

TEMA V. MECANISMOS DE PROPAGACIÓN

1. [Propagación en VLF.](#)
 2. [Propagación ionosférica.](#)
 3. [Propagación por Onda de Superficie.](#)
 4. [Propagación por Onda Espacial.](#)
 - 4.1 [Modelo de propagación de Tierra Plana.](#)
 - 4.2 [Influencia de la troposfera en la propagación.](#)
 - 4.3 [Modelo de tierra curva.](#)
 - 4.4 [Difracción en obstáculos.](#)
 - 4.5 [Atenuaciones adicionales \(lluvia, vegetación, gases y vapores atmosféricos\).](#)
-

1. PROPAGACIÓN EN MUY BAJAS FRECUENCIAS

1.1. Propagación por efecto guía

La ionosfera se comporta como un conductor ($10^{-5} \sim 10^{-6}$ S/m).

La Tierra también se comporta como un conductor ($10^{-2} \sim 10^{-3}$ S/m).

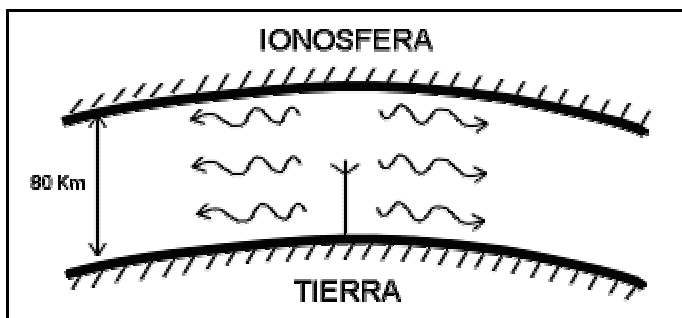


Figura 5.1 El campo eléctrico se confina entre ambos conductores, teniendo menor atenuación que la que ocurriría en espacio libre a esas frecuencias.

El hecho de que los conductores (tierra e ionosfera) no sean perfectos, introduce atenuación.

- para $f < 50$ Hz $\alpha < 1$ dB/1000 Km
- para $f \approx 20$ KHz 5 dB/1000 Km $< \alpha < 15$ dB/1000 Km

Banda de frecuencias (Hz)	Longitud de onda (metros)	Alcance (millas)	Denominación de la banda
30 – 300	$10^7 - 10^6$	6200 - 620	ELF
300 - 3000	$10^6 - 10^5$		ULF
3000 - 30000	$10^5 - 10^4$		VLF

Aplicaciones:

- Navegación (sistema Omega opera entre 10 y 13 KHz)
- Servicio móvil marítimo
- Telégrafo

Ventajas:

- Gran distancia de cobertura
- Poca atenuación
- Estable

Desventajas:

- Ancho de banda muy pequeño \Rightarrow velocidades de transmisión muy pequeñas
- Antenas poco eficaces ($f = 10$ KHz, $L = 250$ m ($\lambda/120$) $\Rightarrow R_r = 0.03 \Omega$). Efectos capacitivos

1.2. Propagación en el mar.

$$\epsilon_r \approx 80, \sigma = 4 \text{ S/m} \Rightarrow \delta = 0.8 \text{ m a } 100 \text{ KHz; } \delta = 2.5 \text{ m a } 10 \text{ KHz}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w\mu\sigma}} \text{ (profundidad de penetración)}$$

con

Características:

- A frecuencias elevadas \Rightarrow atenuación exagerada (no se usa por encima de VLF).
El ruido a esas frecuencias equivale a 10^{14} K (VLF). Si S/N es 20 dB en la atmósfera \Rightarrow S/N \approx 20 dB a la entrada del receptor pues el ruido introducido por el mar es irrelevante frente a esos 10^{14} K. El mar atenúa por igual la señal y el ruido. La relación S/N no se deteriora mucho para atenuaciones inferiores a 100 dB.
- Protege al receptor del ruido atmosférico.

El gran valor de la conductividad frente a $\omega\epsilon$ origina una gran refracción \Rightarrow el campo que se propaga verticalmente en el mar, en tierra lo hace horizontalmente. Es preciso que el campo que se propaga próximo al mar sea vertical debido a que el mar es un buen conductor \Rightarrow las componentes horizontales tienden a cancelarse.

2. PROPAGACIÓN IONOSFÉRICA (SKYWAVE)

Al aumentar la frecuencia de trabajo, la ionosfera se va haciendo cada vez más transparente, menos conductora. A frecuencias superiores a 30 MHz es completamente transparente; a frecuencias inferiores a 1,5 MHz es conductora. La propagación por onda ionosférica se basa en que la señal se refleje en ciertas capas de la ionosfera (repetidor pasivo).

La ionosfera mide entre 90 y 1000 Km. Los enlaces obtenidos son de unos 7.000 Km.

Los terminales son de bajo coste y potencias moderadas.

Inconvenientes:

- Carácter aleatorio de la ionosfera (día, noche...)
 - Gran ruido en esta banda de frecuencia (10^{14} K)
 - Interferencias
 - Grandes desvanecimientos
 - Transmisión de banda estrecha
-

3. PROPAGACIÓN POR ONDA DE SUPERFICIE (GROUNDWAVE)

3.1 Bandas de frecuencia.

Se utilizan las frecuencias $30 \text{ KHz} \leq f \leq 30 \text{ MHz}$

Banda de frecuencias (KHz)	Denominación de la banda	Longitud de onda (metros)
30 – 300	LF	$10^4 - 10^3$
300 – 3.000	MF	$10^3 - 10^2$
3.000 – 30.000	HF	$10^2 - 10^1$

En ciertas condiciones también se puede utilizar el intervalo $30 \text{ MHz} \leq f \leq 150 \text{ MHz}$. Frecuencias más elevadas \Rightarrow menor alcance

Aplicaciones:

- Radiodifusión (LF, MF)
- Comunicaciones radio de servicio fijo y móvil.

