

# Aplicabilidad de modelos teóricos de propagación para entorno urbano en la estimación de las pérdidas a 3.5 GHz en plantaciones de cítricos

Leandro Juan-Llácer<sup>(1)</sup>, David Párraga Riquelme<sup>(1)</sup>, María Teresa Martínez-Inglés<sup>(2)</sup>, José María Molina García-Pardo<sup>(1)</sup>, José Víctor Rodríguez<sup>(1)</sup>, Juan Pascual-García<sup>(1)</sup>, Eva Antonino-Daviu<sup>(3)</sup>, Miguel Ferrando-Bataller<sup>(3)</sup>

leandro.juan@upct.es, mteresa.martinez@tud.upct.es, josemaria.molina@upct.es,  
jvictor.rodriguez@upct.es, juan.pascual@upct.es, evanda@upvnet.upv.es, mferrand@com.upv.es

<sup>(1)</sup> Dep. Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Murcia, España

<sup>(2)</sup> Centro Universitario de la Defensa, Ministerio de Defensa, San Javier, España

<sup>(3)</sup> Dpto. de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España

**Abstract-** Agriculture 4.0 represents a considerable increase in the number of sensors, as well as the appearance of new wireless technologies, which will mean the need to efficiently plan radio communication systems in agricultural environments. In this work, the applicability of the Walfisch-Bertoni and the Ikegami propagation models that have been used to estimate propagation losses in urban environments, has been studied in citrus plantations. The similarities and differences of the profiles between the transmitter and the receiver, have been analyzed to identify the dominant propagation mechanisms in each case: buildings, in urban environments, and trees, in citrus plantations, assuming that the height of the transmitter is above the height of the trees and the height of the receiver below them. The propagation losses estimated by the models have been compared with the measurements carried out at the 3.5GHz frequency (one of the 5G bands) in a lemon plantation after the fruit was collected. Under these conditions, it has been observed how the slope of the regression line of the measurements has a value of 2.7, far from that obtained by the Walfisch-Bertoni model and closer to the one estimated by the Ikegami model. Furthermore, when analyzing the error between the theoretical and the measured losses, a standard deviation of 6.39dB is observed for the Walfisch-Bertoni model and 4.91dB for the Ikegami model.

## I. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías inalámbricas han experimentado un gran desarrollo en los últimos años para las comunicaciones a corta distancia, como la tecnología Bluetooth; a media distancia, como ZigBee; y a larga distancia, como WiFi, GSM / GPRS (2G), UMTS (3G) o LTE (4G) [1]. En agricultura, las tecnologías inalámbricas a media y larga distancia se han combinado para enviar remotamente parámetros capturados sobre el terreno en áreas localizadas. La agricultura 4.0 [2] va a suponer un aumento considerable del número de sensores, así como la aparición de nuevas tecnologías inalámbricas que van a facilitar, por ejemplo, el guiado automático de tractores, el seguimiento del estado del fruto a lo largo del tiempo antes de su cosecha, la automatización del abonado o la recolección de frutas, etc., lo que va a suponer la necesidad de planificar eficientemente los sistemas de radiocomunicación en estos entornos.

La planificación de estos sistemas se realiza mediante herramientas informáticas [3] que incorporan modelos de propagación basados en teorías electromagnéticas [4], que a



Figura 1. Plantación de limoneros, situación del transmisor y recorridos con las medidas realizadas.

partir de los parámetros radioeléctricos de los equipos de radiocomunicaciones (potencia transmitida, pérdidas y ganancias en transmisión y recepción, sensibilidad de los receptores, etc.) y el perfil del terreno permiten estimar las pérdidas por propagación y la cobertura radioeléctrica. La gran mayoría de los modelos de propagación incorporados a estas herramientas se pueden aplicar en entornos rurales, urbanos, suburbanos e interiores, debido al despliegue masivo de sistemas como GSM, UMTS o LTE. La utilización masiva de sensores y actuadores que se espera en la agricultura 4.0 va a requerir un gran despliegue de sistemas inalámbricos en otros entornos. En este sentido, se hace necesario proponer nuevos modelos de propagación para entornos agrícolas específicos atendiendo al tipo de plantación (cítricos, viñedos, cereales, hortalizas, etc.) para que puedan ser incorporados a las

herramientas de planificación de sistemas de radiocomunicaciones.

