

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
DE TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



**Trabajo Fin de Grado**

Pérdidas por propagación y dispersión temporal para el canal de radiocomunicaciones omnidireccional y direccional a frecuencias de milimétricas en entorno microcelular de plantación de cítricos



AUTOR: Alfredo Serna Sabater  
DIRECTORES: Leandro Juan Llácer  
José María Molina García-Pardo

<b>Autor:</b>	Alfredo Serna Sabater
<b>E-mail del Autor:</b>	alfrejunior972222@gmail.com
<b>Directores:</b>	Leandro Juan Llácer y José María Molina García-Pardo
<b>E-mail de los Directores:</b>	<a href="mailto:leandro.juan@upct.es">leandro.juan@upct.es</a> <a href="mailto:josemaria.molina@upct.es">josemaria.molina@upct.es</a>
<b>Título del TFG:</b>	Pérdidas por propagación y dispersión temporal para el canal de radiocomunicaciones omnidireccional y direccional a frecuencias de milimétricas en entorno microcelular de plantación de cítricos
<b>Resumen:</b>	<p>El desarrollo de la Agricultura 4.0 está llevando a la sensorización masiva de cultivos, la aparición de maquinaria y vehículos sin conductor, la transmisión de imágenes para su análisis remoto, etc. y, por tanto, a la necesidad de desplegar sistemas de radiocomunicaciones que operan en diversas bandas de frecuencia en este tipo de entornos. Algunas de estas aplicaciones van a requerir la necesidad de transmitir datos a gran velocidad ya en la interfaz radio lo que está llevando a la caracterización del canal en bandas de frecuencia más elevadas, como la de milimétricas, de las que se han venido utilizando habitualmente como la de UHF. Además, esta caracterización se está llevando a cabo en diversos entornos: industriales, aeroportuarios, hospitalarios, agrícolas, etc.</p> <p>Los modelos de propagación caracterizan el canal desde el punto de vista de sus pérdidas por propagación al atenuarse la señal entre el transmisor y el receptor, dispersión temporal debida a que las contribuciones que llegan al receptor en diferentes instantes de tiempo, amplitudes y fases, y la dispersión espacial al llegar las contribuciones al receptor desde ángulos diferentes, amplitudes y fases. Una forma de analizar las pérdidas por propagación y la dispersión temporal es medir la función de transferencia del canal mediante un analizador de redes vectorial y, a partir de la transformada inversa de Fourier obtener el perfil de retardo.</p> <p>En el proyecto se ha analizado el canal a las frecuencias de 3.5GHz y 28GHz en un entorno microcelular en una plantación de cítricos y se ha propuesto un modelo de propagación.</p>
<b>Titulación:</b>	Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación
<b>Departamento:</b>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación:</b>	10/2020



# ÍNDICE

Índice de Tablas .....	6
Índice de figuras.....	7
<b>1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
1.1.- Introducción.....	9
1.2. Objetivos.....	9
1.3. Fases del proyecto.....	9
1.4 Estructura .....	10
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>11</b>
2.1. Pérdidas de propagación medidas (banda ancha) .....	11
2.2. Perfil de retardo y dispersión de retardo (medidas) .....	11
2.3 Contribuciones Principales. ....	12
2.3.1 Contribución directa .....	13
2.3.2. Contribución reflejada en el suelo.....	13
2.3.3 Contribución reflejada en los árboles.....	14
2.4. Coeficientes de reflexión en el suelo.....	15
2.4.1 Modelo a 2 rayos: directo y reflejado en el suelo .....	17
2.5. Coeficientes de Reflexión en los árboles .....	21
2.6. Función de transferencia teórica .....	25
2.7. Perfil de retardo y dispersión temporal .....	26
<b>3. ENTORNO DE PROPAGACIÓN Y MEDIDAS DISPONIBLES.....</b>	<b>27</b>
3.1. Entorno de propagación .....	27
3.2. Sistema de medidas.....	30
3.3. Ejemplo de medidas disponibles.....	31
<b>4. COMPARACIÓN Entre MEDIDAS Y MODELO PROPUESTO.....</b>	<b>33</b>
4.1. BANDA DE 3.5 GHz .....	33
4.1.1. Pérdidas de propagación .....	33

4.1.2. Perfil de retardo y dispersión temporal.....	34
4.2.- BANDA DE 28GHz .....	52
4.1.1. Pérdidas de propagación .....	52
4.1.2. Perfil de retardo y dispersión temporal.....	53
<b>5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS .....</b>	<b>57</b>
5.1.- Conclusiones .....	57
5.2. Futuras líneas .....	58
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO A: Permitividad relativa en hojas de limonero .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO B: PROGRAMAS EN MATLAB .....</b>	<b>62</b>

## Índice de Tablas

<i>Tabla 1..Modelos Susceptibilidad Magnética.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2. Parámetros Cálculo Susceptibilidad.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3. Alturas y distancias de las antenas.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4.Ancho de banda y número de muestras .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 5. Pendientes y Desviaciones Estándar (3.5 GHz).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 6.RMS 3.5 GHz (MC 100%).....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 7. RMS 3.5 GHz (MC 0%).....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 8.Pendientes y Desviaciones Estándar (28 GHz) .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 9.RMS 28 GHz.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 10.RMS Medio (100 %) .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 11.RMS Medio (0 %) .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 12. Permitividad Dieléctrica Compleja (0% MC).....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 13. Permitividad Dieléctrica Compleja (100% MC).....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 14. Permitividad Dieléctrica Compleja (3.5 GHz) .....</i>	<i>62</i>

## Índice de figuras

<i>Figura 1. Corte vertical (a) y horizontal visto desde arriba (b)</i> .....	12
<i>Figura 3. Reflexión entre dos medios (Pol. Vertical)</i> .....	15
<i>Figura 4. Reflexión entre dos medios (Pol. Horizontal)</i> .....	15
<i>Figura 5. Coeficiente Reflx vs Ángulo Incidencia (Pol. V)</i> .....	16
<i>Figura 6. Coeficiente Reflx vs Ángulo Incidencia (Pol. H)</i> .....	17
<i>Figura 7. Modelo a dos rayos para polarización vertical y horizontal (900 MHz)</i> .....	18
<i>Figura 8. Modelo a dos rayos para polarización horizontal (1850 MHz)</i> .....	19
<i>Figura 9. Comparación Pérdidas Banda Ancha y Banda Estrecha (3.5 GHz)</i> .....	20
<i>Figura 10. Circular Disc Scattering Geometry</i> .....	21
<i>Figura 11. Susceptibilidades Magnéticas <math>X_z</math> y <math>X_t</math></i> .....	23
<i>Figura 12. Coeficiente Reflx vs Ángulo Incidencia MC 100% (Pol. V)</i> .....	25
<i>Figura 13. Coeficiente Reflx vs Ángulo Incidencia MC 100% (Pol. H)</i> .....	25
<i>Figura 14. Entorno de propagación</i> .....	27
<i>Figura 15. Antena Transmisora y</i> .....	28
<i>Figura 16. Ajuste de la distancia</i> .....	28
<i>Figura 17. Imagen de las antenas utilizadas</i> .....	29
<i>Figura 18. Antena Omnidireccional y Bocina conectadas</i> .....	29
<i>Figura 19. Pérdidas de Propagación Omni. Polarización V (3,5 GHz) en función de la distancia entre el transmisor y el receptor.</i> .....	31
<i>Figura 20. PDP Medido Omni. Polarización V (3,5 GHz); <math>d=6</math> m.</i> .....	32
<i>Figura 21. Comparación Pérdidas Omni. Pol. V (3.5 GHz)</i> .....	33
<i>Figura 22. Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)</i> .....	35
<i>Figura 23. Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)</i> .....	36
<i>Figura 24. Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)</i> .....	37
<i>Figura 25. Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)</i> .....	38

<i>Figura 26.Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)</i> .....	39
<i>Figura 27.Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)</i> .....	40
<i>Figura 28.Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)</i> .....	41
<i>Figura 29.Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)</i> .....	42
<i>Figura 30.Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)</i> .....	43
<i>Figura 31.Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)</i> .....	44
<i>Figura 32.Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)</i> .....	45
<i>Figura 33.Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)</i> .....	46
<i>Figura 34.Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)</i> .....	47
<i>Figura 35. Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)</i> .....	48
<i>Figura 36. Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)</i> .....	49
<i>Figura 37. Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)</i> .....	50
<i>Figura 38. Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)</i> .....	51
<i>Figura 39. Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)</i> .....	51
<i>Figura 40.Comparación Pérdidas Bocina Pol. V (28 GHz)</i> .....	53
<i>Figura 41.Comparación PDP Bocina Pol V. 8 m (28 GHz)</i> .....	54
<i>Figura 42.Comparación PDP Bocina Pol V. 40 m (28 GHz)</i> .....	55
<i>Figura 43.Comparación RMS Delay Spread Bocina (28 GHz)</i> .....	56
<i>Figura 44.Parte Real de la Constante Dieléctrica (<math>\epsilon'</math>)</i> .....	60
<i>Figura 45.Parte Imaginaria de la Constante Dieléctrica (<math>\epsilon''</math>)</i> .....	61



## 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Se expondrá en este capítulo tanto las causas que impulsan este trabajo como los objetivos que se aspiran a alcanzar. Trazaremos y detallaremos la ruta a seguir en el proyecto, exponiendo sus distintas fases y estructura.

### 1.1.- Introducción

La agricultura 4.0 supone un aumento de las tecnologías inalámbricas para las comunicaciones a corta y media distancia en este campo, automatizando la maquinaria, controlando el suelo y el agua mediante drones y sensores, etc. Normalmente, los sistemas como GSM (2), UMTS(3G) o LTE (4G) se aplican en entornos urbanos, rurales o suburbanos. Además, sabemos de la importancia de las plantaciones de cítricos en el sector agrícola, estando España entre los diez países con mayor producción de cítricos en el mundo (3 millones de toneladas), siendo la Región de Murcia la tercera comunidad autónoma con más hectáreas en este aspecto (30.000), según ICEX [8]. Por tanto, es algo obligado el despliegue de sistemas de radiocomunicaciones eficientemente diseñados en esta clase de entornos

Para desarrollar una buena planificación de un sistema de radiocomunicación se han de recrear modelos basados en las teorías electromagnéticas mediante herramientas informáticas. Se hará uso de medidas tomadas por el grupo SiCoMo en el entorno agrícola de una empresa de cítricos en la banda de frecuencias SHF en las porciones de 3 GHz a 4 GHz y de 27 GHz a 29 GHz (las cuales nombraremos como banda de 3.5 GHz y 28 GHz, respectivamente). A partir de ellas y otros parámetros como la ganancia y pérdidas en transmisión y recepción, los mecanismos de propagación como la reflexión (en el suelo y en las hojas de los árboles), etc., podremos diseñar un modelo propio con las herramientas informáticas pertinentes, estimando las pérdidas de propagación, el PDP (*Power Delay Profile*) y el RMS Delay Spread ( $\tau_{rms}$ ).

### 1.2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es el análisis y modelado de una campaña de medidas en las bandas de frecuencia de 3.5GHz y 28GHz en una plantación de cítricos para proponer un modelo de propagación basado en entornos microcelulares.

### 1.3. Fases del proyecto

Las fases a seguir en este trabajo son:

1. Analizar una campaña de medidas, realizada en [7], en una plantación de cítricos en las bandas de frecuencias de 3.5GHz y 28GHz.

2. Estudiar los mecanismos de propagación y las teorías electromagnéticas para estimar las pérdidas de propagación y la dispersión temporal del canal.
3. Proponer un modelo para el entorno de propagación y las bandas de frecuencias medidas y programar dichos modelos en MATLAB.
4. Analizar los resultados.
5. Redacción de la memoria.

## 1.4 Estructura

En primer lugar, expondremos cómo se resuelven este tipo de investigaciones a nivel teórico, tanto lo que se ha hecho en las medidas de las que parte este trabajo, como de nuestro modelo de propagación, haciendo un estudio teórico de los mecanismos de propagación que tendremos en cuenta, tales como la propagación en espacio libre y la reflexión sobre superficie lisa. Esto nos lleva a estudiar distintas contribuciones que llegarán a la antena receptora, provenientes del rayo directo, del rayo reflejado con el suelo y los rayos con reflexión simple en los árboles. Con esto obtendremos las pérdidas de propagación en Banda Ancha y Banda Estrecha, así como la función de transferencia, a través de la cual podremos representar los distintos perfiles de retardo para cada una de las distancias de separación entre antenas.

Lo segundo a realizar será una descripción del entorno de propagación en el que se han obtenido las medidas, por el grupo de investigación SiCoMo, de las que dispondremos. Se describirá brevemente el sistema de medidas y los dispositivos utilizados para la tarea. También se mostrarán tanto las pérdidas de las medidas en el entorno en la banda de  $3,5\text{ GHz}$ , a modo de ejemplo .

Una vez expuestos los valores medidos y nuestro modelo de propagación, éste se programará en MATLAB y se comparará cómo responde nuestro modelo a las pérdidas de propagación, perfil de retardo y dispersión temporal bajo las condiciones de trabajo y del entorno de propagación, previamente descrito.

Finalmente, se expondrán unas conclusiones a modo de resumen de los análisis realizados en este trabajo y de lo que ha supuesto para el alumno, tanto a nivel académico como personal.

## 2. ESTADO DEL ARTE.

En este segundo capítulo se expondrá cómo se afrontan esta clase de problemas en la actualidad. Por ello, primero deberemos mostrar qué formulación teórica se ha utilizado para obtener a través de las medidas parámetros como las pérdidas de propagación, el PDP y el  $\tau_{rms}$ .

Una vez visto esto, observaremos los mecanismos de propagación que utilizaremos para nuestro modelo, así como el modelaje de las pérdidas de propagación, PDP y  $\tau_{rms}$ .

### 2.1. Pérdidas de propagación medidas (banda ancha)

Las pérdidas de banda ancha (en dB) para cada distancia entre el transmisor y el receptor  $d$  se pueden calcular con la expresión:

$$PL_m(d) = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|H_m(f_n, d)|^2}{g_{Tx}(f_n) g_{Rx}(f_n)} \right) \quad (1)$$

Siendo  $H_m(f_n, d)$  igual al parámetro  $s_{21}(f)$  medido en el analizador,  $N$  el número de muestras de frecuencia,  $g_{Tx}(f_n)$  y  $g_{Rx}(f_n)$  las ganancias de la antena transmisora y receptora, respectivamente.

### 2.2. Perfil de retardo y dispersión de retardo (medidas)

El perfil de retardo (PDP, Power Delay Profile en inglés) representa, para una distancia fija entre el transmisor y el receptor, la potencia en función del retardo  $\tau$  en el que llegan las diferentes contribuciones (directa, reflejada, etc.) a la antena receptora. A partir de la función de transferencia medida, se calcula con la siguiente expresión:

$$PDP_m(\tau, d) = |IDFT^{-1}(H_m(f, d))|^2 \quad (2)$$

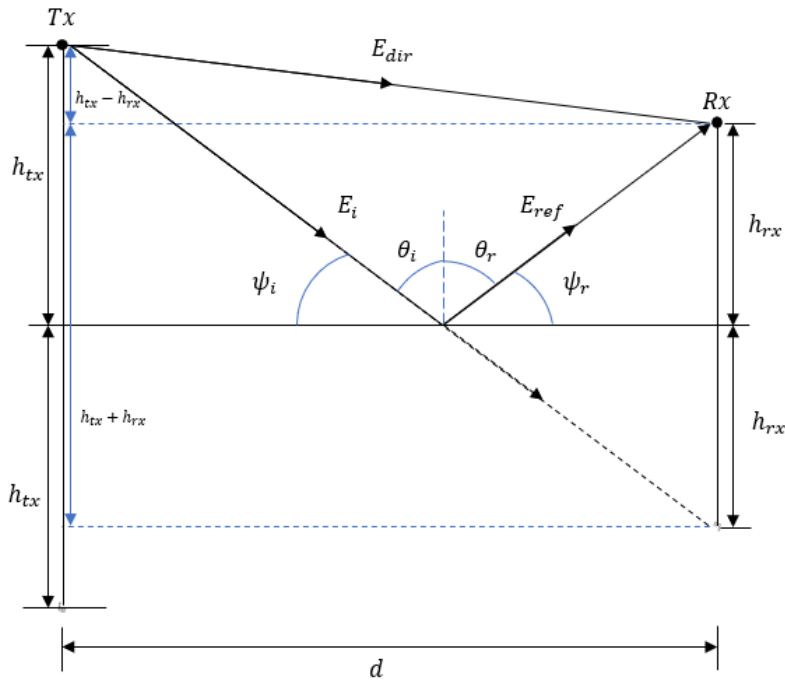
A partir del PDP, se puede estimar la dispersión de retardo mediante el RMS ('*root mean square*') delay spread mediante la expresión:

$$\tau_{rms}(d) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\tau_n - \bar{\tau}(d))^2 PDP(\tau_n, d)}{\sum_{n=1}^N PDP(\tau_n, d)}} \quad (3)$$

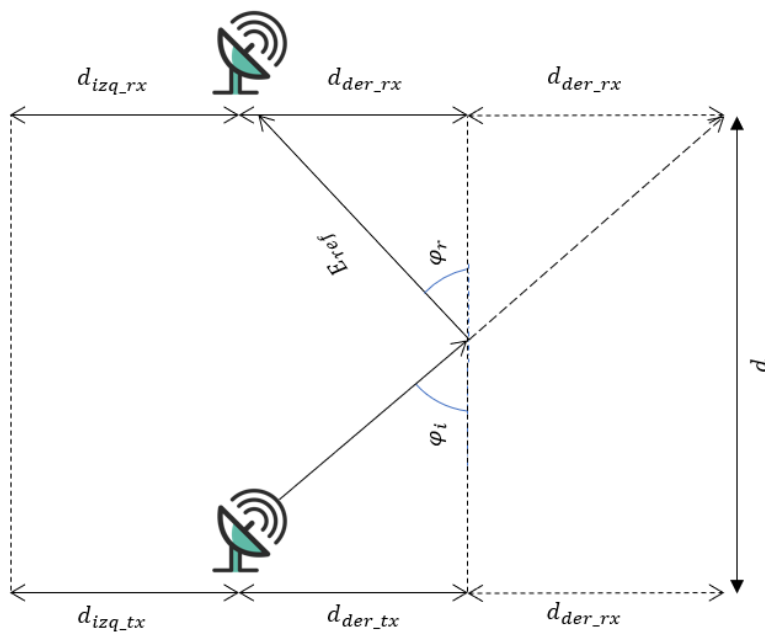
Siendo  $\bar{\tau}$  el *mean delay spread*, expresado como:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{n=1}^N \tau_n PDP(\tau_n, d)}{\sum_{n=1}^N PDP(\tau_n, d)} \quad (4)$$

### 2.3 Contribuciones Principales.



(a)



(b)

Figura 1. Corte vertical (a) y horizontal visto desde arriba (b)

Vamos a tener distintas contribuciones dependiendo del plano en el que nos encontremos:

- **Plano Horizontal:** Las contribuciones van a ser el rayo directo y reflejado en el suelo, el cual es un medio homogéneo e isótropo que cuenta con una permitividad compleja dependiente de la frecuencia.
- **Plano Vertical:** La contribución que tendremos en cuenta será la reflexión simple del rayo con los árboles a izquierda y derecha, siendo estos modelados como un medio anisótropo con una permitividad compleja.

### 2.3.1 Contribución directa

La contribución directa se corresponde con la señal recibida en condiciones de espacio libre.

La expresión de la onda del campo eléctrico radiado desde una antena es:

$$\vec{E}_t = E_0 \frac{e^{-jkr_{dir}}}{r_{dir}} \hat{\theta} \quad (5)$$

siendo  $E_0$ , la amplitud del campo eléctrico a la distancia de 1 metro,  $t_t$  el diagrama de radiación de la antena,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  el número de onda con  $\lambda$  la longitud de onda y  $r$  la distancia entre el transmisor y el receptor.

Finalmente, mediante el Teorema de Pitágoras podemos hacer uso de la distancia entre las antenas y la diferencia entre las alturas de estas para dilucidar la distancia recorrida por el rayo directo ( $r_{dir}$ ):

$$r_{dir} = \sqrt{d^2 + (h_{tx} - h_{rx})^2} \quad (6)$$

### 2.3.2. Contribución reflejada en el suelo

Si asumimos antenas omnidireccionales la expresión del campo eléctrico de la onda reflejada es:

$$\vec{E}_r = E_0 R_s \frac{e^{-jkr_{ref}}}{r_{ref}} \hat{\theta} \quad (7)$$

Siendo  $R_s$  el coeficiente de reflexión en el suelo y  $r_{ref}$  la distancia recorrida por la onda reflejada desde el transmisor al receptor.

De nuevo, mediante el Teorema de Pitágoras podemos hacer uso de la distancia entre las antenas y las alturas de estas para obtener la distancia total recorrida por el rayo reflejado en el suelo ( $r_{ref}$ ):

$$r_{ref} = \sqrt{d^2 + (h_{tx} + h_{rx})^2} \quad (8)$$

Definiremos también la expresión del ángulo de incidencia, que por trigonometría queda como:

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{h_{tx} + h_{rx}}{d}\right) \quad (9)$$

### 2.3.3 Contribución reflejada en los árboles

Si asumimos antenas omnidireccionales la expresión del campo eléctrico de la onda reflejada es:

$$\vec{E}_r = E_0 R_a \frac{e^{-jk r_{ref}}}{r_{ref}} \hat{\theta} \quad (10)$$

Siendo  $R_a$  el coeficiente de reflexión y  $r_{ref}$  la distancia recorrida por la onda reflejada desde el transmisor al receptor.

Sabiendo la distancia que separa la antena de los árboles, y la distancia entre las antenas, mediante teoría de imágenes y el teorema de Pitágoras podremos saber cuál es la distancia que recorre el rayo reflejado simple:

$$r_{ref\_simple} = \sqrt{(d_{der\_tx} + d_{der\_rx})^2 + d^2} \quad (11)$$

Mediante trigonometría deducimos el ángulo de incidencia:

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{d_{der\_tx} + d_{der\_rx}}{d}\right) \quad (12)$$

## 2.4. Coeficientes de reflexión en el suelo

Uno de los mecanismos de propagación es la reflexión de una onda al incidir sobre otro medio con propiedades dieléctricas y/o magnéticas diferentes. En el caso que nos ocupa, asumimos que los medios son homogéneos y sólo varía la permitividad (medios no magnéticos) de un medio respecto a otro. En las figuras Fig.9 y Fig.10 se representa el plano de incidencia y dos medios caracterizados por sus parámetros dieléctricos, magnéticos y conductores. También se ha representado el campo eléctrico y magnético de las ondas incidentes, reflejadas y transmitidas según el tipo de polarización del campo eléctrico (paralelo o perpendicular al plano de incidencia), y se ha definido el ángulo de la onda incidente ( $\theta_i$ ), de la reflejada ( $\theta_r$ ) y de la transmitida ( $\theta_t$ ).

Las expresiones de los coeficientes de reflexión de Fresnel son, para cada una de las dos polarizaciones, las siguientes:

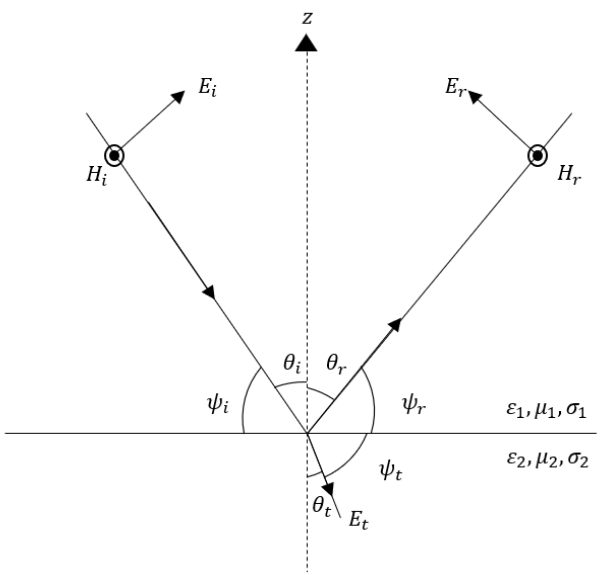


Figura 2. Reflexión entre dos medios (Pol. Vertical)

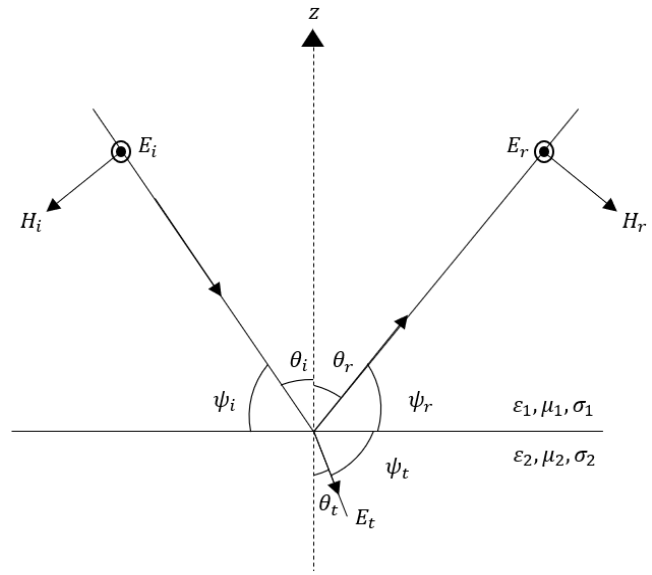


Figura 3. Reflexión entre dos medios (Pol. Horizontal)

$$R_{\parallel} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_t}{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_t} \quad (13)$$

$$R_{\perp} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_t}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_t} \quad (14)$$

En el entorno de propagación en el que se realizaron las medidas, las antenas transmisora y receptora se encuentran sobre el suelo, siendo el medio de propagación el aire, cuya permitividad es 1. Por ello, las expresiones de los coeficientes se pueden expresar como:

$$R_{||} = \frac{\epsilon_r \operatorname{sen} \varphi_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \varphi_i}}{\epsilon_r \operatorname{sen} \varphi_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \varphi_i}} \quad (15)$$

$$R_{\perp} = \frac{\operatorname{sen} \varphi_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \varphi_i}}{\operatorname{sen} \varphi_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \varphi_i}} \quad (16)$$

Si asumimos que el segundo medio tiene pérdidas, es posible caracterizarlo mediante una permitividad relativa compleja con una parte real  $\epsilon'$  y una parte imaginaria ( $\epsilon''$ ) [3].

