



## Propagación de Microondas (Microwave Propagation)

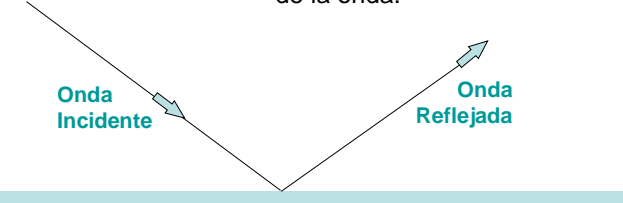
### Capítulo 5

*Ing. Marcial López Tafur  
mlopez@uni.edu.pe*

- El diseño de un enlace esta orientado a predecir los periodos de interrupción que sufrirá este y asegurarse que no excedan los objetivos de calidad.
  - La mayoría de estas interrupciones ocurren como resultado de efectos atmosféricos.
  - Es muy importante que el diseñador tenga un buen conocimiento de la propagación de las microondas
- UNI - Sistemas de MW 2

## Reflexión

Desplazamiento de fase =  $180^\circ$  (metales).  
Ángulo de incidencia = Ángulo de reflexión de la onda.

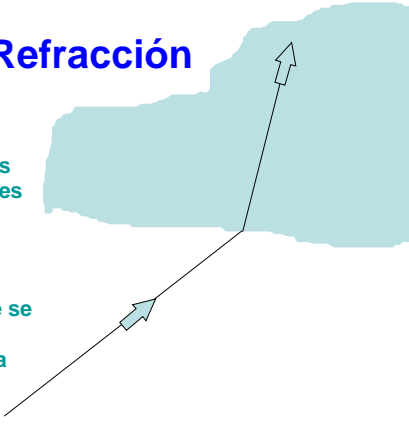


UNI - Sistemas de MW 3

## Refracción

-La onda incidente pasa a través de dos medios transparentes en los cuales la velocidad de la luz difiere ...

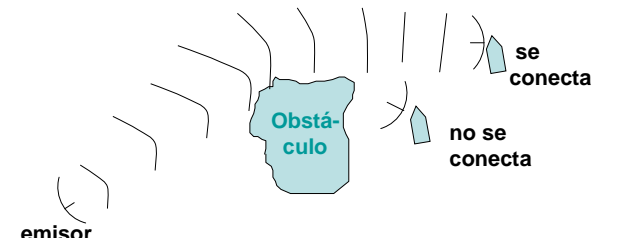
-- La onda incidente se divide en una onda reflejada y una onda refractada.



UNI - Sistemas de MW 4

## Difracción

...una onda plana viajando en un trayecto recto se curva alrededor de una obstrucción.



UNI - Sistemas de MW 5

- ## Efectos atmosféricos en la propagación
- Comúnmente se entiende que el haz es un rayo delgado que viaja en línea recta entre dos antenas (Tx y Rx)
  - En realidad es un frente de onda EM
  - El trayecto del frente de onda depende de la densidad de la troposfera.
  - En una atmósfera estándar la densidad promedio decrece con la altitud
- UNI - Sistemas de MW 6

- Luego la parte superior del frente de onda viaja más rápido que la parte inferior, que está atravesando un medio más denso
- Desde que la dirección de propagación del frente de onda EM es siempre perpendicular al plano de fase constante, el haz tiende a doblarse hacia abajo, a esto se le llama “**índice de refracción**”

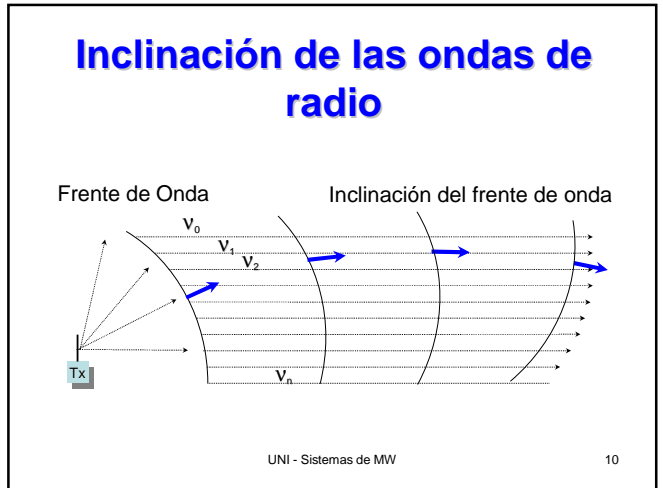
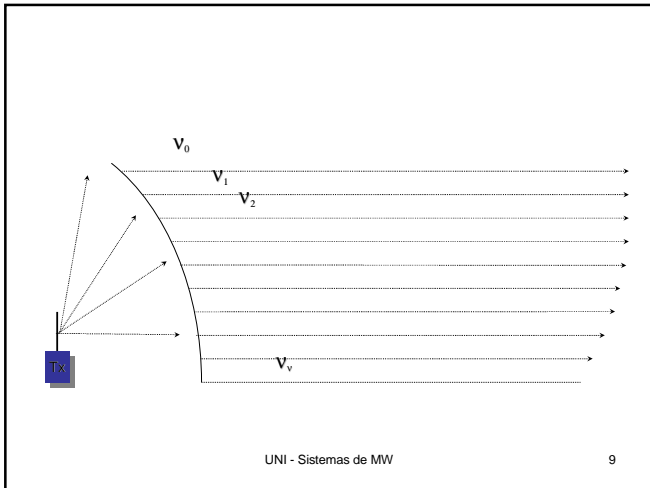
UNI - Sistemas de MW 7