En el sector agrícola, las plantaciones de cítricos tienen una especial relevancia. A nivel mundial se estiman 6.9 millones de hectáreas de plantaciones de cítricos, ocupando China el primer lugar con 1.3 millones de hectáreas. En cuanto a España, la Comunidad Valenciana ocupa el primer lugar con unas 175.000 hectáreas, en segundo lugar, Andalucía con unas 80.000, en tercer lugar, la Región de Murcia con unas 30.000, seguidas del resto de comunidades autónomas que entre todas suman unas 5000 hectáreas. En cuanto a la producción mundial, Brasil y Estados Unidos son los líderes con el 37 por ciento de la cosecha de cítricos del mundo, con 14,8 millones de toneladas y 14,3 millones respectivamente. España se encuentra entre los primeros 10 países productores en el mundo, siendo el principal exportador con unos 3 millones de toneladas. Con estos números, el aumento significativo de sistemas de radiocomunicaciones en estas plantaciones para estar al nivel de lo que supone la agricultura 4.0, requiere cada vez más de una planificación eficiente de estos sistemas en este tipo de plantaciones.

Las plantaciones de cítricos (limoneros, naranjos, mandarinos y pomelos) siguen un marco de plantación que viene definido por la distancia entre filas y la distancia entre los árboles en una misma fila (ver Fig. 1). Este marco de plantación suele realizarse de tal forma que la distancia entre filas es mayor que la distancia entre árboles, dando lugar habitualmente a que las ramas de árboles consecutivos en una misma fila se toquen, dejando un camino (calle) entre filas que es utilizado principalmente para fumigar, podar y recolectar el fruto. Si tenemos en cuenta que, a partir de 1 GHz, los mecanismos de propagación para árboles aislados son: la difracción, la dispersión al atravesar el árbol y la reflexión en el suelo [5], el entorno de plantación de cítricos tiene similitudes con el planteado en [6] para entorno urbano. En este trabajo, Walfisch y Bertoni identifican los principales mecanismos de propagación en el perfil representado en la Fig. 2(a) para proponer un modelo teórico en la banda de UHF. Básicamente, asumen edificios equiespaciados una distancia  $w$  y de la misma altura  $h_b$ , altura del transmisor  $h_t$  por encima de la altura de los edificios y la altura del receptor  $h_r$  por debajo de la altura de los edificios. Los mecanismos de propagación dominantes según este modelo son: la difracción múltiple por propagación sobre los edificios y la difracción final desde el edificio más próximo al receptor considerando también un término adicional por la reflexión en el edificio al otro lado de la calle.

En el trabajo que se presenta, se ha considerado el perfil de la Fig. 2(b) para plantaciones de cítricos y se ha estudiado la aplicabilidad de los modelos de propagación propuestos por Walfisch-Bertoni y por Ikegami [7] en estos entornos. Para ello, se ha llevado a cabo una campaña de medidas a 3.5GHz (una de las bandas de 5G) en una plantación de limoneros, una vez recolectada la fruta. En la sección II se describen el entorno de propagación y el sistema de medidas empleado. Las expresiones que estiman las pérdidas por propagación de los modelos estudiados se presentan en la sección III. En la sección IV se hacen algunas consideraciones para aplicar estos modelos en plantaciones de cítricos. Los resultados obtenidos con los modelos teóricos se analizan y comparan con las medidas en la sección V. Finalmente, en la sección VI se presentan las conclusiones.

## II. ENTORNO DE PROPAGACIÓN Y SISTEMA DE MEDIDAS

### A. Entorno de propagación

Las medidas fueron realizadas en un área de 200x300m de una plantación de limoneros de la empresa FRUCA situada en el valle de Carrascoy en la Región de Murcia (ver Fig. 1). El marco de plantación es 7x5m, es decir, 7m. entre filas y 5 m. entre limoneros de la misma fila.

