

**MULTICIENCIAS**, Vol. 12, N° Extraordinario, 2012 (305 - 310)  
ISSN 1317-2255 / Dep. legal pp. 200002FA828

## Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil

Jairo Beltrán<sup>1</sup>, José Fermín<sup>2</sup> y María Hernández<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Facultad de Ingeniería, <sup>2</sup>Facultad Experimental de Ciencias,  
Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela

[jairolbd@gmail.com](mailto:jairolbd@gmail.com), [jfermin70@gmail.com](mailto:jfermin70@gmail.com), [fernanda750@gmail.com](mailto:fernanda750@gmail.com)

### Resumen

En el presente estudio se comparan los modelos implementados con mayor frecuencia en la predicción de la pérdida por propagación de la telefonía móvil, para la banda de 900 MHz en ambientes rurales y macro-células. La metodología aplicada es de campo permitiendo desarrollar contrastes con data de la zona occidental de Venezuela. Los resultados evidencian que el modelo que mejor estima su predicción es el de Espacio Libre, seguido por el Okumura-Hata. La curva de regresión obtenida de la data permite estimar, a través de la ley de Lambert-Beer, la constante de absorción del medio de propagación y proponer calibraciones para los modelos analizados. Finalmente se recomienda ampliar la campaña de medición para validar los hallazgos.

**Palabras clave:** modelo de propagación electromagnética, pérdida por propagación, telefonía móvil.

# Comparison of Electromagnetic Propagation Models Implemented in Mobile Telephony

## Abstract

In this study, the models implemented most frequently to predict the path loss of mobile telephony for the 900 MHz band in rural environments and macro-cells are compared. Field methodology is applied, permitting the development of contrasts with data from western Venezuela. Results show that the model that best estimates the prediction is Free Space, followed by Okumura-Hata. The regression curve obtained from the data, permits estimating the absorption constant of the propagation medium through the Lambert-Beer law, and proposing calibrations for the analyzed models. Finally, it is recommended that the measurement campaign be expanded to validate the findings.

**Keywords:** electromagnetic propagation models, mobile telephony, path loss.

## Introducción

El modelado de los canales de radiocomunicación es uno de los procesos más complejos que intervienen en el diseño de sistemas de comunicación. Esto generalmente se logra con el uso de métodos estadísticos, partiendo de las mediciones realizadas en una zona específica y para un rango del espectro electromagnético.

En la actualidad, los modelos de propagación de la telefonía móvil están dirigidos principalmente a predecir la potencia recibida de una señal emitida a una determinada distancia del transmisor, así como sus variaciones en la cercanía de un punto de interés. Para tal fin, numerosos autores entre los que destacan Okumura y col. (1968), Hata (1980), Delisle y col. (1985), Iskander y Yun (2002), Galvis y col. (2007), Ignea y Mihăiuþi (2008), Patel y col. (2010), entre otros, han propuesto y adaptado modelos de propagación electromagnética a las telecomunicaciones, que varían en su enfoque, complejidad y precisión.

Sin embargo, García y col. (2002) afirman que se puede incurrir en graves errores si no se prueba la eficiencia de estos modelos en las regiones donde se desee aplicar, por lo que es importante seleccionar y ajustar el modelo que más se aproxime a la realidad de las condiciones del ambiente de propagación, para una óptima ubicación de las estaciones base y cálculo de cobertura.

En virtud de lo expuesto, el presente artículo tiene como objetivo comparar los modelos implementados con

mayor frecuencia en la predicción de la pérdida por propagación (*path-loss*) de las estaciones base de telefonía móvil, con la finalidad de determinar cuál estima con mayor aproximación los *path-loss* en ambientes rurales de la zona occidental de Venezuela.

## Modelos de propagación para ambientes abiertos

Los modelos vigentes varían según su complejidad, precisión y naturaleza de estudio. El más sencillo de estos modelos es el de espacio libre donde se considera la propagación de la onda en el vacío.