Las antenas son muy grandes aunque eléctricamente son pequeñas \Rightarrow monopolos. Se sitúan sobre torres altas. Se transmite con una potencia

$10 \text{ KW} \leq P_t \leq 1 \text{ MW}$, consiguiéndose alcances de centenares de millas.

3.2 Fundamentos de la propagación por onda de superficie.

Este modelo de propagación supone que el camino de propagación es tierra esférica, ignorando los efectos de la ionosfera. La tierra absorbe parte de la energía electromagnética originando que parte del flujo de energía vaya hacia tierra: fenómenos de reflexión, refracción y difracción. Las pérdidas son debidas a tres causas:

- expansión de la energía
- absorción de tierra
- difracción.

La atenuación es aproximadamente proporcional a $1/d^4$ con d = distancia entre antena transmisora y receptora. La onda de superficie rodea los obstáculos (difracción). El efecto favorable de la difracción crece con la frecuencia.

Supóngase un dipolo sobre tierra con pérdidas. Aplicando las ecuaciones de Maxwell + condiciones de contorno, y suponiendo que $k \gg 10$:

$$E_z = j \frac{k_0 z_0}{4\pi R} e^{-jk_0 R} \frac{2(k-1)}{k} A_s \approx E_0 2A_s$$

Los parámetros de la onda de superficie se calculan mediante las expresiones:

$$A_s = \frac{2 + 0.3p}{2 + p + 0.6p^2} - \sqrt{\frac{p}{2}} e^{-0.6p} \sin b$$

$$p = \frac{\pi}{\lambda} \frac{d}{\sqrt{\epsilon_r^2 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)^2}}$$

$$\frac{\sigma}{w\epsilon_0} \approx \frac{1.8 \cdot 10^4 \sigma}{f(\text{MHz})}$$

$$b = \arctg \frac{\epsilon_r w \epsilon_0}{\sigma}$$

Estas ecuaciones son válidas para tierra plana, polarización vertical y $d < 100 \frac{1}{\sqrt[3]{f}}$ (d en Km y f en MHz) ya que no tiene en cuenta la curvatura de la tierra ni los efectos de difracción. Para tener en cuenta estos efectos, habría que incluir otro factor que hace esta expresión muy complicada. Así, se crearon gráficas de campo que son función de ϵ , σ , f , d para $P_{RVC} = 1$ KW, que aparecen recogidas en la Recomendación P.368 del ITU-R (CCIR).

Para calcular el campo real, se corrige con $10 \log P_i(\text{KW})$

El uso de las gráficas para propagación por onda de superficie supone considerar ϵ y σ constantes. Esto no es cierto. Debe hacerse una estimación de condiciones positivas y negativas, y establecer la variabilidad.

Las expresiones anteriores se pueden simplificar para valores elevados de p . Así, en tierra húmeda, con $\epsilon_r = 3$ y $\sigma = 3 \cdot 10^{-4} \text{ S/m}$, se tiene para una frecuencia de 10 MHz, un valor de $p = 0,035 d[\text{m}]$, que, por ejemplo, para una distancia de 10 Km, resulta dar un valor $p = 350$, y con estos valores el campo por onda de superficie es proporcional al campo en espacio libre y al inverso de la distancia, decayendo por tanto con d^2 y la potencia con d^4 . Es importante notar que el campo por onda de superficie, además de decrecer con la distancia también se reduce con la frecuencia y se incrementa al aumentar al constante dieléctrica relativa y la conductividad del terreno.

3.3 Propagación por trayectos mixtos tierra-mar

Cuando los trayectos son mixtos, las variaciones son abruptas. Si se cambia de un suelo malo a otro mejor (seco \rightarrow mar), se produce una mejora en las condiciones de propagación (efecto recuperación). En el caso inverso, se produce un efecto de pérdida. La recomendación ITU-R P.368 propone la siguiente técnica para el cálculo del campo:

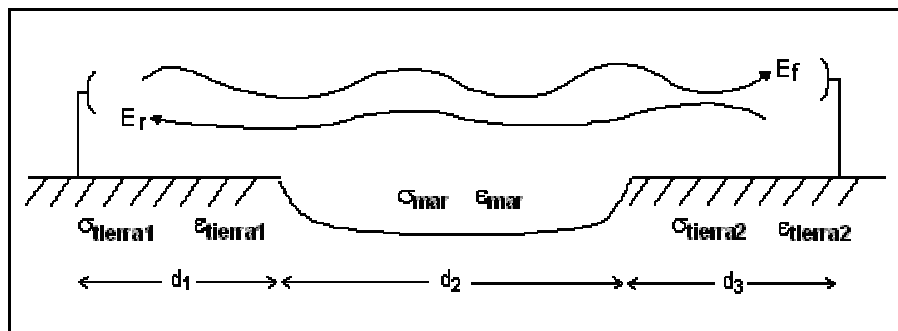


Figura 5.2 Trayecto mixto tierra-mar-tierra

$$E = \frac{E_f + E_r}{2}$$

$$E_f = E_{tierra2}(d_1 + d_2 + d_3) - E_{tierra2}(d_1 + d_2) + E_{mar}(d_1 + d_2) - E_{mar}(d_1) + E_{tierra1}(d_1)$$

$$E_r = E_{tierra1}(d_1 + d_2 + d_3) - E_{tierra1}(d_2 + d_3) + E_{mar}(d_2 + d_3) - E_{mar}(d_3) + E_{tierra2}(d_3)$$

4. PROPAGACIÓN POR ONDA ESPACIAL

Esta forma de propagación se produce a frecuencias superiores a 10 MHz y se basa en la propagación en espacio libre, siguiendo la expresión de la fórmula de Friis. Como la frecuencia es elevada, el ancho de banda es grande, las pérdidas de espacio libre también y la ganancia de la antena puede ser arbitrariamente grande, ya que la longitud de onda será pequeña y se podrán crear antenas eléctricamente grandes con pocas pérdidas. Al tener ganancia elevada, los anchos de haz serán estrechos y permitirán apuntar la antena lo cual puede reducir las interferencias producidas por las reflexiones.

