

Propagación Indoor de 10 a 20 Ghz con Correcciones por Humedad y Concentración de Oxígeno para la Región Andina

Indoor Propagation Model from 10 to 20 Ghz with Corrections for Humidity and Oxygen Concentration for the Andean Region

Jefferson Ribadeneira-Ramírez*, Marco Suarez †, Edison Sarmiento ‡, Fabricio Santacruz §

* , § Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 060155, Riobamba, Ecuador, †, ‡ Investigador Independiente, Quito, Ecuador.

Email: *jefferson.ribadeneira@esepoch.edu.ec , †javico1101@hotmail.com, ‡e.m.sarmiento@hotmail.es, § fabricio.santacruz@esepoch.edu.ec

Resumen— Actualmente, las bandas de frecuencia inferiores a 6 GHz, las cuales, clásicamente han sido utilizadas para la transmisión de sistemas de comunicaciones inalámbricas, se encuentran saturadas. Por lo que, la búsqueda de nuevas bandas de frecuencia es necesaria y ha sido enfocada a frecuencias superiores. En este escenario, caracterizar la propagación en bandas superiores a 6 GHz para diversos entornos de propagación es necesario. En el presente artículo se presenta un modelo de propagación empírico para predecir las pérdidas de propagación en interiores de 10 a 20 GHz. El modelo fue obtenido a partir de medidas realizadas dentro de una cámara anecoica, la cual fue diseñada y construida con cubierta interna de espuma de poliuretano como material absorbente y cobertura externa metálica. Las medidas se realizaron en saltos de distancia y frecuencia de 10 cm y 50 MHz, respectivamente. Además, se modificaron las condiciones atmosféricas de temperatura, humedad y nivel de oxígeno en el interior de la cámara, a través de la inserción de oxígeno y vapor de agua. Con el fin de emular las condiciones climatológicas de lugares montañosos y costeros. Se determinó que la variación de la concentración de oxígeno y humedad mejora las condiciones de propagación en 7 dB y 15 dB, respectivamente.

Palabras Clave— Propagación, Pérdidas, Comunicaciones Inalámbricas, Cámara Anecoica

Abstract— the frequency bands below 6 GHz, which have traditionally been used for the transmission of wireless communications systems, are saturated. Therefore, the search for new frequency bands has been focused on higher frequencies. In this scenario, characterizing the propagation in bands above 6 GHz for various propagation environments is necessary. In this article, an empirical propagation model is presented to predict indoor propagation losses from 10 to 20 GHz. The model was obtained from measurements carried out inside an anechoic chamber, which was designed and built with an internal cover of polyurethane foam as absorbent material and metallic external cover. Measurements were performed in distance and frequency steps of 10 cm and 50 MHz, respectively. In addition, the atmospheric conditions of temperature, humidity and oxygen level inside the chamber were modified, through the insertion

of oxygen and water vapor. In order to emulate the weather conditions of mountainous and coastal places. It was determined that the variation of the oxygen and humidity concentration improves the propagation conditions by 7 dB and 15 dB, respectively.

Keywords— Propagation, Losses, Wireless Communications, Anechoic Chamber

I. INTRODUCCIÓN

Historicamente los sistema de comunicaciones inalámbricos se han desplegado en frecuencias por debajo de 6 GHz. Esto debido a que en esta banda de frecuencias la absorción atmosférica, al igual que las pérdidas por lluvia se pueden considerar despreciables [1]. Sin embargo, en la mayoría de los países, la banda de frecuencias por debajo de 10 GHz está saturada [2]. Por lo que, el uso de nuevas bandas de frecuencia para el despliegue de las futuras redes inalámbricas es necesario. Algunas de las bandas ya propuestas y en proceso de despliegue son las de ondas milimétricas (30 a 300 GHz), principalmente para comunicaciones 5G-NR (5 Generation New Radio) y LTE-A (Long Term Evolution-Advance)[3], [4]. La principal ventaja de esta banda de frecuencias es el elevando ancho de banda disponible. Sin embargo, presentan una atenuación elevada de la señal, por lo que los radios de cobertura se ven drásticamente reducidos. Sin embargo, esto a la vez permite densificar las redes móvil [6]. Por otro lado, el espectro de frecuencia de 10 a 20 GHz, calificado como banda SHF (Super High Frequency), está destinada según la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) para uso de Radioastronomía, comunicaciones por microondas, redes inalámbricas, radares modernos, comunicaciones y televisión por satélite DBS (Direct Broadcast Satellite), radioafición e inclusive para telefonía móvil [5]. Sin embargo, gran parte de la banda de frecuencia se encuentra subutilizada. La cual