### 1. Modelo de propagación en el espacio libre

Según diversos autores (Iskander y Yun, 2002; Correa y col., 2005; Nadir y col., 2008; Alim y col., 2010; Mantilla y col., 2010; Nadir y Muhammad, 2010), el modelo de espacio libre es utilizado para predecir la potencia de la señal cuando existe una línea de vista entre el transmisor isotrópico y el receptor, a través de la ecuación:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad [1]$$

donde,  $P_t$ ,  $G_t$  y  $P_r$ ,  $G_r$  son las potencias (W) y ganancias (dB), transmitidas y recibidas respectivamente,  $d$  (m) es la distancia de separación entre las antenas,  $L$  un factor de pérdida del sistema no relacionado a la propagación,  $\lambda$  es

la longitud de onda. Bajo este modelo, la *pérdida por propagación*  $P_L$  (dB), según su frecuencia  $f$  (Hz) es:

$$P_L = 20 \log d + 20 \log f - 10 \log G_t - 10 \log G_r - 147,55 \quad (\text{dB}) [2]$$

## 2. Clasificación de los modelos de pérdida por propagación (path loss)

Según Pedraza y col. (2009), la clasificación de los modelos de pérdida por propagación, puede hacerse según el ambiente de propagación, la cobertura y el origen de los datos (Figura 1).

### 2.1. Modelo de Okumura

El modelo empírico de Okumura (1968) es uno de los más ampliamente utilizados para la predicción de señales en áreas urbanas. Este modelo es aplicable para frecuencias en el rango de 150 MHz a 1920 MHz, distancias de 1 Km a 100 Km, y altura de la antena de la estación base en el rango de 30 m a 1000 m. Su ecuación es:

$$P_L = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_t) - G(h_r) - G_{AREA} \quad (\text{dB}) [3]$$

donde,  $L_F$  es la atenuación de espacio libre,  $A_{mu}(f, d)$  la atenuación relativa promedio (curvas),  $G_{AREA}$  la ganancia debido al tipo de ambiente, y el resto de las variables las define el modelo de Espacio Libre.

### 2.2. Modelo de Okumura-Hata

El modelo Hata (1980) formula matemáticamente los gráficos de pérdidas por propagación del modelo Okumura. Las pérdidas existentes en el enlace pueden ser obtenidas por medio de la ecuación, en la que se ha incluido el factor de corrección para ambientes rurales.

$$F_t = 23,61 + 7,83 \log(f) - 13,82 \log g(h_t) + (44,9 - 6,55 \log(h_r)) \cdot \log(d) - 4,78(\log(f))^2 \quad (\text{dB}) [4]$$

donde,  $h_t$  (m) es la altura de la antena transmisora,  $f$  (MHz) la frecuencia de la onda y  $d$  (Km) la distancia entre las antenas transmisora y receptora.

### 2.3. Modelo de dos rayos (reflexión terrestre)

El modelo determinístico de Dos Rayos de reflexión terrestre (Figura 2) se basa en óptica geométrica, y considera la transmisión directa y una componente de propagación reflejada en la tierra entre el transmisor y el receptor. Se puede considerar que este modelo de gran escala predice la potencia de la señal en distancias de varios kilómetros, tomando en cuenta que la antena transmisora debe tener una altura mínima de 50m (Saunders y Zavala 2007; Milanović y col. 2010).

$$P_{L(\text{dB})} = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r) \quad [5]$$

donde la nomenclatura y simbología es la utilizada en el modelo de espacio libre. Este método es el modelo determinístico más básico e ideal para predecir la pérdida a varios kilómetros, pero posee poca fortaleza al utilizarlo a cortas distancias debido a que no estudia las condiciones ambientales y geográficas de propagación.

## Procedimiento metodológico para la recolección de los datos

El proceso seguido para desarrollar la campaña de medición se basó en las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R 2009 Rec. P.1546-4, ITU-R 2012 Rec. P.1411-6, ITU-R 2012 Rec. P.526-12) CONATEL (2003), Abhayawardhana y col. (2005), Correa y col. (2005), Daboin y Mavares (2007) y Ayyappan y Dananjayan (2008).

