

IMPACTO DEL PARÁMETRO RADIOMETEOROLÓGICO INTENSIDAD DE PRECIPITACIONES SOBRE LAS COMUNICACIONES POR ONDAS MILIMÉTRICAS

Vladimir Conde Williams¹, Lanyer Pérez Garlobo²

¹Escuela Interarmas de las FAR General “Antonio Maceo”, Caimito, Artemisa, Cuba, ²Instituto Técnico Militar José Martí, ITM, calle 66-A y 45, Marianao, La Habana, Cuba

¹e-mail: amaceo@unicom.co.cu

²e-mail: itm@unicom.co.cu

RESUMEN

El esfuerzo que realiza el país en cuanto al desarrollo y sostenimiento de la infraestructura de telecomunicaciones en aras de lograr un mayor acceso a la banda ancha, demanda el planeamiento y diseño de redes de microondas que aseguren el transporte de los nuevos servicios que emergen. En la banda milimétrica donde operan algunos de estos sistemas, las precipitaciones en forma de lluvia se erige como el principal factor degradante del enlace radioeléctrico. Con esto es necesario la evaluación del impacto del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones” ($R_{0.01}$) sobre los sistemas de radiocomunicaciones en las condiciones particulares de Cuba. Actualmente, el cálculo de la atenuación por lluvia en los Radioenlaces Terrenales del Servicio Fijo (RESF), los Sistemas de Radiocomunicaciones por Satélites (SRCS) y otros, solo considera valores a macroescala del parámetro radiometeorológico, lo cual influye en la distancia máxima de los enlaces. En tal sentido, se evalúa el impacto de las precipitaciones en forma de lluvia sobre los sistemas de radiocomunicaciones ubicados en la región de estudio, que abarca las provincias de Artemisa, la Habana y Mayabeque.

PALABRAS CLAVES: Atenuación por lluvia, intensidad de precipitaciones, microondas, banda milimétrica.

IMPACT OF THE METEOROLOGICAL RADIO PARAMETER PRECIPITATION INTENSITY ON MILLIMETRIC WAVE COMMUNICATIONS

ABSTRACT

The country's efforts to develop and sustain telecommunications infrastructure in order to achieve greater access to broadband require the planning and design of microwave networks to ensure the transport of the new emerging services. In the millimeter band where some of these systems operate, precipitation in the form of rain is the main factor degrading the radio link. Therefore, it is necessary to evaluate the impact of the radiometeorological parameter "rainfall intensity" ($R_{0.01}$) on the radiocommunication systems in the particular conditions of Cuba. Currently, the calculation of attenuation due to rainfall in the Fixed Service Terrestrial Radio Links (RESF), Satellite Radiocommunication Systems (SRCS) and others, only considers macro-scale values of the radiometeorological parameter, which influences the maximum distance of the links. In this sense, the impact of precipitation in the form of rain on the radiocommunications systems located in the study region, which includes the provinces of Artemisa, Havana and Mayabeque, is evaluated.

INDEXTERMS: Rain attenuation, rain rate, microwave, millimeter band.

1. INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones que tienen lugar en la troposfera, para frecuencias superiores a 6 GHz, provocan la disminución de la potencia disponible de recepción en los Sistemas de Radiocomunicaciones por Satélites (SRCS) y en los Radioenlaces Terrenales del Servicio Fijo (RESF), afectando la calidad de servicio que estos deben asegurar [1], [2]. Esta atenuación, resulta apreciable durante la ocurrencia de

eventos de lluvias torrenciales, niebla, nieve, granizo, nubes u otros factores meteorológicos presentes en las capas inferiores de la tropósfera, resultando en ocasiones tan severas que se interrumpe la radiocomunicación [1]. Por tal razón, la valoración del impacto de este fenómeno sobre los enlaces radioeléctricos, resulta de vital importancia en aras de lograr la mayor efectividad durante las etapas de cálculo, diseño y modelación de los sistemas.

El surgimiento de nuevos servicios de telecomunicaciones que demandan mayores anchos de banda [3], conlleva al empleo de frecuencias cada vez más altas del espectro. Por tal motivo, la lluvia se convierte en el principal factor degradante de la disponibilidad por propagación en los sistemas de radiocomunicaciones, [4], [5].

Para evaluar esta influencia, es necesario determinar la atenuación por lluvia durante porcentajes de tiempo específicos y para frecuencias superiores a 6 GHz [1]. La degradación producto de la lluvia A_p (dB) en los radioenlaces terrenales [6], se define como:

$$A_p(R, p) = \gamma(R, p) \cdot L_{ef} \quad (1)$$

Siendo:

$\gamma(R, p)$: Atenuación específica inducida por la lluvia (dB/km).

R : Intensidad de las precipitaciones (mm/h).

p : Porcentaje de tiempo (%).

L_{ef} : Longitud efectiva del trayecto (km).

En consecuencia, la atenuación específica ó por unidad de distancia [7], expresada en dB/km, se expresa a través de la ley de potencial:

$$\gamma(R, p) = k \cdot R^\alpha \quad (2)$$

Donde los coeficientes k y α son coeficientes de regresión los cuales dependen de la distribución del tamaño de las gotas de lluvia (DSD, por sus siglas en inglés), temperatura, frecuencia y polarización de la onda.