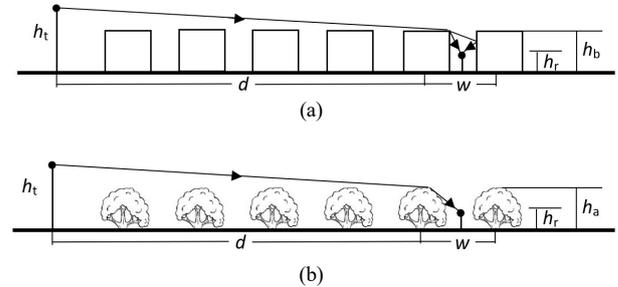


Figura 2. Corte vertical con (a) edificios equiespaciados y con (b) árboles equiespaciados.

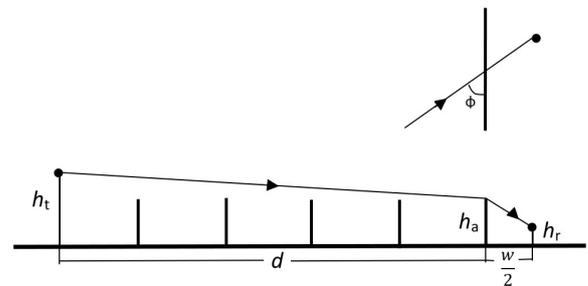


Figura 3. Corte vertical de perfil idealizado con aristas equiespaciadas y corte horizontal visto desde arriba.

### B. Sistema de medidas

El sistema de medidas utilizado se basa en el analizador de redes VNA ZVK (10MHz-40GHz) de Rhode&Schwarz y en el analizador de espectros portátil MS2090A (9kHz-26.5GHz) de Anritsu. Además, se han utilizado el amplificador ZVE-8G+ (2-8GHz), 2 antenas ultra-wideband (0.8-40GHz) STEATITE Q-PAR, un GPS, cables y conectores. También se ha desarrollado un programa en MATLAB que permite automatizar el proceso de medida.

En transmisión, el analizador de redes genera un tono de 3dBm a la frecuencia de 3.5 GHz que es amplificado y transmitido con polarización vertical por una antena situada en un mástil a una altura  $h_t=4.2$ m.

El sistema receptor se monta en un vehículo con la antena receptora a una altura  $h_r=1.7$ m. El programa desarrollado permite seleccionar la frecuencia a medir, el ancho de banda, el tiempo entre muestras, etc. del analizador de espectros portátil y almacenar un conjunto de muestras en un recorrido. Para cada muestra, se dispone de la posición geográfica, la potencia recibida, el tiempo (hora, minutos y segundos) y altura sobre el nivel del mar.

Para tener en cuenta el efecto de todo el equipamiento en la medida se llevó a cabo un proceso de calibración con un conjunto de medidas en caminos de visión directa entre transmisor y receptor.

En la Fig. 1 puede verse la localización del transmisor y los recorridos realizados. Se llevaron a cabo 21 recorridos

cada uno de ellos en un camino (calle) de longitud de 200m. El número de muestras por recorrido fue de 116 en media, siendo el número de muestras totales de 2448.

### III. MODELOS DE PROPAGACIÓN EN ENTORNO URBANO

#### A. Walfisch-Bertoni

Este modelo asume el perfil de la Fig.2(a) y las pérdidas totales se estiman como la suma de tres contribuciones [6]: pérdidas de espacio libre, pérdidas por difracción múltiple sobre edificios y pérdidas por difracción final.

Las pérdidas en espacio libre se calculan con la expresión:

$$L_o(dB) = 32.44 + 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) \quad (2)$$

donde:

- $d$  se expresa en km y
- $f$  es la frecuencia expresada en MHz.

Para estimar las pérdidas por difracción, sustituye los edificios por aristas (ver Fig. 3) y propone unas expresiones para el cálculo de la difracción sobre múltiples aristas y para la difracción final, calculando las pérdidas en espacio libre con la expresión (3).

En este modelo, las pérdidas por difracción múltiple se calculan con la siguiente expresión:

$$L_{msd}(dB) = 68.87 - 9\log_{10}(f) - 18\log_{10}(h_t - h_a) + 18\log_{10}(d) \quad (3)$$

donde  $f$  se expresa en MHz y  $d$  en km.

Las pérdidas por difracción se estiman con:

$$L_{rts}(dB) = -11.8 + 10\log_{10}(f) + 5\log_{10}\left[\left(\frac{w}{2}\right)^2 + (h_a - h_r)^2\right] + 20\log_{10}\left[\frac{2(h_a - h_r)}{w}\right] \quad (4)$$

donde:

- $f$  se expresa en MHz,
- $w$  es el ancho de la calle,
- $h_a$  la altura media de los árboles, y
- $h_r$  la altura del receptor.

