

CAPÍTULO 3

REALIZACIÓN PRÁCTICA. DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA EN LA LOCALIDAD DE BENAOCÁZ

3.1 EL SIMULADOR RADIO MOBILE

Para el diseño de la red inalámbrica en el municipio gaditano de Benaocáz se ha usado Radio Mobile, que es un programa de simulación desarrollado por el canadiense Roger Coudé en 1998. Se utiliza para predecir el comportamiento de sistemas radio, simular radioenlaces y representar el área de cobertura de una red de comunicaciones, entre otras funciones [1].

Utiliza datos digitales de elevación del terreno para generar un perfil del trayecto entre un emisor y un receptor. Estos datos, junto a otros relativos al entorno y a las características técnicas de los transceptores, sirven para alimentar un modelo de propagación de las ondas de radio conocido como *Irregular Terrain Model* (ITM) basado en el algoritmo de Longley-Rice e integrado en el propio programa, que permite determinar el área de cobertura de un sistema de radiocomunicaciones que trabaje en una frecuencia comprendida entre los 20 MHz y los 20 GHz.

Este software se va a usar para simular la cobertura creada por la tecnología Wi-Fi que es la tecnología que se utilizará para proporcionar a los habitantes del municipio acceso inalámbrico a Internet. Dicha tecnología ofrece problemas por radios de cobertura pequeños. Como se verá posteriormente, se

va a utilizar tecnología Pre-Wimax para propagar la señal proveniente del *router* que suministra el acceso a Internet a los puntos de acceso. Esta tecnología, al permitir NLOS (comunicación sin vista directa) no será necesaria simularla: aunque transmisor y receptor pueden no verse debido a los edificios del pueblo, el relieve geográfico no interrumpe la visión. Además, alcanza distancias de hasta 30 Km, así que no habrá problemas puesto que las antenas serán directivas.

El cálculo de radioenlaces es el resultado de la fusión de tres capas: mapa de trabajo, mapa topográfico y mapa de cobertura. En este capítulo se detallan dichas capas.

3.2 MODELO DE PROPAGACIÓN LONGLEY-RICE

El modelo de propagación de Longley-Rice, nombrado así por sus creadores Anita Longley y Phil Rice, es un modelo de radio propagación de propósito general cuyo rango de operación en frecuencia está comprendido entre los 20 MHz y los 20 GHz y puede ser aplicado en una gran variedad de problemas de ingeniería. El modelo, que se basa en la teoría electromagnética y en análisis estadísticos de las características del terreno y mediciones de radio, entrega como resultado el valor medio de la atenuación de la señal de radio en función de la distancia y de la variabilidad de la señal en el tiempo y en el espacio [4].

Se le conoce también como ITM (*Irregular Terrain Model*) y fue desarrollado a finales de los años 60 con la necesidad de mejorar los sistemas móviles de radio y transmisión de televisión. Fue ampliamente utilizado para la creación del cuadro de asignación de canales de VHF y UHF de la radiodifusión pública de EEUU.

El modelo permite operar en dos modalidades de trabajo: el modo de predicción de área y el modo punto a punto. El modo punto a punto es capaz de predecir estadísticamente las pérdidas de propagación sobre un trayecto de propagación determinista a partir de los datos característicos de radio y del entorno. El modo de predicción de área opera de forma similar, sin embargo, no trabaja sobre un trayecto de propagación determinista, sino que genera una proyección del área de cobertura de un terminal dado en función de las características de cada terminal y las irregularidades del terreno.

Fue escrito en forma de algoritmo con el objetivo de facilitar la programación software de procesamiento de datos. La versión de uso actual del algoritmo es la versión 1.2.2 mientras que el software original es el ITM del *Institute for Telecommunication Sciences*. Este software utiliza la base de datos de elevación de terrenos GLOBE (*Global Land One-km Base Elevation*).

En el siguiente apartado se describe analíticamente la versión 1.2.2 del algoritmo del modelo de propagación de Longley-Rice que es la que actualmente se implementa.

3.3 ALGORITMO ITM

3.3.1 VARIABLES DE ENTRADA

Los dos modos de trabajo del modelo de propagación se diferencian principalmente en la cantidad de variables de entrada necesarias. En el modo punto a punto se deben proporcionar detalles del perfil del terreno del enlace que en el modo de predicción de área se estiman usando medidas empíricas [5].

Vamos a llamar a partir de ahora a los terminales del enlace terminales 1 y 2, dejando al usuario que identifique cuál es el transmisor y cuál el receptor.

3.3.1.1 Variables generales de entrada para ambos modos de trabajo

A continuación se detallan cada una de las variables de entrada generales válidas para los dos modos de trabajo.

1. **d Distancia entre los dos terminales.**
2. **h_{g1}, h_{g2} Alturas de las antenas.** Corresponden a la altura del centro de radiación sobre la elevación del terreno. Se define en cada terminal.
3. **k Número de onda.** Es una de las portadoras o la frecuencia central. Se mide en unidades inversas de longitud. Se define como:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{f}{f_0}$$

Ecuación 3. 1 Número de onda

donde $f_0 = 47.70 \text{ MHz}\cdot\text{m}$, λ es la longitud de onda y f es la frecuencia. Se ha asumido que la velocidad de la luz en el aire es $299,7 \text{ m}/\mu\text{s}$.

4. **Δh Variable de terreno irregular.** Las irregularidades del terreno que se encuentran entre dos terminales se tratan como función aleatoria de la distancia entre los terminales. Para caracterizar esta función, el modelo ITM utiliza un único valor de Δh para representar de forma simplificada la altura promedio de las irregularidades en el terreno.

Forma del terreno	Δh (m)
Plano o superficie del agua	0
Llanuras	30
Colinas	90
Montañas	200
Montañas escabrosas	500

Tabla 3. 1 Valores sugeridos para el parámetro de terreno irregular

5. **N_s Refractividad de la superficie.** Para simplificar su expresión, la refractividad de la superficie a veces viene dada en términos de N_0 , la refractividad en la superficie del mar. Cuando ocurre esto, su expresión es la siguiente,

$$N_s = N_0 e^{-\frac{z_s}{z_1}}$$

Ecuación 3. 2 Refractividad de la superficie

donde z_s es la elevación de la región en cuestión y $z_1 = 9.46\text{km}$. Normalmente se mide en N-unidades (partes por millón). Valores sugeridos en función del clima se indican en la siguiente tabla.

Clima	N_s (N-unidades)
Ecuatorial	360
Continente subtropical	320
Marítimo subtropical	370
Desierto	280
Continental templado	301
Marítimo templado, sobre la tierra	320
Marítimo templado, sobre el mar	350

Tabla 3. 2 Valores sugeridos para la refractividad de la superficie

6. **γ_e Curvatura efectiva de la Tierra** medida en unidades inversas de longitud. Se define como el inverso del radio efectivo de la Tierra y viene dada por la siguiente expresión,

$$\gamma_e = \gamma_a / K$$

Ecuación 3. 3 Curvatura efectiva de la Tierra

donde γ_a es la curvatura actual de la Tierra y K es el factor efectivo del radio de la Tierra que viene dado normalmente a partir de la refracción de la superficie. Su fórmula empírica es,

$$\gamma_e = \gamma_a \left(1 - 0.04665 e^{N_s/N_1} \right)$$

Ecuación 3. 4 Curvatura efectiva de la Tierra a partir de N_s

donde $N_1 = 179.3$ N-unids y $\gamma_a = 157 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1} = 157 \text{ N-unids/Km}$

7. **Z_g Impedancia de la superficie del suelo.** Viene definida normalmente en función de la permitividad relativa ϵ_r , de la conductividad del suelo σ y de la polarización de la onda radio en cuestión. En estos términos tenemos:

$$Z_g = \begin{cases} \sqrt{\epsilon_r' - 1} & \text{polarización horizontal} \\ \frac{\sqrt{\epsilon_r' - 1}}{\epsilon_r'} & \text{polarización vertical} \end{cases}$$

Ecuación 3. 5 Impedancia del suelo Z_g

donde ϵ_r' es la permitividad relativa compleja definida como $\epsilon_r' = \epsilon_r + iz_0 \sigma/k$ con $z_0 = 376.62 \Omega$.

La conductividad σ viene expresada normalmente en Siemens (inverso de ohmios) por metro.

Tipos de suelo	Permitividad relativa	Conductividad (S/m)
Tierra promedio	15	0.005
Tierra pobre	4	0.001
Tierra buena	25	0.020
Agua dulce	81	0.010
Agua salada	81	5.000

Tabla 3. 3 Valores sugeridos para las constantes eléctricas del terreno

8. **Clima.** Se describe cualitativamente a partir de un conjunto discreto de etiquetas. Los climas reconocidos actualmente se indican en la tabla 3.4. Junto con N_s , el clima se utiliza para caracterizar la atmósfera y su variabilidad en el tiempo.

Clima	N_s (N-unidades)
Ecuatorial	360
Contiente subtropical	320
Marítimo subtropical	370
Desierto	280
Continental templado	301
Marítimo templado, sobre la tierra	320
Marítimo templado, sobre el mar	350

Tabla 3. 4 Valores sugeridos para N_s en función del clima

3.3.1.2 Variables de entrada adicionales para el modo de predicción de área

Si se usa el modo de predicción de área se puede añadir una variable adicional, el criterio de ubicación, que nos indica el criterio que debe seguir cada terminal para asegurar unas condiciones de propagación radio óptimas. Se expresa cualitativamente en tres modos: *random*, *careful* o *very careful*.

3.3.1.3 Variables de entrada adicionales para el modo punto a punto

Si se usa el modo punto a punto se pueden añadir otras variables de entrada adicionales. Éstas se enumeran a continuación.

1. **h_{e_1}, h_{e_2} Altura efectiva de las antenas.**
2. **d_{L_1}, d_{L_2} Distancia de cada terminal a su horizonte de radio.**
3. **$\theta_{e_1}, \theta_{e_2}$ Ángulos de elevación a la altura de las antenas medidos en radianes.**

Todas estas variables, junto con Δh , son geométricas y deben determinarse a partir del perfil del terreno situado entre los dos terminales.

La altura efectiva de una antena es la altura sobre un plano reflectante o sobre un plano intermedio entre la antena y su horizonte. Uno de los problemas que presenta este modelo es que no está definida explícitamente esta cantidad así que la exactitud de este modelo a veces depende de la habilidad que tenga el usuario para estimar los valores de dichas alturas efectivas.

En el caso de una trayectoria con línea de vista no hay horizontes, pero el modelo requiere valores para d_{L_j}, θ_{e_j} con $j = 1, 2$. Estos valores se deben determinar a partir de las fórmulas utilizadas en el modo de predicción de área. Puede ocurrir que después de estos cálculos se cumpla que $d > d_L = d_{L_1} + d_{L_2}$, implicando que el trayecto va más allá del horizonte radio de cada uno de los terminales. Teniendo en cuenta que d_L es una función monótona creciente de h_{e_j} , podemos asumir que estos últimos valores se han subestimado y debemos incrementarlos hasta conseguir que $d = d_L$.

3.3.2 SALIDA

Las salidas del modelo pueden ser varias, depende de las opciones del usuario. Una de las formas más simples es la *Atenuación de Referencia* A_{ref} . Nos da el valor medio de la atenuación en el espacio libre.

Otra de las posibles salidas del modelo nos da la distribución de la atenuación en dos o tres dimensiones en función del tiempo, de la localización y

de la situación. Esto viene dado a partir del cuantil $A(q_T, q_L, q_S)$, que indica la atenuación que no debe ser superada en función del tiempo, localización y situación. Nos dice en qué q_S de las situaciones habrá al menos q_L de las localizaciones donde la atenuación no excederá $A(q_T, q_L, q_S)$ para al menos el q_T del tiempo.

Cuando se usa el modo punto a punto, se definen trayectos con terminales fijos. Entonces, la localización no varía y se usa la distribución de la atenuación en dos dimensiones. En este caso, se calculan las q_S situaciones en las que la atenuación no excederá $A(q_T, q_S)$ para al menos el q_T del tiempo.

3.3.3 CÁLCULOS

En este apartado se indican algunos cálculos preliminares de naturaleza geométrica necesarios para la resolución del algoritmo ITM.

3.3.3.1 Cálculos preliminares para el modo de predicción de área

Los parámetros d_{L_j} y θ_{e_j} con $j = 1, 2$, que son algunas de las variables de entrada del modo punto a punto, en el modo de predicción de área, se estiman usando fórmulas empíricas.

Primero se consideran las alturas efectivas. Tenemos que:

$$h_{e_j} = h_{g_j} \text{ si el terminal } j \text{ está situado aleatoriamente (modo } random)$$

Ecuación 3. 6 Altura efectiva para el modo *random*

Por otro lado, para calcular la expresión de la altura efectiva para los modos *careful* y *very careful*, se define un nuevo parámetro,

$$B'_j = (B_j - H_1) \sin\left(\frac{\pi}{2} \min(h_{g_1}/H_2, 1)\right) + H_1$$

Ecuación 3. 7 Parámetro B'_j para el cálculo de h_{e_j}

donde $H_1 = 1$ m, $H_2 = 5$ m y

$$B_j = \begin{cases} 5 \text{ m} & \text{si el terminal } j \text{ está ubicado con cuidado (careful)} \\ 10 \text{ m} & \text{si el terminal } j \text{ está situado con sumo cuidado (very careful)} \end{cases}$$

Así que la expresión que nos queda para la altura efectiva de las antenas es,

$$h_{e_j} = h_{g_j} + B'_j e^{-2h_{g_j}/\Delta h}$$

Ecuación 3. 8 Altura efectiva para los modos *careful* y *very careful*

Las distancias de cada terminal a su horizonte radio d_{L_j} y los ángulos de elevación θ_{e_j} se determina de la siguiente manera.

$$d_{Lsj} = \sqrt{2h_{ej}/\gamma_e}$$

$$d_{Lj} = d_{Lsj} \exp \left[-0.07 \sqrt{\Delta h / \max(h_{ej}, H_3)} \right] \text{ con } H_3 = 5 \text{ m,}$$

$$\theta_{ej} = [0.65 \Delta h (d_{Lsj}/d_{Lj} - 1) - 2h_{ej}] / d_{Lsj}$$

Ecuación 3. 9 Distancias de cada terminal a su horizonte radio y ángulos de elevación

3.3.3.2 Cálculos preliminares para ambos modos

Para los modos de predicción de área y punto a punto, se calculan previamente los parámetros auxiliares d_{Ls} , d_L y θ_e .

$$d_{Lsj} = \sqrt{2h_{ej}/\gamma_e} \quad j = 1, 2$$

$$d_{Ls} = d_{Ls1} + d_{Ls2}$$

$$d_L = d_{L1} + d_{L2}$$

$$\theta_e = \max(\theta_{e1} + \theta_{e2}, -d_L \gamma_e)$$

Ecuación 3. 10 Cálculos preliminares para ambos modos

Se definen también dos expresiones dependientes de la distancia s ,

$$\Delta h(s) = (1 - 0.8e^{-s/D}) \Delta h \text{ con } D = 50 \text{ Km}$$

y,

$$\sigma_h(s) = 0.78 \Delta h(s) \exp[(\Delta h(s)/H)^{1/4}] \text{ con } H = 16 \text{ m}$$

Ecuación 3. 11 Definición de $\Delta h(s)$ y $\sigma_h(s)$

3.3.4 LA ATENUACIÓN DE REFERENCIA

La atenuación de referencia es tratada por el modelo como una función continua de la distancia d (ver figura 3.1) y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$A_{ref} = \begin{cases} \max(0, A_{el} + K_1 d + K_2 \ln(d/d_{Ls})) & d \leq d_{Ls} \\ A_{ed} + m_d d & d_{Ls} \leq d \leq d_x \\ A_{es} + m_s d & d_x \leq d \end{cases}$$

Ecuación 3. 12 Expresión de la atenuación de referencia A_{ref}

Donde los coeficientes A_{el} , K_1 , K_2 , A_{ed} , m_d , A_{es} , m_s y la distancia d_x se calculan usando expresiones que más adelante se indicarán. Al ser la ecuación continua, en vez de tener siete coeficientes independientes, tendremos sólo cinco.