Como se aprecia, el cálculo de la atenuación por lluvia depende fundamentalmente de la estadística del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones” excedida el 0.01 % del tiempo ó porcentaje de interés $R_{0.01}$ [6]. En la actualidad la mayoría de los métodos de predicción de la atenuación por precipitaciones [8], evalúan valores de $R_{0.01}$ a macroescala ó extrapolan estos a otros tipos clima, lo que no permite estimar correctamente el comportamiento local de esta variable. Por consiguiente, la UIT-R recomienda emplear valores locales que consideren la variabilidad espacio-temporal de la lluvia [9]. En tal sentido, en el artículo se consideran las estadísticas del parámetro radiometeorológico $R_{0.01}$ obtenidas para las condiciones locales [10].

2 VALORACIÓN DEL IMPACTO DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIONES

El esfuerzo que realiza el país en cuanto al desarrollo y sostenimiento de la infraestructura telecomunicaciones en aras de lograr un mayor acceso a la banda ancha [11], conlleva al empleo de un conjunto de tecnologías, entre las que figuran los radioenlaces de microondas. En tal sentido, el desarrollo paulatino de nuevos servicios de telecomunicaciones provoca un uso creciente del espectro de frecuencia y en donde la lluvia entre otros factores, manifiesta una marcada influencia, [3],[5].

Atendiendo a lo expuesto, se hace necesario evaluar el impacto del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones”. En este orden de ideas se consideran algunos sistemas de radioenlaces de microondas representativos de la infraestructura de comunicaciones actual y futura del país.

Definición de los indicadores de impacto.

Para la valoración del impacto sobre los sistemas se establecen los siguientes indicadores:

1. Atenuación por lluvia.
2. Distribución espacial de la atenuación específica o atenuación por unidad de distancia.
3. Alcance ó distancia máxima del enlace.

En el primer indicador se considera la estimación de la atenuación por lluvia expresada en dB, de acuerdo a la frecuencia en GHz, la distancia en km y la intensidad de precipitaciones propia de la región considerada, expresada en mm/h. El objetivo que se persigue es obtener las curvas características que permitan predecir el impacto del hidrometeoro considerando valores específicos del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones”, para las diferentes bandas de operación de los sistemas.

El segundo indicador tiene como objetivo, evaluar cómo se distribuye espacialmente la atenuación específica inducida por la lluvia, expresada en dB/km, en cada una de las zonas que conforman la región, considerando datos locales. En tal sentido, se consideran los valores de $R_{0,01}$ a largo plazo y estacionales para el período poco lluvioso y lluvioso respectivamente.

Por último, el indicador alcance ó distancia máxima del enlace, permite determinar el alcance energético de los sistemas, expresado en km. Para tal fin, se evalúa la influencia del parámetro radiometeorológico en cada porcentaje de análisis y se compara el resultado obtenido, teniendo en cuenta el valor $R_{0,01}$ para las condiciones locales y a macroescala propuesto por la UIT-R. Ello permite disminuir los costos asociados al despliegue innecesario de sistemas repetidores durante el diseño de los enlaces radioeléctricos.

Valoración del impacto la atenuación por lluvia.

La valoración del impacto de la atenuación por lluvia, se realizó considerando su influencia sobre los sistemas de microondas. Este análisis se llevó a cabo con una representación del equipamiento que forma parte de la infraestructura del Sistema de Radiocomunicaciones Móviles (SRCM) presente y futura del país, según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Bandas de frecuencias y aplicación de algunos de los sistemas de microondas empleados en la infraestructura de comunicaciones actual.

Denominación del sistema	Frecuencia (GHz)					Aplicación
	7	15	23	70	80	
RTN -605 1F	x	x	x			Backhaul (SRCM) y Fronthaul (última milla)
RTN -320	x	x	x			Backhaul (SRCM) y Fronthaul (última milla)
ALFOPlus 80HDX				x	x	Futuro Backhaul (SRCM)

Estos sistemas se caracterizan por operar en ventanas espectrales donde la afectación más relevante en el enlace es atribuible a las pérdidas en exceso por hidrometeoros, principalmente en forma de lluvia, como es en el caso de Cuba. Por tanto, estos radioenlaces deben asegurar los niveles deseados en cuanto a flexibilidad, capacidad y latencia se refiere.

En los sistemas evaluados la frecuencia con mayor presencia en los enlaces es la de 15 GHz. No obstante, el análisis se centra en la frecuencia de 80 GHz en donde se manifiesta en mayor medida la afectación por el fenómeno de la lluvia. Además, esta banda del espectro está destinada para su empleo inmediato como soporte a los servicios de la red 5G en el país [12]. En la valoración, sólo se considera la polarización horizontal, teniendo en cuenta la notable influencia de la intensidad de precipitaciones sobre las ondas radioeléctricas que emplean esta polarización [1], [13].

Los valores a considerar del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones” para los porcentajes $R_{0,1}$, $R_{0,01}$ y $R_{0,001}$, son los obtenidos para las condiciones locales a nivel de región y se cuantifican en 14.58, 64.65 y 113.41 mm/h respectivamente [10]. Estos porcentajes responden a los niveles de disponibilidad de los sistemas para el 99.9, 99.99 y 99.999 % en cada caso.