El equipo utilizado estuvo conformado por un analizador de espectro portátil Aaronia Spectran HF-2025, una antena Aaronia Hyper-log 7525, un dispositivo GPS Garmin Nüvi 855, la interfaz gráfica LCS Spectrum Analyzer (HF) y un computador portátil.

La campaña fue llevada a cabo en una macro-célula de ambiente rural del Municipio Buchivacoa del Estado Falcón, aplicando el siguiente procedimiento:

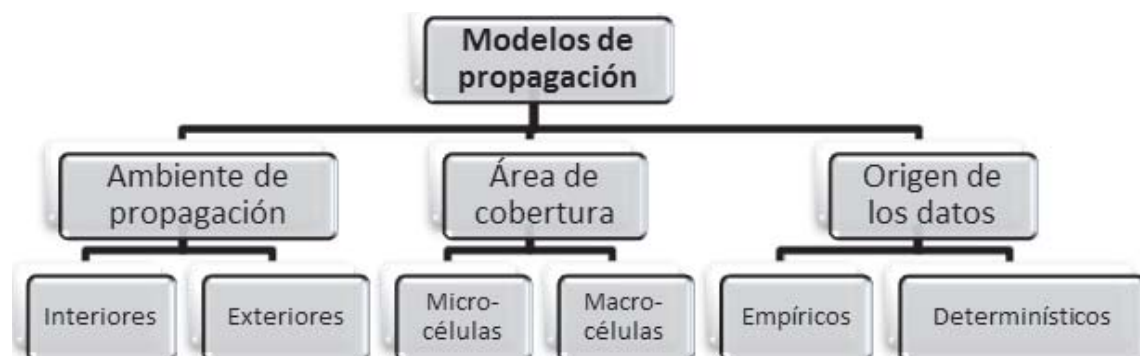
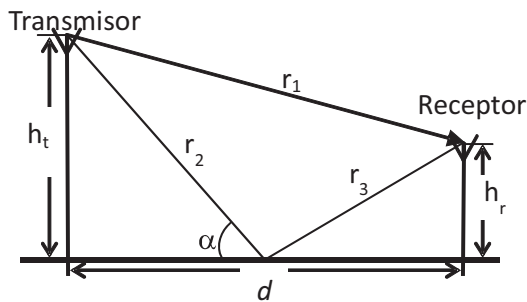


Figura 1. Clasificación de los modelos de pérdida por propagación. Fuente: Elaboración propia adaptado de Pedraza y col. (2009).



**Figura 2.** Modelo de dos rayos. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Milanović y col. (2010).

- Identificar la Estación Base y sus características.
- Calcular matemáticamente la potencia recibida en función a la distancia, utilizando las ecuaciones de los modelos de propagación aplicables.
- Seleccionar los parámetros y las rutas de medición.
- Realizar mediciones de campo de la potencia recibida, en función a la distancia.
- Comparar los resultados matemáticos con las mediciones.

## Comparación de los modelos de propagación con las mediciones de campo

La señal analizada fue 893 MHz proveniente de una estación base de las compañías operadoras de telefonía celular ubicada en Capatárída, municipio Buchivacoa. En la Tabla 1 se presentan los cálculos matemáticos de la pérdida de potencia por propagación estimados por los modelos Espacio Libre (E.L.) Okumura-Hata (O-H), Dos Rayos (DOS R), al tiempo que se muestran las mediciones de campo (Real), la predicción utilizando la regresión (Reg) de los datos y finalmente los residuos (ERROR absoluto en dBm) al comparar la data con cada uno de los modelos.

En la Tabla 1 se observa que el mayor error promedio en la predicción de la pérdida de potencia en la distancia lo presenta el modelo de *Dos Rayos* con 9,09 dBm, seguido del *Okumura-Hata* con un error de 8,83 dBm mientras que el menor error lo muestra el modelo de Espacio Libre con 3,26 dBm.