podría ser utilizada especialmente en interiores para uso secundario de redes inalámbricas. En el presente artículo, se presenta un modelo de propagación empírico para la banda de 10 a 20 GHz, la cual se presenta como una alternativa para el despliegue de redes inalámbricas. El modelo de propagación se obtuvo a partir de medidas realizadas en un ambiente controlado dentro de una cámara anecoica. Variando la distancia y frecuencia y bajo condiciones atmosféricas de la región andina y región costera emuladas mediante variaciones de O_2 , humedad y temperatura. El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En la sección II se presenta la metodología. En la sección III se presentan los resultados y el modelo de propagación obtenido a partir de las medidas realizadas. Finalmente, la sección IV concluye el artículo.

II. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en 2 secciones: a) Diseño y construcción de la cámara anecoica y b) metodología de medición variando las condiciones ambientales.

A. Diseño de la cámara anecoica

Para el cálculo del tamaño mínimo en ancho, largo y profundidad de la cámara, se utilizó la fórmula de campo lejano Ec. 1 [8].

$$L = \frac{2D^2}{\lambda} \tag{1}$$

Donde, $D = 0.049$ m es el tamaño de la diagonal mayor de la antena tipo corneta en metros y $\lambda = 0.03m$ es la longitud de onda en metros para 10 GHz (frecuencia inferior). La distancia de campo lejano $L0.166m$. Por tanto, para el diseño de la cámara anecoica se consideró 0.1667 metros como la longitud mínima de separación entre la antena receptora y la antena transmisora. Con el fin de tener un rango de separación mayor para el estudio de propagación, se establecieron dimensiones de 2.4 m de largo y 0.8 metros de ancho y alto.

Por otro lado, el espesor mínimo del material absorbente varía en función de las frecuencias a medir siguiendo la expresión $L - l = \frac{\lambda}{2}$ Donde, el espesor mínimo del material es la mitad de la longitud de onda de la frecuencia inferior de estudio (10 GHz) [7], [9], [11]; se obtiene por tanto 0.015 m. Sin embargo, se utilizó un material absorbente con espesor de 0.05 m para garantizar mayor absorción de las ondas. El diseño de la cámara anecoica se muestra en la Fig. 1.

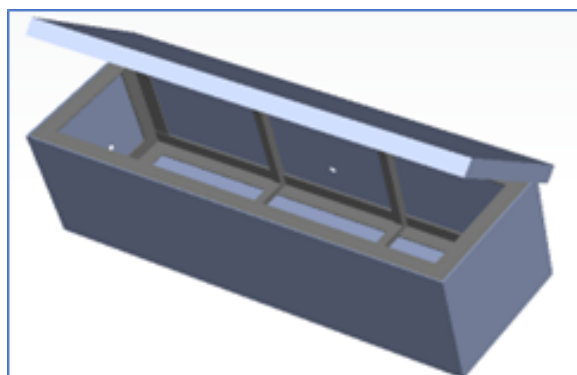


Figura 1. Diseño Cámara Anecoica en Software de Simulación.

La cámara anecoica implementada se presenta En la Fig. 2.



Figura 2. Implementación de la Cámara Anecoica.

B. Metodología de Medición

Se planificaron 3 escenarios de medidas: i) bajo condiciones atmosféricas normales de la Sierra Andina, al cual se denominó “vacío”. ii) Variando la concentración de oxígeno (oxígeno) y iii) variando la temperatura y Humedad (Humedad) para emular condiciones costeras del pacífico ecuatorial.

Para emular las condiciones atmosféricas de concentración de oxígeno, temperatura y humedad de la costa ecuatorial, se inyectó oxígeno y vapor de agua caliente, para el escenario 2 y 3, respectivamente. Se tomó como referencia los valores de temperatura y porcentajes de humedad existentes en la región andina (Riobamba, Ecuador), y en la región costera (Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador). Donde la temperatura máxima promedio es de 19 °C y 32 °C, respectivamente; la humedad es de de 49% y 87% y la concentración de oxígeno es de 20.95 % y 35.19%, respectivamente [15]. Las medidas se realizaron con saltos en frecuencia de 100 MHz y saltos de distancia de 10 cm.