Dentro de este marco, se obtuvieron las curvas para la frecuencia de 80 GHz con el empleo de la herramienta computacional Matlab versión R 18. En rigor, se aprecia una adecuada representación del fenómeno, mostrando una correspondencia entre la atenuación, la distancia y los valores considerados del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones” (Fig. 1).

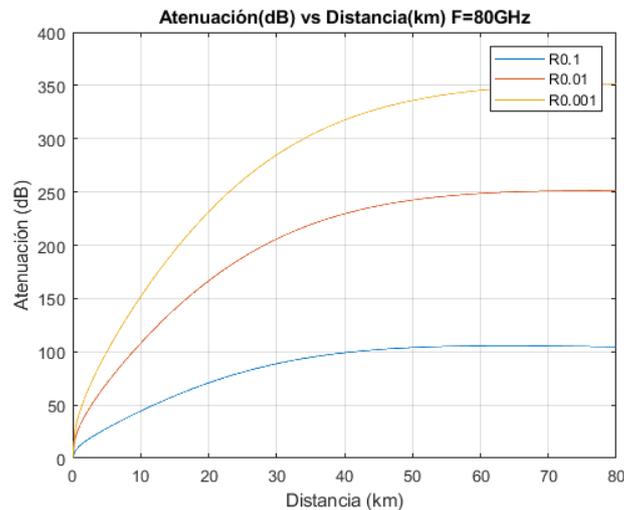


Figura 1: Atenuación por lluvia en función de la distancia para la frecuencia de 80 GHz.

Como se observa, para una distancia de referencia de 10 km y considerando las estadísticas del parámetro radiometeorológico para el valor de $R_{0.01}$, la atenuación toma un valor de 70 dB por encima en relación a la frecuencia de 15 GHz. Es por ello que la planificación de enlaces radioeléctricos en esta frecuencia constituye un reto para los diseñadores durante el despliegue de los sistemas que soportarán los futuros servicios 5G. Este tipo de curvas, constituyen una herramienta útil para la evaluación práctica de la atenuación por lluvia para un sistema y distancia particular.

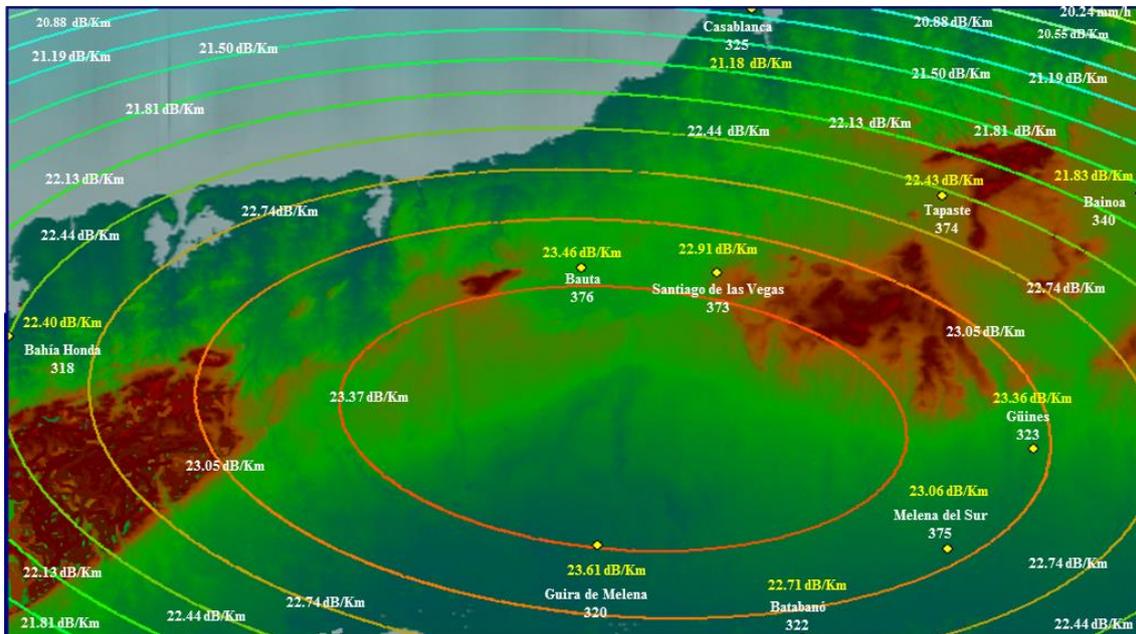
Valoración del impacto de la atenuación específica inducida por la lluvia.

Sobre esta perspectiva, se evalúa el comportamiento de la atenuación específica inducida por la lluvia [7], considerando la estadística del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones” ($R_{0.01}$) para la región de estudio a largo plazo y para los periodos poco lluvioso y lluvioso. Para el análisis estacional, se tiene en cuenta los meses que muestran un comportamiento extremo de la “intensidad de precipitaciones” para la época poco lluviosa (enero) y lluviosa (julio) [10].