### Velocidad de las ondas de Radio

- Velocidad de las ondas de radio en “Espacio libre”:  $v_0$
- Velocidad de las ondas de radio en la atmósfera:  $c$
- Bajo condiciones atmosféricas normales (temperatura, presión, contenido de agua) la velocidad de las ondas de radio es ligeramente menor que cerca a la superficie de la superficie de la tierra

$$c_0 = 300 \times 10^6 \text{ m/s}$$

UNI - Sistemas de MW 8



### Índice de refracción (n)

- Es la relación de la velocidad de una onda EM viajando en el vacío relativa a la velocidad con que viajaría en un medio finito  $n = c_0/c$   
donde:  $c_0$  es la velocidad en el vacío y  $c$  es la velocidad del haz en un medio finito
- Refracción = Refractividad

UNI - Sistemas de MW 11

### Refractive Index (n)

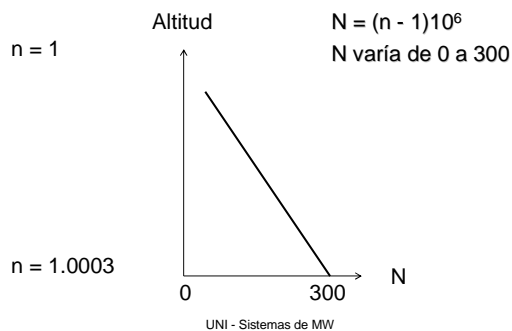
$$n = c_0 / c$$

- en espacio libre  $n = 1.0$
- ¿en la atmósfera  $n = ?$

En condiciones estándares, y cerca a la superficie de la Tierra,  $n = 1.0003$  aprox.

UNI - Sistemas de MW 12

## Cociente de refractividad



13

## Cociente de refracción (refractividad)

- El índice de refracción es mucho mayor que la unidad, para una onda que viaja por el aire es ligeramente mayor que 1, (1.000315), por eso se define el cociente de refracción  $N = (n-1)10^6$
- Para un valor de  $n = 1.000315$  se obtiene un valor de 315  $N$  – unidades.
- Para enlaces por debajo de 100 GHz está definido:  $N = 77.6 P/T + 3.732 \times 10^{-5} e/T^2$

UNI - Sistemas de MW

14

## Gradiente de refractividad (G)

- Para el diseño de enlaces es importante el cambio de los valores de la refracción sobre el frente de onda de las  $\mu O$
- En los primeros cientos de metros se puede aproximar a un gradiente lineal  $G = dN/dH$ , bajo condiciones atmosféricas medias este valor es constante (-39 N unidades / Km), varía con el tiempo

UNI - Sistemas de MW

15

## Radio efectivo de la tierra

- Debido a la reflexión el haz no viaja en línea recta, la curvatura del haz depende del gradiente de refractividad que experimenta en cada punto sobre la trayectoria.
- Sí uno promedia el gradiente sobre cada punto del trayecto uno puede asumir que el rayo describe una trayectoria curva

UNI - Sistemas de MW

16

- Puede considerarse que el haz viaja sobre un arco de radio  $r$ .
- Este radio es inversamente proporcional al gradiente del índice de refracción promedio sobre la trayectoria:  $1/r = dn/dh$
- Como el haz de  $\mu O$  no es una línea recta, la superficie de la Tierra sobre la cual viaja no es plana.
- Es necesario tomar en cuenta la curvatura de la tierra ( $R = 6,371$  Km)

UNI - Sistemas de MW

17

- La claridad del haz depende de la distancia relativa entre dos curvas.
- Para simplicidad se hace una de ellas una recta mientras que la otra se expande un poco para compensarla.
- Entonces el haz viaja en una línea recta respecto al radio efectivo de la Tierra, el cual ha sido “ajustado” de acuerdo al índice de refractividad

UNI - Sistemas de MW

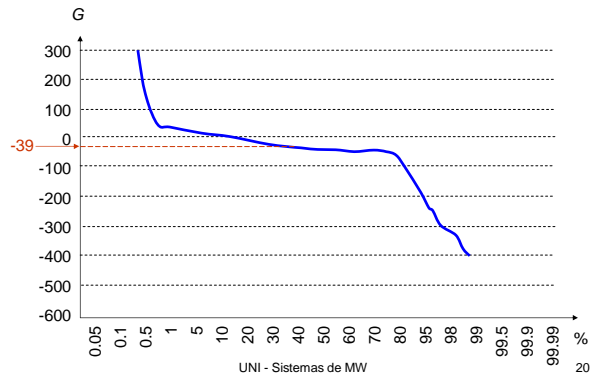
18

### Comparación del factor $k$ versus el gradiente de refractividad

Factor $k$	Gradiente de Radio refractividad $G$
$k = 1$	$G = 0$
$k = 4/3$	$G = - 39$
$k = \infty$	$G = - 157$
$k < 1$	$G > 0$

Tabla 5.1

### Campo resultante mostrando la distribución de probabilidad del gradiente de refractividad



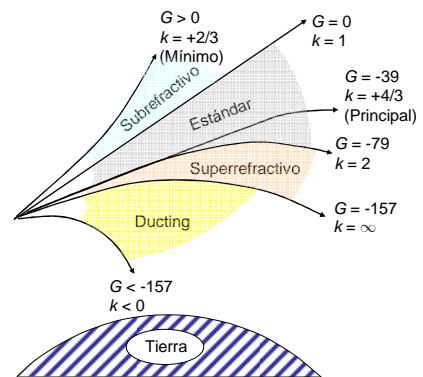
### Anomalías en la propagación

- El gradiente de refractividad que causa la curvatura del haz, cambia también con el tiempo.
- Puede cambiar desde un valor positivo a otro negativo abruptamente.
- Estos valores extremos solo permanecen por pequeños instantes de tiempo
- El valor medio es  $- 39 N$  unidades / Km que corresponden a un factor  $k = 4/3$