Para realizar las medidas se utilizó un Generador de señales Anritsu MG3690C, un Analizador de espectros Anritsu y antenas tipo corneta [14]. Además, las medidas se realizan en el interior de la cámara anecoica (Fig. 3).

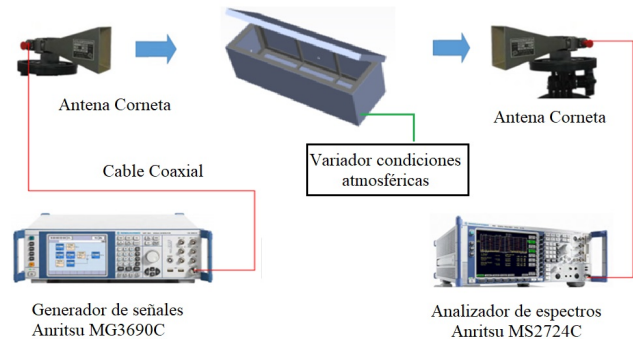


Figura 3. Set-up de laboratorio para las medidas.

C. Obtención del modelo de propagación

Tomando como base la ecuación del “Modelo de Propagación de Friss” Ec. 2 [12] se calculó los valores de las

pérdidas de propagación, teniendo una aproximación de la curva que representa las pérdidas medidas

$$L = A \log d + B \log f \tag{2}$$

Donde, A y B son las constantes por determinar, d representa la distancia en metros entre las antenas y f es la frecuencia en GHz. Para determinar los valores de las constantes A y B se generó un sistema de n ecuaciones con la Ec. 3 y Ec. 4. Donde n es el número máximo de medidas tomadas y m varía desde 1 hasta n - 1. Por tanto, con m = n - 1 se obtiene L₁, que corresponde a la primera medida realizada.

$$L_n = A_n \log d_n + B_n \log f_n \tag{3}$$

$$L_{n-m} = A_m \log d_{n-1} + B_m \log f_{n-1} \tag{4}$$

Con el fin de determinar la exactitud de la ecuación de propagación propuesta, se determinó el valor de error cuadrático medio (MSRE) entre las medidas realizadas y los valores obtenidos con la ecuación de propagación. El MSRE se lo calculó a partir de la Ec. 5. Donde, P es el valor predicho, O es el valor medido y n es la cantidad de datos analizados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \tag{5}$$

III. RESULTADOS

Los resultados se presentan en 2 secciones, primero las pérdidas de propagación medidas son presentadas. Luego se presenta la ecuación empírica presentada para los 3 casos definidos y entornos indoor.

A. Medidas de pérdidas de propagación

A manera de ejemplo, en la Fig. 4 se presenta las mediadas realizadas para los 3 escenarios propuestos para una frecuencia específica (18 GHz), se puede observar que las pérdidas de propagación oscilan entre 6 y 37 dB a una distancia de 20 cm y 2 m, respectivamente. Este comportamiento se mantiene para frecuencias de 18, 19 y 20 GHz.

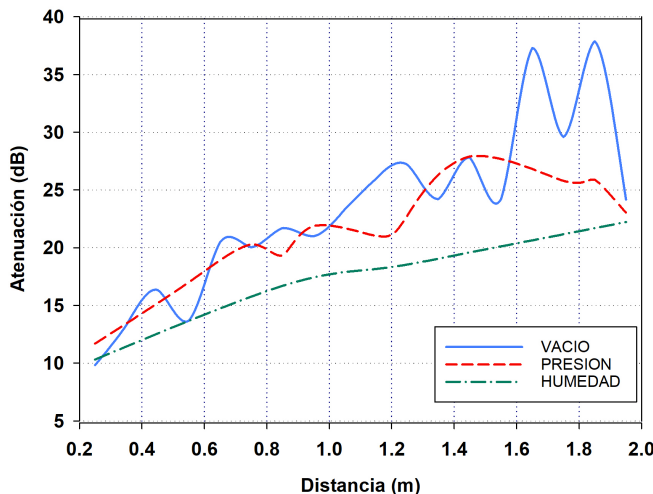


Figura 4. Pérdidas de propagación medidas a 18 GHz.

