

PREDICCIONES DE ATENUACION POR LLUVIA Y GASES ATMOSFERICOS EN LA BANDA Ku PARA LA CIUDAD DE QUITO

JAN-WILLEM WALLENBURG
Technische Universiteit Eindhoven
Eindhoven - Países Bajos

ING. MARIO R. CEVALLOS V.
Escuela Politécnica Nacional
Quito - Ecuador

El presente artículo corresponde a un extracto de parte del informe sobre el proyecto: "Estudio de Factibilidad de una Estación Terrena Satelital para Experimentos de Propagación en la Banda Ku", que se está realizando en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

RESUMEN. - Se presentan alternativas de estimación y cálculo de la atenuación por lluvia y gases atmosféricos en la Banda Ku para la ciudad de Quito. Para la atenuación por lluvia se han aplicado dos procedimientos: uno utilizando el procedimiento y el modelo recomendados por el CCIR, con datos derivados de mapas y diagramas publicados por el CCIR, referidos a la ciudad de Quito. El otro en cambio hace uso de datos meteorológicos disponibles en el Observatorio Astronómico de Quito. Los Resultados obtenidos por los dos procedimientos se presentan en curvas de atenuación excedente vs porcentaje de tiempo en un año promedio.

ABSTRACT. - This report presents alternatives for estimation and evaluation of attenuation by rain and hydrometeors in the Ku band for a site located in Quito - Ecuador. For rain attenuation two different procedures have been applied: the CCIR recommended model for rain attenuation and precipitation, and using meteorologic data obtained from the Astronomic Observatory in Quito. The results are given in curves of excess attenuation for time percentage on an average year.

INTRODUCCION

El efecto de la lluvia en la propagación de ondas electromagnéticas en frecuencias del rango superior de micro ondas es muy importante. Para este caso se consideran frecuencias superiores, las mayores que 10 GHz. Las gotas de lluvia absorben y disipan energía de las ondas de radio en el trayecto de propagación. La atenuación debida a la lluvia es aceptable para un cierto porcentaje del tiempo y por eso se necesitan estimaciones de dicha atenuación. Se puede estimar la atenuación por lluvia de varias maneras. Una es analizar datos diarios de intensidades de lluvia. Desgraciadamente, muchas veces no se dispone de este tipo de datos, sino solamente datos de cantidades de lluvia, los cuales son importantes para la agricultura. Estos datos no son muy detallados, pues dan cantidades de lluvia por día o por hora en lugar de por minuto.

Otra forma de estimación es utilizar el método de predicción de la propagación del CCIR. Este método calcula las estadísticas de término largo de la atenuación por lluvia. El CCIR publica mapas para determinar el tipo de clima del lugar en estudio.

En este artículo se tratarán el método del CCIR y un análisis de datos meteorológicos. El objetivo es estimar la atenuación por lluvia para ciertos porcentajes del tiempo, a fin de determinar aproximadamente las posibilidades para comunicación por satélite en la banda Ku para la ciudad de Quito. También se verificará la validez de los mapas del CCIR para la región.

1.- ATENUACION POR LLUVIA

1.1.- Precipitación lluviosa y atenuación específica

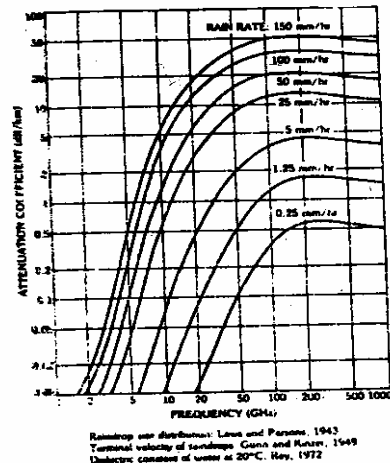


Fig. 1.- Atenuación por lluvia vs. frecuencia.

La figura 1 muestra la atenuación específica por lluvia para varias intensidades vs. frecuencia, [721-3]. Generalmente se expresa la intensidad de la precipitación lluviosa por la medida, forma, orientación, velocidad y temperatura de las gotas de lluvia. El cálculo de la atenuación es influido fuertemente por la supuesta estructura de la precipitación. Para aplicaciones prácticas se puede aproximar la relación entre la atenuación por lluvia Γ_r (dB/km) y la intensidad de lluvia R (mm/hora) con la ley de potencia, [721-3].

(1)

$$h_g (km) = \begin{cases} 4.0 & 0. < \gamma < 36^\circ \\ 4.0 - 0.075 (\gamma - 36) & \gamma = 36^\circ \end{cases} \quad (2)$$

donde k y a son constantes, altamente dependientes de la frecuencia y la estructura de la precipitación, y débilmente de la polarización.

Los valores de los coeficientes k y a han sido calculados para un número de frecuencias entre 1 y 1000 GHz y son dados en el modelo del CCIR, [721-3], el mismo que supone lo siguiente:

Forma de las gotas: oblada esferoidal.

Temperatura de las gotas: 20°C.

Distribución de la medida de las gotas: según Law y Parsons.

Velocidad de las gotas: según Gunn y Kinzer.

1.2.- Distribución Acumulativa de lluvia

La conducta de término largo de la intensidad de lluvia se describe con una distribución acumulativa estadística, generalmente se da una curva de intensidad excedente. Esta curva muestra los porcentajes del tiempo (generalmente de un año) para los cuales la intensidad excedió un cierto valor. Porcentajes importantes son, por ejemplo, 1% y 0.01%. La tabla 1 indica la duración en tiempo que corresponde a algunos porcentajes.

Con los datos de intensidad de lluvia excedente, se calcula la atenuación excedente y estos resultados se presentan en las llamadas curvas de atenuación excedente, las mismas que indican los porcentajes para los cuales la atenuación excedió un cierto valor, [Pratt].

2.- EL MODELO DEL CCIR PARA CALCULAR LA ATENUACION POR LLUVIA

El modelo del CCIR, [564-4], calcula la distribución acumulativa de la atenuación por lluvia. Requiere el valor de la intensidad de lluvia excedente para 0.01% de un año promedio en el lugar concerniente. El método consta de dos partes: la primera predice la atenuación excedente para 0.01% del tiempo, la segunda predice la atenuación excedente para porcentajes entre 0.001% y 1%.

2.1.- Parámetros de entrada:

$R_{0.01}$: Intensidad de lluvia (en mm/hora) excedente en el lugar concerniente para 0.01% de un año promedio.

h_s : Altura de la estación terrena (en km) sobre del nivel promedio del mar.

E_l : Ángulo de elevación (en °).

