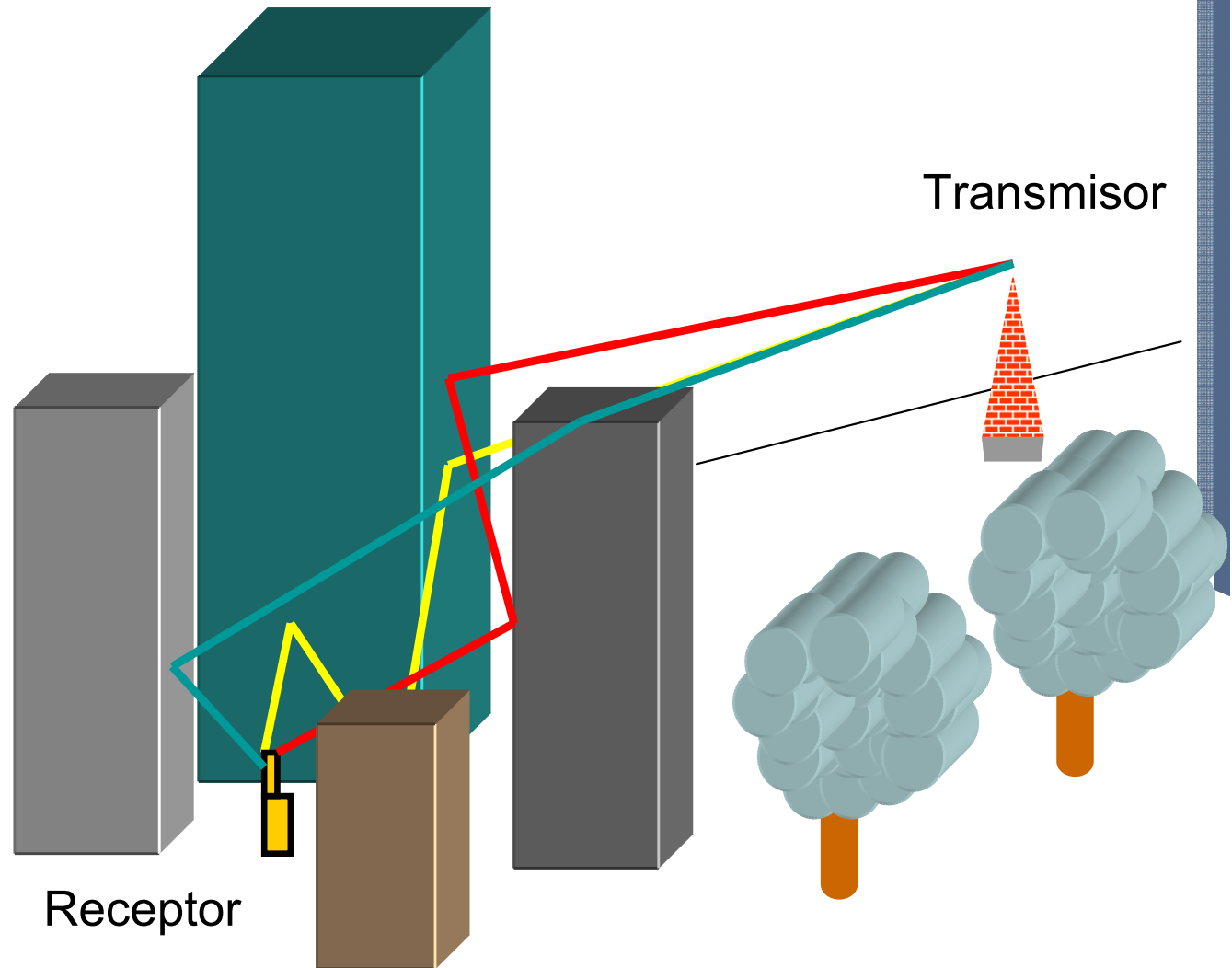




# **Tema 3: Modelos de Propagación de gran Escala**

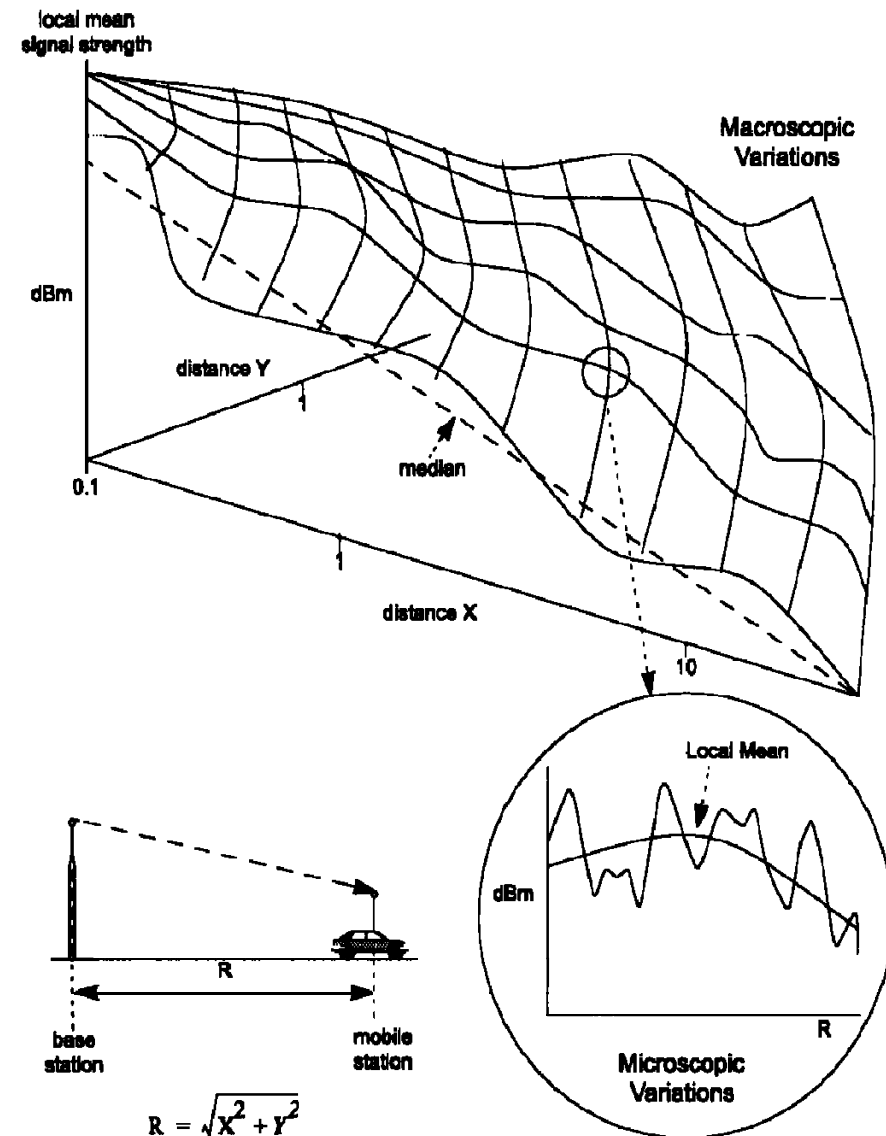
# Modelos de propagación

- ❑ La señal recibida por el móvil en cualquier punto del espacio puede estar constituida por un gran número de ondas planas con distribución aleatoria de amplitud, de fase y de ángulo de llegada.
- ❑ Es posible la recepción incluso cuando no hay visión directa entre Transmisor y Receptor.
  - Bloqueo (shadowing)



# Modelos de propagación

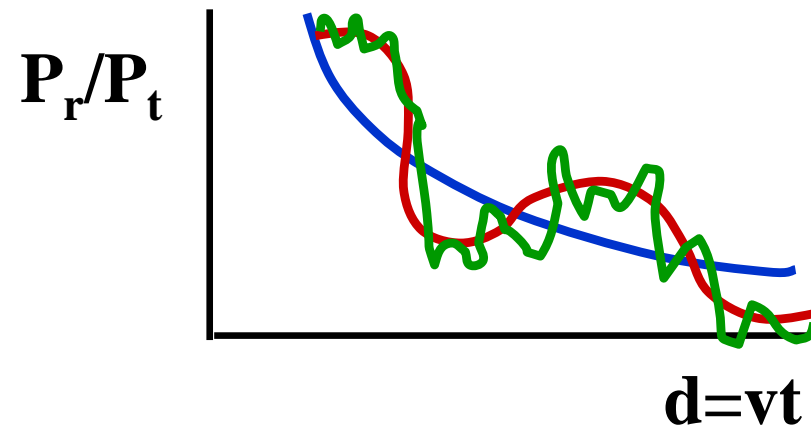
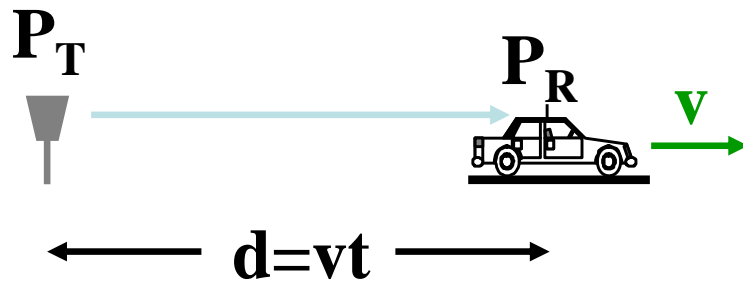
- ❑ Los modelos de propagación a gran escala predicen el comportamiento medio para distancias  $\gg \lambda$ 
  - Dependencia de la distancia y de características del entorno
  - Independencia del ancho de banda
  - Útiles para modelar el alcance de un sistema radio y para planificación.
- ❑ Modelos de pequeña escala (fading) describen las variaciones de señales sobre distancias del orden de  $\lambda$ 
  - Fading: cambios rápidos de la señal sobre distancias (intervalos de tiempo) cortos.
  - Multitrayecto
    - Cancelación de fase
    - Atenuación constante
  - Dependencia del ancho de banda de transmisión.



# Modelos de propagación

## □ Mecanismos de Propagación de señal.

- Espacio Libre (Path Loss, Line-of-Sight)
- Bloqueo (debido a obstrucciones)
  - Modelo Log-distancia
  - Modelo Log-normal
- Desvanecimiento por multitrayecto (interferencia con(des)tructiva)



# Modelos de gran escala: Path Loss, PL

## □ Propagación en espacio libre

$$P_R(d)[W] = P_T[W] \times G_T G_R \underbrace{\left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2}_{\text{Espacio libre}}$$

## □ Path Loss

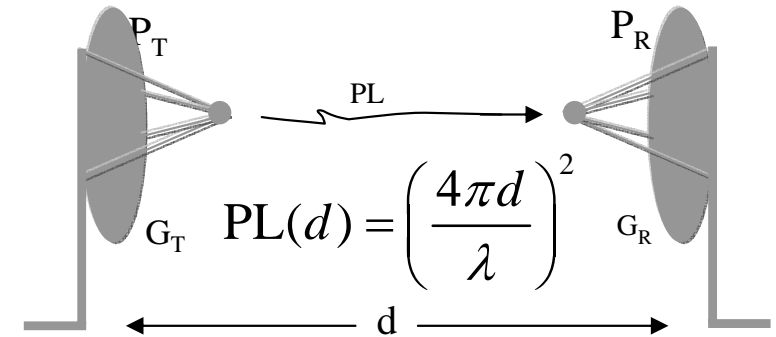
$$PL(d)[dB] = (32.44 + 20\log_{10} d + 20\log_{10} f) \quad \begin{array}{l} f \text{ en MHz} \\ d \text{ en Km} \end{array}$$

## □ El modelo de propagación de espacio libre es sólo válido para campo lejano ( $d > d_0$ )

- Valores típicos de  $d_0$ 
  - Celdas grandes (rural): 1 km.
  - Microceldas (urbano): 100 m
  - Indoor (WLAN): 1m.

$$P_R(d)[W] = P_R(d_0)[W] \times \left( \frac{d_0}{d} \right)^2, \quad d \geq d_0$$

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 20\log \left( \frac{d}{d_0} \right)$$





# Modelos de gran escala: Path Loss, PL

□ Existen modelos que pueden explicar “mejor” que el de “espacio libre” las pérdidas en un trayecto.

