UNIDAD Nº: 1
RADIOPROPAGACIÓN

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

OBJETIVOS

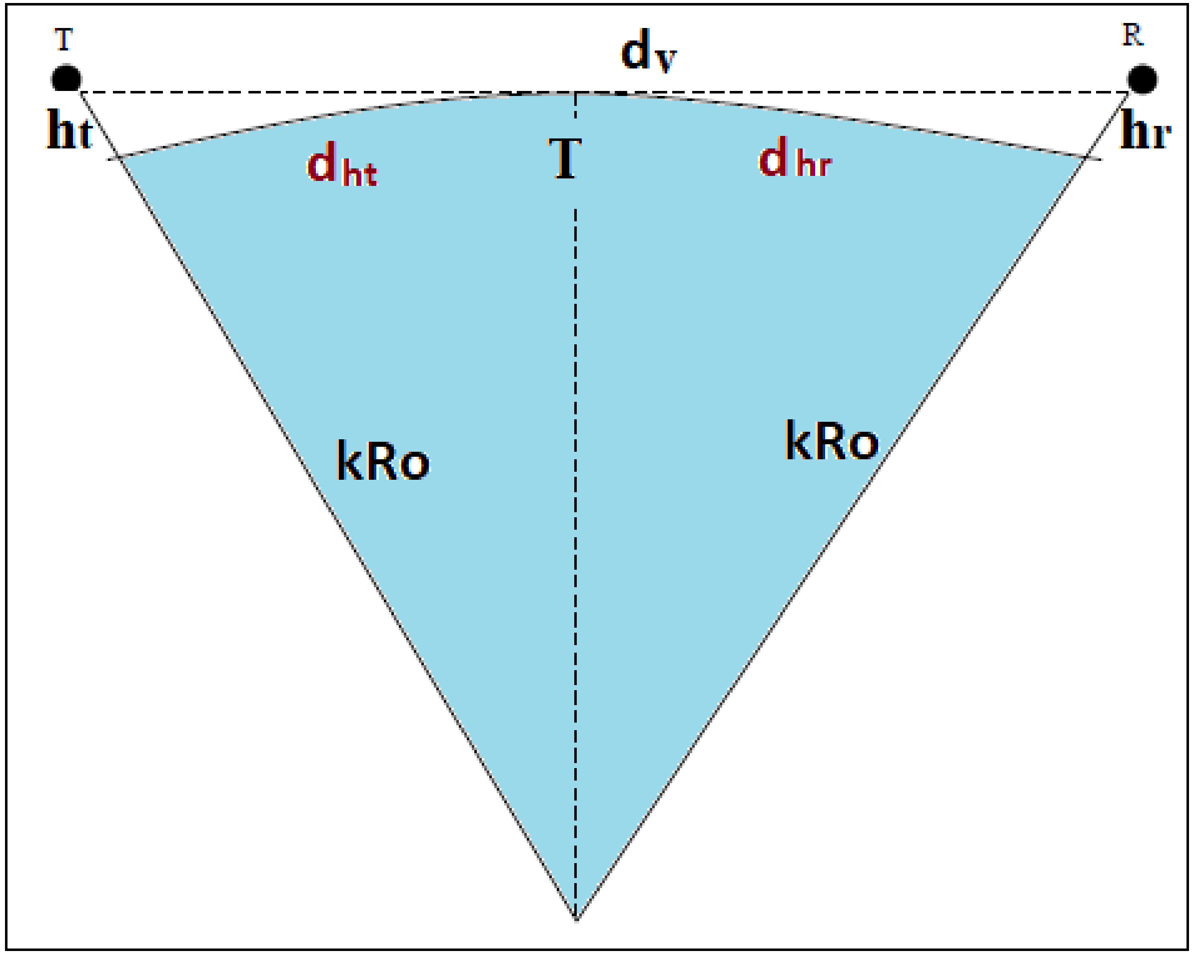
- Describir la propagación de la onda electromagnética en tierra curva
- Analizar los parámetros pertinentes a esta emisión de onda

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

- Modelo que se aplica cuando la longitud del enlace es del orden de la distancia de visibilidad radioeléctrica o mayor. Se considera trayectoria rectilínea del rayo y Tierra ficticia de radio kRo.
- Se asumirá una Tierra lisa como sucede en trayectos sobre el mar, grandes lagos o llanuras con terreno poco ondulado.