ϕ : Latitud de la estación terrena (en °).

f : Frecuencia (en GHz).

2.2.- Altura efectiva de lluvia

La altura efectiva h_g para la latitud ϕ de la estación:

Para el presente caso la altura efectiva de lluvia no se calculó según el método del CCIR, sino según [All]. De acuerdo con [564-4] dicha altura sería de 3.0 km en el caso de Quito. Este valor no puede ser correcto, dado que la altura de Quito es 2.8 km. por lo que parece ser mejor utilizar el método anterior, el cual entrega 4.0 km. Este aspecto necesita más estudio.

2.3.- La Longitud de trayecto inclinado

Para $E_l > 5^\circ$, la longitud de trayecto inclinado L_s está dado por:

$$L_s (km) = \frac{h_g - h_s}{\sin E_l} \quad (3)$$

La proyección horizontal L_g de L_s :

$$L_g (km) = L_s \cdot \cos(E_l) \quad (4)$$

En el siguiente diagrama se ilustra lo anterior:

Fig.2.- Presentación esquemática de un trayecto tierra-espacio

2.4.- El factor de reducción

El factor de reducción $r_{0.01}$, para 0.01% del tiempo, se puede calcular con:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + L_g/L_a} \quad (5)$$

donde:

$$L_a = 35 \cdot \exp(-0.015 \cdot R_{0.01}) \quad (6)$$

2.5.- La atenuación específica r_f .

$$r_f (dB/km) = K \cdot (R_{0.01})^a \quad (7)$$

Se indicó que k y a han sido calculados para un número de frecuencias entre 1 y 1000 GHz, valores para otras frecuencias se obtienen por interpolación logarítmica para la frecuencia y K , e interpolación lineal para a . La tabla 2 muestra algunos valores de dichos coeficientes:

Las siguientes fórmulas indican como se calculan los valores de estos coeficientes:

$$K = [K_{f\gamma} + K_{f\tau} + (K_{f\beta} - K_{f\gamma}) \cdot \cos^2 E_l \cdot \cos 2\tau] / 2 \quad (8)$$

$$a = [K_{a\beta} + K_{a\tau} + (K_{a\gamma} - K_{a\tau}) \cdot \cos^2 E_l \cdot \cos 2\tau] / 2R \quad (9)$$

donde τ es el ángulo de inclinación. Este ángulo es de interés para la

Tabla 1.- Algunos porcentajes y la duración correspondiente

Porcentaje del tiempo (%)	1	0.1	0.01	0.001
Tiempo de un año (min)	5256	525.6	52.6	5.3

2.6.- La atenuación excedente

La atenuación excedente para 0.01% de un año promedio se obtiene de:

$$A_{0.01} = r_p L_s R_{0.01} \text{ dB} \quad (10)$$

La atenuación excedente para otros porcentajes de un año promedio, entre 0.001% y 1%, se puede estimar con:

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0.12 \cdot p^{-0.546 + 0.043 \log p} \quad (11)$$

donde p es el porcentaje requerido

3.- LAS REGIONES DE CLIMAS SEGUN EL CCIR

Para calcular la atenuación por lluvia según el método del CCIR, se necesita el parámetro $R_{0.01}$, la atenuación excedente para 0.01% de un año promedio en el lugar concerniente. Generalmente este parámetro es desconocido. Por lo tanto el CCIR publica mapas de regiones de climas, [563-4] para que se pueda estimar $R_{0.01}$. Estos mapas no son muy exactos. Quito, por ejemplo, está en una región muy extensa que comprende Brasil, Colombia y Venezuela. El mapa no muestra las grandes diferencias de clima que existen en los alrededores de la ciudad.

Tabla 2.- Algunos valores de los coeficientes K y δ

Frecuencia (GHz)	K_H	K_V	δ_H	δ_V
4	0.00065	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128

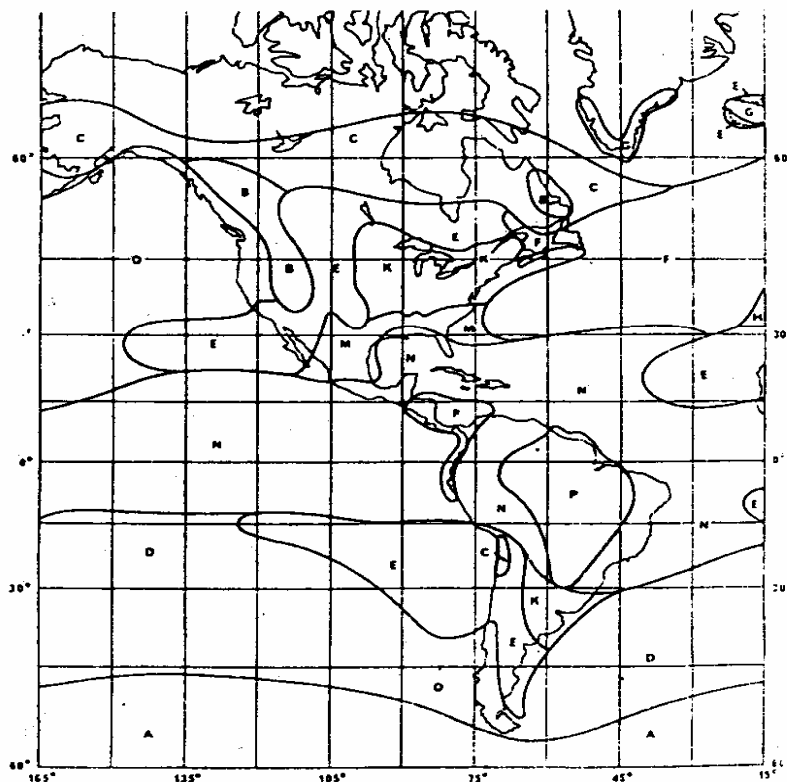


Fig. 3.- Regiones de lluvia

Hay dos tipos de mapas: el uno consiste de regiones de clima, Fig 3, donde se muestra que Quito está ubicada en la región N. De este mapa se deriva la tabla que da las intensidades excedentes de lluvia para algunos porcentajes del tiempo.

El segundo tipo de mapa muestra contornos de intensidades de lluvia. Este mapa es más exacto que el primero, pero probablemente no sea suficiente puesto que da solamente la atenuación excedente para 0.01% del tiempo, ver Fig. 4. De este mapa se tiene que el parámetro $R_{0.01}$ es igual a 120 mm/hora para Quito. Este valor es mayor que el del otro mapa, o sea 95 mm/hora.