El análisis en la frecuencia de 80 GHz para el período a largo plazo (figura 2), exhibe una tendencia en la distribución de los campos bastante similar al obtenido para la frecuencia de 15 GHz en igual período [10]. La exactitud de los resultados responde a la calidad del dato de “intensidad de precipitaciones” evaluado. Esta estadística fue obtenida a partir del procesamiento en masa aplicado a los registros de lluvia emitidos por los pluviógrafos de las provincias de Artemisa, La Habana y Mayabeque, pertenecientes al Instituto de Meteorología. Esta entidad, aseguró la debida certificación de los instrumentos en superficie empleados [10].

En esta banda, la atenuación específica disminuye paulatinamente desde el centro hacia el este del área en 3.13 dB/km. Esta diferencia es superior en 2 dB/km respecto al resultado obtenido en la frecuencia de 15 GHz. Por otra parte, los mayores valores se presentan en la zona central de la región, donde las isóneas describen valores en el orden de 23.37 a 23.03 dB/km, superando en 18.26 y 18.20 dB/km al estudio realizado en la frecuencia de 15 GHz [10]. Hacia el oeste de la región, la variable se describe en un rango entre 22.74 y 21.51 dB/Km, el cual excede en 17.81 y 17.16 dB/Km en relación a la frecuencia precedente. A su vez, es inferior respecto a la zona central en un intervalo entre 0.83 y 1.34 dB/Km. Al

este del área considerada, los campos de la variable se discurren en un intervalo entre 22.74 y 20.24 dB/Km, lo que constituye entre 0.63 y 2.81 dB/km menos, respecto a la zona central.



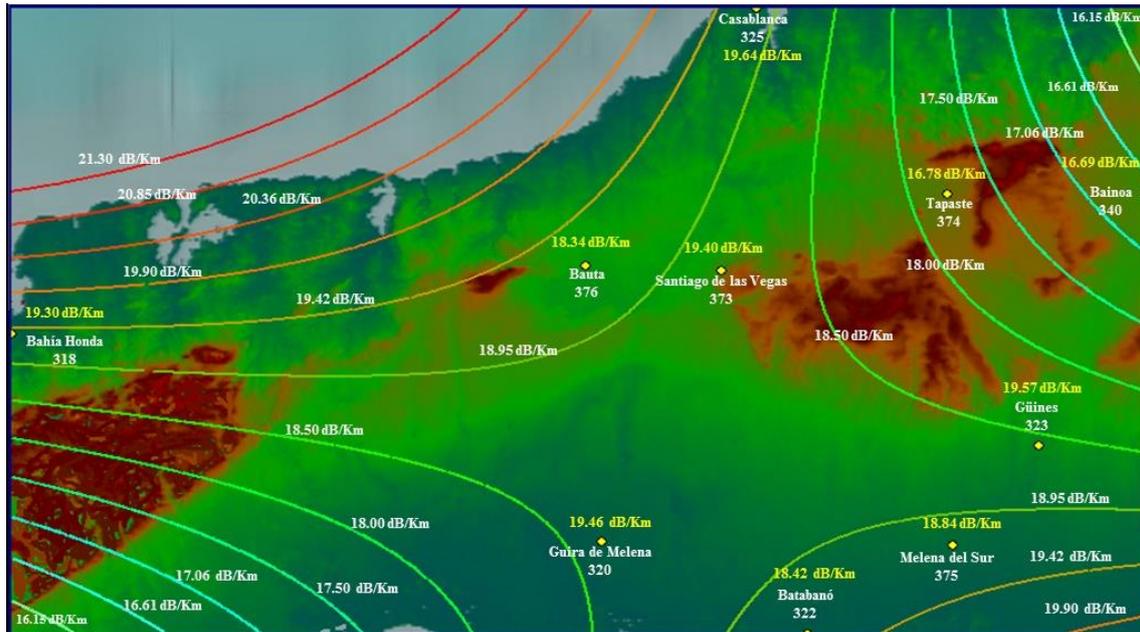


Figura 3: Atenuación específica inducida por la lluvia para la frecuencia de 80 GHz, considerando las estadísticas de $R_{0,01}$ para el período poco lluvioso (mes de enero) a nivel de región, empleando polarización horizontal.

En consecuencia, para esta frecuencia y época del año, las regiones oeste y este, exhiben los menores valores en comparación a las costas. Por tal motivo, se muestra un rango entre 0.45 a 5.15 dB/km menos de atenuación específica, lo que representan por ende el área más adecuada para el planeamiento de sistemas. Entre tanto, la valoración realizada para el mes de julio (figura 4), exhibe una distribución decreciente de los campos de la variable del centro hacia la periferia de la región. Los valores obtenidos exceden al estudio a largo plazo en 1.76 a 3.18 dB/km y en 6.18 a 2.12 dB/km respecto al mes de enero.

En la zona central, la atenuación específica muestra un incremento de la variable en relación a la frecuencia precedente en igual área de 19.46 a 19.28 dB/km. Hacia el oeste de la región, la atenuación específica toma valores entre 24.65 y 24.04 dB/km, lo que representa 0.48 a 0.76 dB/km menos de atenuación respecto a la zona central y 19.13 a 18.74 dB/km superior en relación a la frecuencia de 15 GHz. En el caso de la región este, los campos de la variable se distribuyen en un intervalo entre 24.65 a 23.42 dB/km y muestran un rango entre 0.48 a 1.38 dB/Km menos respecto a la zona central. A su vez, exhibe valores superiores en relación a la frecuencia de 15 GHz en 19.13 a 18.35 dB/km.

