

# ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE RADAR E INSTRUMENTACIÓN



## ESTUDIO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Lic. Laura Daniela Baravalle

Director: Ing. Marcela Busnardo

Córdoba, Marzo del 2014



**Palabras claves:**

Ondas Electromagnéticas - Modelos de Propagación - Radiofrecuencia



---

## Resumen

Los modelos de propagación tienen como objetivo lograr una estimación lo más precisa posible de cómo se propagan las ondas electromagnéticas. Su finalidad es predecir las pérdidas de trayecto que existen entre el transmisor y el receptor para diferentes tipos de ambientes. Es de gran importancia hacer las consideraciones correspondientes respecto a los efectos del ambiente y los obstáculos sobre los cuales ocurre la propagación, como lo son edificios, calles, árboles, montañas, etc.

En el presente trabajo se realizó un estudio de carácter bibliográfico de los diferentes modelos de propagación de ondas electromagnéticas en ambientes no confinados (out-door).

Luego se realizó una constatación empírica de aquellos modelos que parecen ser los más adecuados a los entornos donde se llevaron a cabo las mediciones (entorno sub-urbano y entorno urbano) y a la frecuencia de los equipos de transmisión ( $5GHz$ ).

---

## Introducción

Este trabajo de Especialización en Sistemas de Radar e Instrumentación tiene como objetivo general investigar y analizar modelos de propagación en ambientes no confinados (outdoor). Determinando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, para luego realizar una constatación empírica de los mismos.

Los modelos de propagación son un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características del medio de propagación de un ambiente determinado. Los mismos predicen la pérdida por trayectoria que una señal de radiofrecuencia pueda tener entre una estación base y un receptor móvil o fijo.

La demanda actual de los servicios de comunicaciones móviles, hacen que se encuentren en la literatura gran variedad de trabajos relacionados al tema en cuestión. Dentro de los más renombrados se encuentran el modelo de propagación en el espacio libre o modelo de Friss, modelo de propagación Okumura-Hata, modelo de propagación de Lee y modelo de Erceg-SUI, entre otros.

Para llevar a cabo este trabajo se realizaron mediciones variando el ambiente de propagación. La primer campaña se realizó en el predio del Instituto Universitario Aeronáutico (IUA) y de la Escuela de Aviación Militar, y la segunda campaña en Barrio Juniors, ambos de la ciudad de Córdoba. Cabe aclarar que la segunda etapa de mediciones formó parte de un trabajo final de grado de la carrera Ing. en Telecomunicaciones del IUA.

El desarrollo del presente trabajo se divide de la siguiente manera:

- **Capítulo 1:** Se realiza una introducción a la teoría propagación de ondas electromagnéticas a partir de las ecuaciones de Maxwell. Se define el concepto de modelo de propagación. Se presenta el marco teórico de aquellos modelos más populares, junto con las ecuaciones que los describen.
- **Capítulo 2:** Se comparan los modelos de propagación planteados en el capítulo anterior. Determinando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos en los diferentes escenarios donde se realizan las campañas de medición.

- 
- **Capítulo 3:** En este capítulo se describe el trabajo de campo realizado. Se presentan los dos diferentes escenarios donde se llevaron a cabo las mediciones. Se detallan los cálculos de pérdida de trayecto para cada uno de los modelos de propagación elegidos.
  - **Capítulo 4:** Por último se presentan las conclusiones y las perspectivas futuras del proyecto.

# Índice general

<b>1. Propagación de Ondas Electromagnéticas</b>	<b>1</b>
1.1. Las Ecuaciones de Maxwell . . . . .	1
1.1.1. Teorema de Poynting . . . . .	2
1.2. Modelos de Propagación de Ondas Electromagnéticas . . . . .	3
1.3. Modelos de Propagación de Ondas Electromagnéticas Outdoor . . . . .	4
1.3.1. Propagación en el espacio libre. Modelo de Friss . . . . .	4
1.3.2. Modelo de Propagación Okumura . . . . .	5
1.3.3. Modelo de Propagación Okumura-Hata . . . . .	7
1.3.4. Modelo COST 231 . . . . .	8
1.3.5. Modelo Cost 231 Walfisch-Bertoni . . . . .	8
1.3.6. Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami . . . . .	10
1.3.7. Modelo de Propagación de Lee . . . . .	12
1.3.8. Modelo de Erceg-SUI . . . . .	15
1.3.9. Modelo de SUI con factor de corrección de Frecuencia . . . . .	17
1.3.10. Modelo de SUI extendido . . . . .	17
1.3.11. Modelo de Propagación Recomendación UIT-R P.1411-6 . . . . .	19
<b>2. Análisis de los Modelos de Propagación Outdoor</b>	<b>27</b>
2.1. Modelo de Propagación de Okumura y de Okumura-Hata . . . . .	27
2.2. Modelo COST 231, Modelo Cost 231 Walfisch-Bertoni y Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami . . . . .	28
2.3. Modelo de Propagación de Lee . . . . .	28
2.4. Modelo de Propagacion de Erceg-SUI . . . . .	28
2.5. Modelo de SUI con factor de corrección de Frecuencia . . . . .	29
2.6. Modelo de SUI extendido . . . . .	29
2.7. Modelo de Propagacion UIT-R P.1411-6 . . . . .	30

<b>3. Trabajo de Campo</b>	<b>31</b>
3.1. Campaña A: Medición del Nivel de Potencia en el predio del Instituto Universitario Areronáutico . . . . .	31
3.1.1. Configuración del Enlace Punto a Punto . . . . .	32
3.1.2. Datos Obtenidos . . . . .	33
3.2. Campaña B: Medición del Nivel de Potencia en Barrio Junior . . . . .	35
3.2.1. Cálculo de pérdidas de trayecto utilizando los modelos de propagación . . . . .	36
<b>4. Conclusiones y Perspectivas Futuras</b>	<b>47</b>
<b>5. Anexo</b>	<b>51</b>
5.1. Clasificación de frecuencias . . . . .	51
5.2. Especificaciones técnicas de la antena transmisora utilizada para el trabajo de campo A . . . . .	52
5.3. Ejemplos de los informes del analizador Aircheck Fluke . . . . .	52

# Índice de cuadros

1.1. Valores numéricos de los parámetros del modelo de Erceg . . . . .	16
1.2. Altura efectiva de la calle ( $h_s$ ) para tránsito pesado . . . . .	22
1.3. Altura efectiva de la calle ( $h_s$ ) para tránsito ligero . . . . .	22
3.1. Características del Enlace Punto a Punto . . . . .	33
3.2. Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de Lee . . . . .	35
3.3. Comparación de los valores de potencia en dBm obtenidos a partir del Modelo de Lee con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke .	35
3.4. Datos del Access Point . . . . .	36
3.5. Pérdidas de trayecto Espacio Libre y potencia de recepción . . . . .	37
3.6. Pérdidas de trayecto Espacio Libre y potencia de recepción . . . . .	37
3.7. Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de SUI con co- rreccion de frecuencia . . . . .	38
3.8. Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de SUI con co- rreccion de frecuencia . . . . .	38
3.9. Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de SUI Extendido .	39
3.10. Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de SUI Extendido .	40
3.11. Pérdidas de Trayecto y potencia de recepción. Recomendación UIT-R P.1411-6 . . . . .	43
3.12. Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Recomendación UIT-R P.1411-6 . . . . .	43
3.13. Comparación de los modelos de propagación con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke. Medición A . . . . .	44
3.14. Comparación de los modelos de propagación con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke. Medición B . . . . .	44
3.15. Comparación de los modelos de propagación con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke. Medición C . . . . .	45

3.16. Comparación de los modelos de propagación con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke. Medición D . . . . .	45
5.1. Clasificación de frecuencias . . . . .	51

# Índice de figuras

1.1. Curvas de atenuación relativa de Okumura . . . . .	6
1.2. Situaciones típicas de propagación en Áreas Urbanas . . . . .	20
1.3. Parámetros. Caso sin línea de vista NLOS . . . . .	24
3.1. Mapa satelital correspondiente a la Campaña A de medición . . . . .	32
3.2. Configuración de Enlace Punto a Punto . . . . .	33
3.3. Mapa satelital correspondiente a la Campaña B de medición . . . . .	36
5.1. Especificaciones técnicas de la antena transmisora . . . . .	53
5.2. Reporte entregado por el Wi-Fi Tester . . . . .	54

# 1 Propagación de Ondas Electromagnéticas

## 1.1. Las Ecuaciones de Maxwell

El estudio de las ondas electromagnéticas, en general, se fundamenta en las ecuaciones de Maxwell [1]. Estas ecuaciones relacionan el campo eléctrico  $E$  y el campo magnético  $H$  con la densidad de corriente  $J$  y la densidad de carga  $\rho$ .

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = J + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}) = \rho \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot (\mu \vec{H}) = 0 \quad (1.4)$$

donde  $\varepsilon$  y  $\mu$  son la permitividad y la permeabilidad del medio respectivamente.

Para el presente estudio resulta suficiente considerar la solución de las ecuaciones de Maxwell para una onda plana simple. Una onda plana que viaja en la dirección  $z$  positiva, con polarización en dirección  $x$  puede representarse de la siguiente forma:

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz) \hat{x} \quad (1.5)$$

donde  $E_0$  es la amplitud de la onda,  $\omega$  es la frecuencia angular  $2\pi f$  y  $k$  el número de onda. La velocidad de la onda está dada por:

$$c = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = \lambda f \quad (1.6)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda.

La Ecuación 1.5 es una solución de la ecuaciones de Maxwell en el vacío siempre y cuando se cumpla que:

$$k^2 = \omega^2 \mu_0^2 \varepsilon_0^2 \quad (1.7)$$

A partir de estas últimas ecuaciones obtenemos que la velocidad de la onda esta dada por:

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (1.8)$$

donde  $\mu_0$  y  $\varepsilon_0$  son la permeabilidad magnética y la permitividad en el vacío respectivamente.

A su vez, el campo magnético para la onda plana esta dado por:

$$H = H_0 \cos(\omega t - kz) \hat{y} \quad (1.9)$$

de donde se obtiene la amplitud del campo magnético:

$$H_0 = \frac{E_0 k}{\omega \mu_0} \quad (1.10)$$

Si relacionamos la amplitud del campo eléctrico con la amplitud del campo magnético, obtenemos la impedancia de la onda:

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \frac{E_0}{H_0} = \frac{\omega \mu_0}{k} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (1.11)$$

### 1.1.1. Teorema de Poynting

El producto vectorial del campo eléctrico y el campo magnético da como resultado la densidad de potencia de la onda electromagnética. Para la solución de la onda plana, el flujo de potencia en la dirección z es ( $\frac{|E||H|}{2}$ ). La potencia promedio puede expresarse como:

$$\frac{E_x^2}{2Z_0} = \frac{Z_0}{2} H_0^2 \quad (1.12)$$

En una onda plana el campo eléctrico y el campo magnético siempre son ortogonales entre si. El flujo de potencia puede ser representado por el vector de Poynting  $S$ , el cual apunta en la dirección del flujo de potencia y tiene una magnitud igual a la densidad de potencia. El vector de Poynting se define como:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}^* \quad (1.13)$$

## 1.2. Modelos de Propagación de Ondas Electromagnéticas

Los modelos de propagación tienen como objetivo calcular el valor medio de la atenuación del canal de radio. Estos son un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características del medio de propagación de un ambiente determinado. Estos modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal de radiofrecuencia pueda tener entre una estación base y un receptor móvil o fijo.

La ventaja de modelar los radio canales, teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre transmisor y receptor, es poder determinar costos y capacidad de equipos requeridos para los proyectos que se deseen planear.

La aplicabilidad de un modelo depende de las especificaciones que este mismo requiera tal como son: el tipo de terreno (montañoso, ondulado o cuasi liso), características del ambiente de propagación (área urbana, sub-urbana, rural), características de la atmósfera (índice de refracción, lluvias), propiedades eléctricas del suelo (conductividad terrestre, tipo de material de las construcciones terrestres, entre otros.

Los modelos de propagación se clasifican de la siguiente manera [2]:

- Modelos determinísticos o teóricos:

Se basan en principios básicos y fundamentales de los fenómenos de propagación. En la práctica, su implementación usualmente requiere de gran cantidad de datos de las características del medio de propagación.

- Modelos empíricos o estadísticos:

Están basados fundamentalmente en campañas de mediciones, realizadas en diferentes tipos de entornos y con diferentes tipos de parámetros, tales como frecuencias, alturas de antenas, obstáculos, etc. Una ventaja de este modelo, es que se toman en cuenta todas las influencias ambientales sin importar el hecho de que estas pueden ser analizadas por separado. Su pronóstico no depende solamente de la exactitud de las mediciones, sino también de la semejanza entre el medio analizado y el contexto donde se las lleva a cabo.

- Modelos mixtos o híbridos:

Se basan en una combinación de los modelos determinísticos y empíricos.