En la siguiente parte se calcula la atenuación excedente en Quito, según los dos valores anteriores de $R_{0.01}$. Para comparación también se evalúa la atenuación excedente según datos meteorológicos.

3.1.- Cálculo de la Atenuación por Lluvia según los Datos del CCIR

Introduciendo los datos para Quito en el proceso indicado en la sección anterior se calcula la atenuación excedente. Primero se

utiliza el valor de $R_{0.01}$ del diagrama 4, 120 mm/hora, después se utilizan los valores de la tabla 3. En este caso no se necesita calcular los otros porcentajes diferentes de 0.01% del tiempo, solamente se necesita convertir todas las intensidades a atenuaciones.

3.2.- Proceso de cálculo

Datos de entrada:

$R_{0.01}$: 120 mm/hora
 h_s : 2.85 km
 E_l : 57.3° (satélite Intelsat VA F3)
 ϕ : 0°
 f : 11.2 GHz

La altura efectiva de lluvia se calcula para la latitud ϕ de la estación:

$$h_f = 4.0 \text{ km} \quad (12)$$

La longitud del trayecto inclinado L_s , está dada por:

$$L_s = \frac{4.0 - 2.85}{\sin 57.3^\circ} = 1.37 \text{ km} \quad (13)$$

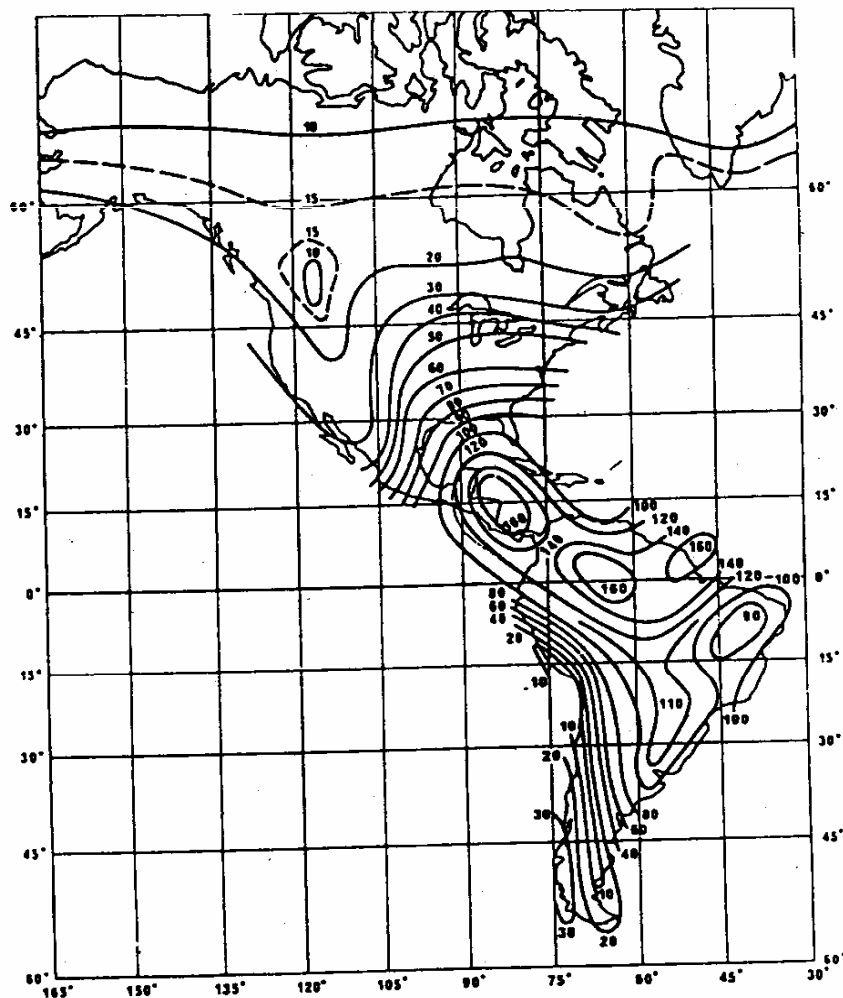


Fig. 4.- Contornos de intensidades de lluvia para 0.01% del tiempo

Tabla 3.- Intensidades excedentes de lluvia

Porcentaje del tiempo (%)	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3	0.1
Intensidad excedente (mm/hora)	180	140	95	65	35	15	5

La proyección horizontal L_G de L_S :

$$L_G = 1.37 \cdot \cos(57.3^\circ) = 0.74 \text{ km} \quad (14)$$

Con los parámetros L_G y $R_{0.01}$ se calcula el factor de reducción $r_{0.01}$ para 0.01% del tiempo:

$$L_0 = 35 \cdot \exp(-0.015 \cdot 120) = 5.79 \text{ km} \quad (15)$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1+0.74/5.79} = 0.89 \quad (16)$$

La atenuación específica r_f con:

$$K = 0.0142 \quad (17)$$

$$a = 1.214 \quad (18)$$

$$r_f = 0.0142 \cdot (120)^{1.214} = 4.75 \text{ dB/km} \quad (19)$$

Los valores de los coeficientes k y a se calcularon con los valores de la tabla 2 y según el proceso de interpolación indicado. El ángulo de inclinación es desconocido, por lo que se utilizó el promedio de los valores con los ángulos máximo (45°) y mínimo (0°). Sin embargo, este ángulo tiene poca influencia en el resultado.

La atenuación excedente para 0.01% de un año promedio es la siguiente:

$$A_{0.01} = 4.75 \cdot 1.37 \cdot 0.89 = 5.77 \text{ dB} \quad (20)$$

La atenuación excedente para otros porcentajes de un año promedio, entre 0.001% y 1%, se puede estimar por:

$$A_p = 5.77 \cdot 0.12 \cdot p^{-0.546+0.043 \log p} \text{ dB} \quad (21)$$

La tabla 4 presenta los valores para todos los porcentajes.

No solamente se puede utilizar los datos de la Fig. 4, sino también los datos de la tabla 3. Esta tabla da las intensidades excedentes de lluvia. En este caso la distribución de intensidades es conocida, de modo que no es necesario estimar la distribución de intensidades con la fórmula (11), sino solamente convertir las intensidades a atenuaciones.