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

7.1 Distancia de visibilidad



- El modelo se muestra en la figura de la siguiente página.
- La distancia horizonte dht, dhr es la distancia entre el pie de antena y el punto de tangencia (T) del rayo a la Tierra.
- La distancia de visibilidad dv para dos antenas es la suma de las distancias horizonte.
- dv = dht + dhr

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

De la figura se desprende:

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

$$d_{ht}^2 = h_t^2 + 2kR_O h_t$$

$$\approx 2kR_O h_t$$

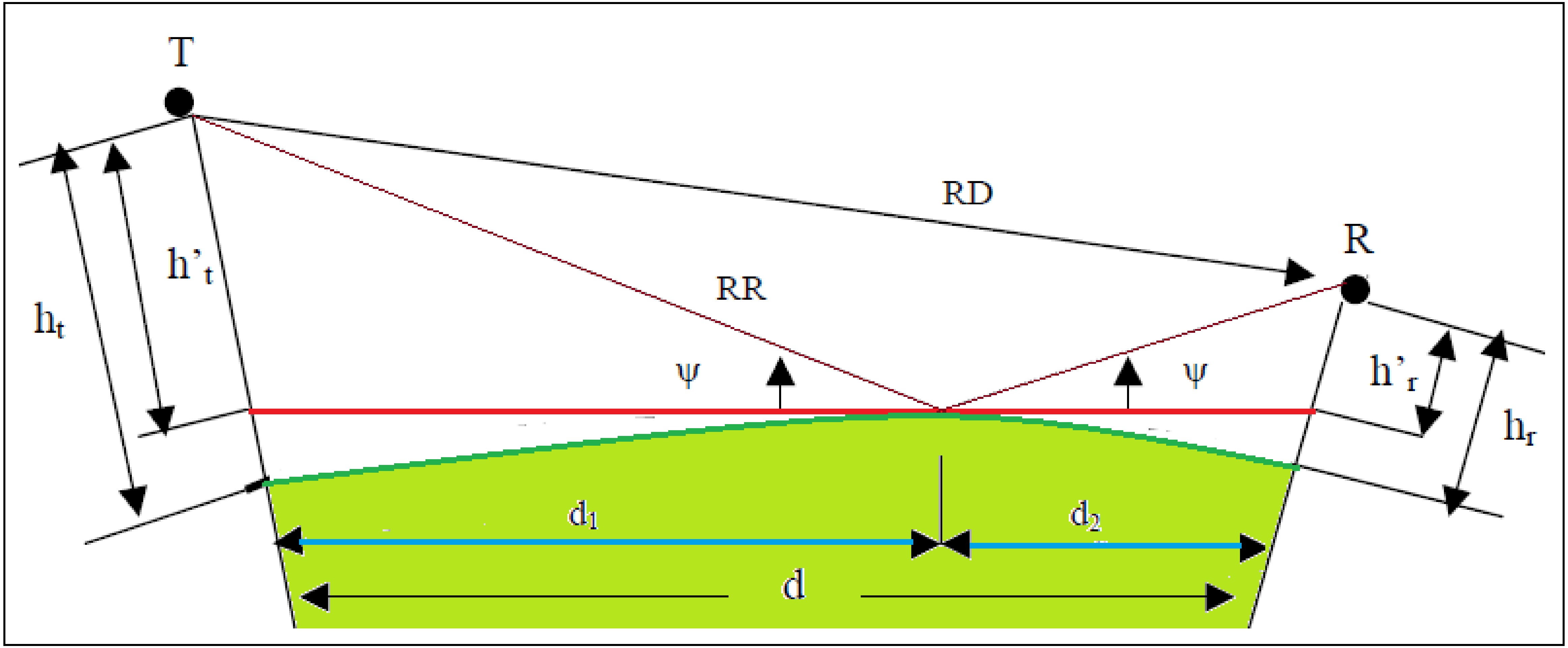
$$d_{ht}(km) = 3.57\sqrt{kh_t(m)} \quad unidades \quad prácticas$$