Finalmente, mostramos dos figuras en las que representamos el módulo del coeficiente de reflexión en función del ángulo de incidencia para polarización vertical (Fig. 11) y polarización horizontal (Fig. 12) calculados con las expresiones (15) y (16), respectivamente, esto es, se han obtenido a través de la horizontal con el ángulo  $\varphi_i$ . Sabiendo que la permitividad real del suelo es  $\epsilon' = 15$  y  $\epsilon''$  se calcula con la expresión (17), obtenemos  $\epsilon_r = 15 - 0.0257i$ :

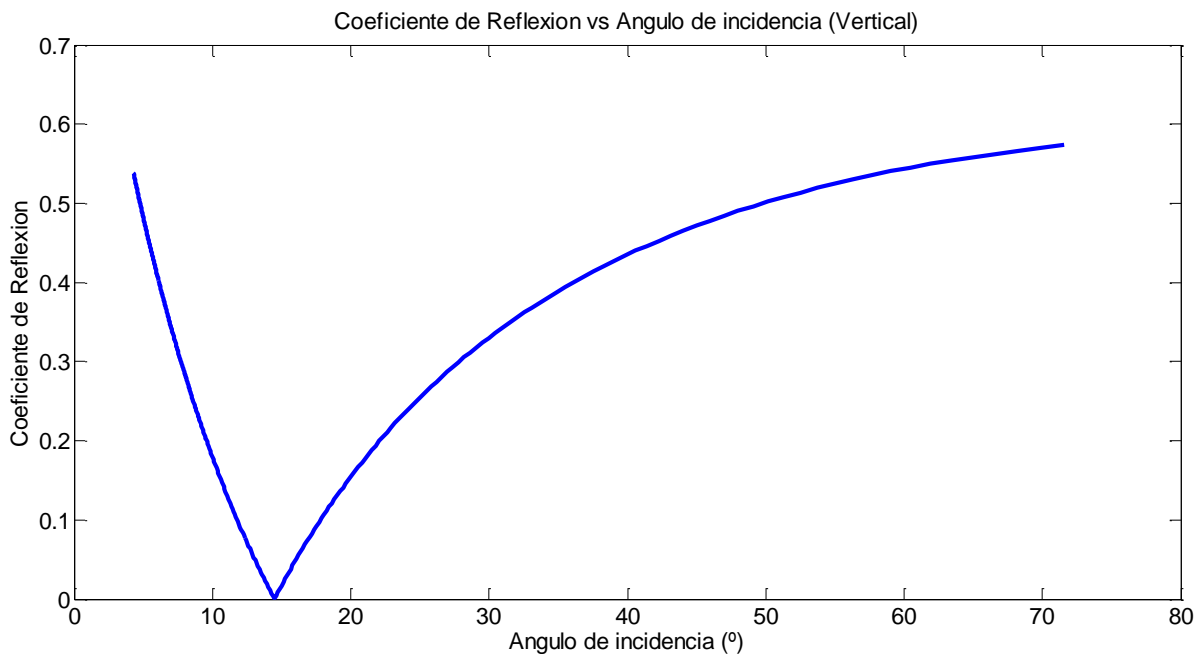


Figura 4. Coeficiente Reflx vs Ángulo Incidencia (Pol. V)



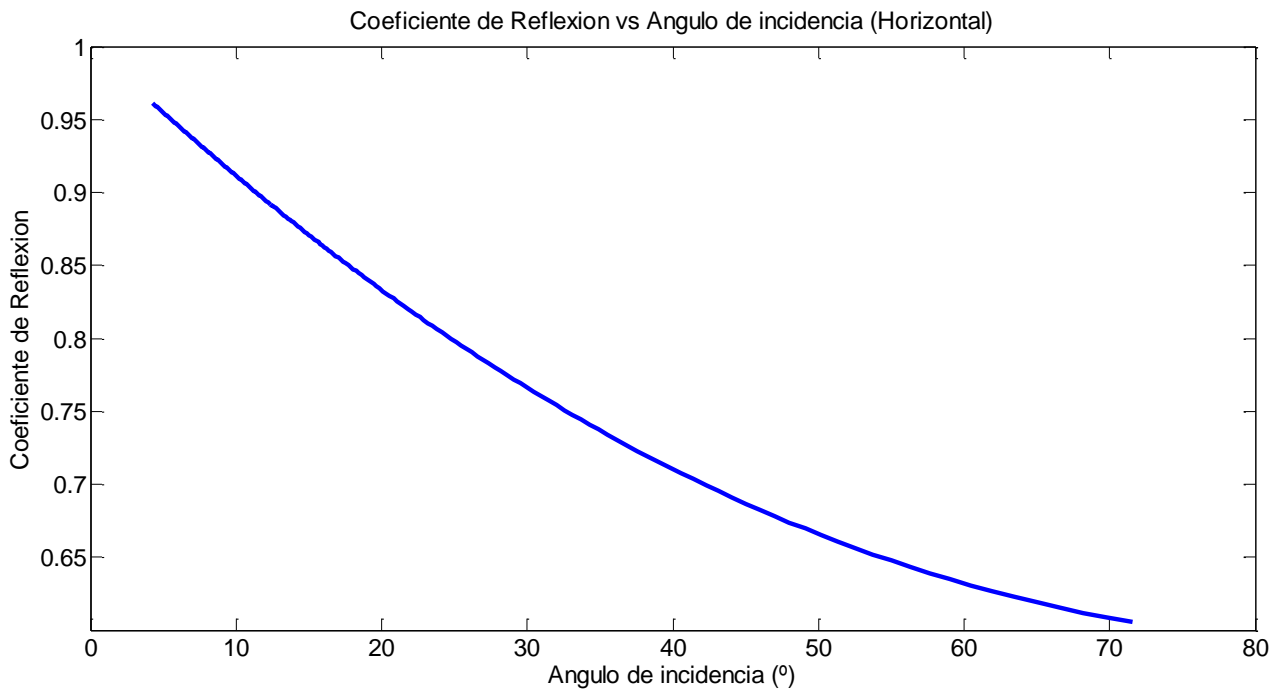


Figura 5. Coeficiente Reflx vs Ángulo Incidencia (Pol. H)

#### 2.4.1 Modelo a 2 rayos: directo y reflejado en el suelo

Partiremos de un modelo a dos rayos para nuestro modelo de propagación, y mediante teoría de imágenes se puede confeccionar una representación como Fig.8a.

Los parámetros que más nos interesan a la hora de programar nuestro modelo son, la altura del transmisor y receptor, el ángulo de incidencia de la onda con el suelo, la distancia entre el transmisor y receptor y la longitud del camino recorrida tanto por el rayo directo ( $r_{dir}$ ) como por el rayo reflejado en el suelo ( $r_{ref}$ ).

La fórmula que con la cual hallaremos el valor de la permitividad compleja ( $\epsilon''$ ) que usaremos para determinar el coeficiente de reflexión en el suelo aparece en el artículo [2]:

$$\epsilon'' = -60 \cdot 0.005 \cdot \lambda \quad (17)$$

La función de transferencia, a partir de (5) y (7), queda como:

$$H_t(f, d) = \frac{c}{4\pi f} \left( \frac{e^{-jkr_{dir}}}{r_{dir}} + R_s \frac{e^{-jkr_{ref}}}{r_{ref}} \right) \quad (18)$$

Vamos a calcular las pérdidas de propagación con los parámetros utilizados en el artículo [5]. En este artículo las pérdidas son de banda estrecha, es decir, a una frecuencia determinada. Por ello, vamos a utilizar la expresión (37) con  $N=1$ , junto con la ecuación (36).

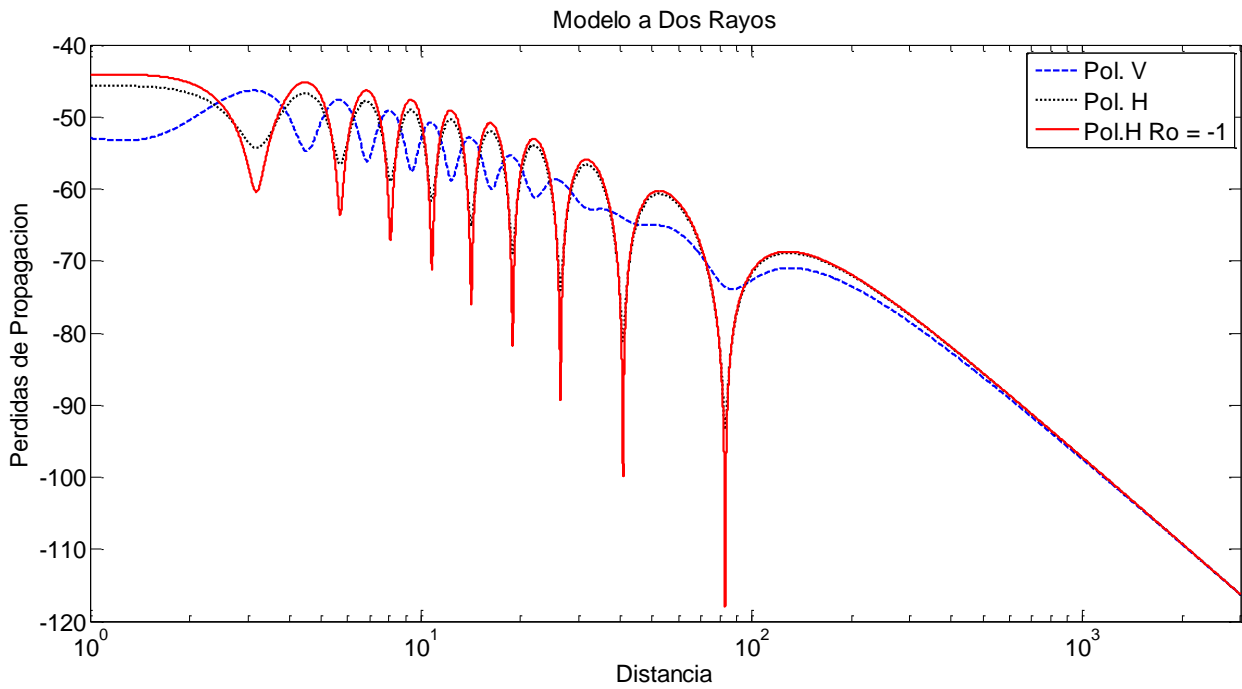


Figura 6. Modelo a dos rayos para polarización vertical y horizontal (900 MHz)

Los resultados son satisfactorios, los niveles de potencia son muy similares excepto en alguno de los desvanecimientos.

Tomamos los valores de [5] para Fig. 4 y lo probamos de nuevo en nuestro modelo:

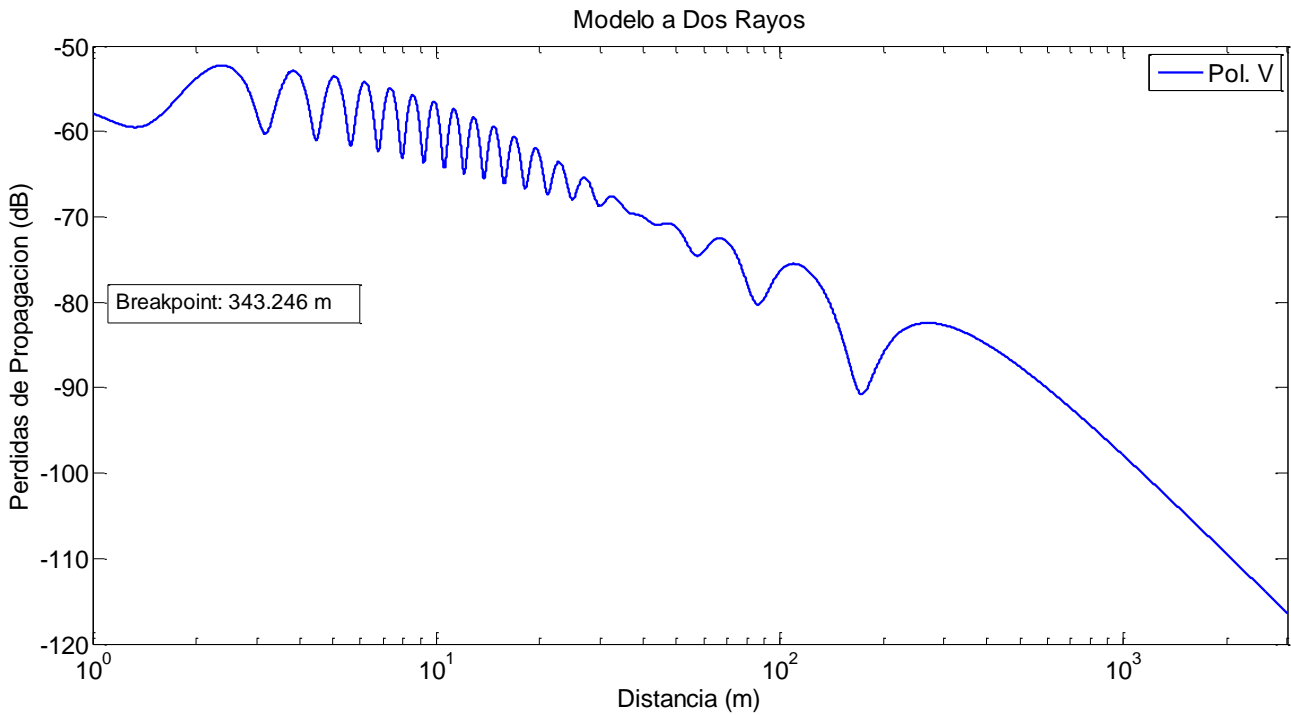


Figura 7. Modelo a dos rayos para polarización horizontal (1850 MHz)

Las pérdidas para 1850 MHz se corresponden con lo visto en el artículo [5], lo cual reafirma que nuestro modelo funciona de forma adecuada.

Se observa aquí un fenómeno llamado “*breakpoint*” es decir, una distancia a partir de la cual ya no se asegura el despeje del primer elipsoide de Fresnel, obstruyendo el suelo esta primera zona de Fresnel, aumentando las pérdidas de camino. Haciendo uso de la expresión del artículo de [5] para saber a qué distancia se produce esta obstrucción en función de la altura de las antenas y la frecuencia de trabajo:

$$d = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(\Sigma^2 - \Delta^2)^2 - 2(\Sigma^2 + \Delta^2) \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{4}\right)^4} \quad (19)$$

$$\Sigma = h_{tx} + h_{rx} \quad (20)$$

$$\Delta = h_{tx} - h_{rx} \quad (21)$$

A altas frecuencias se puede simplificar la expresión (19), quedando:

$$d = \frac{4h_{tx}h_{rx}}{\lambda} \quad (22)$$

A continuación, vamos a comparar las pérdidas medidas con las calculadas en banda ancha y banda estrecha.

En la Fig. 15 se han representado las pérdidas de propagación en función de la distancia entre el transmisor y el receptor para banda estrecha a la frecuencia de 3.5GHz y las de banda ancha a la frecuencia central de 3.5 GHz y un ancho de banda de 1 GHz.

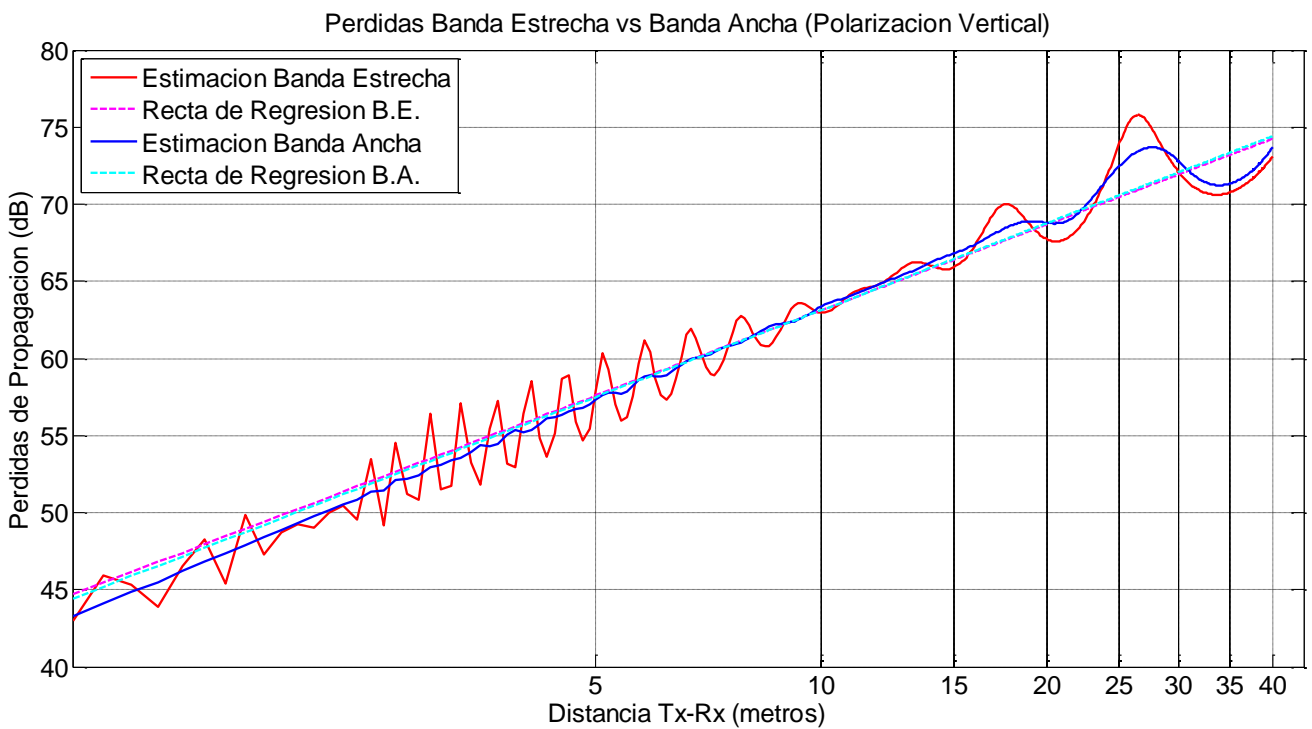


Figura 8. Comparación Pérdidas Banda Ancha y Banda Estrecha (3.5 GHz)

Haremos uso también del modelo de ajuste CI de las pérdidas de camino con distancia de referencia en espacio libre, para compararlo con nuestro modelo más adelante. Podemos definir estas pérdidas como:

$$L(dB) = L(d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \chi_{\sigma} \quad (23)$$

$d$ : Distancia entre transmisor y receptor.

$d_0$ : Distancia de referencia.

$L(d_0)$ : Pérdidas de propagación en espacio libre para una distancia  $d_0$ .

$\chi_\sigma$ : Variable aleatoria de media cero y desviación estándar  $\sigma$ .

$n$ : Exponente de pérdidas.

## 2.5. Coeficientes de Reflexión en los árboles

El coeficiente de reflexión en los árboles dependerá de las permitividades dieléctricas transversales y longitudinales, las hallaremos a partir de las susceptibilidades magnéticas:

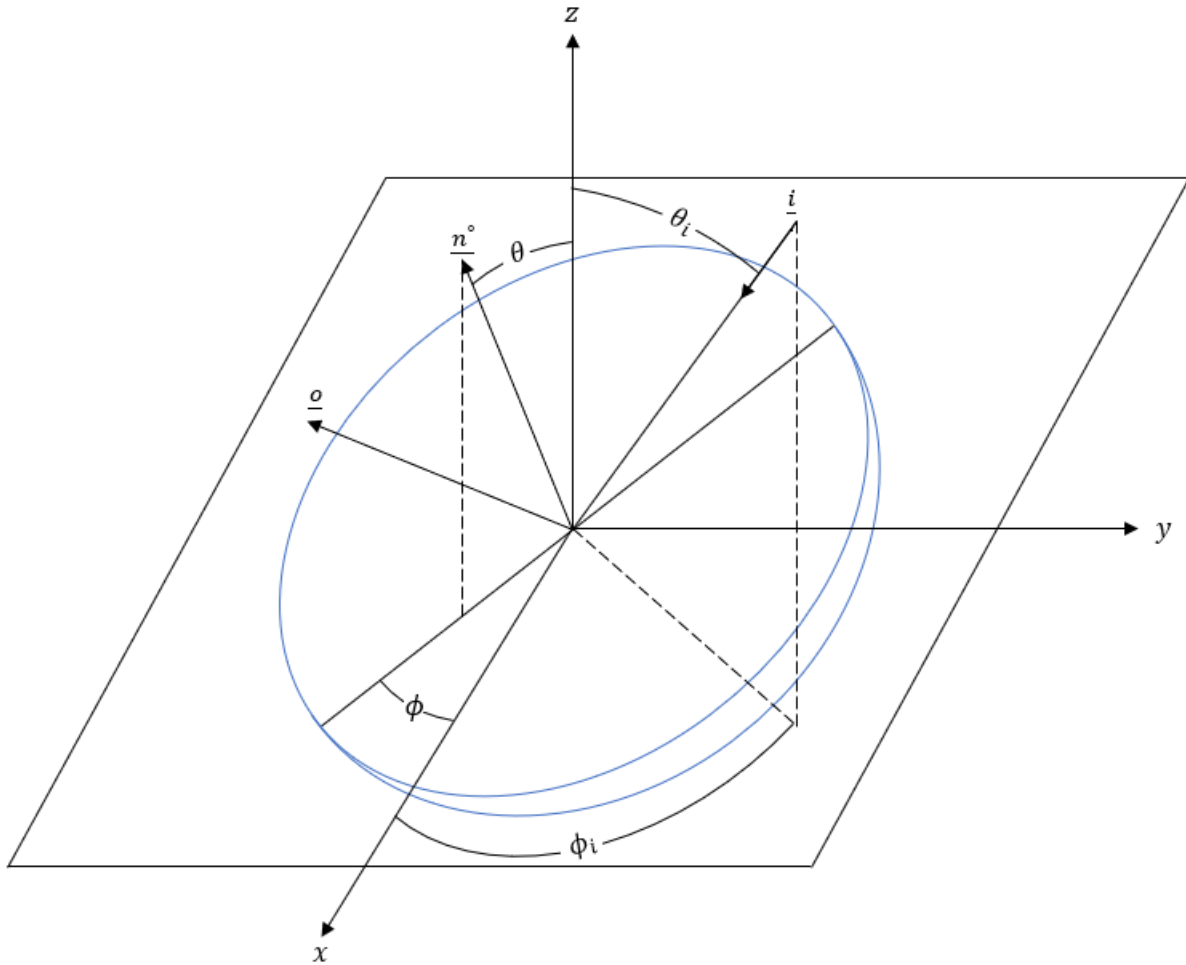


Figura 9. Circular Disc Scattering Geometry

Obtenemos las susceptibilidades a través de las siguientes expresiones extraídas de [6]:

$$\chi_{hh} = \pi\chi_l\rho a^2 t \left[ 1 - \frac{\chi_l}{2(1 + \chi_l)} I_1 \right] \quad (24)$$

$$\chi_{vv} = \pi\chi_l\rho a^2 t \left[ 1 - \frac{\chi_l}{2(1 + \chi_l)} (I_1 \cos^2 \theta_i + 2I_2 \sin^2 \theta_i) \right] \quad (25)$$

$$\chi_{hv} = 0 \quad (26)$$

$$\chi_{vh} = 0 \quad (27)$$

Donde  $\chi_l$  es un número complejo,  $a$  es el radio de la hoja,  $t$  es el grosor de la hoja,  $\rho$  es la densidad de hojas por metro cúbico,  $\theta_i$  orientación de las hojas en el ángulo de elevación.

Donde  $I_1$  e  $I_2$  son:

$$I_1 = \int_0^\pi d\theta p(\theta) \sin^2\theta \quad (28)$$

$$I_2 = \int_0^\pi d\theta p(\theta) \cos^2\theta \quad (29)$$

En [6] se proponen tres modelos para determinar las susceptibilidades, nosotros nos centraremos en los dos primeros, los valores de los parámetros anteriormente mencionados serían:

<b>MODELOS</b>	$\chi_l' = \epsilon_l' - 1$	$\chi_l'' = \epsilon_l''$
<i>I</i>	39	10
<i>II</i>	39	$1.8/f_{GHz}$ ( $\sigma = 0.1 \text{ mho/m}$ )

Tabla 1..Modelos Susceptibilidad Magnética

PARÁMETROS	
$\rho$	200 hojas/m <sup>3</sup>
$t$	1 mm
$a$	5 cm

Tabla 2. Parámetros Cálculo Susceptibilidad

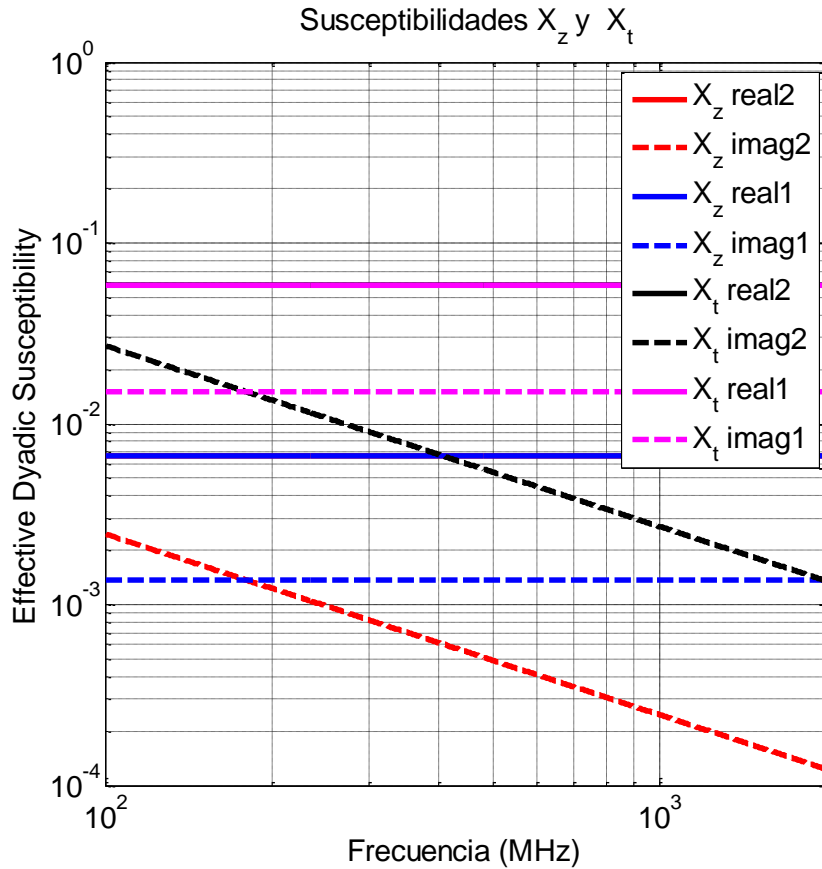


Figura 10. Susceptibilidades Magnéticas  $X_z$  y  $X_t$

Obtenemos los valores de las susceptibilidades para las frecuencias que nos interesen por medio del método de mínimos cuadrados. Una vez sabidas las susceptibilidades podremos calcular  $\epsilon_t$  y  $\epsilon_z$ :

$$\epsilon_t = \chi_{hh} + 1 \quad (30)$$

$$\epsilon_z = \chi_{vv} + 1 \quad (31)$$

Disponemos, ahora, de todos los parámetros necesarios para poder determinar los coeficientes de reflexión paralelo y perpendicular al plano de incidencia en un medio anisótropo:

$$R_{\parallel} = \frac{\sqrt{\varepsilon_t} \operatorname{sen}\psi - \left[1 - \frac{1}{\varepsilon_z} \cos^2\psi\right]^{1/2}}{\sqrt{\varepsilon_t} \operatorname{sen}\psi + \left[1 - \frac{1}{\varepsilon_z} \cos^2\psi\right]^{1/2}} \quad (32)$$

$$R_{\perp} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_t}} \operatorname{sen}\psi - \left[1 - \frac{1}{\varepsilon_z} \cos^2\psi\right]^{1/2}}{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_t}} \operatorname{sen}\psi + \left[1 - \frac{1}{\varepsilon_z} \cos^2\psi\right]^{1/2}} \quad (33)$$

Debido a la dispersión que se produce por las hojas de los limoneros debemos tener en cuenta que los rayos que choquen con ellas podrán generar otros, teniendo distintas reflexiones. Tendremos en cuenta una reflexión simple, como se muestra en Fig. 8b.