Algo similar ocurre en las frecuencias de 10, 11, 12 y 13 GHz (Fig. 5), con una variación de hasta 35 dB a 2 metros de distancia. Mientras que las pérdidas oscilan hasta 36 dB en las frecuencias de 14, 15, 16 y 17 GHz.

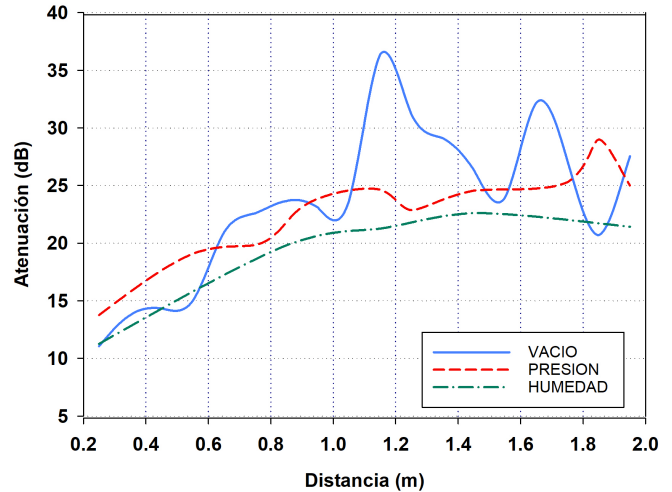


Figura 5. Pérdidas de propagación medidas a 10 GHz.

B. Desarrollo del modelo de propagación

A continuación, se presenta el modelo de propagación empírico y la diferencia en pérdidas de propagación para los 3 escenarios propuestos.

1) Escenario “vacío”: Resolviendo el sistema de ecuaciones presentado en La Ec. 3 y 4 utilizando los valores medidos, se obtiene los valores A = 5.5127 y B = 20.495. Por tanto, se obtiene la ecuación de propagación para espacio libre presentada en la Ec. 6

$$L = 5.5127 \log d (m) + 20.495 \log f (GHz) \tag{6}$$

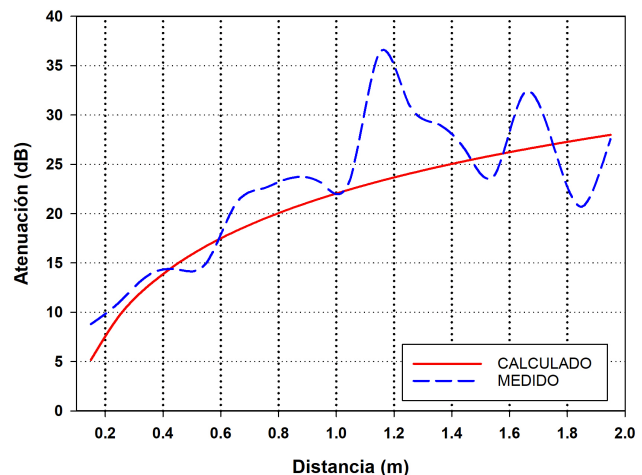


Figura 6. Pérdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en condiciones de espacio libre a frecuencias de 10 GHz.

La comparación entre las pérdidas medidas y calculadas con la Ec. 6 para 2 frecuencias (10 y 15 GHz) se presenta en la Fig. 6 y Fig. 7, donde se obtiene un RMSE de 4.45 y 3.23 dB, respectivamente.

2) *Escenario "Oxígeno"*: Para la diferente concentración de O_2 en la Costa Ecuatorial se obtuvieron los parámetros $A = 5.8903$ y $B = 13.6388$. La ecuación de propagación resultante se presenta en la Ec. 8.

$$L = 5.8903 \log d(m) + 13.6388 \log f(GHz) \quad (8)$$

En la Fig. 8 se presentan a manera de ejemplo las pérdidas de propagación para 10 GHz en condiciones de "oxígeno" medidos y calculados. El RMSE es este caso es de de 1.53.