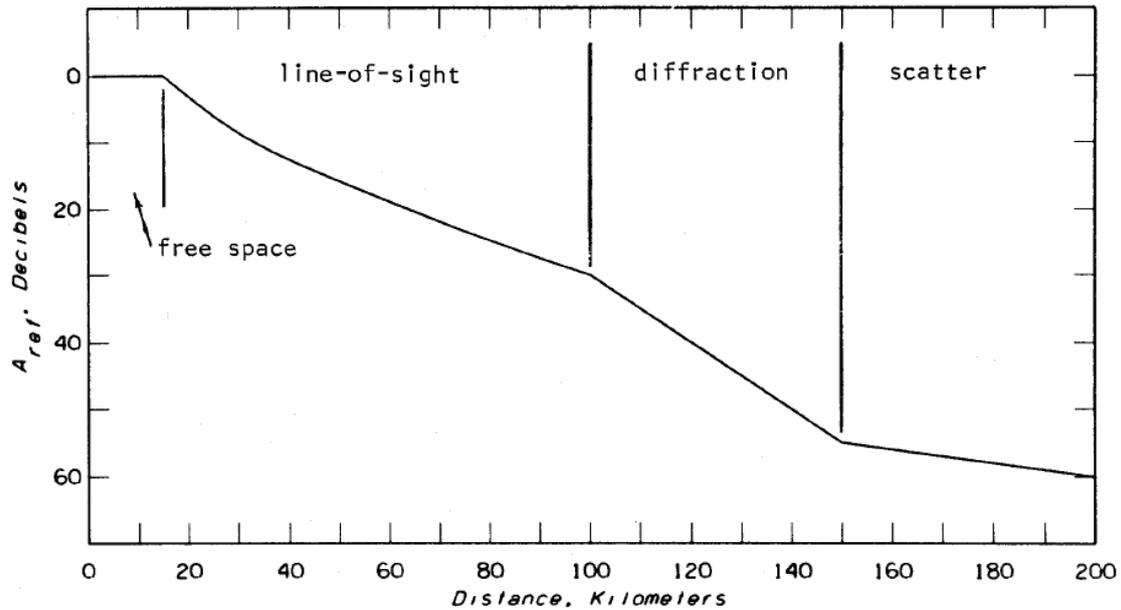


Figura 3. 1 Gráfica típica de la atenuación de referencia en función de la distancia

Los tres intervalos definidos en la ecuación de arriba se denominan línea de vista, difracción y región de dispersión, respectivamente. La región de línea de vista es aquella en donde la curvatura de la Tierra no interrumpe la línea directa de propagación de ondas pero si pueden existir obstrucciones tales como colinas, bosques, etc. La atenuación de referencia se determina como una función logarítmica lineal de la distancia.

3.3.4.1 Coeficientes para el rango de difracción

Se definen las siguientes variables,

$$\begin{aligned} X_{ae} &= (k\gamma_e^2)^{-1/3} \\ d_3 &= \max(d_{LS}, d_L + 1.3787X_{ae}) \\ d_4 &= d_3 + 2.7574X_{ae} \\ A_3 &= A_{diff}(d_3) \\ A_4 &= A_{diff}(d_4) \end{aligned}$$

Ecuación 3. 13 Variables para el cálculo de la atenuación en el rango de difracción

donde A_3 y A_4 serán los valores de la atenuación de referencia en los puntos d_3 y d_4 respectivamente. Como se ha dicho anteriormente, la atenuación de referencia es una función continua así que, para calcular su expresión, basta con conocer los valores en sus extremos. Por tanto, la pendiente y la ordenada en el origen de la expresión son, respectivamente:

$$\begin{aligned} m_d &= (A_4 - A_3)/(d_4 - d_3) \\ A_{ed} &= A_3 - m_d d_3 \end{aligned}$$

Ecuación 3. 14 Expresiones de m_d y A_{ed}

▪ La función $A_{diff}(s)$

En primer lugar, para calcular la función A_{diff} , definimos el factor de ponderación,

$$w = \frac{1}{1 + 0.1\sqrt{Q}}$$

Ecuación 3. 15 Factor de ponderación

con

$$Q = \min\left(\frac{k}{2\pi} \Delta h(s), 1000\right) \left(\frac{h_{e1}h_{e2}+C}{h_{g1}h_{g2}+C}\right)^{1/2} + \frac{d_L + \theta_e/\gamma_e}{s}$$

$$y C = \begin{cases} 0 & \text{en el modo de predicción de área} \\ 10 \text{ m}^2 & \text{en el modo punto a punto} \end{cases}$$

$\Delta h(s)$ es la función definida en la ecuación 3.11. Definimos ahora el factor *clutter* como,

$$A_{fo} = \min [15.5 \log(1 + \alpha k h_{g1} h_{g2} \sigma_h(d_{Ls}))]$$

Ecuación 3. 16 Factor de clutter

con $\alpha = 4.77 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-2}$. $\sigma_h(s)$ está definida en la ecuación 3.11.

En función de estas variables, se define la atenuación de referencia en la región de difracción como,

$$A_{diff}(s) = (1 - w)A_k + wA_r + A_{fo}$$

Ecuación 3. 17 Atenuación de referencia en la región de difracción

donde la “atenuación por doble filo de cuchillo” A_k y la “atenuación debida a la redondez de la tierra” A_r se van a definir a continuación.

La “atenuación por doble filo de cuchillo” se define como,

$$A_k = Fn(v_1) + Fn(v_2)$$

Ecuación 3. 18 Atenuación por doble filo de cuchillo

donde $Fn(v)$ es la integral de Fresnel⁵ y v_j viene dada a partir de la expresión $v_j = \frac{\theta}{2} \left(\frac{k}{\pi} \cdot \frac{d_{Lj}(s-d_L)}{s-d_L+d_{Lj}} \right)^{1/2}$ con $j = 1,2$ y donde $\theta = \theta_e + s\gamma_e$.

Para la atenuación debida a la redondez de la Tierra usamos el modelo de difracción de Vogler⁶ de tres radios. Entonces, se define la “atenuación debida a la redondez de la Tierra” como,

⁵ Se define como $F_n(v) = 20 \log \left| \frac{1}{\sqrt{2i}} \int_v^\infty e^{i\pi u^2/2} du \right|$

$$A_r = G(x_0) - F(x_1, K_1) - F(x_2, K_2) - C_1(K_0)$$

Ecuación 3. 19 Atenuación debida a la redondez de la Tierra

con,

$$\begin{aligned} x_0 &= AB(K_0)\alpha_0\theta + x_1 + x_2 \\ x_j &= AB(K_j)\alpha_j\gamma_j d_{Lj}, \quad j = 1, 2 \\ K_j &= \frac{1}{i\alpha_j Z_g}, \quad j = 0, 1, 2 \end{aligned}$$

Ecuación 3. 20 Variables para el cálculo de las funciones de Vogler

y donde $A = 151.03$ es una constante adimensional. Nótese que K_j son números complejos. El resto de variables que aparecen en las ecuaciones anteriores se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \theta / (s - d_L) \\ \gamma_j &= 2h_{ej} / d_{Lj}^2 \quad j = 1, 2 \\ \alpha_j &= (k / \gamma_j)^{1/3} \quad j = 0, 1, 2 \end{aligned}$$

Ecuación 3. 21 Expresiones auxiliares para el cálculo de A_r

Las funciones $B(K)$, $G(x)$, $F(x, K)$ y $C_1(K)$ que aparecen en las ecuaciones 3.19 y en la 3.20, están definidas por Vogler. Para deducirlas, se parte de la función especial Airy que se define como,

$$W_i = Ai(z) + iBi(z) = 2Ai(e^{2\pi i/3} z)$$

Ecuación 3. 22 Función especial Airy

donde $Ai(z)$ y $Bi(z)$ son dos funciones Airy estándar. Se analizan en el plano complejo y son soluciones particulares de la ecuación diferencial $w''(z) - zw(z) = 0$.

Primero, para definir la función $B(K)$, se busca la solución más pequeña de la ecuación modal $Wi(t_0) = 2^{1/3} K Wi'(t_0)$.

Tomando el valor resultante de t_0 obtenemos una de las funciones de Vogler,

$$B = 2^{-1/3} Im\{t_0\}$$

Ecuación 3. 23 Función B de Vogler

⁶ En este modelo de radiopropagación, los obstáculos se aproximan por medio de bordes de cuchillo con radio cero. La principal restricción es que la fuente, el receptor y los diversos bordes de cuchillo deben estar lo suficientemente espaciados para garantizar la convergencia del algoritmo.

El resto de las funciones necesarias para definir la “atenuación debida a la redondez de la Tierra” A_r tienen las expresiones que se indican a continuación.

$$\begin{aligned} G(x) &= 20 \log(x^{-1/2} e^{x/A}) \\ F(x, K) &= 20 \log \left| (\pi / (2^{1/3} AB))^{1/2} Wi(t_0 - (x / (x / 2^{1/3} AB))^2) \right| \\ C_1(K) &= 20 \log \left| \frac{1}{2} (\pi / (2^{1/3} AB))^{1/2} (2^{2/3} K^2 t_0 - 1) Wi'(t_0)^2 \right| \end{aligned}$$

Ecuación 3. 24 Resto de funciones de Vogler

donde A es de nuevo la constante definida anteriormente.

Nótese que para valores grandes de x tenemos que $F(x, K) \sim G(x)$, y para los valores de K que nos interesan es una buena aproximación tomar $C_1(K) = 20$ dB.

3.3.4.2 Coeficientes para el rango de línea de vista

Comenzamos definiendo un punto d_2 que coincida con la distancia hasta la que se considera que hay línea de vista. El valor de la atenuación de referencia en este punto, según la ecuación 3.12, es A_2 .

$$\begin{aligned} d_2 &= d_{Ls} \\ A_2 &= A_{ed} + m_d d_2 \end{aligned}$$

Ecuación 3. 25 Valor de la atenuación en d_{Ls}

Se han de tener en cuenta dos casos generales. Primero, si $A_{ed} \geq 0$, tomamos,

$$\begin{aligned} d_0 &= \min \left(\frac{1}{2} d_L, 1.908 k h_{e1} h_{e2} \right) \\ d_1 &= \frac{3}{4} d_0 + \frac{1}{4} d_L \\ A_0 &= A_{los}(d_0) \\ A_1 &= A_{los}(d_1) \end{aligned}$$

Ecuación 3. 26 Caso en el que $A_{ed} \geq 0$

Donde la función $A_{los}(s)$ se definirá más adelante. La idea ahora es obtener una curva de la forma $A_{e1} + K_1 d + K_2 \ln(d/d_{Ls})$ que tome los valores A_0 , A_1 y A_2 en los puntos d_0 , d_1 y d_2 respectivamente.

Sin embargo, se debe cumplir la restricción $K_1, K_2 \geq 0$ y ello nos obliga a renunciar a que la función tome los valores A_0 y/o A_1 .

Definimos las derivadas de K_1 y K_2 como,

$$K_2' = \max \left[0, \frac{(d_2 - d_0)(A_1 - A_0) - (d_1 - d_0)(A_2 - A_0)}{(d_2 - d_0)\ln(d_1/d_0) - (d_1 - d_0)\ln(d_2/d_0)} \right]$$

$$K_1' = (A_2 - A_0 - K_2'\ln(d_2/d_0))/(d_2 - d_0)$$

Ecuación 3. 27 Derivadas de K_1 y K_2

Las cuáles, excepto para el caso de que el primer cálculo de K_2' resultase negativo, la solución más simple que podrían tomar los dos coeficientes, siempre que $K_1' \geq 0$, es $K_1 = K_1'$ y $K_2 = K_2'$.

En cambio, si $K_1' < 0$, definimos la derivada segunda de K_2 como,

$$K_2'' = (A_2 - A_0)/\ln(d_2/d_0)$$

Ecuación 3. 28 Derivada segunda de K_2

y si $K_2'' \geq 0$ entonces, $K_1 = 0$ y $K_2 = K_2''$. Si renunciamos a que la función tome los valores A_0 y A_1 , nos queda que $K_1 = m_d$ y $K_2 = 0$.

En el segundo caso tenemos que $A_{ed} < 0$. Definimos,

$$d_0 = 1.908kh_{e1}h_{e2}$$

$$d_1 = \max(-A_{ed}/m_d, d_L/4)$$

Ecuación 3. 29 Caso en el que $A_{ed} < 0$

Si $d_0 < d_1$ evaluamos de nuevo A_0 , A_1 y K_2' como antes. Pero si además $K_2' > 0$, evaluamos K_1' y procedemos de la misma manera que en el caso anterior.

Por otro lado, si tenemos que $d_0 \geq d_1$ o $K_2' = 0$, evaluamos A_1 y definimos la derivada segunda de K_1' como,

$$K_1'' = (A_2 - A_1)/(d_2 - d_1)$$

Ecuación 3. 30 Derivada segunda de K_1

Si tenemos que $K_1'' > 0$, establecemos que $K_1 = K_1''$ y $K_2 = 0$ y si tenemos el caso contrario, tomamos $K_1 = m_d$ y $K_2 = 0$.