Se deben tener en cuenta los valores de la permitividad dieléctrica en las hojas, nos basaremos en el artículo [1] para extender sus medidas de forma aproximada a banda ancha (en este caso a 3.5 GHz) mediante el método de mínimos cuadrados. En Anexo A se puede observar el proceso seguido para la obtención de los valores de la permitividad.

Comparamos una vez más el ángulo de incidencia con el coeficiente de reflexión para cada una de las dos polarizaciones, haciendo uso de (32) y (33):

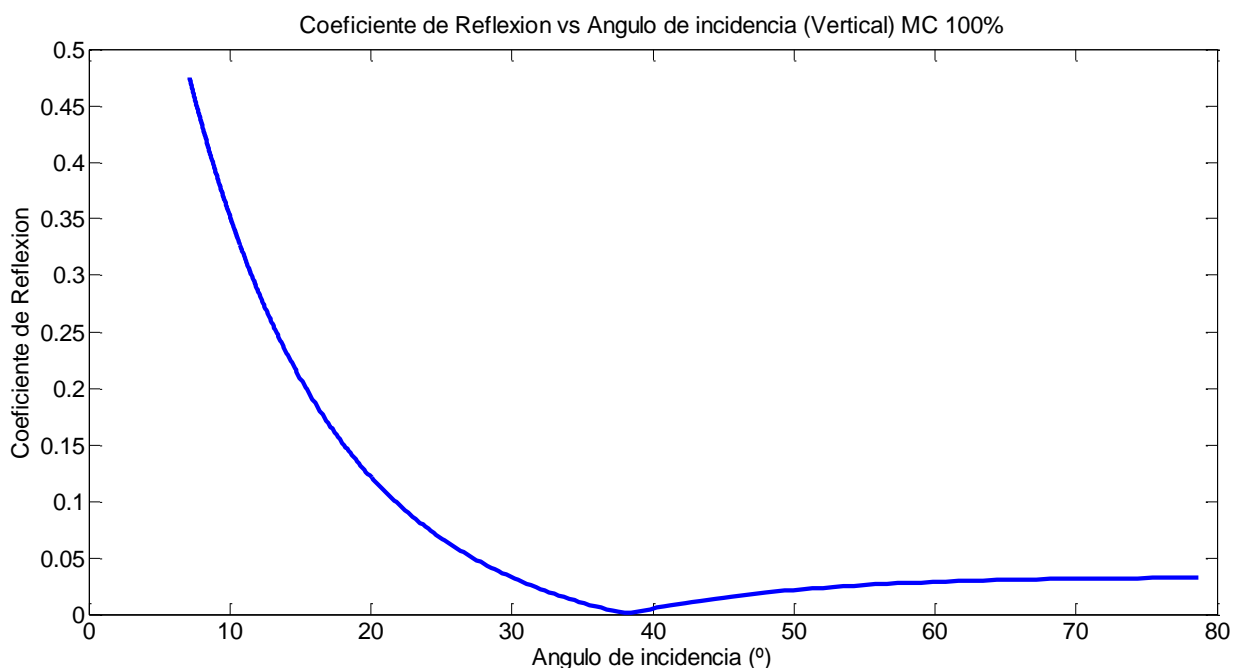




Figura 11. Coeficiente Refl vs Ángulo Incidencia MC 100% (Pol. V)

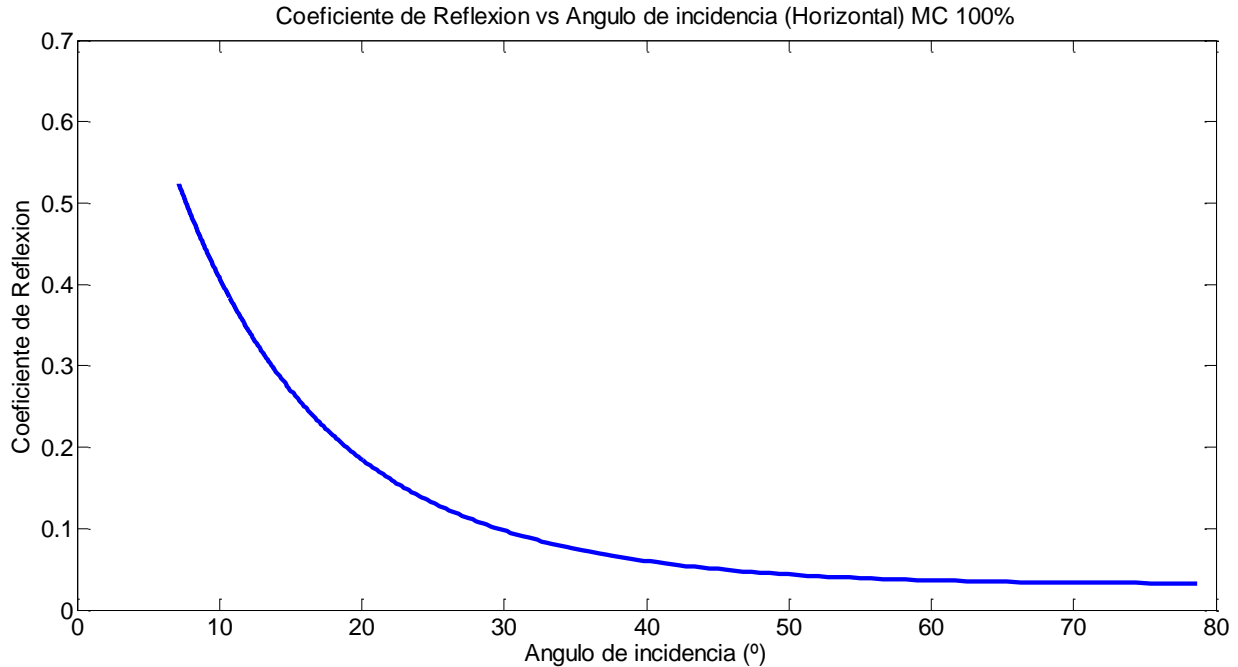


Figura 12. Coeficiente Refl vs Ángulo Incidencia MC 100% (Pol. H)

Una vez que hemos visto los mecanismos de propagación, las contribuciones y cómo vamos a hacer uso de ello en nuestro modelo, queda presentar cómo podremos obtener los parámetros de pérdidas, PDP y  $\tau_{rms}$ .

## 2.6. Función de transferencia teórica

La función de transferencia teórica se define como:

$$H_t(f, d) = \frac{\lambda}{4\pi} \sum_{i=1}^M \left[ \sum_{j=1}^{n_i} \frac{E_{ij}(f, d)}{E_0} \right] \quad (34)$$

Siendo  $E_{ij}(f)$  el campo recibido por cada contribución, siendo  $i$  el tipo de rayo (directo, reflejado, etc.) y  $n_i$  el número de rayos de cada tipo que se reciben (en este caso, sólo será uno).

Si queremos obtener la función de transferencia para un canal de banda ancha sumaremos todas las funciones de transferencias de las frecuencias de la banda, en el dominio de la frecuencia, tanto en fase como en amplitud.

Las pérdidas de propagación (en dB) se calculan a partir de la función de transferencia teórica como:

$$PL_t(d) = -10\log_{10} \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|H_t(f_n, d)|^2}{g_{Tx}(f_n)g_{Rx}(f_n)} \right) \quad (35)$$

Si la ganancia de las antenas se considera independiente de la frecuencia, las pérdidas de propagación quedan:

$$PL_t(d) = -10\log_{10} \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_t(f_n, d)|^2 \right) \quad (36)$$

## 2.7. Perfil de retardo y dispersión temporal

El perfil de retardo se calculará de forma similar al que se hace en las medidas, a partir del módulo al cuadrado de la transformada inversa de Fourier de la función de transferencia teórica:

$$PDP(\tau, d) = |IDFT^{-1}(H_t(f, d))|^2 \quad (37)$$

Y el  $\tau_{rms}$  teórico de [2]:

$$\tau_{rms}(d) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N PDP(\tau_n, d) \cdot \tau_n^2}{\sum_{n=1}^N PDP(\tau_n, d)} - \left( \frac{\sum_{n=1}^N PDP(\tau_n, d) \cdot \tau_n}{\sum_{n=1}^N PDP(\tau_n, d)} \right)^2} \quad (38)$$

### 3. ENTORNO DE PROPAGACIÓN Y MEDIDAS DISPONIBLES

En este capítulo se detallará el entorno y el equipo con el cual las medidas fueron obtenidas, así como las expresiones teóricas a través de las cuales se mostrarán las pérdidas de propagación y los perfiles de retardo.

#### 3.1. Entorno de propagación

En este capítulo se mostrará el entorno en el que se realizaron las medidas en campo, las cuales se hicieron en una plantación de limoneros, ambas antenas (transmisora y receptora) se encontraban entre dos hileras, la separación entre cada antena los dos árboles laterales era de 1,2 m, así como el ancho de los limoneros (midiendo el ancho del follaje) sería de 3 m. Se dispusieron las antenas a distintas distancias para medir las pérdidas:

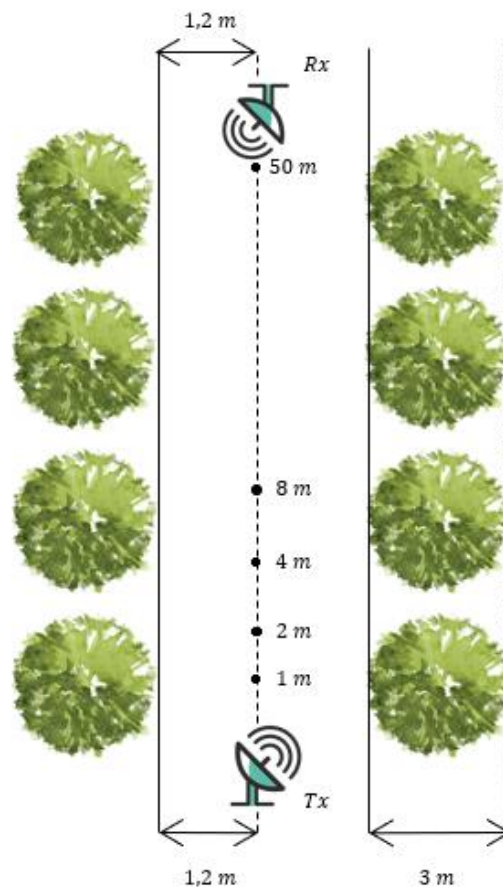


Figura 13. Entorno de propagación

A continuación, veremos unas imágenes del día que se tomaron las medidas [7]:



*Figura 14. Antena Transmisora y Receptora entre limoneros*



*Figura 15. Ajuste de la distancia*

Se observa la disposición del entorno comentada anteriormente, con las antenas situadas en el pasillo central entre dos hileras de limoneros, así con el VNA desde donde se generará la señal y se almacenarán los datos recibidos por la antena receptora. Quedando una de ellas fija, mientras la otra se va desplazando, pasando por las distancias de separación entre ellas que nos interesan.



*Figura 16. Imagen de las antenas utilizadas*



*Figura 17. Antena Omnidireccional y Bocina conectadas*

Se observan ambas antenas, tanto la omnidireccional como la de bocina, sobre mástiles de plástico. Tanto la antena transmisora como la receptora irán conectadas al VNA, una a cada uno de sus dos puertos.

La siguiente tabla muestra bajo qué condiciones se harán las distintas medidas respecto a las alturas de las antenas y las distancias de separación entre ellas:

	Altura (m)	Distancias (m)
Transmisor	1.5	-
Receptor	1.5	1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40

Tabla 3. Alturas y distancias de las antenas

### 3.2. Sistema de medidas

Haremos uso de dos tipos de antena, omnidireccional y bocina. En la Tabla 2. se muestran los valores de ancho de banda y número de muestras en cada una de las bandas de frecuencias medidas.

	3.5 GHz	28 GHz
Modelo antena	QOM-SL-0.8-40-K-SG-L	QSH-SL-26-40-K-20
Tipo antena	Omnidireccional	Directiva
Ancho de banda (GHz)	1	2
Número de muestras (N)	2001	2001

Tabla 4. Ancho de banda y número de muestras

El dispositivo que generará las señales y las procesará será el VNA (*Vector Network Analyzer*), el cual contiene tanto una fuente como un receptor conectados a un dispositivo a través del cual se detectan los cambios en las señales. Se encarga de medir tanto la potencia que se refleja en el transmisor como la que se detecta en el receptor, es decir, parámetros-S de reflexión y transmisión. En nuestro caso, nos interesa el parámetro  $S_{21}$ , esto es, la potencia que llega al puerto 2 (*RX*) en comparación con la que se transmite desde el puerto 1 (*TX*). Se puede encontrar información más detallada sobre el funcionamiento del *VNA* en [8].

Por tanto, en nuestro sistema de medidas contamos con dos antenas omnidireccionales y dos antenas de bocina (con un trípode ajustado a una altura de 1.5 m cada una) una ejerciendo el rol de transmisor y la otra de receptor, ambas se encuentran conectadas al VNA (*Vector Network Analyzer*). La antena transmisora se encuentra conectada al puerto de salida del VNA (donde se

genera la señal), conectados ambos a través de un cable de fibra óptica de más de 100 m. El receptor recibirá la señal transmitida y, a través de un cable de fibra óptica de 3 m, el analizador de redes vectoriales mide el parámetro de dispersión  $s_{21}(f)$ , pudiendo extraerlos a través de *Floppy Disk* en un formato adecuado para su posterior uso en MATLAB.

### 3.3. Ejemplo de medidas disponibles

Se representarán las medidas que disponemos, a modo de ejemplo, en la banda de 3.5 GHz.

#### PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN

En la Fig. 6 se representan las pérdidas de propagación calculadas con la ecuación (1) en función de la distancia entre transmisor y receptor para las medidas efectuadas en el campo de limoneros en la banda de frecuencias de 3.5GHz.

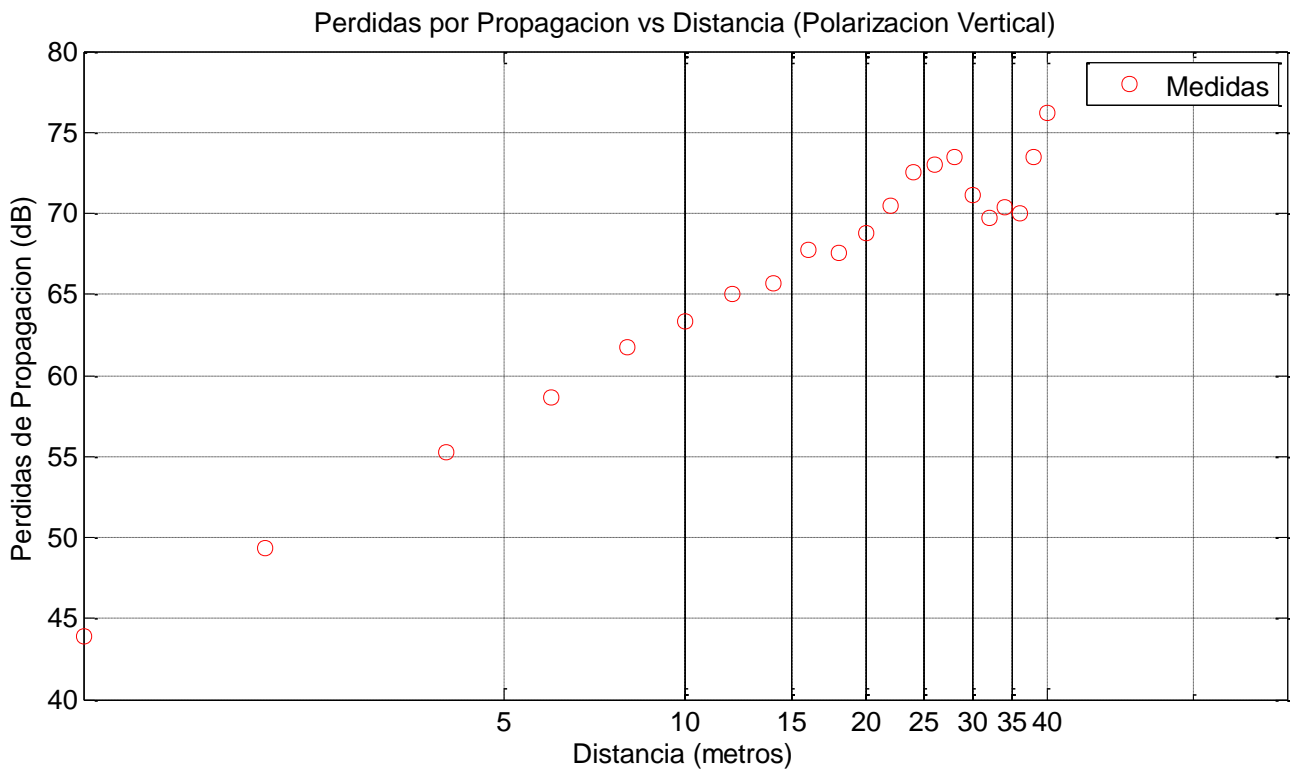


Figura 18. Pérdidas de Propagación Omni. Polarización V (3,5 GHz) en función de la distancia entre el transmisor y el receptor.

### PERFIL DE RETARDO Y DISPERSIÓN TEMPORAL

En la Fig. 7 se ha representado el PDP en función de la distancia calculada como  $\frac{\tau}{c}$ , siendo  $c$  la velocidad de propagación en el medio. Observamos, una contribución principal que sería la debida al rayo directo, y otras debidas a reflexiones, etc. en el entorno de propagación.

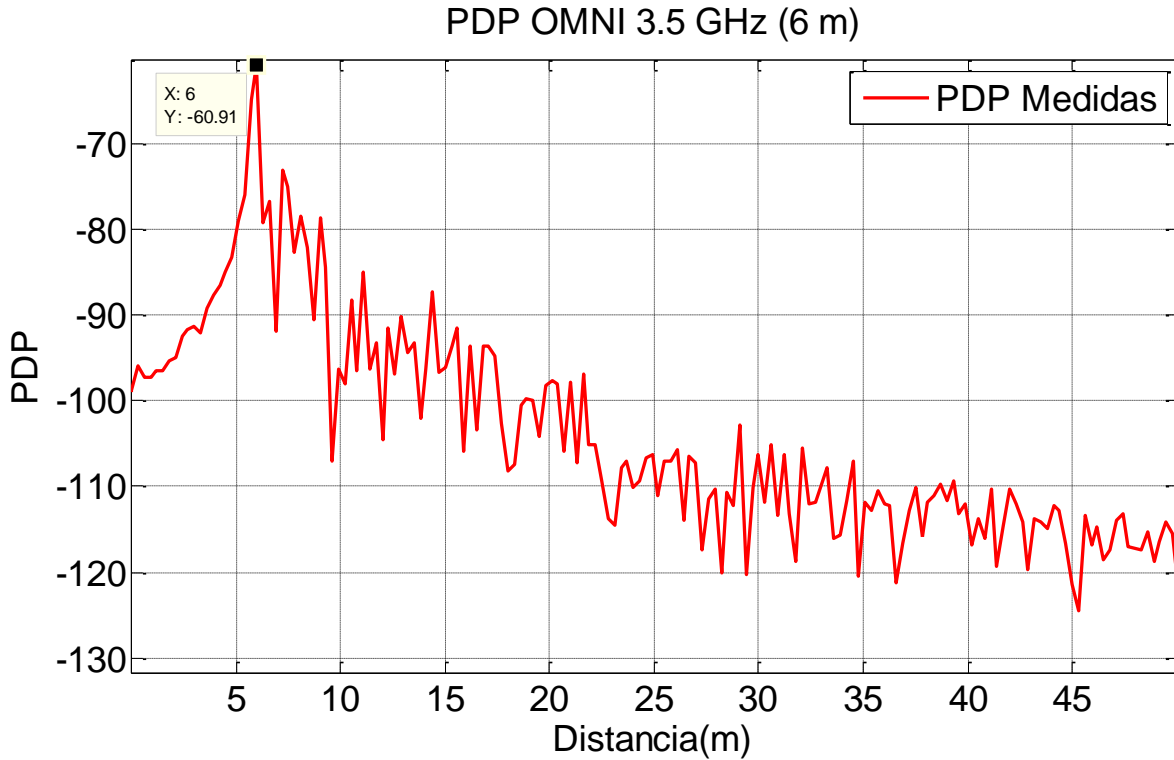


Figura 19. PDP Medido Omni. Polarización V (3,5 GHz);  $d=6$  m.

Se aprecia una contribución cercana a 6 metros que es superior en potencia a las demás, el rayo directo, el cual contiene la mayor parte de la potencia de la señal.



## 4. COMPARACIÓN ENTRE MEDIDAS Y MODELO PROPUESTO

En este cuarto capítulo se mostrarán los resultados obtenidos producto de nuestro modelo, comparándolos con los de las medidas para las pérdidas de propagación, el PDP (*Power Delay Profile*) y  $\tau_{rms}$ . Mostraremos todo esto para distintas densidades de hojas por metro cúbico (200, 300, 400) y *Moisture Content*, es decir, el porcentaje de humedad de las hojas.

### 4.1. BANDA DE 3.5 GHz

#### 4.1.1. Pérdidas de propagación

##### Modelo a dos rayos (directo y reflejado en el suelo)

A continuación, se mostrarán unas gráficas donde hemos desarrollado nuestro modelo a dos rayos y comprobaremos su fidelidad respecto a las medidas tomadas en campo. Haciendo uso de las expresiones teóricas para calcular las pérdidas, tanto del rayo directo como del reflejado, las agrupamos para saber las pérdidas totales para cada distancia mediante la expresión (15).

Con los parámetros establecidos en las tablas (3) y (4) programamos las medidas teóricas. También hemos programado el modelo CI con distancia de referencia en espacio libre haciendo uso de la formulación (23).

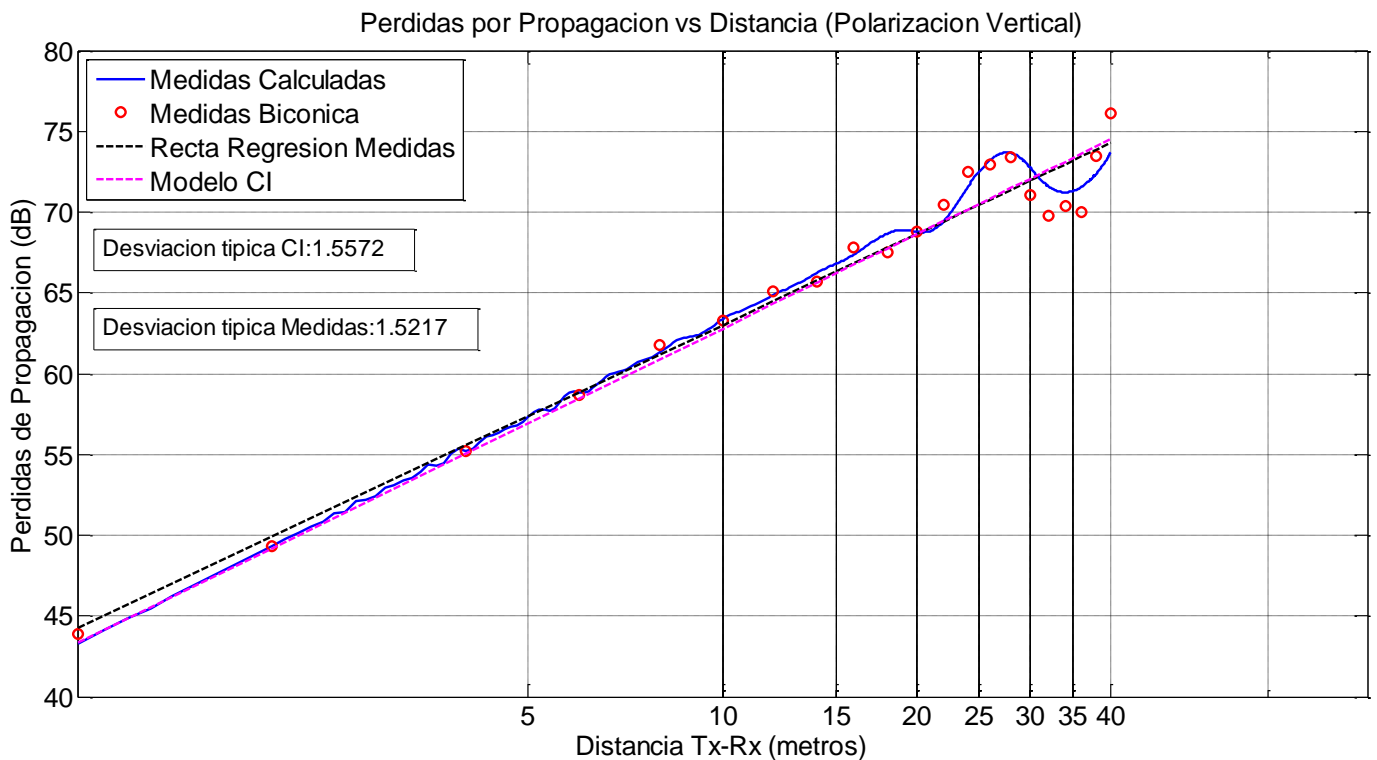


Figura 20. Comparación Pérdidas Omni. Pol. V (3.5 GHz)

	<i>FSPL (dB)</i>	<i>n</i>	<i>σ</i>
<i>Ajuste CI</i>	43.323	1.946	1.557
<i>Recta Regresión Medidas</i>	–	1.873	1.522

*Tabla 5. Pendientes y Desviaciones Estándar (3.5 GHz)*

Se observan buenos resultados para nuestras simulaciones. En nuestro caso las alturas de las antenas ( $h_{tx}$  y  $h_{rx}$ ) son iguales, 1.5 m, y la distancia a la que se daría el punto de ruptura sería mayor de 40 m, por tanto, no presenta un problema. Además, el modelo CI se asemeja mucho a la recta de regresión de las medidas, sobre todo a partir de los 15 m.