Para garantizar que haya onda espacial, debe haber línea de vista (LOS) entre las antenas transmisora y receptora. Este es su principal inconveniente, por la presencia del suelo, por la curvatura de la Tierra, por la presencia de la atmósfera (refractividad, absorción y dispersión) y por la existencia de obstáculos que dificulten la propagación.

Para $10 \text{ MHz} < f < 150 \text{ MHz}$ se deben tener en cuenta la onda directa (O.D.), la onda reflejada (O.R.) y la onda de superficie (O.S.) cuando la polarización es vertical.

$$E = E_0 \{ 1 + R e^{-j\Delta} + (1 - R) A e^{-j\Delta} \}$$

donde A es el factor de atenuación.

La diferencia de fase será proporcional a la diferencia de caminos recorridos por las dos ondas:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l$$

El coeficiente de reflexión será complejo:

$$R = |R|e^{-j\phi}$$

Para $f > 150$ MHz sólo se tiene en cuenta O.D. + O.R. $\rightarrow A = 0$

La permitividad relativa del suelo se puede obtener como

$$\epsilon'_c = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} = \epsilon'_r - j \sigma \frac{\eta_0}{2\pi} \lambda$$

La impedancia característica para incidencia horizontal y vertical variará según el ángulo de incidencia con las expresiones:

$$Z_{(h)} = \sqrt{\epsilon'_c - \cos^2 \psi} \quad Z_{(v)} = \frac{\sqrt{\epsilon'_c - \cos^2 \psi}}{\epsilon'_c}$$

Por tanto, el coeficiente de reflexión para incidencia horizontal y vertical seguirá las siguientes expresiones

$$R_{(h)} = \frac{\sin \psi - \sqrt{\epsilon'_c - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{\epsilon'_c - \cos^2 \psi}} \quad R_{(v)} = \frac{\epsilon'_c \sin \psi - \sqrt{\epsilon'_c - \cos^2 \psi}}{\epsilon'_c \sin \psi + \sqrt{\epsilon'_c - \cos^2 \psi}}$$

De esta forma, el coeficiente de reflexión R depende de:

- Tipo de suelo (ϵ, σ)
- Frecuencia
- Angulo de incidencia
- Polarización

R se puede obtener mediante tablas, gráficas o fórmulas. Para incidencia con ángulos próximos a cero y para distintos terrenos, el coeficiente de reflexión tiene típicamente los siguientes valores:

	R	Am [dB]
Bosques	$0 \rightarrow -0,1$	$0 \rightarrow 2$
Terreno arbolado	$-0,1 \rightarrow -0,4$	$2 \rightarrow 5$
Hierba alta	$-0,5 \rightarrow -0,7$	$5 \rightarrow 10$
Hierba baja, mar	$-0,7 \rightarrow -0,8$	$10 \rightarrow 20$
Terreno plano, estanque	$-0,9 \rightarrow -1$	$20 \rightarrow 40+$

4.1. Modelo de propagación de Tierra Plana

La propagación se puede modelar mediante rayos perpendiculares a los frentes de fase esféricos.

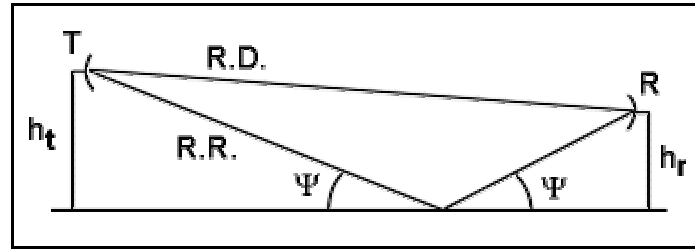


Figura 5.3 Modelo de tierra plana

Este modelo es aplicable a distancias cortas en las que se pueden despreciar la curvatura terrestre, y con terreno liso.

$$\psi = \arctg\left(\frac{h_t + h_r}{d}\right)$$

$$\Delta l = TRR - TRD = \frac{2h_t h_r}{d} \Rightarrow \Delta = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

Para frecuencias elevadas ($f > 100$ MHz) se puede considerar que la onda de superficie es despreciable y el campo eléctrico dependerá del existente en espacio libre y de la reflexión sobre el suelo, mediante la expresión:

$$e = e_0 \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R|\cos(\Delta + \beta)}$$

$$\psi \approx 0 \Rightarrow R \approx -1 \Rightarrow e = e_0 \sqrt{2 - 2\cos\frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}} = e_0 2\text{sen}\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

Si $d > \frac{h_t h_r}{\lambda} \Rightarrow e = e_0 \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$, con lo cual el campo decae con d^2 , pero esto sólo ocurre cuando el coeficiente de reflexión es próximo a -1 . En otro caso, habrá una parte del campo (proporcional a $1+R$) que decae con d y otra proporcional a $-R$ que decae con d^2 .

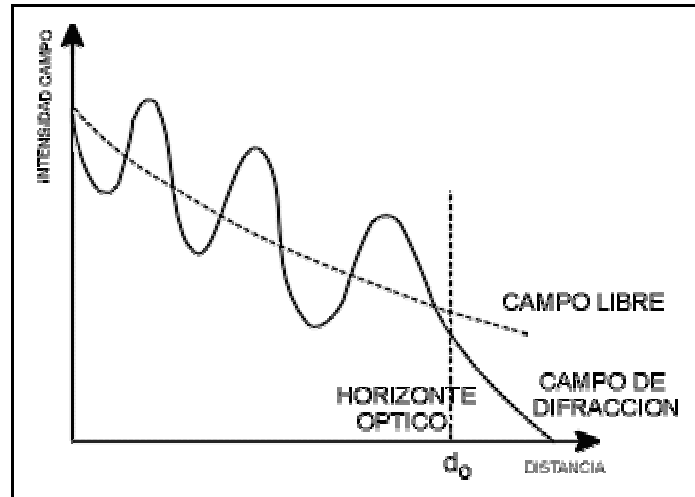


Figura 5.4 *Lóbulos de interferencia*: refuerzo o cancelación del campo eléctrico.