En la zona costera norte, donde se ubica la estación de Bahía Honda, la atenuación específica se describe en un rango entre 24.80-24.65 dB/km, lo que representa 0.33 a 0.15 dB/km menos de afectación en comparación con la zona central. Además, supera al valor obtenido para la frecuencia de 15 GHz [10]. En igual área en 19.20-19.13 dB/km. Por otra parte, en la zona donde se encuentra la estación de Casablanca, la variable se muestra en un intervalo entre 24.35 a 23.88 dB/km, lo que constituye 0.78 a 0.92 dB/km menos de influencia del hidrometeoro sobre las ondas radioeléctricas en relación al centro de la región. A su vez, se supera el valor en relación a la frecuencia de análisis precedente en 18.98 a 18.66 dB/km.

En la zona costera sur, la atenuación específica toma valores entre 24.04 y 23.10 dB/km y representa una disminución en relación a la zona de mayor valor en un intervalo entre 1.09 y 1.7 dB/km. En rigor, se supera al valor obtenido para la frecuencia de 15 GHz en un rango desde 18.67 hasta 18.18 dB/km. Para este período en particular se muestra que para lograr la menor influencia de las precipitaciones en forma de lluvia sobre los enlaces de microondas a realizar, se debe considerar las zonas costeras. En estas áreas, la atenuación específica describe una diferencia máxima respecto a la zona central de la región de 1.7 dB/km menos.

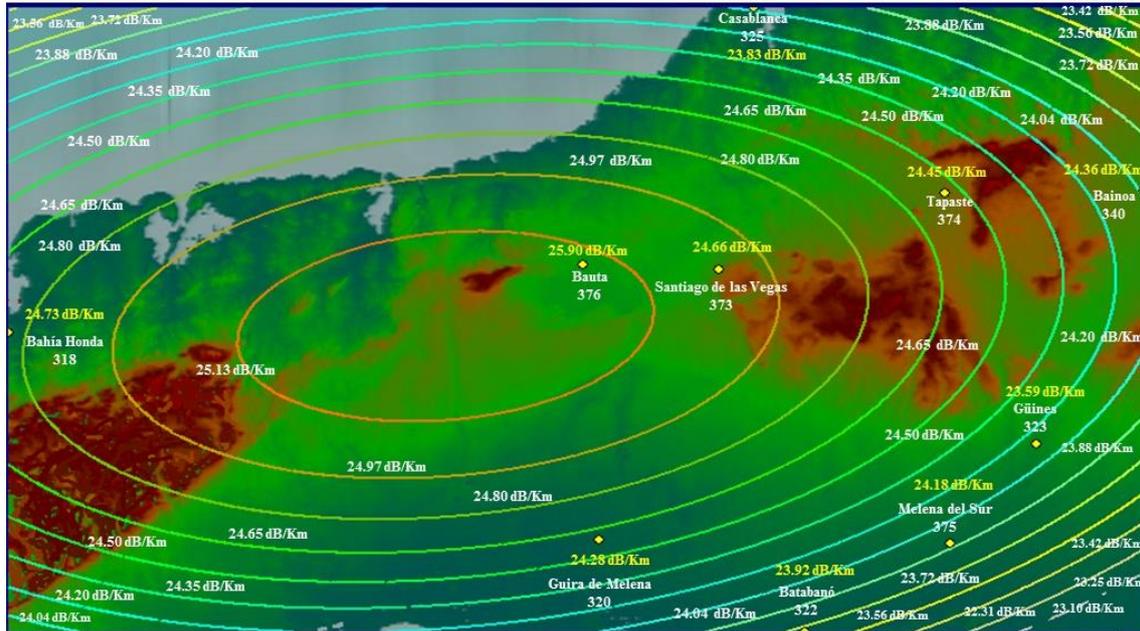


Figura 4: Atenuación específica inducida por la lluvia para la frecuencia de 80 GHz, considerando las estadísticas de $R_{0.01}$ para el período lluvioso (mes de julio) a nivel de región, empleando polarización horizontal.

De forma general, para cada período considerado se muestra una correspondencia entre las estadísticas del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones” obtenido [10], según la época del año y la atenuación específica inducida por la lluvia. Este resultado posibilita una adecuada distribución de los enlaces a partir de conocer a priori las posibles afectaciones de un enlace en la ubicación de interés. A su vez, el empleo de estos gráficos constituye una herramienta práctica, para la obtención de los valores de atenuación específica en lugares en los que no existen datos del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones”.

Valoración del impacto sobre el alcance de los sistemas.

Para la valoración del impacto del parámetro radio-meteorológico “intensidad de precipitaciones” sobre el alcance de los sistemas radioeléctricos, se consideran los parámetros eléctricos del equipamiento de microondas digital presente en la infraestructura de comunicaciones de la región en cuestión (Tabla 2). A su vez, para el análisis se valoran las pérdidas en el espacio libre y las pérdidas por absorción y dispersión ocasionadas por la lluvia, caracterizada a partir de las estadísticas del parámetro radio-meteorológico “intensidad de precipitaciones” local [10] y el dato a macroescala ofrecido por la UIT-R ($R_{0.01} = 95$ mm/h). Por otra parte, para el estudio se define el empleo del esquema de modulación 16 QAM entre el resto de los empleados por los citados sistemas y se seleccionan los parámetros eléctricos según los datos brindados por el proveedor [14], [15], [16].