La altura efectiva de lluvia es la misma:

$$h_f = 4.0 \text{ km} \quad (22)$$

La longitud de trayecto inclinado L_S y la proyección horizontal L_G de L_S también son las mismas:

$$L_S = 1.37 \text{ km} \quad (23)$$

$$L_G = 0.74 \text{ km} \quad (24)$$

Con los valores anteriores pero utilizando en este caso $R_{0.01}$ igual a 95 mm/hora:

$$L_0 = 35 \cdot \exp(-0.015 \cdot 95) = 8.42 \text{ km} \quad (25)$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1+0.74/8.42} = 0.92 \quad (26)$$

En este caso en vez de calcular solamente la atenuación para 0.01% del tiempo y estimar los otros porcentajes con la fórmula (11), se calcula la atenuación para todos los porcentajes, es decir para las intensidades excedentes de la tabla 3. El parámetro R_p es la intensidad de lluvia excedente para el porcentaje especificado del tiempo.

$$r_f = 0.0142 \cdot (R_p)^{1.214} \text{ dB/km} \quad (27)$$

Tabla 4.- La atenuación excedente según $R_{0.01}=120$ mm/hora

porcentaje del tiempo (%)	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0
atenuación excedente (dB)	12.34	10.02	7.40	5.77	4.40	3.01	2.20	1.59	1.00	0.69

La atenuación excedente para un porcentaje p de un año promedio es la siguiente:

$$A_p = r_f \cdot L_s \cdot r_{0.01} \text{ dB} \\ = r_f \cdot 1.37 \cdot 0.89 \text{ dB} \quad (28)$$

de donde se verifica que r_f es diferente para cada intensidad de lluvia. La tabla 4 da los valores de la atenuación excedente para todos los porcentajes de la tabla 3. Estos valores se calcularon con la fórmula anterior y las intensidades de la tabla 3.

La tabla a continuación indica la atenuación calculada según el modelo del CCIR, [564-4], con $R_{0.01}=120$ mm/hora.

Tabla 5.- La atenuación excedente según las intensidades de la región N.

Porcentaje del tiempo (%)	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3	1.0
Atenuación excedente (dB)	9.79	7.21	4.51	2.84	1.34	0.48	0.13

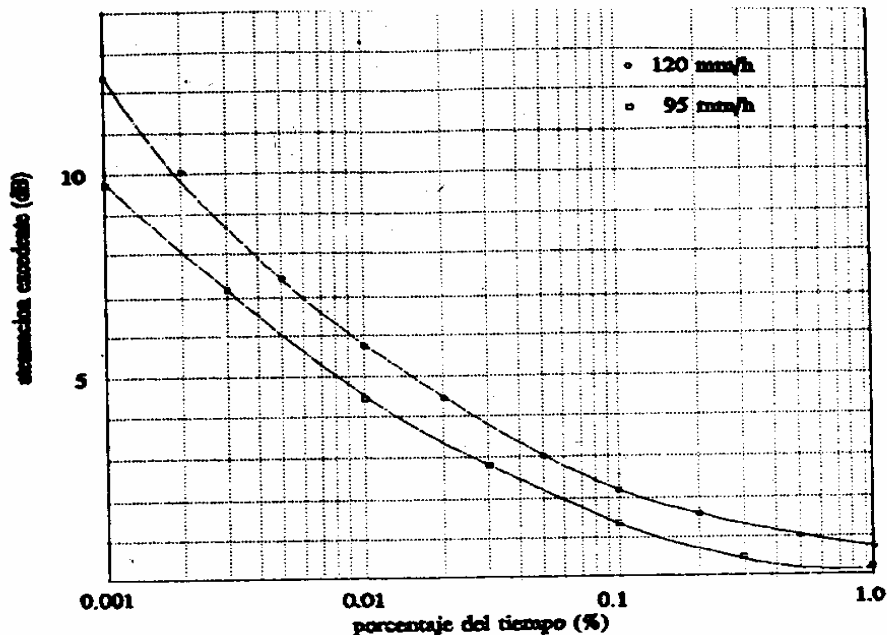


Fig. 5.- Curvas de atenuación excedente según datos del CCIR

posible obtener datos de intensidades derivando la variación de la cantidad respecto del tiempo. El problema es que para el cálculo de la atenuación excedente se utilizan tiempos muy cortos. Por ejemplo, es muy común estudiar un porcentaje de 0.01% de un año promedio. Este porcentaje corresponde a una duración de 53 minutos. Por esta razón, datos de cantidades por hora o por día no tienen mucho valor. En lugar de estos datos se necesitan datos de cantidades por minuto, o más exactos. De esta manera si se identifican sucesos cortos.

Los datos disponibles corresponden a datos de los pluviógrafos de la estación meteorológica del Observatorio Astronómico de Quito. Consisten en curvas diarias de la cantidad de lluvia.

Utilizando los datos de las tablas 4 y 5 se graficaron las curvas de atenuación excedente mostradas en la Fig. 5.

4.- ESTIMACION DE LA ATENUACION CON DATOS METEOROLOGICOS

En la siguiente parte se calculará la atenuación excedente según algunos datos meteorológicos. Los resultados de este cálculo serán comparados con los resultados de los cálculos según los datos del CCIR.

4.1.- Datos de pluviógrafos

Se indicó que los datos meteorológicos disponibles para Quito, corresponden a cantidades de lluvia, de los cuales es

Se considera que es posible, con las curvas diarias, estimar intensidades hasta 50-75 mm/hora y con una duración mínima de 1 minuto con una exactitud de 25%. También se puede estimar intensidades más altas, pero serán menos correctas. La exactitud depende de la duración del suceso; se puede medir sucesos largos con más precisión. La exactitud no solamente está limitada por el método de estimación de la intensidad, es decir derivando la curva, sino también está limitada por el equipo, en este caso por el pluviógrafo, que no puede medir cambios muy rápidos.

Esto no tendrá mucha importancia cuando estas intensidades correspondan a porcentajes menores de 0.01%, porque generalmente se utilizan porcentajes de 0.01% y mayores para el diseño de antenas

satelitales. Poco se conoce de los requerimientos de medidores de lluvia con respecto a su rango de operación. Se sabe que Intelsat, [eut], requiere para un proyecto en Indonesia que el rango lineal sea desde 3 a 90 mm/hora y el rango utilizable sea desde 1 a 150 mm/hora.

Por eso parece que la exactitud de los datos de pluviógrafos sea suficiente para estimar la atenuación excedente. Este estudio sirve para indicar el orden de magnitud de la atenuación, de todas maneras serán necesarios otros estudios y, más importante, mediciones para determinar de manera práctica dicha atenuación.

En resumen, probablemente sea posible estimar correctamente la atenuación excedente si las intensidades más altas de 50-75 mm/hora corresponden a porcentajes menores de 0.01%.

Para el cálculo de la atenuación por lluvia según los datos de pluviógrafos, la exactitud será suficiente para intensidades hasta 50-75 mm/hora. A continuación se calcularán las distribuciones acumulativas de la intensidad excedente de lluvia y la atenuación excedente.