Una vez llegados a este punto en el que tenemos definidos los valores de K_1 y K_2 , falta por definir la expresión de la primera variable de la curva $A_{el} + K_1d + K_2\ln(d/d_{LS})$. El valor del coeficiente A_{el} se indica en la ecuación siguiente.

$$A_{el} = A_2 - K_1d_2$$

Ecuación 3. 31 Expresión de A_{el}

▪ La función $A_{los}(s)$

Para calcular la expresión de la atenuación en el rango de línea de vista, se define el factor de ponderación como,

$$w = 1/(1 + D_1 k \Delta h / \max(D_2, d_{LS}))$$

Ecuación 3. 32 Expresión de \mathbf{A}_e

donde $D_1 = 7$ m y $D_2 = 10$ Km.

A continuación se expresa la atenuación en el rango de línea de vista como,

$$A_{los} = (1 - w)A_d + wA_t$$

Ecuación 3. 33 Expresión de \mathbf{A}_{los}

Donde la atenuación debida a la “difracción extendida” A_d y la atenuación debida a los dos rayos, A_t se van a definir a continuación.

Una expresión simplificada de A_d viene dada por la siguiente expresión.

$$A_d = A_{ed} + m_d s$$

Ecuación 3. 34 Expresión simplificada de \mathbf{A}_d

Para la atenuación debida a los dos rayos, definimos,

$$\sin \psi = \frac{h_{e1} + h_{e2}}{\sqrt{s^2 + (h_{e1} + h_{e2})^2}}$$

Ecuación 3. 35 Expresión del $\sin \psi$ para el cálculo de \mathbf{A}_t

y

$$R'_e = \frac{\sin \psi - Z_g}{\sin \psi + Z_g} \exp[-k\sigma_h(s) \sin \psi]$$

Ecuación 3. 36 Expresión de \mathbf{R}'_e para el cálculo de \mathbf{A}_t

donde $\sigma_h(s)$ es la función definida en la ecuación 3.11. Nótese que R'_e es un número complejo ya que está definida a partir de la impedancia característica del medio Z_g . Luego,

$$R_e = \begin{cases} R'_e & \text{si } |R'_e| \geq \max(1/2, \sqrt{\sin \psi}) \\ (R'_e/|R'_e|)\sqrt{\sin \psi} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Ecuación 3. 37 Expresión de \mathbf{R}_e para el cálculo de \mathbf{A}_t

Definimos también,

$$\delta' = 2kh_{e1}h_{e2}/s$$

y

$$\delta = \begin{cases} \delta' & \text{si } \delta' \leq \pi/2 \\ \pi - (\pi/2)^2/\delta' & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Ecuación 3. 38 Expresiones de δ' y δ para el cálculo de \mathbf{A}_t

La expresión de A_t se define a partir de las variables anteriores quedando,

$$A_t = -20 \log |1 + R_e e^{i\delta}|$$

Ecuación 3. 39 Expresión de A_t

3.3.4.3 Coeficientes para el rango de dispersión

Para el cálculo de la atenuación en el rango de dispersión, A_{scat} , se toman dos puntos que se encuentren en dicho intervalo, $d_5 = d_L + D_s$ y $d_6 = d_5 + D_s$ donde $D_s = 200$ Km. Los valores de atenuación en dichos puntos se indican a continuación.

$$\begin{aligned} A_5 &= A_{scat}(d_5) \\ A_6 &= A_{scat}(d_6) \end{aligned}$$

Ecuación 3. 40 Expresión de la atenuación de referencia en d_5 y d_6

Hay que tener en cuenta que hay algunos valores para los cuales la función A_{scat} no está definida así que puede ocurrir que A_5 y/o A_6 no estén definidos. Si esto fuera así, tomamos $d_x = +\infty$ y así conseguimos que A_{es} y m_s queden definidos. En situaciones normales tenemos,

$$\begin{aligned} m_s &= (A_6 - A_5)/D_s \\ d_x &= \max [d_{Ls}, d_L + X_{ae} \log(kH_s), (A_5 - A_{ed} - m_s d_5)/(m_d - m_s)] \\ A_{es} &= A_{ed} + (m_d - m_s)d_x \end{aligned}$$

Ecuación 3. 41 Expresiones de m_s , d_x y A_{es}

donde X_{ae} se ha definido en la ecuación 3.13 y $H_s = 47.7$ m.

▪ La función $A_{scat}(s)$

Para calcular la función de atenuación $A_{scat}(s)$ partimos de las siguientes ecuaciones,

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_e + \gamma_e s \\ \theta' &= \theta_{e1} + \theta_{e2} + \gamma_e s \\ r_j &= 2k\theta' h_{ej}, \quad j = 1, 2 \end{aligned}$$

Ecuación 3. 42 Expresiones para el cálculo de A_{scat}

Si tanto r_1 como r_2 toman valores por debajo de 0.2, la función A_{scat} no está definida (o es infinita). Si esto no ocurre, podemos expresar A_{scat} como,

$$A_{scat}(s) = 10 \log(kH\theta^4) + F(\theta_s, N_s) + H_0$$

Ecuación 3. 43 Expresiones para el cálculo de A_{scat}

donde $F(\theta_s, N_s)$ es la función mostrada en la figura 3.2, H_0 es la función de ganancia en frecuencia y $H = 47.7$ m.

La función de ganancia en frecuencia es función de r_1 y r_2 , del factor de eficiencia en dispersión η_s y del factor de asimetría s_s . Una dificultad que tiene este modelo es que no hay datos geométricos suficientes en las variables de entrada para determinar el punto de corte. Esto se resuelve tomándolo a mitad de camino de los dos horizontes. El factor de asimetría, por ejemplo, se determina definiendo primero la distancia entre dos horizontes,

$$d_s = s - d_{L1} - d_{L2}$$

Ecuación 3. 44 Distancia entre dos horizontes

Con lo que el factor de asimetría queda,

$$s_s = \frac{d_{L2} + d_s/2}{d_{L1} + d_s/2}$$

Ecuación 3. 45 Factor de asimetría

A partir del factor de simetría, se puede calcular el punto de corte que se encuentra en,

$$z_0 = \frac{s_s d \theta'}{(1 + s_s)^2}$$

Ecuación 3. 46 Punto de corte

Finalmente, el factor de eficiencia en dispersión queda,

$$\eta_s = \frac{Z_0}{Z_0} \left[1 + (0.031 - N_s 2.32 \cdot 10^{-3} + N_s^2 5.67 \cdot 10^{-6}) e^{-(z_0/Z_1)^6} \right]$$

Ecuación 3. 47 Factor de eficiencia en dispersión

donde $Z_0 = 1.756$ Km y $Z_1 = 8.0$ Km.

El modelo requiere que estos resultados se den para las dos distancias definidas anteriormente, d_5 y d_6 . Hay ciertas precauciones que se deben llevar a cabo para evitar anomalías en el modelo. Si en d_5 los resultados indican que H_0 supera los 15 dB, ese valor se reemplaza por el que tome la función en d_6 . Esto ayuda a mantener la pendiente del modo dispersión dentro de límites razonables.

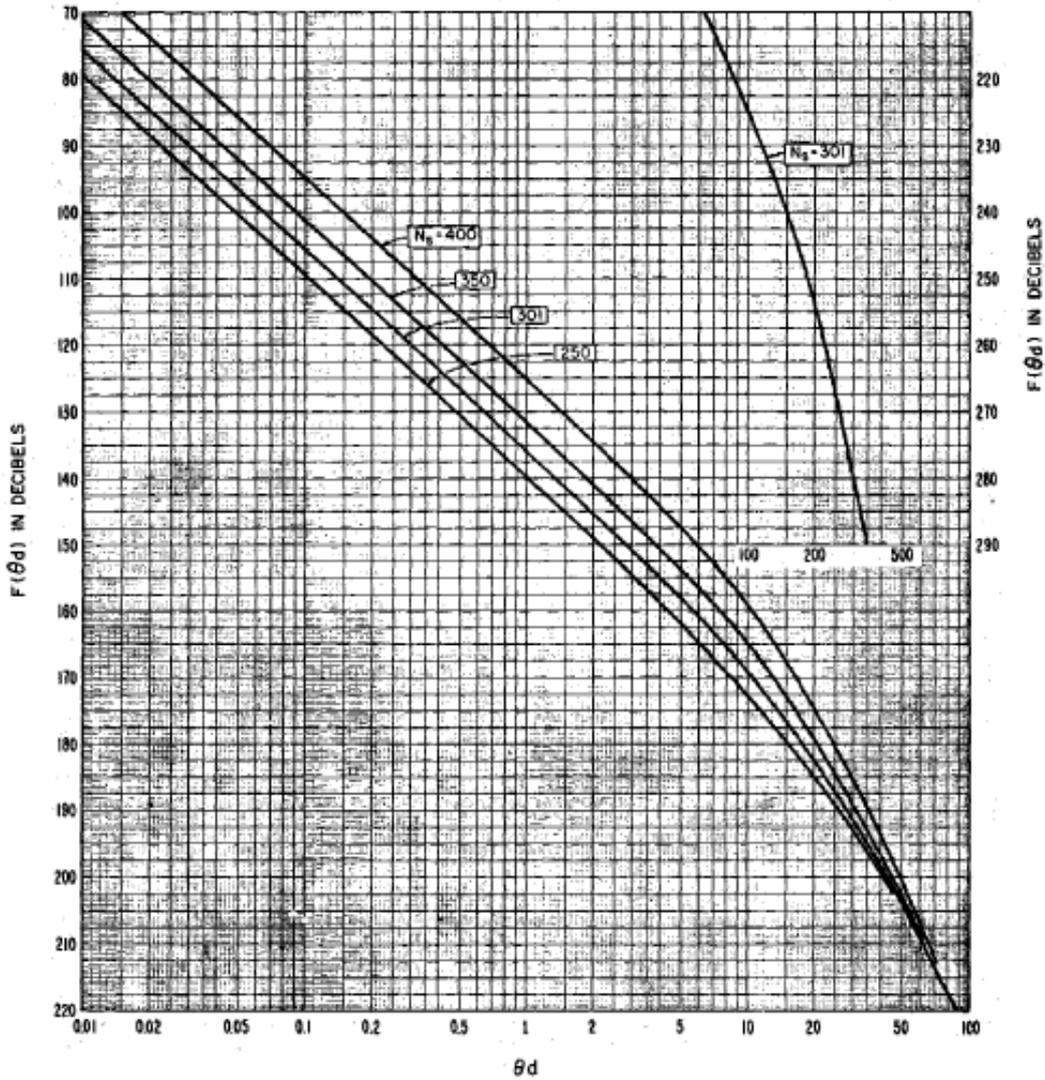


Figura 3. 2 Función de atenuación $F(\theta_s, N_s)$. La distancia d viene dada en Km y θ en radianes

3.3.5 LOS CUANTILES DE ATENUACIÓN

Buscamos calcular los cuantiles $A(q_T, q_L, q_S)$ donde q_T , q_L y q_S designan fracciones de tiempo, localización y situación respectivamente. Para el modo punto a punto se necesita conocer sólo dos cuantiles $A(q_T, q_S)$ pero esto es equivalente a tomar $A(q_T, 0.5, q_S)$.

Como todas las funciones de distribución involucradas en el cálculo son normales, o próximas a la normal, para simplificar las ecuaciones, basta con expresarlas en términos de la desviación típica normal. Para ello, usamos la función de distribución normal complementaria que se define como,

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$

Ecuación 3. 48 Función de distribución normal complementaria

La desviación es simplemente la inversa de dicha función,

$$z(q) = Q^{-1}(q)$$

Ecuación 3. 49 Desviación típica

Por tanto, si la variable aleatoria x sigue una distribución normal de media X_0 y desviación típica σ , sus cuantiles vienen dados por la expresión,

$$X(q) = X_0 + \sigma z(q)$$

Ecuación 3. 50 Cuantiles

Tomando $z_T = z(q_T)$, $z_L = z(q_L)$ y $z_S = z(q_S)$, podemos calcular los cuantiles $A(q_T, q_L, q_S)$. Para el caso particular del modo punto a punto bastaría con tomar $z_L = 0$.

Previamente se define,

$$A' = A_{ref} - V_{med} - Y_T - Y_L - Y_S$$

Ecuación 3. 51 Expresión de A'

donde A_{ref} es la atenuación de referencia descrita en el apartado 3.3.4 y la corrección V_{med} y las desviaciones Y_T , Y_L , Y_S están definidas más abajo en las ecuaciones 3.55, 3.56 y 3.57, respectivamente. Los valores de Y_T y Y_L dependen de las variables z_T y z_L , respectivamente. Por otro lado, el valor de Y_S depende de las tres desviaciones típicas normales.

La expresión final del cuantil viene dada a partir de la modificación de A' ,

$$A(z_T, z_L, z_S) = \begin{cases} A' & \text{si } A' \geq 0 \\ A' \frac{29 - A'}{29 - 10A'} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Ecuación 3. 52 Expresión final del cuantil $A(z_T, z_L, z_S)$

Una expresión muy usada es la distancia efectiva. Se define como,

$$d_e = \begin{cases} D_0 d/d_{ex} & \text{para } d \leq d_{ex} \\ D_0 + d - d_{ex} & \text{para } d \geq d_{ex} \end{cases}$$

Ecuación 3. 53 Expresión final del cuantil $A(z_T, z_L, z_S)$

donde, $d_{ex} = \sqrt{2a_1 h_{e1}} + \sqrt{2a_1 h_{e2}} + a_1 (kD_1)^{-1/3}$, $a_1 = 9000$ Km, $D_1 = 1266$ Km y $D_0 = 130$ Km.

3.3.5.1 Variabilidad del tiempo

Los cuantiles de tiempo variable se calculan usando una variación de los métodos descritos en la Sección 10 y Anexo III de NBS TN101, y también de

CCIR Report 238-3. Estos métodos hablan de ocho o nueve radio climas, de los cuales siete han sido documentados con sus correspondientes curvas empíricas. Estas curvas empíricas son las que referenciamos más abajo. Todas representan las desviaciones de los cuantiles en función de la distancia efectiva d_e [5].

El ajuste de la atenuación de referencia a la media anual es,

$$V_{med} = V_{med}(d_e, clim)$$

Ecuación 3. 54 Ajuste de la atenuación de referencia a la media anual

donde la función se describe en la figura 3.3.