Tabla 2: Parámetros eléctricos de los sistemas empleando modulación 16 QAM.

Frecuencia (GHz)		7	15	23	70	80	Ganancia de las Antenas (dBi)		
							7 GHz	15 GHz	23GHz
Potencia del transmisor (dBm)	RTN -605 1F	28	20	19	-	-	31	37	41
	RTN -320	28	24	23	-	-	31	37	41
	ALFOPlus80HDX	-	-	-	17	17	70 Ghz		80 GHz
							47		50.8

Sensibilidad del receptor (dBm) BER= 10 ⁻⁶	RTN -605 1F	-84.5	-84	-83.5	-	-	31	37	41
	RTN -320	-82	-81.5	-81	-	-	31	37	41
	ALFOPlus80HDX	-	-	-	-58.5	-58.5	47	50.8	

En consideración, las pérdidas básicas de propagación L_b (dB) serán función de las pérdidas en el espacio libre L_{bf} (dB) y la atenuación debida a la absorción y dispersión ocasionada por el fenómeno de la lluvia A_p (dB), teniendo en cuenta que en el trayecto, sólo se manifiesta esta pérdida en exceso (ecuación 3).

$$L_b(dB) = L_{bf}(dB) + A_p(dB) \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que en los radioenlaces de microondas la frecuencia se expresa en GHz, las pérdidas en el espacio libre resultan entonces:

$$L_{bf}(dB) = 92.45 + 20 \log f(GHz) + 20 \log d(Km) \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (3) quedaría:

$$L_b(dB) = 92.45 + 20 \log f + 20 \log d + \gamma(R,p) \cdot d \cdot r \quad (5)$$

Siendo:

d : distancia del enlace, expresada en km .

r : factor de distancia.

El resultado analítico obtenido requiere de una vía para determinar la variable alcance en la ecuación (5). En tal sentido, se hace necesario aplicar una solución numérica empleando un procedimiento iterativo. La valoración realizada del alcance máximo (Tabla 3), considerando el valor de 14.58 mm/h, correspondiente al valor del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones” para el 0.1 % del tiempo anual ($R_{0.1}$), muestra que los radioenlaces terrenales que operan en las frecuencias de 7 y 15 GHz, no manifiestan una afectación apreciable por el fenómeno de la lluvia para las condiciones locales.

En rigor, el alcance práctico asumido es el alcance máximo de visibilidad directa, el cual supera el valor de 41.7 km en cada caso. Lo anterior, responde a que las bases teóricas que fundamentan la propagación de las ondas radioeléctricas [2], impiden que los alcances teóricos obtenidos puedan ser materializados, siendo necesario establecer como limite el alcance máximo de visibilidad directa ó de horizonte. Este comportamiento se manifiesta de forma similar en la frecuencia de 7 GHz, durante la valoración del parámetro radiometeorológico para el 0.01y el 0.001por ciento del tiempo anual, correspondientes al $R_{0.01}$, $R_{0.001}$ respectivamente.

Dentro de esta perspectiva, a partir de la frecuencia de 23 GHz se comienza a manifestar la afectación por lluvia sobre los sistemas, limitando los alcances hasta 37.1 y 40.2 km, los que corresponden a los sistemas de microondas RTN-605 1F y RTN-320, respectivamente. A su vez, estos alcances se comprometen en mayor medida, cuando se valoran las frecuencias de 70 y 80 GHz y en donde las distancias máximas, no exceden los valores de 6.5 y 6 km en cada caso. Ello demuestra la relación proporcional entre la influencia de las precipitaciones en forma de lluvia sobre las ondas radioeléctricas y la frecuencia [1].

El análisis realizado para el porcentaje de interés ($R_{0.01}$), exhibe resultados coherentes entre los valores de alcance obtenidos en función del dato de intensidad de precipitaciones evaluado. En consecuencia, para la frecuencia de 15 GHz se evidencia una mayor influencia de la lluvia respecto al análisis precedente. En esta frecuencia, los mayores alcances se obtienen para el valor de $R_{0.01}$ local (64.65 mm/h). Estos valores superan en 6.5 km para cada sistema evaluado respecto al valor de la UIT-R (95 mm/h) considerado.

Tabla 3: Alcance máximo considerando la influencia de la lluvia.