Se acostumbra a analizar un año promedio, en este caso corresponde al año 1985, el cual se determinó con datos meteorológicos de los últimos veinte años. Para su identificación primero se determinó manualmente la variación de la derivada de la cantidad de lluvia vs. el tiempo. Segundo se determinó la duración para la cual la intensidad de lluvia excedió un cierto valor. Tercero se convirtieron los valores de intensidad de lluvia a valores de atenuación siguiendo el método del CCIR. En ese caso también se utilizó una distribución de intensidades excedentes de lluvia con la diferencia de que aquí se

utiliza la distribución derivada de los datos meteorológicos la misma que probablemente sea mejor, si por lo menos los porcentajes menores de 0.01% del tiempo corresponden a intensidades mayores de 50-75 mm/hora.

En la tabla 6 se muestra la distribución de intensidades excedentes de lluvia. Se vé que para un porcentaje del tiempo de 0.0098%, casi igual a 0.01%, la intensidad de lluvia excedió el valor de 60 mm/hora. Entonces para $R_{0.01}$ se escoge este valor. La tabla también muestra los resultados del cálculo de la atenuación, los parámetros de entrada son los mismos, solamente $R_{0.01}$ es diferente, 60 mm/hora, en lugar de 120 ó 95 mm/hora.

Como se observa en la tabla 6 no hay datos para porcentajes mayores de 0.53%, en realidad estos datos no tienen mucha importancia debido a que la atenuación estimada es menor de 0.1 dB. Tampoco hay datos de porcentajes menores de 0.001% ya que no es posible medir las altas intensidades de lluvia correspondientes a estos porcentajes, por lo que se espera que los valores de la atenuación debida a intensidades mayores que 50-75 mm/hora, no sean muy confiables, debido a la inexactitud del equipo y al método de análisis de las curvas de cantidad de lluvia. Por lo tanto el valor de $R_{0.01}$ es más o menos exacto dado que la intensidad de 60 mm/hora puede ser determinada con suficiente fiabilidad.

4.2.- Cálculo de la atenuación por lluvia con $R_{0.01}$ según los Datos de Pluviógrafos

Los parámetros de entrada son los mismos como en la sección anterior, solamente el parámetro $R_{0.01}$ es diferente. Según el pluviógrafo el valor de $R_{0.01}$ es igual a 60 mm/hora.

Tabla 6.- Intensidades excedentes de lluvia

intensidad excedente (mm/hora)	atenuación excedente (dB)	duración (min)	porcentaje del tiempo (%)
100	4.95	5.5	0.0010
90	4.36	8.5	0.0016
80	3.78	8.5	0.0016
70	3.21	33.5	0.0064
60	2.66	51.5	0.0098
50	2.14	69.5	0.013
45	1.88	95.5	0.018
40	1.63	123	0.023
35	1.39	143	0.027
30	1.15	197	0.037
25	0.92	278	0.053
20	0.70	370	0.070
15	0.49	571	0.11
10	0.30	1177	0.22
5	0.13	2775	0.53

proceso de cálculo:

$$R_{0.01} = 60 \text{ mm/hora}$$

$$L_0 = 14.23$$

$$I_{0.01} = 0.95$$

$$L_p = 1.37 \text{ Km}$$

$$r_g = 0.0142 \cdot (60)^{1.214} = 2.05 \text{ dB/Km} \quad (29)$$

$$A_{0.01} = r_{11} \cdot L_1 \cdot I_{0.01}$$

$$= 2.05 \cdot 1.37 \cdot 0.95 = 2.66 \text{ dB/Km} \quad (30)$$

La atenuación para otros porcentajes se calcula con:

$$A_p = 0.319 \cdot p^{-(0.546 + 0.043 \log p)} \text{ dB} \quad (31)$$

La atenuación para 0.01% del tiempo es igual a:

En la tabla 7 se presentan los valores de la atenuación para los porcentajes del tiempo en el rango desde 0.001% a 1%.

Tabla 7.- La atenuación excedente según $R_{0.01} = 60 \text{ mm/hora}$

porcentaje del tiempo (%)	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0
atenuación excedente (dB)	5.69	4.62	3.41	2.66	2.03	1.39	1.02	0.73	0.47	0.32

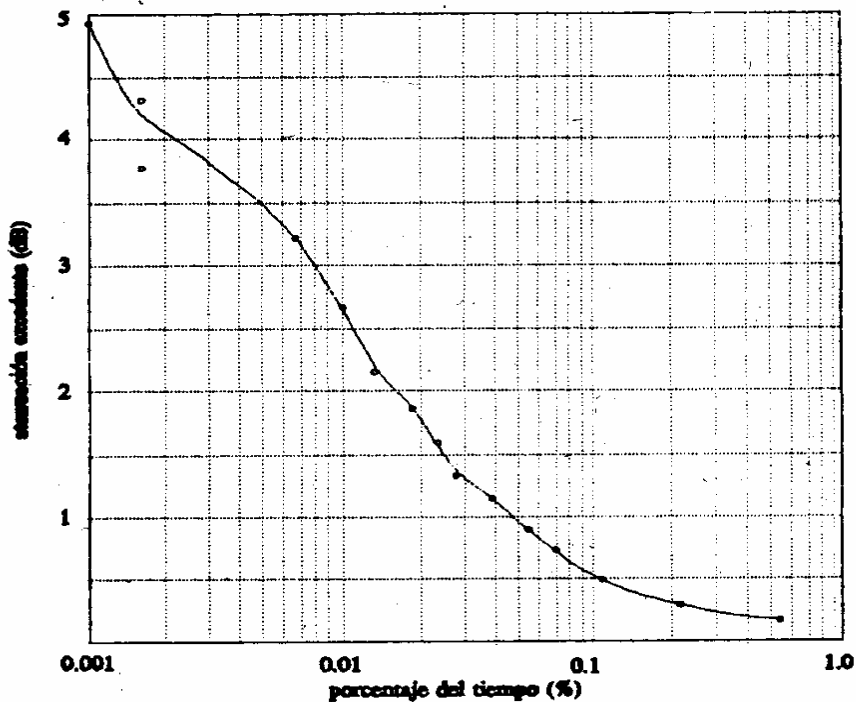


Fig. 6.- Curvas de atenuación excedente según datos de pluviógrafos

5.- ATENUACION POR GASES ATMOSFERICOS

No solamente la lluvia causa atenuación, especialmente en frecuencias altas, sino también los gases atmosféricos como oxígeno y vapor de agua y otras formas de precipitación como niebla nieve y granizo. La atenuación por otras formas de precipitación no tiene mucha importancia, mientras que la atenuación por gases atmosféricos es importante.