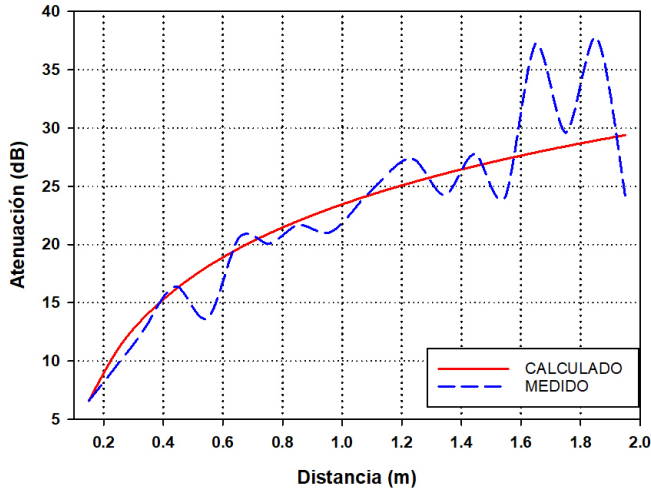


Figura 7. Pérdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en condiciones de espacio libre a 18 GHz.

Los valores de RMSE para frecuencias de 10 a 20 GHz se muestran en la Tabla I, donde se puede observar que el valores de RMSE oscilan entre 1.82 y 3.45.

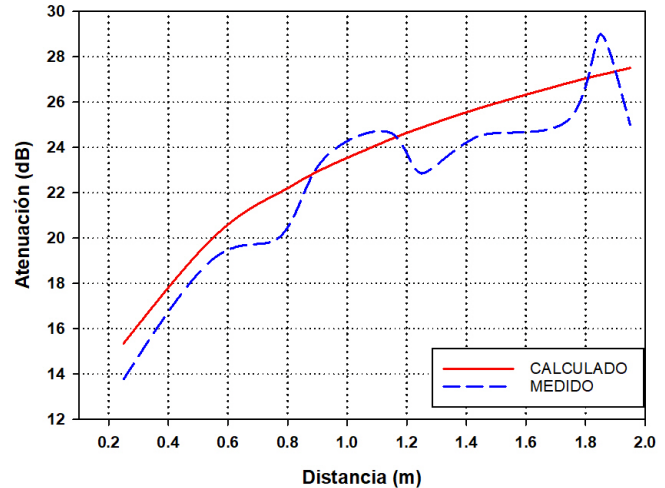


Figura 8. Pérdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en condiciones de Oxígeno a 35.19% en 10 GHz.

Tabla I

VALORES DE RMSE ESCENARIO VACÍO DE LOS RESULTADOS MEDIDOS VS SIMULADOS.

Frecuencia (GHz)	Indice de Error Cuadrático Medio (RMSE)
10	1.82
11	1.42
12	1.33
13	2.28
14	3.45
15	3.23
16	2.73
17	2.19
18	2.06
19	3.07
20	2.81

Realizando la comparación para otra frecuencia, en este caso 15 GHz. En la Fig. 9, se obtiene un RMSE de 2.11, el cual es similar al obtenido para la frecuencia de 10 GHz.

El rango de aplicación de la ecuación Ec. 6 se presenta en la Ec. 7.

$$\begin{aligned}
 &10GHz < f < 20GHz \\
 &0 < d < 7m \\
 &temperatura \approx 19^\circ C \\
 &Humedad \approx 49\% \\
 &O_2 \approx 21\%
 \end{aligned} \quad (7)$$

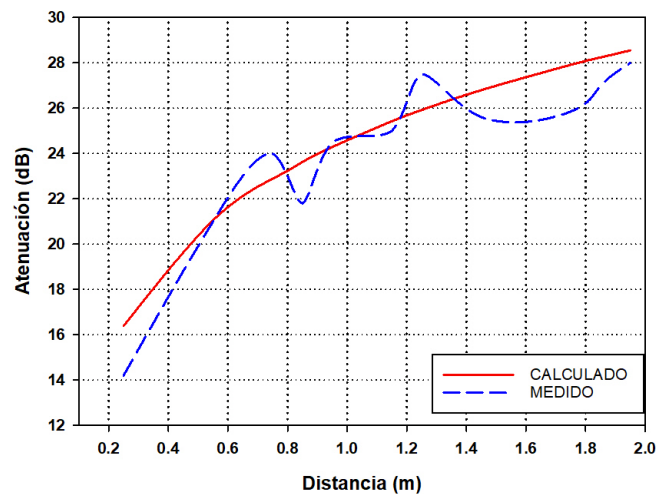


Figura 9. Pérdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en condiciones de Oxígeno a 35.19% en 15 GHz .