La desviación Y_T es una función dependiente de z_T y se define de la forma,

$$Y_T = \begin{cases} \sigma_T - z_T & z_T \leq 0 \\ \sigma_T + z_T & 0 \leq z_T \leq z_D \\ \sigma_T + z_D + \sigma_{TD}(z_T - z_D) & z_D \leq z_T \end{cases}$$

Ecuación 3. 55 Desviación Y_T

Las pendientes (o “desviaciones pseudo-estándar”), $\sigma_{T-} = \sigma_{T-}(d_e, clim)$ y $\sigma_{T+} = \sigma_{T+}(d_e, clim)$ se obtienen de la siguiente manera. Para calcular σ_{T-} usamos el cuantil ,90 y dividimos las correspondientes ordenadas por $z(.90) = -1.282$. Para σ_{T+} usamos el cuantil ,10 y dividimos por $z(.10) = 1.282$.

El resto de las constantes de la ecuación 3.55 se refieren a los “ducting” o a casos menos probables. Escribimos, $z_D = z_D(clim)$ y $\sigma_{TD} = C_D(clim)\sigma_{T+}$, donde los valores de z_D y C_D vienen dados en la tabla 3.5. En esa misma tabla se indica un listado de valores de $q_D = Q(z_D)$.

Clima	q_D	z_D	C_D
Ecuatorial	0,10	1,282	1,224
Continente subtropical	0,015	2,161	0,801
Marítimo subtropical	0,10	1,282	1,380
Desierto	0,00	∞	-
Continental templado	0,10	1,282	1,224
Marítimo templado, sobre la tierra	0,10	1,282	1,518
Marítimo templado, sobre el mar	0,10	1,282	1,518

Tabla 3. 5 Constantes ducting (probabilidad baja)

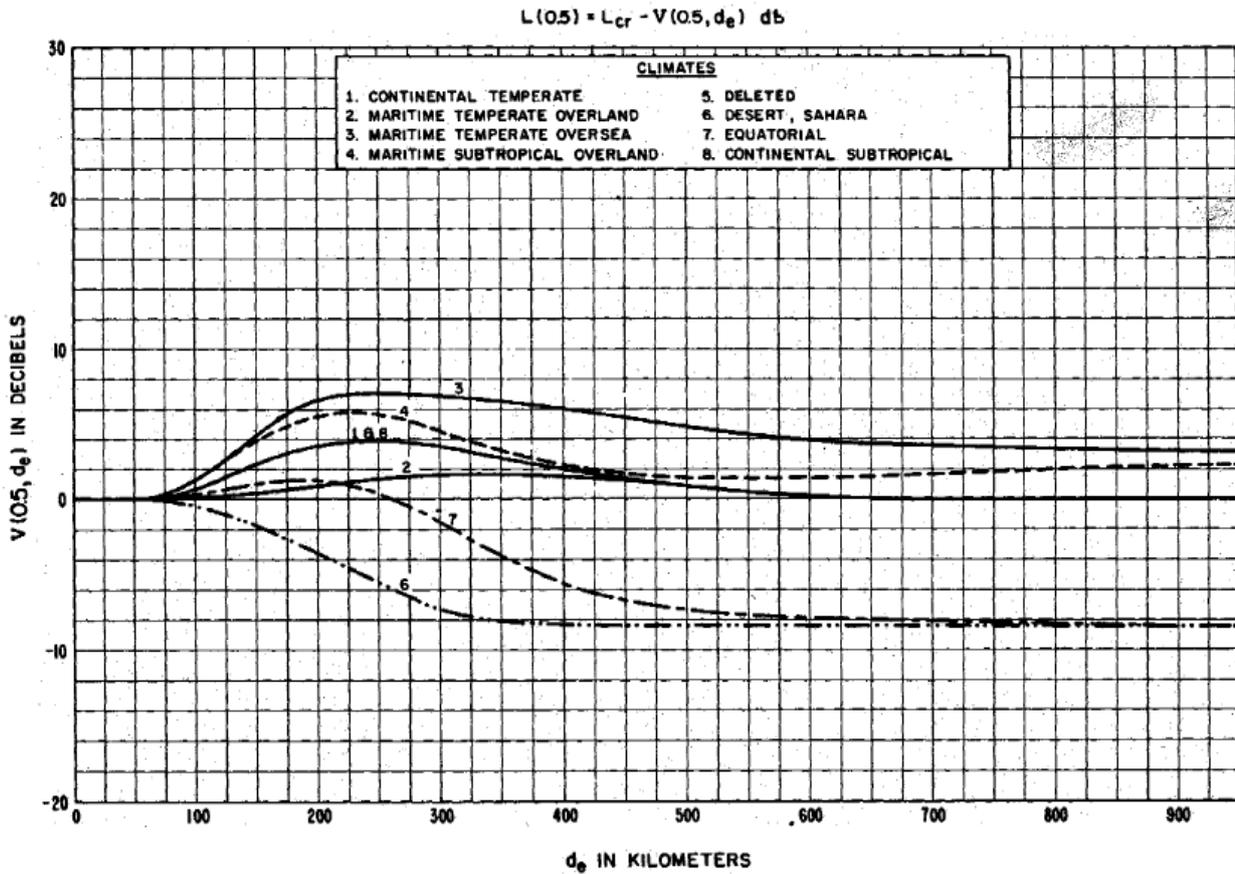


Figura 3. 3 La función $V(0.5, d_e)$ para cada uno de las ocho regiones climáticas

3.3.5.2 Variabilidad de la localización

Establecemos,

$$Y_L = \sigma_L z_L$$

Ecuación 3. 56 Variabilidad de la localización

donde $\sigma_L = 10k\Delta h(d)/(k\Delta h(d) + 13)$ y $\Delta h(s)$ está definida en la ecuación 3.11.

3.3.5.3 Variabilidad de la situación

Establecemos $\sigma_S = 5 + 3e^{-d_e/D}$ donde $D = 100 \text{ Km}$. Luego,

$$Y_S = \left(\sigma_S^2 + \frac{Y_T^2}{7,8 + z_S^2} + \frac{Y_L^2}{24 + z_S^2} \right)^{1/2} z_S$$

Ecuación 3. 57 Variabilidad de la situación

Esto último intenta demostrar cómo las incertidumbres son más grandes en los extremos de las distribuciones.

3.3.5.4 Aproximaciones numéricas

En parte del algoritmo ITM se usan aproximaciones de las funciones estándar que se han definido en este capítulo. En estas aproximaciones, la simplicidad en el cálculo ha tenido prioridad sobre la precisión.

La integral de Fresnel usada en el cálculo de la función A_{diff} en el apartado 3.3.4.1 se aproxima para $v > 0$ como,

$$Fn(v) \approx \begin{cases} 6,02 + 9,11v - 1,27v^2 & \text{si } v \leq 2,40 \\ 12,953 + 20 \log v & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Ecuación 3. 58 Ecuación de Fresnel

Las funciones $B(K)$, $F(x, K)$, $C_1(K)$, que se han usado en el cálculo de la difracción debido a la redondez de la Tierra se pueden aproximar como,

$$\begin{aligned} B(K) &\approx 1,607 - |K| \\ G(x) &= 0,5751x - 10 \log x \\ F(x, K) &\approx \begin{cases} F_2(x, K) & \text{si } 0 < x < 200 \\ G(x) + 0,0134xe^{-x/200} & \text{si } 200 < x < 2000 \\ G(x) & \text{si } 2000 \leq x \end{cases} \end{aligned}$$

Ecuación 3. 59 Funciones $B(K)$, $G(X)$ y $F(x, K)$

donde,

$$\begin{aligned} F_2(x, K) &= \begin{cases} F_1(x) & \text{si } |K| < 10^{-5} \text{ o } x(-\log|K|)^3 > 450 \\ 2,5 \cdot 10^{-5}x^2/|K| + 20 \log|K| - 15 & \text{e. o. c} \end{cases} \\ F_1(x, K) &= 40 \log(\max(x, 1)) - 117 \end{aligned}$$

Ecuación 3. 60 Funciones $F_1(x, K)$ y $F_2(x, K)$

Finalmente definimos $C_1(K)$ como,

$$C_1(K) \approx 20$$

Ecuación 3. 61 Funciones $C_1(K)$

Para completar este apartado tenemos las funciones $F(\theta d)$ y H_0 usadas para el cálculo de la dispersión troposférica,

$$F(D, N_s) = F_0(D) - 0,1(N_s - 301)e^{-D/D_0}$$

Ecuación 3. 62 Función $F(D, N_s)$

donde $D_0 = 40$ km y,

$$F_0(D) = \begin{cases} 133,4 - 0,332 \cdot 10^{-3}D - 10 \log D & \text{para } 0 < D \leq 10 \text{ km} \\ 104,6 + 0,212 \cdot 10^{-3}D - 2,5 \log D & \text{para } 10 < D \leq 70 \text{ km} \\ 71,8 + 0,157 \cdot 10^{-3}D + 5 \log D & \text{e. o. c} \end{cases}$$

Ecuación 3. 63 Función $F_0(D)$

La variable D viene dada en metros.

La función de la ganancia en frecuencia se puede escribir como,

$$H_0 = H_{00}(r_1, r_2, \eta_s) + \Delta H_0$$

Ecuación 3. 64 Función H_0

donde $\Delta H_0 = 6(0,6 - \log \eta_s) \log s_s \log r_2 / s_s r_1$ y donde H_{00} se obtiene a partir de una interpolación lineal cuando η_s es entero.

Para $\eta_s = 1, \dots, 5$ establecemos,

$$H_{00}(r_1, r_2, j) = \frac{1}{2} [H_{01}(r_1, j) + H_{01}(r_2, j)]$$

Ecuación 3. 65 Función $H_{00}(r_1, r_2, j)$

con,

$$H_{01}(r, j) = \begin{cases} 10 \log(1 + 24r^{-2} + 25r^{-4}) & j = 1 \\ 10 \log(1 + 45r^{-2} + 80r^{-4}) & j = 2 \\ 10 \log(1 + 68r^{-2} + 177r^{-4}) & j = 3 \\ 10 \log(1 + 80r^{-2} + 395r^{-4}) & j = 4 \\ 10 \log(1 + 105r^{-2} + 705r^{-4}) & j = 5 \end{cases}$$

Ecuación 3. 66 Función $H_{01}(r, j)$

Para $\eta_s > 5$, usamos los valores para $\eta_s = 5$. Para $\eta_s = 0$ tenemos,

$$H_{00}(r_1, r_2, 0) = 10 \log \left[\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{r_1}\right)^2 \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{r_2}\right)^2 \frac{r_1 + r_2}{r_1 + r_2 + 2\sqrt{2}} \right]$$

Ecuación 3. 67 Función H_{00} para $\eta_s = 0$

Después de todo esto, se truncan los valores de s_s y $q = r_2 / s_s r_1$ a 0,1 y 10 respectivamente.

3.4 PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LA RED

3.4.1 SITUACIÓN ACTUAL DE BENAOCÁZ

Benaocaz es un término municipal de la provincia de Cádiz que se encuentra ubicado en el corazón del Parque Nacional Sierra de Grazalema, al noroeste de la provincia, entre la Sierra del Caíllo y la Depresión de Benaocaz. Está situado a una altura de 793 metros sobre el nivel del mar y se encuentra a

120 km de la capital de la provincia, Cádiz. Su extensión superficial es de 69,8 km².

Limita al norte con Grazalema, al sur con Ubrique, al este con Villaluenga del Rosario y al oeste con El Bosque. Forma parte junto con estos municipios de la ruta de los pueblos blancos, nombre que reciben por la costumbre de sus habitantes de encalar frecuentemente las fachadas de sus casas [6].



Figura 3. 4 Situación geográfica de Benaocaz

Según los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), el municipio tiene 745 habitantes de los que 377 son hombres y 368 mujeres. De estos, el 19,46% son menores de 20 años y el 12,89% son mayores de 65 años. El 20% de los establecimientos con actividad comercial se dedican al negocio inmobiliario y de alquiler, aunque se ha de destacar otra de sus fuentes principales de ingreso: la elaboración artesanal de chacinias y embutidos y de quesos de oveja y de cabra [8].

3.4.2 ESQUEMA DE RED

Como se ha dicho anteriormente, el objetivo de este proyecto es ofrecer una conexión inalámbrica óptima a los habitantes de Benaocaz. Para evitar la posible saturación de los enlaces y dispositivos inalámbricos utilizados, la topología elegida es en estrella. Además, para poder proporcionar suficiente ancho de banda a cada habitante, se va a utilizar un nodo central con tecnología Pre-Wimax que se comunicará con los diferentes puntos de acceso repartidos por el pueblo. De esta manera, estos dispositivos serán los que ofrezcan acceso a Internet mediante tecnología Wi-Fi a los habitantes del municipio.

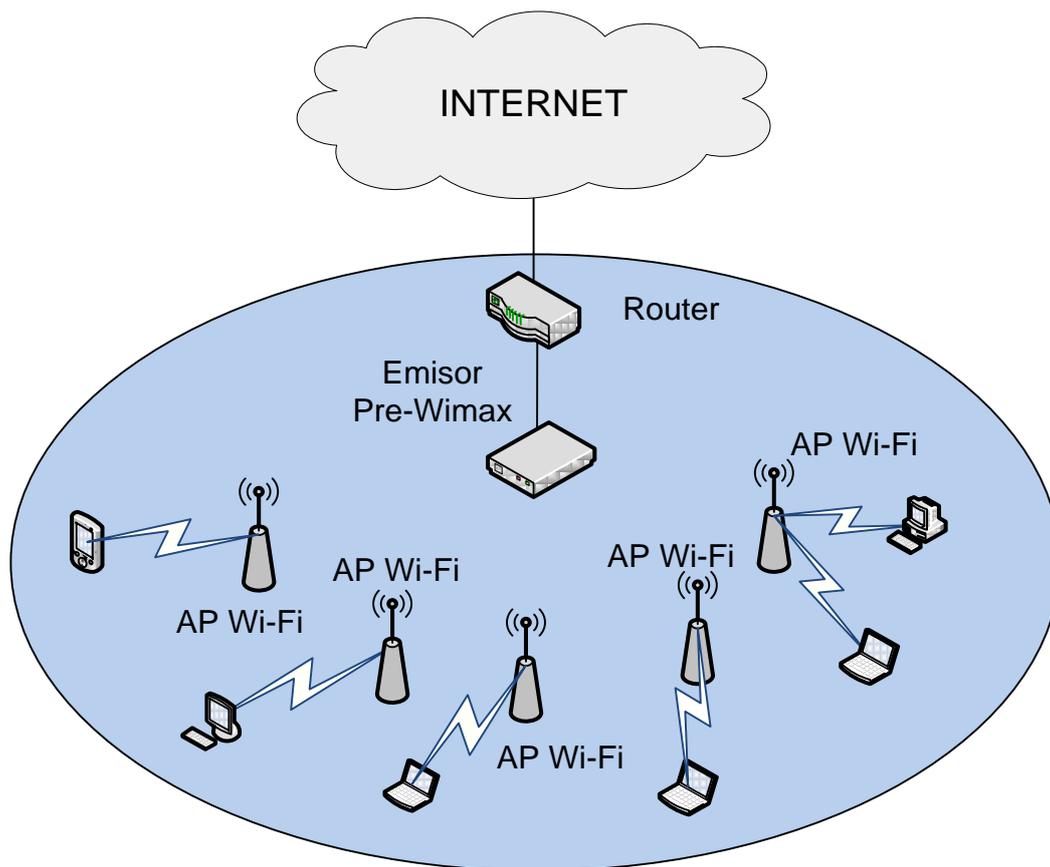


Figura 3. 5 Esquema de la red inalámbrica de Benaocaz

3.4.3 EQUIPOS DE RED

Para poder elegir correctamente los equipos hay que tener en cuenta dos factores importantes: el impacto visual y los costes. Una solución óptima es aquella que reduce al mínimo el impacto visual y a su vez no es excesivamente cara.