También es posible clasificar los modelos según el entorno donde pretenden ser implementados: Modelos indoor (interior) o Modelos outdoor (exterior). Además, el canal de radio de un sistema de comunicaciones puede ser de dos tipos:

- LOS: es la propagación de radiofrecuencia con línea de vista directa entre la estación base y el receptor. En estos enlaces la señal viaja a través de un camino directo, sin obstáculos entre el transmisor hacia el receptor.
- NLOS: se da cuando entre el transmisor y el receptor no existe un camino de línea directa para la señal.

### 1.3. Modelos de Propagación de Ondas Electromagnéticas Outdoor

La siguiente sección está dedicada a desarrollar teóricamente y analíticamente algunos de los modelos de propagación más renombrados. Estos modelos predicen las pérdidas en decibeles de la potencia en un ambiente en particular .

#### 1.3.1. Propagación en el espacio libre. Modelo de Friss

El modelo de Friss o también llamado modelo de propagación en el espacio libre [3] es utilizado para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor

no hay obstáculos, es decir, se encuentran en línea de vista (LOS).

Los sistemas de comunicación satelital y los enlaces microondas se pueden modelar como propagación en el espacio libre. El modelo del espacio libre predice que la potencia recibida decae como función de la distancia de separación entre el transmisor y receptor. Este modelo sirve como base para la mayoría de los modelos de propagación.

Matemáticamente, se expresa lo anteriormente dicho como:

$$L = \frac{(\lambda)^2}{(4\pi R)^2} \quad (1.14)$$

donde  $L$  es la atenuación en el espacio libre y  $R$  es la distancia en Km. Además:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (1.15)$$

Reemplazando la Ecuación 1.15 en la Ecuación 1.14 y aplicando logaritmo para lograr el resultado en dB obtenemos:

$$P_L(dB) = 35,42 + 20\log(R) + 20\log(f) \quad (1.16)$$

La Ecuación 1.16 representa la atenuación en dB en el espacio libre para un irradiante isotrópico. Este modelo es el más simple de todos y se utiliza para predecir el nivel de potencia recibido cuando existe línea de vista entre el receptor y el transmisor.

### 1.3.2. Modelo de Propagación Okumura

Es uno de los modelos más utilizados en la predicción de señales en ambientes urbanos. Se basa en curvas desarrolladas por Okumura [4], las cuales entregan la atenuación relativa al espacio libre. Estas curvas fueron obtenidas en base a numerosas pruebas de propagación hechas por Okumura en ambientes urbanos de terreno casi plano. Para frecuencias entre  $100MHz$  y  $3000MHz$  y distancias entre  $1km$  y  $100km$  tenemos:

$$L(dB) = L_f + A_\mu - G(h_{tx}) - G(h_{rx}) - G_{Area} \quad (1.17)$$

Donde:

- $L$  = atenuación por trayectoria
- $L_f$  = atenuación por espacio libre

- $A_\mu$  = atenuación relativa promedio (curvas)
- $G(h_{tx})$  = ganancia de la antena de transmisión con altura  $h_{tx}$
- $G(h_{rx})$  = ganancia de la antena de recepción con altura  $h_{rx}$
- $G_{Area}$  = ganancia debido al tipo de ambiente.

La atenuación relativa promedio es obtenida de las curvas diseñadas por Okumura, las cuales se muestran en la Figura 1.1. Basándose en las curvas de atenuación obtenidas en pruebas, Okumura desarrolló su modelo. Pese a que es un modelo simple, es muy utilizado por su buenas predicciones en ambientes poblados.

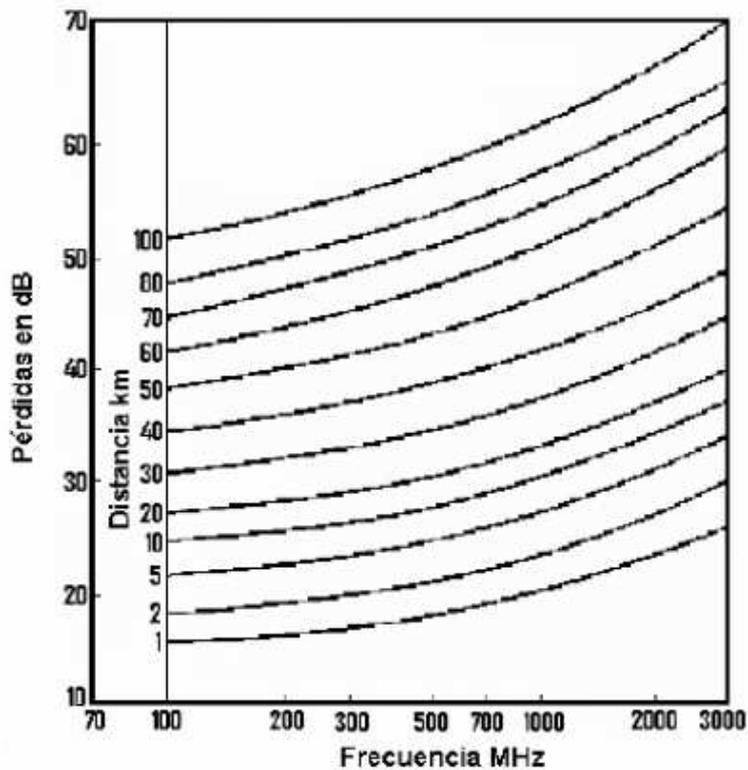


Figura 1.1: Curvas de atenuación relativa de Okumura

### 1.3.3. Modelo de Propagación Okumura-Hata

Este es un modelo empírico, limitado en frecuencias, ya que es efectivo hasta  $1500\text{MHz}$ . Las pérdidas consideradas por este modelo están dadas por la siguiente ecuación:

$$L_{\text{urbano}}(\text{dB}) = 69,55 + 26,16\text{Log}(f_c) - 13,82\text{Log}(h_{tx}) - a(h_{rx}) + (44,9 - 6,55\text{Log}(h_{tx}))\text{Log}(d) \quad (1.18)$$

Donde:

- $f_c$  = frecuencia de la portadora en MHz
- $h_{tx}$  = altura de la antena transmisora (sobre el terreno), válido para  $30\text{m} < h_{tx} < 200\text{m}$
- $h_{rx}$  = altura antena receptora, válido para  $1\text{m} < h_{rx} < 10\text{m}$
- $a(h_{rx})$  = factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil
- $d$  = distancia entre transmisor y receptor en km

El factor de corrección de altura puede tomar distintos valores dependiendo del ambiente en el cual se desarrolle el estudio de propagación. Entonces se define  $a(h_{rx})$  como sigue:

Para ciudades pequeñas:

$$a(h_{rx})(\text{dB}) = (1,1\text{Log}(f_c) - 0,7)h_{rx} - (1,56\text{Log}(f_c) - 0,8) \quad (1.19)$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_{rx})(\text{dB}) = 3,2(\text{Log}(11,75h_{rx}))^2 - 4,97 \quad (1.20)$$

Aunque el modelo está definido para ambientes urbanos, también existen correcciones para el cálculo de las pérdidas en ambientes suburbanos y rurales [5].

### 1.3.4. Modelo COST 231

Este modelo [6] es una extensión en frecuencia del modelo de propagación Okumura-Hata. Es generalmente utilizado para frecuencias menores a  $2000MHz$ , aunque usado también en predicciones para  $2,5GHz$ .

El modelo indica las pérdidas con la siguiente ecuación:

$$L_{urbano}(dB) = 46,3 + 33,9 \text{Log}(f_c) - 13,82 \text{Log}(h_{tx}) - a(h_{rx}) + (44,9 - 6,55 \text{Log}(h_{tx})) \text{Log}(d) + C_M \quad (1.21)$$

$C_M$  es un factor de corrección para adecuar el modelo extendiendo el rango de la frecuencia para el que opera el modelo. El factor de corrección se basa en pruebas empíricas, las cuales demuestran que a para grandes ciudades es mayor que para áreas suburbanas.

Entonces  $C_M$  puede tomar los siguientes valores:

- $C_M = 0 \text{ dB}$  para ciudades medianas y áreas suburbanas
- $C_M = 3 \text{ dB}$  para centros metropolitanos

El valor de la ganancia  $a(h_{rx})$  corresponde al resultado de las mismas ecuaciones descritas para el modelo Okumura-Hata. Este modelo tiene mayor precisión para distancias entre  $1km$  y  $20km$ .

### 1.3.5. Modelo Cost 231 Walfisch-Bertoni

El siguiente modelo tiene en cuenta las pérdidas producidas debido a la altura de los edificios y a la propagación sobre los techos, es un modelo que no considera LOS entre el transmisor y el receptor, utiliza el fenómeno de la difracción para describir las pérdidas. La pérdida total consiste en tres factores: la pérdida entre antenas en espacio libre, la pérdida por difracción por múltiples cuchillos hasta el edificio más cercano al móvil y la pérdida por difracción desde este punto hasta el móvil a la altura de la calle. Asumiendo antenas isotrópicas, el primero de estos factores es la pérdida básica definida por:

$$L_0(dB) = 32,44 + 20 \log(f_c) + 20 \log(d) \quad (1.22)$$

La siguiente expresión representa el exceso de pérdida de propagación sobre la pérdida en espacio libre:

$$L_{ex}(dB) = 57,1 + A + \log(f) + 18\log(d) - 18\log(h_t - h) - 18\log\left(1 - \frac{d^2}{17(h_t - h)}\right) \quad (1.23)$$

La influencia de la geometría de los edificios está contemplada en el siguiente término:

$$A = 5\log\left[\left(\frac{d^2}{2} + (h - h_t)^2\right) - 9\log(d) + 20\log[\tan^{-1}(2(h - h_{re})/2)]\right] \quad (1.24)$$

Luego la pérdida total será:

$$L_t(dB) = L_0 + L_{ex} \quad (1.25)$$

Donde:

- $L_0$  : pérdidas en el espacio libre
- $L_{ex}$  : término que combina las pérdidas por difracción y de propagación sobre los edificios
- $f_c$  : frecuencia de operación
- $d$  : distancia entre las antenas
- $b$  : separación de los edificios de centro a centro
- $h_t$  : altura del transmisor
- $h_r$  : altura del receptor
- $h$  : altura media de los edificios.

El modelo funciona optimamente en los siguientes rangos:  $300MHz < f_c < 3000MHz$  y  $0,2km < d < 5km$ .

Además, la separación entre los edificios debe ser menor que su altura.

### 1.3.6. Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami

En este modelo de propagación [7] se incluyen, a diferencia de los anteriores los siguientes datos:

- Altura promedio de edificios ( $h$ )
- Ancho de calles ( $w$ )
- Separación de edificios ( $b$ )
- Orientación de las calles respecto del camino LOS ( $\Phi$ )

Además el modelo hace una distinción entre los caminos con línea de vista (LOS) y aquellos son línea de vista (NLOS).

- Caso LOS

$$L_{LOS}(dB) = 32,44 + 26\log(d) + 20\log(f), d \geq 20m \quad (1.26)$$

- Caso NLOS

La pérdida básica de transmisión se compone de la pérdida en el espacio libre. La pérdida por difracción en múltiples cuchillos ( $L_{msd}$ ) y la pérdida por difracción desde el techo de los edificios de la calle ( $L_{rst}$ ). De esta manera:

$$L_{NLOS}(dB) = \begin{cases} L_B + L_{rst} + L_{msd} & \text{si } (L_{rst} + L_{msd}) > 0 \\ L_B & \text{si } (L_{rst} + L_{msd}) < 0 \end{cases} \quad (1.27)$$

Donde:

$$L_{rst} = -16,9 - 10\log(w) + 10\log(f) + 20\log(h - h_r) + L_{ort} \quad (1.28)$$

$$L_{ort} = \begin{cases} -10 + 0,354\Phi & \text{si } 0 \leq \Phi \leq 35 \\ 2,5 + 0,075(\Phi - 35) & \text{si } 35 \leq \Phi \leq 55 \\ 4,0 - 0,114(\Phi - 35) & \text{si } 55 \leq \Phi \leq 90 \end{cases} \quad (1.29)$$

La pérdida por difracción en multiples cuchillos fue estimada por Walfisch y Bertoni para el caso en que la radiobase está por encima de los techos ( $h_t > h$ ). Para el caso en que la antena está debajo de la altura media de las edificaciones, las ecuaciones más relevantes son:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - \log(b) \quad (1.30)$$

Donde:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log[1 + (h_t - h)] & \text{si } h_t > h \\ 0 & \text{si } h_t \leq h \end{cases} \quad (1.31)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{si } h_t > h \\ 54 - 0,8(h_t - h) & \text{si } h_t \leq h, d \geq 0,5 \text{ km} \\ 54 - 0,8(h_t - h) \frac{d}{0,5} & \text{si } h_t \leq h, d < 0,5 \text{ km} \end{cases} \quad (1.32)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{si } h_t > h \\ 18 - 15 \frac{(h_t - h)}{h} & \text{si } h_t \leq h \end{cases} \quad (1.33)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \left( \frac{f}{(925-1)} \right) & \text{para ciudades - medianas, centros - suburbanos} \\ -4 + 0,7 \left( \frac{f}{(925-1)} \right) & \text{para centros - metropolitanos} \end{cases} \quad (1.34)$$

El término  $k_a$  representa el aumento en la pérdida de propagación cuando la radiobase está por debajo de la altura de los techos. Los términos  $k_d$  y  $k_f$  consideran la dependencia de la pérdida por difracción con la distancia y la frecuencia.