#### B. Ikegami

En este modelo, las pérdidas totales se estiman como la suma de las pérdidas en espacio libre y las pérdidas por difracción final [7]. Las pérdidas de espacio libre se calculan, al igual que el modelo anterior, con la expresión (2) y para las pérdidas por difracción final propone la expresión (5).

$$L_{rts}(dB) = -8.2 + 10\log_{10}(f) - 10\log(w) + 20\log_{10}(h_a - h_r) + 10\log_{10}(\sin(\phi)) \quad (5)$$

donde:

- $f$  se expresa en MHz, y
- $\phi$  es el ángulo que forma el rayo incidente respecto al eje de la calle (ver Fig. 3).

### IV. APLICACIÓN DE LOS MODELOS EN PLANTACIONES DE CÍTRICOS

Los mecanismos de propagación para árboles aislados a frecuencias superiores a 1GHz son: la difracción, la dispersión al atravesar el árbol y la reflexión en el suelo [5].

En el entorno de propagación de la Fig. 2 (b) para el caso de múltiples árboles, con la antena transmisora por encima de los árboles, asumimos que los mecanismos de propagación dominantes van a ser los mismos que para el entorno de la Fig. 2(a), es decir, difracción múltiple y difracción final.

Para la difracción múltiple sobre árboles, si sustituimos cada árbol por una arista se pueden estimar las pérdidas con la expresión (4).

En la difracción final, las expresiones de los modelos de Walfisch-Bertoni e Ikegami consideran el efecto de la reflexión del edificio al otro lado de la calle (ver Fig. 2(a)) que no se va a producir en entorno de árboles ya que la señal difractada en la arista se va a dispersar en el árbol al otro lado del camino. Por tanto, se deben corregir las expresiones de Walfisch-Bertoni e Ikegami con un factor de 3dB y 2.4dB, respectivamente.

En el apartado siguiente, los resultados que se muestran para los modelos implementados han tenido en cuenta estas consideraciones.

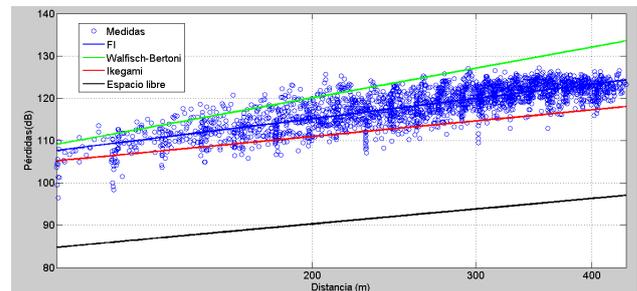


Figura 5. Pérdidas en función de la distancia.

### V. RESULTADOS

En la Fig. 5 se han representado las pérdidas medidas (en dB) en función de la distancia. También se ha representado las rectas de regresión de las pérdidas medidas y de las pérdidas totales estimadas con los modelos de Walfisch-Bertoni y de Ikegami. Estas regresiones se han obtenido utilizando el método de ajuste FI (*Floating Intercept*) [8].

$$L_{FI}(dB) = \alpha + \beta 10\log_{10}(d) + \chi_\sigma \quad (6)$$

donde:

- $\alpha$  (en dB) y  $\beta$  (pendiente) son parámetros de ajuste,
- $d$  la distancia entre transmisor y receptor en metros, y
- $\chi_\sigma$  una variable aleatoria gaussiana de media cero y desviación estándar  $\sigma$  en dB.

En la Tabla I se muestran los parámetros utilizados en los cálculos.

TABLA I  
PARÁMETROS UTILIZADOS EN LOS CÁLCULOS

$f$ (GHz)	3.5
$h_t$ (m)	4.2
$h_r$ (m)	1.7
$h_a$ (m)	2.7
$w$ (m)	7

En la Tabla II, se recogen las pendientes y las desviaciones estándar en cada caso.

De los resultados, se observa que la pendiente de la recta de regresión de las medidas es 2.7, por debajo de 3.9 del modelo de Walfisch-Bertoni y por encima de 2.1 del modelo de Ikegami.

