

Modelo avanzado

## Conclusiones

Red completa

Líneas de trabajo futuras

Resumen de horas

**PFC -> 6 Créditos  
60 horas**

**654 Horas invertidas**



## TEXTO PUBLICADO

# Análisis de la Influencia Topológica en la Implantación de Redes de Sensores Vitivinícolas





# MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

## INFLUENCIA TOPOLÓGICA Y MORFOLÓGICA EN LA PLANIFICACIÓN RADIOELÉCTRICA DE REDES DE SENSORES EN ENTORNOS AGROPECUARIOS

Ingeniero Técnico de Telecomunicación  
Pamplona, Junio 2012



Guillermo Gil Lapuente  
Tutor: Francisco Javier Falcone Lanas