Si no se dispone de datos exactos se recomienda utilizar los siguientes:

$h = 3mx$  (número de pisos) + altura del techo

$20m < b < 50m$

$w = b/2$

$\Phi = 90$

$$altura - techo = \begin{cases} 3m & \text{si techos} - \text{puntiagudos} \\ 0m & \text{si techos} - \text{planos} \end{cases} \quad (1.35)$$

Además la aplicación de este modelo se restringe a los siguientes valores:

$$800MHz < f_c < 2000MHz$$

$$4m < h_{te} < 50m$$

$$1m < h_{re} < 3m$$

$$0,2km < d < 5km$$

Este modelo no considera propagación multi-trayectoria y su confiabilidad en la estimación de pérdidas disminuye si el terreno no es plano.

### 1.3.7. Modelo de Propagación de Lee

El modelo de Lee es uno de los modelos más populares de predicción macroscópico. Este modelo es relativamente simple e intuitivo, proporciona predicciones exactas. El modelo fue desarrollado como resultado de una gran colección de datos recolectados en Estados Unidos. Debido a la simple formulación matemática, es frecuentemente usado en simulaciones y para la formulación de modelos de propagación [8].

Inicialmente el modelo se desarrolló para ser usado en una frecuencia alrededor de los  $900MHz$ , pero se ha demostrado que el modelo también puede ser aplicado para frecuencias mayores a  $2GHz$ . El modelo se divide en dos partes. La primer parte, predicción área a área, es utilizada para predecir las pérdidas sobre terreno plano, sin tener en cuenta la configuración particular del terreno. Esta predicción es inadecuada para terrenos montañosos. La segunda parte usa la predicción área a área como base y desarrolla punto a punto para resolver el problema. Basándose en el perfil de terreno tiene en cuenta la línea de vista o no línea de vista y la influencia de las reflexiones.

El modelo básico área a área se encuentra parametrizado por  $P_{r0}$  (potencia a 1 milla) y por  $\gamma$  que es la pendiente de curva de pérdidas experimentalmente determinada, cuyos valores se encuentran tabulados y depende de la zona ([8]). Su ecuación viene dada por:

$$P_r = 10 \log [P_{r0} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\gamma} \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-n} \alpha_0] \quad (1.36)$$

Donde:

- $P_r$  : Intensidad de campo recibida a la distancia  $r$  del transmisor
- $P_{r_0}$  : Potencia recibida a 1 milla
- $r$  : distancia entre móvil y antena de estación base
- $r_0$  : 1 milla ( $1,6Km$ )
- $\gamma$  : pendiente pérdidas
- $f$  : frecuencia utilizada en MHz
- $f_0$  : frecuencia nominal ( $900MHz$ )
- $n$  : empíricamente determinado, depende de la topología de la zona y la frecuencia utilizada.
- Para áreas abiertas y suburbanas se recomienda utilizar  $n = 2$  y  $f < 450MHz$ , para áreas urbanas  $n = 3$  y  $f > 450MHz$
- $\alpha_0$  : Factor de corrección.

El modelo de Lee asume una serie de condiciones iniciales, luego el modelo debe ser adaptado para las diferentes condiciones de uso mediante el factor  $\alpha_0$ . Las condiciones iniciales del modelo son:

- Frecuencia:  $900MHz$
- Altura de la estación base:  $30 - 48mts$
- Potencia del transmisor:  $10W$
- Ganancia antena estación base:  $8, 15dBi$
- Altura antena del móvil:  $3m$
- Ganancia antena del móvil:  $2, 15dBi$

El Factor de Corrección esta dado por la siguiente relación:

$$\alpha_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \tag{1.37}$$

Donde:

$$\alpha_1 = \left(\frac{h_b}{30,48}\right)^2 \quad (1.38)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{h_m}{3}\right)^v \quad (1.39)$$

$$\alpha_3 = \frac{P_t}{10} \quad (1.40)$$

$$\alpha_4 = \frac{G_b}{6,53} \quad (1.41)$$

$$\alpha_5 = \frac{h_b}{1,64} \quad (1.42)$$

Donde:

- $h_b$  : Altura de la estación base (m)
- $P_t$  : Potencia transmitida (W)
- $G_b$  : Ganancia antena estación base respecto al radiador isotrópico
- $h_m$  : Altura antena estación móvil (m)
- $G_m$  : Ganancia antena estación móvil respecto al radiador isotrópico

Donde  $v$  es un dato determinado empíricamente y especificado como:

$$v = \begin{cases} 2 & \text{si } h_b > 10m \\ 1 & \text{si } h_b < 3m \end{cases} \quad (1.43)$$

Las pérdidas para un entorno suburbano, están dadas por la siguiente relación:

$$L_L = 99,2 + 47,3 \log\left(\frac{r}{1,6}\right) + 10n \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 \quad (1.44)$$

Utilizando la ecuación de radioenlace se calcula la potencia recibida como;

$$L_L(dBm) = P_t(dBm) - P_r(dBm) \quad (1.45)$$

Los valores de  $P_{r0}$  y  $\gamma$  restantes se encuentran tabulados, según el ambiente donde se desea trabajar [8].

### 1.3.8. Modelo de Erceg-SUI

Este modelo es un modelo empírico de predicción de pérdida de camino basado en exhaustivas mediciones realizadas por AT Wireless Services a lo largo del territorio de Estados Unidos, cubriendo 95 macroceldas de 1.9 GHz [9].

Se aplica a entornos suburbanos, y a su vez distingue entre tres diferentes categorías de terreno. La caracterización consiste en una curva lineal de potencia en función de distancia, con una variación gaussiana a dicha recta debida al efecto de shadowing, variaciones de potencia provocadas principalmente por la vegetación. El aspecto más novedoso del modelo es que tanto el exponente de pérdida de camino (pendiente de la recta), como la desviación estándar del shadowing  $\sigma$ , varía aleatoriamente de una celda a otra, y esto es modelado estadísticamente mediante variables aleatorias gaussianas cuyos parámetros dependen de la altura del móvil y del tipo de terreno.

Con este modelo se intentan cubrir algunas carencias de los modelos de predicción ya existentes, como por ejemplo la disminución de la altura de las radiobases y aumento de las frecuencias. El modelo de Okumura-Hata, que es el más usado para entornos suburbanos de macroceldas, no da buenos resultados para los casos de altura de radiobase baja (menor a  $30m$ ), altura de móvil alta (mayor que  $2m$ ), terrenos ondulados o con alta densidad de vegetación.

Se distingue dentro del entorno suburbano tres categorías diferentes de terreno. Las condiciones de mayor pérdida de camino se engloban en la categoría A, terreno ondulado con densidad de vegetación media a alta. Le sigue la categoría B, que incluye tanto terrenos ondulados con baja densidad de vegetación, como terrenos llanos densamente arbolados. Finalmente, la categoría de condiciones más favorables para la propagación categoría C, es aquella caracterizada por terrenos llanos que a su vez poseen baja densidad de árboles. Ha dado también buenos resultados la aplicación de este modelo en entornos urbanos.

La pérdida de camino en decibeles puede escribirse como:

$$PL(dB) = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s. \quad (1.46)$$

La Ecuación 1.46 se cumple cuando  $d > d_0$ . Además  $A$  está dado por la fórmula de

espacio libre:

$$A = 20 \log\left(\frac{4d_0}{\lambda}\right) \quad (1.47)$$

donde  $d_0 = 100m$  es la distancia de referencia y  $\lambda$  la longitud de onda en metros. El exponente de pérdida de camino  $\gamma$ , es una variable aleatoria gaussiana, que puede expresarse de la siguiente manera:

$$\gamma = \left(a - bh_t + \frac{c}{h_t}\right) + x\sigma_\gamma \quad (1.48)$$

El término entre paréntesis corresponde a la media  $\sigma$  y  $\gamma$  a la desviación estándar.  $x$  es una variable aleatoria entre  $[0, 1]$ ;  $h_t$  es la altura (sobre el terreno) de la radiobase en metros;  $a$ ,  $b$  y  $c$ , con sus respectivas unidades, son constantes ajustadas empíricamente, que al igual que  $\sigma$  y  $\gamma$  dependen de la categoría de terreno y están dadas en el Cuadro 1.1.

El término  $s$  de la Ecuación 1.46 representa el efecto de shadowing, efecto que ocurre cuando el receptor se coloca detrás de un obstáculo y experimenta una reducción en la potencia de la señal recibida. Se modela como una variable aleatoria lognormal de media nula, cuya desviación estándar también es una variable aleatoria gaussiana que puede escribirse como:

$$\sigma = \mu_\sigma + z\sigma_\sigma \quad (1.49)$$

Cuadro 1.1: Valores numéricos de los parámetros del modelo de Erceg

Parámetro	Terreno A	Terreno B	Terreno C
a	4.6	4.0	3.6
$b(m^{-1})$	0.0075	0.0065	0.0050
$c(m)$	12.6	17.1	20.0
$\sigma_\gamma$	0.5	0.75	0.59
$\mu_\sigma$	10.6	9.6	8.2
$\sigma_\sigma$	2.3	3.0	1.6

Donde  $\mu_\sigma$  es la media,  $\sigma_\sigma$  la varianza y  $z$  una variable aleatoria que va de  $[0, 1]$ . Los valores numéricos de estas constantes para las diferentes categorías de terreno pueden encontrarse también en el Cuadro 1.1.

### 1.3.9. Modelo de SUI con factor de corrección de Frecuencia

Para frecuencias mayores a  $2GHz$ , y altura de la antena receptora,  $2m < h_r < 10m$ , se introducen factores de corrección al modelo de Erceg-SUI, expresado en la sección anterior.

$$PL(dB) = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s + \Delta L_{bf} + \Delta L_{bh} \quad (1.50)$$

donde:

- $\Delta L_{bf}$ : Factor de corrección para la frecuencia, dado por:

$$\Delta L_{bf} = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (1.51)$$

siendo  $f$  la frecuencia en  $MHz$ .

- $\Delta L_{bh}$ : Factor de corrección para la altura de la antena del receptor  $h_r$

$$\Delta L_{bh} = \begin{cases} 10,8 \log\left(\frac{h_r}{2}\right) & \text{si } AyB \\ 20 \log\left(\frac{h_r}{2}\right) & \text{si } C \end{cases} \quad (1.52)$$

Esta versión del modelo de Erceg-SUI que incluye factores de corrección, es la más usada en los cálculos de propagación con este modelo.

### 1.3.10. Modelo de SUI extendido

El modelo SUI extendido propuesto por el IEEE 802.16 modifica el factor de corrección  $\Delta L_{bh}$  en función de los propuestos por Okumura. Esta modificación supone un recálculo de la distancia de referencia  $d_0$  que asume ahora un valor  $d'_0$ . Se definen así las siguientes expresiones para el cálculo de la pérdida de propagación:

$$\Delta L_b(db) = \begin{cases} 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) & \text{si } d < d'_0 \\ A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s + \Delta L_{bf} + \Delta L_{bh} & \text{si } d > d'_0 \end{cases} \quad (1.53)$$

donde:

$$A = 20 \log\left(\frac{4d'_0}{\lambda}\right) \quad (1.54)$$

$$d'_0 = d_0^{-\left(\frac{\Delta L_{bf} + \Delta L_{bh}}{10\gamma}\right)} \quad (1.55)$$

$$\gamma = \left(a - bh_t + \frac{c}{h_t}\right) \quad (1.56)$$

donde:

$\Delta L_{bf}$ : Factor de corrección para la frecuencia

$$\Delta L_{bf} = 6 \log \frac{f}{2000} \quad (1.57)$$

siendo  $f$  la frecuencia en  $MHz$ .