#### 4.1.2. Perfil de retardo y dispersión temporal

En el *Anexo A* se puede observar cómo calculamos los valores de la permitividad compleja de los limoneros para cada una de las bandas de frecuencia, el factor MC (Moisture Content) es muy relevante a la hora de aproximar nuestras permitividades, por eso dividiremos los resultados en base al porcentaje de humedad con el que se han calculado. La polarización utilizada para el rayo reflejado en el suelo es vertical, mientras la utilizada para las reflexiones simples en los árboles es horizontal.

Variamos los valores de la *tabla 4*, para  $t = 0.5 \text{ mm}$ ,  $a = 6 \text{ cm}$  y una densidad de hojas por metro cúbico de 200, 300 y 400.

**Moisture Content 100%.**

Observaremos ahora el PDP (Power Delay Profile) a 8 m, representando no sólo el medido y el teórico total, sino también la contribución del rayo directo, el reflejado en el suelo y las reflexiones simples en los árboles.

- Densidad ( $p$ ) = 200 hojas/m<sup>3</sup>

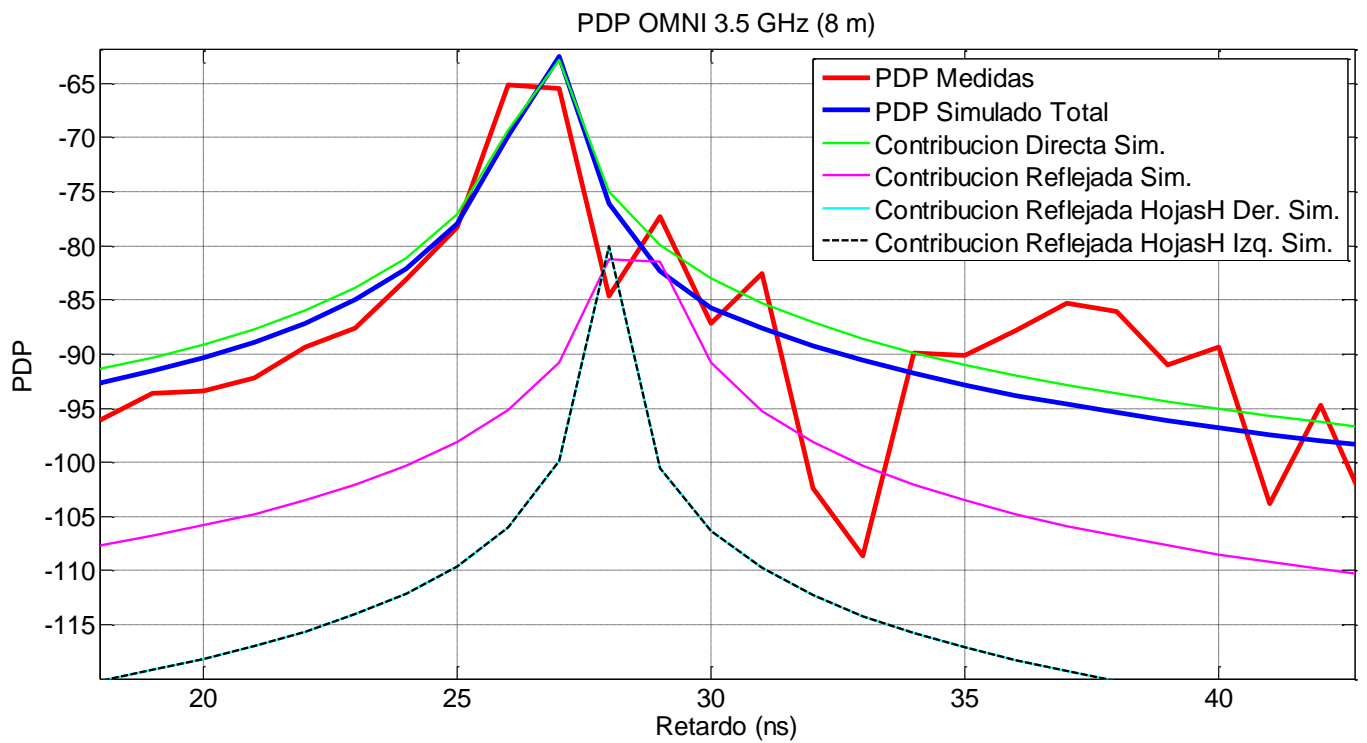


Figura 21. Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)

Se aprecia una buena aproximación por parte de nuestro modelo, donde la contribución del rayo directo tiene un retardo de 27 ns, mientras que la reflejada en el suelo tarda un poco más en llegar al receptor, tomándole unos 28 ns, así como con el retardo de la reflexión simple en los árboles, coincidiendo con el pico adyacente al principal del PDP medido. En cualquier caso, la correlación entre las medidas y el modelo es bastante elevada.

Repetimos el proceso anterior a la distancia de 40 m:

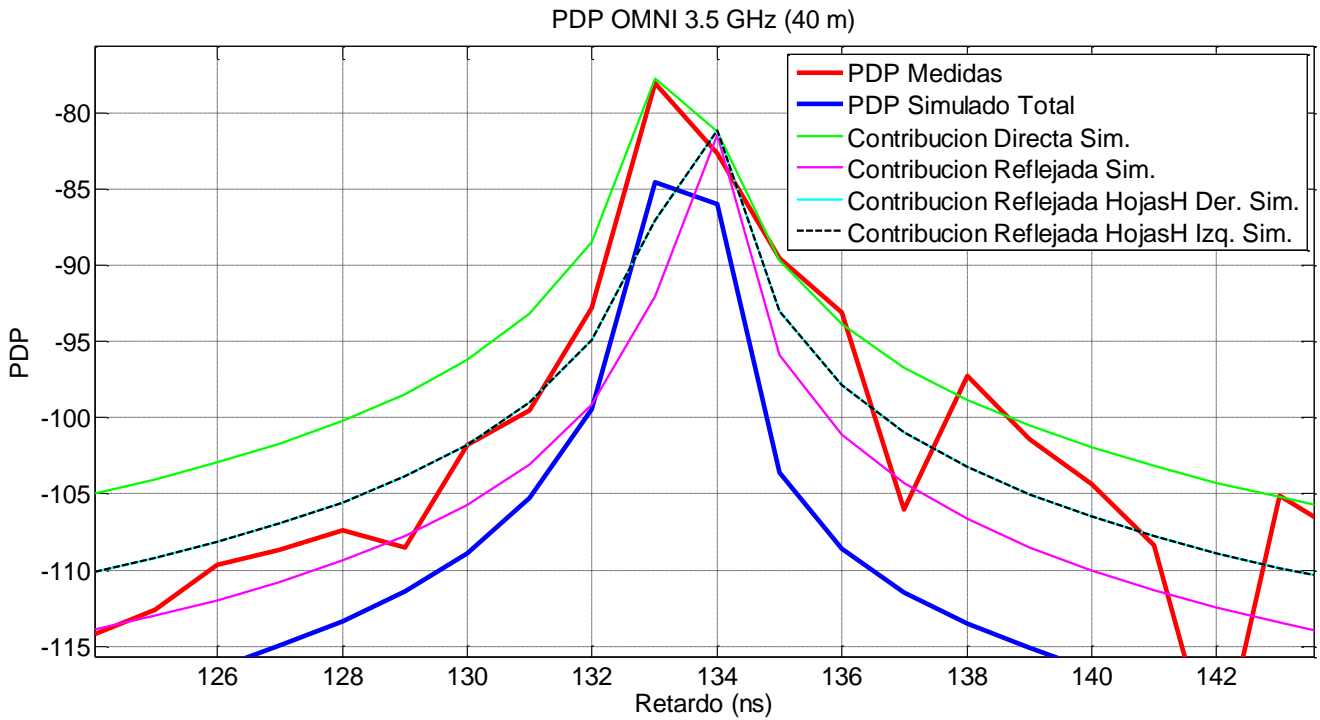


Figura 22. Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)

En este caso, de nuevo, el rayo directo determina la forma de nuestro PDP, ya que contiene la mayor cantidad de potencia, y lo hará recorriendo  $133.33 \text{ ns}$ , sin embargo, conforme las antenas se van separando, las distancias que recorren tanto el rayo directo como el reflejado y los rayos con reflexiones simples se van asemejando (comprobable usando la formulación mostrada en [2.3]) hasta llegar al punto donde el retardo de ambos caminos es muy similar, como sucede en este caso.

Habiendo calculado los PDP y los retardos para cada distancia podremos obtener el  $\tau_{rms}$  a partir de la definición (38).

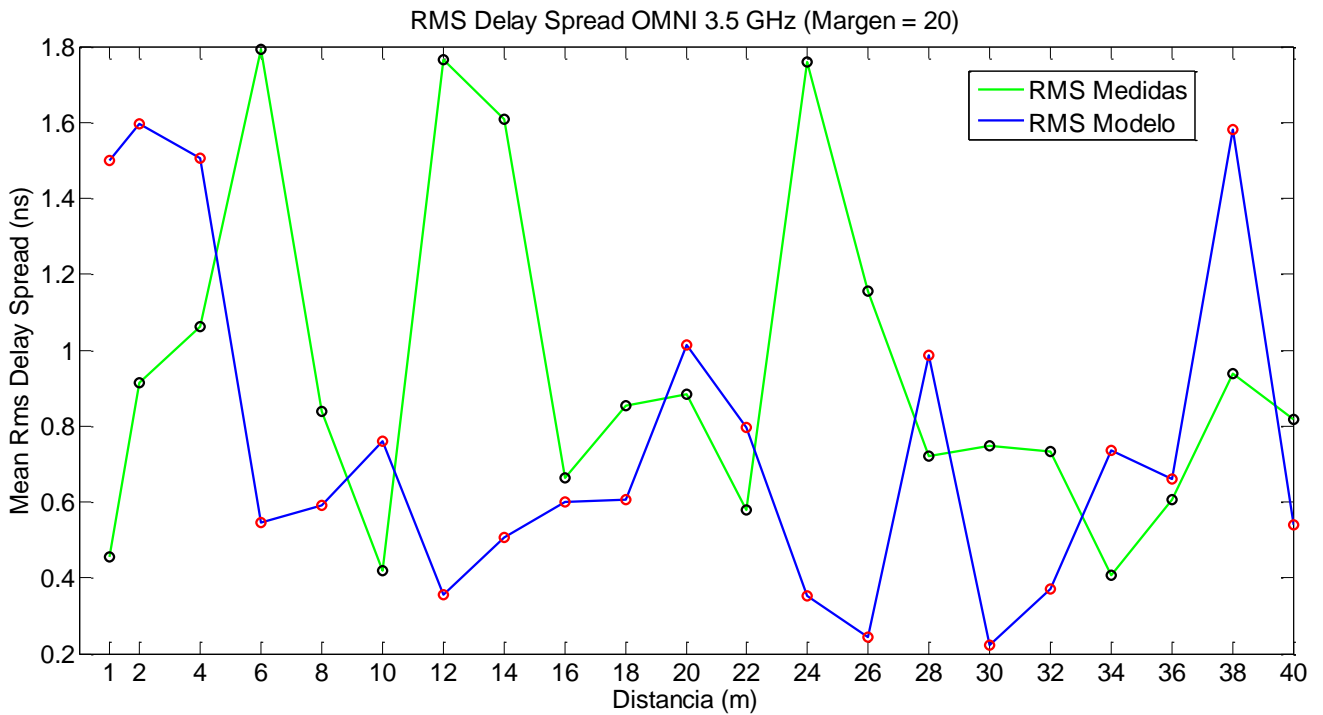


Figura 23. Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)

Aunque los resultados no coinciden en magnitud, sí lo hacen en las distancias, donde nuestro modelo responde de forma similar a lo medido, haciendo énfasis en los picos que se producen entre 10 m y 20 m, 24 m y 30 m y 35 m y 40 m. Hemos representado a partir de 1 m, sin embargo, no es sino hasta los 8 m que tenemos unos resultados interesantes (a distancias más cortas la dispersión del retardo debería tener una tendencia a ser menor) esto último es algo que ocurrirá en todas las gráficas relacionadas con el  $\tau_{rms}$  que veremos de aquí en adelante.

- Densidad ( $\rho$ ) = 300 *hojas/m*<sup>3</sup>

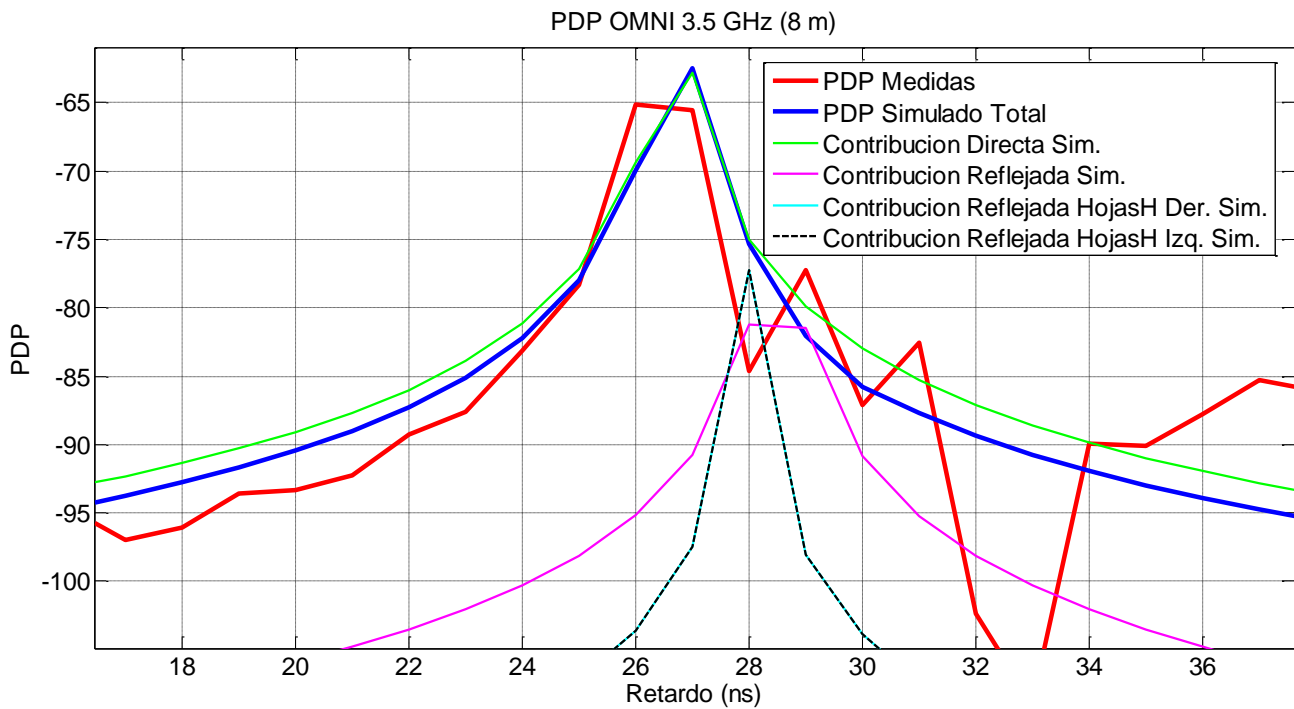


Figura 24. Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)

Observamos un comportamiento idéntico en cuanto al rayo directo y reflejado en el suelo, como cabría esperar ya que la densidad del medio anisótropo no afecta a éstos. Sin embargo, aunque es poco apreciable, la potencia del pico del rayo reflejado en las hojas ha aumentado, siendo de  $-77,27 \text{ dBm}$  para esta densidad, y  $-80,03 \text{ dBm}$  para la anterior ( $200 \text{ hojas/m}^3$ ).

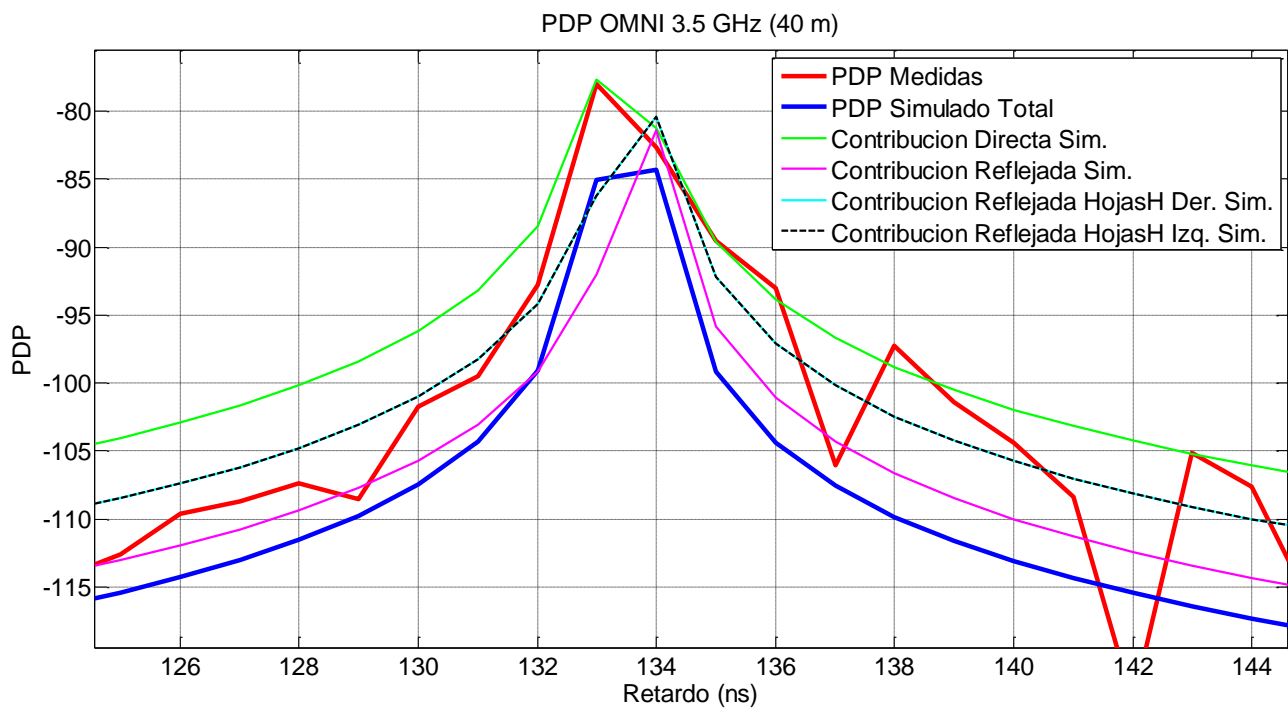


Figura 25. Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)

Para 40 m, tenemos un caso como el de 8 m, el rayo directo y reflejado en el suelo no se ven afectados por el cambio de densidad de las hojas, pero, de nuevo, la potencia de la componente reflejada en los árboles ha aumentado.

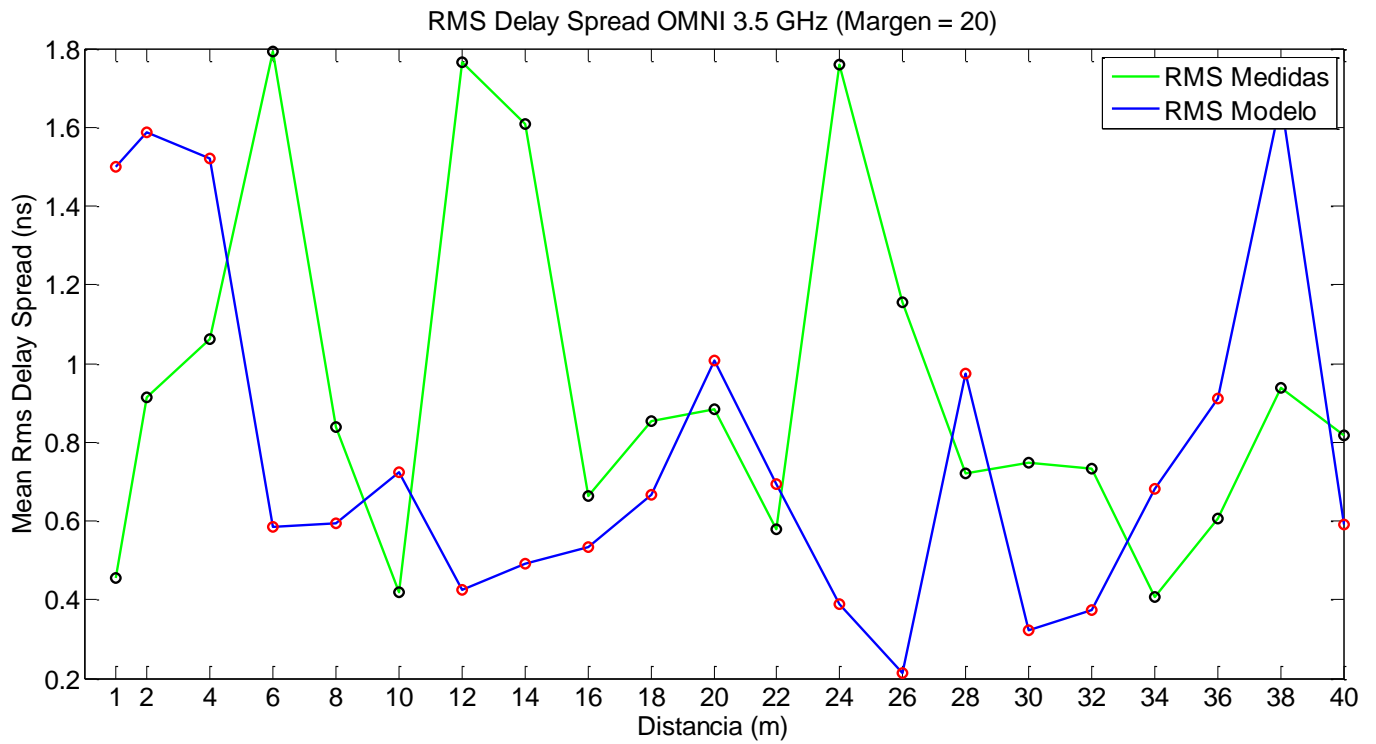


Figura 26. Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)

Observamos un aumento en la magnitud del  $\tau_{rms}$  con el aumento de la densidad de hojas en el limonero, manteniendo una forma semejante a la densidad anterior.



- Densidad ( $p$ ) = 400 hojas/ $m^3$

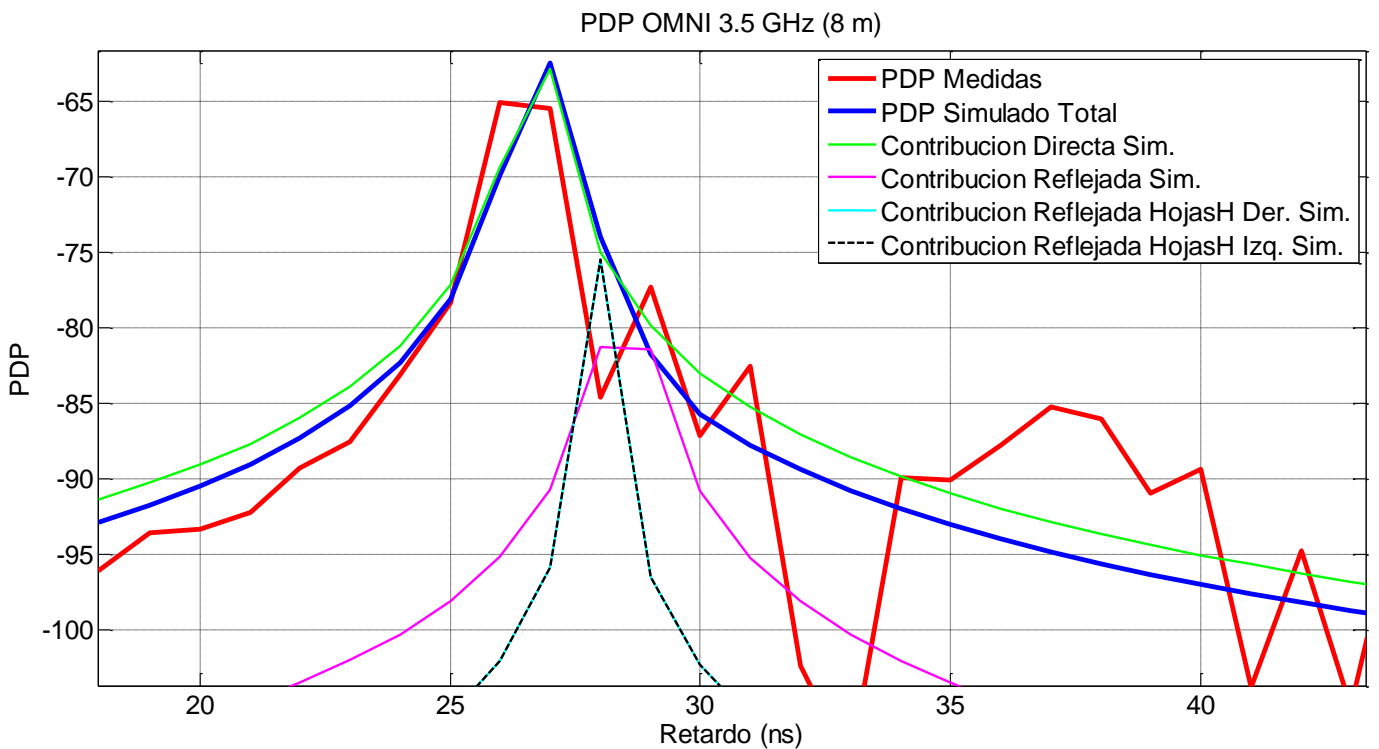


Figura 27. Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)

En este caso observamos lo mismo que en los anteriores, llegando ahora la potencia de nuestro rayo reflejado en los árboles a  $-75.47 \text{ dBm}$ . Esto ocurre ya que el aumento de la densidad conlleva valor mayor de las susceptibilidades (24) y (25), aumentando los valores de las permitividades transversales y longitudinales, (30) y (31), ascendiendo el valor de los coeficientes de reflexión (32) y (33), por tanto, la potencia perdida será menor.