- Ejemplo: Modelo de Okumura-Hata: pérdidas en promedio

$$\overline{PL}_{\text{Okumura}} [\text{dB}] = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(H_1) + [44.9 - 6.55 \log(H_1)] \log(d) - a(H_2)$$

donde:

$f$ : frecuencia (MHz)

$H_1$ : Altura efectiva de la antena transmisora (m) [30 a 200 m]

$H_2$ : Altura efectiva de la antena receptora (m) [1 a 10 m]

$d$ : distancia (km)

$$a(H_2) = (1.1 \log(f) - 0.7) H_2 - (1.56 \log(f) - 0.8)$$

- Comparación con el modelo de propagación en espacio libre

$$PL(d) [\text{dB}] = (32,44 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f) \begin{matrix} f \text{ en MHz} \\ d \text{ en Km} \end{matrix}$$



# Modelos de gran escala: log-distancia

- En la práctica, existen condiciones del entorno que afectan a la **potencia media recibida**

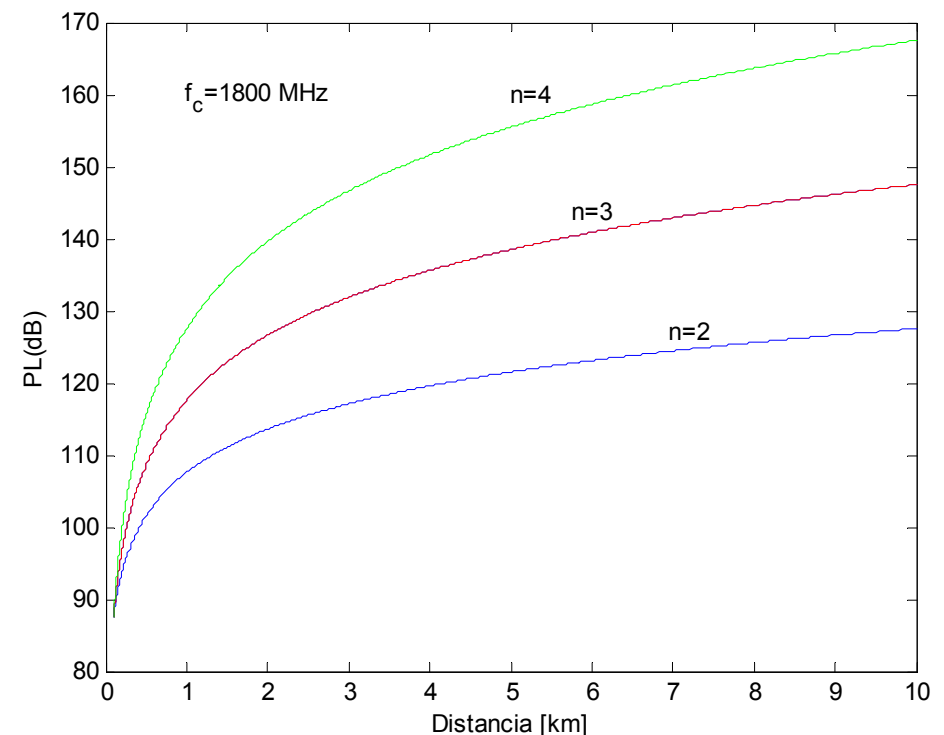
$$P_R(d)[W] = P_R(d_0)[W] \times \left( \frac{d_0}{d} \right)^n, \quad d \geq d_0$$

- Pérdidas medias en el trayecto

$$P_R(d)[\text{dBW}] = P_R(d_0)[\text{dBW}] - 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

$$PL(d)[\text{dB}] = PL(d_0)[\text{dB}] + 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

Entorno	Exponente, n
Espacio libre	2
Reflexión especular ideal	4
Entorno urbano	2.7 - 3.5
Entorno urbano (shadowing)	3 - 5
En edificios (visión directa)	1.6 - 1.8
En edificios (camino obstruido)	4 - 6
En industria (camino obstruido)	2 - 3



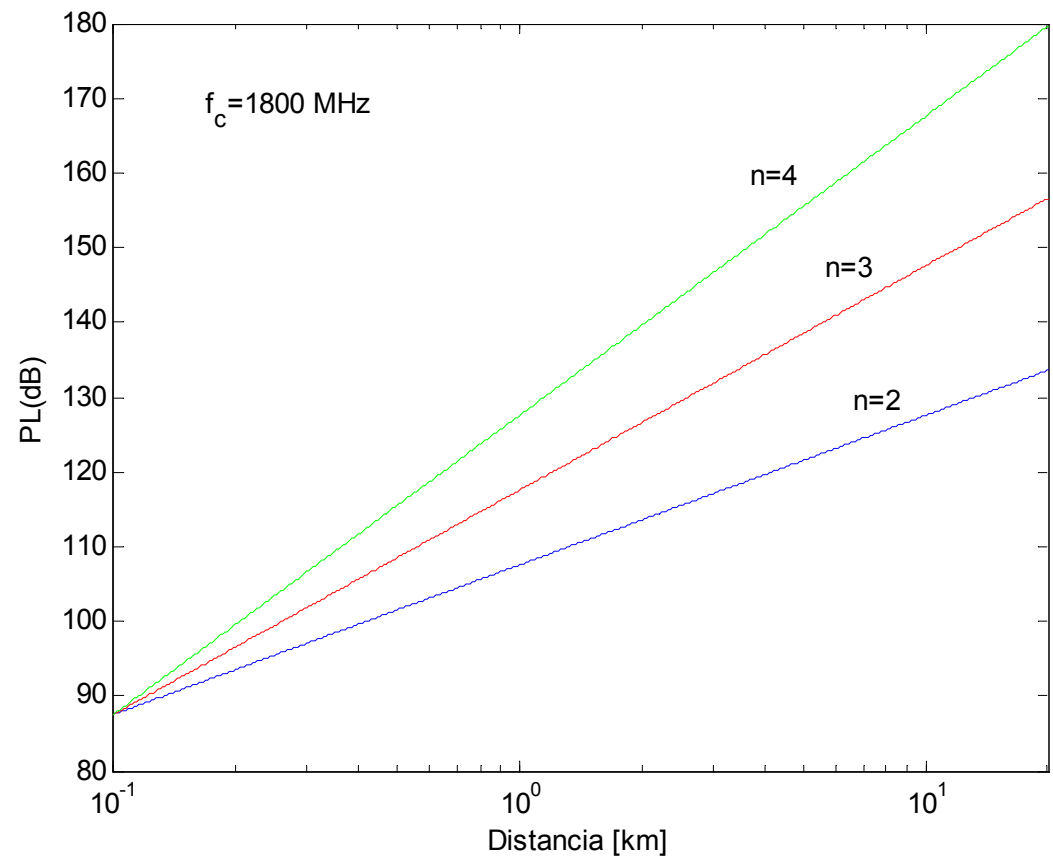


# Modelos de gran escala: log-distancia

## □ Pérdidas medias en el trayecto

$$PL(d)[\text{dB}] = PL(d_0)[\text{dB}] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

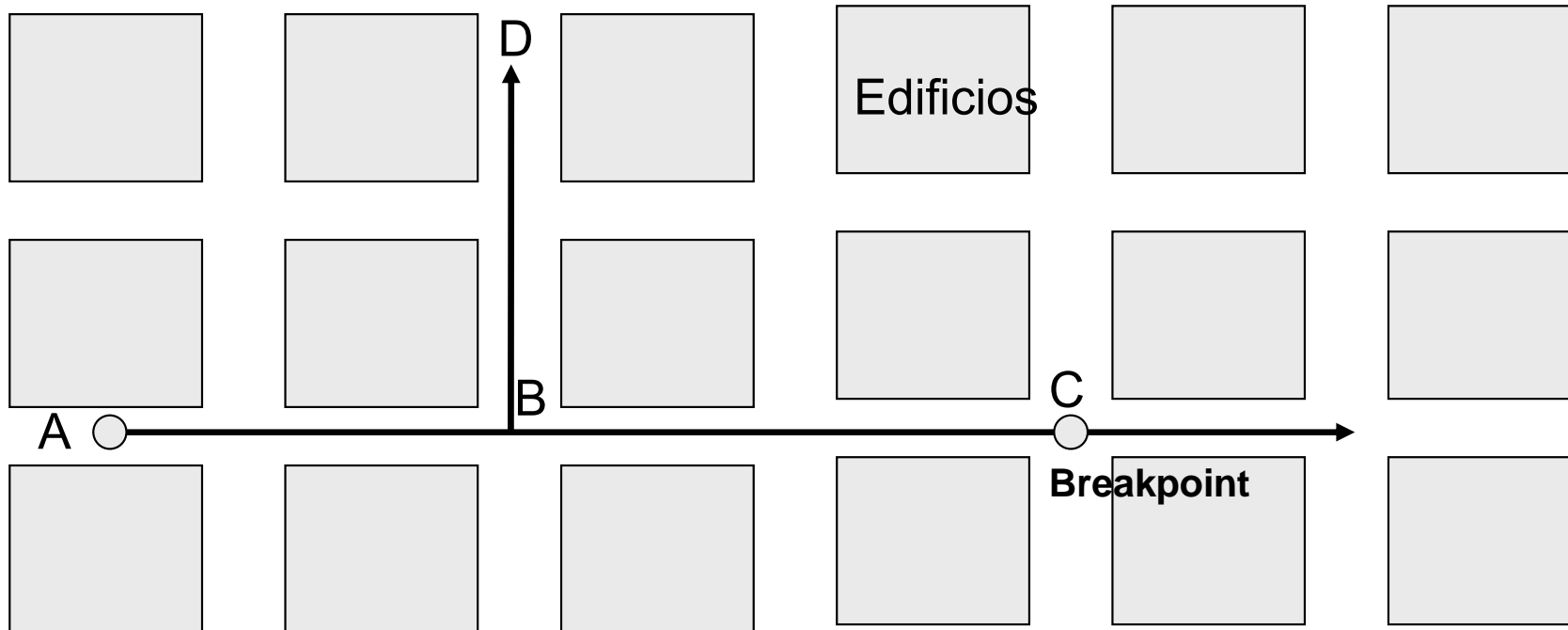
- Lineal cuando la distancia se expresa en unidades logarítmicas
  - log-distancia