-Modelo con $A = 0$ y alturas ficticias (para $\psi \approx 0$ y $d > \frac{12h_t h_r}{\lambda}$)

$$h_{t',r'} = \sqrt{h_{t,r}^2 + h_0^2}$$

siendo h_t y h_r las alturas reales de las antenas Tx y Rx, respectivamente.

Se corrigen las alturas de las antenas para tener en cuenta la O.S. (CCIR).

$$h_0(\text{horiz.}) = \frac{\lambda}{2\pi} \left\{ (\epsilon' - 1)^2 + \left(\frac{\lambda \sigma \eta}{2\pi} \right)^2 \right\}^{-1/4}$$

$$h_0(\text{vert.}) = \frac{\lambda}{2\pi} \left\{ (\epsilon' + 1)^2 + \left(\frac{\lambda \sigma \eta}{2\pi} \right)^2 \right\}^{+1/4}$$

h_0 sólo toma valores significativos para polarización vertical y $f < 150$ MHz.

4.2 Influencia de la troposfera en la propagación.

A $f > 30$ MHz ya casi no contribuyen a la propagación la onda de superficie (O.S.) y la onda ionosférica (O.I.).

Las radiocomunicaciones se efectúan a través de las capas bajas de la atmósfera entre antenas elevadas varias λ encima del suelo. Es preciso conocer la trayectoria de la onda y su posición relativa respecto de los accidentes del terreno para evitar intercepciones del rayo.

También pueden producirse modos de propagación por trayectos múltiples por reflexión de las ondas en el suelo o en las fronteras de separación entre capas de una atmósfera estratificada (n variable) \Rightarrow trayectoria no rectilínea lo cual puede influir sobre el efecto de los obstáculos o en la puntería de la antena.

Los gases y vapores atmosféricos (O_2 , vapor de agua) absorben energía electromagnética \Rightarrow atenuación adicional ($f > 10$ GHz). Lo mismo ocurre con las precipitaciones (lluvia, nubes, niebla). Estos fenómenos incrementan la temperatura, la atenuación y la despolarización. Los alcances coinciden con la visión óptica entre las antenas. Más allá de estas distancias, es posible el enlace pero hay pérdidas adicionales por difracción.

4.2.1 Índice de refracción.

El índice de refracción n está próximo a la unidad \Rightarrow se utiliza el coíndice o refractividad N

$$N = (n - 1)10^6$$

La Rec. 453 del ITU-R proporciona

$$N = \frac{77.6}{T} \left(p + 4810 \frac{e}{T} \right)$$

donde p es la presión atmosférica y e la presión parcial de vapor de agua, ambas en milibares.

$$N = N_s (1 - 0.136h) \quad 0 \leq h \leq 1 \text{ Km}$$

siendo $N_s = 315$ (Rec. 369 del ITU-R) el valor típico de N en la superficie y h se expresa en Km.

4.2.2 Curvatura de los rayos.

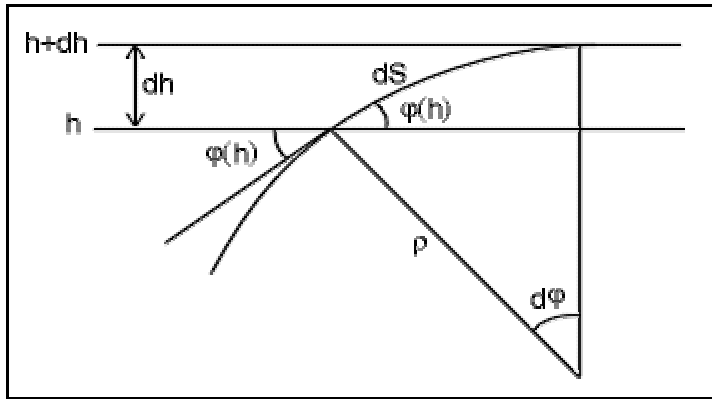


Figura 5.5 Curvatura de los rayos. El índice de refracción (n) es necesario para conocer la trayectoria de los rayos.

$$n(h) \cos \varphi(h) = cte \Rightarrow \frac{dn(h)}{dh} \cos \varphi - \operatorname{sen} \varphi \frac{d\varphi}{dh} n = 0$$

$$\frac{dn}{dh} \cos \varphi - \frac{d\varphi}{dS} n = 0 \Rightarrow \frac{dn}{dh} \cos \varphi = \frac{d\varphi}{dS} n$$

Como la incidencia es casi rasante

$$\varphi = 0, \cos \varphi = 1, n = 1 \Rightarrow \frac{dn}{dh} = \frac{d\varphi}{dS} = -\rho \quad [\varphi(h) \rightarrow 0 \Rightarrow dS \rightarrow 0]$$

donde ρ es la curvatura del trayecto ($1/R$)

$$\frac{dn}{dh} = -\rho = N_s (-0,136) 10^{-6} \quad \rho = 1,36 \cdot 10^{-7} N_s = \frac{1}{R} [Km^{-1}]$$

4.2.3 Geometría del trayecto.

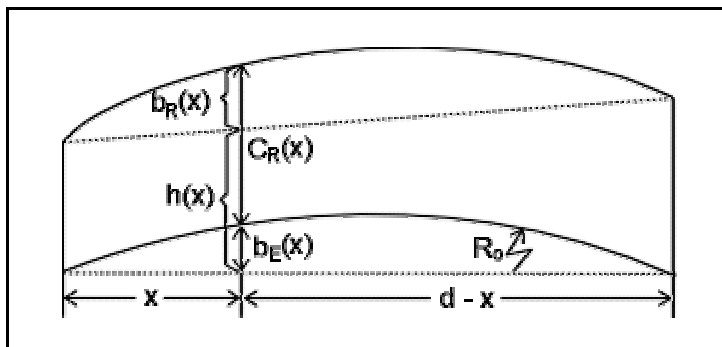


Figura 5.6 Geometría del trayecto. Sea R_0 el radio de la tierra y R el radio del rayo. Modelamos la tierra como una parábola.