$\Delta L_{bh}$ : Factor de corrección para la altura de la antena del receptor  $h_r$ :

$$\Delta L_{bh} = \begin{cases} -10 \log\left(\frac{h_r}{3}\right) & \text{si } h_r \leq 3m \\ -20 \log\left(\frac{h_r}{3}\right) & \text{si } h_r > 3m \end{cases} \quad (1.58)$$

Los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d_0$  del modelo, son aquellos definidos en el Cuadro 1.1 Finalmente la expresión que representa a las pérdidas totales, incluyendo los factores correctivos está dada por la Ecuación 1.59:

$$PL_{total} = PL + \Delta L_{bf} + \Delta L_{bh}. \quad (1.59)$$

El rango de validez de los parámetros es:

- $450MHz < f < 11,2GHz$  frecuencia de transmisión
- $10m < ht < 80m$  altura del transmisor
- $2m < hr < 10m$  altura del móvil
- $0,01 < km < d8km$  distancia entre el móvil y la base

### 1.3.11. Modelo de Propagación Recomendación UIT-R P.1411-6

Esta recomendación [10] provee una serie de directivas sobre propagación en exteriores para sistemas de radiocomunicaciones de corto alcance, en el rango de frecuencia de  $300\text{MHz}$  a  $100\text{GHz}$ , para trayectos LOS y NLOS en una variedad de entornos. Se trata de un modelo semi-empírico basado en el modelo COST 231 y mejorado por el UIT-R.

La propagación en medios outdoor, es afectada principalmente por edificios y árboles más que por elevaciones del terreno. El efecto de los edificios es predominante, ya que la mayoría de enlaces radioeléctricos con trayecto corto se dan en áreas urbanas y suburbanas.

#### Entorno Urbano:

- $h_b$ : 4 a 50 [m].
- $h_m$ : 1 a 3 [m].
- $f$ : 800 MHz a 5000 MHz.
- $d$ : 20 a 5000 [m].
- 2 a 16 GHz para  $h_b < h_r$  y  $w_2 < 10m$ .

#### Entorno Sub-urbano:

- $h_r$ : cualquier altura [m].
- $\Delta h_b$ : 1 a 100 [m].
- $\Delta h_r$ : 4 a 10 [m].
- $h_b = h_r + \Delta h_b$  [m].
- $h_m = h_r - \Delta h_m$  [m].
- $f$ : 0,8 GHz a 20 GHz.
- $d$ : 10 a 5000 [m].
- $w$ : 10 a 25 [m].

Los modelos típicos de trayectoria se muestran en la Figura 1.2, donde se pueden observar situaciones NLoS y LoS, descritos por la ubicación del equipo transmisor (BS) y la estación receptora (MS).

### Situaciones NLoS

- BS1 y MS1 (NLoS1).
- BS2 y MS3 (NLoS2).

### Situaciones LoS

- BS1 y MS2 (LoS1).
- BS2 y MS4 (LoS2).

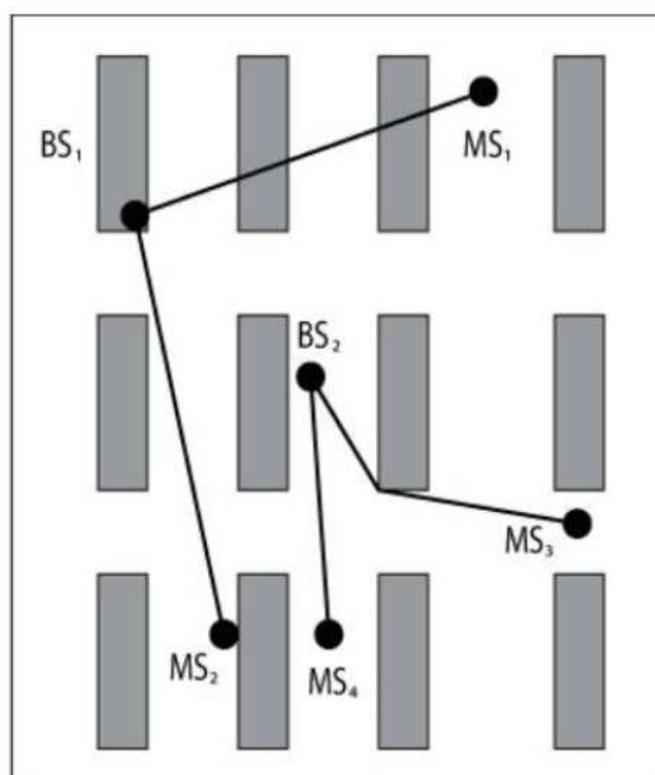


Figura 1.2: Situaciones típicas de propagación en áreas urbanas

### Modelos LoS1 para UHF

En el rango de frecuencia UHF, las pérdidas básicas de transmisión, como están definidas en la recomendación UIT-R P.341 pueden ser caracterizadas por dos pendientes y un solo punto de inflexión. El tramo inferior está dado por la Ecuación 1.60.

$$L_{LOS,l} = L_{bp} + \begin{cases} 20\log\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{si } d \leq R_{bp} \\ 40\log\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{si } d > R_{bp} \end{cases} \quad (1.60)$$

$R_{bp}$  es la distancia al punto de inflexión:

$$R_{bp} \simeq \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad (1.61)$$

Donde:

- $\lambda$ : longitud de onda [m].
- $h_b$ : altura de la antena de transmisión [m].
- $h_m$ : altura de la antena de recepción [m].

Un límite superior aproximado está dado por la Ecuación 1.62:

$$L_{LOS,u} = L_{bp} + 20 \begin{cases} 25\log\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{si } d \leq R_{bp} \\ 40\log\left(\frac{d}{R_{bp}}\right) & \text{si } d > R_{bp} \end{cases} \quad (1.62)$$

Donde  $L_{bp}$  es un valor para las pérdidas de transmisión básicas en el punto de inflexión, definido de la siguiente manera:

$$L_{bp} = \left| 20\log \frac{(\lambda)^2}{8\pi h_b h_m} \right| \quad (1.63)$$

### Modelos LoS para SHF

En SHF para las longitudes de trayectoria mayores a 1 Km, el tránsito influenciará la altura efectiva de la calle y afectará la distancia del punto de inflexión. Esta distancia,  $R_{bp}$  es estimada por la Ecuación 1.64:

$$R_{bp} = \frac{4(h_b - h_s)(h_m - h_s)}{\lambda} \quad (1.64)$$

Donde  $h_s$  es la altura efectiva de la calle debido a los objetos como vehículos o peatones cerca de la calzada. Por lo tanto depende del tráfico en la calle. Los valores de  $h_s$  son derivados de las mediciones en el día y en la noche, correspondiente a diferentes condiciones del tráfico. Las mismas se especifican en el Cuadro 1.2 y el Cuadro 1.3.

Cuadro 1.2: Altura efectiva de la calle ( $h_s$ ) para tránsito pesado

Frecuencia	hb [m]	hm = 2,7 [m]	hm = 1,6 [m]
3,35 GHz	4	1,3	(2)
3,35 GHz	8	1,6	(2)
8,45 GHz	4	1,6	(2)
8,45 GHz	8	1,6	(2)
15,75 GHz	4	1,4	(2)
15,75 GHz	8	(1)	(2)

Donde:

- (1) Punto de inflexión más allá de 1Km.
- (2) No existe punto de inflexión.

Cuadro 1.3: Altura efectiva de la calle ( $h_s$ ) para tránsito ligero

Frecuencia	hb [m]	hm = 2,7 [m]	hm = 1,6 [m]
3,35 GHz	4	0,59	0,23
3,35 GHz	8	(1)	(1)
8,45 GHz	4	(2)	0,43
8,45 GHz	8	(2)	(1)
15,75 GHz	4	(2)	0,74
15,75 GHz	8	(2)	(1)

Donde:

- (1) No se tomaron medidas.
- (2) Punto de inflexión más allá de 1 Km.

El tráfico pesado corresponde al 10-20% de la cobertura de la calzada cubierta con vehículos, y 0,2-1% del sendero ocupado por peatones. Tráfico liviano es 0,1-0,5% de la calzada y menor que 0,001% del sendero ocupado. La calzada es de 27m de ancho, incluyendo 6m de ancho de los senderos de cada lado.

### Modelo NLoS1

Las señales NLoS pueden llegar a la BS o MS por el mecanismo de difracción o por multitrayectoria, la cual puede ser una combinación de los mecanismos de difracción y reflexión. Este modelo es válido para:

- $h_b$ : 4 a 50 [m].
- $h_m$ : 1 a 3 [m].
- $f$ : 800 a 5000 [MHz].
- $d$ : 20 a 500 [m].
- $f$ : 16 GHz para  $h_b < h_r$  y  $w < 10$ .

Los parámetros relevantes para trayectoria sin línea de vista se pueden observar en la Figura 1.3. Donde:

- $h_r$ : altura promedio de edificios [m].
- $w$ : ancho de la calle [m].
- $b$ : separación promedio de edificios [m].
- $\varphi$ : orientación de la calle con respecto a la trayectoria directa [grados].
- $h_b$ : altura de la antena transmisora [m].
- $h_m$ : altura de la antena receptora [m].
- $l$ : longitud de la trayectoria cubierta por edificios [m].
- $d$ : distancia desde el equipo transmisor al receptor [m].

La pérdida básica de propagación,  $L_b$ , se expresa como la suma de la pérdida de espacio libre,  $L_{bf}$ , la pérdida de difracción techo-calle,  $L_{rts}$ , y una reducción en la intensidad de señal debido a la difracción multipantalla,  $L_{msd}$ , de los edificios presentes en el trayecto. En este modelo, las pérdidas  $L_{bf}$  y  $L_{rts}$  son independientes de la altura de la antena de la estación base, mientras que  $L_{msd}$  depende de si ésta se encuentra por debajo o por encima de la altura media de los edificios.

$$L_b = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{si } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & \text{si } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (1.65)$$

Las pérdidas en espacio libre,  $L_{bf}$ , se definen a continuación:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log\left(\frac{d}{1000}\right) + 20 \log f \quad (1.66)$$

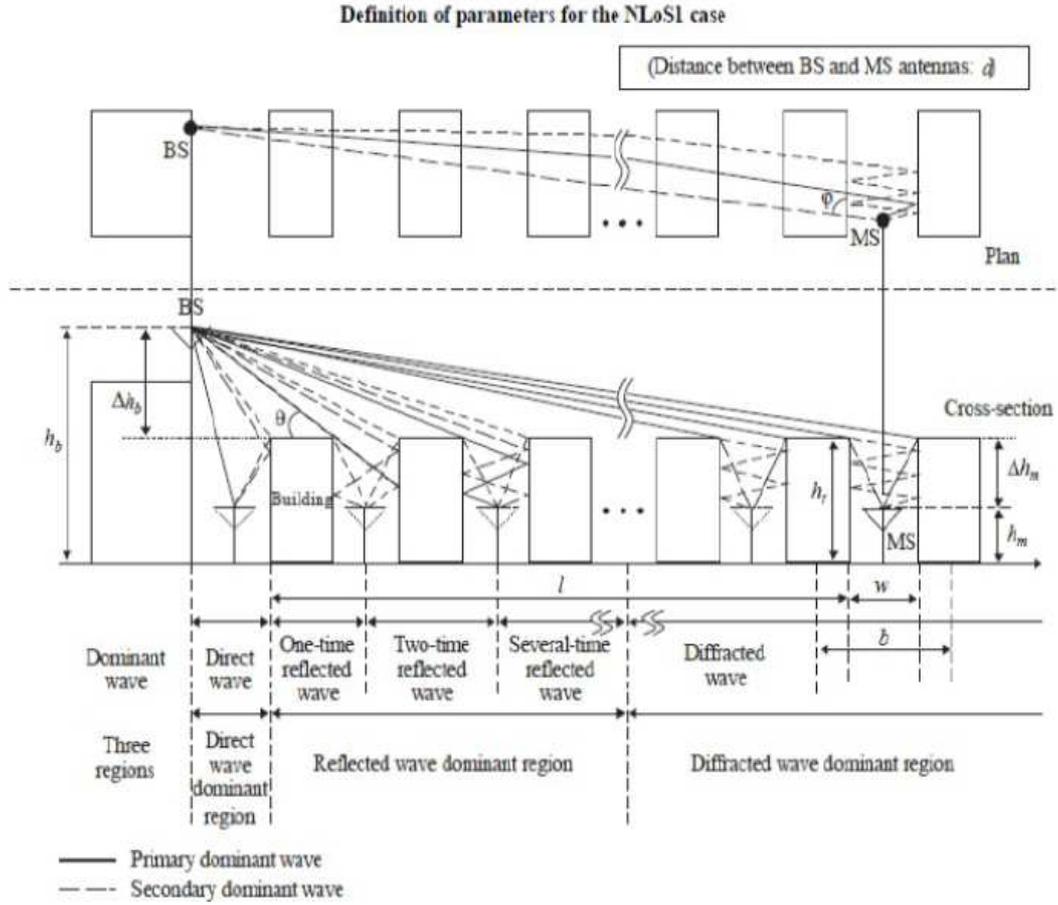


Figura 1.3: Parámetros. Caso sin línea de vista NLOS

Donde,  $d$  se expresa en [m] y  $f$  en MHz. El término  $L_{rts}$  considera los efectos de propagación de la cubierta de los edificios al receptor, entre las paredes de los mismos que forman el cañón urbano en la calle donde se encuentra el móvil. Tiene en cuenta el ancho de la calle y su orientación.

$$L_{rts} = -8,2 - 10\log(w) + 10\log(f) + 20\log(\Delta h_m) + L_{ori} \quad (1.67)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{si } 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ) & \text{si } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55^\circ) & \text{si } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1.68)$$

$$\Delta h_m = h_r + h_m \quad (1.69)$$

$L_{ori}$  es un factor de corrección de la orientación de la calle, el cual tiene en cuenta el efecto de la difracción techo-calle dentro de aquellas calles que no son perpendiculares a la dirección de propagación. La pérdida de difracción multipantalla,  $L_{msd}$  desde la estación base, debido a la propagación que pasa por las filas de edificios, depende de la altura relativa de la estación base respecto a la altura de los edificios y del ángulo de incidencia. Un criterio que define un trayecto con incidencia rasante es el parámetro  $d_s$ : Settle Field Distance (Distancia de Campo Establecida).