La atenuación de las ondas de radio es causada por la absorción molecular y

depende principalmente de la frecuencia, de la altura sobre el nivel del mar y de la humedad absoluta. Para frecuencias menores de 10 GHz la atenuación generalmente puede ser despreciable. El oxígeno tiene líneas de absorción en 118.74 GHz y entre 50 y 70 GHz. El vapor de agua tiene líneas en 22.2, 183.3 y 325 GHz. Cerca de estas frecuencias la atenuación es muy alta y la comunicación es difícil. La fig. 8 muestra la atenuación por gases atmosféricos vs. frecuencia.

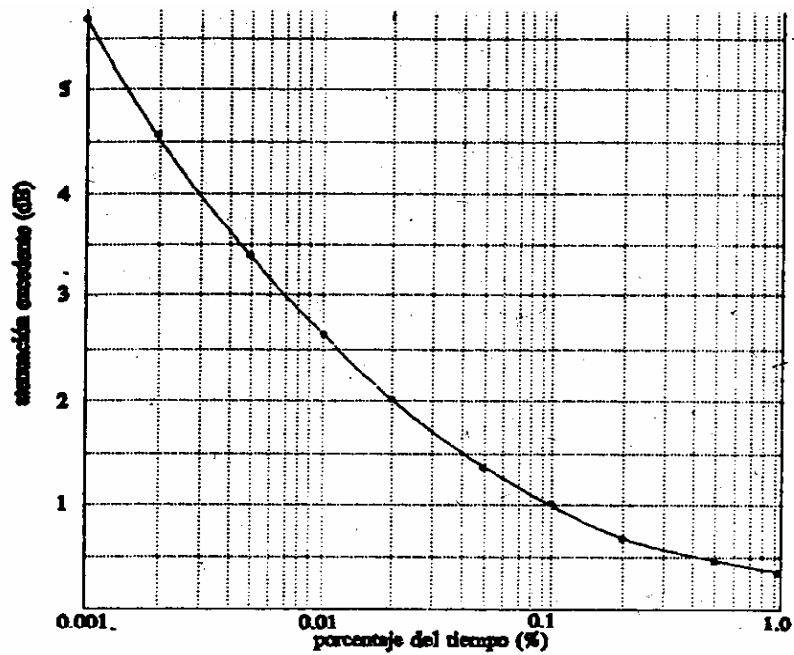


Fig. 7.- Curva de atenuación excedente para $R_{0.01} = 60\text{mm/hora}$

5.1.- El modelo del CCIR para calcular la atenuación por gases atmosféricos.

En esta parte se calculará la atenuación en la banda Ku por oxígeno y vapor de agua para el caso de una estación terrena en Quito. Se estima que dicha atenuación sea bastante baja, generalmente menos de 1 dB.

El CCIR desarrolló un modelo para predecir la atenuación por gases atmosféricos. Este modelo es válido para una presión atmosférica en el rango de 1013 ± 50 mb, el rango de temperatura desde -20°C a 40°C y la concentración de vapor de agua en el rango desde 0 a 50 g/m^3 . El modelo estima la atenuación por absorción molecular hasta 350 GHz. Hay dos casos; el caso de condiciones de cielo despejado y el caso de condiciones de precipitación lluviosa fuerte.

5.2.- Cálculos de atenuación por gases atmosféricos.

Los parámetros de entrada son los siguientes:

- h_t : Altura de la estación terrena (en km) sobre del nivel promedio del mar.
- EI : Ángulo de elevación (en $^\circ$).
- f : Frecuencia (en GHz).
- R_r : Humedad relativa (en %).
- t : Temperatura promedio (en $^\circ\text{C}$).
- T : Temperatura promedio (en K).

La concentración de oxígeno atmosférico es relativamente constante, mientras que el valor de la humedad absoluta, varía. Primero se calculará este valor:

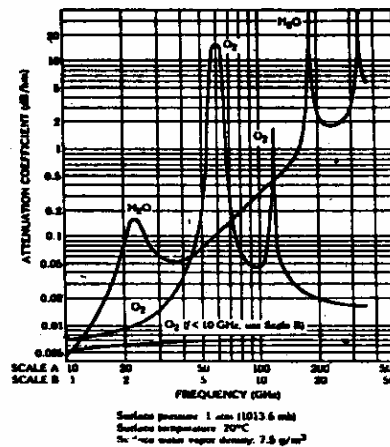


Fig. 8 - Atenuación por gases atmosféricos vs. frecuencia

$$e_s = a \exp[bt/(t+c)] \text{ mb}$$

$$a = 6.1121$$

$$b = 17.502$$

$$c = 240.97$$
(32)

$$e = H_e \cdot e_s / 100 \text{ mb}$$
(33)

$$\rho = 216.7 \cdot e / T \text{ g/m}^3$$
(34)

donde:

e_s es presión de saturación de vapor de agua.
 e es presión parcial de vapor de agua
 ρ es la concentración de vapor de agua (humedad absoluta).
 a, b, c son constantes.

Después se calcula la atenuación específica por oxígeno y vapor de agua, la cual depende de la frecuencia y la humedad absoluta. La fórmula (35) da la atenuación por oxígeno:

$$\gamma_o = \left[7.19 \cdot 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f-57)^2 + 1.50} \right] f^2 \cdot 10^{-3} \text{ dB/Km}$$
(35)

La atenuación por vapor de agua es:

$$\gamma_w = \left[0.050 + 0.0021\rho + \frac{3.6}{(f-22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f-183.3)^2 + 9.0} + \frac{8.9}{(f-325.4)^2 + 26.3} \right] f^2 \rho \cdot 10^{-4} \text{ dB/Km}$$
(36)

donde f es la frecuencia en GHz.

En estas fórmulas se supone una temperatura de superficie de 15°C. Para otras temperaturas se necesita corregir estas expresiones con: -1.0% por °C (oxígeno) y -0.6% por °C (vapor de agua).

Como en el modelo para predecir la atenuación por lluvia, también en este modelo se define una altura equivalente.