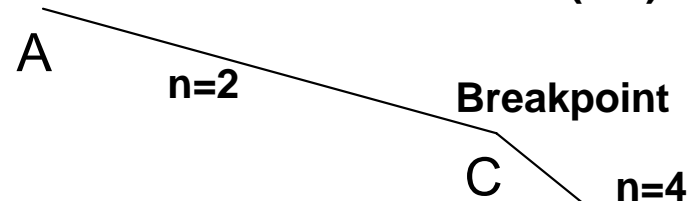


# Microceldas urbanas

□ Dependiendo del perfil, el índice  $n$  puede variar

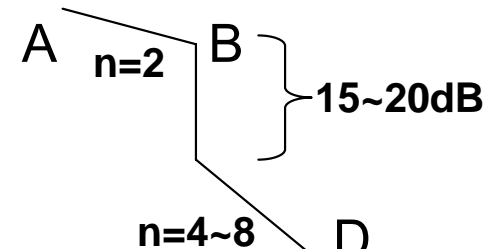


Potencia Media Recibida (dB)



log (distancia)

Potencia Media Recibida (dB)



log (distancia)

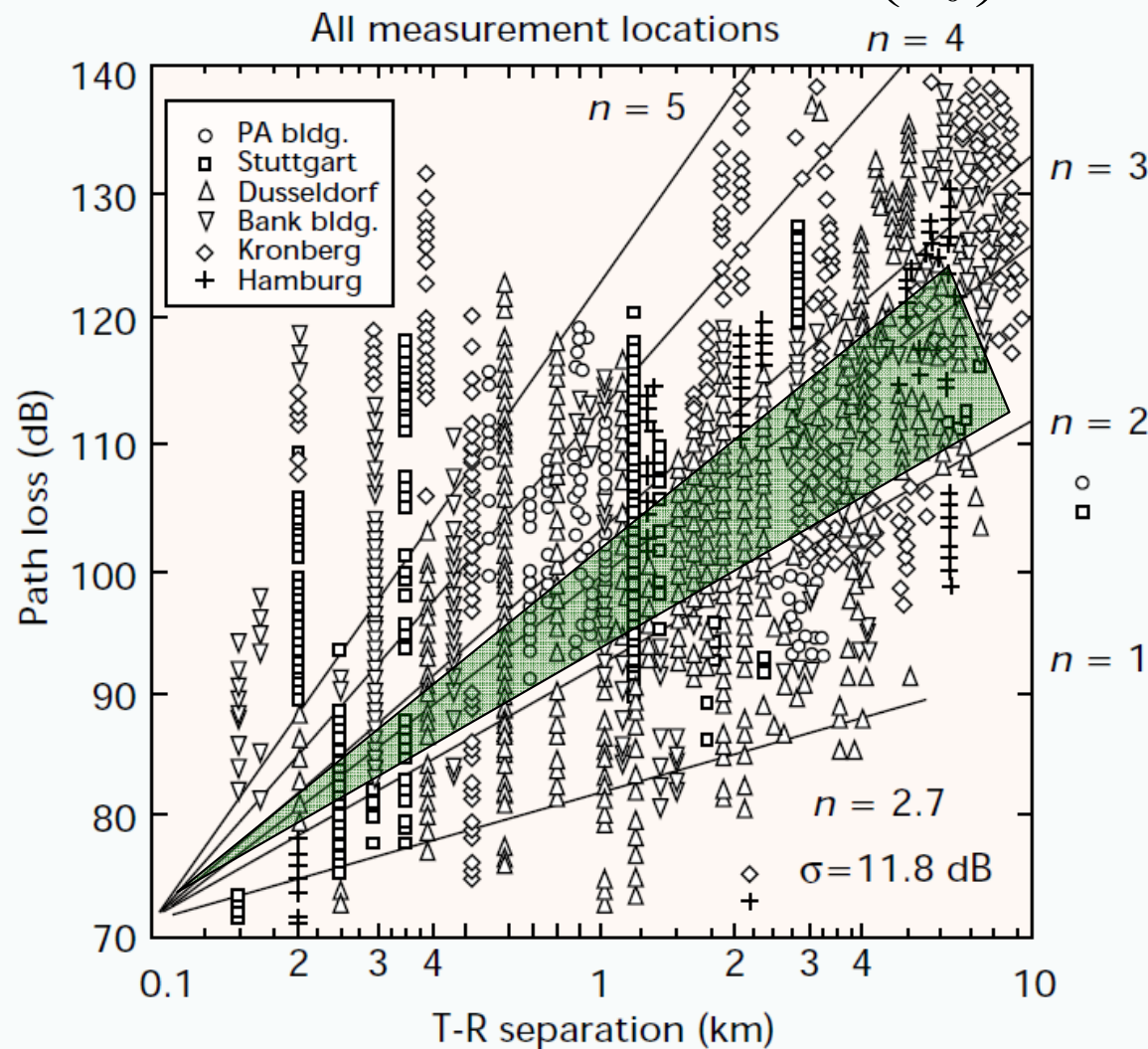
# Modelos de gran escala: log-normal

## Variaciones entorno a la media

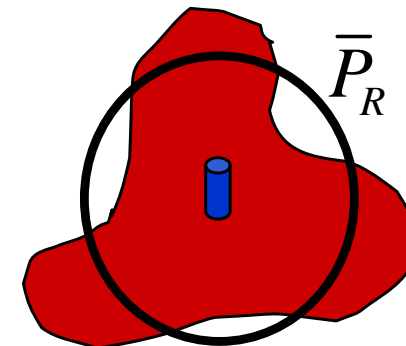
$$PL(d)[\text{dB}] = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$$

Componente de desvanecimiento  
Log-normal [dB]

Variable aleatoria Gaussiana  $(0, \sigma_{PL}^2)$   
[dB]



## Celdas en forma de ameba





# Modelos de gran escala: log-normal

## □ Variaciones entorno a la media

$$PL(d)[\text{dB}] = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$$

Componente de desvanecimiento  
Log-distancia [dB]

Variable aleatoria Gaussiana  $(0, \sigma_{PL}^2)$  [dB]

Building	Frequency (MHz)	n	$\sigma$ (dB)
Retail Stores	914	2.2	8.7
Grocery Store	914	1.8	5.2
Office, hard partition	1500	3.0	7.0
Office, soft partition	900	2.4	9.6
Office, soft partition	1900	2.6	14.1
Factory LOS			
Textile/Chemical	1300	2.0	3.0
Textile/Chemical	4000	2.1	7.0
Paper/Cereals	1300	1.8	6.0
Metalworking	1300	1.6	5.8
Suburban Home			



# Ejemplo: Determinar “n” y $\sigma^2$

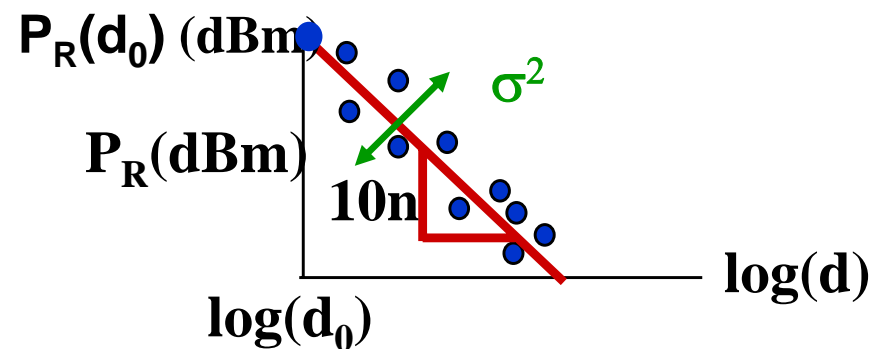
□ Encontrar los parámetros del modelo log-normal

- “n” y  $\sigma^2$

$$P_R(d) [\text{dBm}] = P_R(d_0) [\text{dBm}] - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$$

Componente de desvanecimiento  
Log-distancia [dB]

Variable aleatoria Gaussiana  $(0, \sigma^2)$  [dB]





# Ejemplo: Determinar “n” y $\sigma^2$

- ❑ Asuma  $P_R(d_0) = 0$  dBm y  $d_0 = 100$  m
- ❑ Asuma que la potencia recibida  $P_R(d)$  se mide a distancias 100 m, 200 m, 1000 m y 3000 m,
- ❑ Encontrar los parámetros del modelo log-normal
  - “n” y  $\sigma^2$

Distancia desde el transmisor	Potencia Recibida
100 m	0 dBm
200 m	-20 dBm
1000 m	-35 dBm
3000 m	-70 dBm

Componente de desvanecimiento  
Log-distancia [dB]

$$P_R(d) [\text{dBm}] = P_R(d_0) [\text{dBm}] - 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

Variable aleatoria Gaussiana  $(0, \sigma^2)$  [dB]



# Ejemplo: Determinar “n” y $\sigma^2$

## □ Modelo log-normal

- Cálculo de n

Distancia	$P_R(d)$ (dBm) media experimental	$P_R(d)$ (dBm) media Modelo log-normal
100m ( $d_0$ )	0	0
200m	-20	-3n
1000m	-35	-10n
3000m	-70	-14.77n

$$\overline{P_R}(d) [\text{dBm}] = P_R(d_0) [\text{dBm}] - 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right)$$



# Ejemplo: Determinar “n” y $\sigma^2$

## Modelo log-normal

### • Cálculo de n

$$\overline{P_R}(d)[\text{dBm}] = P_R(d_0)[\text{dBm}] - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

Distancia	$P_R(d)$ (dBm) media experimental	$P_R(d)$ (dBm) media Modelo log-normal
100m ( $d_0$ )	0	0
200m	-20	-3n
1000m	-35	-10n
3000m	-70	-14.77n

### • Error cuadrático

$$- \varepsilon^2(n) = (0-0)^2 + (-20-(-3n))^2 + (-35-(-10n))^2 + (-70-(-14.77n))^2$$

### • Error cuadrático medio

$$\varepsilon^2(n) = \frac{1}{4} \left( 0 + (3n - 20)^2 + (10n - 35)^2 + (14.77n - 70)^2 \right)$$

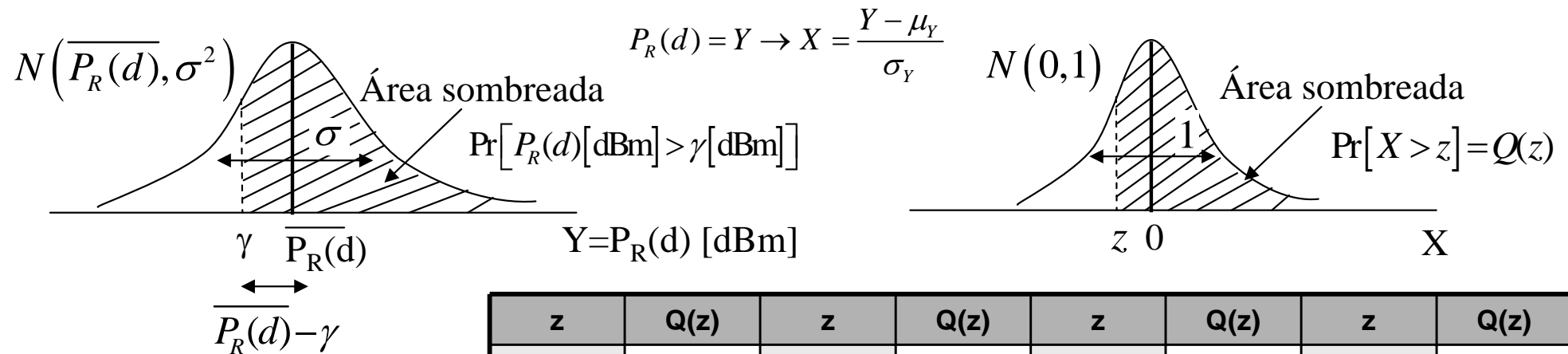
$$n_{\text{opt}} \rightarrow \frac{d\varepsilon^2(n)}{dn} = 0$$

$$\sigma = \sqrt{\varepsilon^2(n_{\text{opt}})} [\text{dB}]$$

# Cálculo de coberturas

□ El Modelo Log-normal (shadowing) nos permite definir probabilidades de coberturas.