En este apartado se van a describir las características más importantes de cada uno de los dispositivos utilizados para la implantación de la red.

3.4.3.1 Emisor Pre-Wimax

El equipo elegido para convertir la conexión que ofrece el proveedor de banda ancha a tecnología Pre-Wimax es el Alvarion BreezeAccess VL.

Éste dispone de dos dispositivos diferentes: la Unidad de Acceso (AU), que se encarga de emitir la tecnología Pre-Wimax y la Unidad del Suscriptor (SU), que actúa como receptor.

Cada Unidad de Acceso incluye una unidad interna y otra externa. La interna se conecta con la red (en nuestro caso con el *router*) mediante una interfaz estándar Ethernet 10/100BaseT (RJ 45), y la unidad externa se conecta con la unidad interna mediante un cable CAT-5. En el mercado se pueden

encontrar dos tipos de BreezeAccess VL-AU: La estación base modular de estante (BS-SH-VL) que permite alojar hasta 6 módulos AU y la micro estación base autónoma (AU-D-SA) que sólo permite una Unidad de Acceso en un chasis. El primer tipo permitiría aumentar la capacidad total de la red. Cabe destacar a su vez que en cualquier tipo de estación base es posible conectar antenas de 360, 120, 60 y 90 grados. Además, un mismo AU puede dar conexión hasta a 50 SUs.

La limitación que se ha de tener en cuenta para elegir el número de AUs necesarias es la capacidad que se quiere ofrecer a los usuarios. Porque cuantos más usuarios se conecten a la unidad, menos velocidad recibirá cada uno de ellos. Teniendo en cuenta esto, harán falta dos unidades de acceso. Así que, el modelo de BreezeAccess VL-AU elegido será la BS-SH-VL.

Por otro lado, la Unidad del Suscriptor (SU) permite al cliente recibir la señal enviada por el AU. Cada SU se conecta con la red mediante una interfaz estándar Ethernet10/100BaseT (RJ-45), y se conecta con la unidad interna mediante un cable CAT-5. Además, no es necesario disponer de una Unidad de Acceso por cada suscriptora. Como se verá más adelante en el estudio por cobertura, se utilizarán 8 APs así que harán falta 8 SUs. [9]



Figura 3. 6 Equipo Alvarion BreezeAccess VL

3.4.3.2 Punto de acceso

El modelo de punto de acceso elegido es Alvarion BreezeAccess Wi². Al instalarlo junto con el emisor Pre-Wimax BreezeAccess VL de Alvarion, el sistema puede ser utilizado para extender las capacidades actuales de WiMax a 2.X, 3.X y 5.X GHz. Presenta gran variedad de características, incluyendo QoS extremo a extremos, punto de acceso virtual, VLAN y mapeo de VLAN, y seguridad 802.11i y 802.1x y sólo necesita una conexión a una fuente CA o CC para su funcionamiento.

Algunas de las características más importantes se recogen en la siguiente tabla. El resto se incluyen en el anexo.

Frecuencia de trabajo	Wi-Fi: 2,4-2,4835 GHz Pre-Wimax: 5,47-5,725 GHz
Potencia transmitida	54 Mbps: 18 dBm
Antenas	2 x 8 dBi omnidireccional (2,4-2,5 GHz)
Dimensiones	32,9 x 27,8 x 21,1 cm
Temperatura	Operación: -40 a 60 C
Peso	7 Kg

Tabla 3. 6 Especificaciones de Alvarion BreezeAccess Wi²

Cabe destacar que para la elección de los equipos se ha tenido en cuenta el rango de temperatura al que pueden operar, ya que en dicho municipio se alcanzan temperaturas muy altas en verano y muy bajas en invierno. Por ejemplo, los puntos de acceso Alvarion BreezeAccess Wi² pueden trabajar en el intervalo de temperatura de -40 a 60°.

3.4.3.3 Antenas

Para la elección de las antenas hay que tener en cuenta que van a hacer falta en tres equipos diferentes: una direccional para que la unidad de acceso correspondiente propague la señal, otra también direccional para que la unidad suscriptora capte la señal y otra de tipo omnidireccional para que los puntos de acceso propaguen la señal a los habitantes del municipio con tecnología Wi-Fi.

La antena que se va a utilizar en las unidades de acceso es direccional de 120° y 15 dBi de ganancia y la de cada unidad suscriptora direccional de 10.5° H/V y 19 dBi de ganancia para que apunte a la unidad de acceso.

Por otro lado, la antena omnidireccional elegida para los puntos de acceso es el modelo Omni-8-2.4-SC Kit de Alvarion. Este modelo trabaja en la banda de frecuencia de 2400-2485 MHz, tiene una ganancia de 8 dBi y tiene polarización vertical. El resto de las especificaciones se recogen en el anexo.



Figura 3. 7 Antena Omni-8-2.4-SC Kit de Alvarion

3.4.3.4 Conmutador

Para concentrar y gestionar el tráfico de cada unidad de acceso hacia el *router* que ofrece la conexión a Internet, es necesario hacer uso de un conmutador. El modelo elegido es el GS605 de NETGEAR. Las principales características de este conmutador se recogen en la siguiente tabla [10].

Número de puertos	5 puertos
Capacidad de los puertos	10Base-T, 100Base-TX, 1000Base-T
Velocidad de transferencia de datos	1 Gbps
Dimensiones	17,7 cm x 11,7 cm x 3,1 cm

Tabla 3. 7 Especificaciones de NETGEAR GS605

3.5 ESTUDIO, RESULTADOS Y SIMULACIONES

En este apartado se recoge el estudio de capacidad realizado, que tiene en cuenta la capacidad que se pretende garantizar a cada usuario, y el estudio de cobertura, que se realiza con el simulador Radio Mobile anteriormente descrito.

Además, se indican los parámetros de la red inalámbrica configurados en Radio Mobile, como la potencia de transmisión, la polarización de las antenas, el modo estadístico utilizado, la topología de la red, etc., así como las capas utilizadas en dicho simulador.

Finalmente se indica la configuración de los canales tanto Wi-Fi como Pre-Wimax.

3.5.1 CAPAS DEL SIMULADOR

3.5.1.1 Mapa de trabajo

El mapa de trabajo se genera a partir de un modelo digital del terreno que cubre la zona a estudiar, en este caso se ha usado el modelo SRTM-DTED (*Shuttle Radar Topography Mission – Digital Terrain Elevation Data*), que ofrece una resolución de hasta 1 segundo de arco para los Estados Unidos y hasta 3 segundos de arco para el resto de regiones comprendidas entre las latitudes 56°S y 60°N.

Es un proyecto desarrollado por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y la NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*) que consistió en un sistema radar que voló en el trasbordador espacial Endeavour durante una misión de 11 días en febrero del año 2000. De este sistema, se obtuvieron los datos de elevación para generar una completa base de datos digital topográfica de la Tierra [3].

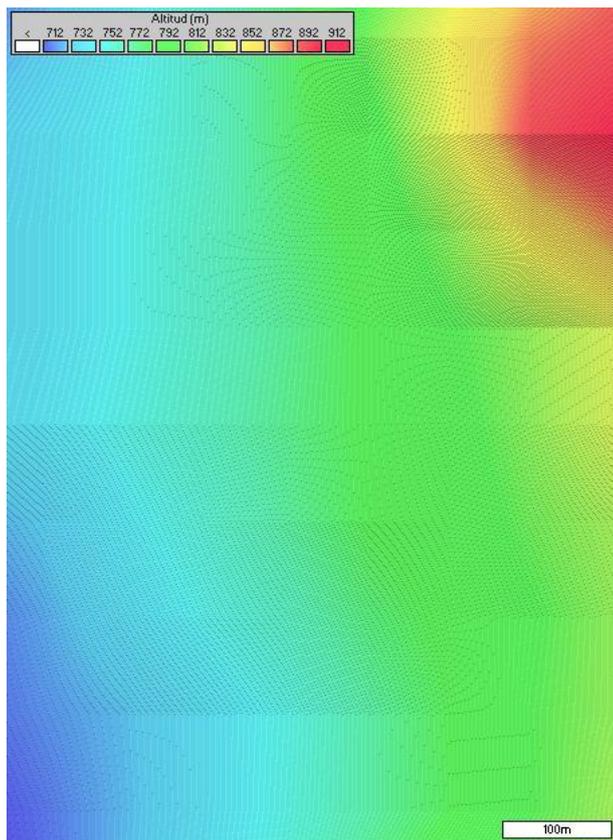


Figura 3. 8 Mapa de trabajo de Benaocaz usando el modelo STRM-DTED



Figura 3. 9 Mapa topográfico de Benaocaz usando Google Maps

3.5.1.1 Mapa topográfico

El mapa topográfico está elaborado a partir de una cartografía de la zona donde se van a realizar los cálculos. En este caso, se ha utilizado un mapa descargado de Google Maps.

Como se pretende dar cobertura Wi-Fi a todo el pueblo, hemos acotado la región de estudio incluyendo el Colegio Público Abardela que se encuentra en la periferia del municipio (36° 42' 3,72"N, 5° 25' 28,93"O).

3.5.1.2 Mapa de cobertura

El mapa de cobertura está elaborado a partir del modelo de propagación ITM implementado en Radio Mobile. Este mapa se podrá ver en el apartado del análisis de cobertura.

3.5.2 PARÁMETROS CONFIGURADOS EN LA SIMULACIÓN

Una vez que se han introducido los mapas en el simulador, es necesario crear la red que se va a diseñar. En la figura 3.10 se indican los parámetros de red a configurar.

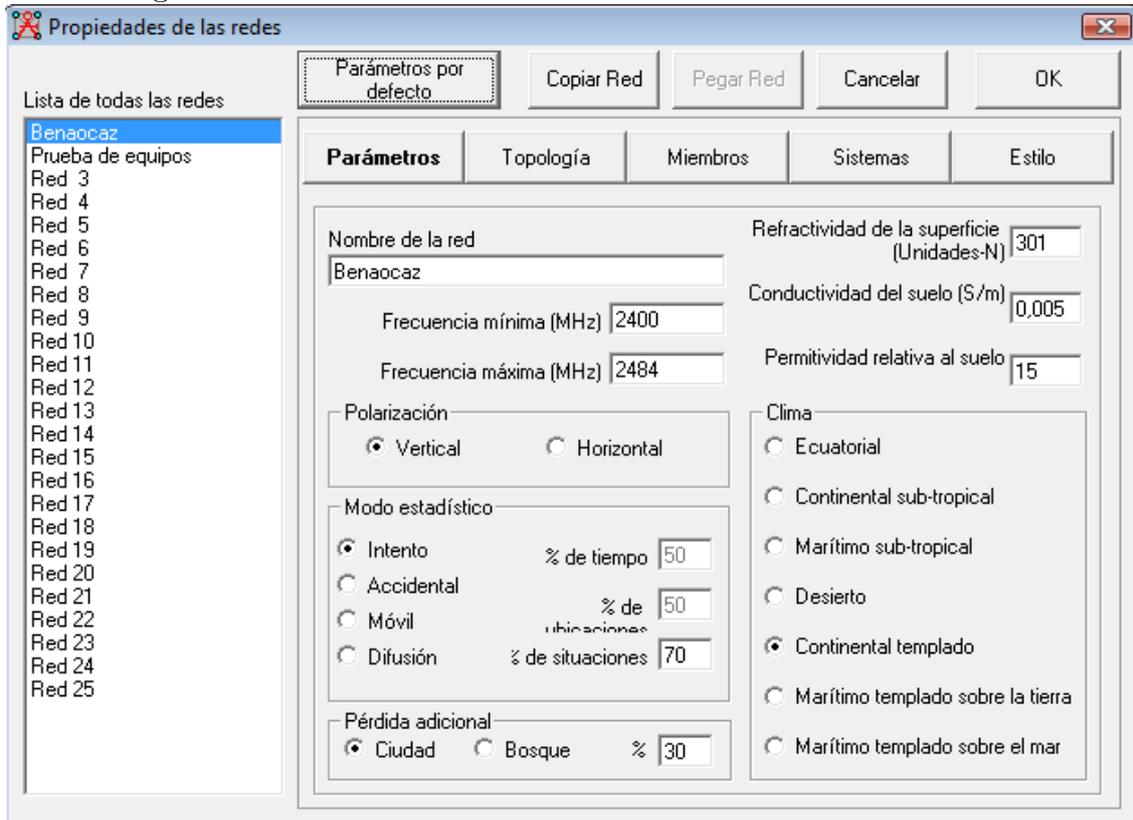


Figura 3. 10 Parámetros de la red Benaocaz

En la parte de la izquierda se encuentra la lista de todas las redes que se pueden almacenar en Radio Mobile. En nuestro caso sólo es necesario crear una, la red llamada Benaocaz.

Los valores de frecuencia mínima y máxima corresponden a las frecuencias límite a las que trabaja el sistema elegido (802.11g). La polarización es vertical, tal y como indica la hoja de especificaciones de la antena escogida.

El modo estadístico es la variabilidad de las señales en función de las características del sistema. Para simular la tecnología Wi-Fi se utiliza el modo intento, ya que es el utilizado en comunicaciones con mensajes cortos entre estaciones fijas. En cuanto al tanto por ciento de situaciones, se deja en 70, que es el valor que viene por defecto [11].