Para oxígeno esta altura es:

$$h_o = 6 \text{ Km}$$
(37)

Para vapor de agua la altura equivalente es:

$$h_w = h_{w0} \left[1 + \frac{3.0}{(f-22.2)^2 + 5} + \frac{5.0}{(f-183.3)^2 + 6} + \frac{2.5}{(f-325.4)^2 + 4} \right] \text{ Km}$$
(38)

donde

$$h_{w0} = 1.6 \text{ Km} \text{ bajo condiciones de cielo despejado}$$

$$= 2.1 \text{ Km} \text{ bajo condiciones de precipitación lluviosa fuerte}$$
(39)

La atenuación total depende de la longitud del trayecto inclinado. La siguiente fórmula da esta atenuación:

$$A = \frac{h_o' \gamma_o + h_w' \gamma_w}{\sin E} \text{ dB}$$
(40)

donde:

$$h_o' = h_o \left[e^{-h_w/h_o} - e^{-h_{sat}/h_o} \right] \text{ Km}$$

$$= h_o \left[e^{-h_w/h_o} \right] \text{ Km}$$
(41)

$$h_w' = h_w \left[1 - e^{-(h_w - h_{sat})/h_w} \right] \text{ Km}$$

$$= h_w \text{ Km}$$
(42)

El parámetro h_{sat} es la altura del satélite sobre la superficie de la tierra. Esta altura es mucho mayor que las alturas h_o , h_w y h_s de modo que se puede simplificar las expresiones.

En el caso de Quito los parámetros de entrada son los siguientes:

$$h_s = 2.85 \text{ Km}$$

$$E = 57.3^\circ$$

$$f = 11.2 \text{ GHz}$$

$$H_r = 75 \%$$

$$t = 13.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T = 286.3 \text{ K}$$

Los valores de la temperatura y la humedad relativa son promedios del período 1891-1986 y son tomados de la estación meteorológica del Observatorio Astronómico, de Quito.

La presión de saturación de vapor de agua es:

$$e_s = 6.1121 \cdot \exp[17.502 \cdot 13.2 / (13.2 + 240.9 \cdot T)] = 15.2 \text{ mb} \quad (43)$$

La presión parcial de vapor de agua es:

$$e = 75 \cdot 15.2 / 100 = 11.3 \text{ mb} \quad (44)$$

La concentración de vapor de agua es:

$$\rho = 216.7 \cdot 11.3 / 286.3 = 8.6 \text{ g/m}^3 \quad (45)$$

Con este valor de concentración de vapor de agua se puede calcular la atenuación específica por oxígeno y vapor de agua.

La atenuación por oxígeno tiene el valor de:

$$\gamma_o = 7.3 \cdot 10^{-3} \text{ dB/Km} \quad (46)$$

El valor de la atenuación por vapor de agua es:

$$\gamma_v = 1.0 \cdot 10^{-2} \text{ dB/Km} \quad (47)$$

La altura equivalente de oxígeno es igual a 6 Km, bajo todas las condiciones de tiempo.

Para vapor de agua la altura equivalente se da por:

$$h_v = h_{v_0} \cdot 1.024$$

$$h_v = 1.64 \text{ Km bajo condiciones de cielo despejado} \\ = 2.15 \text{ Km bajo condiciones de precipitación} \\ \text{lluviosa fuerte} \quad (48)$$

Luego se calculan las alturas equivalentes, corregidas para la altura de la estación terrena. Para vapor de agua no se necesita corregir la altura equivalente. Para oxígeno la altura corregida es:

$$h_o' = 6.0 \cdot e^{-2.05/6} = 3.73 \text{ Km} \quad (49)$$

Con las alturas equivalentes corregidas, el ángulo de elevación y las atenuaciones específicas, se calcula la atenuación total, para condiciones de cielo despejado y de precipitación lluviosa fuerte respectivamente:

$$A = \frac{3.73 \cdot 7.3 \cdot 10^{-3} + 1.64 \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{\sin 57.3^\circ} = 0.05 \text{ dB}$$

$$A = \frac{3.73 \cdot 7.3 \cdot 10^{-3} + 2.15 \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{\sin 57.3^\circ} = 0.06 \text{ dB} \quad (51)$$

6.- CONCLUSIONES

La Precipitación lluviosa causa atenuación de ondas de radio, especialmente en frecuencias mayores que 10 GHz, como es el caso de la banda Ku. La información de este tipo de atenuación es muy importante para el diseño de enlaces satelitales. Como el proyecto trata de comunicación en dicha banda se necesita estudiar la atenuación por lluvia. Se requiere que la atenuación no exceda ciertos valores para ciertos porcentajes del tiempo. Generalmente se analiza esto con las curvas de atenuación excedente.

Se calcularon estas curvas para el caso de Quito de varias maneras. Primero se utilizó el modelo del CCIR. Este modelo consta de dos partes. La primera parte predice la atenuación para 0.01% del tiempo, la segunda parte predice la atenuación para otros porcentajes del tiempo. En esta parte se consideraron los mapas que dan los valores de la intensidad excedente de lluvia para 0.01% del tiempo de un año promedio. Este valor se llama $R_{0.01}$ y es un parámetro muy importante. También se utilizaron mapas que muestran regiones y sus distribuciones especificadas de intensidades de lluvia. En este caso no se necesita la segunda parte del modelo del CCIR. Los mapas dan dos valores de $R_{0.01}$: 95 mm/hora y 120 mm/hora. Los correspondientes valores de la atenuación excedente para 0.01% del tiempo son 4.51 dB y 5.77 dB. Probablemente estos valores no sean muy exactos, porque los mapas no son muy detallados. Por ejemplo, los mapas no muestran las grandes diferencias de clima que existen en los alrededores de Quito.

En segundo lugar se utilizaron datos meteorológicos para determinar la distribución de la intensidad de lluvia en Quito. Este método tiene ventajas y desventajas.

La ventaja es que estos datos fueron medidos dentro de la ciudad de Quito y por lo tanto son más exactos que los datos de los mapas.

La desventaja es que el equipo utilizado, pluviógrafos, no miden intensidades sino cantidades. Por esto fue necesario convertir las curvas medidas a curvas de intensidades, derivándolas, pero no es posible realizar esto con bastante fiabilidad para intensidades mayores de 50-75 mm/hora.

Otra desventaja es que el equipo para medición de lluvia no sea capaz de registrar cambios rápidos, es decir intensidades altas. Esto no tendrá mucha importancia cuando estas intensidades correspondan a porcentajes menores de 0.01%. Porcentajes mayores de este valor son los más importantes para el diseño de enlaces satelitales.

El valor de $R_{0.01}$ derivado de los datos meteorológicos es igual a 60 mm/hora es más o menos exacto y la atenuación excedente correspondiente es igual a 2.66 dB.