- Los valores negativos son mayores que los positivos.
- Se llama refracción estándar cuando el gradiente de refractividad muestra valores promedio (para  $k = 4/3$ )
- Cuando el gradiente cambia a valor positivo es **sub**-refracción y puede causar pérdidas por difracción.
- Cuando se hace más negativo que  $- 100 N$  unidades / Km es **súper**-refractivo resultando en desvanecimiento por multitrayecto

- Cuando se hace más negativo que  $- 157 N$  ocurren condiciones de entubamiento resultando en severa atenuación por multitrayecto, dispersión de haz y hasta interrupción total (Blackout)
- La UIT provee una serie de curvas que detallan el porcentaje de tiempo que el gradiente de refractividad es menor que  $- 100 N$ , dando una indicación de la probabilidad que el entubamiento sea un problema (Método UIT-530)

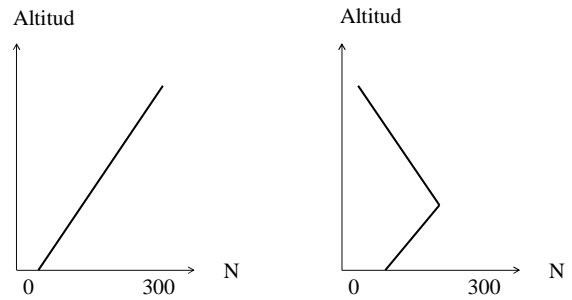
### Curvatura del haz causada por la refracción



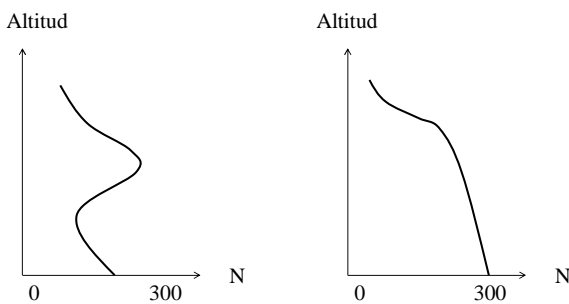
### Condiciones físicas de la atmósfera

- Ya que el cociente de refractividad puede ser expresado en términos de presión, temperatura y humedad, sus efectos serán discutidos en términos de gradientes de refractividad negativos y positivos respectivamente

### Perfiles del cociente de Refractividad



### Cociente de refractividad



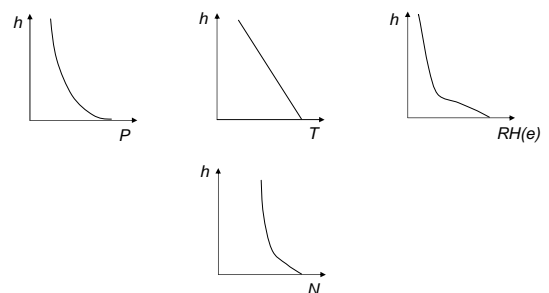
### Gradientes positivos

- Para tenerlos se requiere un gradiente de temperatura fuertemente negativo, los gradientes de presión, temperatura y humedad causan gradiente de refractividad positivos.
- Advección (aumento del aire frío húmedo) causa gradientes positivos sobre la Tierra seca y caliente especialmente en zonas costeras, aumentando abruptamente ....

...la humedad en la superficie terrestre.

- Otra causa: Choque frontal de aire caliente con el aire frío durante las tormentas.
- Auto-convección: Convección del calor de una superficie extremadamente caliente es otra causa.
- La conducción debido al calentamiento solar tiene el mismo efecto

### (a) Gradientes de refractividad positivos Propagación normal

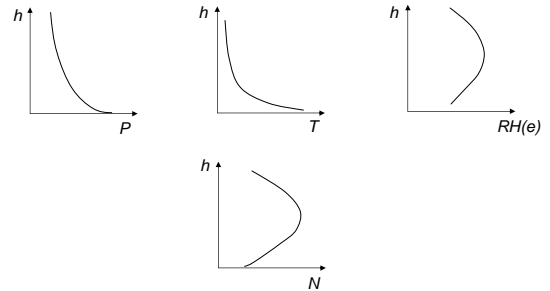


### Gradientes negativos

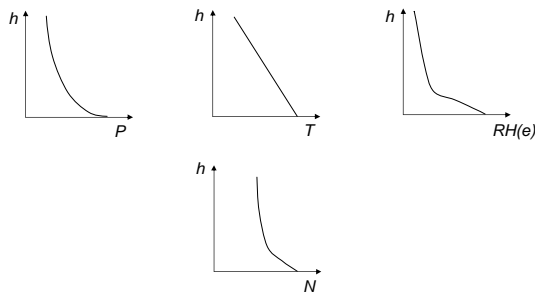
- Requiere gradientes positivos de temperatura (inversión de temperatura) y/o gradiente de humedad fuertemente negativo (hidrolapcia).
- Valores anormales  $< -100 N$  pueden resultar debido a advección, calentamiento de la superficie y radiación de frío y puede llegar a formar ductos