En cuanto a la refractividad de la superficie, la conductividad del suelo, la permitividad relativa al suelo y el clima, los valores que se indican en la figura son los adecuados para la zona de diseño.

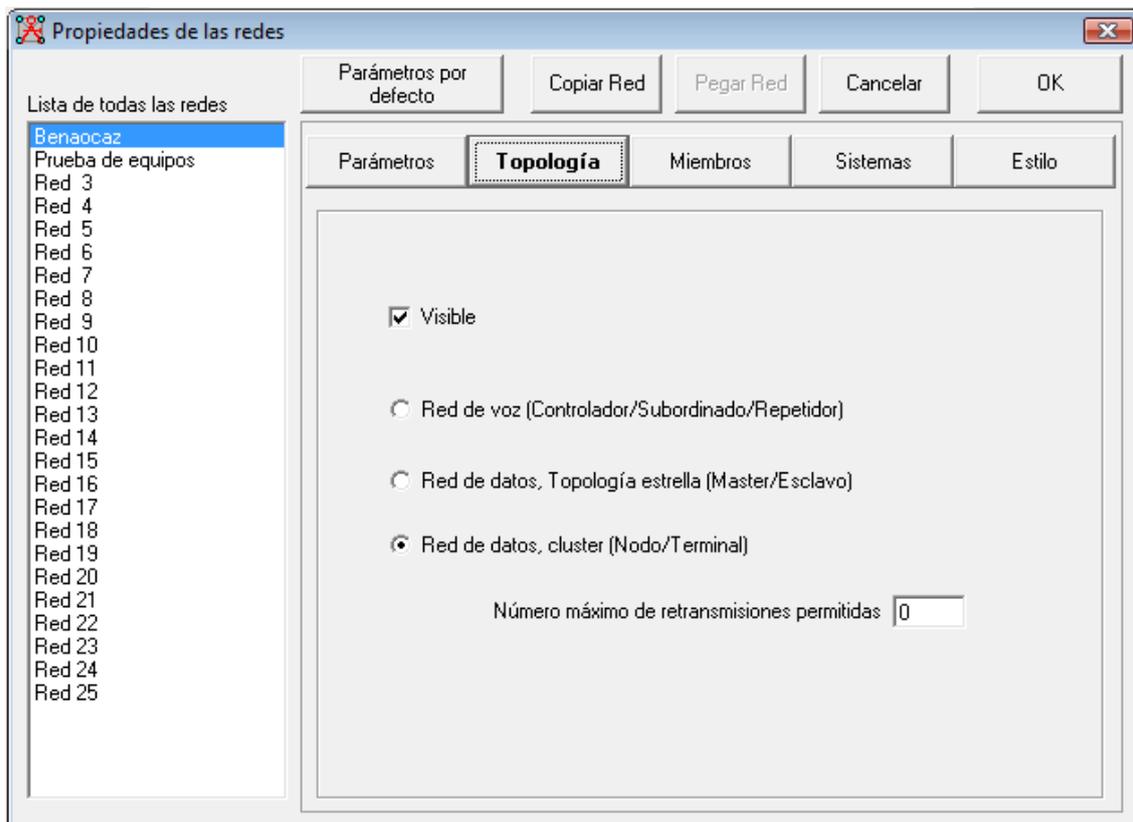


Figura 3. 11 Topología de la red Benaocaz

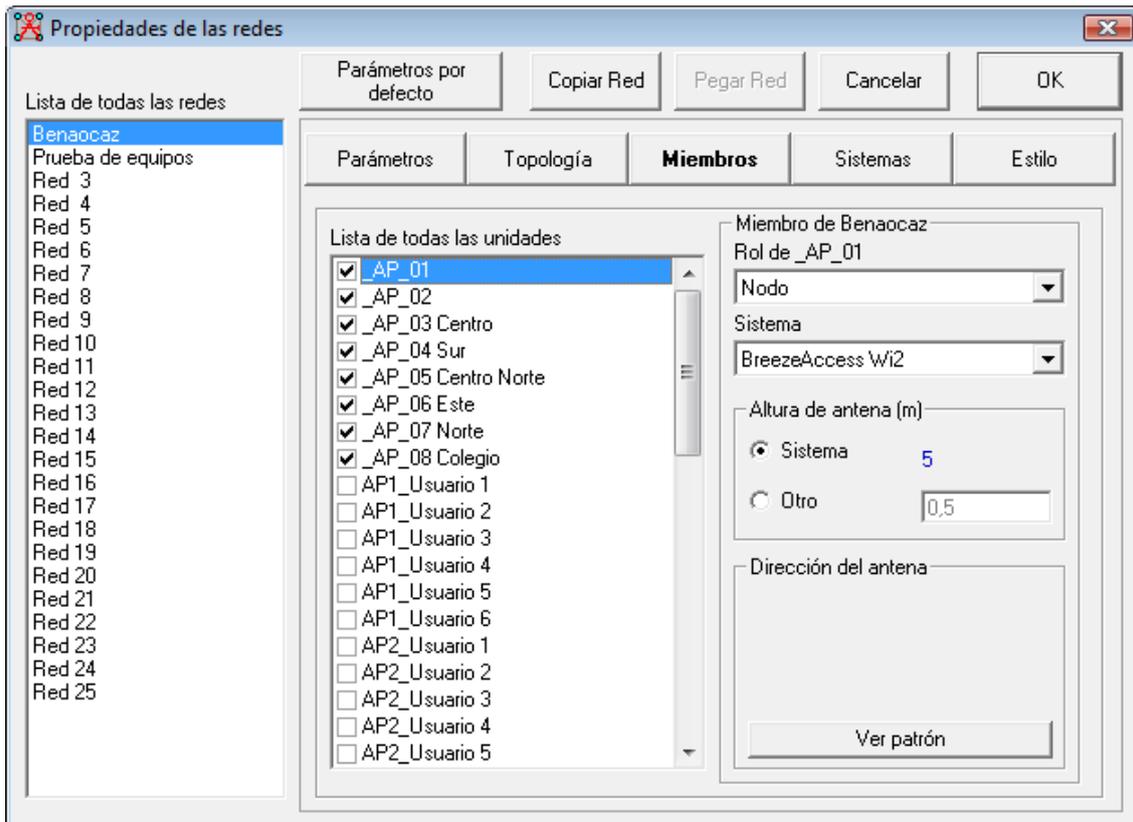


Figura 3. 12 Miembros de la red Benaocaz

El simulador de Radio Mobile no contempla un aspecto muy importante para conseguir unos resultados cercanos a la realidad: no es posible simular edificios. En vez de esto, el programa permite añadir una pérdida adicional en tanto por ciento, según si el área a estudiar se encuentra en bosque o en ciudad. Tomamos un 30% porque el municipio en el que se lleva a cabo la simulación no está densamente poblado.

La pestaña topología (ver figura 3.11) permite elegir entre tres tipos: red de voz, red de datos topología en estrella y red de datos *cluster*. En este caso, al tratarse de una red conjunta, red municipal, se elige la opción de *cluster*.

El apartado de miembros permite establecer el rol de cada dispositivo en la red. La topología *cluster* permite elegir entre Nodo o Terminal. En nuestro caso, los puntos de acceso son nodos y los usuarios terminales.

En la pestaña de sistemas, como se ve en la figura 3.12 se pueden crear hasta 25 sistemas de red diferentes. En nuestro caso, sólo será necesario definir dos: *BreezeAccess Wi2* para los puntos de acceso y *Tarjeta PCI – Ordenador* para simular a las tarjetas Wi-Fi de los usuarios.

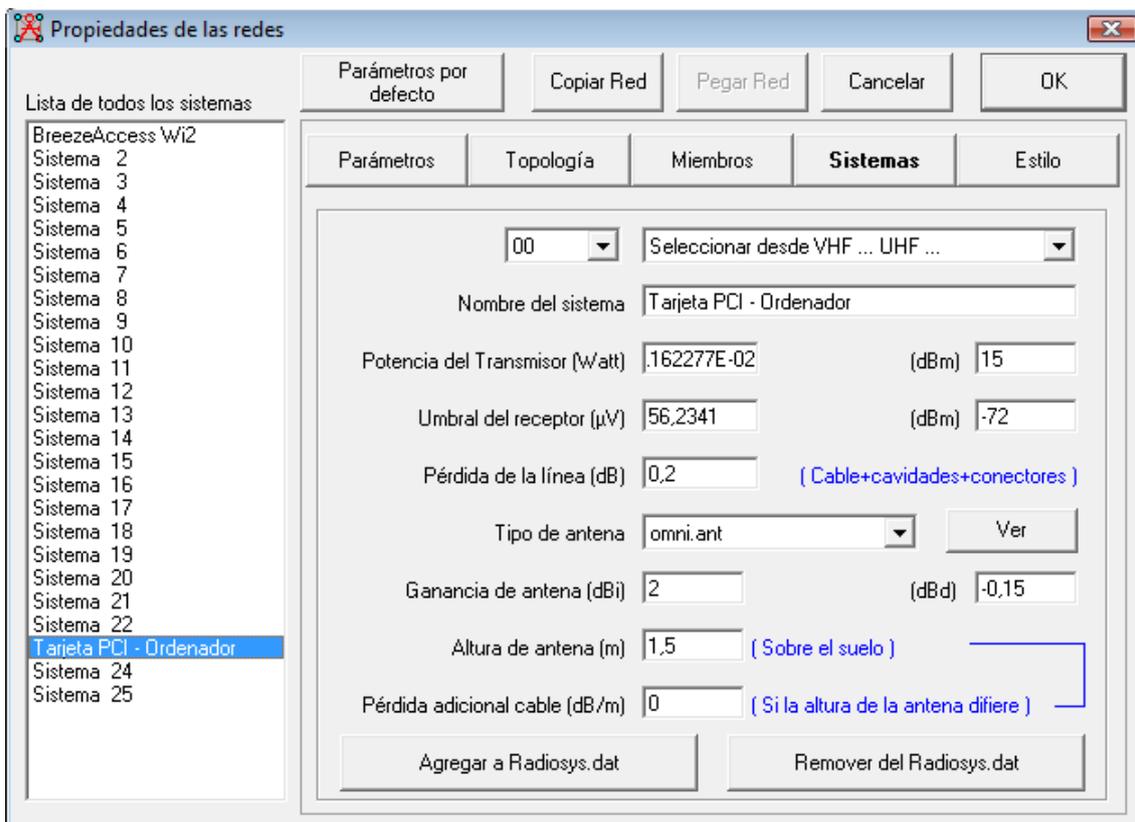
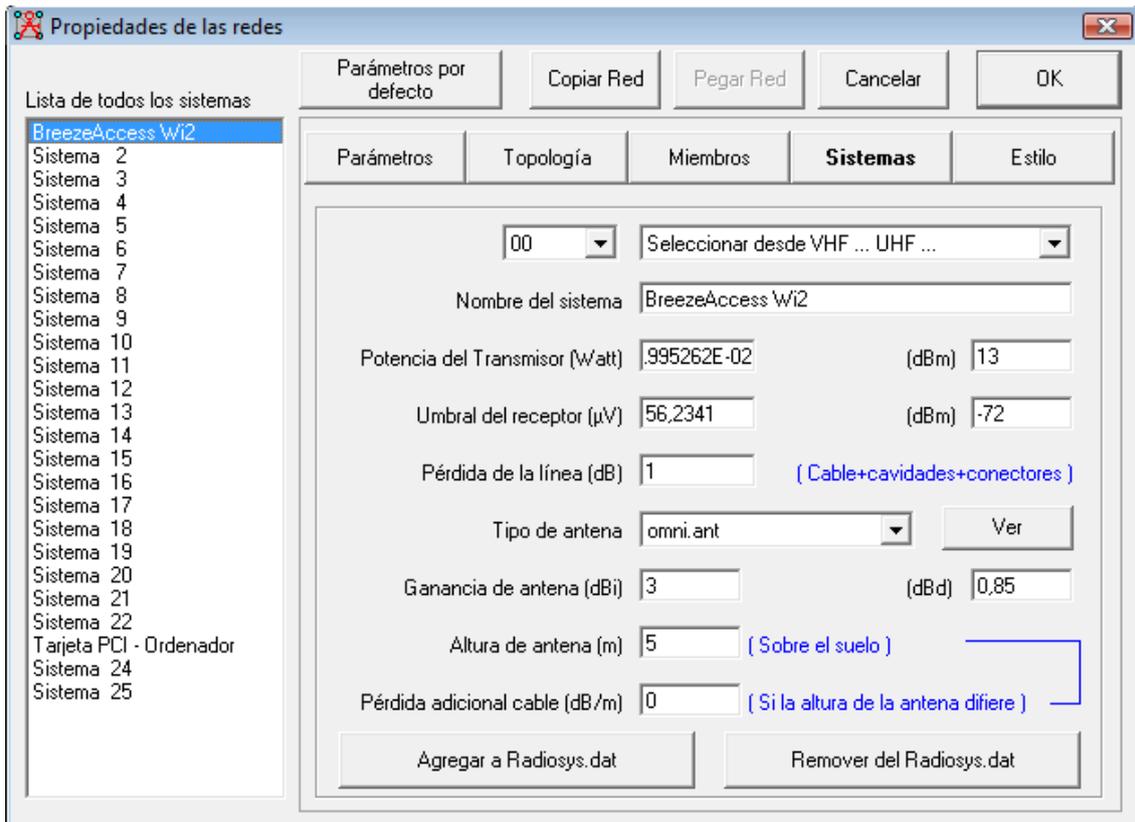


Figura 3. 13 Sistemas de la red Benaocaz

El primer parámetro que se necesita indicar es la potencia del transmisor que se obtiene de la ecuación 3.68. Para realizar este cálculo se ha de tener en cuenta que la ganancia de la antena utilizada en todos los puntos de acceso es de 8 dBi y que la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) no debe superar los 20 dBm. Suponemos además que las pérdidas de línea son de 1 dB. Con todo esto, se tiene un valor de 13 dBm en la potencia de transmisión de cada punto de acceso.

Cabe destacar que se no se ha tomado un valor mayor de la potencia de transmisión y uno menor de la ganancia de la antena (sin dejar de cumplir la ecuación 3.68) ya que, después de realizar diferentes pruebas con el simulador, se ha demostrado que para obtener el mayor radio de cobertura se ha de fijar la ganancia de las antenas al máximo, y reducir la potencia de transmisión.