- La probabilidad de que  $P_R(d)$  [dBm] supere  $\gamma$  [dBm]:
  - Estadística Gaussiana



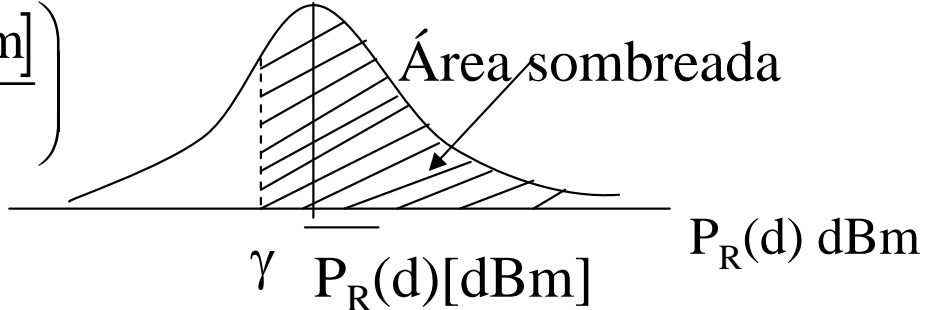
z	Q(z)	z	Q(z)	z	Q(z)	z	Q(z)
0.0	0.5	1.0	0.15866	2.0	0.02275	3.0	0.00135
0.1	0.46017	1.1	0.13567	2.1	0.01786	3.1	0.00097
0.2	0.42074	1.2	0.11507	2.2	0.01390	3.2	0.00069
0.3	0.38209	1.3	0.09680	2.3	0.01072	3.3	0.00048
0.4	0.34458	1.4	0.08076	2.4	0.00820	3.4	0.00034
0.5	0.30854	1.5	0.06681	2.5	0.00621	3.5	0.00023
0.6	0.27425	1.6	0.05480	2.6	0.00466	3.6	0.00016
0.7	0.24196	1.7	0.04457	2.7	0.00347	3.7	0.00011
0.8	0.21118	1.8	0.03593	2.8	0.00256	3.8	0.00007
0.9	0.18406	1.9	0.02872	2.9	0.00187	3.9	0.00005



# Cálculo de coberturas

□ El Modelo Log-normal (shadowing) nos permite definir probabilidades de coberturas.

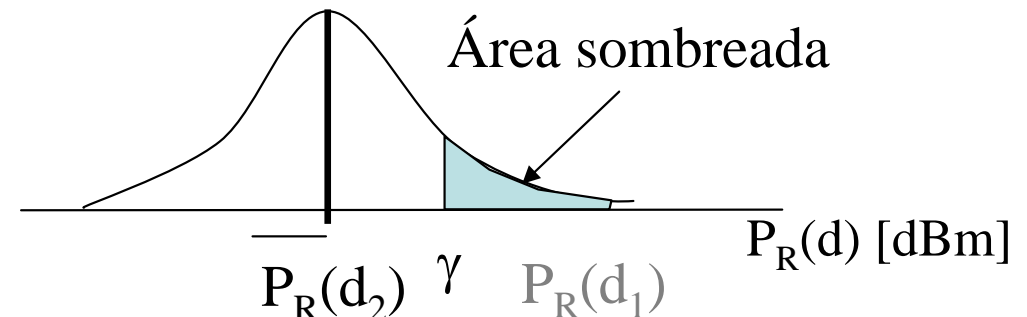
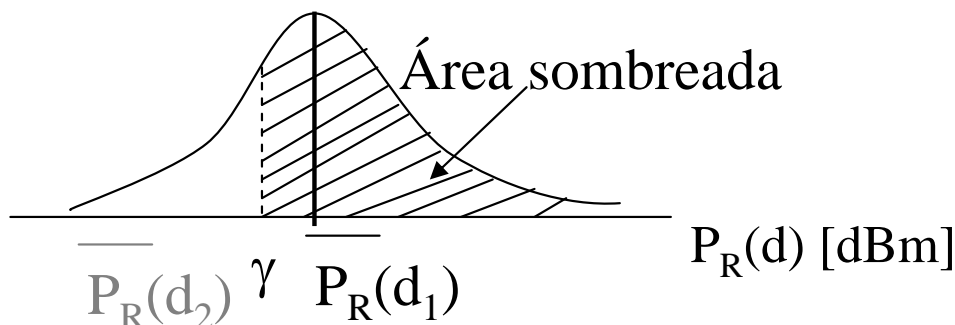
- La probabilidad de que  $P_R(d)$  [dBm] supere  $\gamma$  [dBm]:

$$\Pr[P_R(d) [\text{dBm}] > \gamma [\text{dBm}]] = Q\left(\frac{\gamma [\text{dBm}] - \overline{P}_R(d) [\text{dBm}]}{\sigma [\text{dB}]}\right)$$


- Efecto de la variación de la distancia ( $\gamma$  [dBm] permanece constante).

– Supongamos  $d_1 < d_2$

$$\rightarrow \overline{P}_R(d_1) [\text{dBm}] > \overline{P}_R(d_2) [\text{dBm}]$$

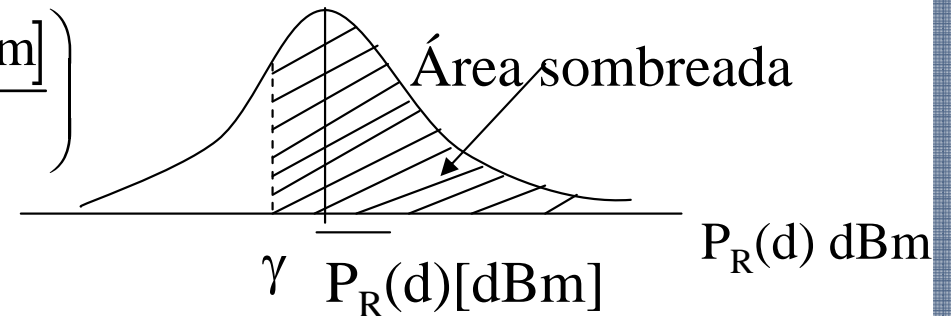


# Cálculo de coberturas

□ El Modelo Log-normal (shadowing) nos permite definir probabilidades de coberturas.

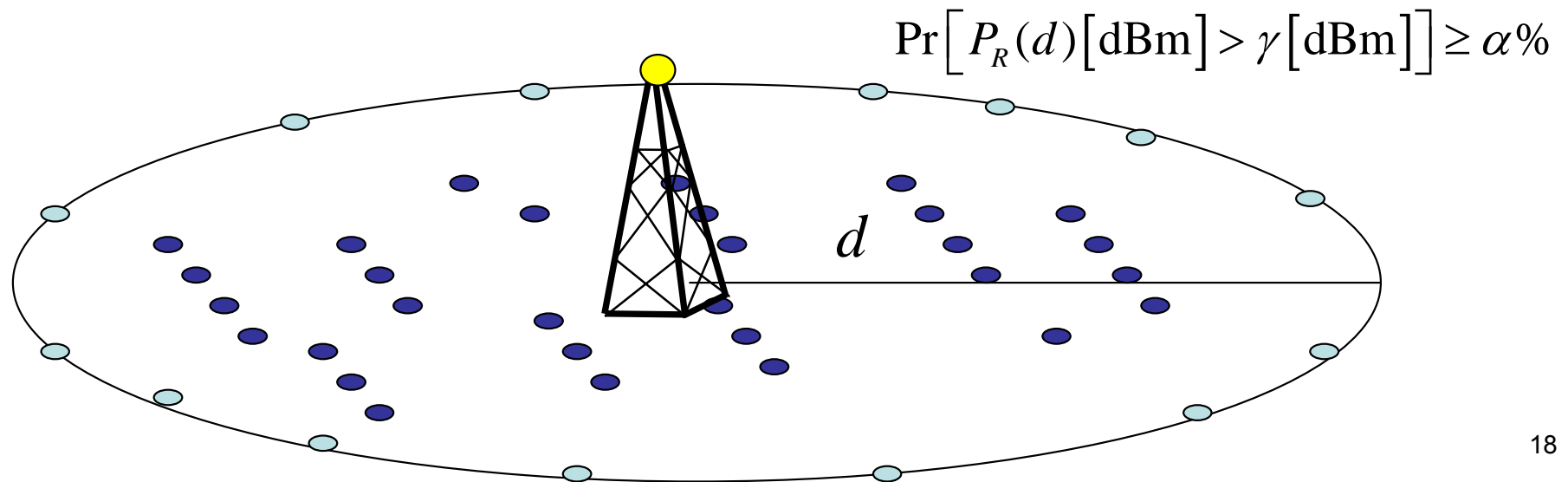
- La probabilidad de que  $P_R(d)$  [dBm] supere  $\gamma$  [dBm]:

$$\Pr[P_R(d)[\text{dBm}] > \gamma[\text{dBm}]] = Q\left(\frac{\gamma[\text{dBm}] - \bar{P}_R(d)[\text{dBm}]}{\sigma[\text{dB}]}\right)$$



□ Planificación de red:

- Encontrar el valor de “d” para el que la potencia recibida media supere el umbral  $\gamma$  [dBm] con una probabilidad  $\alpha$  %.