Los valores de RMSE para diferentes frecuencias de referencia se muestran en la Tabla II. Se puede observar que los

índices RMSE están en torno a 3 excepto para 18 GHz donde se tiene un RMSE de 8.75 . Sin embargo, se considera un valor aceptable para el modelo de propagación, e.g. el modelo Okumura-Hata tiene un margen de error de 10 dB.

Tabla II
VALORES DE RMSE ESCENARIO OXIGENO DE LOS RESULTADOS MEDIDOS VS SIMULADOS.

Frecuencia (GHz)	Índice de Error Cuadrático Medio (RMSE)
10	1.53
11	1.89
12	3.69
13	2.27
14	2.13
15	2.11
16	2.21
17	2.12
18	8.75
19	2.20
20	2.23

El rango de aplicación de la Ec. 8 se presenta en la Ec. 9.

$$\begin{aligned}
 10GHz < f < 20GHz \\
 0 < d < 7m \\
 19^{\circ}C < Temperatura < 32^{\circ}C \\
 Humedad \approx 49\% \\
 O_2 \approx 35.19\%
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

3) Escenario "Humedad": Al emular las condiciones de Humedad establecidas en el escenario "Humedad" se obtuvo el modelo de propagación mostrado en la Ec. 10, donde $A = 2.1381$ y $B = 6.2442$.

$$L = 2.1381 \log d(m) + 6.2442 \log f(GHz) \tag{10}$$

Al igual que en los escenarios anteriores, a manera de ejemplo en la Fig. 10 y Fig. 11 se presentan los valores de pérdidas medidos vs calculados, para 10 y 15 GHz respectivamente. Los cuales presentan un RMSE de 1.36 y 2.26.

En la Tabla III se puede notar que para el caso del escenario "Humedad" el índice RMSE mínimo es de 0.32, mientras que el máximo es de 2.26. Por tanto, la aproximación conseguida con la ecuación de propagación planteada en la Ec. 10 es correcta.

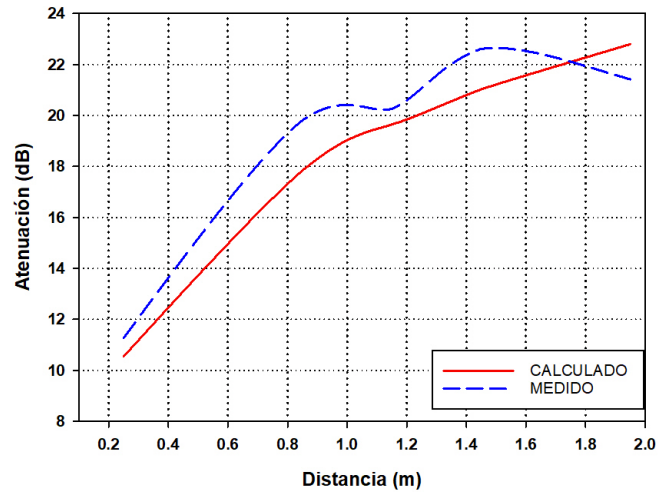


Figura 10. Pérdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en condiciones de Humedad a 35.19% en 10 GHz.

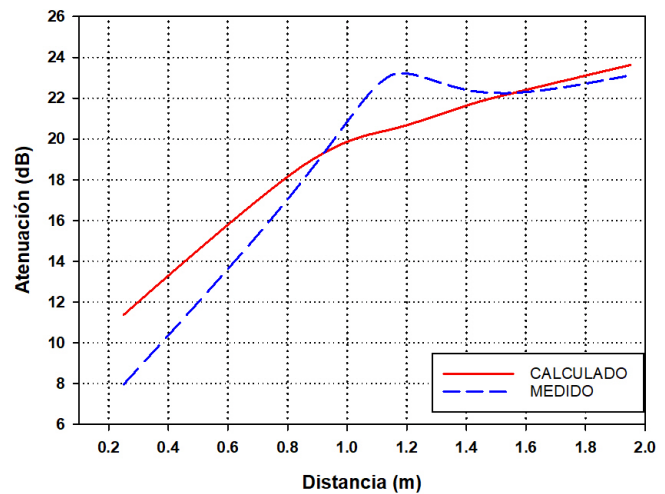


Figura 11. Pérdidas Medidas vs Pérdidas Calculadas en condiciones de Humedad a 35.19% en 15 GHz .