Para el caso de la tarjeta PCI hacemos lo mismo. En este caso, la ganancia de la antena es de 2 dBi y si tomamos que las pérdidas de la línea son 0,2 dBi, nos sale una potencia transmitida permitida de 18,2 dBm. Pero como la tarjeta elegida permite una potencia de transmisión máxima de 15 dBm, éste es el valor que tomamos para realizar la simulación.

En cuanto a los umbrales de recepción se han tomado los que se indican en las especificaciones de los equipos.

$$P_{TxAP} = PIRE - G_{AP} + L_{líneaAP} = 20dBm - 8dBi + 1dB = 13 \text{ dBm}$$

$$P_{TxPCI} = PIRE - G_{PCI} + L_{líneaPCI} = 20dBm - 2dBi + 0,2dB = 18,2 \text{ dBm}$$

Ecuación 3. 68 Potencia transmitida permitida en el AP y en la tarjeta PCI Wi-Fi respectivamente

3.5.3 ESTUDIO DE COBERTURA Y CAPACIDAD

Para proporcionar un servicio de internet inalámbrico óptimo en el municipio es necesario tener en cuenta el número de usuarios que se pueden conectar simultáneamente, la capacidad que se quiere garantizar a cada usuario y el área a cubrir con la red inalámbrica.

Para tener en cuenta todos estos aspectos es necesario realizar un estudio de cobertura y capacidad para determinar el número de puntos de acceso necesarios para implementar la red inalámbrica en Benaocaz.

3.5.3.1 Análisis de capacidad

En este apartado se pretende determinar la capacidad total requerida en el sistema, así como el número de puntos de acceso necesarios para satisfacer las necesidades. Se hará un estudio del número de puntos de acceso por demanda en función del número de habitantes que se puedan conectar simultáneamente.

El número de puntos de acceso que aquí se determine no será el número de puntos de acceso definitivo ya que es posible que sea necesaria una cantidad superior de ellos para cubrir toda la superficie de la localidad. En este caso, el número de puntos de acceso vendría impuesto por el estudio de cobertura.

Para llevar a cabo dicho análisis vamos a tener en cuenta los siguientes parámetros de partida:

- Capacidad efectiva de un punto de acceso C_e . De los 54 Mbps totales 22 Mbps son los efectivos para la transmisión y recepción de datos.
- Número máximo de usuarios N^* . Es el número de habitantes del municipio dividido entre el número de habitantes por familia. Este parámetro nos da una idea del número de ordenadores que se pueden conectar a la red.
- Factor de simultaneidad F . Es el número máximo de usuarios que están usando la red inalámbrica simultáneamente. Se va a utilizar un factor de simultaneidad del 60%.
- Capacidad garantizada por usuario C_g . Es la capacidad mínima que se le garantiza a un usuario en el caso de que F sea máximo. En nuestro caso tomaremos 512 Kbps

Si suponemos que hay dos habitantes por familia, la capacidad necesaria es:

$$C = N^* \times F \times C_g = \frac{745 \text{ habitantes}}{2 \text{ hab/familia}} \times 60\% \times 512 \text{ Kbps} = 114,4 \text{ Mbps}$$

Ecuación 3. 69 Cálculo de la capacidad demandada

Entonces, el número de puntos de acceso necesarios es:

$$\left\lceil \frac{C}{C_e} \right\rceil = \left\lceil \frac{114,4 \text{ Mbps}}{22 \text{ Mbps}} \right\rceil = 6 \text{ Puntos de acceso}$$

Ecuación 3. 70 Cálculo del número de puntos de acceso necesarios por capacidad

3.5.3.2 Análisis de cobertura

La red inalámbrica a implementar en Benaocaz pretende cubrir todo el área del municipio. Para ello es necesario simular en Radio Mobile el radio que los puntos de acceso cubren.

Con la herramienta *Radio Coverage*, se puede dibujar el área de cobertura de una unidad radio mediante cuatro tipos de gráficas: *Single Polar* (que calcula el área de cobertura de una estación transmisora fija para un determinado receptor realizando un barrido radial), *Combined Cartesian* (que utiliza una o varias estaciones fijas para calcular el área de cobertura que ofrecen a un terminal especificado, en coordenadas cartesianas), *Fresnel* (que colorea sobre el

mapa de elevaciones las áreas que cumplen el intervalo de despejamiento de la primera zona de Fresnel especificado), *Interference* (que representa, a partir de las especificaciones del mínimo nivel de señal requerido y margen de interferencia entre dos estaciones transmisoras, las regiones con nivel de interferencia aceptable y aquellas en las que sobrepasa) y *Best Sites* (que permite encontrar el mejor emplazamiento para una antena transmisora que debe ofrecer cobertura a un conjunto de terminales receptores).

Este último tipo de gráfica ha permitido situar óptimamente los puntos de acceso de la red inalámbrica. Después de realizar varias simulaciones, se ha llegado a la conclusión de que, en lo que respecta a la cobertura, el municipio se cubre en su totalidad utilizando 8 puntos de acceso. La distribución de los puntos de acceso según el terreno a cubrir se muestra en la figura 3.14.



Figura 3. 14 Distribución de los puntos de acceso

Por otro lado, utilizando el tipo de gráfico *Combined Cartesian*, se representa en la figura 3.15 en verde, la zona cubierta por la red inalámbrica diseñada.

Como se puede observar, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el estudio por capacidad, el número de puntos de acceso varía en función del estudio realizado. Para realizar un diseño óptimo de la red, tomamos como solución la del estudio que nos indique un número de puntos de acceso mayor. Es decir, en este caso ocho.

En la tabla 3.8 se indican las coordenadas exactas de cada emplazamiento así como su altitud sobre el terreno.

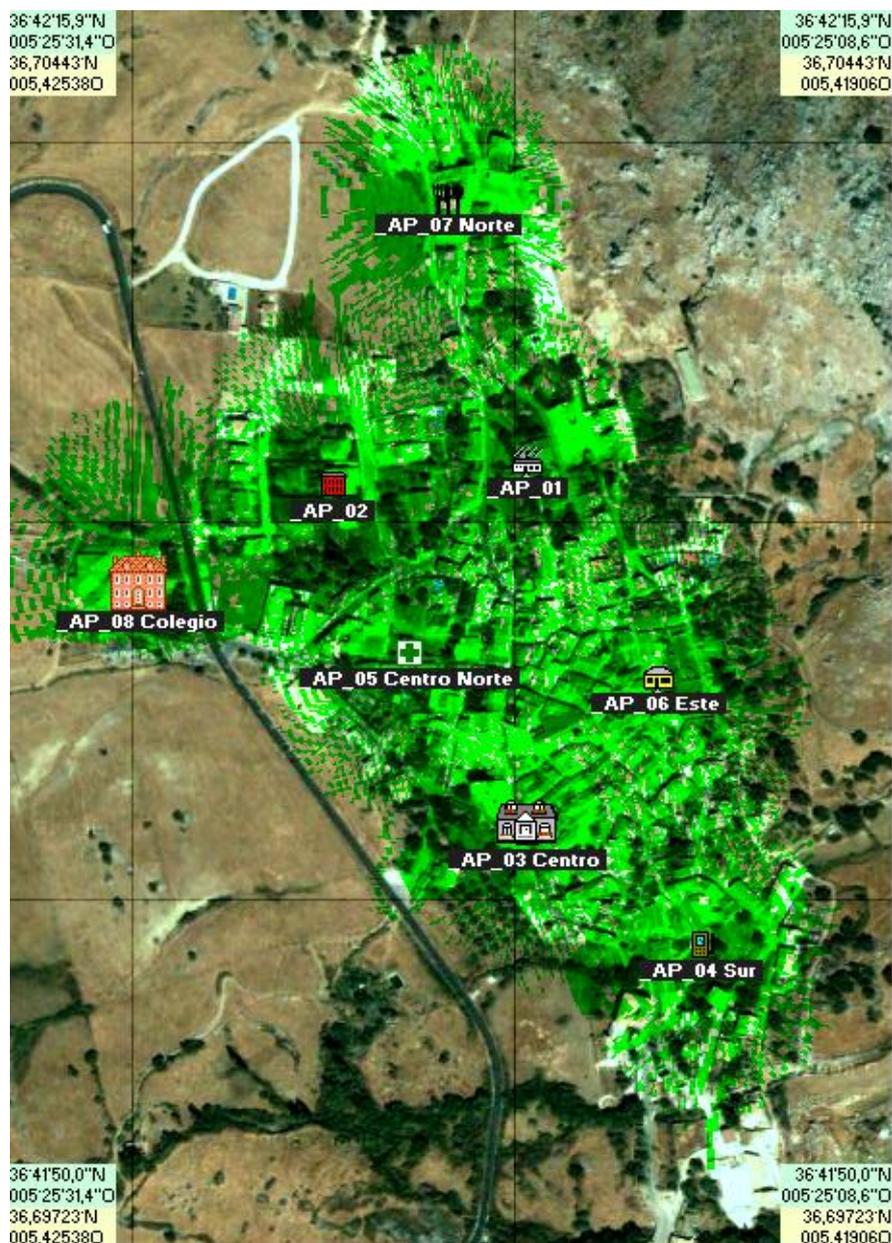


Figura 3. 15 Cobertura de los puntos de acceso en la red Benaocaz

Nombre	Ubicación	Altitud
_AP_01	36°42'06"N 005°25'18"O	795,0m
_AP_02	36°42'06"N 005°25'23"O	769,2m
_AP_03 Centro	36°41'59"N 005°25'18"O	789,5m
_AP_04 Sur	36°41'56"N 005°25'13"O	803,0m
_AP_05 Centro Norte	36°42'03"N 005°25'21"O	779,1m
_AP_06 Este	36°42'02"N 005°25'15"O	807,0m
_AP_07 Norte	36°42'12"N 005°25'20"O	791,0m
_AP_08 Colegio	36°42'04"N 005°25'28"O	751,0m

Tabla 3. 8 Situación de los emplazamientos

El simulador Radio Mobile incluye otra herramienta llamada *Radio Link* que permite analizar el enlace establecido entre dos emplazamientos. Permite, por ejemplo, visualizar el perfil del enlace entre un punto de acceso y un terminal inalámbrico.

En la figura 3.16 se representa el perfil del enlace entre _AP_01 y un usuario que se encuentra en las proximidades de dicho punto de acceso. Como se puede observar, en la fila superior se presentan los resultados radio eléctricos de propagación: azimut con que está orientada la antena de _AP_01 (63.6°), pérdidas de espacio libre (68.1dB), distancia del enlace (0.02Km), peor ángulo de Fresnel para este trayecto (3.4F1), etc. En particular Rx relativo permite conocer el valor de margen respecto de la sensibilidad del sistema receptor con que llega la potencia de la señal recibida. En este caso es de 9.9dB.

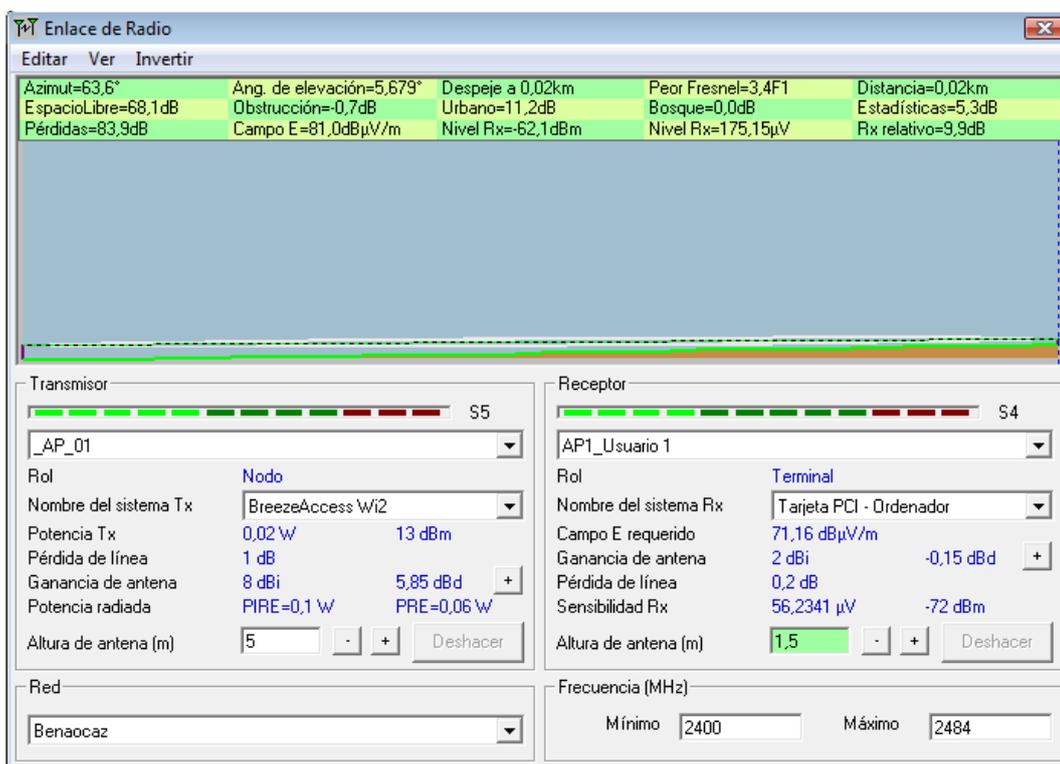


Figura 3. 16 Ejemplo de perfil de enlace entre _AP_1 y un usuario

Es posible además, modificar las alturas de las antenas y la frecuencia, para comprobar el efecto de la variación de estos parámetros sobre el enlace, que se actualiza con los nuevos datos de forma automática.

Además de esta herramienta, en Radio Mobile existe un ejecutable denominado rmpath.exe, que permite representar los resultados anteriores de forma más elegante. En la figura 3.17 se representa el perfil anterior utilizando dicha herramienta.