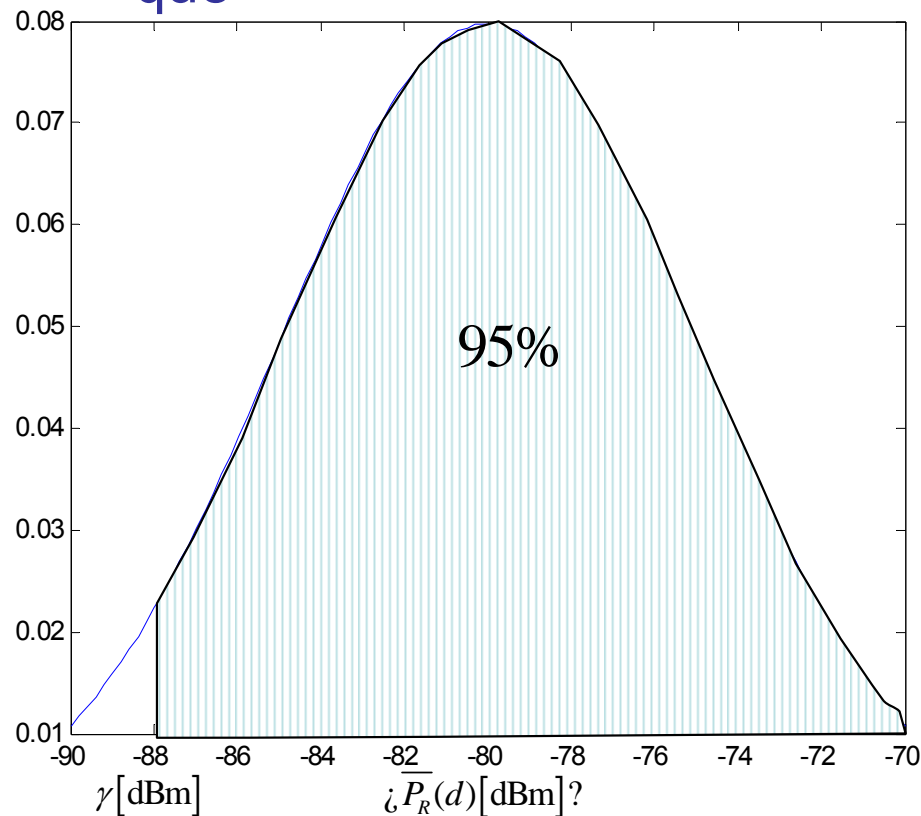
# Potencia recibida y PDF normal

- Encontrar el valor de “d” para el que la potencia recibida media supere el umbral  $\gamma$  [dBm] con una probabilidad  $\alpha$  %

$$\Pr[P_R(d)[\text{dBm}] > \gamma[\text{dBm}]] \geq \alpha\%$$

- Ejemplo:  $\gamma = -88$  [dBm];  $\sigma = 5$  dB; ¿cuánto tiene que valer  $P_R(d)$  para que

$$\Pr[P_R(d)[\text{dBm}] > -88[\text{dBm}]] \geq 95\%$$



z	Q(z)	z	Q(z)	z	Q(z)	z	Q(z)
0.0	0.5	1.0	0.15866	2.0	0.02275	3.0	0.00135
0.1	0.46017	1.1	0.13567	2.1	0.01786	3.1	0.00097
0.2	0.42074	1.2	0.11507	2.2	0.01390	3.2	0.00069
0.3	0.38209	1.3	0.09680	2.3	0.01072	3.3	0.00048
0.4	0.34458	1.4	0.08076	2.4	0.00820	3.4	0.00034
0.5	0.30854	1.5	0.06681	2.5	0.00621	3.5	0.00023
0.6	0.27425	1.6	0.05480	2.6	0.00466	3.6	0.00016
0.7	0.24196	1.7	0.04457	2.7	0.00347	3.7	0.00011
0.8	0.21118	1.8	0.03593	2.8	0.00256	3.8	0.00007
0.9	0.18406	1.9	0.02872	2.9	0.00187	3.9	0.00005

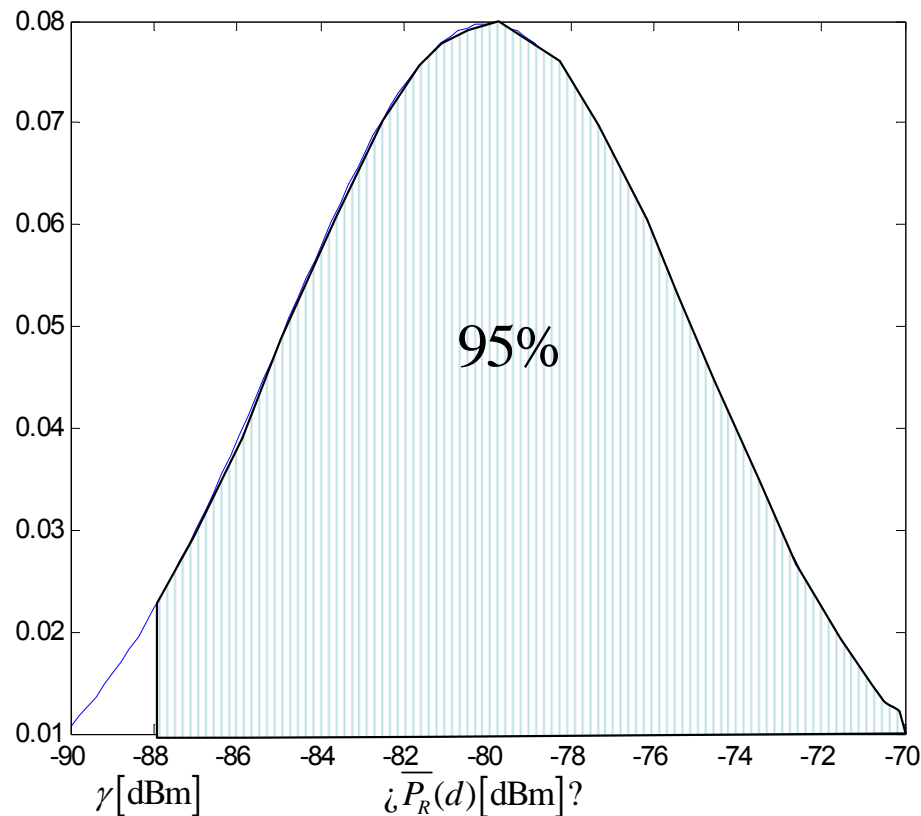
# Potencia recibida y PDF normal

□ Ejemplo:  $\gamma = -88$  [dBm];  $\sigma = 5$  dB; ¿cuánto tiene que valer  $P_R(d)$  para que

$$\Pr[P_R(d)[\text{dBm}] > -88[\text{dBm}]] = Q\left(\frac{-88[\text{dBm}] - \bar{P}_R(d)[\text{dBm}]}{5[\text{dB}]}\right) \geq 0.95?$$

• Equivalentemente...

$$\Pr[P_R(d)[\text{dBm}] < -88[\text{dBm}]] = Q\left(\frac{\bar{P}_R(d)[\text{dBm}] - \gamma[\text{dBm}]}{5[\text{dB}]}\right) \leq 0.05?$$



z	Q(z)	z	Q(z)	z	Q(z)	z	Q(z)
0.0	0.5	1.0	0.15866	2.0	0.02275	3.0	0.00135
0.1	0.46017	1.1	0.13567	2.1	0.01786	3.1	0.00097
0.2	0.42074	1.2	0.11507	2.2	0.01390	3.2	0.00069
0.3	0.38209	1.3	0.09680	2.3	0.01072	3.3	0.00048
0.4	0.34458	1.4	0.08076	2.4	0.00820	3.4	0.00034
0.5	0.30854	1.5	0.06681	2.5	0.00621	3.5	0.00023
0.6	0.27425	1.6	0.05480	2.6	0.00466	3.6	0.00016
0.7	0.24196	1.7	0.04457	2.7	0.00347	3.7	0.00011
0.8	0.21118	1.8	0.03593	2.8	0.00256	3.8	0.00007
0.9	0.18406	1.9	0.02872	2.9	0.00187	3.9	0.00005

$$\frac{\bar{P}_R(d)[\text{dBm}] - \gamma[\text{dBm}]}{5[\text{dB}]} \geq 1.6 \rightarrow \bar{P}_R(d)[\text{dBm}] \geq 5 \times 1.6 - 88 = -80[\text{dBm}]$$

# Reflexión: Modelo de N-Rayos

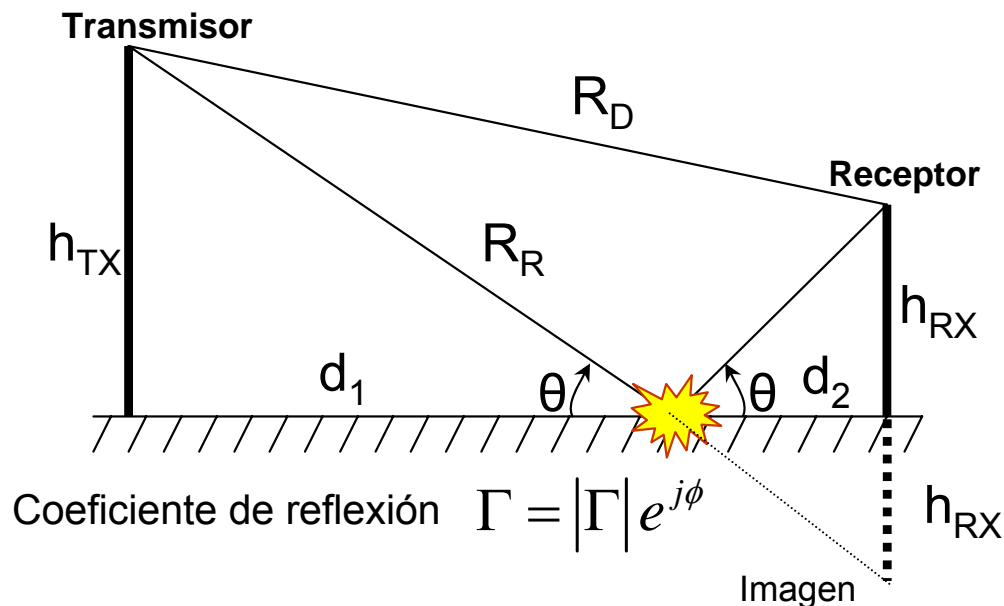
□ Se aplica cuando, en la mayor parte del tiempo, llegan al receptor otras componentes distintas de la LOS.