### (b) Gradientes de refractividad positivos Propagación anormal

Sub-refracción : Difracción

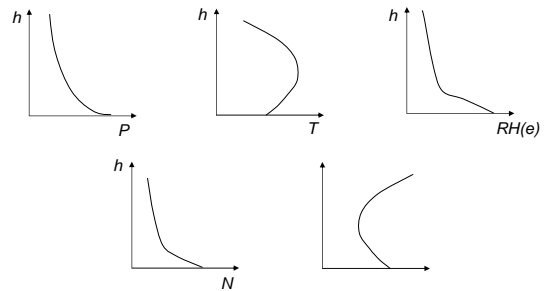


### (a) Gradientes de refractividad negativos Propagación normal



### (b) Gradientes de refractividad negativos Propagación anormal

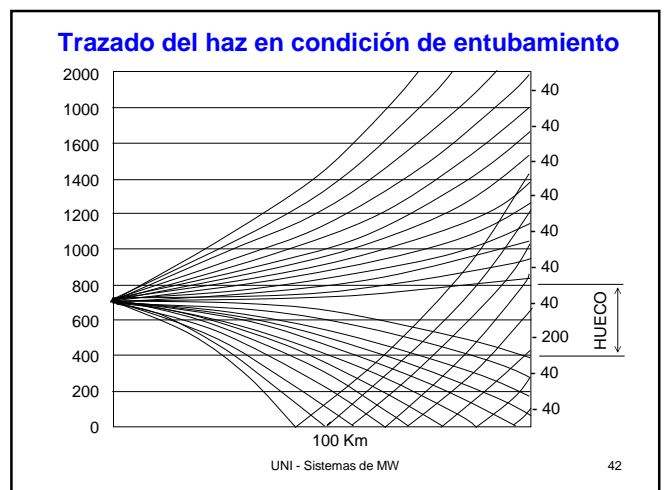
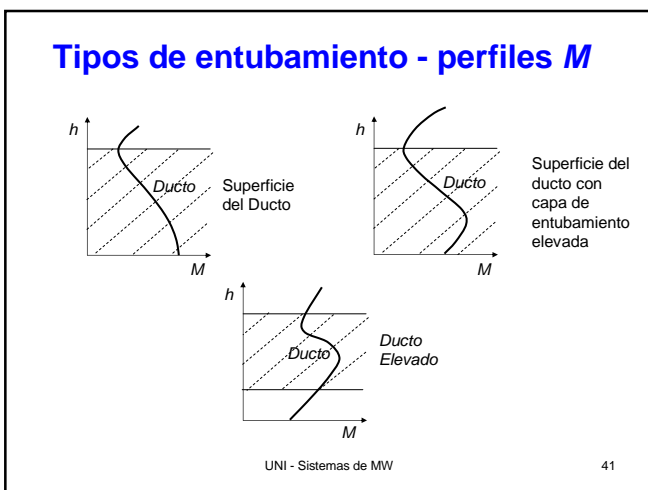
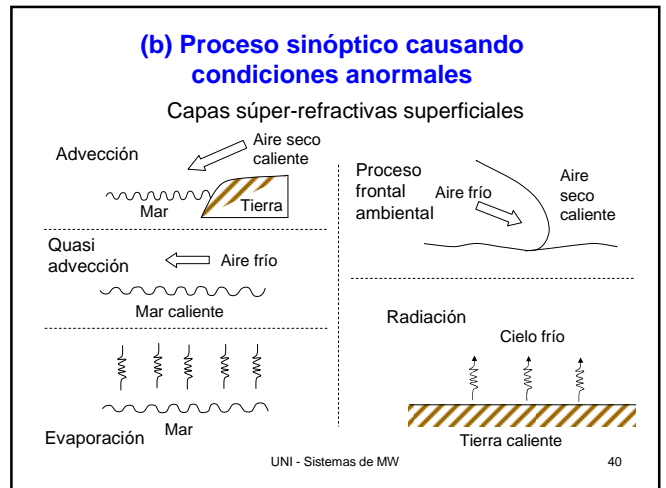
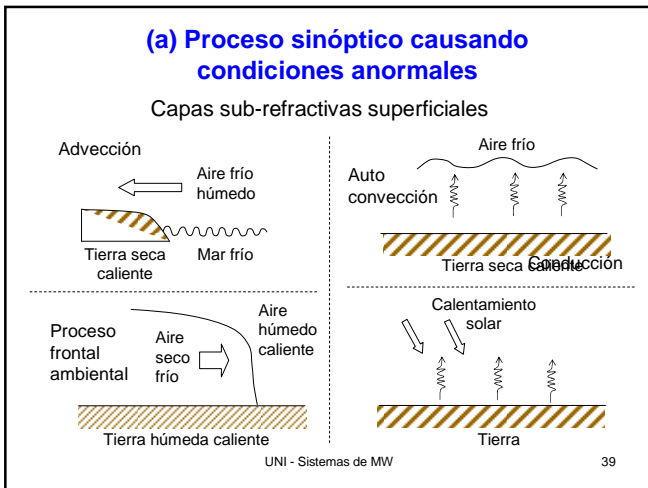
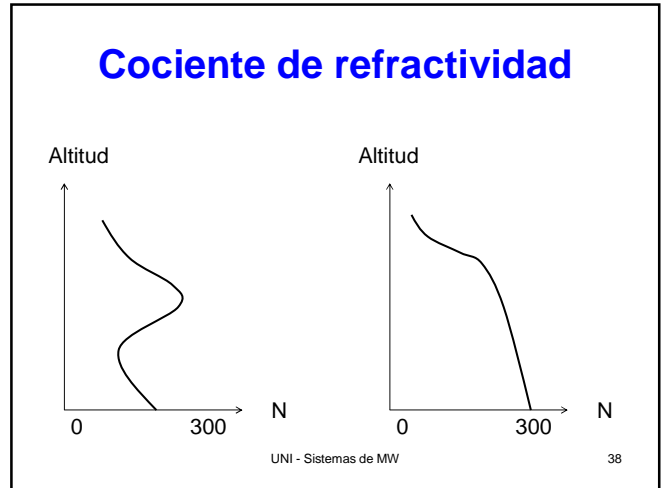
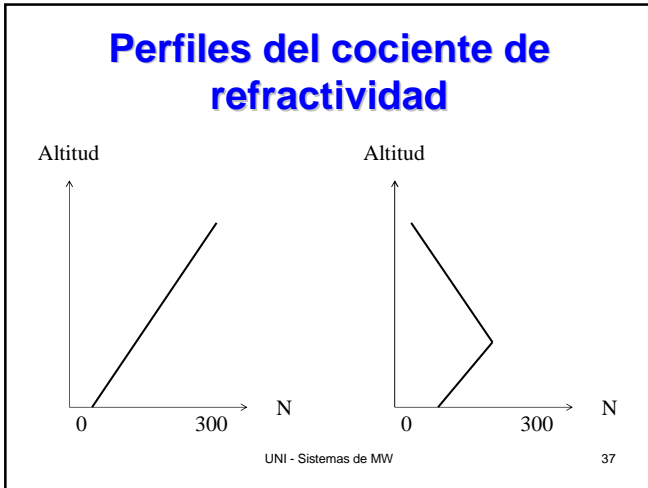
Super-refracción : Multitrayecto - ducting