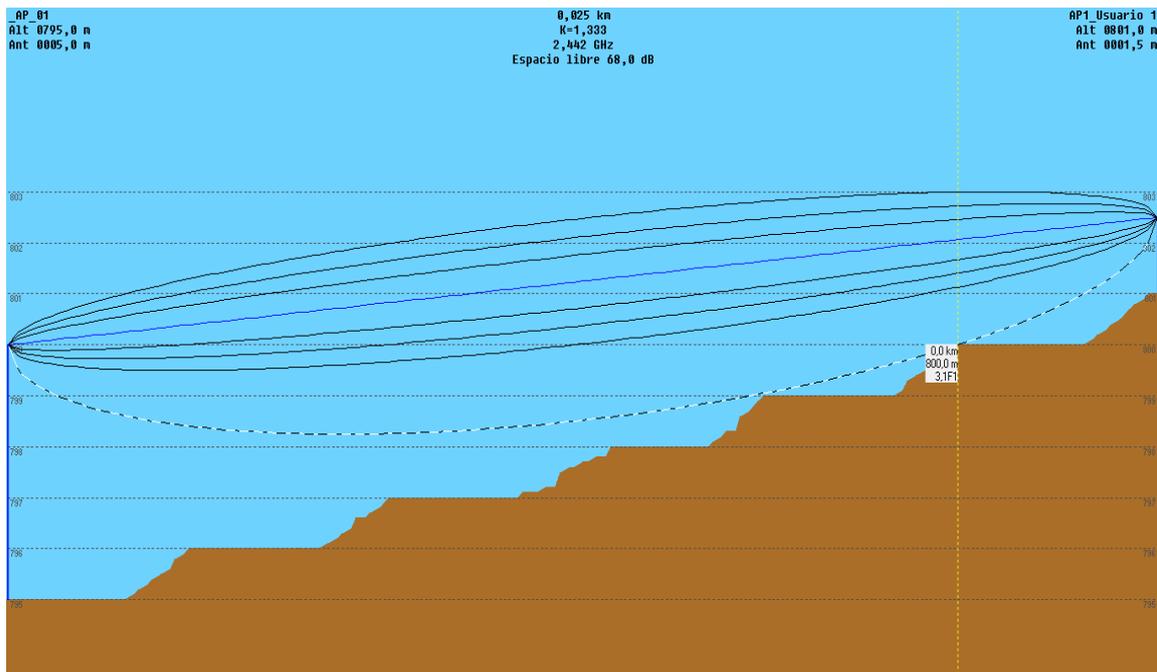


Figura 3. 17 Ejemplo de perfil de enlace entre _AP_1 y un usuario con Rmpath

3.5.4 CONFIGURACIÓN DE LOS CANALES RADIO

3.5.4.1 Canales Wi-Fi

Para que sea eficiente el funcionamiento de la red, la normativa recomienda que existan cinco canales entre dos canales contiguos utilizados, para así minimizar la interferencia entre dispositivos. Teniendo en cuenta esto, en la figura 3.18, se ha representado la zona cubierta por cada punto de acceso en función del canal utilizado. La asignación de frecuencias se muestra en la tabla 3.9.

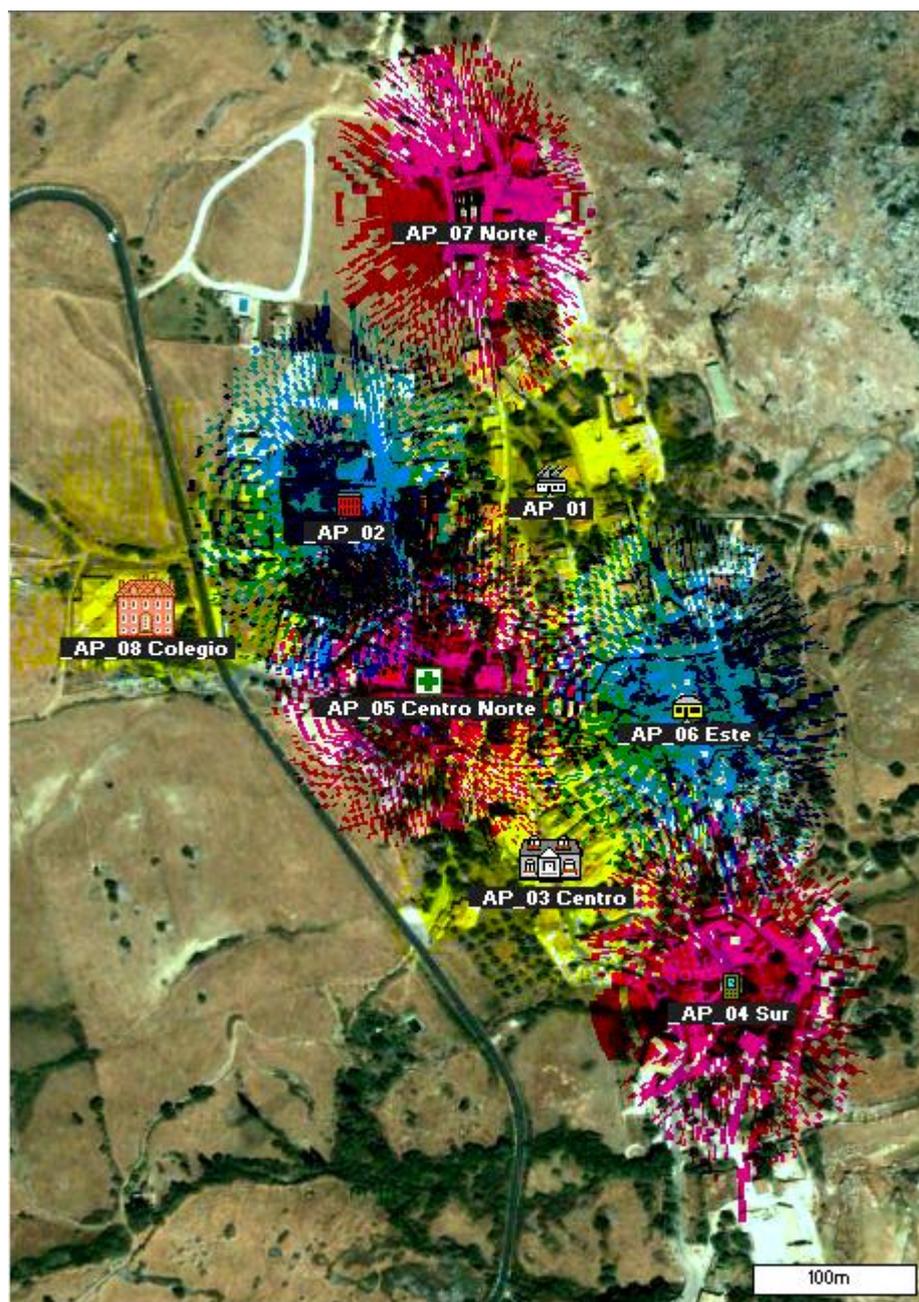


Figura 3. 18 Representación de la asignación de canales en Radio Mobile

Nombre	Canal	Altura antena (m)
_AP_01	1	5
_AP_02	11	5
_AP_03 Centro	1	5
_AP_04 Sur	6	8
_AP_05 Centro Norte	6	5
_AP_06 Este	11	5
_AP_07 Norte	6	5
_AP_08 Colegio	1	3

Tabla 3. 9 Asignación de los canales

3.5.4.2 Canales Pre-Wimax

Igual que ocurre en la tecnología Wi-Fi, la asignación de canales Pre-Wimax también ha de seguir unos requisitos. Ha de haber cinco canales de diferencia entre dos canales a utilizar. En nuestro caso, la normativa se respeta ya que para que cada unidad de acceso apunte a sus unidades suscriptoras correspondientes, todos los equipos usan antenas direccionales.

3.6 ECUACIONES

Ecuación 3. 1 Número de onda.....	92
Ecuación 3. 2 Refractividad de la superficie	93
Ecuación 3. 3 Curvatura efectiva de la Tierra.....	93
Ecuación 3. 4 Curvatura efectiva de la Tierra a partir de N_s	93
Ecuación 3. 5 Impedancia del suelo Z_g	94
Ecuación 3. 6 Altura efectiva para el modo random.....	96
Ecuación 3. 7 Parámetro B'_j para el cálculo de h_{e_j}	96
Ecuación 3. 8 Altura efectiva para los modos careful y very careful.....	96
Ecuación 3. 9 Distancias de cada terminal a su horizonte radio y ángulos de elevación.....	97
Ecuación 3. 10 Cálculos preliminares para ambos modos	97
Ecuación 3. 11 Definición de $\Delta h(s)$ y $\sigma_h(s)$	97
Ecuación 3. 12 Expresión de la atenuación de referencia A_{ref}	97
Ecuación 3. 13 Variables para el cálculo de la atenuación en el rango de difracción.....	98
Ecuación 3. 14 Expresiones de m_d y A_{ed}	98
Ecuación 3. 15 Factor de ponderación.....	99
Ecuación 3. 16 Factor de clutter.....	99
Ecuación 3. 17 Atenuación de referencia en la región de difracción.....	99
Ecuación 3. 18 Atenuación por doble filo de cuchillo.....	99
Ecuación 3. 19 Atenuación debida a la redondez de la Tierra.....	100
Ecuación 3. 20 Variables para el cálculo de las funciones de Vogler.....	100
Ecuación 3. 21 Expresiones auxiliares para el cálculo de A_r	100
Ecuación 3. 22 Función especial Airy	100

Ecuación 3. 23 Función B de Vogler.....	100
Ecuación 3. 24 Resto de funciones de Vogler.....	101
Ecuación 3. 25 Valor de la atenuación en d_{LS}	101
Ecuación 3. 26 Caso en el que $A_{ed} \geq 0$	101
Ecuación 3. 27 Derivadas de K_1 y K_2	102
Ecuación 3. 28 Derivada segunda de K_2	102
Ecuación 3. 29 Caso en el que $A_{ed} < 0$	102
Ecuación 3. 30 Derivada segunda de K_1	102
Ecuación 3. 31 Expresión de A_{el}	102
Ecuación 3. 32 Expresión de A_{el}	103
Ecuación 3. 33 Expresión de A_{los}	103
Ecuación 3. 34 Expresión simplificada de A_d	103
Ecuación 3. 35 Expresión del $\sin \psi$ para el cálculo de A_t	103
Ecuación 3. 36 Expresión de Re' para el cálculo de A_t	103
Ecuación 3. 37 Expresión de Re para el cálculo de A_t	103
Ecuación 3. 38 Expresiones de δ' y δ para el cálculo de A_t	103
Ecuación 3. 39 Expresión de A_t	104
Ecuación 3. 40 Expresión de la atenuación de referencia en d_5 y d_6	104
Ecuación 3. 41 Expresiones de m_s , d_x y A_{es}	104
Ecuación 3. 42 Expresiones para el cálculo de A_{scat}	104
Ecuación 3. 43 Expresiones para el cálculo de A_{scat}	104
Ecuación 3. 44 Distancia entre dos horizontes.....	105
Ecuación 3. 45 Factor de asimetría.....	105
Ecuación 3. 46 Punto de corte.....	105
Ecuación 3. 47 Factor de eficiencia en dispersión	105
Ecuación 3. 48 Función de distribución normal complementaria.....	106
Ecuación 3. 49 Desviación típica	107
Ecuación 3. 50 Cuantiles	107
Ecuación 3. 51 Expresión de A'	107
Ecuación 3. 52 Expresión final del cuantil $A(z_T, z_L, z_S)$	107

Ecuación 3. 53 Expresión final del cuantil $A(z_T, z_L, z_S)$	107
Ecuación 3. 54 Ajuste de la atenuación de referencia a la media anual.....	108
Ecuación 3. 55 Desviación Y_T	108
Ecuación 3. 56 Variabilidad de la localización.....	109
Ecuación 3. 57 Variabilidad de la situación.....	109
Ecuación 3. 58 Ecuación de Fresnel.....	110
Ecuación 3. 59 Funciones $B(K)$, $G(X)$ y $F(x, K)$	110
Ecuación 3. 60 Funciones $F_1(x, K)$ y $F_2(x, K)$	110
Ecuación 3. 61 Funciones $C_1(K)$	110
Ecuación 3. 62 Función $F(D, N_s)$	110
Ecuación 3. 63 Función $F_0(D)$	111
Ecuación 3. 64 Función H_0	111
Ecuación 3. 65 Función $H_{00}(r_1, r_2, j)$	111
Ecuación 3. 66 Función $H_{01}(r, j)$	111
Ecuación 3. 67 Función H_{00} para $\eta_s = 0$	111
Ecuación 3. 68 Potencia transmitida permitida en el AP y en la tarjeta PCI Wi-Fi respectivamente.....	122
Ecuación 3. 69 Cálculo de la capacidad demandada.....	123
Ecuación 3. 70 Cálculo del número de puntos de acceso necesarios por capacidad	123

3.7 FIGURAS

Figura 3. 1 Gráfica típica de la atenuación de referencia en función de la distancia	98
Figura 3. 2 Función de atenuación $F(\theta_s, N_s)$. La distancia d viene dada en Km y θ en radianes	106
Figura 3. 3 La función $V(0.5, d_e)$ para cada uno de las ocho regiones climáticas	109
Figura 3. 4 Situación geográfica de Benaocaz.....	112
Figura 3. 5 Esquema de la red inalámbrica de Benaocaz.....	113
Figura 3. 6 Equipo Alvarion BreezeAccess VL	114
Figura 3. 7 Antena Omni-8-2.4-SC Kit de Alvarion	115

Figura 3. 8 Mapa de trabajo de Benaocaz usando el modelo STRM-DTED....	117
Figura 3. 9 Mapa topográfico de Benaocaz usando Google Maps.....	117
Figura 3. 10 Parámetros de la red Benaocaz	118
Figura 3. 11 Topología de la red Benaocaz.....	119
Figura 3. 12 Miembros de la red Benaocaz.....	120
Figura 3. 13 Sistemas de la red Benaocaz.....	121
Figura 3. 14 Distribución de los puntos de acceso	124
Figura 3. 15 Cobertura de los puntos de acceso en la red Benaocaz.....	125
Figura 3. 16 Ejemplo de perfil de enlace entre _AP_1 y un usuario	126
Figura 3. 17 Ejemplo de perfil de enlace entre _AP_1 y un usuario con Rmpath	127
Figura 3. 18 Representación de la asignación de canales en Radio Mobile	128

3.8 REFERENCIAS

- [1] <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>
- [2] http://download.ehas.org/docs/manual_radiomobile.doc
- [3] <http://www.ipellejero.es/radiomobile/index.html>
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Longley-Rice_Model
- [5] <http://flattop.its.blrdoc.gov/itm.html>
- [6] G. A. Hufford, A. G. Longley, W. A. Kissick: “A guide to use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode,” U.S. Dep. Commerce, Boulder, CO, NTIA Rep. 82-100, 1982.
- [5] <http://www.its.blrdoc.gov/pub/ntia-rpt/tn101>
- [6] <http://www.benaocaz.es/>
- [7] <http://es.wikipedia.org/wiki/Benaocaz>
- [8] <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadistica/sima/>
- [9] <http://www.alvarion.com/>
- [10] <http://www.netgear.com/>
- [11] <http://radiomobile.pe1mew.nl/>
- [12] <http://www.pizon.org/radio-mobile-tutorial/>