□ Reflexión en Tierra: Modelo de 2-Rayos

- Campo recibido: contribución del rayo directo ( $R_D$ ) y del reflejado ( $R_R$ )

$$E_{RX} = E_{FS} + E_{REFLEJADO} = E_{FS} \left( 1 + \Gamma e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta d} \right) \left[ \frac{V}{m} \right]$$

Desfase proporcional a la diferencia de caminos



$$\tan \theta = \frac{h_{TX} + h_{RX}}{d_1 + d_2} = \frac{h_{TX}}{d_1}$$

$$d_1 = \frac{h_{TX}}{h_{TX} + h_{RX}} (d_1 + d_2) = \frac{h_{TX}}{h_{TX} + h_{RX}} d$$

$$d_2 = \frac{h_{RX}}{h_{TX} + h_{RX}} d$$

# Reflexión: Modelo de 2-Rayos

## Desfase entre rayo directo y reflejado

- Distancia recorrida por el rayo directo

$$\sqrt{d^2 + (h_{TX} - h_{RX})^2} = d \sqrt{1 + \frac{(h_{TX} - h_{RX})^2}{d^2}}$$

$$\approx d \left( 1 + \frac{(h_{TX} - h_{RX})^2}{2d^2} \right)$$

↑

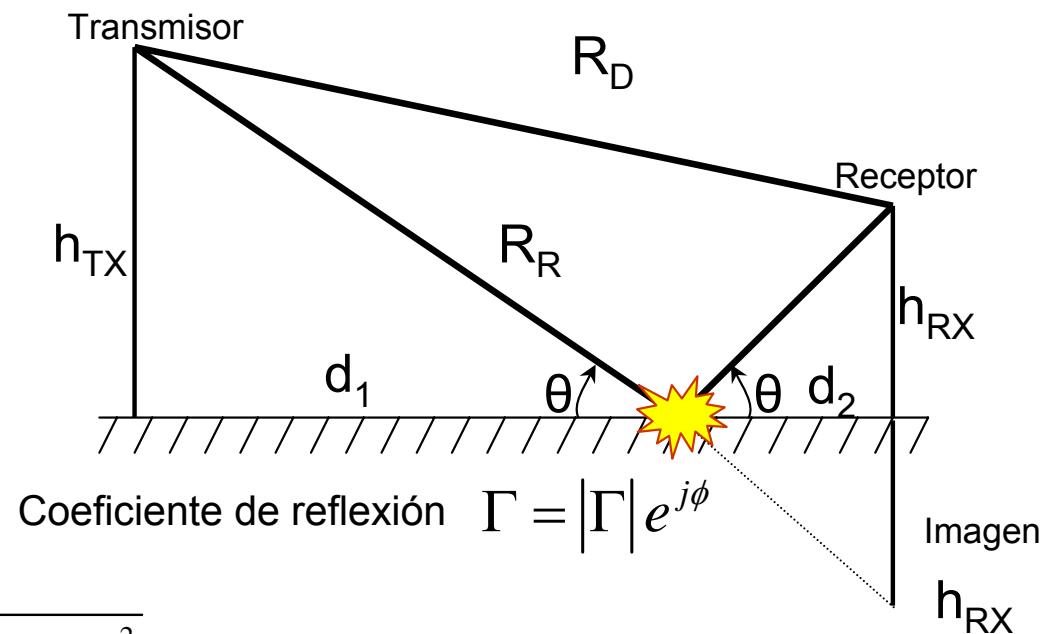
$$\sqrt{1+x} \underset{x \rightarrow 0}{\approx} 1 + \frac{x}{2}$$

- Distancia recorrida por el rayo reflejado

$$\sqrt{d^2 + (h_{TX} + h_{RX})^2} = d \sqrt{1 + \frac{(h_{TX} + h_{RX})^2}{d^2}}$$

$$\approx d \left( 1 + \frac{(h_{TX} + h_{RX})^2}{2d^2} \right)$$

- Diferencia  $\Delta d = \sqrt{d^2 + (h_{TX} + h_{RX})^2} - \sqrt{d^2 + (h_{TX} - h_{RX})^2} \approx \frac{2h_{TX}h_{RX}}{d}$



# Reflexión especular en tierra

□ Casos prácticos:  $\Gamma \approx -1$ ,  $d \gg h_{TX}, h_{RX}$

$$|F| = 2 \left| \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{h_{TX} h_{RX}}{d} \right) \right| \underset{d \gg h_{TX} h_{RX}}{\approx} \frac{4\pi h_{TX} h_{RX}}{\lambda d}$$

□ Potencia recibida

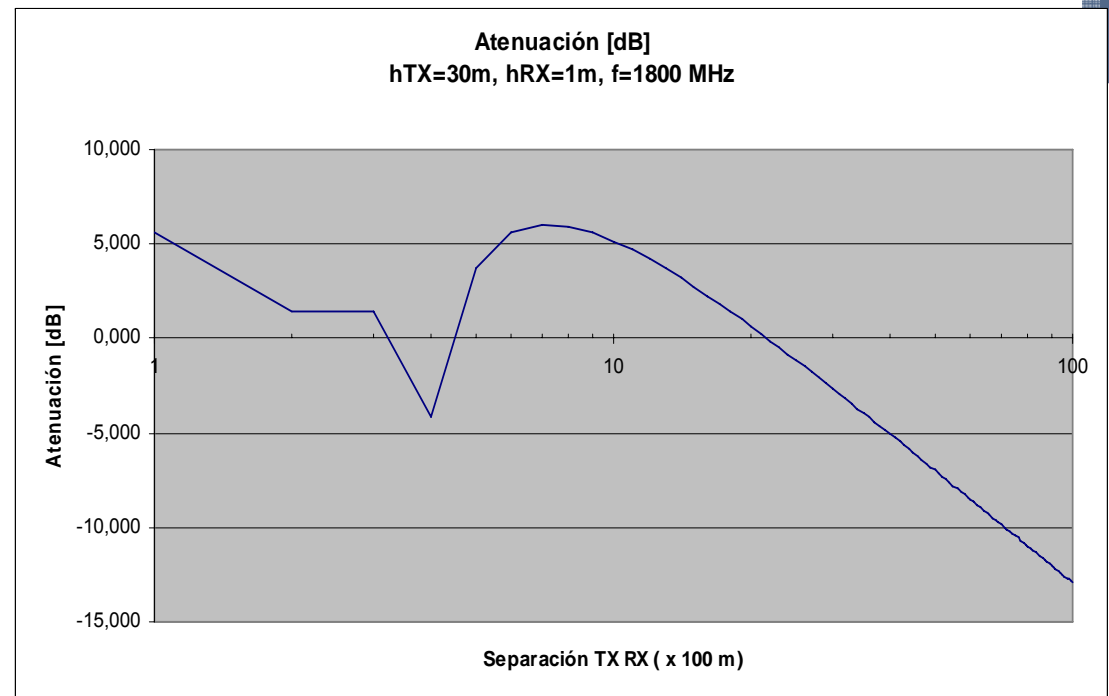
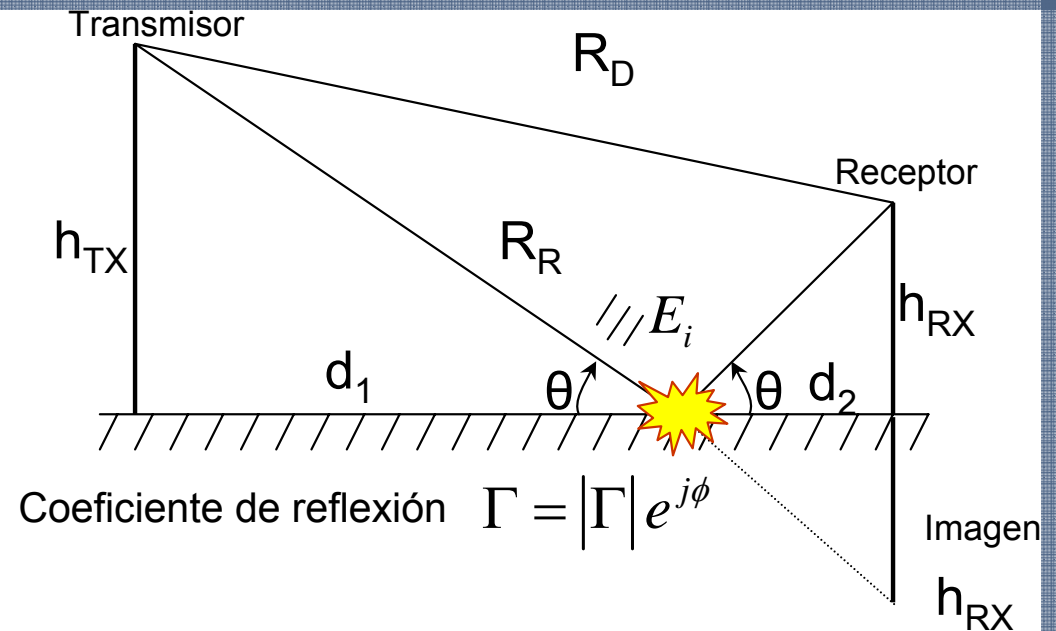
$$P_R = P_T G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 |F|^2$$

$$P_R = P_T G_T G_R \left( \frac{h_{TX} h_{RX}}{d^2} \right)^2$$

□ Pérdidas en el trayecto (n=4)

$$PL(d) = 40 \log(d) - 20 \log(h_{TX} h_{RX})$$

$$PL(d) = PL(d_0) + 40 \log \left( \frac{d}{d_0} \right)$$





# Ejemplo: 2 rayos

## □ Sistema GPRS Clase 10 (4+2)

- $f_c = 1800$  MHz, Ancho de Banda: 200 kHz
- Régimen binario: 57.4 kbits/sec (downlink)
- Distancia: 15 km. Modelo de 2 rayos.
- Transmisor: Potencia: 2 W,  $h_{TX}=40$  m.
- Receptor:  $h_{RX}=1,5$  m, Figura de ruido: 9 dB

## □ ¿ $E_b/N_0$ ?

- $P_{TX} = 2$  W  $\rightarrow 10 \log (2/10^{-3}) = 33$  dBm
- $PL[dB]=40\log(d)-20 \log(h_{TX}h_{RX})=40\log(15000)-20\log(40\times 1,5)=131,48$  dB
- $P_{RX} = 33$  dBm -131,48 dB = -98,48 dBm
- Ruido:

$$- kT_{eq}B=1.3803\times 10^{-23} \times 290\times(10^{9/10} -1) \times 2.0\times 10^5 = 5.5 \times 10^{-15}W \rightarrow -112,55 \text{ dBm.}$$

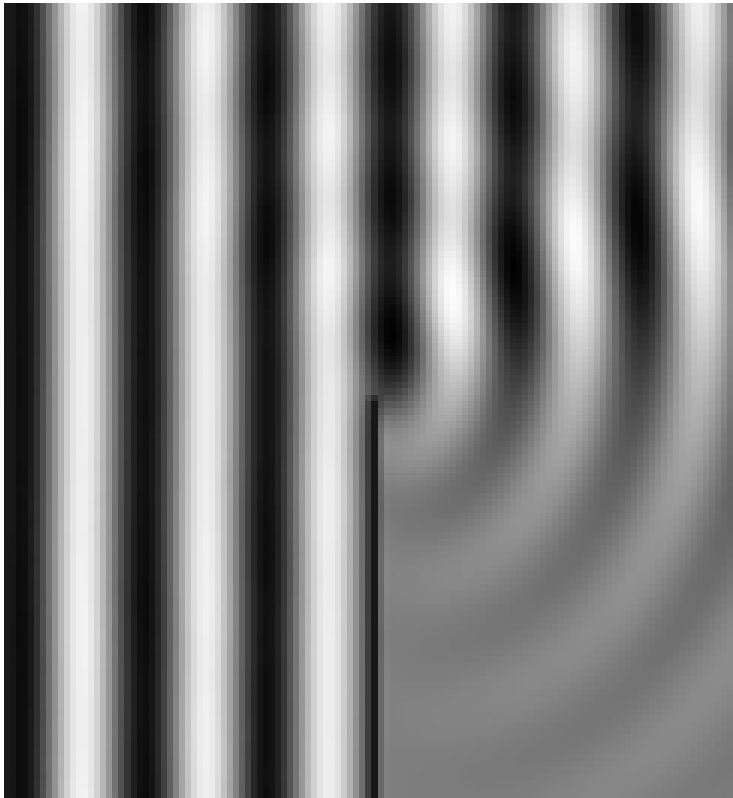
$$\left(\frac{S}{N}\right)[dB] = -98,48 \text{ dBm} - (-112,55) \text{ dBm} = 14 \text{ dB}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{E_b \times R_b}{N_0 \times B} \rightarrow \left(\frac{E_b}{N_0}\right)[dB] = \left(\frac{S}{N}\right)[dB] + 10\log\left(\frac{B}{R_b}\right) = 19,42 \text{ dB}$$