$$d_{hr}(km) = 3.57\sqrt{kh_r(m)} \quad unidades \quad prácticas$$

$$d_v = 3.57\left(\sqrt{kh_t} + \sqrt{kh_r}\right)$$

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

7.2. Modelo de Reflexión



2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

$$(kR_0+(h_t-h_t^{'}))^2=d_1^2+k^2R_0^{\,2} \quad \text{(de la distancia de visibilidad)}$$

$$(h_t+h_t^{'})^2+2KR_0(h_t-h_t^{'})=d_1^2$$

$$\rightarrow h_t^{'}=h_t-\frac{d_1^2}{2KR_0} \qquad (1)$$

$$h_r^{'}=h_r-\frac{d_2^2}{2KR_0} \qquad (2)$$

$$\tan\Psi=\frac{h_t^{'}}{d_1}=\frac{h_r^{'}}{d_2} \qquad (3)$$

$$d=d_1+d_2 \qquad (4)$$

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

Combinando (1), (2), (3) y (4) se obtiene:

$$d_1^3 - \frac{3d}{2} d_1^2 - \left[kR_0 (h_t + h_r) - \frac{d^2}{2} \right] d_1 + KR_0 h_t d = 0$$

que tiene por solución:

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

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

En las fórmulas que siguen, las alturas están en m y distancias en km.

- Si $h_t > h_r$

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}}\left[6.37K(h_t + h_r) + \left(\frac{d^2}{2}\right)\right]^{1/2} \qquad (9)$$

$$\phi = \cos^{-1}\left[\frac{12.74K(h_t - h_r)d}{p^3}\right] \qquad (10)$$

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

- si $h_t < h_r \rightarrow (h_r - h_t)$ en 10 y 8 dará d_2

$$h_t' = h_t - \frac{4d_1^2}{51K} \quad ; \quad h_r' = h_r - \frac{4d_2^2}{51K}$$ (alturas sobre el plano tangente)

$$\psi(mrad) = \frac{h_t' + h_r'}{d}$$ (ángulo de incidencia)

$$\alpha(mrad) = \frac{h_r' - h_t'}{d}$$ (ángulo entre el rayo directo y el plano tangente)

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

Otros ángulos de interés:

$\theta_{D/R,T} = \psi + \alpha$ (ángulo rayo directo con rayo reflejado en el transmisor)

$\alpha_{D/R,T} = \psi - \alpha$ (ángulo rayo directo con rayo reflejado en el receptor)