Tabla III
VALORES DE RMSE ESCENARIO HUMEDAD DE LOS RESULTADOS MEDIDOS VS SIMULADOS.

Frecuencia (GHz)	Índice de Error Cuadrático Medio (RMSE)
10	1.36
11	1.08
12	2.0
13	1.54
14	1.49
15	2.26
16	1.34
17	1.42
18	0.62
19	0.32
20	1.61

El rango de aplicación de la Ec. 10 se muestra en la Ec. 11.

$$\begin{aligned}
 10GHz < f < 20GHz \\
 0 < d < 7m \\
 Temperatura < 32^{\circ}C Humedad \\
 \approx 48\%; O_2 \approx 35.19\%
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

4) *Afectación de la concentración de oxígeno y Humedad en las pérdidas de propagación:* El efecto de la diferente concentración de oxígeno y humedad fue estudiado. En la Fig. 12 y Fig. 13 se puede ver que un aumento de la concentración de oxígeno de 20.95% a 35.19% mejora las condiciones de propagación en aproximadamente 7 dB de media. Por otro lado, la mayor concentración de humedad de 40% al 87% también mejora las condiciones de propagación en 15 dB aproximadamente a la frecuencia de 10 GHz.

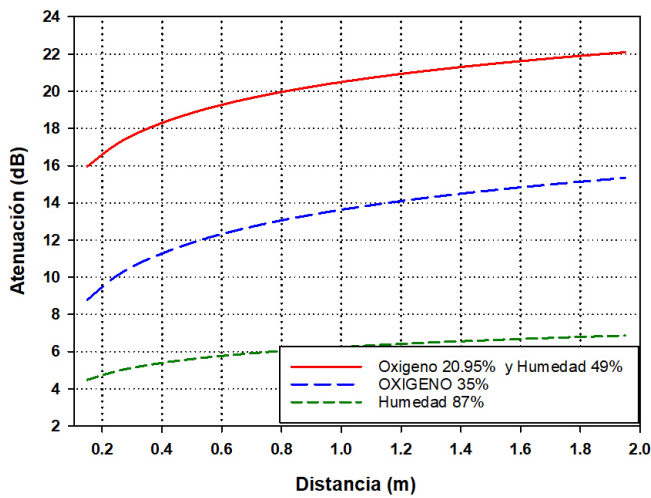


Figura 12. Comparación de pérdidas de propagación para diferentes condiciones de concentración de oxígeno y humedad 10 GHz.

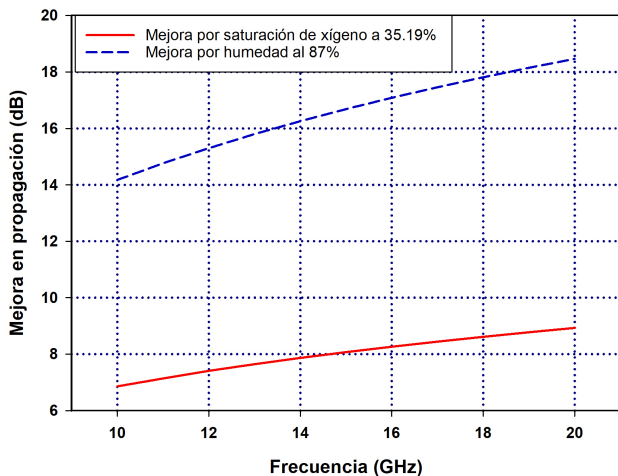


Figura 13. Mejora en pérdidas de propagación para el rango de 10 a 20 GHz por diferentes condiciones de concentración de oxígeno y humedad.

Cabe destacar que, para el rango de frecuencias de estudio, la mejora por el aumento de concentración de oxígeno y humedad va creciendo mientras la frecuencia de propagación aumenta. Por tanto, las diferentes condiciones presentes en distintas zonas de la región andina y costera afectan las condiciones de propagación con una mejora de hasta 18 dB para frecuencias de hasta 20 GHz.