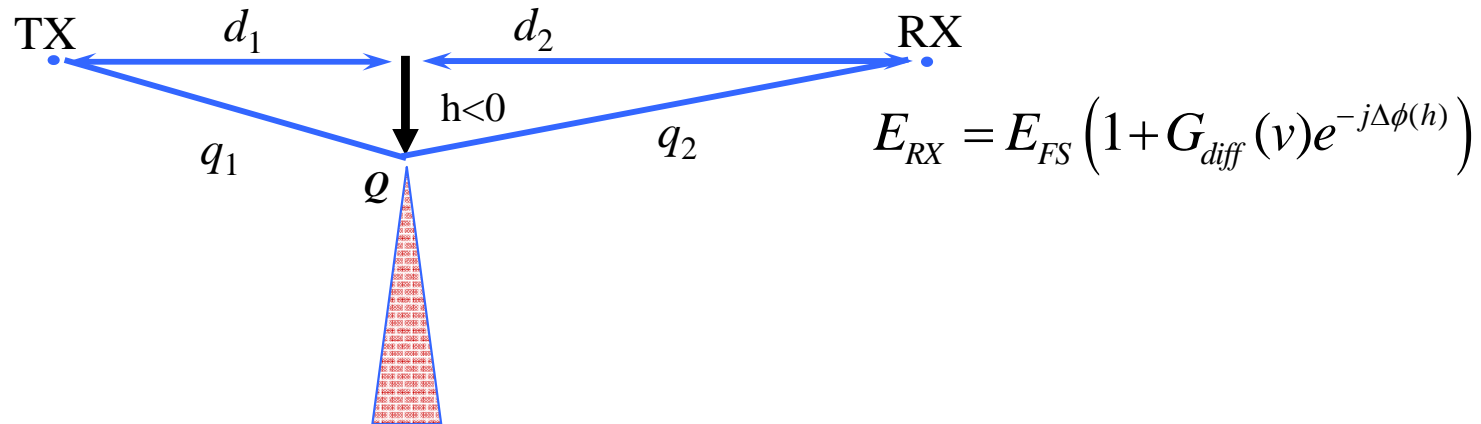
# Difracción

- ❑ La difracción tiene lugar cuando el frente de la onda choca con el borde de un obstáculo.
- Se generan “ondas secundarias” que se propagan en la región de sombra
  - Por el mayor recorrido se produce un desplazamiento de fase.



# Modelando la Difracción

## □ Difracción “filo de cuchillo”



- Donde  $E_{FS}$  es el campo correspondiente a espacio libre.

## □ Se demuestra en base a la teoría de Huygens

$$\frac{E_{RX}}{E_{FS}} = \left( 1 + G_{diff}(v) e^{-j\Delta\phi(h)} \right) = F(v) = \frac{(1+j)}{2} \int_v^{\infty} e^{-j\pi \frac{t^2}{2}} dt$$

- donde  $v$  se define como el “índice de difracción” que provoca el obstáculo.

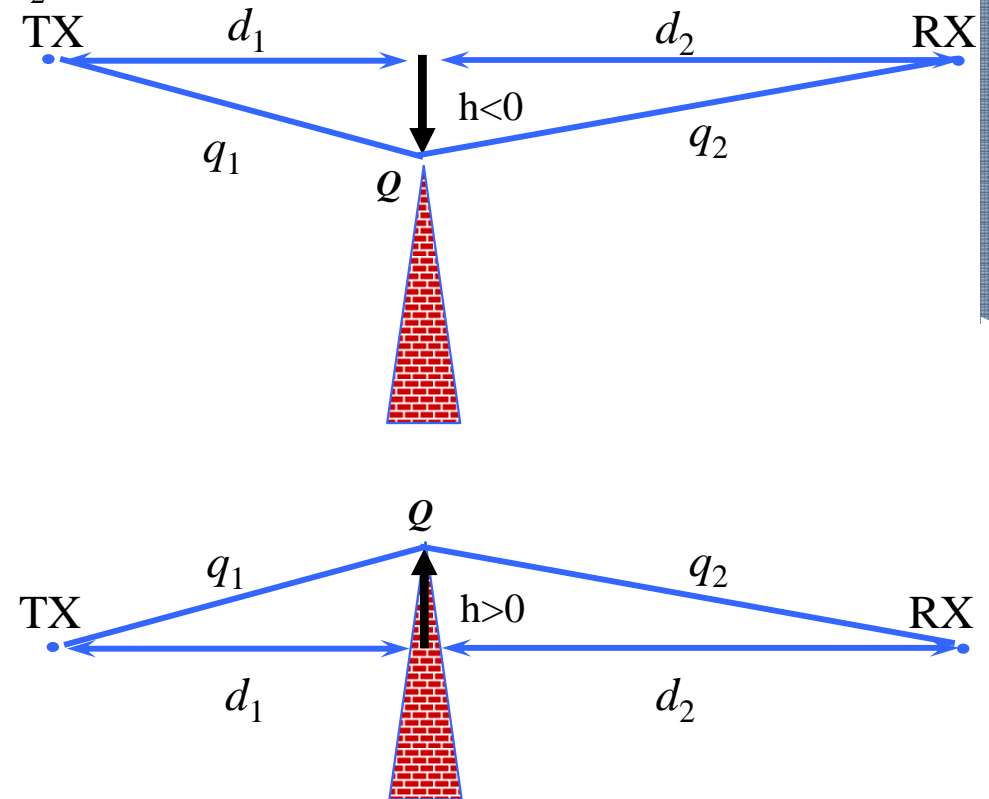
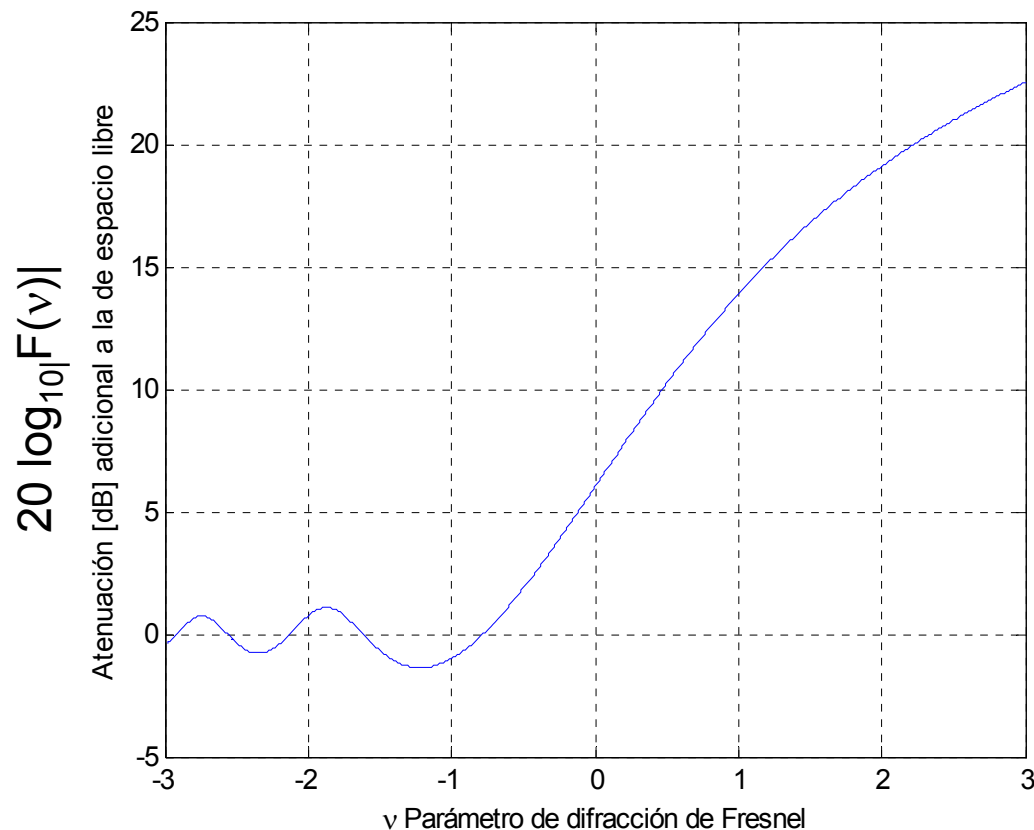
$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}}$$

# Modelando la Difracción

- Los resultados de la integral anterior (integral de Fresnel) se obtienen de tablas para distintos valores de  $v$

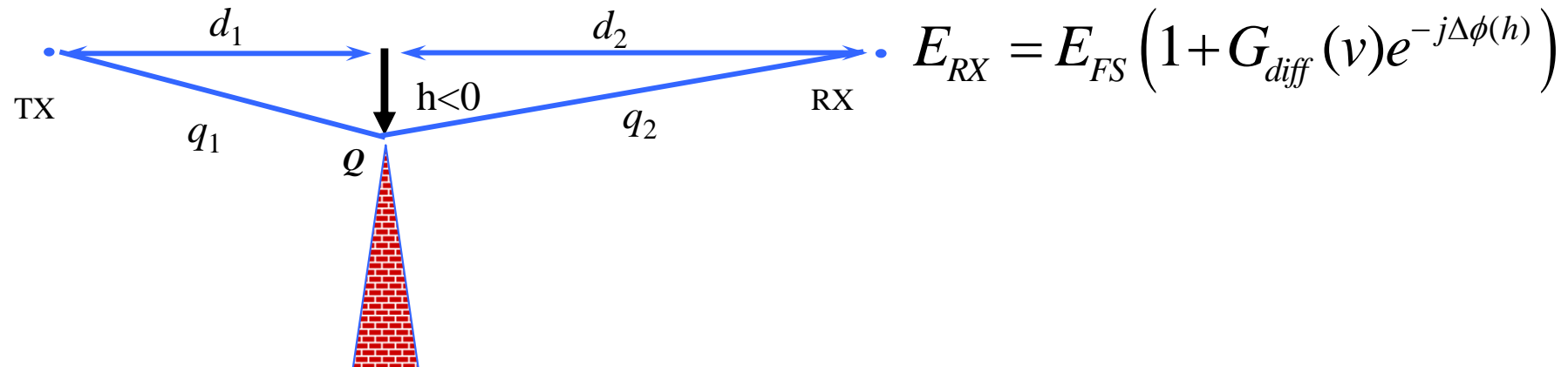
$$\frac{E_{RX}}{E_{FS}} = F(v) \quad v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}}$$

ATENUACIÓN POR DIFRACCIÓN [dB]