Se denomina *protuberancia de la tierra*, b_E , a la elevación de la superficie terrestre sobre la línea horizontal ideal (aproximadamente parabólica):

$$b_E(x) = \frac{x(d-x)}{2R_0}$$

La *protuberancia del rayo*, b_R :

$$b_R(x) = \frac{x(d-x)}{2R}$$

Se denomina *despejamiento* a la distancia entre un punto y la superficie terrestre:

$$C_R(x) = b_R(x) + h(x) - b_E(x)$$

Si mantenemos constante $C_R(x)$ y suponemos un rayo rectilíneo, la tierra debería tener una curvatura modificada KR_0

$$b'_E(x) = \frac{x(d-x)}{2KR_0}$$

Además $b'_R(x) = 0$:

$$b_R(x) + h(x) - b_E(x) = h(x) - b'_E(x) \Rightarrow$$

$$\frac{x(d-x)}{2R} - \frac{x(d-x)}{2R_0} = -\frac{x(d-x)}{2KR_0} \Rightarrow K = \frac{R}{R-R_0}$$

K depende de las condiciones atmosféricas.

Subrefractiva intensa	$0 < K < 1$
Subrefractiva	$1 < K < 4/3$
Estándar	$K = 4/3$
Superrefractiva	$K > 4/3$
Conductiva	$K < 0$

4.3 Modelo de tierra curva.

4.3.1 Distancia de visibilidad.

Cuando la longitud del enlace es del orden de la distancia de visibilidad radioeléctrica o mayor, es preciso tener en cuenta la curvatura terrestre. Se considera una trayectoria rectilínea y una tierra ficticia de radio kR_0 .

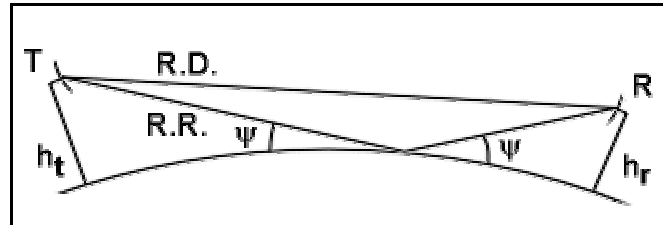


Figura 5.7 Modelo de tierra curva

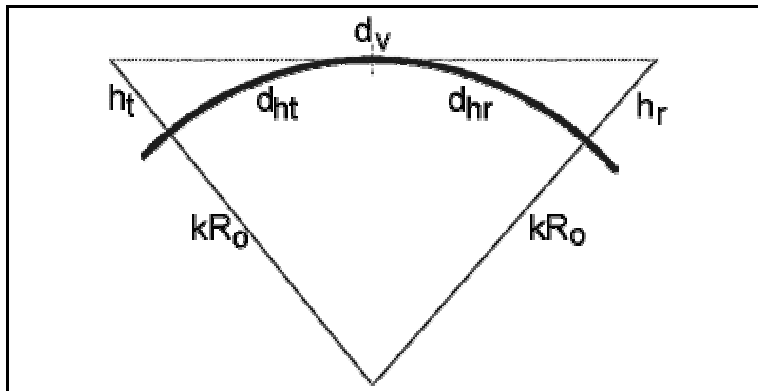


Figura 5.8 Distancia al horizonte

Se denomina distancia de horizonte (d_{ht}) de una antena a la distancia entre el pie de la antena y el punto T de tangencia con la superficie terrestre de un rayo trazado desde la antena.

Se llama distancia de visibilidad radioeléctrica (d_v) para dos antenas a la suma de sus distancias de horizonte.

La distancia del transmisor se obtiene mediante la relación:

$$(kR_0 + h_t)^2 = d_{ht}^2 + (kR_0)^2$$

Desarrollando y teniendo en cuenta que la altura de la antena es muy pequeña frente al radio de "Tierra Ficticia", la expresión anterior queda:

$$d_{ht}^2 \approx 2kR_0 h_t$$

La distancia de visibilidad será por tanto:

$$d_v \approx \sqrt{2kR_0 h_t} + \sqrt{2kR_0 h_r}$$

4.3.2 Modelo de reflexión.

En la figura 7.9 se representa un trayecto de propagación por reflexión sobre tierra curva: la propagación se modela mediante un rayo directo y otro reflejado en el suelo; por tanto, la atenuación de propagación depende de la interferencia entre el rayo directo y el rayo reflejado. En este apartado, no se va a considerar la contribución de la onda de superficie –generalmente, mucho menor que la contribución de la onda directa y reflejada-. De este modo, la expresión del campo eléctrico recibido, \bar{E} , viene dada por

$$\bar{E} = \bar{E}_0 \{1 + R_e \cdot \exp\{-j\Delta\}\}$$

donde \bar{E}_0 es el campo eléctrico en condiciones de espacio libre, R_e , el coeficiente de reflexión en el suelo y Δ , el ángulo de desfaseamiento entre la componente directa y la reflejada.