La teoría de la reflexión óptica es aplicable siempre que Ψ sea superior a

$$\psi_{\lim}(mrad) = (5400 / f)^{1/3} \qquad \text{f (MHz)}$$

si $\Psi < \Psi_{\lim}$ → Aplicar el modelo de difracción sobre tierra esférica

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA

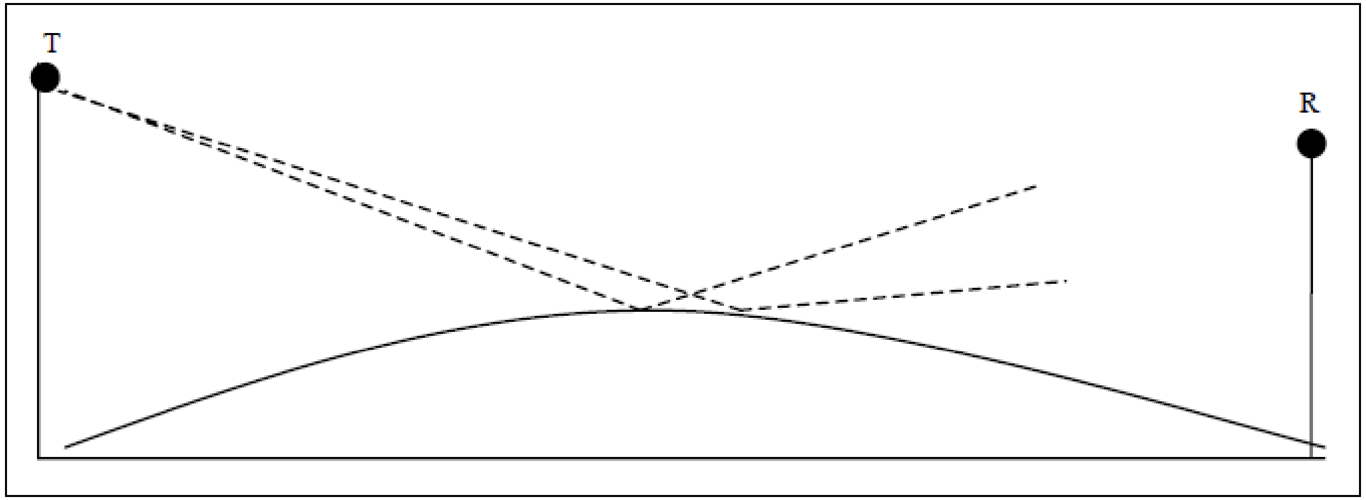
Dado que la reflexión se produce sobre tierra convexa, el rayo reflejado experimenta divergencia, lo que equivale a una reducción aparente del coeficiente de reflexión.

D: Es el factor de divergencia en los trayectos

$R_{efectivo} = Re = RD,$ **R = Coeficiente de reflexión complejo**

Este fenómeno se justifica en la siguiente figura, en la que se aprecia que la radiación incidente se abre una vez que rebota en el suelo debido a la convexidad del suelo.

2.7 MODELO DE TIERRA CURVA



D: Es el factor de divergencia

$$D = \left[1 + \left(\frac{5}{16K}\right)\frac{d_1^2 d_2}{dh_t'}\right]^{-1/2}$$

$D < 1$; d (km); h (m)

Incremento de longitud del rayo reflejado

$$\Delta l(m) = \frac{2h_t' h_r'}{d} 10^{-3}$$

Incremento de longitud del rayo reflejado

$$\Delta l(m) = \frac{2h_t^{'}h_r^{'}}{d}10^{-3}$$

Desfasamiento

$$\Delta(rad) = k\cdot\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta l = \frac{2\pi f}{C}\Delta l = \frac{\pi f}{150}\Delta l$$

El campo e en recepción (despreciando la onda de superficie)

$$e = e_0\left[1 + (D\cdot|R|)^2 + 2\cdot D\cdot|R|\cdot\cos(\beta + \Delta)\right]^{1/2}$$

Para incidencia casi rasante $|R| = 1$, $D \cong 1$, $\beta = \pi$

$$e = 2e_0 sen\left(\frac{2\pi h_t^{'} h_r^{'}}{\lambda d}\right)$$

y para alturas pequeñas frente a d

$$e = 4\pi e_0 \frac{h_t^{'} h_r^{'}}{\lambda d}$$ (como en Tierra plana)