Por otro lado, el Gráfico 1 muestra el comportamiento de cada uno de los modelos y datos obtenidos en la medi-

**Tabla 1.** Pérdida por Propagación en función de la distancia.

N	Distancia (Km)	Real (dBm)	Regr (dBm)	E.L (dBm)	O-H (dBm)	DOS R (dBm)	Error (dBm) Real Vs. Modelo		
							E.L	O-H	DOS R
1	6,328	-45,1	-45,72	-41,47	-56,42	-40,92	3,63	11,32	4,18
2	6,029	-44,65	-45,20	-41,05	-55,77	-40,08	3,60	11,12	4,57
3	5,650	-44,82	-44,51	-40,49	-54,88	-38,96	4,33	10,06	5,86
4	5,385	-42,77	-44,00	-40,07	-54,23	-38,12	2,70	11,46	4,65
5	5,143	-42,55	-43,51	-39,67	-53,61	-37,32	2,88	11,06	5,23
6	4,943	-43,96	-43,08	-39,33	-53,07	-36,63	4,63	9,11	7,33
7	4,717	-44,14	-42,58	-38,92	-52,43	-35,82	5,22	8,29	8,32
8	4,284	-43,66	-41,56	-38,08	-51,12	-34,15	5,58	7,46	9,51
9	3,959	-36,87	-40,72	-37,40	-50,05	-32,78	0,53	13,18	4,09
10	3,856	-36,8	-40,44	-37,17	-49,69	-32,32	0,37	12,89	4,48
11	3,656	-40,49	-39,87	-36,71	-48,97	-31,39	3,78	8,48	9,10
12	3,151	-39,94	-38,28	-35,41	-46,95	-28,81	4,53	7,01	11,13
13	2,785	-42,02	-36,97	-34,34	-45,27	-26,67	7,68	3,25	15,35
14	2,494	-37,1	-35,79	-33,38	-43,77	-24,75	3,72	6,67	12,35
15	2,225	-35,55	-34,58	-32,39	-42,23	-22,77	3,16	6,68	12,78
16	2,017	-31,72	-33,53	-31,54	-40,89	-21,06	0,18	9,17	10,66
17	1,698	-31,88	-31,69	-30,05	-38,55	-18,07	1,83	6,67	13,81
18	1,403	-30,23	-29,66	-28,39	-35,96	-14,76	1,84	5,73	15,47
19	1,113	-24,66	-27,19	-26,38	-32,81	-10,73	1,72	8,15	13,93
Error Promedio							3,26	8,83	9,09
Desviación Estándar							1,92	2,60	4,06

Fuente: Elaboración propia.

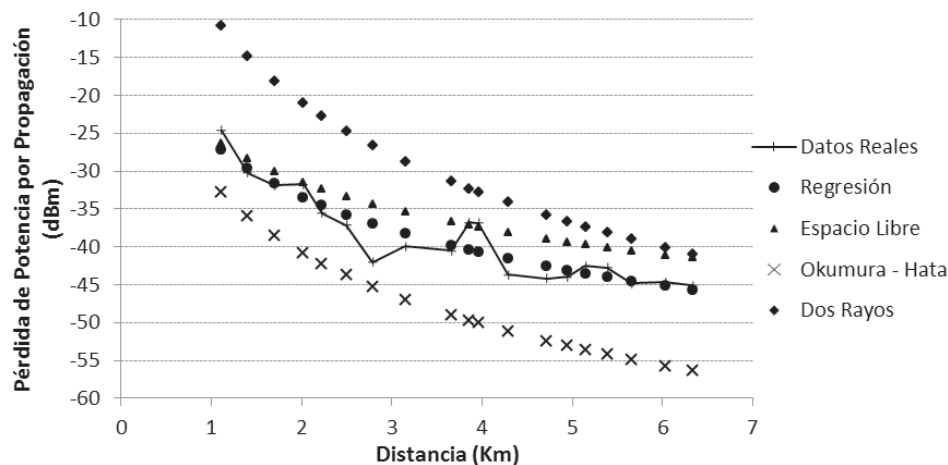


Gráfico 1. Comparación de los modelos de propagación. Fuente: Elaboración propia.

ción; se observa que el modelo de Espacio Libre y el de Dos Rayos predicen por defecto la pérdida por propagación en comparación con la data real, mientras que el modelo Okumura-Hata lo hace por exceso.