Por otra parte, las pérdidas por difracción final, como se observa de las expresiones (4) y (5), son independientes de la distancia entre el transmisor y el receptor. Además, la diferencia entre el valor máximo y el mínimo en ambos modelos está en torno a 3 dB en el área en el que se han realizado las medidas. En el modelo de Ikegami el valor se encuentra entre 18.26 dB y 21.19 dB y en el de Walfisch-Bertoni entre 18.32 dB y 21.37 dB. Se observa que la difracción final contribuye ligeramente a variar la pendiente de las rectas de regresión. Si no se considera la difracción final, la pendiente sería de 3.8 en el modelo de Walfisch-Bertoni y de 2 en el de Ikegami.

TABLA II  
PENDIENTES Y DESVIACIONES ESTÁNDAR

	$\alpha$	$\beta$	$\sigma$ (dB)
Regresión medidas	52.6	2.7	2.87
Walfisch-Bertoni	28.5	3.9	0.99
Ikegami	62.8	2.1	0.51

En la Tabla III se recogen el error medio y la desviación estándar de este error de las pérdidas obtenidas por el modelo teórico y de las pérdidas medidas. El error medio indica que el modelo de Walfisch-Bertoni sobre estima las pérdidas mientras que el modelo de Ikegami las subestima. La desviación estándar de este error es menor para el modelo de Ikegami que para el de Walfisch-Bertoni, con una diferencia de 1.48 dB.

TABLA III  
ERROR MEDIO Y DESVIACIONES ESTÁNDAR

	Error (dB)	$\sigma_{\text{error}}$ (dB)
Walfisch Bertoni	6.40	6.39
Ikegami	-4.92	4.91

## VI. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha estudiado la aplicación de modelos de propagación para estimar las pérdidas en entornos urbanos como el de Walfisch-Bertoni y el de Ikegami, en entornos de plantaciones de cítricos. Para ello, se ha realizado una

campana de medidas a la frecuencia de 3.5GHz en una plantación de limoneros una vez recolectada la fruta. La altura del transmisor está por encima de la altura los árboles. En estas condiciones, se ha observado como la pendiente de la recta de regresión de las medidas tiene un valor de 2.7, alejado del obtenido con el modelo de Walfisch-Bertoni y más próximo al estimado con el de Ikegami, en el que no se considera las pérdidas por difracción múltiple. Además, al analizar el error entre las pérdidas teóricas y las pérdidas medidas, se observa una desviación estándar de 6.39dB con el modelo de Walfisch-Bertoni y de 4.91dB con el modelo de Ikegami.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la empresa FRUCA su interés en el proyecto y permitimos llevar a cabo la campaña de medidas en una de sus plantaciones.

Este trabajo ha sido financiado por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través del proyecto 20804/PI/18 de la convocatoria de Ayudas a proyectos para el desarrollo de investigación científica y técnica por grupos competitivos, incluida en el Programa Regional de Fomento de la Investigación (Plan de Actuación 2019) de la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia y por el Ministerio de Economía y Competitividad MINECO, Spain (TEC2016-78028-C3-2-P).

## REFERENCIAS

- [1] H. Mahmood Jawad, R. Nordin, S. Kamel Gharghan, A. Mahmood Jawad, and M. Ismail, "Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review", *Sensors*, vol. 17, 1-45, Aug. 2015.
- [2] "Digital Farming: What does it really mean?" CEMA, Available at: <http://www.cema-agri.org/page/digital-farming-what-does-it-really-mean>.
- [3] Directory of wireless system planning tools. 2018. UBC Radio Science Lab, datasheet available at: <http://rsl.ece.ubc.ca/planning.html#MentumPlanet>
- [4] C. Phillips, D. Sicker, and D. Grunwald, A Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, n° 1, pp. 225-270, 2013
- [5] Recommendation ITU-R P.833-9: Attenuation in vegetation. P Series Radiowave propagation. Available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833/es>
- [6] J. Walfisch, and H.L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 36, No. 12, pp. 1788-1796, Dec. 1988.
- [7] F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi, and M. Umehira, "Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-32, No. 8, pp. 882-829, Aug. 1984.
- [8] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, and S. Sun, Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design, *IEEE Trans. On Communications*, vol. 63, no. 9, pp. 3029-3055, sep. 2015.