La pérdida básica de propagación (en dB)

$$L_b = L_{bf} + 20\log\frac{e_0}{e}$$

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

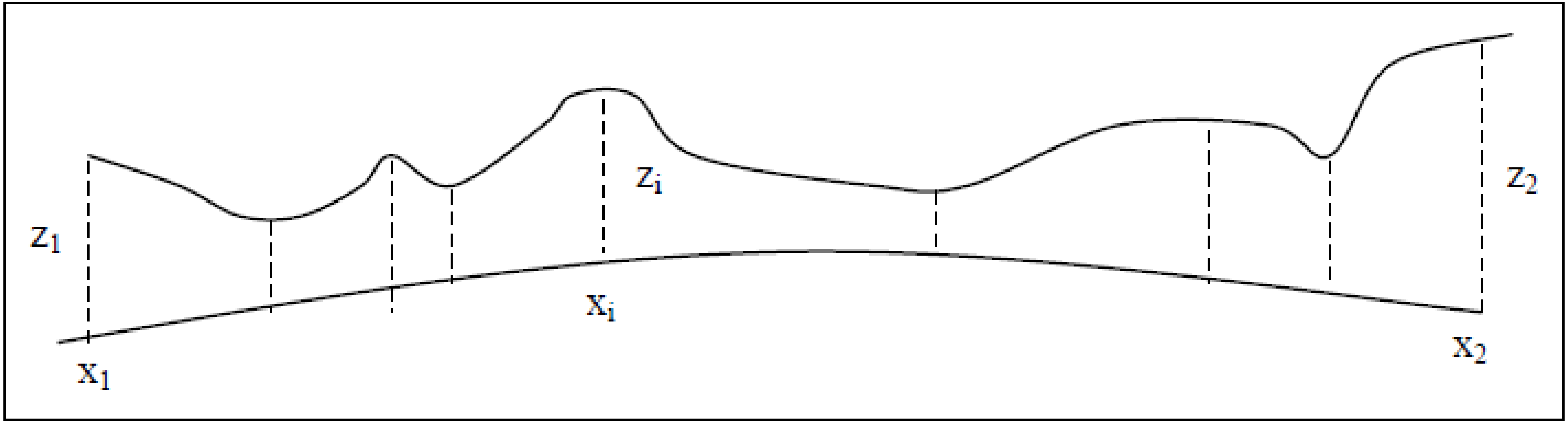
Ejemplo

Calcular la pérdida básica de propagación para un radioenlace sobre el mar, con los siguientes datos: Altura de la antena transmisora $h_t = 300$ m, altura de la antena receptora $h_r = 150$ m, distancia del vano radioeléctrico $d = 38$ km, coeficiente del radio terrestre $k = 4/3$, frecuencia de trabajo $f = 6.125$ MHz

Cuando el terreno es ligeramente ondulado o rugoso, la reflexión es difusa, lo cual supone una disminución del coeficiente de reflexión. El nuevo coeficiente de reflexión es:

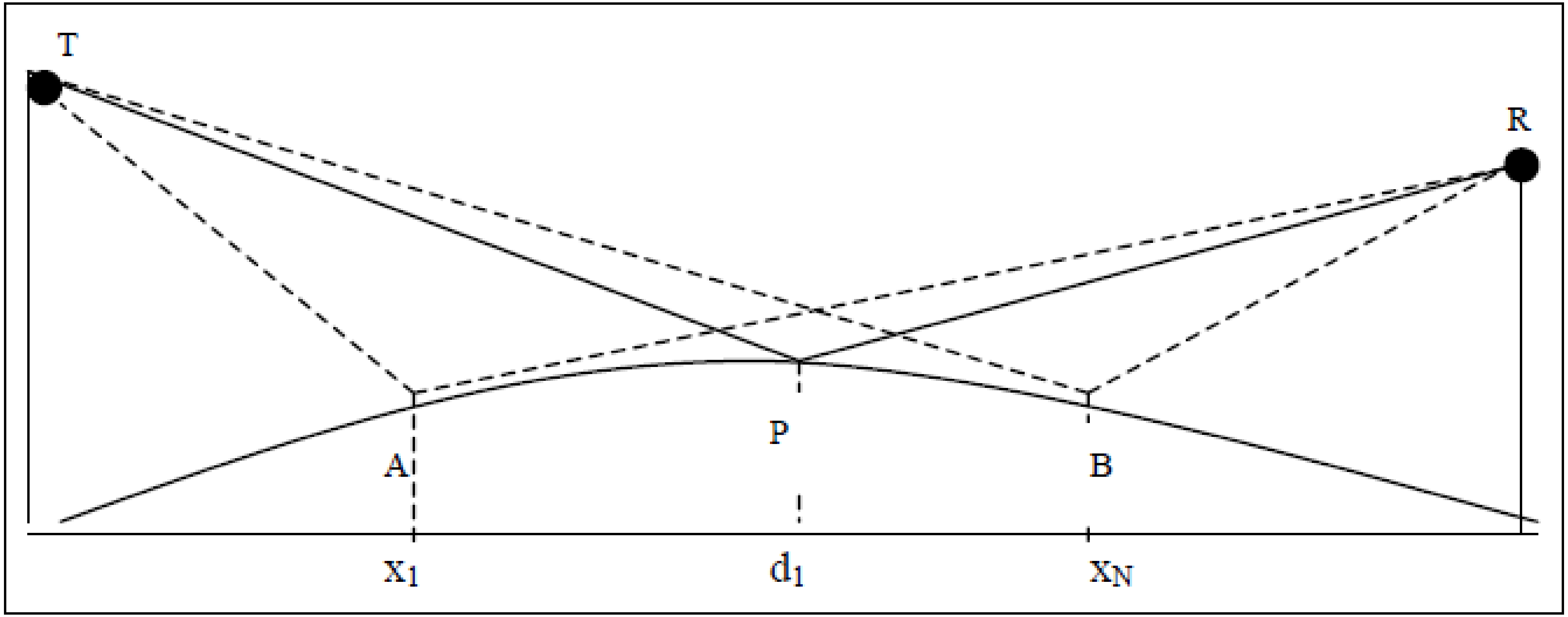
$$|R| \cdot D \cdot e^{-\gamma^2/2} \qquad con: \gamma = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma_z \cdot \operatorname{sen}\psi}{\lambda} \quad ; \quad \sigma_z = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^{N} \left(z_i - \bar{z}\right)^2 \right]^{1/2}$$

σ_z = rugosidad media



z_1
z_i
z_2
x_1
x_i
x_2

La zona determinante de la reflexión está limitada por los punto A,B



$$TAR - TPR = TBR - TPR = \lambda/2$$

Las abcisas de x_1 y x_N de los puntos límites son:

$$x_1 = \left\{2h_t'\left(h_t' + h_r'\right) + \lambda \cdot d - \left[\left(\lambda d\right)^2 + 4h_t'h_r'\lambda d\right]^{1/2}\right\}/D$$

$$x_N = \left\{2h_t'\left(h_t' + h_r'\right) + \lambda \cdot d - \left[\left(\lambda d\right)^2 + 4h_t'h_r'\lambda d\right]^{1/2}\right\}/D$$

$$D = 2 \cdot \left[\lambda d + \left(h_t' + h_r'\right)^2\right]/d$$

h_t' , h_r' , d	en km
$\lambda = 0.3 / f$	f en MHz

Ejemplo

Calcula los límites de la zona de reflexión para $h_t = 300$ m, $h_r = 150$ m, d = 38 km y f = 6.125 MHz.

Resolución

Con estos valores, se obtiene:

$$h_t' = 263.7 \text{ m}$$

$$h_r' = 139.8 \text{ m}$$

$$\psi = 0.0106 \text{ rad}$$

$$x_1 = 23 \text{ km}$$

$$x_2 = 27 \text{ km}$$

Suponiendo ondulación $\sigma_z = 5$ m, $\gamma = 13.6 \rightarrow e^{-\gamma^2/2} \cong 0$ No hay reflexión

Para $\sigma_z = 1$ m, $\gamma = 2.72 \rightarrow e^{-\gamma^2/2} \cong 0.0247$ $R_e = |R| \cdot D \cdot e^{-\gamma^2/2} = 0.018$

GRACIAS