Combinando los análisis de la Tabla 1 y del Gráfico 1, se desprende que para mejorar la predicción de la pérdida de potencia por propagación, es necesario agregar a los modelos una corrección de calibración:

- Para el Modelo de Espacio Libre: -3,26 dBm.
- Para el Modelo Okumura-Hata: +8,83 dBm.
- Para el Modelo de Dos Rayos: -9,09 dBm.

### Parámetros de regresión y su análisis físico

Los modelos de propagación predicen una “pérdida básica” de propagación que varía con la distancia según la ley de absorción de Lambert-Beer (Veiga, 1998) que establece que una onda electromagnética, al propagarse por un medio, es absorbida bajo la ecuación:

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad [6]$$

donde  $I$  es la intensidad de la onda luego de propagarse por el medio,  $I_0$  la intensidad antes de su propagación,  $\alpha$  es el coeficiente de absorción del medio, y  $d$  la distancia de propagación. Expresando la ecuación [6] en dB, queda:

$$P_l(dB) = 10\alpha \log(d) + K \quad [7]$$

donde  $K$  es una constante que depende del ambiente de propagación, el medio, la frecuencia y altura de las antenas.

Los resultados de esta investigación permiten generar la curva de regresión modelada en la ecuación [8] (mostrada en el Gráfico 1) con un coeficiente de correlación cuadrático de 0,8718:

$$P_l(dBm) = 24,55 \log(d) + 26,05 \quad [8]$$

La ecuación [8] permite predecir la pérdida de potencia por propagación de los enlaces de telecomunicaciones en ambientes rurales del municipio Buchivacoa del estado Falcón. Asimismo, estima el coeficiente de absorción del medio  $\alpha = 2,455 \text{ Km}^{-1}$  característico de la zona en estudio, el cual depende de los obstáculos, temperatura, lluvia, presión atmosférica y en general de las condiciones del medio.

### Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede proponer el modelo de Espacio Libre como el mejor estimador de la pérdida por propagación en ambientes rurales, con condiciones geográficas similares a las del municipio Buchivacoa del estado Falcón.

No obstante, la data obtenida debe ser ampliada, incrementando el número de mediciones y la cantidad de enlaces analizados, con el propósito de detectar con mayor precisión la exactitud en la predicción de la pérdida por propagación en ambientes rurales de la región occidental de Venezuela, así como validar el coeficiente de absorción  $\alpha$  del medio.

Por otro lado, es importante acotar que existen numerosos modelos de propagación que se utilizan en telefonía móvil que no fueron mencionados en el presente estudio, tal es el caso de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (2009:59) en su recomendación Rec. ITU-R P.1546-4, donde propone a sus países miembros (entre ellos Venezuela) un modelo que “produce resultados similares a los del método Okumura-Hata para distancias de hasta 10 km”. En virtud de lo expuesto y considerando los hallazgos de este estudio en relación al modelo Okumura-Hata, se hace necesaria la evaluación de la pérdida de

potencia por propagación de los enlaces de telefonía móvil en todo el territorio nacional, para verificar la validez del modelo en las diferentes regiones del país.