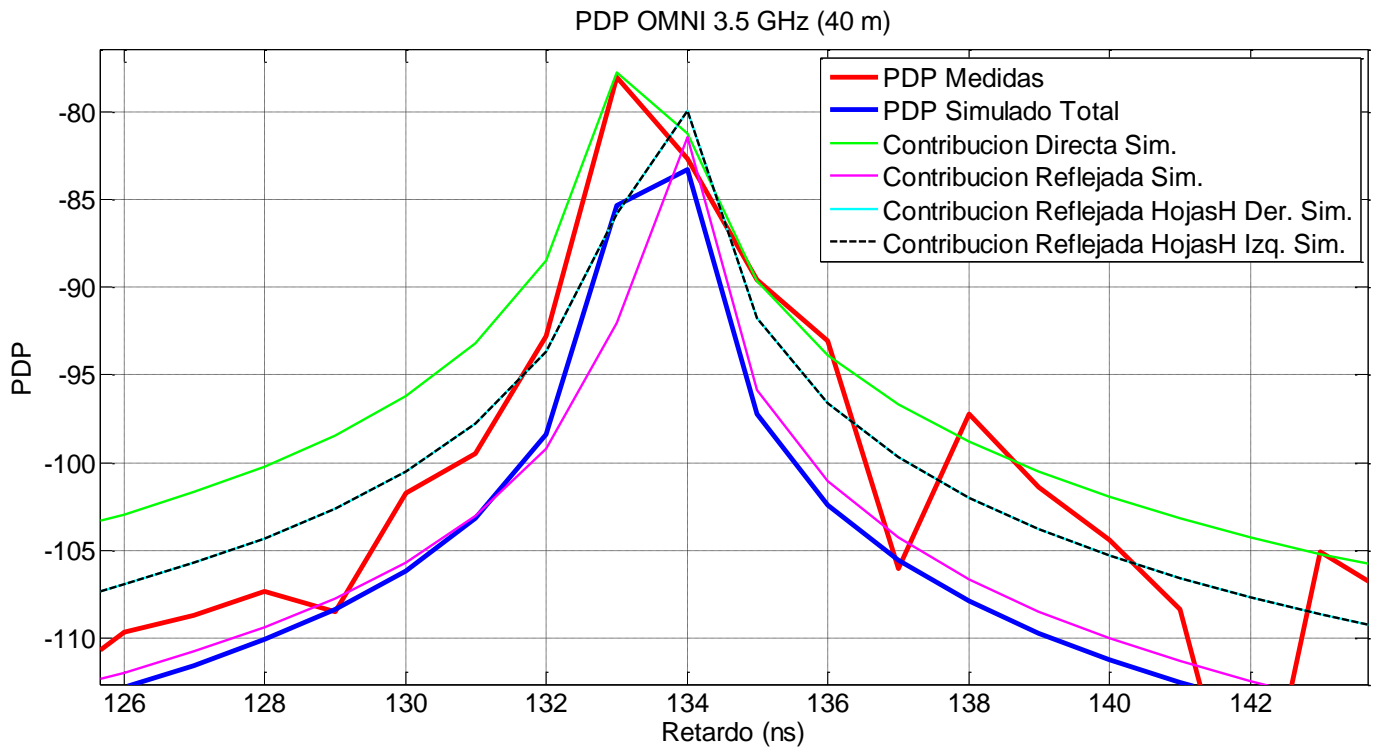


Figura 28. Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)

Una vez más, a 40 m se cumple la tendencia observada con anterioridad, el rayo reflejado en el medio anisótropo es detectado con una mayor potencia.

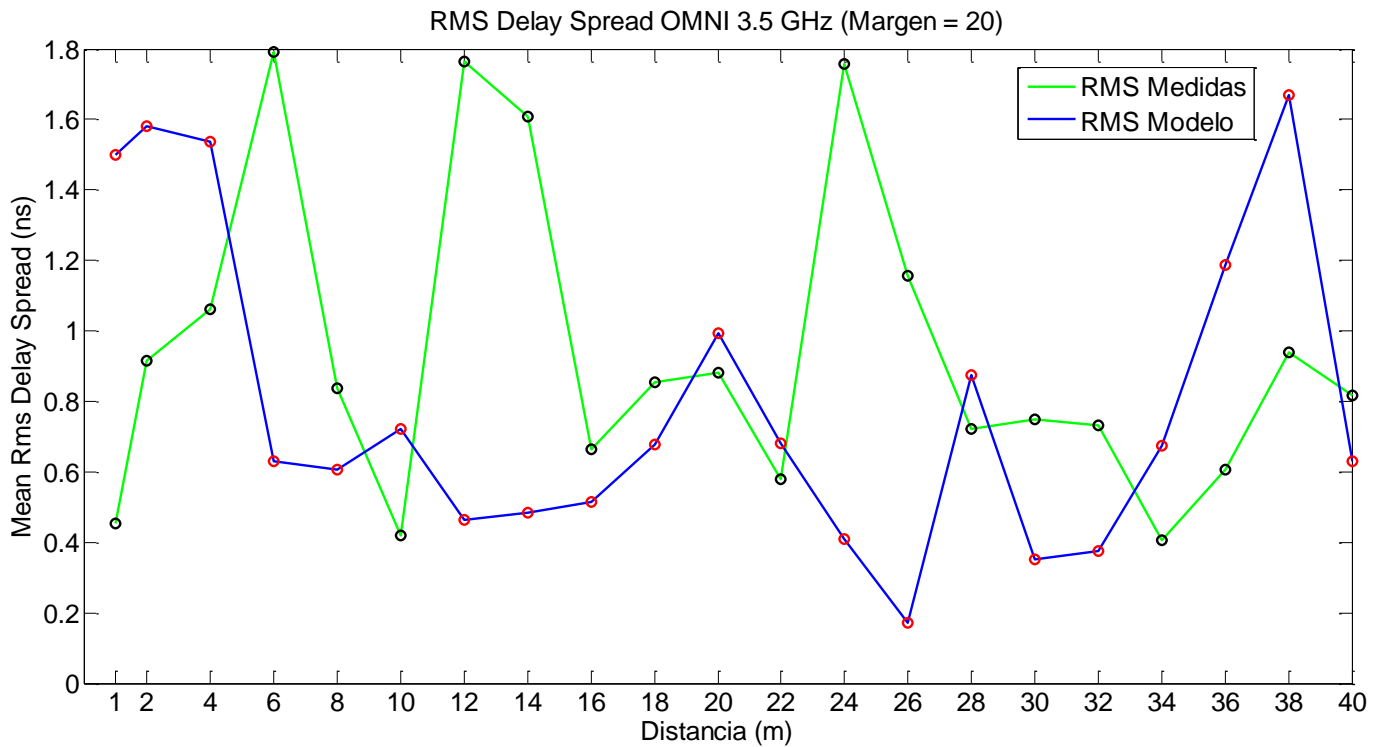


Figura 29. Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)

Una vez más, se aprecia un leve aumento de la dispersión del retardo de nuestro modelo.

Agrupando todos los valores obtenidos para cada caso:

<i>Mean RMS Delay Spread (ns) MC 100%</i>			
<i>Distancia (m)</i>	<i>Densidad (Hojas/m<sup>3</sup>)</i>		
	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>
<b>1</b>	1.50	1.50	1.50
<b>2</b>	1.60	1.59	1.58
<b>4</b>	1.51	1.52	1.54
<b>6</b>	0.54	0.59	0.63
<b>8</b>	0.59	0.59	0.61
<b>10</b>	0.76	0.72	0.72
<b>12</b>	0.35	0.43	0.46
<b>14</b>	0.51	0.49	0.48
<b>16</b>	0.60	0.53	0.51
<b>18</b>	0.61	0.67	0.68
<b>20</b>	1.01	1.01	1.00
<b>22</b>	0.80	0.69	0.68
<b>24</b>	0.35	0.38	0.41
<b>26</b>	0.24	0.21	0.17
<b>28</b>	1.00	0.97	0.87
<b>30</b>	0.22	0.32	0.35
<b>32</b>	0.37	0.37	0.38
<b>34</b>	0.73	0.68	0.67
<b>36</b>	0.66	0.91	1.19
<b>38</b>	1.58	1.67	1.67
<b>40</b>	0.54	0.59	0.63

Tabla 6.RMS 3.5 GHz (MC 100%)

Moisture Content 0%.

Observaremos ahora el PDP (Power Delay Profile) a 8 m, representando no sólo el medido y el teórico total, sino también la contribución del rayo directo, el reflejado en el suelo y las reflexiones simples y dobles en los árboles.

- Densidad ( $p$ ) = 200 hojas/ $m^3$

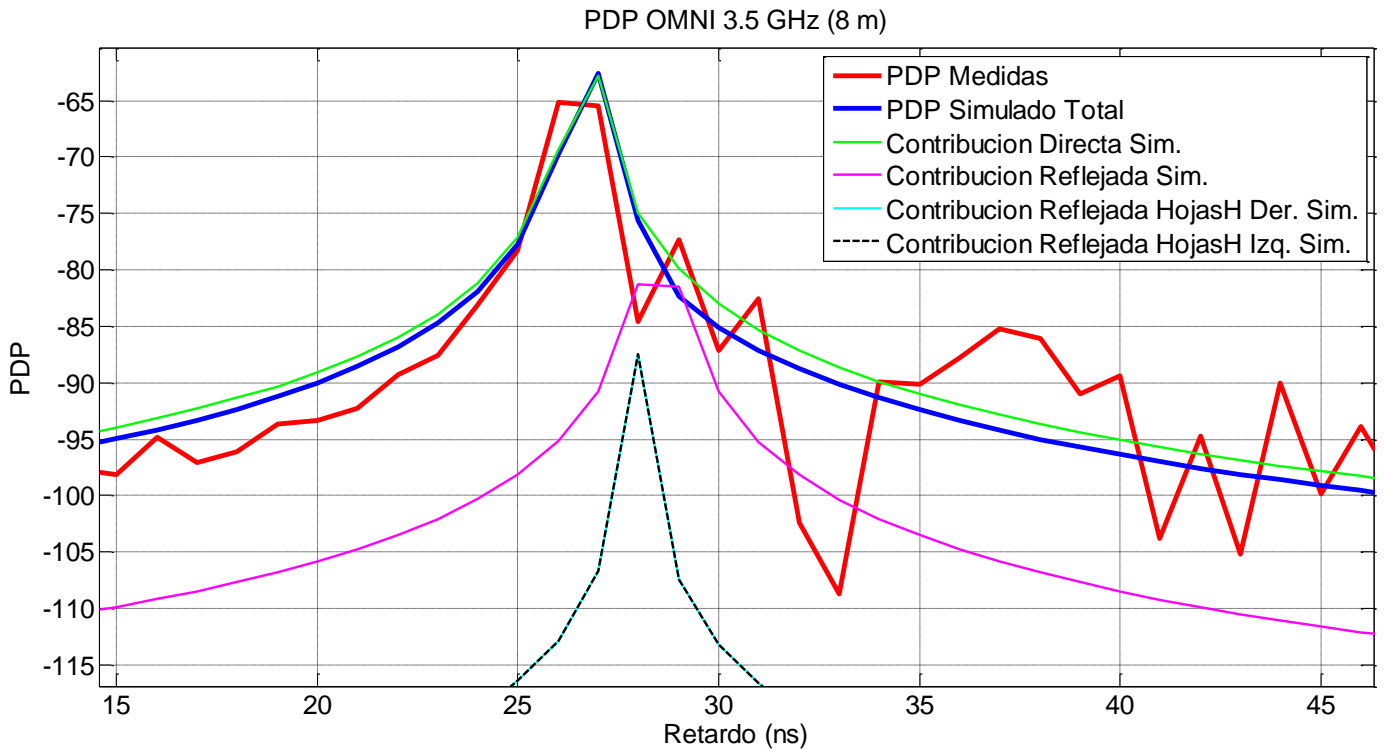


Figura 30.Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)

Las distancias que recorren los rayos para nuestros modelos es la misma que en el contexto anterior donde el rayo principal tarda 27 ns y el reflejado en el suelo 28 ns similar al retardo de la reflexión simple en los árboles, se observa un retardo que coincide con lo que se observa en el PDP medido, sin embargo la potencia de los rayos es menor, debido a que nuestro valor de la permitividad se reduce para este porcentaje de humedad en las hojas. En cualquier caso, existe una buena relación entre el modelo planteado y lo medido.

Repetimos el proceso anterior a la distancia de 40 m:

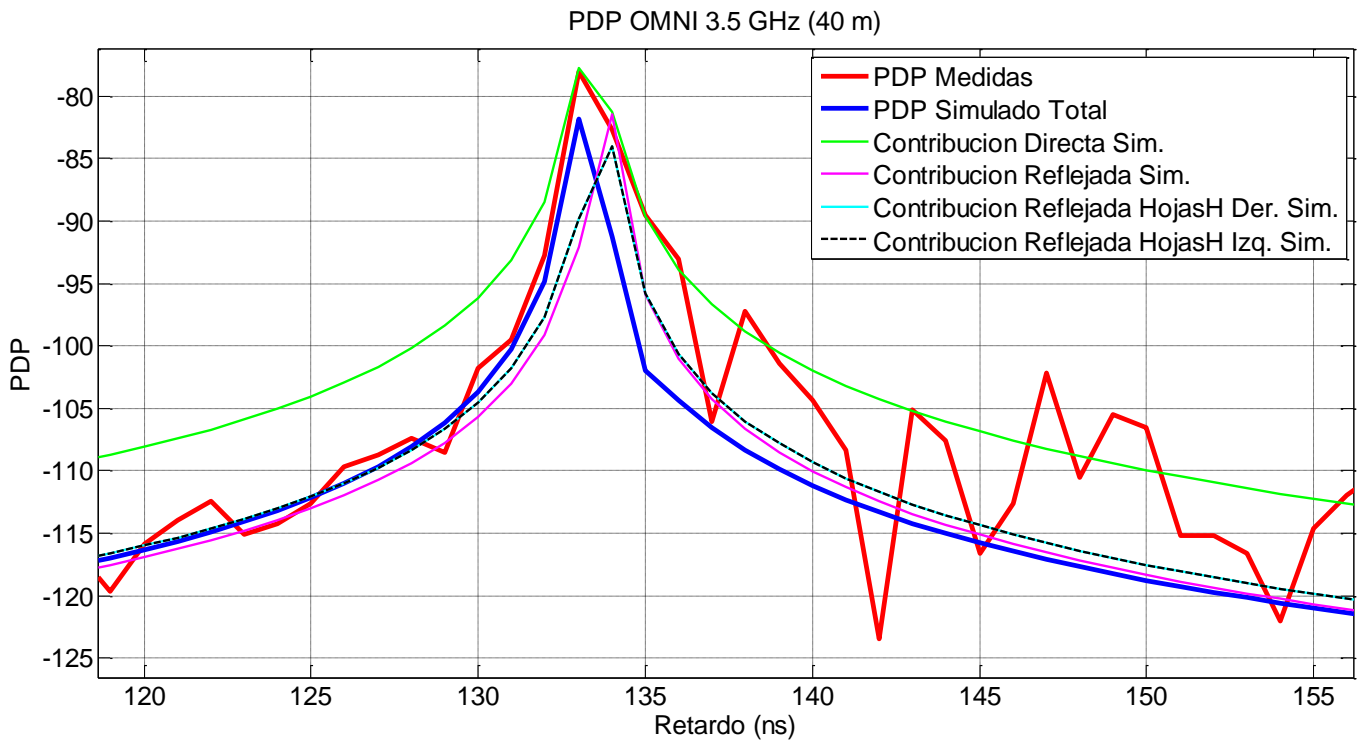


Figura 31. Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)

Una vez más, el rayo directo da forma a nuestro PDP y, como en el caso anterior, conforme la distancia entre transmisor y receptor aumenta el retardo del resto de contribuciones se van igualando, obteniendo una forma de la curva *PDP Simulado* similar a la medida.

Habiendo calculado los PDP y los retardos para cada distancia podremos obtener el  $\tau_{rms}$  a partir de la definición (2.3).

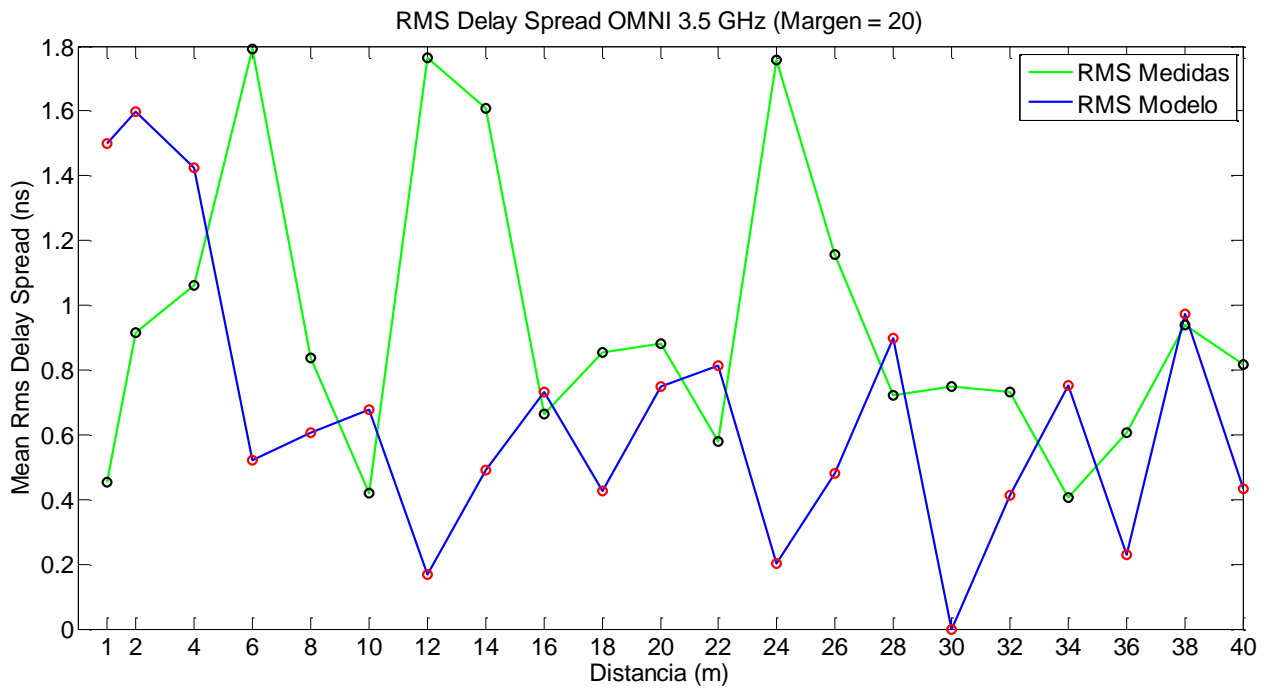


Figura 32. Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)

Se puede apreciar cierta coincidencia en los picos de los retardos con un cierto desplazamiento, pudiendo coincidir el pico de 16 m del modelo con el de 12 m de las medidas, o el de 28 m del modelo con el de 24 m de las medidas.

- Densidad ( $p$ ) = 300 hojas/m<sup>3</sup>

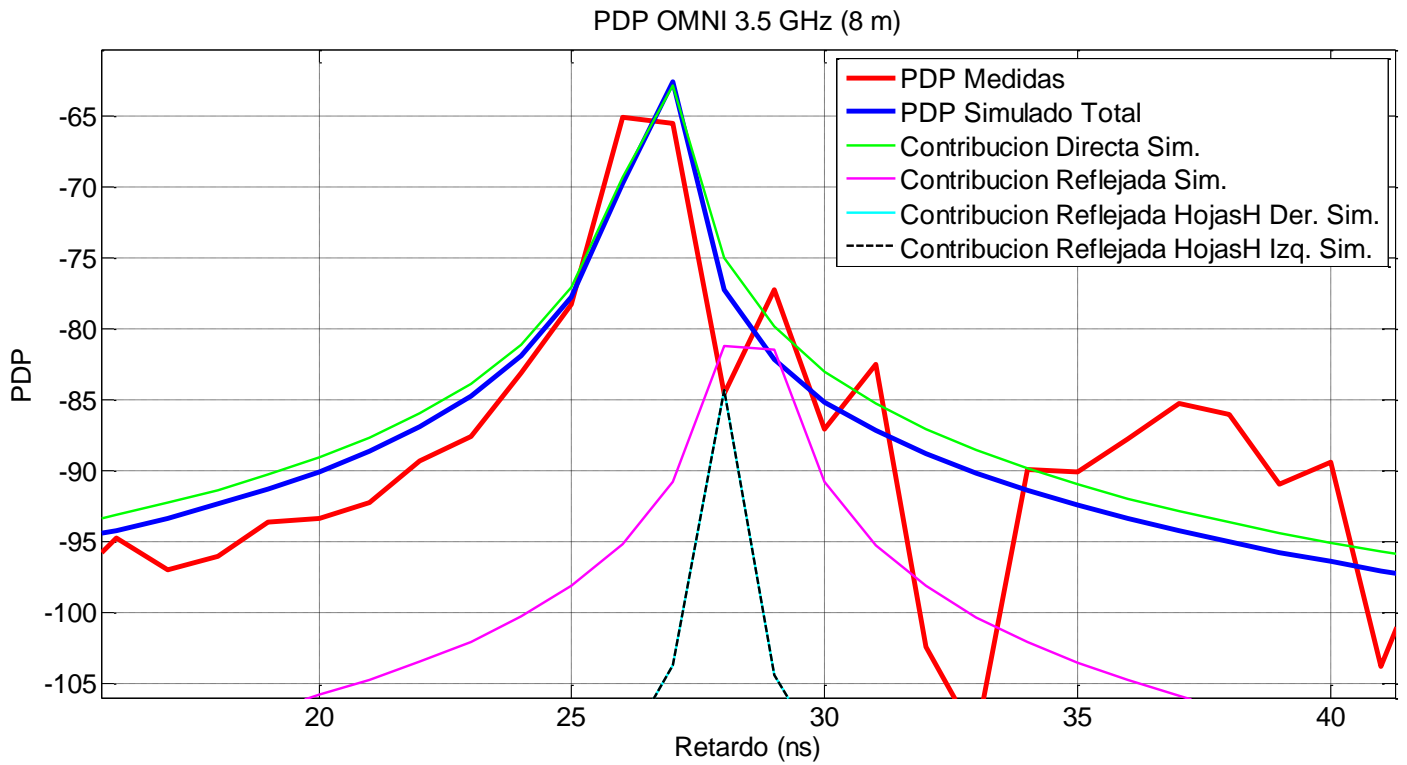


Figura 33. Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)

Observamos un comportamiento similar al anterior, pero con un nivel de potencia de la reflexión en los árboles de  $-84.33 \text{ dBm}$  en comparación a los  $-87.47 \text{ dBm}$  para una densidad de  $200 \text{ hojas/m}^3$ .

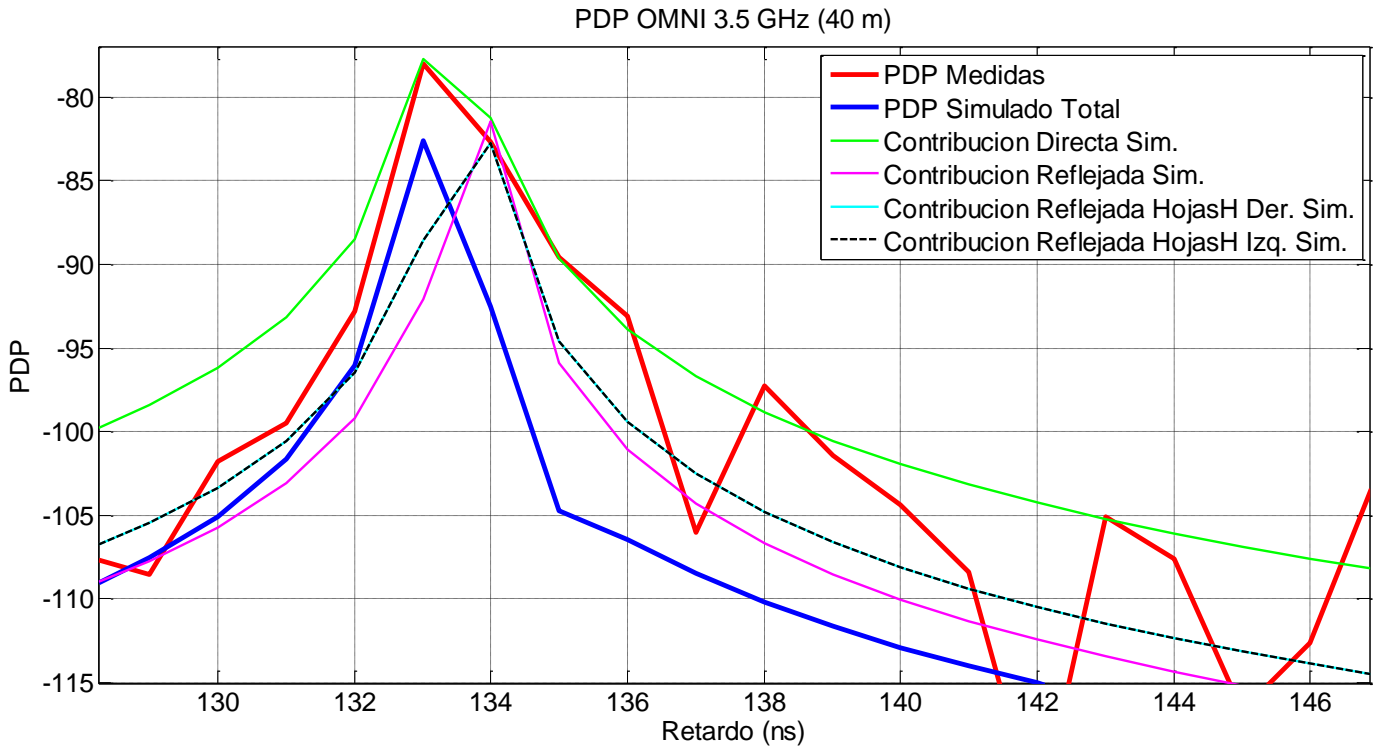


Figura 34. Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)

De nuevo, la diferencia de densidades se refleja en el nivel de potencia de la reflexión con las hojas, el cual aumenta pasando esta vez de  $-84.01 \text{ dBm}$  a  $-82.77 \text{ dBm}$ .