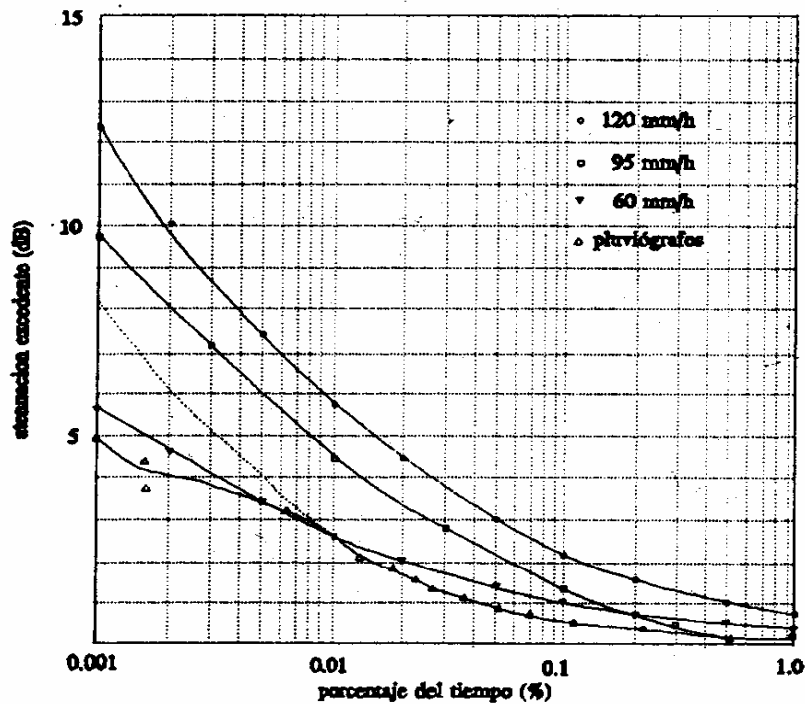


Fig. 9.- Curvas de atenuación excedente

Para verificar la forma de la curva, y de esta manera la distribución de la atenuación excedente, se calculó la distribución con el modelo del CCIR. En este cálculo el parámetro $R_{0.01}$ se tomó igual a 60 mm/hora. La Fig. 9 muestra todas las curvas de atenuación excedente, de modo que es posible comparar las diferentes aproximaciones.

La forma de la curva medida difiere de la forma de la curva calculada. La curva medida decrece para porcentajes pequeños y para porcentajes grandes. Solamente en el rango 0.005%-0.02% son parecidas.

La forma de la curva medida parece indicar que la atenuación estimada es demasiado baja para porcentajes pequeños. Esto se debe al hecho que faltan datos de sucesos de intensidades altas.

En resumen, la curva medida tiene bastante fiabilidad para porcentajes mayores de 0.01%. La atenuación para porcentajes menores de 0.01% es demasiado baja. Las curvas indican que la atenuación para 0.001% del tiempo probablemente sea más de 5.69 dB, que es el valor calculado. Una estimación buena parece ser 8 dB, aunque es muy difícil estimar esto.

De todas maneras es claro que los valores de $R_{0.01}$ según el CCIR no son correctos. Aunque los datos de los pluviógrafos no son muy exactos, las diferencias entre las intensidades de lluvia predichas y medidas son demasiado grandes. Esto se debe al hecho que existen grandes diferencias de clima en los alrededores de Quito. Estas diferencias no se muestran en los mapas del CCIR.

Se calculó la atenuación por gases atmosféricos, oxígeno y vapor de agua, utilizando el modelo del CCIR. Los parámetros de entrada importantes son la humedad relativa promedio y la temperatura promedio. El modelo calcula la atenuación para el caso de condiciones de cielo despejado y de precipitación lluviosa fuerte. La atenuación es baja en ambos casos: respectivamente 0.05 dB y 0.06 dB. La diferencia entre estos valores es mucho menor que la incertidumbre en las otras partes del sistema y por eso se supone que no haya diferencia entre los dos casos; la atenuación por gases atmosféricos en ambos casos se puede considerar igual 0.1 dB.

REFERENCIAS

- [Pratt] Timothy Pratt, Charles W. Bostian. "Satellite Communications". John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [All] J.E. Allnutt. "Satellite to Ground Radiowave Propagation". Peter Peregrinus, London, 1986.
- [563-4] CCIR, Reports of the CCIR. Radiometeorological Data. Volume V, Propagation in Non-Ionized Media, Report 563-4, Geneva, 1990.
- [564-4] CCIR, Reports of the CCIR. Propagation Data and Prediction Methods Required for Earth-Space Telecommunications Systems. Volume V, Propagation in Non-Ionized Media, Report 564-4, Geneva, 1990.

[721-3] CCIR, Reports of the CCIR. Attenuation by Hydrometeors, in Particular Precipitation, and Other Atmospheric Particles. Volume V, Propagation in Non-Ionized Media, Report 721-3, Geneva, 1990.

[eul] R.F.J. Schaffels, W.T.E. Vaessen. Feasibility Study Concerning a Microwave Propagation Measurement Programme in the Monsoon Tropical Climate Region of Indonesia. Report of Diploma Project, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 1989.

BIOGRAFIAS



JAN-WILLEM WALLENBURG: Nació en Utrecht, los Países Bajos el 19 de Febrero de 1970. Es egresado de la "Technische Universiteit Eindhoven" - Facultad de Ingeniería Eléctrica, los Países Bajos.

Colaboro con la E.P.N en un proyecto de comunicaciones satelitales. El presente trabajo constituye una parte del proyecto. Para obtener el título de MSc. realizará su proyecto de tesis el siguiente año en el área de comunicaciones por fibras ópticas en "Philips Research Laboratories Eindhoven"

ERRATA:

El gráfico a continuación ha sido involuntariamente omitido y corresponde a la Fig. 2, que debería estar localizado después de la fórmula (4).

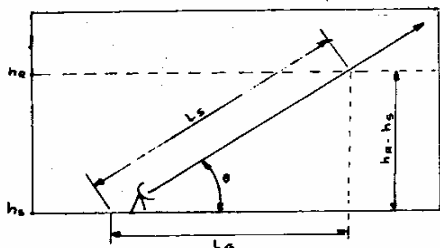
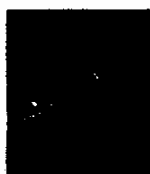


Fig. 2.- Representación esquemática de un trayecto tierra espacio.



ING. MARIO R. CEVALLOS V. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional 1968. Profesor Principal a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Ha realizado cursos de Postgrado y proyectos de investigación en: "Philips International Institute" y "Eindhoven Technical University", Eindhoven-Países Bajos. En 1982 obtuvo el Premio Escuela Politécnica Nacional a la mejor investigación realizada