## Referencias

- ABHAYAWARDHANA, V.; WASSELL, I.; CROSBY, D.; SELLARS, M.; BROWN, M. (2005). Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems. Vehicular Technology Conference. Stockholm, Sweden.
- ALIM, M., RAMHMAN, M., HOSSAIN, M.; AL-NAHID, A. (2010). Analysis of large-scale propagation models for mobile communications in urban area. **International Journal of Computer Science and Information Security**, Vol. 7 N° 1:135-139.
- AYYAPPAN, K.; DANANJAYAN, P. (2008). Propagation model for highway in mobile communication system. **Ubiquitous Computing and Communication Journal**, Vol. 3 N°4:61-66.
- Comisión Nacional de Telecomunicaciones, CONATEL (2003). Condiciones de Seguridad ante las Emisiones de Radiofrecuencias Producidas por Estaciones Radioeléctricas Fijas en el rango de 3 KHz a 300 Ghz. Decreto N° 2493, **Gaceta Oficial** N° 37725.
- CORREA, C.; GOGOY, R.; GRATE, W.; ORELLANA, M. (2005) Evaluación de enlaces inalámbricos urbanos usando protocolo IEEE 802.11b. **Revista de la Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá**, Vol. 13 N°3:38-44.
- DABOIN, A.; MAVARES, D. (2007). Evaluación del modelo de Okumura en áreas abiertas con difracción múltiple, **Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal**. Vol. 1 N° 3:41-48.
- DELISLE, G., LEFEVRE, J., LECOURS, M.; CHOUINARD, J. (1985). Propagation Loss Prediction: A Comparative Study with Application to the Mobile Radio Channel. **IEEE Transaction on Vehicular Technology**. Vol. VT 34 N°3:86-96.
- GALVIS, A., GÓMEZ, C.; HINCAPIÉ, C. (2007) Modelos de canales inalámbricos y su aplicación al diseño de redes Wimax. **Revistas ICESI, Sistemas y Telemática**, Vol. 8 N°1:13-33.
- GARCIA, J., RODRÍGUEZ, O.; CASTILLO, J. (2002). Desempeño de modelos de propagación en comunicación móvil para la zona de Caldas parte 1: modelos para áreas urbanas. X Congreso Internacional de Telecomunicaciones. Valdivia, Chile, 2002.
- HATA, Masharu (1980). Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Vol. 29 N°3:317-325.
- IGNEA, A.; MIHĂIUȚI, A. (2008). The Study of Radio Propagation Models for Urban Areas Prediction. **Seria Electronică și Telecomunicații Transactions on Electronics and Communications**, Vol. 53 N° 67:1-6.
- ISKANDER, M.; YUN, Z. (2002). Propagation prediction models for wireless communication systems. **IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques**. Vol. 50 N°3:662-673.
- MANTILLA, E., REYES, C.; RAMOS, B. (2010). IEEE 802.11 b and g wlan propagation model using power density measurements at spool. **Word Academy of Science, Engineering and Technology** Vol. 70 N°1:93-96.
- MILANOVIĆ, J., RIMAC-DRLJE, S.; MAJERSKI, I. (2010). Radio wave propagation mechanisms and empirical models for fixed wireless access systems. **Technical Gazette**, Vol. 17 N°1:43-52.
- NADIR, Z.; MUHAMMAD, I. (2010). Path loss determination using Okumura-Hata model and cubic regression for missing data for Oman. International Multiconference of Engineers and Computer Scientific, Hong Kong, China.
- NADIR, Z., ELFADHIL, N.; TOUATI, F. (2008). Path loss determination using Okumura - Ha model and spline interpolation for missing data for Oman. World Congress on Engineering, London, U.K.
- OKUMURA, Y., OHMORI, E., KAWANO, T.; FUKUDA, K. (1968). Field strength and its variability in the VHF and UHF land mobile radio service, **Review of the Electrical Communication Laboratory**, N°16:825-873.
- PATEL, S., DWIVEDI, V.; KOSTA, Y. (2010). A parametric characterization and comparative study of Okumura and Hata propagation-loss prediction models for wireless environment. **International Journal of Electronic Engineering Research**, Vol. 2 N°4:453-462.
- PEDRAZA, L., HERNÁNDEZ, C.; BALLESTEROS, D. (2009). Análisis experimental para un modelo de propagación de la telefonía móvil de la universidad militar ciencia e ingeniería neogranadina. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina** Vol. 19 N°2:45-58.
- SAUNDERS, S.; ZAVALA, A. (2007). **Antennas and propagation for wireless communication systems**. Second Edition, UK: Editorial Wiley.
- UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (2009). ITU-R Rec. P.1546-4 Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz, ITU, Geneva, Switzerland.
- UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (2012). ITU-R Rec. P.1411-6, Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. ITU, Geneva, Switzerland.
- UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (2012). ITU-R Rec. P.526-12, Propagation by diffraction, ITU, Geneva, Switzerland.
- VEIGA, Eugenio (1998). **Telecomunicaciones Móviles**, España: Ediciones Marcombo p.p. 276.