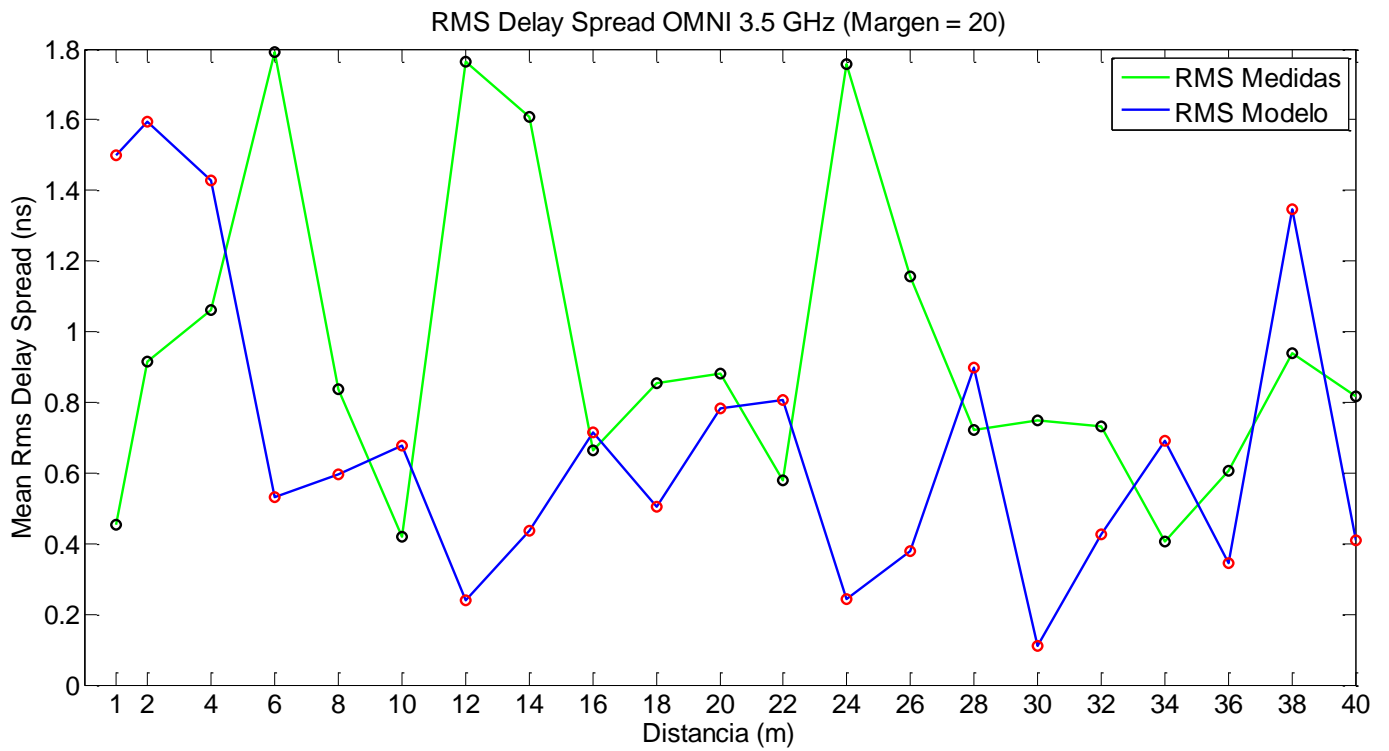


Figura 35. Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)

Al aumentar la densidad observamos que los retardos de 8 m a 32 m son muy similares, sin embargo, se aprecia un descenso en la magnitud del pico a 34 m y un aumento del  $\tau_{rms}$  a 38 m.

- Densidad ( $p$ ) = 400 *hojas/m*<sup>3</sup>

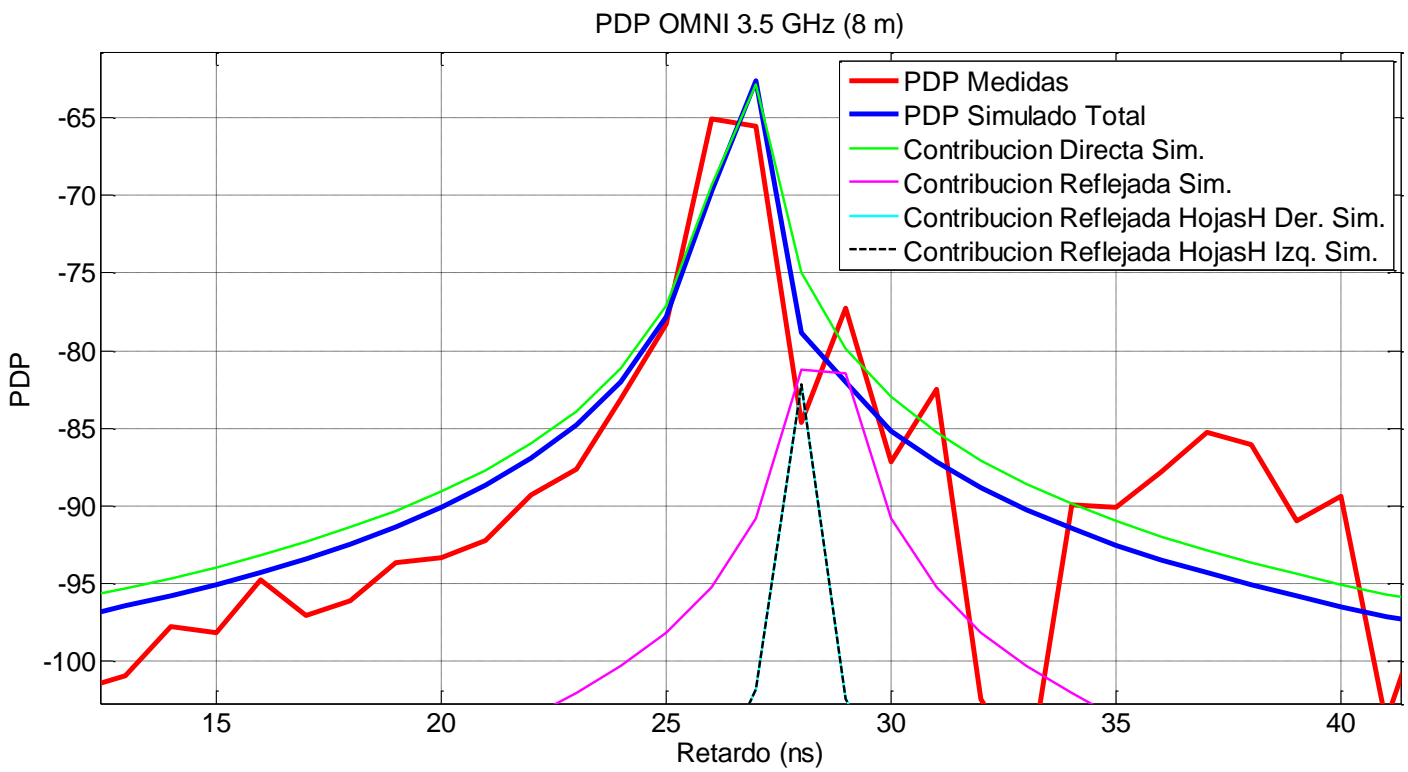


Figura 36. Comparación PDP Omni. Pol V. 8 m (3.5 GHz)

A la densidad de 400 *hojas/m*<sup>3</sup> encontramos el mayor valor del PDP para las reflexiones en las hojas para este porcentaje de humedad,  $-82.22$  dBm.

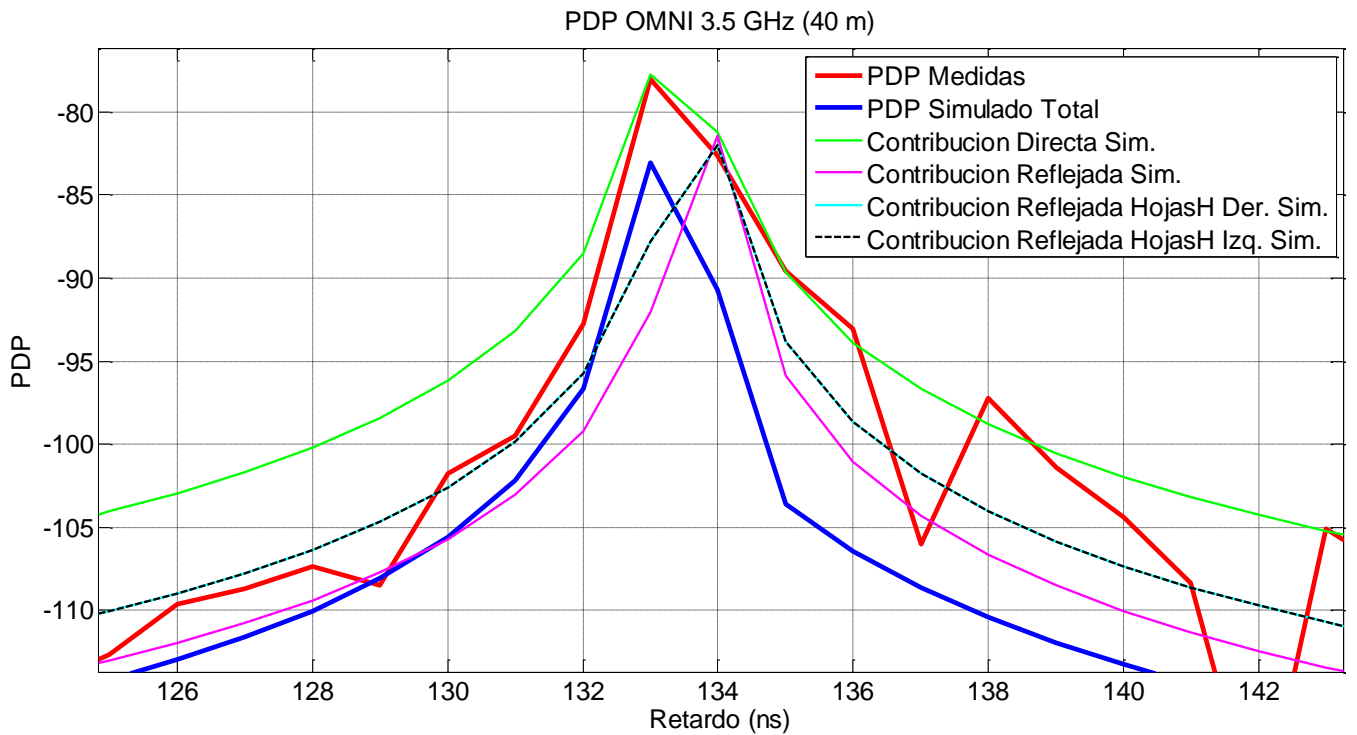


Figura 37. Comparación PDP Omni. Pol V. 40 m (3.5 GHz)

En el PDP a 40 m no encontramos nada que no se haya observado anteriormente, la densidad de las hojas, al haber aumentado también lo ha hecho el nivel de potencia.

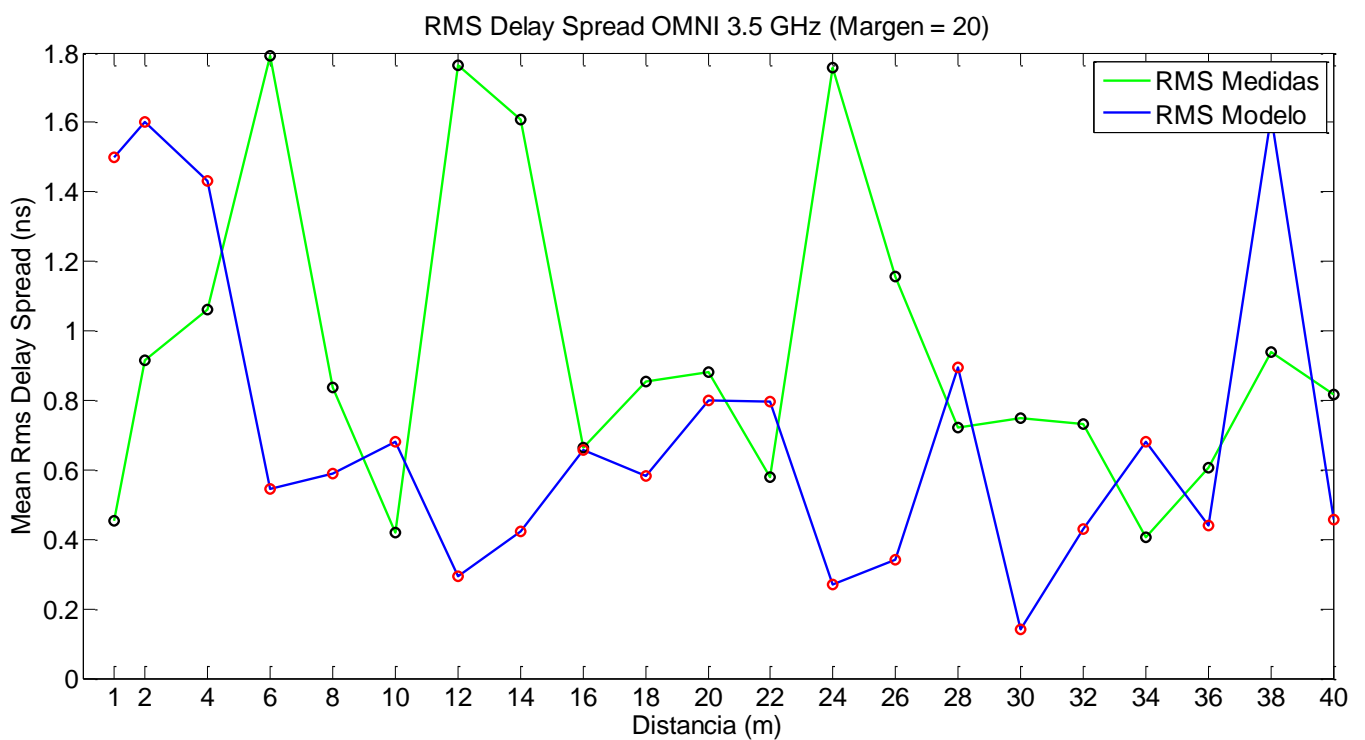


Figura 38. Comparación RMS Delay Spread (3.5 GHz)

Observamos una reducción de los retardos hasta 36 m, mientras que a 38 m vemos otro incremento, siguiendo la tendencia de la densidad anterior.

Agrupando los valores para cada densidad:

<i>Mean RMS Delay Spread (ns) MC 0 %</i>			
	<i>Densidad (Hojas/m<sup>3</sup>)</i>		
<i>Distancia (m)</i>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>
<b>1</b>	1.50	1.50	1.5
<b>2</b>	1.60	1.59	1.60
<b>4</b>	1.43	1.43	1.43
<b>6</b>	0.52	0.53	0.54
<b>8</b>	0.61	0.60	0.59
<b>10</b>	0.68	0.68	0.68
<b>12</b>	0.17	0.24	0.29
<b>14</b>	0.49	0.44	0.42
<b>16</b>	0.73	0.71	0.66
<b>18</b>	0.43	0.50	0.58
<b>20</b>	0.75	0.78	0.80
<b>22</b>	0.81	0.81	0.80
<b>24</b>	0.20	0.24	0.27
<b>26</b>	0.48	0.38	0.34
<b>28</b>	0.90	0.90	0.89
<b>30</b>	0	0.11	0.14
<b>32</b>	0.41	0.43	0.43
<b>34</b>	0.75	0.69	0.68
<b>36</b>	0.23	0.34	0.44
<b>38</b>	0.97	1.35	1.62
<b>40</b>	0.43	0.41	0.46

*Tabla 7. RMS 3.5 GHz (MC 0%)*

## 4.2.- BANDA DE 28GHz

### 4.1.1. Pérdidas de propagación

Modelo a dos rayos (directo y reflejado en el suelo)

Directiva

Procederemos ahora a representar las pérdidas de camino en función de la distancia entre el transmisor y el receptor, desarrollando los mismos modelos que hemos visto a la frecuencia de 3,5 GHz, CI.

Comparamos ahora nuestro modelo con las medidas para una antena de bocina:

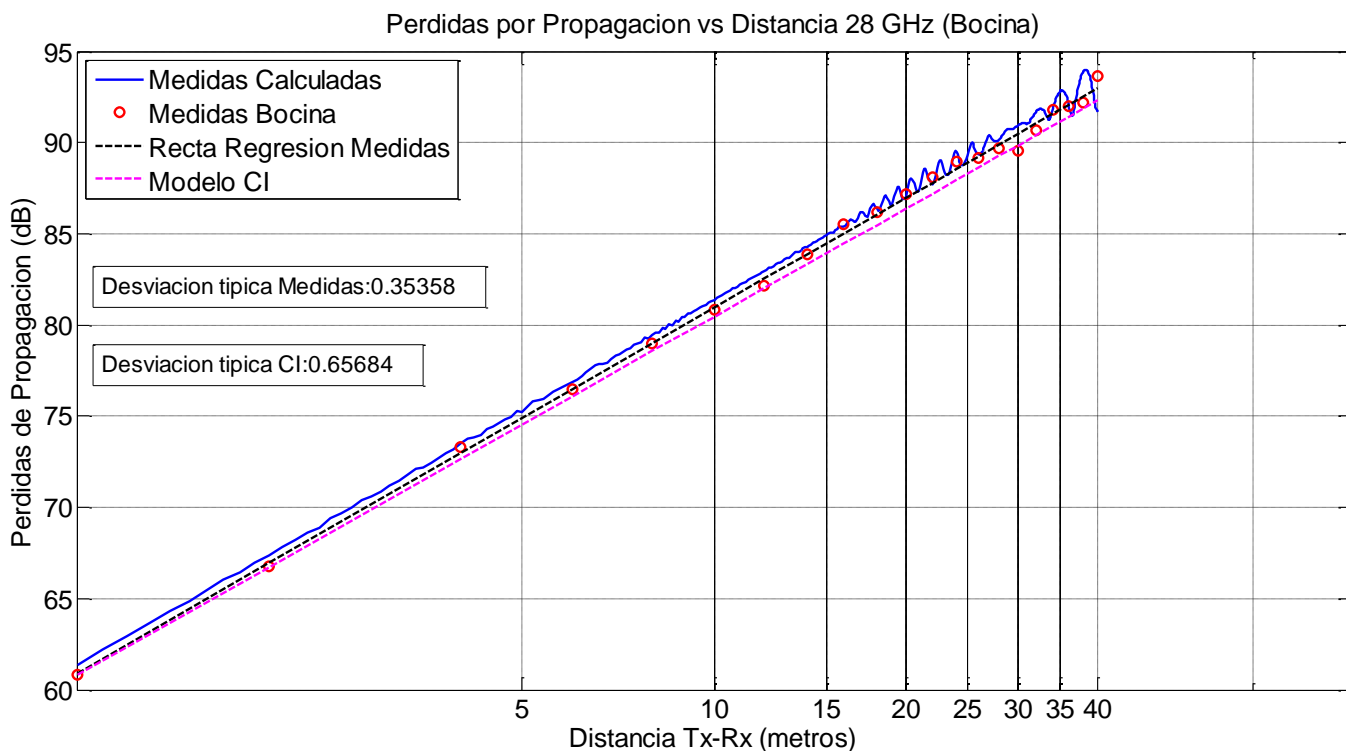


Figura 39. Comparación Pérdidas Bocina Pol. V (28 GHz)

Nuestro modelo se ajusta a las medidas, la inclinación de la pendiente es la misma y las rectas de regresión tanto del modelo CI muestran resultados aceptables a la hora de seguir las variaciones de las medidas, aunque el modelo CI se queda por debajo de la recta de regresión de las medidas,

	<i>FSPL (dB)</i>	<i>n</i>	<i>σ</i>
<i>Ajuste CI</i>	61.385	1.967	0.657
<i>Recta Regresión Medidas</i>	–	2.002	0.354

Tabla 8. Pendientes y Desviaciones Estándar (28 GHz)

#### 4.1.2. Perfil de retardo y dispersión temporal

Hacemos, ahora, lo propio con las medidas tomadas con la antena directiva y los modelos simulados.

Volvemos a comparar los PDP para una antena de bocina, tanto a 8 m como a 40 m:

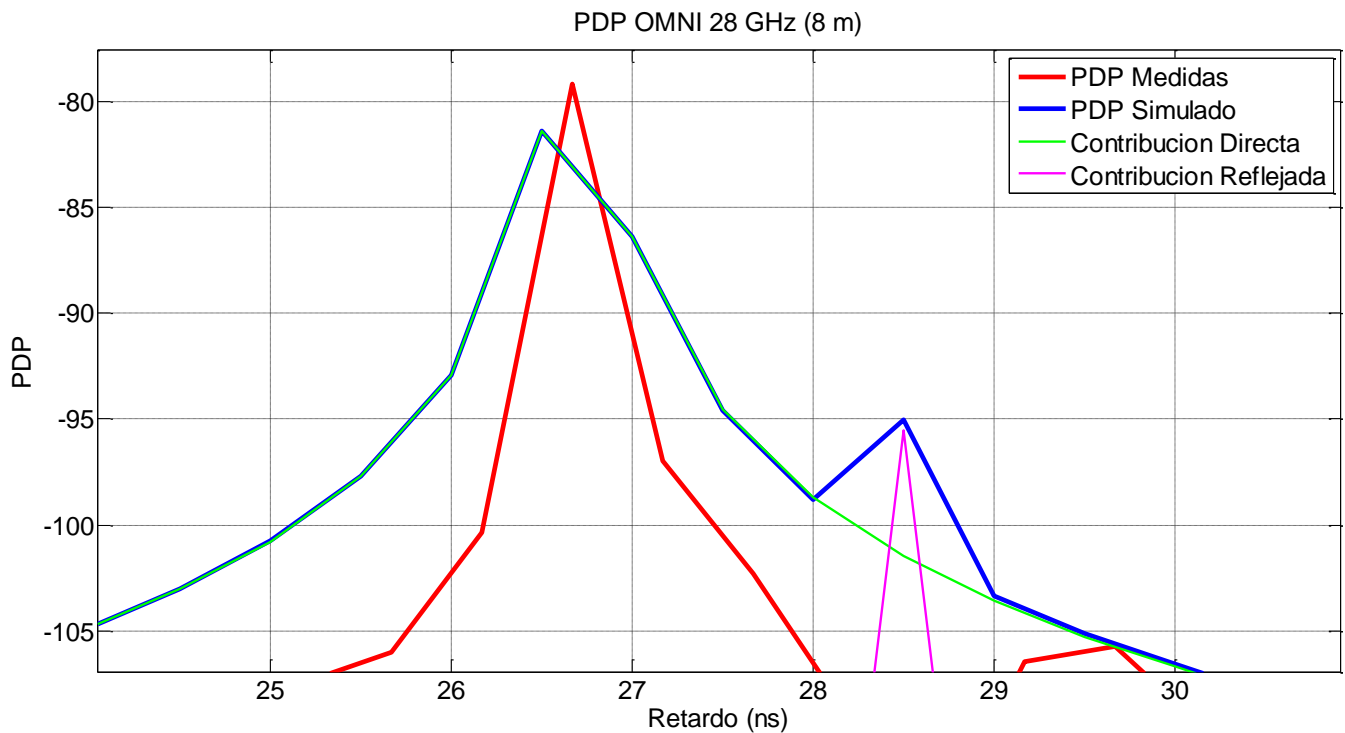


Figura 40. Comparación PDP Bocina Pol V. 8 m (28 GHz)

Si bien el nivel de potencia es más bajo de lo esperado, la contribución del rayo directo presenta un retardo que coincide con lo medido en campo, así como el retardo de la contribución del rayo reflejado en el suelo. El rayo directo coincide con el pico de mayor magnitud, así como la reflexión con el suelo parece responder a un montículo que aparece en el PDP medido.

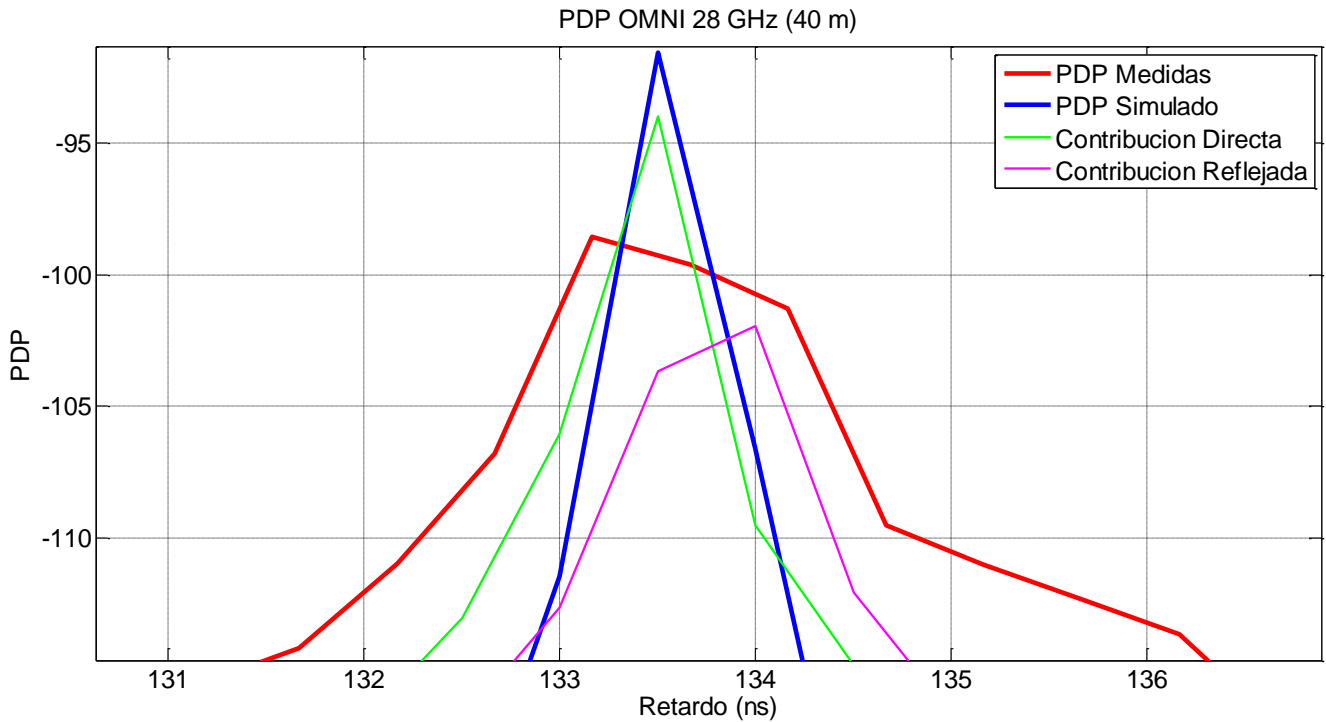


Figura 41. Comparación PDP Bocina Pol V. 40 m (28 GHz)

En el caso de 40 m ocurre lo mismo que hemos visto en los PDP anteriores, el retardo de ambas contribuciones se va igualando conforme la distancia que separa las antenas aumenta, haciendo que en el PDP se observe un único pico producido por la suma de ambos rayos.