### Refractividad modificada

- Para aplicaciones de trazado de haz, se usa una refractividad modificada cuando se considera el ducting  $M = N + 10^6 h/a$  permite considerar que la tierra es plana con la condición atmosférica teniendo las características de  $M$
- El gradiente del flujo de refractividad con la altura ( $dM/dh = G + 157$ )

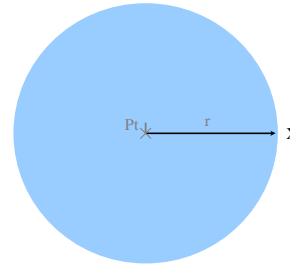
- En la práctica hay tres formas del perfil de  $M$  bajo condiciones de ducting
  - El ducto tiene una gradiente  $M$  negativa de la superficie al tope del ducto
  - El segundo de la superficie al ducto pero con una gradiente positivo de  $M$  presente en su superficie, formando una forma de S en la superficie del ducto
  - El tercero es cuando el valor de  $M$  en la superficie es menor que el valor en el tope tal que el ducto no se extiende hacia abajo (ducto elevado)



### Propagación en el espacio libre

- Las ondas de radio son afectadas por la presencia de la Tierra y la atmósfera que la rodea.
- Para nuestro caso es la troposfera.
- Las pérdidas entre dos antenas que no son afectadas por la Tierra se denominan pérdidas de espacio libre.

### Pérdidas de RF espacio libre



Densidad de potencia a X =  $Pt / 4\pi r^2$  Watts/m<sup>2</sup>

La apertura de una antena isotrópica esta dada por:

$$\lambda^2 / 4\pi$$

La potencia disipada en una carga conectada al terminal de la antena en el punto X:

$$Pr = (Pt / 4\pi r^2) \times (\lambda^2 / 4\pi) = \lambda^2 Pt / (4\pi r)^2$$

$$Pr/Pt = \lambda^2 / (4\pi r)^2$$

En el área de comunicaciones de Microondas, La pérdida de espacio libre (FSL) es normalmente expresada en dB, para una frecuencia (f) en GHz, y distancia (d) en km:

$$FSL = 92.45 + 20 \log f + 20 \log d$$

### Estimación de la potencia requerida

- Se calcula el porcentaje de tiempo que la señal recibida podría estar debajo del umbral del RX relativo al periodo de tiempo total
- Margen de atenuación o desvanecimiento (Margen de Fading) es la diferencia entre el nivel nominal de la señal y el nivel del umbral del RX

### Umbral de recepción (Threshold)

- Es la mínima señal requerida para que el demodulador del Rx trabaje a una especifica tasa de error
- Son definidos dos umbrales
  - A un BER de 10<sup>-6</sup>
  - A un BER de 10<sup>-3</sup>
- Para enlaces analógicos se refieren al nivel de potencia de Rx en dBm (p.e -72dBm)

### Desvanecimiento en los enlaces

- Las variaciones de la señal alrededor del valor nominal de Rx son comúnmente referidas como desvanecimientos
- Las variaciones pequeñas puntuales en el gradiente de refractividad a través del cual la señal pasa durante su trayecto se denominan centelleo y no tiene efecto en el conjunto y pueden ignorarse



- Variaciones estacionales o diurnas en el gradiente de refracción promedio afecta la señal causan desvanecimiento refractivo.
- Esto incluye: Desvanecimiento por refracción, expansión de haz (desenfoque), desvanecimiento por multi-trayecto, el cual resulta en desvanecimiento tipo Raleigh en sistemas de banda angosta y desvanecimiento selectivo Raleigh aditivo en sistemas de banda ancha; entubamiento o desvanecimiento total (blackout)

UNI - Sistemas de MW 49

- Otra causa es la lluvia en sistemas de alta frecuencia (arriba de los 10 GHz)
- **Desvanecimiento Plano:** Es independiente de la frecuencia y por consiguiente resulta en una igual atenuación a través del ancho de banda del Rx,
- Ejemplos: Desvanecimiento por lluvia y difracción, este término es usado para describir la atenuación por desvanecimiento por multi-trayecto en sistemas de banda angosta, los cuales describen una curva de distribución de probabilidad tipo Raleigh

UNI - Sistemas de MW 50

### Absorción atmosférica

- El vapor de agua y el oxígeno absorben la energía EM.
- La resonancia del Oxígeno ocurre aprox. a 0.5 cm (60 GHz) y la del vapor de agua a 1.3 cm (23 GHz)
- La absorción de vapor de agua y la atenuación por lluvia son considerados a partir de los 10 GHz
- La lluvia causa que la señal se disperse

UNI - Sistemas de MW 51

### Desvanecimiento por difracción

- Cuando el gradiente de refractividad positivo esta presente, el haz de radio es refractado hacia arriba y de aquí la porción del frente de onda que es recibido en un punto distante ha viajado muy cerca de la tierra que lo usual, debe asegurarse que la pérdida por difracción no cause una interrupción total (outage), colocando la antena de Rx a una altura conveniente.