Porcentaje del tiempo	Sistemas	Frecuencia (GHz)									
		7		15		23		70		80	
		Alcance (Km)									
$R_{0,1}$	RTN -605 1F	> 41.17		> 41.17		37.1		-		-	
	RTN -320	> 41.17		> 41.17		40.2		-		-	
	ALFOPlus80HDX	-		-		-		6.5		6	
$R_{0,01}$	RTN -605 1F	Local	UIT-R	Local	UIT-R	Local	UIT-R	Local	UIT-R	Local	UIT-R
		> 41.17	19.30	12.8	9.1	6.1	-	-	-	-	
	RTN -320	> 41.17	20,1	13.3	9.4	6.3	-	-	-	-	
	ALFOPlus80HDX	-	-	-	-	-	2.1	1.5	1.9	1.4	
$R_{0,001}$	RTN -605 1F	> 41.17		10.6		5		-		-	
	RTN -320	> 41.17		11		5.2		-		-	
	ALFOPlus80HDX	-		-		-		1.2		1.2	

Para la frecuencia de 23 GHz, se muestra una diferencia de 28 km menos de alcance respecto al porcentaje anterior ($R_{0,1}$). La evaluación realizada para el valor de $R_{0,01}$ local, muestra una menor influencia del hidrometeoro en comparación al valor de la UIT-R. Lo anterior propicia la obtención de alcances de 3 y 3.1 km superior para cada equipamiento analizado (RTN-605 1F, RTN-320) respecto al valor a macroescala propuesto por el organismo regulador (95 mm/h). De igual forma, para las frecuencias de 70 y 80 GHz se presentan 4.4 y 4.1 km de alcance, los cuales son inferiores en comparación al análisis precedente ($R_{0,1}$). En tal sentido, la distancia máxima del enlace evaluando el valor local supera al valor de la UIT-R en 0.6 y 0.5 km para cada frecuencia considerada.

El análisis realizado para el porcentaje de menor valor de indisponibilidad por lluvia ($R_{0,001}$), muestra resultados razonables. En rigor, los radioenlaces terrenales que operan en la frecuencia de 15 GHz, exhiben 8.7 y 9.1 km menos de alcance respecto al valor local del parámetro radiometeorológico evaluado anteriormente ($R_{0,01}$), lo que indica una mayor afectación por el fenómeno de la lluvia.

En la banda de 23 GHz, se evidencia una afectación proporcional con la frecuencia, lo que provoca una disminución del alcance respecto a la frecuencia precedente de 5.6 Km menos para el RTN-6051F y 5.8 km inferior en el caso del RTN-320. Las frecuencias más altas consideradas en la evaluación, muestran que para el valor del parámetro radiometeorológico analizado, los alcances en cada caso no superan el valor de 1.2 km. Este valor representa 0.9 y 0.7 km menos de alcance para cada frecuencia considerada, respecto a la evaluación realizada para el porcentaje de interés ($R_{0,01}$).

La valoración realizada muestra resultados coherentes con los fundamentos teóricos que sustentan la física del fenómeno. En tal sentido, los mayores alcances en el caso del porcentaje de interés ($R_{0,01}$), se logran a partir de evaluar las estadísticas locales del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones”. Este comportamiento obedece a la sobreestimación de la variable por parte del organismo regulador.

Además, el estudio aplicado, permite constatar que los radioenlaces de microondas que operan en la banda de 80 GHz, no exceden los 2.1 km de distancia del enlace, lo que exalta la afectación por lluvia en estas frecuencias y pondera la necesidad de estimar el comportamiento local del parámetro radiometeorológico “intensidad de precipitaciones”, durante el dimensionamiento de estos sistemas.

3. CONCLUSIONES

El comportamiento de la atenuación específica inducida por la lluvia sobre las ondas milimétricas (80 GHz) está condicionado por las características físico-climáticas del área de estudio. En consecuencia, durante el análisis a largo plazo y estacional en el período lluvioso, la mayor influencia del fenómeno se manifiesta en la zona central y en contraparte, la menor afectación se presenta en las áreas cercanas a las costas. Por ende, esta última zona, constituye el área idónea para el despliegue óptimo de sistemas radioeléctricos susceptibles al fenómeno de la lluvia.

En contraste, el análisis de la atenuación específica inducida por la lluvia para la época poco lluviosa, presenta la mayor degradación hacia las costas. Por consiguiente se evidencia que, las áreas del centro hacia el este y oeste respectivamente, constituyen las más adecuadas para lograr la menor influencia sobre los sistemas de radiocomunicaciones que operan en las bandas consideradas. La valoración realizada de la influencia de la intensidad de precipitaciones sobre el alcance de los sistemas, permite constatar, que los mayores alcances se logran a partir del empleo de datos locales. Para el porcentaje de interés, se obtienen

valores máximos de 41.17, 20.1, 9.4 y 2.1 km de distancia del enlace, los que corresponden a las frecuencias de 7, 15, 23 y 80 GHz respectivamente.

En la investigación desarrollada se obtuvo que, los indicadores de influencia considerados, posibilitan evaluar el grado de afectación de los enlaces radioeléctricos por el fenómeno de la lluvia. Los mismos constituyen herramientas prácticas de aplicación durante la etapa de proyección de los sistemas de radiocomunicaciones en la región de análisis.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Climatología del INSMET, al Centro de Meteorología de Artemisa, La Habana y Mayabeque por su colaboración en la obtención de los datos de lluvia y al ingeniero José Luis Fuentes Lorenzo, especialista del Centro de Gestión de ETECSA.