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_b^2} \quad (1.70)$$

$$\Delta h_b = h_b - h_r \quad (1.71)$$

Para el cálculo de  $L_{msd}$ , el parámetro  $d_s$  se compara con la longitud  $l$  a lo largo de la cual se extienden las filas de edificios. Las expresiones se definen a continuación.

**Cálculo de  $L_{msd}(d)$  para  $l > d_s$**

$$L_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log \frac{d}{1000} + k_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (1.72)$$

Donde:

$$k_a = \begin{cases} 71,4 & \text{si } h_b > h_r \quad f > 2000MHz \\ 73 - 0,8\Delta h_b & \text{si } h_b < h_r \quad f > 2000MHz \quad d \geq 500m \\ 73 - 1,6\Delta h_b \frac{d}{1000} & \text{si } h_b \leq h_r \quad f > 2000MHz \quad d < 500m \\ 54 & \text{si } h_b > h_r \quad f \leq 2000MHz \\ 54 - 0,8\Delta h_b & \text{si } h_b < h_r \quad f < 2000MHz \quad d \geq 500m \\ 54 - 1,6\Delta h_b \frac{d}{1000} & \text{si } h_b \leq h_r \quad f \leq 2000MHz \quad d > 500m \end{cases} \quad (1.73)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -8 & \text{si } f > 2000MHz \\ -4 + 0,7\left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{si } f \leq 2000MHz \quad \text{EntornosSuburbanos} \\ -4 + 1,5\left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{si } f \leq 2000MHz \quad \text{CentrosMetropolitanos} \end{cases} \quad (1.74)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} 18 & \text{si } h_b > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r} & \text{si } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (1.75)$$

**Cálculo de  $L_{msd}(d)$  para  $l < d_s$**

Se tienen en cuenta las alturas relativas de la estación base y el techo:

$$L2_{msd} = -10\log(QM^2) \quad (1.76)$$

Donde:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35\left(\frac{\Delta h_b}{d}\sqrt{\frac{b}{\lambda}}\right)^{0,9} & \text{si } h_b > h_r + \delta h_u \\ \frac{b}{d} & \text{si } h_b \leq h_r + \delta h_u \quad h_b \geq h_r + \delta h_l \\ \frac{b}{2\pi d}\sqrt{\frac{\lambda}{\rho}}\left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi\theta}\right) & \text{si } h_b < h_r + \delta h_l \end{cases} \quad (1.77)$$

donde:

$$\theta = \arctang\left(\frac{\Delta h_b}{b}\right) \quad (1.78)$$

$$\rho = \sqrt{(\Delta h_b)^2 + b^2} \quad (1.79)$$

$$\Delta h_u = 10^{-\frac{\log(d)}{9} + \frac{10}{9}\log\left(\frac{b}{2,35}\right) - \log\sqrt{\frac{b}{\lambda}}} \quad (1.80)$$

$$\Delta h_l = \frac{0,00023b^2 - 0,1827b - 9,4978}{\log(f)^{2,938}} + 0,000781b + 0,06923 \quad (1.81)$$

## 2 Análisis de los Modelos de Propagación Outdoor

En el Capítulo anterior se detallaron los distintos modelos de propagación aplicables en ambientes no confinados. En el siguiente capítulo se analizarán cada uno de los modelos, determinando sus ventajas y desventajas, para luego poder indicar cuál de ellos se adecúa más en cada campaña de medición, teniendo en cuenta las distintas características y requisitos de cada uno de los escenarios. Es importante la comparación entre los modelos, ya que a pesar de que se pueden encontrar desarrollados gran variedad de ellos, no todos son aplicables a las condiciones del entorno y a los equipos con los que se lleva a cabo el trabajo de campo. Cuando se restringen estas condiciones, se encuentra que la mayoría de ellos no son aplicables.

### 2.1. Modelo de Propagación de Okumura y de Okumura-Hata

Estos son los modelos más utilizados en la predicción de señales en ambientes urbanos. Estos modelos empíricos tienen la desventaja de su limitación en frecuencia y distancia. La frecuencia de operación para el Modelo de Okumura es de  $100MHz$  y  $3000MHz$ , y su rango de distancia es entre  $1km$  y  $100km$ , y el Modelo de Okumura-Hata es efectivo hasta  $1500MHz$ . En ambas campañas de medición los equipos transmisores no cumplen estos requisitos.

## 2.2. Modelo COST 231, Modelo Cost 231 Walfisch-Bertoni y Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami

El Modelo COST 231, funciona optimamente para distancias entre  $1km$  y  $20km$ . Esta condición, nos proporciona una gran desventaja, ya que las campañas de medición que se han realizado tienen un límite en la distancia de aproximadamente  $1Km$ . En cuanto al Modelo Cost 231 Walfisch-Bertoni, éste tiene un rango de distancia más amplio, pero su frecuencia de operación no es coincidente con la de los equipos transmisores con los que se realiza el trabajo de campo. Por último, el Modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami tiene como desventaja ciertas limitaciones en sus parámetros, los cuales tampoco coinciden con los utilizados en el trabajo de campo, como lo son su rango de frecuencia y la altura de la antena transmisora.

## 2.3. Modelo de Propagación de Lee

Este modelo tiene la ventaja de ser simple matemáticamente e intuitivo. Su ventaja fundamentalmente es la de proporcionar predicciones exactas. El modelo puede ser aplicado para frecuencias superiores a  $2GHz$ , por lo que sería aplicable para la primer campaña de medición del trabajo de campo.

El modelo de Lee asume una serie de condiciones iniciales, permitiendo ser adaptado para las diferentes condiciones del entorno mediante un factor de corrección.

## 2.4. Modelo de Propagación de Erceg-SUI

Este modelo no puede ser aplicado en la campaña de medición de este trabajo, ya que asume una restricción en cuanto a la frecuencia y a la mínima distancia de separación entre los equipos ( $100m$ ).

En cuanto a la restricción en frecuencia se tiene que  $f \leq 2GHz$ . Debido a las mencionadas restricciones, en el trabajo de campo se tendrá en cuenta el modelo Erceg-SUI, pero aplicando el factor de corrección de frecuencia.

## 2.5. Modelo de SUI con factor de corrección de Frecuencia

Se agrega un factor de corrección  $L_{bf}$ , para poder ser utilizado a la frecuencia en que se desea aplicar el modelo. En la segunda campaña de medición se aplica este modelo (frecuencia de operación de  $5GHz$ ).

El factor de corrección se calcula como se mostró en el Capítulo anterior de la siguiente manera:

$$\Delta L_{bf} = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (2.1)$$

donde la frecuencia está expresada en MHz.

Por otra parte, se adiciona un factor de corrección para la altura del receptor, en caso de que sea mayor a  $2m$ ,  $h_r > 2m$ . Este factor no añade cambios para el cálculo de pérdidas, dado que la altura del receptor es menor a  $2m$ . Si bien, se soluciona el problema de la frecuencia de transmisión, todavía existe la restricción en cuanto a la distancia de separación entre los equipos transmisor y receptor.

## 2.6. Modelo de SUI extendido

La extensión al modelo de propagación de SUI, permite modificar la distancia de referencia, mediante un recálculo de la misma (Ecuación 1.55) Esta corrección está dada por:

$$(d_0)' = d_0 10^{-\left(\frac{\Delta L_{bf} + \Delta L_{bh}}{10\gamma}\right)} \quad (2.2)$$

El factor de corrección de la frecuencia que se aplica es el mismo que el planteado anteriormente, pero aquí el factor de corrección de la altura del receptor está dado por la corrección:

$$\Delta L_{bh} = \begin{cases} -10 \log\left(\frac{h_r}{3}\right) & \text{si } h_r \leq 3m \\ -20 \log\left(\frac{h_r}{3}\right) & \text{si } h_r > 3m \end{cases} \quad (2.3)$$

Por lo que se analiza desde el punto de vista teórico, esta extensión del modelo es la que brindará los resultados más aproximados a las mediciones a realizar, solo en el caso

que al calcular la distancia de referencia  $d_0''$ , la misma de como resultado un valor que sea menor a la mínima distancia en que se realicen mediciones.

## 2.7. Modelo de Propagacion UIT-R P.1411-6

Los parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de aplicar este modelo, se encuentran dentro de los que se deben utilizar al momento de realizar los cálculos. Por lo tanto esta recomendación de la UIT-R P.1411-6 no posee ningún tipo de restricción para ser aplicado en el proyecto. Se espera que los resultados que otorgará este modelo serán muy aproximados a los que se obtendrán en el trabajo de campo.

Dentro de las desventajas de este modelo, es que el mismo presenta muchos parámetros que se deben fijar. Cuenta con muchas ecuaciones matemáticas, por lo que es necesario trabajar de manera precisa.

## 3 Trabajo de Campo

Este trabajo está centrado en la banda de frecuencia de  $5GHz$  (banda SHF) (ver Anexo). Esta banda forma parte de las bandas de frecuencia que se denominan Ondas de Radio. El término ondas de radio se refiere al hecho de que se utilizan en radio comunicaciones.

Durante el trabajo de campo, se llevaron a cabo dos campañas de recolección de datos, las cuales fueron diferenciadas ya que fueron realizadas en distintos entornos.

La primera campaña se realizó en el predio del Instituto Universitario Aeronáutico (Campaña A) y la segunda en el Barrio Juniors (Campaña B), ambos en la Ciudad de Córdoba. A continuación se describen dichos entornos, se explica el proceso de recolección de datos, y por último se presentan los resultados obtenidos.

### 3.1. Campaña A: Medición del Nivel de Potencia en el predio del Instituto Universitario Aeronáutico

La primer campaña se llevó a cabo en el predio del Instituto Universitario Aeronáutico. Las características de este entorno corresponden a un ambiente suburbano, pues hay edificaciones bajas y bien distanciadas entre si, además hay poca presencia de árboles, y de vehículos que circulan por el lugar.

Se decidió colocar un enlace punto a punto, ubicando el equipo transmisor frente a la Iglesia del IUA (Nodo A) y el receptor en la entrada de la escuela de aviación (Nodo B), ambos ubicados en línea de vista. La Figura 3.1 muestra una imagen satelital del entorno donde se realizaron las mediciones, y se especifica la ubicación del Nodo A y el Nodo B. Cabe aclarar que el objetivo de esta campaña es medir como varía la potencia recibida en función de la distancia, para luego poder comparar estos valores con los resultados que se obtienen ajustando un modelo de propagación determinado.



Figura 3.1: Mapa satelital correspondiente a la Campaña A de medición

#### 3.1.1. Configuración del Enlace Punto a Punto

Se estableció el siguiente diagrama de conexión, en donde dejaremos fijo al Transmisor configurándolo como Access Point (AP), alimentado a través del inyector PoE con 220V. La frecuencia de trabajo es de 5180 Mhz. El AP está montado de manera de actuar como reflector sobre una antena grillada de 28 dBi de ganancia instalada sobre un mástil a una altura de 2,5m desde el suelo. La potencia de transmisión está seteada en 17 dBm y se tuvo en cuenta una clara línea de vista con el receptor para selección del escenario de medición. Cabe aclarar que el enlace utilizado tiene un software en el que se puede observar en momento real como varía la señal en el receptor. El receptor, configurado en modo estación, será móvil siempre pendiente de la LOS entre el transmisor, conectado a una notebook (software) para verificar su nivel de señal. Este dispositivo será alimentado por medio de una batería de 12V a 24V con un consumo de corriente entre 0.8 a 1 A. El nivel de Umbral o Sensibilidad del equipo receptor está ajustado en -95 dBm. Las especificaciones técnicas de este equipo se encuentran en el Anexo.