IV. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones de concentración de oxígeno de 20.95% y Humedad del 49%, característico de la región Andina, las pérdidas promedio de propagación en la banda de 10 a 20 GHz y distancia de hasta 2 metros son de 21.88 dB. Bajo diferentes niveles de concentración de oxígeno, que en la costa superan en un 14.64% a la costa, Las pérdidas de propagación disminuyen en 7 dB,. Es decir, ambientes con mayor concentración de oxígeno son más favorables para la propagación de la señal en el rango de frecuencias estudiado.

Por otro lado, considerando las condiciones de humedad presentes en la costa (87%) las pérdidas de propagación disminuyen hasta 18 dB en el rango de 10 a 20 GHz. Por tanto, las condiciones ambientales en la costa generan un ambiente propicio para la propagación de señales radioeléctricas, debido principalmente a la mejor conductividad presente en un medio con mayor humedad. Esto toma especial relevancia en ambientes interiores donde las distancias que recorre la onda electromagnética son pequeñas.

empírico a través de la formula general de propagación $L = A \log d + B \log f$ para el rango de frecuencias de 10 a 20 GHz para la región Ecuatorial. Las constantes A Y B para un entorno Andino sierra son: $A = 5.5126$ y $B = 20.494$; para un entorno costero con mayor concentración de Oxígeno $A = 5.8903$ y $B = 13.6388$; Finalmente, considerando ambientes costeros de alta Humedad $A = 2.1381$ y $B = 6.2442$.

El valor máximo de RMSE de los resultados calculados con el modelo de propagación propuesto vs los valores obtenidos con mediciones, es de 3.45 para la sierra (Concentración de oxígeno 20.95% y humedad del 49%). Para entornos costeros con concentración de oxígeno del 35.19% el RMSE máximo fue de 8.75 a 18 GHz y de 3.69 a 12 GHz. Para entornos costeros con 87% de humedad el RMSE máximo fue de 2.0. Por tanto, el modelo de propagación presentado permite una buena aproximación a los datos reales.

ACKNOWLEDGMENT

Un agradecimiento especial a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Ecuador.

REFERENCIAS

- [1] ITU-R . P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. ITU,2005.
- [2] Leon W. Couch, William J. Weisz *Radio Spectrum Utilization*. Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), 2003, Pages 793-805
- [3] S. Rangan, T. S. Rappaport and E. Erkip *Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges*. in Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 3, pp. 366-385, March 2014

- [4] Barrado, A. D. *Estudio y caracterización del canal y de la propagación en ondas milimétricas, orientada a su utilización en redes de comunicaciones móviles 5G*. Modelo de integración de tecnologías para la provisión de servicios móviles basados en localización y contexto. 2017
- [5] IEEE *Database of Frequency Allocation*. IEEE, 2022
- [6] Bhushan, N. et al *Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G*. IEEE Communications Magazine. 2014, pp. 82–89.
- [7] Campos, Mónica L; & Flores, Pauina B. *Implementación de una cámara anecoica en la banda de 2-3 GHz*, 2006
- [8] Balanis, Constantine. *Antenna Theory - Analysis and Design*. WILEY, 4th Edición, 2016.
- [9] Darío, B; & Juan, G. *Criterios generales para el diseño de cámaras anecoicas*. Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. 2012.
- [10] Jaramillo, Darwin; & Quishpe *Estudio, diseño y construcción de un prototipo de arreglo de antenas microstrip para recepción en la banda x comparable a la ganancia de una antena parabólica*. Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Ecuador. 2013.
- [11] Altamirano, Dennis. *Proyecto de una cámara semi-anecoica*. Barcelona. 2009.
- [12] ITU *Propagación de las ondas radioeléctricas en sistemas terrestres móviles terrestres en las bandas de ondas métricas/decimétricas*. Manual ITU, 2002.
- [13] Kiran Chand, Dr. M V Raghavendra, K.Sathyavathi *Radiation Analysis and Design of Pyramidal Horn Antenna*. International Journal of Engineering Research & Technology (Ijert) Volume 02, Issue 10, October 2013.
- [14] The Weather Channel *National and Local Weather Radar, Daily Forecast, Hurricane and information from The Weather Channel and weather*. 2018
- [15] The Weather Channel *National and Local Weather Radar, Daily Forecast, Hurricane and information from The Weather Channel and weather*. 2018