REFERENCIAS

- [1] José M. Hernando Rábanos, Transmisión por Radio, Editora Universitaria Ramón Aceres, pp. 179 - 188, 2008, ISBN-13:978-84-8004-856-9.
- [2] M. P. Dolujanov., *Propagación de las ondas de radio*. Editorial Mir Moscú. 1977. 414 pp.
- [3] UIT-R, Reporte F.2323-1, «Uso del servicio fijo y tendencias futuras». Publicaciones Electrónicas UIT, pp 4-10, Ginebra Suiza, 2017.
- [4] I.Shayea, T.Rahman, M. Hadri, and R. Islam, «Real Measurement Study for Rain Rate and Rain Attenuation Conducted Over 26 GHz Microwave 5G Link Systems in Malaysia». *Open Access Journal IEEE Access*, volume 6, pp 19044-19064, doi: 10.1109/ACCESS. 2018.2810855.
- [5] A. Al-Saman, M. Cheffena, M. Mohamed, M. Hadri Azmi, M and Y Al, «Statistical Analysis of Rain at Millimeter Waves in Tropical Area». *Open Access Journal IEEE Access*, volume 8, pp 1-18, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979683, *IEEE Access*.
- [6] UIT-R, Recomendación P.530. «Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa», Publicaciones Electrónicas UIT, pp.15-17, Ginebra, Suiza, 2017.
- [7] UIT-R, Recomendación P.838. «Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción», Publicaciones Electrónicas UIT, pp 1-8, Ginebra, Suiza, 2005.
- [8] R. H. Rubio, V. C. Williams, «Resumen de los métodos de estimación de la Intensidad de Precipitaciones para el cálculo de atenuación por lluvia», *Revista Militar de Ciencia y Tecnología de las Far*, RNPS-2131, La Habana, 2021.
- [9] UIT-R, Recomendación P-837-7. «Características de la precipitación para establecer modelos de propagación», Publicaciones Electrónicas UIT, pp 1-5, Ginebra, Suiza, 2017.
- [10] V. C. Williams, «Método para la obtención de la estadística del parámetro radiometeorológico "intensidad de precipitaciones". Influencia sobre los sistemas de radiocomunicaciones en las condiciones particulares de Cuba», Tesis presentada en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Técnico Militar " José Martí ", La Habana, 2022.
- [11] «Sobre la Informatización de la Sociedad en Cuba», Decreto-Ley No. 370, Gaceta Oficial No. 45, pp 763-764, GOC-2019-547-O45, La Habana, 2019.
- [12] E. M. Rodríguez, «Planeamiento y diseño de las nuevas redes de MO Broadband con vistas a la futura evolución hacia la 5G en Cuba», *Revista TONOS*, Vol. 16, No. 1, pp. 30-41, ISSN: 1813-5056, RNPS: 0514, La Habana, 2020.
- [13] «Attenuation of millimetre wave radio signal at worst hour Rainfall rate in a tropical region: A case study, Nigeria», *Journal Scientific African Nymphasa*, E.F. Ibe, O, march, 2022. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>.
- [14] «Product Description OptiX RTN 320F, Radio Transmission System, V100R009C10», 2018. <http://www.huawei.com>.
- [15] «Product Description OptiX RTN 605 Radio Transmission System, V100R003», 2009. <http://www.huawei.com>.
- [16] «ALFOplus80HDX, Maximum Link Length Estimation», 2019. <http://www.siaemic.com>.

SOBRE LOS AUTORES

Vladimir Conde Williams: Graduado como Ingeniero Radioelectrónico en Radiocomunicaciones en el año 1995, de Máster en Radioelectrónica en 2012 (ITM) y de Doctor en Ciencias Técnicas en 2022 (ITM). En la actualidad es profesor Titular desde 2012 y Jefe de Cátedra de Comunicaciones de la EIGAM y miembro de su Consejo Científico. Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica, la Propagación de las Ondas de Radio y Transmisión de Datos. ORCID: 0000-0002-2775-1600.

Lanyer Pérez Garlobo: Graduado como Ingeniero Radioelectrónico en Comunicaciones en el año 2002, y de Doctor en Ciencias Técnicas (ITM) en el 2010. En la actualidad es Profesor Titular desde el 2015 y Profesor e Investigador del ITM, Miembro de su Consejo Científico y de la Comisión de Grados Científicos. Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica y la Propagación de las Ondas de Radio. Ha presentado trabajos en eventos nacionales e internacionales, participando en varias ediciones de CITTEL. Ha alcanzado premios a nivel nacional y ramal por resultados de investigaciones aplicadas a la rama de la Radiopropagación. ORCID: 0000-0001-7911-7807.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado, ni con ninguna otra institución. Las opiniones expresadas aquí son únicamente responsabilidad de los autores.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Vladimir Conde Williams: su principal contribución consiste en la conceptualización e idea del artículo, su preparación, escritura y desarrollo, así como la revisión crítica de cada una de las versiones del borrador y la conformación de la versión final a publicar después de su análisis con los otros autores. Además, contribuyó a la obtención de los datos empírico-experimentales del parámetro radiometeorológico que sirvieron de base para la elaboración del artículo

Lanyer Pérez Garlobo: Además de su contribución en cuanto a la conceptualización e idea del artículo, su principal contribución radica en los programas empleados. Por otra parte, ha contribuido al desarrollo del trabajo con su experiencia en la propagación de las ondas de radio lo que influyó en la revisión crítica de su primera versión y la aprobación de la versión final.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