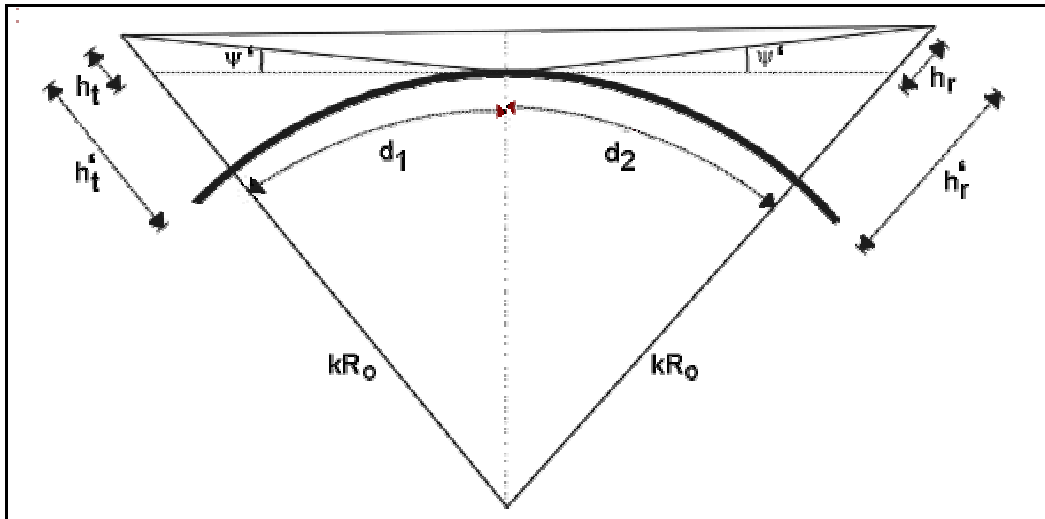


Figura 5.9 Punto de reflexión sobre tierra curva cuando las antenas transmisora y receptora tienen diferentes alturas

Así, para conocer el valor de campo eléctrico es preciso determinar el valor del coeficiente de reflexión en el suelo (R_e) y del ángulo de desfaseamiento entre la componente directa y la reflejada (Δ) a partir de los parámetros que se conocen:

- las alturas de las antenas, h'_t y h'_r
- la distancia del enlace, d
- el factor K de modificación del radio terrestre.

a) Cálculo del ángulo de desfaseamiento entre el rayo directo y reflejado

De manera similar a como se hacía con tierra plana, en primer lugar se calcula la diferencia de trayectos Δl entre ambos rayos:

$$\Delta l = \frac{2h_t h_r}{d}$$

con lo cual

$$\Delta(rad) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{h_t h_r}{d}$$

En este caso, es preciso determinar los valores de h_t y h_r -alturas de las antenas transmisora y receptora, respectivamente, sobre la tangente a la superficie terrestre en el punto de reflexión de la superficie terrestre-, a diferencia del modelo de tierra plana donde coincidían con las alturas reales de las antenas. El proceso de cálculo se inicia determinando el punto de reflexión, o expresado de otro modo, calculando las distancias d_1 y d_2 que lo separan de la antena transmisora y de la antena receptora:

$$h_t = h'_t - \frac{d_1^2}{2kR_0}$$

$$h_r = h'_r - \frac{d_2^2}{2kR_0}$$

En dicho punto, además, el ángulo de incidencia debe igualar al ángulo de reflexión:

$$\tan \psi = \frac{h_t}{h_r} = \frac{d_1}{d_2}$$

Por su parte, la distancia del enlace debe ser igual a

$$d = d_1 + d_2$$

Combinando estas cuatro ecuaciones –cuatro ecuaciones, cuatro incógnitas- se obtiene una ecuación de una sola variable de orden tres:

$$d_1^3 - \frac{3d}{2} d_1^2 - \left[kR_0 (h_t + h_r) - \frac{d^2}{2} \right] d_1 + kR_0 h_t d = 0$$

cuya solución es

$$d_1 = \frac{d}{2} + p \cdot \cos\left(\frac{\pi + \phi}{3}\right)$$

donde

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(kR_0 (h_t + h_r) + \frac{d^2}{4} \right)^{1/2}$$

$$\phi = \arccos \frac{2kR_0 |h_t - h_r| d}{p^3}$$

A partir de d_1 se puede determinar d_2 , h_t y h_r . El ángulo de incidencia es

$$\psi' = \frac{h_t + h_r}{d}$$

mientras que el ángulo entre el rayo directo y el plano tangente vale

$$\alpha = \frac{h_t - h_r}{d}$$

Todos estos cálculos están basados en la denominada teoría de reflexión de Óptica Geométrica. Esta teoría es aplicable siempre que

$$\psi(\text{mrad}) \geq \left(\frac{5400}{f(\text{MHz})} \right)^{1/3}$$

pues en caso contrario habría que aplicar el modelo de difracción sobre tierra esférica.

b) Cálculo del coeficiente de reflexión sobre tierra curva.

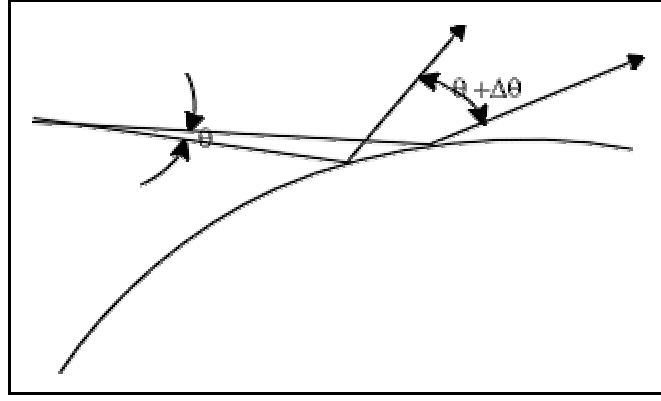


Figura 5.10 *Divergencia de rayos*

Como la reflexión se produce sobre una superficie esférica convexa, el haz de rayos reflejados experimenta una divergencia (figura 7.10) lo que equivale a una reducción aparente del coeficiente de reflexión. El coeficiente de reflexión efectivo pasa a ser:

$$R_e = R \cdot D$$

donde R es el coeficiente de reflexión complejo de tierra plana, mientras que D es el factor de divergencia dado por

$$D = \left(1 + \frac{5}{16k} \frac{d_1^2 d_2}{d h_t} \right)^{-1/2}$$

donde d , d_1 y d_2 deben sustituirse en Km, mientras que h_t en metros.