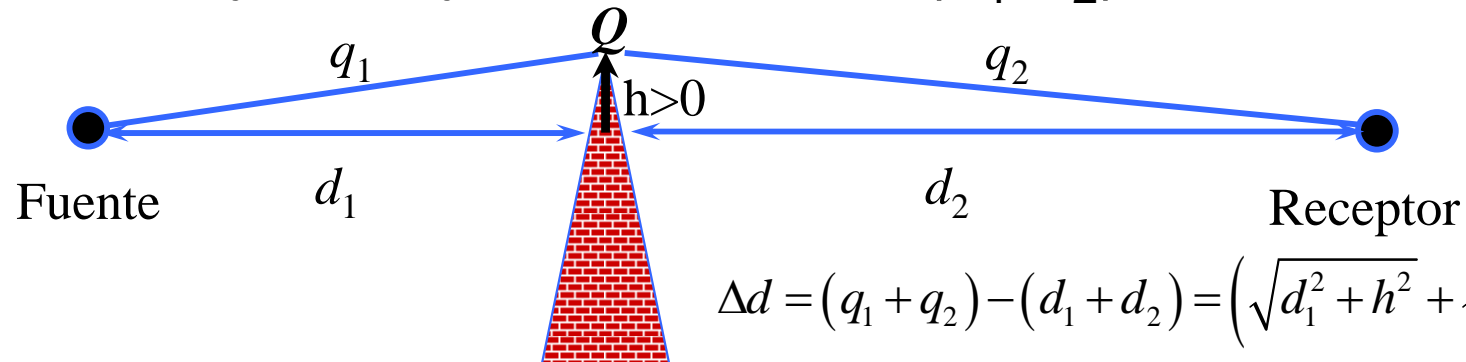
# Modelando la Difracción

- Dependiendo del “despejamiento” ( $h$ ), puede haber variaciones en la señal recibida
- Cuando el desfase es un múltiplo par de  $\pi$  radianes se produce una interferencia constructiva (suma en fase)
  - Cuando el desfase es un múltiplo impar de  $\pi$  radianes hay interferencia destructiva (suma en contrafase)



# Modelando la Difracción

- Diferencia de camino entre la trayectoria directa ( $d_1-d_2$ ) ahora obstruida, y la trayectoria por Q, ( $q_1-q_2$ )



$$\Delta d = (q_1 + q_2) - (d_1 + d_2) = \left( \sqrt{d_1^2 + h^2} + \sqrt{d_2^2 + h^2} \right) - (d_1 + d_2)$$

$$\Delta d = \left( d_1 \sqrt{1 + \left( \frac{h}{d_1} \right)^2} + d_2 \sqrt{1 + \left( \frac{h}{d_2} \right)^2} \right) - (d_1 + d_2)$$

- Para  $h \ll d_1, d_2$ , se puede aproximar la diferencia de camino  $\Delta d$  por

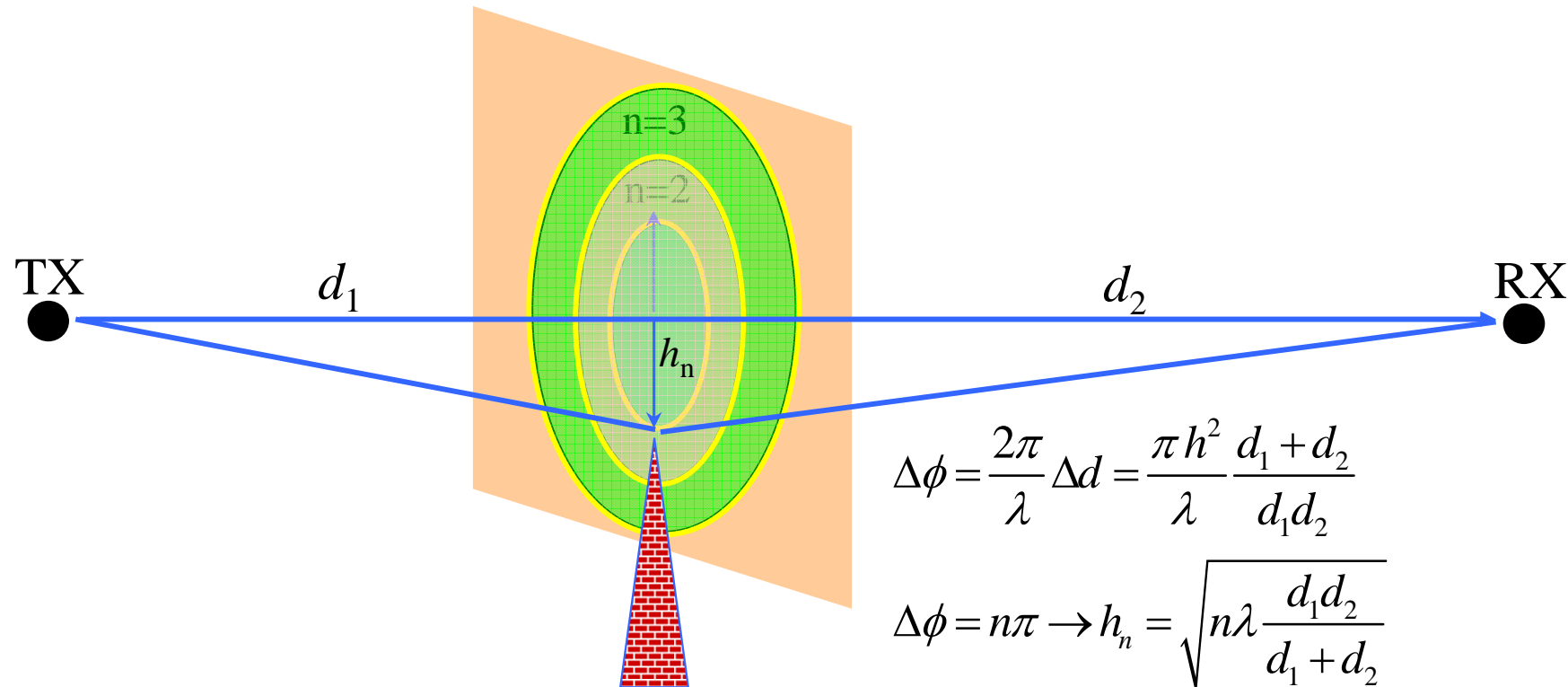
$$\sqrt{1+x} \underset{x \rightarrow 0}{\approx} 1 + \frac{x}{2}$$

$$\Delta d \approx d_1 \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{d_1} \right)^2 \right) + d_2 \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{d_2} \right)^2 \right) - (d_1 + d_2)$$

$$\Delta d = \frac{h^2}{2} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \rightarrow \Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d = \frac{\pi h^2}{\lambda} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} = \frac{\pi v^2}{2}$$

# Modelando la Difracción

- Existe una simetría cilíndrica en torno al eje  $d_1$ - $d_2$



- los  $h_n$  determinan radios de círculos concéntricos en el plano perpendicular a la dirección de propagación.
  - Los haces dentro del primer círculo difieren en fase entre si, y como mucho, en  $\pi$ .
    - Para  $h_1$ , el desfase entre el rayo directo y el refractado es de  $\pi$  radianes  $\Leftrightarrow$  la diferencia de caminos es de  $\lambda/2$  metros

# Modelando la Difracción

- Tridimensionalmente, las regiones de Fresnel son elipsoidales con radios:

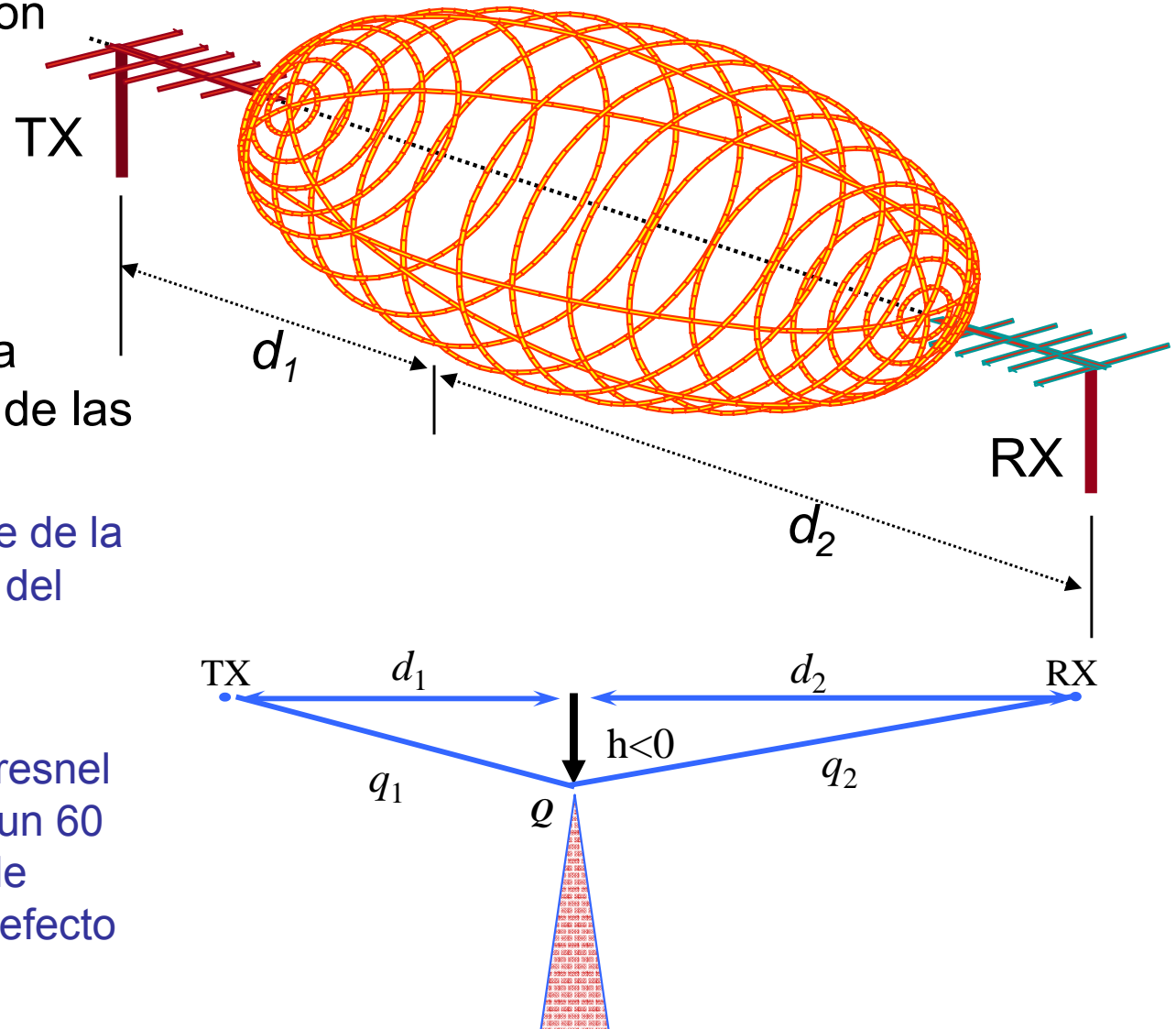
$$h_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

- La difracción será más severa cuanto menor sea el índice  $n$  de las regiones afectadas.

- El grado de obstrucción depende de la frecuencia ( $1/\lambda$ ) y la posición del obstáculo ( $d_1$ ,  $d_2$ )

- Regla empírica:

- cuando la primera zona de Fresnel está despejada en al menos un 60 % un mayor despejamiento de zonas de Fresnel tiene poco efecto sobre el enlace.



$$\text{Si } -h > 0.6h_1$$

# Propagación en gases

## □ Absorción por gases en la troposfera

- Dos contribuciones: Oxígeno y Vapor de agua
- Atenuación específica: dB/km.