Para medir el nivel de potencia de la señal wireless se utiliza el analizador Aircheck Fluke (Wi-Fi Tester) [11], [12]. Este analizador, una vez que ubica la red que deseamos analizar, nos entrega los valores de la señal recibida, el ruido y la relación señal sobre ruido. Además nos proporciona un reporte de los valores obtenidos generando un archivo

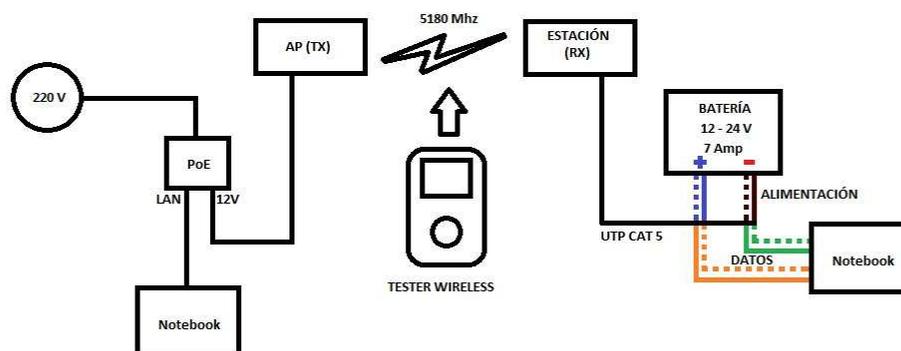


Figura 3.2: Configuración de Enlace Punto a Punto

del mismo (ver Anexo). En este trabajo solo se consideró el valor de la señal, ya que se pudo comprobar que el ruido es despreciable y que no varía en función de la distancia. Una vez medido el nivel de potencia de la señal wireless con el analizador Aircheck Fluke, se verifican los valores obtenidos con el nivel de señal que nos entrega el software del enlace punto a punto.

Luego como paso final se compara que los valores de potencia obtenidos mediante las mediciones son comparables con los resultados teóricos predichos por el Modelo de Lee.

El Cuadro 3.1 muestra las características del equipo con el que se realizó el Enlace Punto a Punto utilizado para poder realizar las mediciones:

Cuadro 3.1: Características del Enlace Punto a Punto

$f_c(Mhz)$	$h_b(m)$	$P_t(dBm)$	$G_b(dBi)$	$h_m(m)$	$G_m(dBi)$
5180	2.5	52	28	1.5	3

### 3.1.2. Datos Obtenidos

#### Modelo de Lee

Las pérdidas, para un entorno suburbano, en este modelo están dadas por la siguiente ecuación:

$$L_L = 99,2 + 47,3 \log\left(\frac{r}{1,6}\right) + 10n \log\left(\frac{f}{900}\right) - \alpha_0 \quad (3.1)$$

Utilizando la ecuación de radioenlace se calcula la potencia recibida como:

$$L_L(dBm) = P_t(dBm) - P_r(dBm) \quad (3.2)$$

Para realizar los cálculos se consideraron los siguientes valores:

- Pendiente de pérdidas  $\gamma=4,73$  (valor tabulado correspondiente a un ambiente sub-urbano)
- $n = 3$  este valor depende de la topología de la zona y de la frecuencia utilizada ( $f > 450MHz$ )
- $\nu=1$  pues la altura de la antena móvil es menor a 3m
- Factor de corrección  $\alpha_0 = 0,0013$ .

Donde:

$$\alpha_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \quad (3.3)$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{h_b}{30,48}\right)^2 = \left(\frac{2,5}{30,48}\right)^2 = 0,0067 \quad (3.4)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{h_m}{3}\right)^\nu = \frac{1,5}{3} = 0,5 \quad (3.5)$$

$$\alpha_3 = \frac{P_t}{10} = \frac{0,5}{10} = 0,05 \quad (3.6)$$

$$\alpha_4 = \frac{G_b}{6,53} = \frac{28}{6,53} = 4,28 \quad (3.7)$$

$$\alpha_5 = \frac{h_b}{1,64} = \frac{3}{1,64} = 1,82 \quad (3.8)$$

Los valores calculados de las pérdidas en función de la distancia a partir de este modelo se muestran en el Cuadro 3.2. En el Cuadro 3.3 se comparan los valores de potencia recibida [dBm] en función de la distancia para el Modelo de Lee con los valores medidos con el analizador Aircheck Fluke.

Cuadro 3.2: Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de Lee

$(d \pm 1)[m]$	500	600	700	800	900	1000
$(L \pm 1)[dBm]$	97	105	113	119	124	126
$(P_r \pm 1)[dBm]$	-45	-53	-61	-70	-73	-77

Cuadro 3.3: Comparación de los valores de potencia en dBm obtenidos a partir del Modelo de Lee con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke

	$P_r$ a 500m	$P_r$ a 600m	$P_r$ a 700m	$P_r$ a 800m	$P_r$ a 900m	$P_r$ a 1000m
Modelo Lee	$-45 \pm 1$	$-53 \pm 1$	$-61 \pm 1$	$-70 \pm 1$	$-73 \pm 1$	$-77 \pm 1$
Aircheck	$-40 \pm 1$	$-52 \pm 1$	$-59 \pm 1$	$-64 \pm 1$	$-69 \pm 1$	$-78 \pm 1$

Se aclara que el error correspondiente a la potencia recibida calculada por el modelo de Lee es de 1 (se calculo a partir del método de propagación de errores) y el error correspondiente a la medición con el analizador es de 1, este último es debido a la precisión del instrumento.

Tomando como referencia una distancia de 1Km, obtenemos a partir del Modelo de Lee una potencia recibida de  $(-77 \pm 1)dBm$ , y a partir de los datos medidos con el analizador obtenemos una potencia recibida de  $(-78 \pm 1)dBm$ .

## 3.2. Campaña B: Medición del Nivel de Potencia en Barrio Junior

Esta campaña de medición se realizó en Barrio Juniors de la ciudad de Córdoba. Podemos clasificar a este entorno como urbano, con presencia de edificaciones en su mayoría en altura, y además mucho tránsito de vehículos.

Se llevaron a cabo mediciones de un Access Point situado en un edificio Córdoba II. La antena de transmisión es una parábola NanoBridge M, cuya potencia de transmisión y ganancia de detallan en el Cuadro 3.4, como también se expresa la ganancia del equipo receptor. La Fig.3.3 muestra una imagen extraída de Google Earth, donde se observa la región de interes.

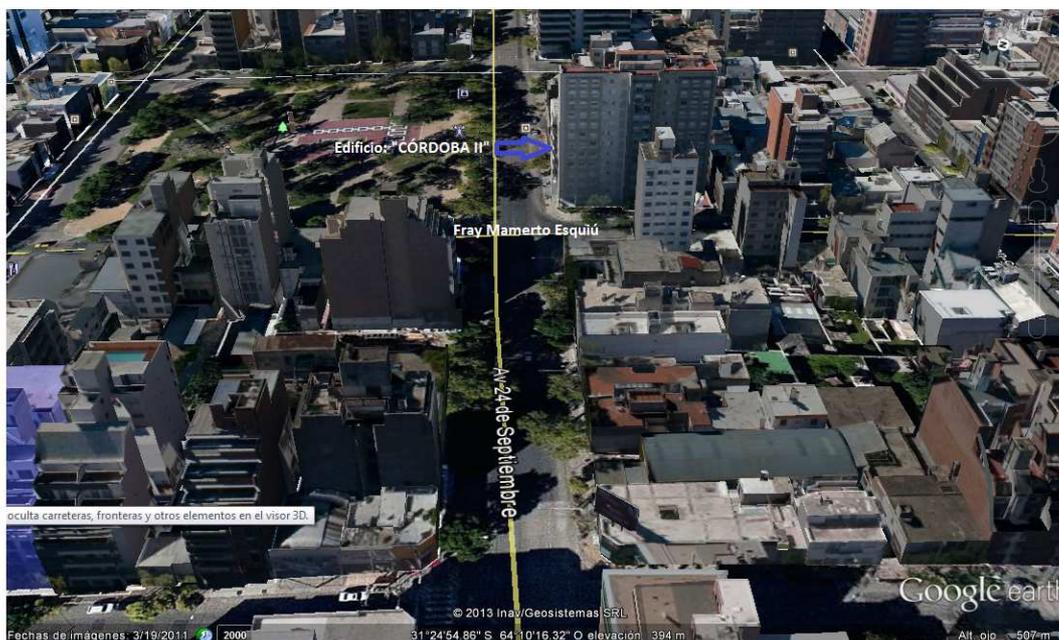


Figura 3.3: Mapa satelital correspondiente a la Campaña B de medición

Cuadro 3.4: Datos del Access Point

$F$ [MHz]	$\lambda$ [m]	$d$ [m]	$P_t$ [dBm]	$G_t$ [dBi]	$G_r$ [dBi]
5210	0.05758	20-200	23	22	3

### 3.2.1. Cálculo de pérdidas de trayecto utilizando los modelos de propagación

Para realizar el análisis de los valores calculados en forma teórica, se llevaron a cabo los siguientes cálculos de pérdidas de trayecto para cada uno de los modelos de propagación.

#### Espacio Libre

Para realizar el cálculo de pérdidas de trayecto usamos la siguiente ecuación:

$$PL(dB) = 35,42 + 20\log(f) + 20\log(d). \quad (3.9)$$

Se obtienen las pérdidas en decibeles utilizando los siguientes valores:

- $f = 5210MHz$
- $\lambda = 0,05758m$

- $20m < d < 200$

Una vez obtenidos los valores de las pérdidas de trayecto, se aplica la ecuación de enlace para obtener la potencia de recepción en cada punto de análisis. En los cuadros 3.5 y 3.6 se muestran los valores calculados.

$$P_r = -PL + P_t + G_t + G_r \quad (3.10)$$

Cuadro 3.5: Pérdidas de trayecto Espacio Libre y potencia de recepción

$(d \pm 0,001)[Km]$	0,020	0,030	0,0450	0,050	0,060	0,070	0,095	0,100	0,105
$(PL \pm 1)[dB]$	76	80	83	84	85	87	89	89	90
$(P_r \pm 1)[dBm]$	-28	-31	-35	-36	-37	-37	-41	-42	-42

Cuadro 3.6: Pérdidas de trayecto Espacio Libre y potencia de recepción

$(d \pm 0,001)[Km]$	0,111	0,115	0,130	0,145	0,150	0,167	0,170	0,200
$(PL \pm 1)[dB]$	91	91	92	93	93	94	94	96
$(Pr \pm 1)[dBm]$	-43	-43	-44	-45	-45	-46	-46	-48

### Modelo de SUI con factor de corrección de Frecuencia

En este modelo, se tienen en cuenta factores que dependen del tipo de terreno donde se debe aplicar. Se toman los valores correspondientes a la Categoría A, que corresponde a terrenos con condiciones de pérdidas elevadas. Ya que en el lugar donde se realizan las mediciones, es una zona urbana densa, con edificios de aproximadamente 6 pisos. Los valores de los parámetros que pertenecen a esta categoría toman los siguientes valores:  $a = 4,6$ ,  $b = 0,0075m^{-1}$  y  $c = 12,6m$ .

Por lo tanto la exponente de pérdidas  $\gamma$  está dada por:

$$\gamma = (a - bh_t + \frac{c}{h_t}) = (4,6 - 0,0075 * \frac{12,6}{42}) = 4,585 \quad (3.11)$$

La variable  $s$ , varía entre  $8,2dB$  y  $10,6dB$ . Se toma el valor igual a  $10,6dB$ .

El valor de A, corresponde a las pérdidas por espacio libre:

$$A = 20 \log \frac{4\pi d_0}{\lambda} = 20 \log \frac{4\pi 100}{0,06} = 86,421 dB. \quad (3.12)$$

Para los factores de corrección se tiene:

$$\Delta L_{bf} = 6 \log \frac{f}{2000} = 6 \log \frac{5210}{2000} = 2,495 dB \quad (3.13)$$

$$\Delta L_{bh} = -10,8 \log \frac{h_r}{2} = -10,8 \log \frac{1,8}{2} = 0,494 dB. \quad (3.14)$$

Utilizando los valores arriba obtenidos, se calculan las pérdidas utilizando la siguiente ecuación:

$$PL(dB) = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s + \Delta L_{bf} + \Delta L_{bh} \quad (3.15)$$

En los cuadros 3.7 y 3.8 se detallan los valores obtenidos para las diferentes distancias aplicando las ecuaciones anteriores.