Representamos el  $\tau_{rms}$ :

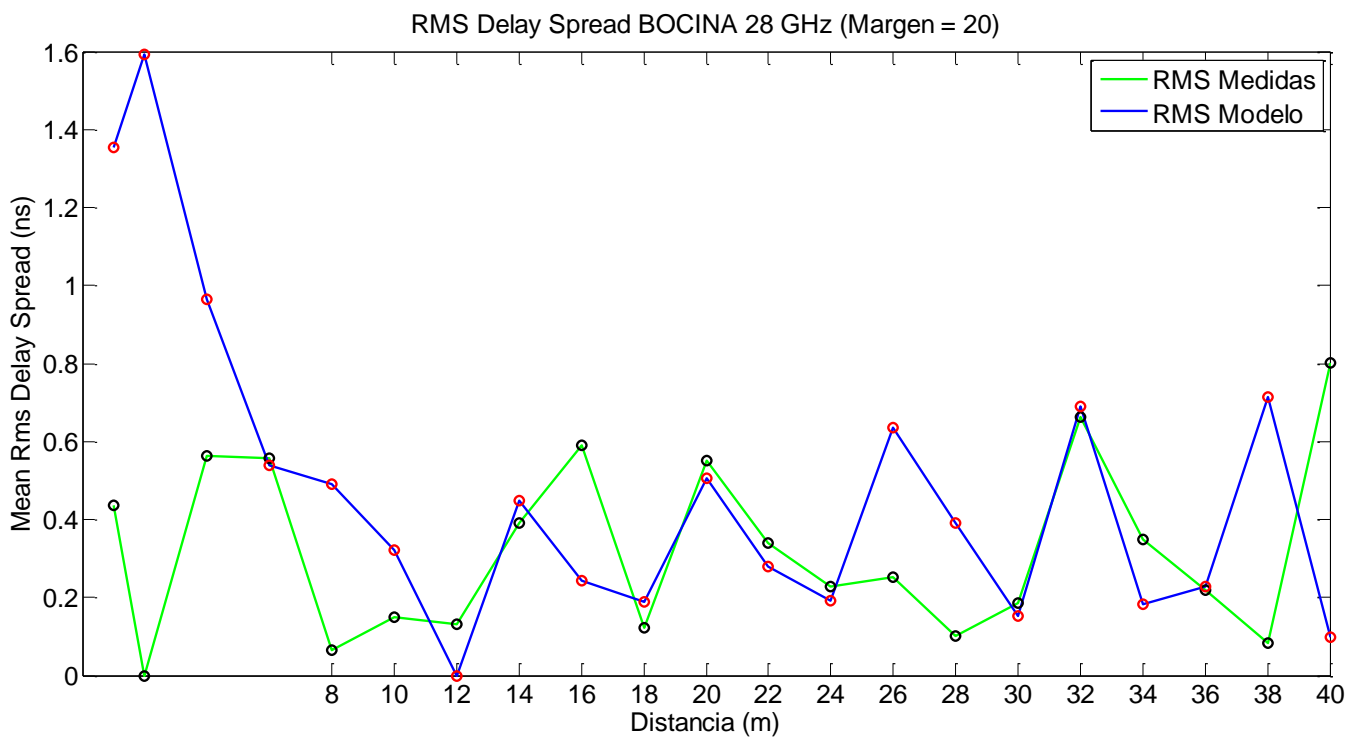


Figura 42. Comparación RMS Delay Spread Bocina (28 GHz)

Aunque los niveles de potencia en los PDP no coincidieran, sí lo hacían los retardos temporales, es por eso que las similitudes entre el  $\tau_{rms}$  real y estimado son muy buenas, sobre todo en la parte central de las distancias, entre los 14 m y los 40 m.

Recopilamos los valores de la dispersión para cada distancia:

<i>Distancia (m)</i>	<i>Mean RMS Delay Spread (ns)</i>
<b>1</b>	1.35
<b>2</b>	1.59
<b>4</b>	0.96
<b>6</b>	0.54
<b>8</b>	0.49
<b>10</b>	0.32
<b>12</b>	0
<b>14</b>	0.45
<b>16</b>	0.24
<b>18</b>	0.19
<b>20</b>	0.72
<b>22</b>	0.28
<b>24</b>	0.19
<b>26</b>	0.64
<b>28</b>	0.39
<b>30</b>	0.15
<b>32</b>	0.69
<b>34</b>	0.18
<b>36</b>	0.23
<b>38</b>	0.72
<b>40</b>	0.10

Tabla 9. RMS 28 GHz



## 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

Por último, mostraremos las conclusiones y deducciones a las que hemos llegado tras este trabajo, además de describir brevemente lo que ha supuesto a nivel académico y personal la realización del mismo.

### 5.1.- Conclusiones

A lo largo de este trabajo se han podido comprobar cosas que ya conocíamos como, por ejemplo, el aumento de las pérdidas respecto a la distancia, como se observa en las figuras Fig.20 y Fig.39. Además, la frecuencia también ha afectado a la cantidad de potencia que se deja de detectar, al tener una longitud de onda mucho menor los rayos a 28 GHz presentaban unas pérdidas mayores que los emitidos en la banda de frecuencias de 3.5 GHz, aunque las pendientes que presentaban para ambos modelos eran similares, de 0.802 y 0.7946, respectivamente.

Se puede hacer una buena aproximación de los retardos de los rayos a través del PDP para tres rayos distintos, directo, reflejado en el suelo y reflejado en las hojas de los limoneros, aumentando, además, la potencia de estos últimos, acorde a la densidad de hojas y la humedad de las hojas (MC), ya que aumenta la reflexión de los rayos en las hojas.

El  $\tau_{rms}$  nos ofrece buenos resultados a la frecuencia de 3.5 GHz a la misma vez que aumentamos el valor de la densidad de las hojas, haciendo que la contribución reflejada en los limoneros tenga un mayor impacto, haciendo así que la dispersión del retardo aumente. Aunque es a 28 GHz donde obtenemos la mejor coincidencia (42). Además, podemos ver la media de la dispersión del retardo para cada frecuencia, Moisture Content y densidad de hojas:

<b>Dispersión del retardo (ns) 100 %</b>	<b>Densidad (hojas/m<sup>3</sup>)</b>		
<i>Frecuencia (GHz)</i>	200	300	400
3.5	0.765	0.782	0.797
28	0.496		

Tabla 10.RMS Medio (100 %)

<b>Dispersión del retardo (ns) 0 %</b>	<b>Densidad (hojas/m<sup>3</sup>)</b>		
<i>Frecuencia (GHz)</i>	200	300	400
3.5	0.671	0.698	0.722
28	0.496		

Tabla 11.RMS Medio (0 %)

Se observa cómo la dispersión va en aumento conforme sube la densidad de las hojas por metro cúbico, ya que esto propicia un mayor efecto multicamino la dispersión es mayor. También tenemos una dispersión mayor para un *MC* del 100% que del 0%. A 28 GHz no hay variación ya que sólo se tiene en cuenta el rayo directo y el reflejado en el suelo. Por tanto, será en la banda de 3.5 GHz , con un *MC* del 100 % y una dispersión de 400 hojas/m<sup>3</sup> que la probabilidad de interferencia inter-simbólica (*ISI*) será mayor.

Este trabajo me ha permitido aprender de forma más visual los principios vistos en asignaturas del grado, como “*Comunicaciones Móviles*”, así como a interpretar los datos que se me presentan en situaciones reales. Y gracias a la excelente dirección y atención por parte de los directores el proyecto ha sido un proceso enriquecedor.

## 5.2. Futuras líneas

Como futuras líneas quedan abiertas las siguientes:

- Las medidas se realizaron con el fruto recolectado. Por tanto, sería interesante llevar a cabo una campaña de medidas con fruto en los árboles.
- Estudiar un modelo en el que la fila de limoneros sea sustituida por un *slab* cuya anchura estaría relacionada con las dimensiones del limonero. De esta forma se podrían considerar nuevas contribuciones como la transmitida-reflejada-transmitida debido al *slab*.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rodrigo-Peñarrocha Vicent, Molina-García Pardo José-María, Juan LLácer Leandro, Pascual-García Juan, Reig Juan and Sanchís-Borras Concepción, "Milimeter wave channel measurements in an intra-wagon environment," IEEE Trans. Veh. Technol.
- [2] Molina-García-Pardo José-María, Rodríguez José-Victor and Juan-LLácer Leandro, "Wide-Band Measurements and Characterization at 2.1 GHz While Entering in a Small Tunnel," IEE Trans. Veh. Technol., vol. 53, no. 6, Nov. 2004.
- [3] Abdullah GENÇ, Habib DOĞAN and Ibrahim Bahadır BASYIĞIT, "A new siempirical model determining the dielectric characteristics of citrus leaves for the remote sensing at C band," Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci.
- [4] Juan-LLácer, L.; Pascual García, J. y Molina García-Pardo, J.M. (2010). Sistemas de Comunicaciones Móviles: Caracterización del Canal Móvil. Murcia: Universidad Politécnica de Cartagena. CRAI Biblioteca.
- [5] Xia Howard H., Bertoni Henry L., *Fellow*, R. Maciel Leandro, Lindsay-Stewart Andrew and Rowe Robert, "Radio Propagation Characteristics for Line-of-Sight Microcellular and Personal Communications," IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 41, no. 10, Oct. 1993.
- [6] R.H Lang, A. Schnedider, S. Seker and F.J. Altman, "UHF Radiowave Propagation Through Forests", CyberCom Corporation, Sept. 1982.
- [7] Martínez Rubiola Luis, Juan LLácer Leandro, Molina García-Pardo José María (2020), "Caracterización del canal de radiocomunicaciones de banda ancha a frecuencias milimétricas en entorno de plantación de cítricos", Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia.
- [8] Secretaría de Estado de Comercio (11 de enero de 2019). Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. <https://www.icex.es/icex/es/Navegacion-zona-contacto/revista-el-exportador/noticias/NEW2019810484.html>

## ANEXO A: PERMITIVIDAD RELATIVA EN HOJAS DE LIMONERO

Para poder modelar las reflexiones en las hojas de los limoneros necesitamos de la permitividad dieléctrica del material en el que se refleja, para eso hemos hecho uso del artículo [3] para estimar el valor de la constante dieléctrica mediante el método de mínimos cuadrados a la frecuencia de 3.5 GHz. Diferenciaremos entre la parte real de la permitividad compleja (energía almacenada en el material) y la parte imaginaria (que afecta a la velocidad de propagación, atenuación y parámetros de transmisión)

Se contemplarán los casos en los que las hojas tienen tanto 0% como 100% de MC (Moisture Content), es decir, la cantidad de agua contenida en un material. Las gráficas del artículo sobre las permitividades reales e imaginarias en función de la frecuencia y el MC son las siguientes:

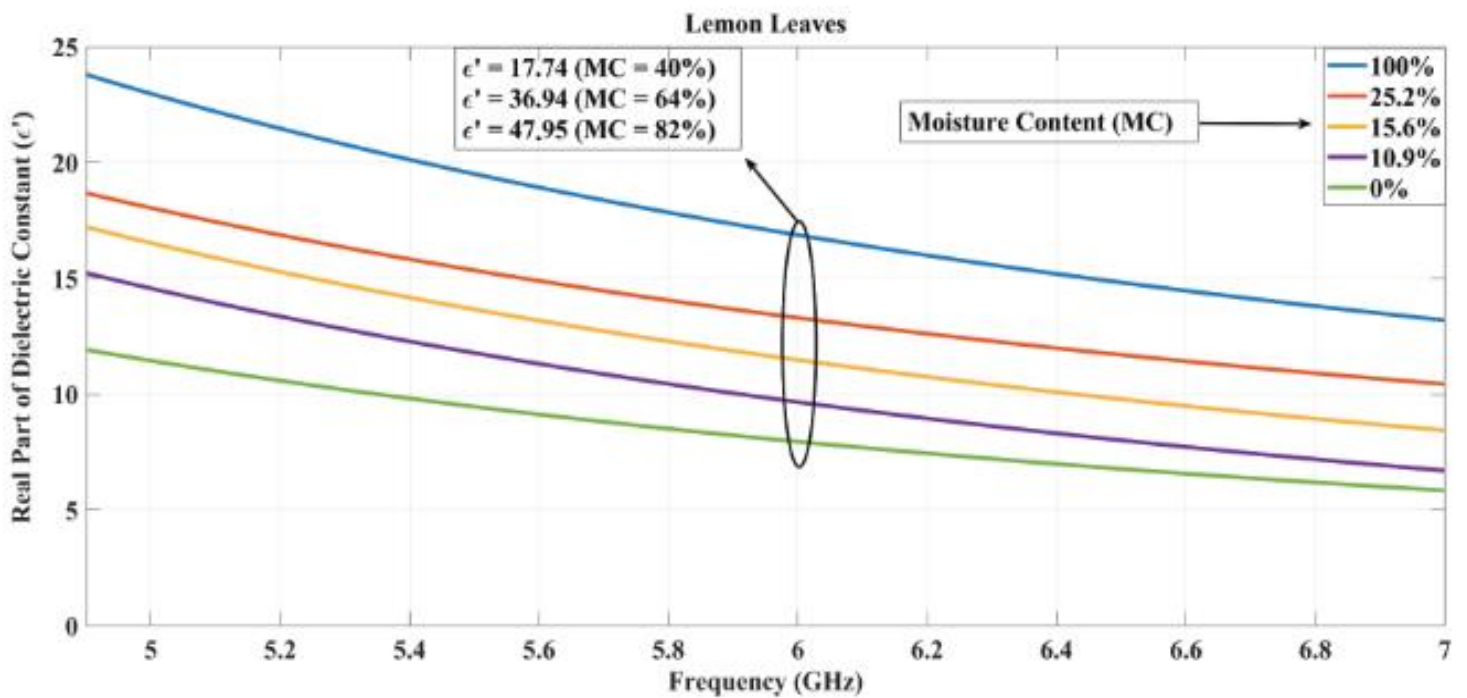


Figura 43. Parte Real de la Constante Dieléctrica ( $\epsilon'$ )

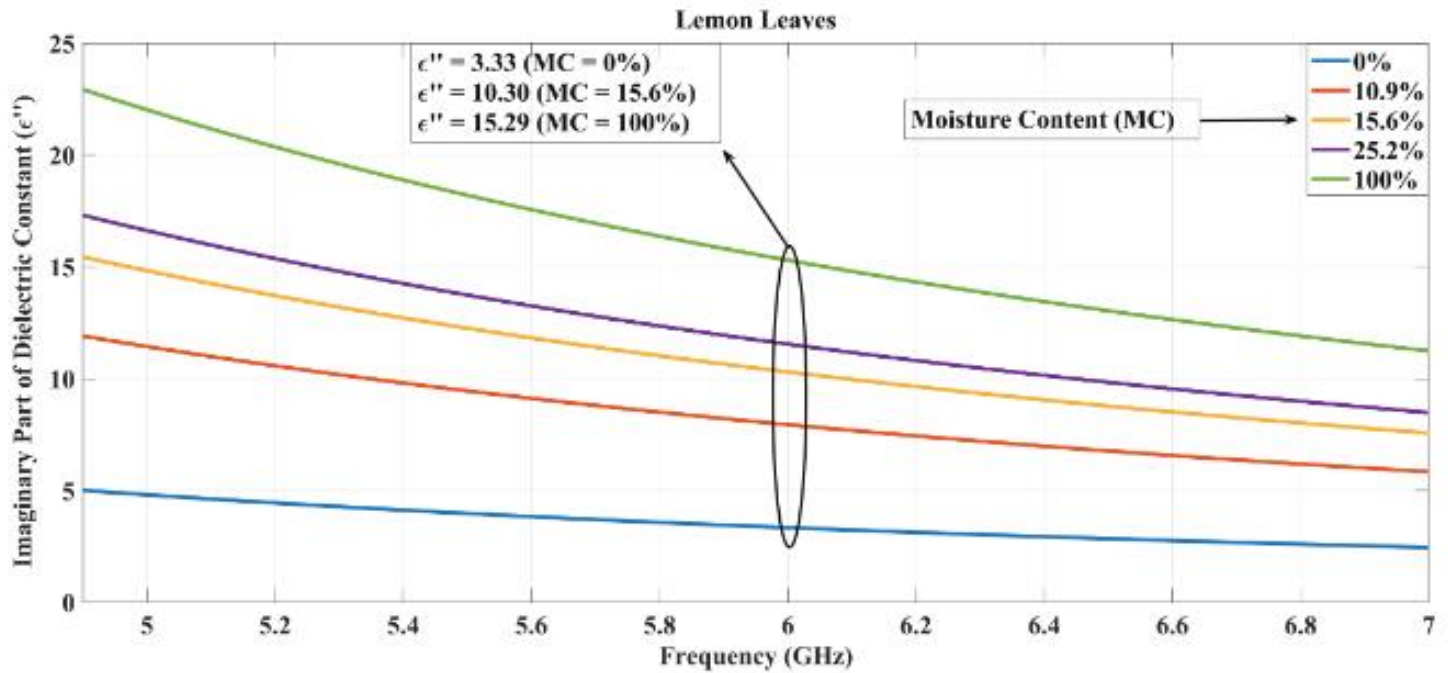


Figura 44. Parte Imaginaria de la Constante Dieléctrica ( $\epsilon''$ )

Tabulamos los valores de las permitividades en función de su Moisture Content y su frecuencia:

Permitividad Dieléctrica Compleja (0% MC)											
Permitividades	Frecuencias (GHz)										
	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2	6.4	6.6	6.8	7
$\epsilon'$	11.42	10.57	9.71	9.14	8.57	7.86	7.43	7	6.57	6.29	5.86
$\epsilon''$	4.86	4.43	4.14	3.71	3.57	3.43	3.14	2.86	2.71	2.57	2.43

Tabla 12. Permitividad Dieléctrica Compleja (0% MC)

Permitividad Dieléctrica Compleja (100% MC)											
Permitividades	Frecuencias (GHz)										
	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2	6.4	6.6	6.8	7
$\epsilon'$	22.86	21.43	20	18.86	17.71	16.71	15.86	14.86	14.43	13.71	13.14
$\epsilon''$	22	20.29	18.86	17.57	16	15.29	14.28	13.14	12.57	11.86	11.29

Tabla 13. Permitividad Dieléctrica Compleja (100% MC)

Con esto, podemos aproximar la tendencia de las permitividades a través del método de mínimos cuadrados en MATLAB, generando un polinomio dependiente de la frecuencia que haga mínima la distancia de todos los puntos de la tabla respecto del polinomio y ampliando su rango hasta la frecuencia que nos interesa, en este caso, 3.5 GHz. Esto lo haremos para cada

una de las permitividades en la banda y MC. A modo de ejemplo, a la frecuencia central de la banda de 3.5 GHz obtenemos lo siguiente:

Permitividades	Moisture Content (MC)	
	0 %	100 %
$\epsilon'$	19.2	36.93
$\epsilon''$	8.15	37.71

Tabla 14. Permitividad Dieléctrica Compleja (3.5 GHz)

## ANEXO B: PROGRAMAS EN MATLAB

Se presentarán los distintos códigos utilizados en MATLAB para la ejecución del trabajo, teniendo en cuenta que códigos como “RMS Delay Spread” , “Comparación RMS Medido vs Modelo en la banda de 3.5 GHz” y “Comparación RMS Medido vs Modelo en la banda de 28 GHz” fueron extraídos de [7] y, cuando ha sido necesario, modificados para la adaptación a nuestro trabajo.

### Coeficiente de Reflexión en el Suelo

```
function [Ref_coeff] = coefreflx(cond,pol,ang,perm_real,perm_imag)
% Cond--> Conductor(Si la onda incide sobre conductor cond = 1, si no, cond= 0).
% Pol-->Polarizacion, 1 paralela (vertical), 0 perpendicular (horizontal).
% ang--> Angulo de incidencia.
% perm_real--> Permitividad Real.
% perm_imag--> Permitividad imaginaria (si la permitividad fuera un numero
% complejo).

e_r = perm_real-1i.*perm_imag;
if cond == 1
    if pol == 1
        Ref_coeff = 1;
    elseif pol == 0
        Ref_coeff = -1;
    end
elseif cond == 0
    if pol == 1
        Ref_coeff = ((e_r).*sin(ang)-sqrt((e_r)-(cos(ang)).^2))./(e_r).*sin(ang)+sqrt((e_r)-(cos(ang)).^2));
    elseif pol == 0
        Ref_coeff = (sin(ang)-sqrt((e_r)-(cos(ang)).^2))./(sin(ang)+sqrt((e_r)-(cos(ang)).^2));
    end
end
end

end
```

## Pérdidas de Propagación

```
function [Losses] = pathloss(h_tx,h_rx,d,freq,cond,pol,perm_real,perm_imag)
% h_tx --> altura del transmisor
% h_rx --> altura del receptor
% d --> distancia entre transmisor y receptor
% freq --> frecuencia
% R --> Coeficiente de reflexion
% Cond--> Conductor(Si la onda incide sobre conductor cond = 1, si no, cond= 0).
% perm_real--> Permitividad Real
% perm_imag--> Permitividad imaginaria (si la permitividad fuera un numero
% complejo).

r_dir = sqrt((h_tx-h_rx).^2+d.^2);

alpha = atan((h_tx+h_rx)./d);

lambda = 3e8./freq;

k= (2*pi)./lambda;

R = coefreflx(cond,pol,alpha,perm_real,perm_imag);

r_ref = sqrt((h_tx+h_rx).^2+d.^2);

Losses = -20.*log10((lambda./(4.*pi))*abs((exp(-1i.*k.*r_dir)./r_dir)+R.*(exp(-
1i.*k.*r_ref)./r_ref))));

end
```

## Recta de Regresión

```
function [Recta_regresion] = Recta_Regresion(X,Y)
% Funcion para hallar los valores de la recta de regresion
% Con el eje X e Y y Polyfit crearemos una aproximacion lineal mediante una
% recta (orden 1 Polyfit) que pase por los distintos puntos Y a las distancias X
X_log = 10.*log10(X);
p = polyfit(X_log,Y,1);
Recta_regresion = polyval(p,X_log,1);
end
```

## Desviación Típica

```
function[std] = desviacion_tipica(X,X_prima)
N = length(X);
NMSE = sum((X-X_prima).^2)./N;
std = sqrt(NMSE);
end
```

## Comparación de Pérdidas a 3.5 GHz

```
% En este script se hara una comparacion de las perdidas medidas con
% nuestro modelo.

% Antena Omnidireccional, Polarizacion Vertical

% Cargamos los datos de las medidas
clc
clear all
load MedidasLimon.mat

H_Luis= h035(:,:,,1:21);
dimensionesMatrizH=size(H_Luis);

% Ajustamos las ganancias
Gto=1.75;
Gro=1.75;

% Establecemos las distancias

Distancia = [1 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40];
D_log = 10*log10(Distancia);
X=dimensionesMatrizH(1);
Y=dimensionesMatrizH(2);
T=dimensionesMatrizH(3);
Dist=dimensionesMatrizH(4);
realizaciones = X*Y;

for Dist = 1:1: length(H_Luis(1,1,1,:))
    matrizh_d =squeeze(H_Luis(:,:,,Dist));
    H=reshape(matrizh_d(:, :),X*Y,T);

    for jj=1:realizaciones
        H_temp=squeeze(H(jj,:));
        matrizj(jj,:)=abs(H_temp).^2;
    end
end
```



```

Loc(Dist)=Gto+Gro-10*log10(mean(matrizj));
end

htx = 1.5;
hrx = 1.5;

frecuencias = 3e9:0.5e6:4e9;
N = length(frecuencias);

freq = 3.5e9;

lambda = 3e8./freq;

dif = htx-hrx;
suma = htx+hrx;

break_point = (1./lambda).*sqrt((suma.^2-dif.^2).^2-
2.*(suma.^2+dif.^2)*(lambda./2).^2+(lambda./2).^4)

% Hasta 40 metros, 391 puntos

dist = 1:0.1:40;

% Perdidas Banda Ancha

for f = 1:N

lambda_wb(f) = 3e8./frecuencias(f);
perm_real = 15;
perm_imag(f) = 60.*0.005.*lambda_wb(f);

for d = 1:length(dist)
Losses_3_5GHz(d,f) =
pathloss(htx,hrx,dist(d),frecuencias(f),0,1,perm_real,perm_imag(f));

end

end

for d_2 = 1:length(dist)

Losses_wide_band(d_2) = sum(Losses_3_5GHz(d_2,:))/2001;

end

% Recta de regresion de las medidas

y2 = Recta_Regresion(Distancia,Loc);

% Desviacion tipica de las medidas

std_Medidas = desviacion_tipica(Loc,y2)

% Modelo CI Teoricas antes del breakpoint
% Para el modelo CI hacemos uso de las perdidas en Free Space, tomando una
% como las de referencia las de 1 metro

```

```

syms n;

x = linspace(1,40,391);

N1 = length(x);

Lfreespace_ref = -20*log10(3e8/(4*pi*freq));

Ldc = Loc;

Ldc(1) = Lfreespace_ref;

P11=Ldc(1)+n*10*log10(x);

NMSE=eval((sum((Ldc-P11).^2))/N1);
dNMSE=diff(NMSE,n);
nNMSE=solve(dNMSE==0,n);
n_CI=eval(nNMSE); % Determina las perdidas respecto
                  % a la distancia por decada
Lp_CI=Ldc(1)+n_CI*10*log10(x); % Recta de Regresion del Modo
                              % CI

% Representamos las perdidas medidas y su recta de regresion, asi como
% nuestro modelo como nube de puntos y la recta de regresion modelo CI

semilogx(x,Losses_wide_band,'b','Linewidth',2) % Perdidas Calculadas
                                              % Banda Ancha

hold on

semilogx(Distancia,Loc,'ro','MarkerSize',7,'Linewidth',1.5); % Medidas

hold on

semilogx(Distancia,y2,'k--','Linewidth',1.5) % Recta de Regresion de las
                                             % medidas en campo

semilogx(x,Lp_CI,'m--','Linewidth',1.5) % Modelo CI

hold off

set(gca,'fontsize',16);
dim=[0.14, 0.6, 0.1, 0.1];
dim_2 = [0.14, 0.5, 0.1, 0.1];
grid on
annotation('textbox',dim_2,'string',['Desviacion tipica
Medidas:',num2str(std_Medidas)],'FitBoxToText','on','fontsize',14)

```

```

title('Perdidas por Propagacion vs Distancia (Polarizacion Vertical)')
xlabel('Distancia (metros)')
ylabel('Perdidas de Propagacion (dB)')
Legend({'Medidas Calculadas','Medidas Biconica','Recta Regresion Medidas','Modelo
CI'},'Location','Northwest')
set(gca,'xtick',[0:5:40]);

```

## Comparación de Pérdidas a 28 GHz

```

% En este script se hara una comparacion de las perdidas medidas con
% nuestro modelo.

% Bocina 28GHz, Polarizacion Vertical

% Cargamos los datos de las medidas
clc
clear all
load MedidasLimon.mat

H_Luis= hd(:,:,,1:21);
dimensionesMatrizH=size(H_Luis);

% Ajustamos las ganancias
Gto=17.6;
Gro=17.6;

% Establecemos las distancias

Distancia = [1 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40];
D_log = 10*log10(Distancia);
X=dimensionesMatrizH(1);
Y=dimensionesMatrizH(2);
T=dimensionesMatrizH(3);
Dist=dimensionesMatrizH(4);
realizaciones = X*Y;

for Dist = 1:1: length(H_Luis(1,1,1,:))
    matrizh_d =squeeze(H_Luis(:,:,,Dist));
    H=reshape(matrizh_d(:,,:),X*Y,T);

    for jj=1:realizaciones
        H_temp=squeeze(H(jj,:));
        matrizj(jj,:)=abs(H_temp).^2;
    end

    Loc(Dist)=Gto+Gro-10*log10(mean(matrizj));

end

htx = 1.5;
hrx = 1.5;

frecuencias = 27e9:1e6:29e9;

```

```

N = length(frecuencias);

freq = 28e9;
lambda = 3e8./freq;

dif = htx-hrx;
suma = htx+hrx;

break_point = (1./lambda).*sqrt((suma.^2-dif.^2).^2-
2.*(suma.^2+dif.^2)*(lambda./2).^2+(lambda./2).^4)

% Hasta 40 metros, 391 puntos

dist = 1:0.1:40;

%Perdidas Banda Ancha

for f = 1:N

lambda_wb(f) = 3e8./frecuencias(f);
perm_real = 15;
perm_imag(f) = 60.*0.005.*lambda_wb(f);

for d = 1:length(dist)
Losses_28GHz(d,f) = pathloss(htx,hrx,dist(d),frecuencias(f),0,1,perm_real,perm_imag(f));

end

end

for d_2 = 1:length(dist)

Losses_wide_band(d_2) = sum(Losses_28GHz(d_2,:))/2001;

end

%Recta de regresion de Medidas
y2 = Recta_Regresion(Distancia,Loc);

%sacamos la pendiente de la recta de regresion de las medidas.

pendiente_medidas = (y2(10)-y2(5))/(Distancia(10)-Distancia(5))

%Desviacion tipica Medidas

std_Medidas = desviacion_tipica(Loc,y2)

%Modo CI Teoricas antes del breakpoint
syms n; %Declaramos la variable n, la cual nos determina las
% perdidas de propagacion con respecto a la distancia por
%decada.