UNI - Sistemas de MW 52

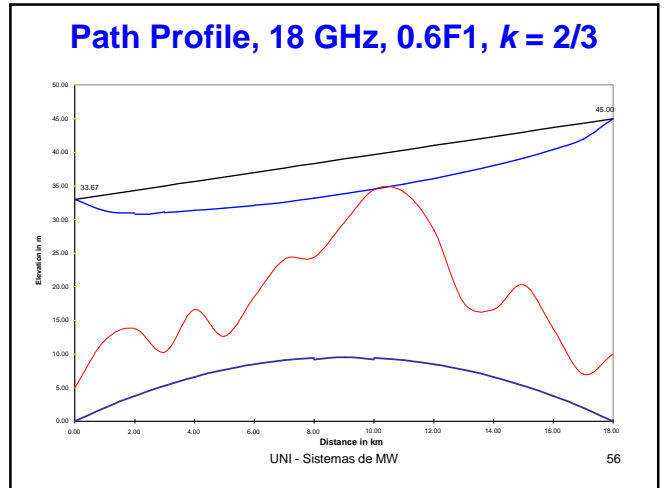
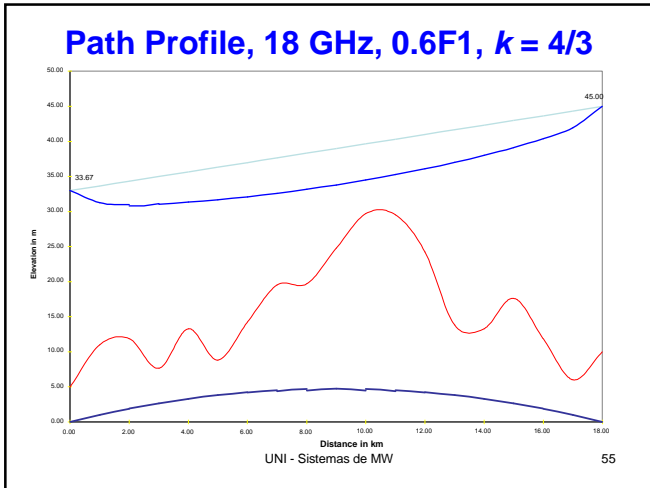
### Zona de Fresnel

- El perfil del trayecto debe ser trazado tal que muestre la altura de las antenas y las alturas del terreno teniendo en cuenta las variaciones de  $k$ .
- Para un área particular del perfil que tiene la menor medida de claridad del rayo directo dibujado entre las dos antenas es llamado el obstáculo dominante

UNI - Sistemas de MW 53

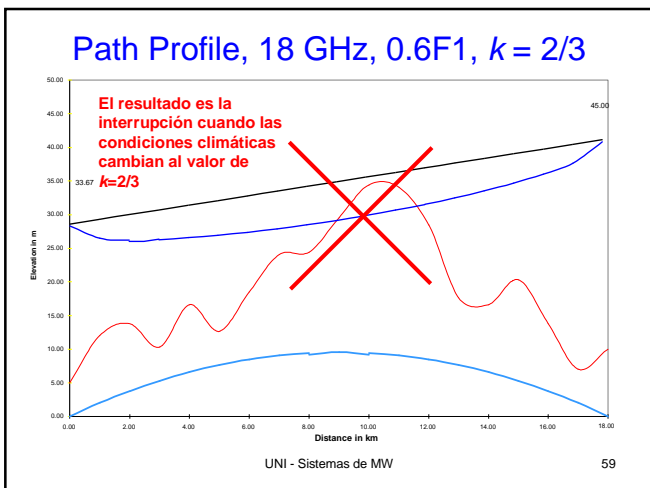
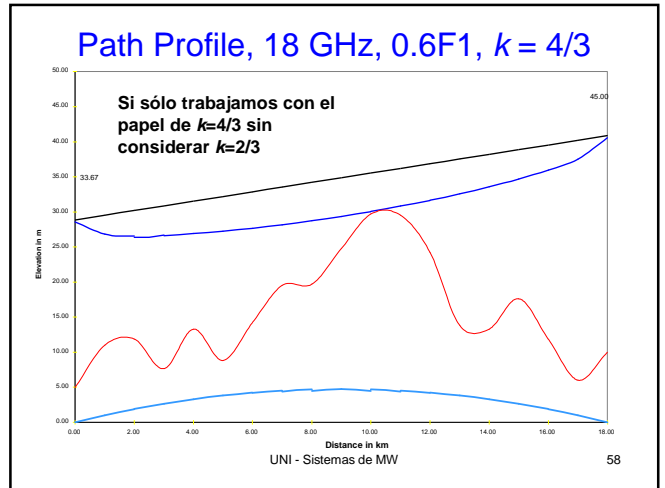
### Configuración sistema típico

UNI - Sistemas de MW 54



**¿Qué pasa si no se tiene cuidado en tener claridad en la 1ra Zona de Fresnel, bajo distintos valores de  $k$ ?**

UNI - Sistemas de MW 57



- En algunos casos el obstáculo dominante puede ser diferente para diferentes valores de  $k$ .
  - Línea de vista rasante (**NLOS** Near **Line Of Sight**): Cuando el trayecto de línea de vista (**LOS** - **Line Of Sight**) entre las dos antenas pasa a las justas el obstáculo dominante, la línea de vista rasante podría no resultar en condiciones de propagación de espacio libre
- UNI - Sistemas de MW 60

- Este concepto está basado en la introducción de una pantalla delgada infinita en el trayecto directo de un frente de onda electromagnético y analizando la curvatura alrededor de la pantalla, el cual es llamado difracción.
- De acuerdo con el principio de Huygen, un frente de onda puede ser considerado como un número infinito de pequeñas ondulaciones secundarias cada una radiando energía en la misma forma que la fuente primaria, así produciendo un frente de onda secundario.