Cuadro 3.7: Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de SUI con correccion de frecuencia

$(d \pm 0,001)[Km]$	0,020	0,030	0,045	0,050	0,060	0,070	0,095	0,100	0,105
$(PL \pm 1)[dB]$	68	76	84	87	90	93	99	100	101
$(Pr \pm 1)[dBm]$	-20	-28	-36	-39	-42	-45	-51	-52	-53

Cuadro 3.8: Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de SUI con correccion de frecuencia

$(d \pm 0,001)[Km]$	0,111	0,115	0,130	0,145	0,150	0,167	0,170	0,200
$(PL \pm 1)[dB]$	102	103	106	108	108	111	111	114
$(Pr \pm 1)[dBm]$	-54	-55	-58	-60	-60	-63	-63	-66

### Modelo de SUI Extendido

Esta modificación del modelo SUI, permite un recálculo de la distancia de referencia  $d_0$ , mediante la siguiente ecuación:

$$d'_0 = d_0^{-\left(\frac{\Delta L_{bf} + \Delta L_{bh}}{10\gamma}\right)} \quad (3.16)$$

donde:

$$\Delta L_{bf} = 6 \log \frac{f}{2000} = 6 \log \frac{5210}{2000} = 2,495 dB \quad (3.17)$$

$$\Delta L_{bh} = -10 \log \frac{h_r}{3} = -10 \log \frac{1,8}{3} = 2,218 dB \quad (3.18)$$

$$\gamma = (a - bh_t + \frac{c}{h_t}) = 4,6 - 0,0075 * 42 + \frac{12,6}{42} = 4,585 \quad (3.19)$$

$$d'_0 = d_0^{-\left(\frac{\Delta L_{bf} + \Delta L_{bh}}{10\gamma}\right)} = 100 * 10^{-\left(\frac{2495 + 2,218}{10 * 4,585}\right)} = 78,923 m \quad (3.20)$$

$$\Delta L_b(dB) = \begin{cases} 20 \log \frac{4\pi d_0}{\lambda} & \text{si } d \leq d'_0 \\ A + 10\gamma \log \frac{d}{d'_0} + s + \Delta L_{bf} + \Delta L_{bh} & \text{si } d > d'_0 \end{cases} \quad (3.21)$$

donde:

$$A = 20 \log \left( \frac{4\pi d'_0}{\lambda} \right) \quad (3.22)$$

Los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d_0$  son los definidos en el Cuadro 1.1. Luego las pérdidas se calculan con la siguiente ecuación:

$$PL_{total} = PL + \Delta L_{bf} + \Delta L_{bh} \quad (3.23)$$

Para aquellos puntos en los cuales las mediciones correspondan a distancias menores a  $d_0$  se usa:

$$L_b(dB) = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (3.24)$$

En los cuadros 3.9 y 3.10 se detallan los valores obtenidos para las diferentes distancias aplicando las Ecuaciones 3.7 y 3.2.

Cuadro 3.9: Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de SUI Extendido

$(d \pm 0,001)[Km]$	0,020	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,095	0,100	0,105
$(PL \pm 1)[dB]$	73	76	80	81	82	84	104	105	106
$(Pr \pm 1)[dBm]$	-25	-28	-32	-33	-34	-36	-56	-57	-58

Cuadro 3.10: Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Modelo de SUI Extendido

$(d \pm 0,001)[Km]$	0,111	0,115	0,130	0,145	0,150	0,167	0,170	0,200
$(PL \pm 1)[dB]$	107	107	110	112	113	115	115	117
$(Pr \pm 1)[dBm]$	-59	-59	-62	-64	-65	-70	-67	-71

### Recomendación UIT-R P.1411-6

Este modelo tiene en cuenta muchas características dependientes del ambiente en el cual se realizarán las mediciones. Los parámetros presentados a continuación resumen los límites de validez del modelo para entornos urbanos:

- $h_b$ : 4 a 50 [m].
- $h_m$ : 1 a 3 [m].
- $f$ : 800 MHz a 5000 MHz.
- $d$ : 20 a 5000 [m].
- 2 a 16 GHz para  $h_b < h_r$  y  $w_2 < 10m$ .

La pérdida básica de propagación,  $L_b$ , se expresa como la suma de la pérdida de espacio libre,  $L_{bf}$ , la pérdida de difracción techo-calle,  $L_{rts}$ , y una reducción en la intensidad de señal debido a la difracción multipantalla,  $L_{msd}$ , de las filas de edificios presentes en el trayecto. En este modelo, las pérdidas  $L_{bf}$  y  $L_{rts}$  son independientes de la altura de la antena de la estación base, mientras que  $L_{msd}$  depende de si ésta se encuentra por debajo o por encima de la altura media de los edificios.

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} \quad (3.25)$$

Las pérdidas en espacio libre,  $L_{bf}$ , se calculan teniendo en cuenta:

- $f=5000$  MHz.
- La distancia varía según el punto donde se realiza la medición. Para ejemplificar, se toma la distancia  $d = 50m$

$$L_{bf} = 32,4 + 20\log\left(\frac{d}{1000}\right) + 20\log f = 32,4 + 20\log\left(\frac{50}{1000}\right) + 20\log 5210 = 80,7016dB. \quad (3.26)$$

El valor de  $\Delta h_m$ , se calcula teniendo en cuenta la altura promedio de edificios  $h_r = 35m$  y la altura de la antena receptora  $h_m = 1,8m$ .

$$\Delta h_m = h_r - h_m = 35 - 1,8 = 33,2m \quad (3.27)$$

El término  $L_{ori}$ , es el factor de corrección de la orientación de la calle, y varía según el valor del ángulo  $\varphi$ , que se refiere a la orientación de la calle respecto al trayecto directo entre el equipo transmisor y el receptor. Se calculó aplicando trigonometría, ya que se conoce la altura del transmisor y se varía la distancia según la medición que se va realizando.

Por ejemplo, para una distancia de  $50m$ :

$$\tan\varphi = \frac{42m}{50m} = 0,84 \quad (3.28)$$

Para esta distancia se obtiene  $\varphi = 40,03^\circ$

Luego las pérdidas  $L_{ori}$  son:

$$L_{ori} = 2,5 + 0,075\varphi = 2,5 + 0,075(40,03^\circ - 35^\circ) = 2,877dB \quad (3.29)$$

teniendo en cuenta el ancho de la calle  $w = 9m$ , se puede calcular el término  $L_{rts}$ :

$$L_{rts} = -8,2 - 10\log(9) + 10\log(5210) + 20\log(33,2) + 2,877 = 52,726dB. \quad (3.30)$$

La pérdida de difracción multipantalla,  $L_{msd}$  desde la estación base, debido a la propagación que pasa por las filas de edificios, depende de la altura relativa de la estación base respecto a la altura de los edificios y del ángulo de incidencia. Un criterio que define un trayecto con incidencia rasante es el parámetro  $d_s$ :

$$d_s = \frac{\lambda d_2}{\Delta(h_b)^2} \quad (3.31)$$

La altura de la antena transmisora es  $h_b = 42m$  y la altura promedio de los edificios  $h_r = 35m$ , entonces:

$$\Delta h_b = h_b - h_r = 42 - 35 = 7m \quad (3.32)$$

luego el parámetro  $d_s$ , para una distancia de  $130m$  es  $d_s = 19,859m$ . Para poder seleccionar el modelo con que se calcularán las pérdidas  $L_{msd}$ , se deben comparar los valores de  $d_s$  con los del parámetro  $l$ , que es la longitud total de la trayectoria cubierta por edificios. Las comparaciones se realizaron para todas las distancias en las que se realizó una medición, dando todas como resultado que  $l > d_s$ . Para una distancia de  $130m$  el valor de  $l$  es  $114,25m$ .

Por lo tanto, las pérdidas  $L_{msd}$  están dadas por:

$$L_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log \frac{d}{1000} + k_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (3.33)$$

donde:

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_b) = -18 \log(1 + 7) = -16,2556dB. \quad (3.34)$$

Se selecciona el coeficiente  $k_a$  correspondiente, teniendo en cuenta que  $f > 2000MHz$ , y que  $h_b > h_r$ , luego:

$$k_a = 71,4 \quad (3.35)$$

el coeficiente  $k_f$  seleccionado es:

$$k_f = -8 \quad (3.36)$$

Dicho valor es el que corresponde a frecuencias  $f > 2000MHz$ . El parámetro  $b$  hace referencia a la separación promedio de edificios. Al realizar las mediciones, se tomaron medidas de las distancias de separación entre edificios, para luego calcular el promedio de la misma:

$$b = 8,25m \quad (3.37)$$

Por último, si  $h_b > h_r$ , el coeficiente  $k_d$ :

$$k_d = 18 \quad (3.38)$$

### 3.2 Campaña B: Medición del Nivel de Potencia en Barrio Junior

Una vez establecidos todos estos valores, se calculan las pérdidas  $L_{msd}$ . Se muestra como ejemplo el cálculo de las mismas para una distancia de 50m:

$$L_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log \frac{d}{1000} + k_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (3.39)$$

$$L_{msd}(d) = -16,2556 + 71,4 + 18 \log \frac{50}{1000} - 8 \log(5210) - 9 \log(8,25) = -6,257 dB \quad (3.40)$$

A partir de las pérdidas calculadas, se obtienen las pérdidas totales. En este caso, para una distancia de 50m:

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} = 80,716 + 52,726 - 6,257 = 127,185 dB \quad (3.41)$$

El mismo procedimiento se realizó para las distintas distancias en las que se efectuaron las mediciones, obteniéndose los valores expresados en los Cuadros 3.11 y 3.12, junto con su correspondiente a la potencia de recepción.

Cuadro 3.11: Pérdidas de Trayecto y potencia de recepción. Recomendación UIT-R P.1411-6

$(d \pm 0,001)[Km]$	0,020	0,030	0,045	0,050	0,060	0,070	0,095	0,100	0,105
$(PL \pm 1)[dB]$	112	120	126	127	130	131	133	134	134
$(Pr \pm 1)[dBm]$	-64	-72	-78	-79	-82	-83	-85	-86	-86

Cuadro 3.12: Pérdidas de trayecto y potencia de recepción. Recomendación UIT-R P.1411-6

$(d \pm 0,001)[Km]$	0,111	0,115	0,13	0,145	0,15	0,167	0,17	0,2
$(PL \pm 1)[dB]$	135	135	136	138	140	139	140	141
$(Pr \pm 1)[dBm]$	-87	-87	-88	-90	-90	-91	-91	-93

#### Datos obtenidos

A continuación se detallan los valores obtenidos de la medición del nivel de potencia del Access Point (AP) en 4 diferentes direcciones: Mediciones A (sur del AP), Mediciones B (este del AP), Mediciones C (norte del AP) y Mediciones D (oeste del AP).

Por ser una zona urbana densa, es una zona con grandes pérdidas, debido mayormente

a la gran cantidad de construcciones existentes, dentro de las cuales, se encuentran varios edificios de gran altura (mayores a 6 pisos). La distancia máxima hasta donde se logró medir la señal correspondiente a la red es de 200m.

Para lograr una mayor fidelidad de los datos, se realizaron dos campañas de medición. En ambas ocasiones, los valores fueron tomados en los mismos puntos para poder contrastarlos. El error correspondiente a la medición con el analizador se le atribuye a la precisión del instrumento, así como también se le atribuye un error igual a 1 a los valores obtenidos a partir de los diferentes modelos de propagación.

Cuadro 3.13: Comparación de los modelos de propagación con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke. Medición A

<b>Modelo de Propagación</b>	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 50m	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 100m	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 200m
Espacio Libre	-36	-42	-48
UIT-R P.1411-6	-79	-86	-93
SUI con factor de corrección	-38	-52	-66
SUI Extendido	-33	-57	-70
Campaña I (Aircheck Fluke)	-73	-81	-88
Campaña II (Aircheck Fluke)	-75	-85	-90

Cuadro 3.14: Comparación de los modelos de propagación con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke. Medición B

<b>Modelo de Propagación</b>	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 20m	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 70m	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 100m
Espacio Libre	-28	-39	-42
UIT-R P.1411-6	-64	-83	-86
SUI con factor de corrección	-20	-45	-52
SUI Extendido	-25	-36	-57
Campaña I (Aircheck Fluke)	-87	-90	-92
Campaña II (Aircheck Fluke)	-87	-91	-90

Analizando los resultados en los Cuadros 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16, podemos observar que el modelo de propagación que brinda los valores más aproximados a los medidos, es el UIT-R P.1411-6. Esto se debe a que dicho modelo tiene en cuenta muchos factores y características de la zona donde se desea realizar la medición del nivel de señal. Por lo que podemos decir que dicho modelo es propicio a la hora de estudiar la propagación de ondas electromagnéticas en ambientes urbanos, para frecuencias altas y distancias cortas.

### 3.2 Campaña B: Medición del Nivel de Potencia en Barrio Junior

Cuadro 3.15: Comparación de los modelos de propagación con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke. Medición C

<b>Modelo de Propagación</b>	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 45m	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 95m	$P_r \pm 1)[dBm]$ a 170m
Espacio Libre	-35	-41	-46
UIT-R P.1411-6	-78	-85	-91
SUI con factor de corrección	-36	-51	-63
SUI Extendido	-32	-56	-67
Campaña I (Aircheck Fluke)	-77	-88	-92
Campaña II (Aircheck Fluke)	-77	-87	-91

Cuadro 3.16: Comparación de los modelos de propagación con los datos obtenidos por el analizador Aircheck Fluke. Medición D

<b>Modelo de Propagación</b>	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 30m	$(P_r \pm 1)[dBm]$ a 60m
Espacio Libre	-32	-37
UIT-R P.1411-6	-72	-82
SUI con factor de corrección	-28	-42
SUI Extendido	-28	-34
Campaña I (Aircheck Fluke)	-79	-91
Campaña II (Aircheck Fluke)	-75	-91

Las predicciones de los modelos SUI con factor de corrección de frecuencia y SUI extendido, difieren en un máximo de  $20dB$  con las del modelo en el espacio libre. En cambio, las pérdidas que presenta el modelo de la recomendación UIT-R P.1411-6 difieren mucho más con las del espacio libre, ya que son pérdidas mucho mayores, llegando hasta una diferencia de  $50dB$ . Esto es lo que caracteriza a la recomendación antes mencionada, debido a que, al presentar pérdidas mucho mayores, los niveles de potencia de recepción de la señal son mucho más precisos y cercanos a los medidos en las campañas de medición.