```

```

x = linspace(1,40,391);

N1 = length(x); % x son las distancias que tendremos en cuenta para el
                % diseño del modelo. Siendo N1 el número de puntos del que
                % constará la representación del modo CI

Lfreespace_ref = -20*log10(3e8/(4*pi*freq));
                %Calcula las pérdidas en espacio libre
                %de referencia a 1 metro

Ldc = Loc;

Ldc(1) = Lfreespace_ref;
                %Colocamos como primer valor de las pérdidas el de
                %referencia.

P11=Ldc(1)+n*10*log10(x);
                % Aplicamos la fórmula del modelo CI vista en
                % el artículo URSI_2019_pérdidas_interiores, de nuevo, esta
                % puesto para una distancia de referencia de 1 metro. Esta
                % línea sirve para plantear la ecuación con la incógnita n
                % que se despejara en líneas posteriores.

NMSE=eval((sum((Ldc-P11).^2))/N1); %Eval para fijar una expresión. De forma
                                   %de forma que se pueda derivar como en
                                   %la línea siguiente.

dNMSE=diff(NMSE,n);                %Derivamos respecto de n la expresión
                                   %anterior, de manera que obtenemos la
                                   % ecuación de la pendiente

nNMSE=solve(dNMSE==0,n);           %resolvemos la ecuación para sacar el
                                   %valor de n que hace 0 la ecuación dNMSE

n_CI=eval(nNMSE);

Lp_CI=Ldc(1)+n_CI*10*log10(x);

% Representamos las pérdidas, las medidas y las rectas de regresión, teórica y con
% respecto a las medidas tomadas
semilogx(x, Losses_wide_band, 'Linewidth', 2)

hold on

semilogx(Distancia, Loc, 'ro', 'Linewidth', 2);

semilogx(Distancia, y2, 'k--', 'Linewidth', 2)

semilogx(x, Lp_CI, 'm--', 'Linewidth', 2)

```

```

hold off
set(gca,'fontsize',16);

dim_2 = [0.14, 0.55, 0.1, 0.1];
annotation('textbox',dim_2,'String',['Desviacion tipica
Medidas:',num2str(std_Medidas)],'FitBoxToText','on','fontsize',14)
title('Perdidas por Propagacion vs Distancia 28 GHz (Bocina)')
xlabel('Distancia (metros)')
ylabel('Perdidas de Propagacion (dB)')

Legend({'Medidas Calculadas','Medidas Bocina','Recta Regresion Medidas','Modelo
CI'},'Location','Northwest')
grid on
set(gca,'xtick',[0:5:40]);

```

## Comparación Pérdidas Banda Ancha y Banda Estrecha

```

%Perdidas Banda Estrecha
htx = 1.5;
hrx = 1.5;
freq = 3.5e9;
lambda = 3e8./freq;
perm_real = 15;
perm_imag = 60.*0.005.*lambda;
dist = 1:0.1:40;

Losses_3_5GHz = pathloss(htx,hrx,dist,freq,0,1,perm_real,perm_imag,0);

% Recta de Regresion banda estrecha

x = linspace(1,40,391);
y1 = Recta_Regresion(x,Losses_3_5GHz);

% Banda ancha
frecuencias = 3e9:0.5e6:4e9;
N = length(frecuencias);
H_wide_band = -10.*log10((abs(H_nb(:, :))).^2);

for f = 1:N

lambda_wb(f) = 3e8./frecuencias(f);
perm_real = 15;
perm_imag(f) = 60.*0.005.*lambda_wb(f);

for d = 1:length(dist)
Losses_3_5GHz_wb(d,f) =
pathloss(htx,hrx,dist(d),frecuencias(f),0,1,perm_real,perm_imag(f),0);
end
end

```

```

end

for d_2 = 1:length(dist)

Losses_wide_band(d_2) = sum(Losses_3_5GHz_wb(d_2,:))/2001;

end

%Recta de regresion modelo teorico wb
x_wb = linspace(1,40,391);
y1_wb = Recta_Regresion(x_wb,Losses_wide_band);

figure

semilogx(dist,Losses_3_5GHz,'r','Linewidth',2)
hold on
semilogx(x,y1,'m--','Linewidth',2)
semilogx(x_wb,Losses_wide_band,'b','Linewidth',2)
semilogx(x_wb,y1_wb,'c--','Linewidth',2)

hold off

set(gca,'fontsize',16);

title('Perdidas Banda Estrecha vs Banda Ancha (Polarizacion Vertical)')
xlabel('Distancia (metros)')
ylabel('Perdidas de Propagacion (dB)')
xlim([0 44])

Legend({'Estimacion Banda Estrecha','Recta de Regresion B.E.','Estimacion Banda
Ancha','Recta de Regresion B.A.'},'Location','Northwest')

grid on

set(gca,'xtick',[0:5:40]);

```

## Coeficiente de Reflexión en medio Anisótropo

```

function [ Ref_coeff ] = coeff_refl_anisotropo(pol,ang,et,ez)

% pol ---> 1 polarizacion vertical, 0 polarizacion horizontal
% ang ---> angulo de incidencia
% et ---> permitividad electrica transversal
% ez ---> permitividad electrica longitudinal
% f ---> frecuencia de trabajo

if pol == 1
    Ref_coeff = (sqrt(et).*sin(ang)-sqrt(1-
(1./ez).*(cos(ang)).^2))./(sqrt(et).*sin(ang)+sqrt(1-(1./ez).*(cos(ang)).^2)));
else

```

```

Ref_coeff = (1./(sqrt(epsilon)).*sin(ang)-sqrt(1-
(1./epsilon).*(cos(ang)).^2))./(1./(sqrt(epsilon)).*sin(ang)+sqrt(1-(1./epsilon).*(cos(ang)).^2));
end

end

```

## Permitividad Eléctrica de las Hojas en la Banda de 3.5 GHz

```

function [perm_real,perm_imag] = perm_hojas_3_5(MC,freq)
%perm_hojas: Obtenemos la permitividad electrica de las hojas en funcion del
%MC(Moisture Content) y la frecuencia
%MC(Moisture Content) --> 1, MC 100%, 0 MC 0%
%freq --> frecuencia de trabajo

if MC == 1

    % Parte real

    x_real = [5.0 5.2 5.4 5.6 5.8 6.0 6.2 6.4 6.6 6.8 7.0];
    y_real = [22.8571 21.4286 20 18.8571 17.7143 16.7143 15.8571 14.8571 14.4286 13.7143
13.1429];
    Real_Leaves = polyfit(x_real,y_real,2);
    x2 = [freq*1e-9:0.01:7];
    Real_Leaves_pol = polyval(Real_Leaves,x2);
    perm_real = Real_Leaves_pol(1);

    % Parte imaginaria

    x_imag = [5.0 5.2 5.4 5.6 5.8 6.0 6.2 6.4 6.6 6.8 7.0];
    y_imag = [22 20.2857 18.8571 17.5714 16 15.2857 14.28 13.1429 12.57 11.8571 11.2857];
    Imag_Leaves = polyfit(x_imag,y_imag,2);
    x2 = [freq*1e-9:0.01:7];
    Imag_Leaves_pol = polyval(Imag_Leaves,x2);
    perm_imag = Imag_Leaves_pol(1);

elseif MC == 0

    % Parte real

    x_real = [5.0 5.2 5.4 5.6 5.8 6.0 6.2 6.4 6.6 6.8 7.0];
    y_real = [11.42 10.57 9.71 9.1429 8.5714 7.8571 7.4286 7 6.5714 6.2857 5.8571];
    Real_Leaves = polyfit(x_real,y_real,2);
    x2 = [freq*1e-9:0.01:7]; % Para aproximar a 3.5 gigaherzios
    Real_Leaves_pol = polyval(Real_Leaves,x2);
    perm_real = Real_Leaves_pol(1);

    % Parte imaginaria

    x = [5.0 5.2 5.4 5.6 5.8 6.0 6.2 6.4 6.6 6.8 7.0];
    y = [4.8571 4.4286 4.1429 3.71 3.5714 3.4286 3.1429 2.8571 2.7143 2.5714 2.4286];
    Imag_Leaves = polyfit(x,y,2);
    x2 = [freq*1e-9:0.01:7]; % Para aproximar a 3.5 gigaherzios

```



```

Imag_Leaves_pol = polyval(Imag_Leaves,x2);
perm_imag = Imag_Leaves_pol(1);

```

```
end
```

## Susceptibilidad Magnética

```

function [x_zz_2_real,x_zz_2_imag,x_tt_2_real,x_tt_2_imag] =
susceptibility(rad,a,t,p,rad_i,x_l)
% susceptibility: Calcula la susceptibilidad magnetica.
% rad --> La orientacion aleatoria de las hojas es uniforme en el angulo de
% elevacion en el rango de 0 a 30 grados
% a --> Radio de la hoja
% t --> Grosor de la hoja
% p --> Densidad de hojas por metro cubico
% rad_i --> angulo de incidencia de nuestro rayo en el medio
% x_l --> susceptibilidad de una hoja

I1=(1/rad)*(rad/2-sin(2*rad)/4);
I2=(1/rad)*(rad/2+sin(2*rad)/4);

x_tt_2 = pi*x_l*p*t*a.^2*(1-((x_l*I1)/(2*(1+x_l))));
x_zz_2 = pi*x_l*p*t*a.^2*(1-
(x_l/(2*(1+x_l)))*((cos(rad_i)).^2)*I1+((sin(rad_i)).^2)*I2));

x_zz_2_real = real(x_zz_2);
x_zz_2_imag = -imag(x_zz_2);
x_tt_2_real = real(x_tt_2);
x_tt_2_imag = -imag(x_tt_2);

```

```
end
```

## Comparación PDP Medido vs Modelo en la banda de 3.5 GHz

```

clc
clear all

distancias = [1 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40];
frecuencias = 3e9:0.5e6:4e9;

a = 6e-2;
t = 0.5e-3;

```

```

% La densidad p, variara entre 200, 300 y 400
p = 200;

teta = (30*pi)/180;

%Permitividad del suelo

perm_real_suelo = 15;

%Alturas y distancias
htx = 1.5;
hrx = 1.5;
dtx_der = 1.25;
drx_der = 1.25;
dtx_izq = 1.25;
drx_izq = 1.25;

N = 2001;

for d = 1:21
    for f = 1:N

        lambda = 3e8./frecuencias(f);
        perm_imag_1 = 60.*0.005.*lambda;
        k= (2*pi)./lambda;

        % Caminos recorridos

        r_dir = sqrt((htx-hrx).^2+distancias(d).^2);
        r_ref = sqrt((htx+hrx).^2+distancias(d).^2);

        r_ref_hojas_der = sqrt((dtx_der+drx_der).^2+distancias(d).^2);
        r_ref_hojas_izq = sqrt((dtx_izq+drx_izq).^2+distancias(d).^2);

        % Angulos de incidencia

        alpha_suelo = atan((htx+hrx)./distancias(d));

        alpha_hojas_der = atan((dtx_der+drx_der)./distancias(d));
        alpha_hojas_izq = atan((dtx_izq+drx_izq)./distancias(d));

        % Permitividad electrica Hojas

        [perm_real, perm_imag] = perm_hojas_3_5(1,frecuencias(f));
        perm_leaf = perm_real - 1i*perm_imag;
        x_l = perm_leaf -1;
    end
end

```

```

% Ez y Et para reflexion simple

[X_z_real,X_z_imag,X_t_real,X_t_imag] =
susceptibility(teta,a,t,p,alpha_hojas_der,x_l);

X_z = X_z_real - X_z_imag*1i;

e_z = 1+ X_z;

X_t = X_t_real - X_t_imag*1i;

e_t = 1+X_t;

%Reflexiones

R_suelo = coefreflx(0,1,alpha_suelo,perm_real_suelo,perm_imag_1);

R_hojas_Horizontal_der = coeff_refl_anisotropo(0,alpha_hojas_der,e_t,e_z);

R_hojas_Horizontal_izq = coeff_refl_anisotropo(0,alpha_hojas_izq,e_t,e_z);

%Perdidas

Losses_directas = (exp(-1i.*k.*r_dir))./r_dir;
Losses_reflejadas= R_suelo.*(exp(-1i.*k.*r_ref))./r_ref);

Losses_reflejadas_Horizontal_hojas_der = R_hojas_Horizontal_der.*(exp(-
1i.*k.*r_ref_hojas_der))./r_ref_hojas_der);

Losses_reflejadas_Horizontal_hojas_izq = R_hojas_Horizontal_izq.*(exp(-
1i.*k.*r_ref_hojas_izq))./r_ref_hojas_izq);

% Haremos uso de las perdidas de polarizacion vertical para rayo reflejado en el
suelo y la de los arboles en horizontal

Losses_lineal = [Losses_directas Losses_reflejadas
Losses_reflejadas_Horizontal_hojas_der Losses_reflejadas_Horizontal_hojas_izq];

% Funciones de transferencia

H(d,f) = lambda/(4*pi)*sum(Losses_lineal);
H_dir(d,f) = lambda/(4*pi)*Losses_directas;
H_ref(d,f) = lambda/(4*pi)*Losses_reflejadas;
H_ref_hojasH_der(d,f) = lambda/(4*pi)*Losses_reflejadas_Horizontal_hojas_der;
H_ref_hojasH_izq(d,f) = lambda/(4*pi)*Losses_reflejadas_Horizontal_hojas_izq;

end

```

```

end

BW = frecuencias(end) - frecuencias(1);
tau = linspace(0,(length(frecuencias)-1)/BW,length(frecuencias));

for d = 1:21
PDP(d,:)=(abs(ifft(H(d,:)))).^2;
PDP_dir=(abs(ifft(H_dir(d,:)))).^2;
PDP_ref=(abs(ifft(H_ref(d,:)))).^2;
PDP_ref_hojasH_der = (abs(ifft(H_ref_hojasH_der(d,:)))).^2;
PDP_ref_hojasH_izq = (abs(ifft(H_ref_hojasH_izq(d,:)))).^2;

PDP_log(d,:) = 10*log10(PDP(d,:));
PDP_dir_log = 10*log10(PDP_dir);
PDP_ref_log = 10*log10(PDP_ref);
PDP_ref_hojasH_der_log = 10*log10(PDP_ref_hojasH_der);
PDP_ref_hojasH_izq_log = 10*log10(PDP_ref_hojasH_izq);

figure
PDP_O3_5GHz_2(distancias(d))

hold on
plot(x,PDP_log(d,:), 'b', 'Linewidth',3)
plot(x,PDP_dir_log, 'g', 'Linewidth',2)
plot(x,PDP_ref_log, 'm', 'Linewidth',2)
plot(x,PDP_ref_hojasH_der_log, 'c', 'Linewidth',2)
plot(x,PDP_ref_hojasH_izq_log, '--k', 'Linewidth',2)

set(gca, 'fontsize',16);

title(['PDP OMNI 3.5 GHz (' num2str(distancias(d)) ' m)']);
xlabel('Distancia(m)')
ylabel('PDP')
xlim([0 60])
grid on

Legend({'PDP Medidas', 'PDP Simulado', 'Contribucion Directa', 'Contribucion
Reflejada', 'Contribucion Reflejada HojasH Der.', 'Contribucion Reflejada HojasH Izq.'})

end

PDP_23 = PDP(1:21,:); % tomamos las medidas desde 1m hasta 40m para todas
% las frecuencias, se utilizaran para el calculo del
% rms delay spread

save('Comparacion PDP', 'PDP_23')

```

## Comparación PDP Medido vs Modelo en la banda de 28 GHz

```
clc
clear all

distancias = [1 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40];
frecuencias = 27e9:1e6:29e9;

a = 6e-2;
t = 0.5e-3;
% La densidad p, variara entre 200, 300 y 400
p = 200;

teta = (30*pi)/180;

%Permitividad del suelo y hojas
perm_real_suelo = 15;

%Alturas y distancias

htx = 1.5;
hrx = 1.5;
dtx_der = 1.25;
drx_der = 1.25;
dtx_izq = 1.25;
drx_izq = 1.25;

N = 2001;

for d = 1:21
    for f = 1:N

        lambda = 3e8./frecuencias(f);
        perm_imag_1 = 60.*0.005.*lambda;
        k= (2*pi)./lambda;

        %Caminos recorridos

        r_dir = sqrt((htx-hrx).^2+distancias(d).^2);
        r_ref = sqrt((htx+hrx).^2+distancias(d).^2);

        %Angulos de incidencia

        alpha_suelo = atan((htx+hrx)./distancias(d));
```

```

%Reflexiones

R_suelo = coefreflx(0,1,alpha_suelo,perm_real_suelo,perm_imag_1);

%Perdidas

Losses_directas = (exp(-1i.*k.*r_dir))./r_dir;
Losses_reflejadas= R_suelo.*(exp(-1i.*k.*r_ref))./r_ref);

Losses_lineal = [Losses_directas Losses_reflejadas];

%Funciones de transferencia

H(d,f) = lambda/(4*pi)*sum(Losses_lineal);
H_dir(d,f) = lambda/(4*pi)*Losses_directas;
H_ref(d,f) = lambda/(4*pi)*Losses_reflejadas;

end
end

BW = frecuencias(end) - frecuencias(1);
tau = linspace(0,(length(frecuencias)-1)/BW,length(frecuencias));

for d = 1:21

%PDP's

PDP(d,:)=(abs(ifft(H(d,:))))).^2;
PDP_dir=(abs(ifft(H_dir(d,:))))).^2;
PDP_ref=(abs(ifft(H_ref(d,:))))).^2;

%PDP's logaritmico

PDP_log(d,:) = 10*log10(PDP(d,:));
PDP_dir_log = 10*log10(PDP_dir);
PDP_ref_log = 10*log10(PDP_ref);

figure
PDP_Horn_2(distancias(d))

hold on
plot(x,PDP_log(d,:), 'b', 'Linewidth', 3)
plot(x,PDP_dir_log, 'g', 'Linewidth', 2)
plot(x,PDP_ref_log, 'm', 'Linewidth', 2)
set(gca, 'fontsize', 16);

```

```

title(['PDP OMNI 28 GHz (' ,num2str(distancias(d)), ' m)'])
xlabel('Distancia(m)')
ylabel('PDP')
xlim([0 60])
grid on

Legend({'PDP Medidas', 'PDP Simulado','Contribucion Directa','Contribucion Reflejada'})

end
PDP_23 = PDP;

save('Comparacion_PDP_28GHz', 'PDP_23')

```

## RMS Delay Spread

```

function RMS_DS=delay_spread(t_medi,H_T,Margen)

pdp_medi=abs(H_T);
Margen=10.^(Margen/10);
limite=max(pdp_medi);
pdp_medi_2=[];
t_medi_2=[];
a = 0;
for l= 0:(2000)
    if (pdp_medi(l+1)>limite/Margen)
        a = a+1;
        pdp_medi_2=[pdp_medi_2;pdp_medi(l+1)];
        t_medi_2=[t_medi_2;t_medi(l+1)];
    end
end

RMS_DS=sqrt((sum(pdp_medi_2.*(t_medi_2.^2))/sum(pdp_medi_2))-
(sum(pdp_medi_2.*t_medi_2)/sum(pdp_medi_2)

```

## Comparación RMS Medido vs Modelo en la banda de 3.5 GHz

```

clc
clear all
load MedidasLimon.mat

H_Luis= h035(:,:,,1:21);

dimensionesMatrizH=size(H_Luis);

X=dimensionesMatrizH(1);
Y=dimensionesMatrizH(2);
T=dimensionesMatrizH(3);

```

```

Dist=dimensionesMatrizH(4);

realizaciones = X*Y;

distancias = [1 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40];

frec=3.5e9;
frec_ini=3e9;
frec_fin=4e9;

B=frec_fin-frec_ini;
N=2001;

tau=0:1/B:(N-1)/B;
tau_micro=tau/1e-6;

Margen = 20;

% RMS de las Medidas

for Dist = 1:1: length(H_Luis(1,1,1,:))

    matrizh_d =squeeze(H_Luis(:,:,,Dist));

    H=reshape(matrizh_d(:,,:),X*Y,T);

    for jj=1:realizaciones

        H_temp=squeeze(H(jj,:));
        h_temp=(ifft(H_temp));
        matrizh(jj,:)=abs(h_temp).^2;

    end

    mediamatrizh=matrizh;
    % RMS DELAY SPREAD
    RMS_PDP_20_035(Dist)= delay_spread(tau,mediamatrizh,Margen);
end

% RMS del Modelo

load ('Comparacion_PDP','PDP_23')

for d = 1:21
    RMS_PDP_3_5(d) = delay_spread(tau,PDP_23(d,:),Margen);
end

% Representacion de RMS's

figure;
set(gca,'fontsize',16);

```



```

plot(distancias(1:21), (RMS_PDP_20_035(1:21)).'*1e9, 'g', 'Linewidth', 2);
hold on

plot(distancias(1:21), (RMS_PDP_3_5(1:21)).'*1e9, 'Linewidth', 2)
plot(distancias(1:21), (RMS_PDP_20_035(1:21)).'*1e9, 'ko', 'Linewidth', 2);
set(gca, 'xtick', [1, 2:2:40]);
plot(distancias(1:21), (RMS_PDP_3_5(1:21)).'*1e9, 'ro', 'Linewidth', 2)
ylabel('Mean Rms Delay Spread (ns)');
xlabel('Distancia (m)');
title(['RMS Delay Spread OMNI 3.5 GHz (Margen = ', num2str(Margen), ')']);
legend('RMS Medidas', 'RMS Modelo')

```

## Comparación RMS Medido vs Modelo en la banda de 28 GHz

```

clc
clear all
load MedidasLimon.mat

H_Luis= hD(:,:,,1:21);

dimensionesMatrizH=size(H_Luis);

X=dimensionesMatrizH(1);
Y=dimensionesMatrizH(2);
T=dimensionesMatrizH(3);
Dist=dimensionesMatrizH(4);

realizaciones = X*Y;

distancias = [1 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40];

frec=28e9;
frec_ini=27e9;
frec_fin=29e9;

B=frec_fin-frec_ini;
N=2001;

tau=0:1/B:(N-1)/B;
tau_micro=tau/1e-6;

Margen = 20;

% RMS de las Medidas

for Dist = 1:1: length(H_Luis(1,1,1,:))

    matrizh_d =squeeze(H_Luis(:,:,,Dist));

    H=reshape(matrizh_d(:, :), X*Y, T);

```

```

for jj=1:realizaciones

    H_temp=squeeze(H(jj,:));
    h_temp=(ifft(H_temp));
    matrizh(jj,:)=abs(h_temp).^2;

end

mediamatrizh=matrizh;

RMS_PDP_20_OMNI(Dist)=delay_spread(tau,mediamatrizh,Margen)

end

% RMS del Modelo

load('Comparacion_PDP_28GHz','PDP_23')

for d = 1:21

    RMS_PDP_28(d) = delay_spread(tau,PDP_23(d,:),Margen);

end

figure;
set(gca,'fontsize',16);
plot(distancias(1:21),(RMS_PDP_20_OMNI(1:21)).'*1e9','g','Linewidth',2);
hold on
plot(distancias(1:21),(RMS_PDP_28(1:21)).'*1e9','Linewidth',2)
plot(distancias(1:21),(RMS_PDP_20_OMNI(1:21)).'*1e9','ko','Linewidth',2);
set(gca,'xtick',[8:2:40]);
plot(distancias(1:21),(RMS_PDP_28(1:21)).'*1e9','ro','Linewidth',2)
ylabel('Mean Rms Delay Spread (ns)');
xlabel('Distancia (m)');
title(['RMS Delay Spread BOCINA 28 GHz (Margen = ', num2str(Margen),')']);
legend('RMS Medidas','RMS Modelo')

```