El valor del campo en recepción se calcula aplicando la ecuación del campo eléctrico recibido:

$$|\bar{E}| = |\bar{E}_0| \left[1 + (D \cdot |R|)^2 + 2 D \cdot |R| \cdot \cos(\beta + \Delta) \right]^{1/2}$$

en función del valor de campo eléctrico en condiciones de espacio libre y considerando $R = |R| \exp\{j\beta\}$. Así, la pérdida básica de propagación puede ponerse como

$$L_b = L_{bf} - 10 \log \left[1 + (D \cdot |R|)^2 + 2 D \cdot |R| \cdot \cos(\beta + \Delta) \right]$$

4.3.3 Suelo rugoso.

Cuando el terreno es ligeramente rugoso u ondulado, la reflexión es difusa, lo cual supone una reducción del coeficiente de reflexión. El nuevo coeficiente se calcula modificando el anterior del modo siguiente

$$R_e = R \cdot D \cdot \exp\left\{-\gamma^2 / 2\right\}$$

donde

$$\gamma = \frac{4\pi \cdot \sigma_z \cdot \sin \psi}{\lambda}$$

Siendo ψ el ángulo de incidencia y σ_z la rugosidad del terreno medida como desviación típica de las cotas de los puntos del perfil sobre su valor medio calculadas en la zona determinante de la reflexión.

4.4 Difracción en obstáculos.

4.4.1 Zonas de Fresnel.

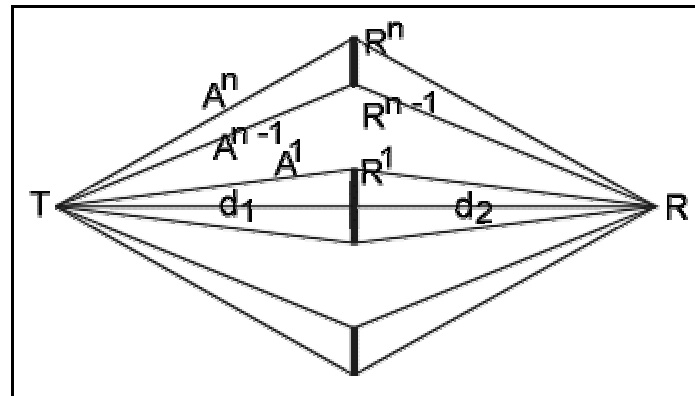


Figura 5.11 Zonas de Fresnel

Considérese el trayecto radioeléctrico en espacio libre entre transmisor y receptor (TR). El campo en R , en condiciones de espacio libre, puede demostrarse que es la resultante de contribuciones de campo producidas por anillos de radios R_{n-1} , R_n dispuestos en planos ortogonales al eje TR (figura 7.11) situados a distancias d_1 y d_2 de T y R , respectivamente. Cada anillo define y delimita una zona de Fresnel. Los radios de los anillos cumplen la condición

$$TA_nR - TR = n\lambda / 2$$

de donde se deduce que

$$R_n = \sqrt{\frac{n \lambda d_1 d_2}{d}}$$

donde:

- R_n es el radio de la n-ésima zona de Fresnel
- f es la frecuencia
- d_1 es la distancia del transmisor al plano considerado
- d_2 es la distancia del receptor al plano considerado

Las zonas de Fresnel son elipsoides concéntricos formados por la revolución de la figura 7.11 en torno al eje TR . Sus focos son los puntos T y R ; el n-ésimo elipsoide es el lugar geométrico de los puntos A_n que cumplen la condición anterior. Las secciones de los elipsoides normales al trayecto de propagación TR son círculos concéntricos.

De manera general, puede estudiarse la variación del campo recibido en R cuando se suprime la contribución (por ejemplo, mediante un diafragma) al mismo de diversas zonas de Fresnel desde un punto determinado situado a una distancia d_1 del transmisor:

- El campo varía de forma oscilatoria alrededor de su valor en espacio libre.
- Si la apertura del diafragma es $0,577R_1$, el campo es igual al de espacio libre.
- Puede lograrse una ganancia teórica de 6 dB para $r=R_1$ (las componentes de onda se suman en fase).
- En algunos casos, aun con visibilidad, el campo eléctrico puede ser menor que el de espacio libre (algunas componentes de la onda se suman en oposición de fase).

Estos principios se aplican a la propagación troposférica cuando el trayecto de la onda pasa cerca de un obstáculo (protuberancia de la Tierra, accidentes del terreno ...)

El análisis de la influencia de los obstáculos se realiza mediante los elipsoides de Fresnel, considerándose que la propagación se efectúa en condiciones de visibilidad directa si no existe ningún obstáculo dentro del primer elipsoide. Debido al carácter oscilatorio del campo, es innecesario que el trayecto pase muy por encima de los obstáculos. Basta trabajar en el entorno de la primera zona de Fresnel, por lo que se suele usar como parámetro de referencia R_1 .

Cuando el rayo pasa cerca de un obstáculo o es interceptado por este, experimenta una pérdida debida a la difracción. Se denomina "despejamiento" a la distancia h entre el rayo y el obstáculo. La ITU-R considera, por convenio, $h>0$ cuando hay interceptación del rayo y $h<0$ cuando el rayo pasa por encima del despejamiento.