UNI - Sistemas de MW

61

- La intensidad de campo recibida que podría ser medido en la antena receptora es la suma de un infinito número de diminutas onditas producidas por la antena transmisora.
- Elementos fuera del eje principal del haz de microondas, formando la superficie directa entre las dos aperturas de las antenas, así contribuyen al total del campo recibido.
- Sí ellos son bloqueados, la intensidad de campo recibida en la antena es afectada.

UNI - Sistemas de MW

62

- El retardo de fase de los componentes fuera del eje es también crítico.
- Sí el componente fuera del eje es retardada  $\lambda/2$ , luego cuando ellos son sumados en el lado del receptor ellos se cancelarán; sí la diferencia es de un  $\lambda$ , se sumarán.
- Bajo condiciones de espacio libre los complejos arreglos de fase resultan en una condición normal de decremento de la intensidad de campo con el cuadrado de la distancia desde la antena.

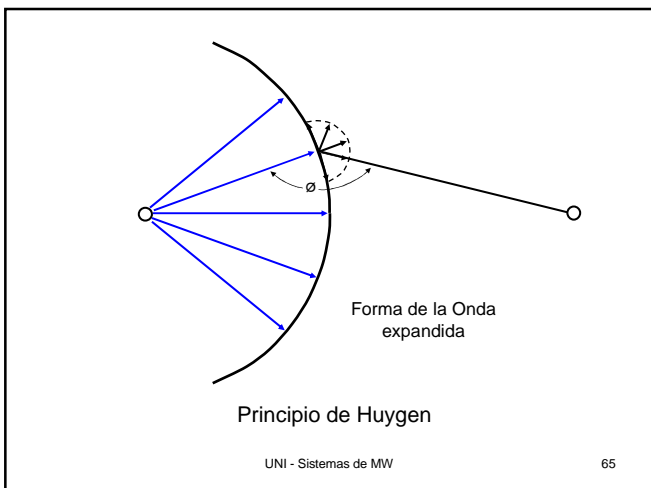
UNI - Sistemas de MW

63

- Sin embargo, sí la pantalla es introducida tal que bloquee una porción del frente de onda, el modelo luce completamente diferente y áreas con mínimos y máximos que pueden ser observados a medida que la pantalla bloquee más y más el frente de onda.
- Esto es mostrado visualmente en óptica donde una pantalla con un agujero en él bloquea a una fuente de luz, resultando en un patrón de difracción de círculos concéntricos de luz y oscuridad.

UNI - Sistemas de MW

64



UNI - Sistemas de MW

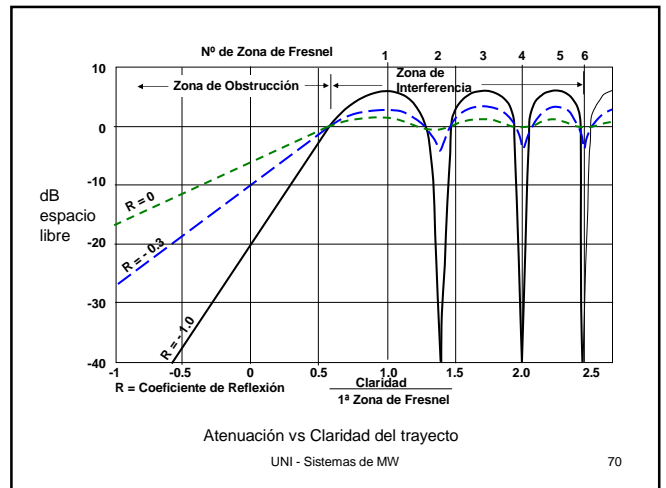
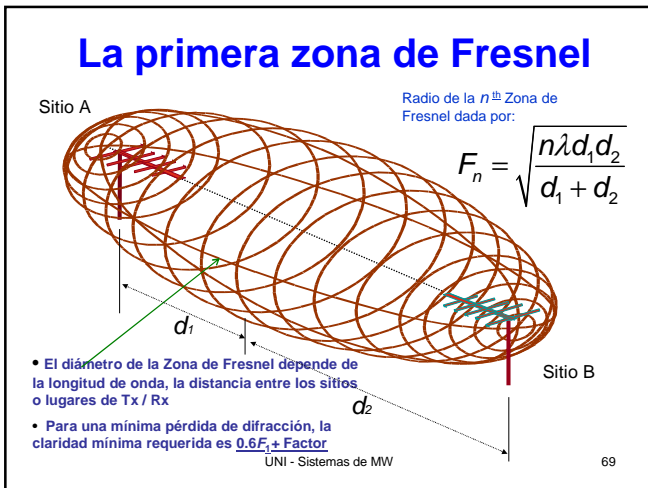
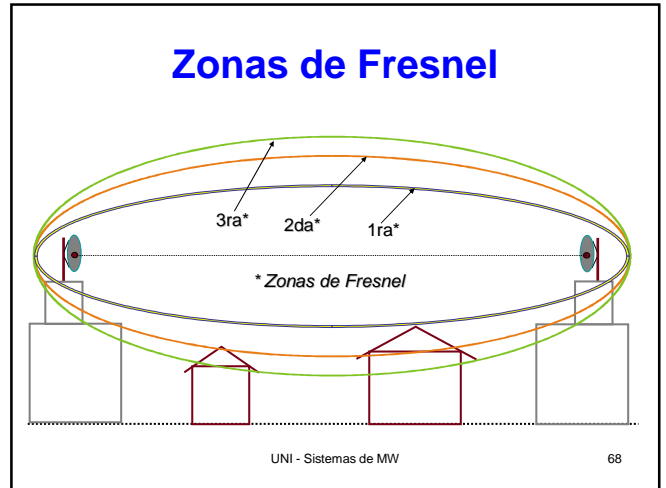
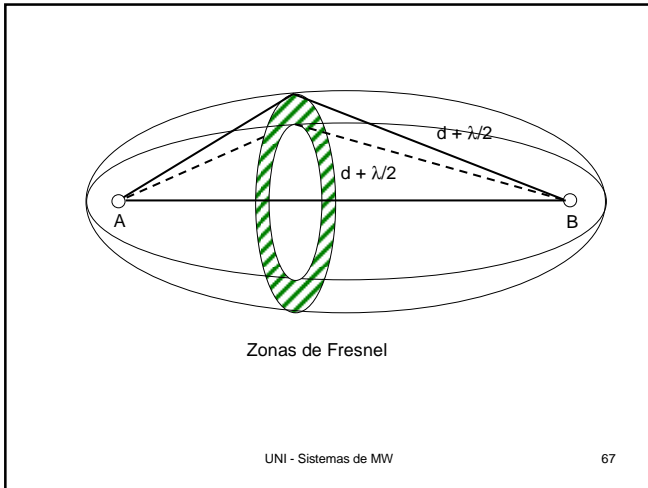
65