## 4 Conclusiones y Perspectivas Futuras

Los modelos de propagación tienen como objetivo lograr una estimación lo más precisa posible de cómo se propagan las ondas electromagnéticas. Su finalidad es predecir las pérdidas de trayecto que existen entre el transmisor y el receptor para diferentes tipos de ambientes, ya sea en ambientes confinados (indoor) o ambientes no confinados (outdoor).

Son de gran importancia al momento de diseñar una red de comunicaciones, debido a que permiten predecir las pérdidas que existen entre los equipos de transmisión y recepción. Es de gran importancia hacer las consideraciones correspondientes respecto a los efectos del ambiente y los obstáculos sobre los cuales ocurre la propagación, como lo son edificios, calles, árboles, montañas, etc.

En este trabajo se realizó un exhaustivo estudio de los diferentes modelos de propagación outdoor de ondas electromagnéticas, y luego se llevaron a cabo distintas campañas de medición (outdoor) en dos ambientes bien diferentes entre si.

En primer lugar, se estudió el comportamiento de las ondas electromagnéticas en un ambiente suburbano, donde las edificaciones son bajas y distantes, y donde el tránsito es reducido. Para esto, se eligió el Modelo de Propagación que más se adecuaba a este ambiente, siendo este el Modelo de Propagación de Lee.

Los datos obtenidos en esta campaña, están de acuerdo con los valores predichos en éste Modelo. Se puede concluir, que el Modelo de Lee proporciona un modelo de predicción confiable para este rango de frecuencia y distancias en la que hemos trabajado.

Luego se estudió la propagación en un ambiente urbano denso, como lo es un barrio céntrico de la ciudad de Córdoba. En esta etapa, se analizaron los siguientes Modelos de Propagación: Espacio Libre, Recomendación de la UIT P. 1411-6 y el modelo de Propagación de Erceg-SUI, modelo de SUI con corrección de frecuencia y modelo de SUI

extendido.

- **Modelo de Propagacion de Erceg-SUI:** En el desarrollo de la primer parte de este modelo se agrega un factor de corrección de frecuencia al modelo SUI básico para poder ser aplicado en sistemas que trabajan con frecuencias mayores a 2 GHz. Es decir que con respecto a la frecuencia de trabajo no presenta problemas para ser aplicado en las mediciones de este proyecto. Sin embargo, plantea como distancia de referencia  $d_0 = 100m$ , por lo tanto se debe aplicar para distancias mayores o iguales a 100 m. Es por esto, que los valores teóricos presentan tanta diferencia a los medidos con el analizador de Wi-Fi Aircheck Fluke. Este modelo, también diferencia tres categorías de terreno según las características del mismo y la densidad de vegetación, por lo que se podría suponer que para distancias mayores a la de referencia, los valores deberían ser aproximados. Esto no ocurre, debido a que, aunque se lo puede aplicar a entornos urbanos, este modelo fue desarrollado para entornos sub-urbanos.

Por otra parte, este Modelo, permite efectuar un recálculo de la distancia de referencia, lo que permitiría obtener valores más cercanos a los brindados por el analizador de Wi-Fi. Sin embargo, al realizar el cálculo de la nueva distancia de referencia, se obtiene una distancia de  $d_0 = 78,923m$ . Por lo tanto, no se puede aplicar a todos los puntos donde se tomaron mediciones. Además, para aquellos puntos en los que se pudo aplicar esta nueva distancia de referencia, se observa una diferencia de 4 dB con respecto a los valores que se obtuvieron tomando como distancia de referencia los 100 m, es decir, que tampoco se obtienen grandes aproximaciones. Esto se debe, como se dijo anteriormente, a que el modelo SUI fue pensado y diseñado para entornos sub-urbanos, y en Barrio Juniors, donde se encuentra el Access Point, es una zona urbana, con edificios de gran altura y altamente poblada.

- **Modelo UIT-R P.1411-6:** esta recomendación tiene en cuenta muchos factores y características que dependen de la zona donde se realizan las mediciones. Entre ellos se encuentra la diferencia entre entornos urbanos y sub-urbanos, las situaciones de línea de vista (LoS) y sin línea de vista (NLoS), y el efecto que producen los edificios y árboles, ya que en medios outdoor la propagación se ve afectada principalmente por estos, más que por ondulaciones propias del terreno. Para este proyecto, se utilizó el modelo NLoS1, ya que el rango de los distintos parámetros en

---

el que es válido dicho modelo, cumple con los necesarios para este trabajo. Cabe destacar que este modelo de la UIT, recomienda que la distancia de separación varíe entre 20 m y 1 km, por lo que se ajusta perfectamente a las condiciones de las mediciones realizadas. Es por esto, que este modelo es el que brinda los valores más aproximados a los obtenidos en las distintas campañas de medición.

Se comprobó que el modelo de la recomendación UIT P.1411-6 es el que brinda los valores más aproximados a los obtenidos con el analizador de Wi-Fi, debido a que éste considera muchos factores que dependen de diversas características de la zona donde se realizan las mediciones del nivel de señal. Es decir, que esta recomendación permite generar de forma teórica, valores consistentes con las mediciones.

Para este trabajo de especialización solo se han llevado a cabo estudios en el rango de frecuencia de  $5GHz$ , por el solo motivo de que en el lugar de trabajo (Departamento de Electrónica del Instituto Universitario Aeronáutico) se cuenta con instrumentos que operan en dichas gama de frecuencias.

Como trabajo futuro para la Maestría en Sistemas de Radar e Instrumentación se pretende llevar estas mediciones a frecuencias en las que operan los radares actualmente, ya que los modelos generalmente son escalables en frecuencias. Adicionalmente se desea incorporar en un futuro a estos modelos en estudio las condiciones ambientales de cada uno de los escenarios. Para llevar este proyecto adelante se utilizará el Radar VITRO RIR 778-C, ubicado en las instalaciones de la Fuerza Aérea de la ciudad de Córdoba.



## 5 Anexo

### 5.1. Clasificación de frecuencias

Cuadro 5.1: Clasificación de frecuencias

Nombre	Abreviatura	Banda de Frecuencia
Frecuencia Extremadamente Baja	ELF	3-30 Hz
Súper Baja Frecuencia	SLF	30-300 Hz
Ultra Baja Frecuencia	ULF	300-3000 Hz
Muy Baja Frecuencia	VLf	3-30 KHz
Baja Frecuencia	LF	30-300 KHz
Media Frecuencia	MF	300-3000 KHz
Alta Frecuencia	HF	3-30 MHz
Muy Alta Frecuencia	VHF	30-300 MHz
Ultra Alta Frecuencia	UHF	300-3000 MHz
Súper Alta Frecuencia	SHF	3-30 GHz
Frecuencia Extremadamente Alta	EHF	30-300 GHz

## 5.2. Especificaciones técnicas de la antena transmisora utilizada para el trabajo de campo A

En la Figura 5.1 se muestran las especificaciones técnicas de la antena utilizada para realizar el trabajo de campo A. La misma es una antena grillada de la marca AirGrid, Modelo: AGM5-HP-1724. Este equipo se complementa con un software para la configuración del radioenlace.

## 5.3. Ejemplos de los informes del analizador Aircheck Fluke

A continuación se muestra un infome otorgado por el analizador Aircheck Fluke (Wi-Fi Tester) generado a partir de una medición en el predio del Instituto Universitario Aeronáutico. El informe que este equipo homologado entrega incluye la información de todas las redes que el mismo detecte. En la Figura5.2 la red correspondiente al AP utilizado en nuestras mediciones es la que se llama *ubnt – IUA*.

No se incluyen en este informe los reportes técnicos de cada una de las diferentes mediciones, tanto para la campaña A como para la B, porque cada uno de ellos tiene una extensión aproximada de 16 páginas. Solo se utilizaron los valores de la señal recibida.

## Specifications

AGM5-HP-1724	
Dimensions	620 x 460 x 359 mm (Mount Included)
Weight	2.850 kg (Mount Included)
Networking Interface	(1) 10/100 Ethernet Port
Enclosure	Outdoor UV Stabilized Plastic
Frequency	5470 – 5825 MHz*
Gain	27 dBi
Output Power	25 dBm
Max. Power Consumption	3.0 W
Power Supply	24V, 0.5A PoE Adapter (Included)
Power Method	Passive Power over Ethernet (Pairs 4, 5+; 7, 8 Return)
Max. VSWR	1.5:1
Wind Survivability	125 mph
Wind Loading	5 lbf @ 100 mph
ETSI Specification	EN 302 326 DN2
Shock and Vibration	ETSI300-019-1.4
Certifications	FCC, IC, CE
Operating Temperature	-30 to 75 °C
Operating Humidity	5 to 95% Condensing
Mounting	Universal Pole Mount Included

Figura 5.1: Especificaciones técnicas de la antena transmisora



## AirCheck Detail Report

## AirCheck Information

Serial Number 2265021

File TANQUE

Date/Time Recorded

MAC 00:C0:17:32:27:59

Profile Default

6/26/2013 11:33:56 AM

## SSID: Personal WIFI4568

Vendor MAC/BSSID	Meru AP/Radio ID	Name	Ch	Signal (dBm)	SNR (dB)	Authorization (ACL)	Security	802.11 Types	Discovered /Reported Clients	Supported Rates (Mbps)
Samsng 98:0C:82:BD:07:F2			6	-80	17	Unauthorized	No Security	b,g,n	0/--	1 - 65

## SSID: tango200675

Vendor MAC/BSSID	Meru AP/Radio ID	Name	Ch	Signal (dBm)	SNR (dB)	Authorization (ACL)	Security	802.11 Types	Discovered /Reported Clients	Supported Rates (Mbps)
A4:52:6F:0F:DB:44			6	-80	17	Unauthorized	WPA-P(AES-CCMP)	b,g,n	0/--	1 - 300

## SSID: ubnt\_IUA

Vendor MAC/BSSID	Meru AP/Radio ID	Name	Ch	Signal (dBm)	SNR (dB)	Authorization (ACL)	Security	802.11 Types	Discovered /Reported Clients	Supported Rates (Mbps)
Ubiquiti DC:9F:DB:14:AD:DD			36	-63	32	Unauthorized	No Security	a,n	0/--	6 - 150

Figura 5.2: Reporte entregado por el Wi-Fi Tester

# Bibliografía

- [1] J. Jackson. Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, 3 edition. 1991
- [2] J. L. Camargo Olivares. Proyecto Final de Carrera: Modelo de cobertura para redes inalámbricas de interiores. Universidad de Sevilla. 2009.
- [3] T. Rappaport. Wireless Communications, Ed. Prentice Hall. 2 Edition. 1996.
- [4] T. Okumura, E. Ohmore, and K. Fukuda. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile service. Rev. Elec. Commun. Lab., pp. 825-73, September-October 1968.
- [5] Okumura-Hata. Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands. ITU-R Recommendation P. 529-2. Geneva: ITU, pp. 5-7, 1995.
- [6] E. Damosso. Digital Mobile Radio: Towards Future Generation Systems. European Commission, Final Report of the COST 231 Project. Chapter 4. 1998.
- [7] L. M. Correia, A View of the COST 231-Bertoni-Ikegami Model, 3rd European Conference on Antennas and Propagation. EuCAP 2009. Berlin. March 2009.
- [8] C. Cevallos Tipánan. Proyecto de grado para la obtención del título de Ingeniería: Análisis y desarrollo de un Software de Modelos de Simulación de un canal móvil para las bandas de 850 MHz Y 1900 MHz. Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Eléctrica y Electrónica Sangolquí, Ecuador. 2006.

- [9] V. Erceg, et al. Channel Models for Fixed Wireless Applications. IEEE 802.16.3c-01/29r4, July 2001.
- [10] Recomendación UIT-R P.1411-6. Datos de Propagación y Métodos de Predicción para la Planificación de Sistemas de Radiocomunicaciones en Exteriores de corto alcance y Redes de Radiocomunicaciones de Área Local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz. 2012.
- [11] Fluke Corporation. Manual del Usuario - Analizador de Wi-Fi, 2010-2012.
- [12] Fluke Corporation. Especificaciones Técnicas - Analizador de Wi-Fi, 2012.