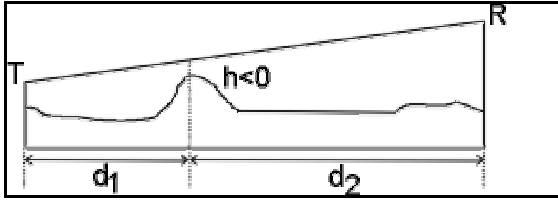


Figura 5.12 Despejamiento negativo

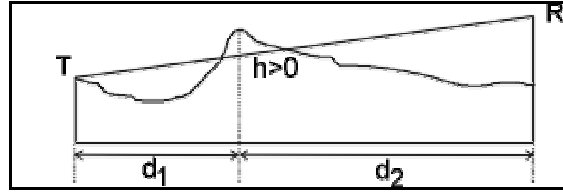


Figura 5.13 Despejamiento positivo

Para evaluar el despejamiento y la consiguiente atenuación por difracción, debe representarse el perfil del terreno sobre una tierra de radio kR_0 y procederse a un análisis del número, situación e influencia de los obstáculos.

4.4.2 Difracción en obstáculos agudos ("filo de cuchillo").

En esta asignatura sólo se va a considerar difracción en un obstáculo aislado y agudo (arista en filo de cuchillo). El cálculo de la difracción debida a un obstáculo agudo es un problema resuelto mediante las integrales de Fresnel. Para las aplicaciones usuales de radiocomunicación, se dispone de curvas proporcionadas por ITU, que representan las atenuaciones adicionales que hay que considerar por el hecho de propagarse una señal en presencia de un obstáculo en función del parámetro adimensional v :

$$v = h \left[\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \right]^{1/2}$$

Este parámetro v sigue el mismo convenio de signos que el despejamiento h , definido en el apartado anterior. Se puede comprobar que v es igual a $\sqrt{2}$ veces el despejamiento normalizado respecto al radio de la primera zona de Fresnel.

También es posible calcular esas atenuaciones adicionales mediante aproximaciones numéricas sencillas:

$$L_D(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \text{ dB}$$

En otro caso, la atenuación se puede calcular a partir de la gráfica de la figura 7.14:

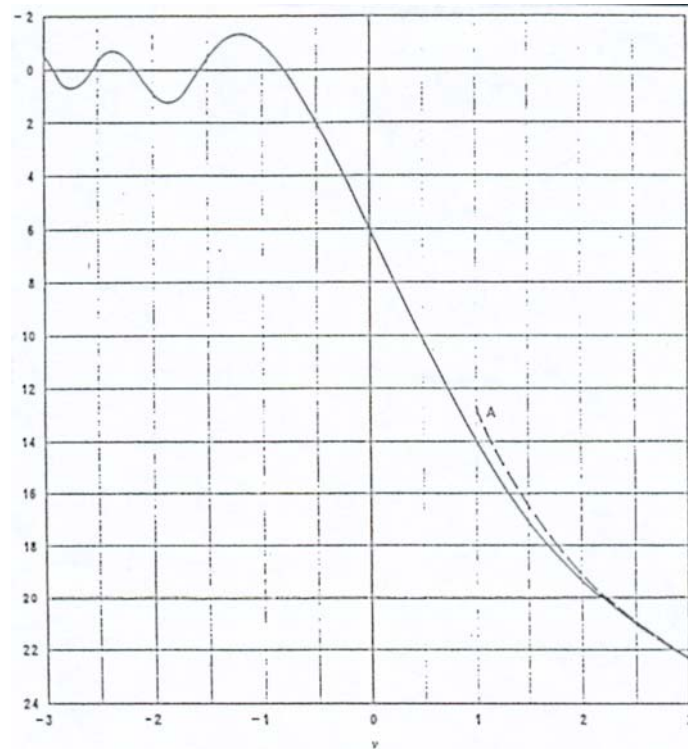


Figura 5.14. Atenuación adicional por difracción.

4.5 Atenuaciones adicionales (lluvia, vegetación, gases y vapores atmosféricos).

La lluvia es el principal factor que limita las comunicaciones a partir de 10 GHz. El agua, tanto en su estado líquido como gaseoso, absorbe la radiación electromagnética en diferente grado en función de la frecuencia, tal y como se aprecia en la siguiente figura:

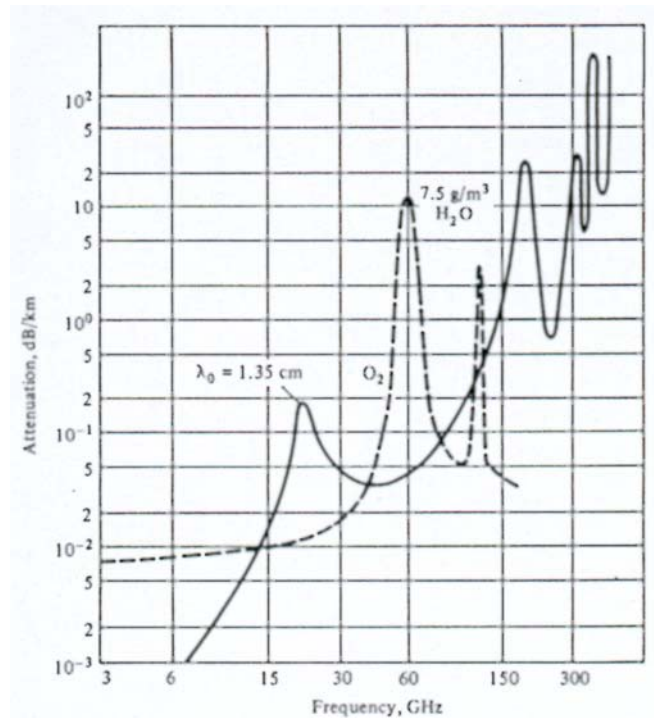


Figura 5.15: Absorción del vapor de agua y del oxígeno a nivel del mar con temperatura de 20° C.

En esta figura también se puede observar las absorciones debida a otros gases como el oxígeno.

Además de absorber, el agua en la atmósfera también refleja y despolariza las ondas electromagnéticas.

En cuanto a la vegetación, su absorción se debe a su alta concentración de agua, atenuando más cuando más densa sea esta vegetación.