- Los puntos limítrofes están donde la diferencia del trayecto entre el rayo directo y un rayo desde un ondita secundaria son múltiples de media longitud de onda.
- De acuerdo con la teoría de las Zonas de Fresnel, estos puntos están definidos por una serie de elipses donde las dos antenas son los focos. Esto es ilustrado en la figura siguiente.

$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

UNI - Sistemas de MW

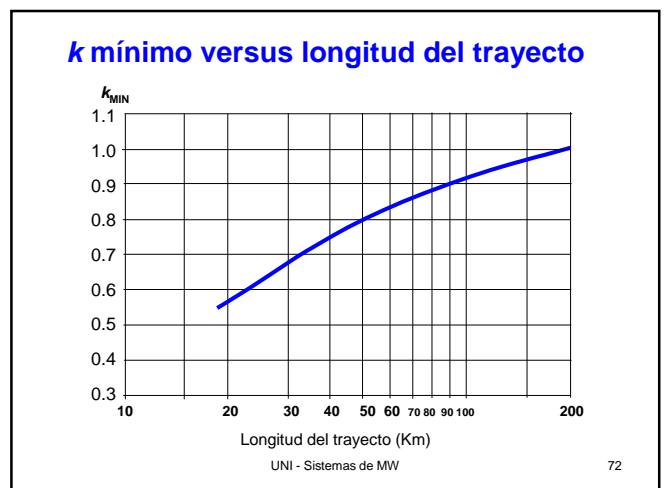
66



### Valores mínimos de k

- Cuando están presentes abruptos gradientes de refracción positivos, condición donde son consideradas las pérdidas de difracción, corresponde a un valor mínimo de k.
- Este valor mínimo de k varía de región en región y también de estación en estación.
- Obviamente el mayor valor de k mínimo, más baja es la altura de la torre requerida.

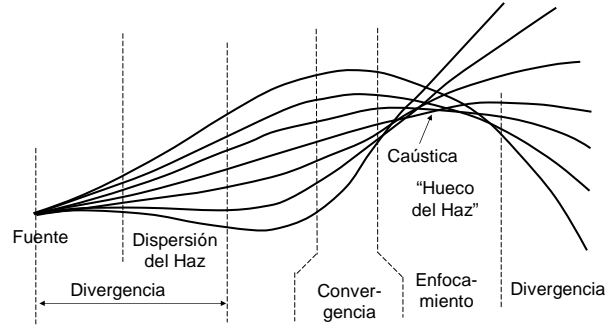
UNI - Sistemas de MW 71



### Dispersión del haz

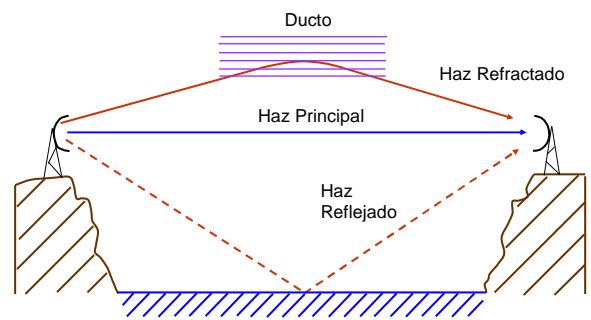
- Cuando ocurre una condición atmosférica súper-refractiva, una condición cáustica puede ser creado a lo largo del cual ocurre el enfocamiento del la energía del haz, con los llamados agujeros de radio creados alrededor de él.
- Dependiendo de la altura de esta capa y las alturas de las antenas de TX y RX, un reforzamiento o reducción señal puede ocurrir.

### Efecto de la capa de ducting sobre el haz de microonda



### Propagación por multitrayecto

- Un ducto atmosférico tiene un gradiente negativo muy abrupto y tiende a refractar fuertemente la señal de radio hacia abajo.
- Dependiendo de donde está situado el ducto relativo a la señal de radio más de un camino de transmisión es posible.
- Esta condición es llamada multitrayecto atmosférico



### Entubamiento (Ducting)

- Cuando el gradiente de refracción es tan fuertemente negativo que el haz es doblado hacia abajo de tal manera que no es recibido en la antena receptora.
- Ocurre en áreas donde la variación promedio del gradiente de refractividad es muy alto.
- En áreas donde los gradientes negativos exceden el 50% de ocurrencia son áreas de alto riesgo



Muchas gracias por su atención



UNI FIEE  
Lima Perú