INVESTIGACIÓN & DESARROLLO, Vol. **20**, No. **1**: 89 – 97 (2020)
ISSN 2518-4431

APLICACIÓN WEB PARA ESTIMACIÓN DE ATENUACIÓN POR LLUVIA EN ENLACES CON EL SATÉLITE TKSAT-1

WEB-BASED APPLICATION FOR RAIN ATTENUATION ESTIMATION ON TKSAT-1 SATELLITE LINKS

Gustavo Siles, Gustavo Marín
Laboratorio de Radiocomunicaciones (LRC)
Universidad Privada Boliviana
gustavosiles@upb.edu
(Recibido el 20 de mayo 2020, aceptado para publicación el 15 de junio 2020)

RESUMEN

En el presente artículo se introduce una aplicación web diseñada para el cálculo de estadísticas de atenuación por lluvia en Bolivia. Los cálculos que realiza son válidos para enlaces con el satélite boliviano TKSat-1 y se realizan en base a las últimas recomendaciones proporcionadas por la UIT-R. Se presentan un par de aplicaciones concretas tomando en cuenta dos emplazamientos en Bolivia: uno en una región tropical con altos niveles de precipitación, y otro en una región altiplánica en la región occidental del país. Los resultados obtenidos demuestran la utilidad de la aplicación y permiten estudiar de manera cuantitativa los diferentes efectos que produce la lluvia a diferentes bandas de frecuencias, así como su comportamiento estadístico en un año medio.

Palabras Clave: Comunicaciones Satelitales, Atenuación por Lluvia, Propagación, Satélite TKSat-1.

ABSTRACT

The present paper aims to introduce a web-based-application for the calculation of rain attenuation statistics in Bolivia. The calculations developed by the tool are valid for slant path links using the Bolivian satellite TKSat-1 and are based on latest versions of recommendations provided by the ITU-R. A couple of study cases are discussed by using two different sites in Bolivia: one located in a tropical region with high precipitation levels, and other one located in the Bolivian Andean plateau in the western region of the country. The results obtained show the usefulness of the tool and allow to quantitatively study the attenuation effects caused by rain at different frequency bands, as well as their statistical behavior in an average year.

Keywords: Satellite Communications, Rain Attenuation, Atmospheric Propagation, TKSat-1 Satellite.

1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones por satélite permanecen a día de hoy como la única solución tecnológica que, en términos de cobertura, es la más extensa, pues permite llegar con servicios de telecomunicaciones a vastas zonas geográficas que no son atendidas por otro tipo de redes, como ser fibra óptica o redes móviles 4G. Estrategias nacionales de conectividad de banda ancha en países tan avanzados como Francia, tienen en cuenta a los satélites de comunicaciones como solución para reducir brechas digitales [1]. Nuevas tecnologías como los satélites HTS (*High Throughput Satellite*) [2] o VHTS (*Very High Throughput Satellite*) [3] en banda Ka permiten proyectar servicios comerciales de acceso a Internet a costes competitivos con redes fijas del tipo xDSL [4].

Los parámetros de calidad de un enlace de comunicaciones por satélite se pueden deteriorar principalmente por la presencia de lluvia a lo largo del trayecto. Por encima de 10 GHz, donde la longitud de onda es comparable al tamaño de las gotas, la lluvia produce niveles de atenuación, A_R (dB), como resultado de absorción y dispersión de energía. En la literatura, esta atenuación se calcula típicamente a partir de estadísticas de intensidad de lluvia, R (mm/h). La Unión Internacional de Telecomunicaciones, sección Radiocomunicaciones (UIT-R) proporciona modelos para estimar estadísticas anuales de ambos parámetros, dada su naturaleza estocástica

En este artículo se presenta una aplicación web desarrollada en el Laboratorio de Radiocomunicaciones (LRC), con el fin de dar apoyo tanto en actividades docentes en la asignatura de Comunicaciones Satelitales, como a ingenieros practicantes que requieren obtener estadísticas anuales de A_R para cualquier punto del territorio de Bolivia. Estas estadísticas se calculan para enlaces con el satélite boliviano Túpac Katari (TKSat-1, 87.2°W), principal recurso con el que cuenta el país para explotar este tipo de comunicaciones, con transpondedores en las bandas C, Ku y Ka y cobertura total del territorio nacional. Otras aplicaciones o softwares de uso académico [5] requieren para su uso contar con el software licenciado Matlab®, y también se pueden encontrar en el mercado softwares comerciales como [6] con funcionalidades que exceden el alcance de la aplicación desarrollada.

DOI: 10.23881/idupbo.020.1-7i

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se describe de manera general la aplicación. Las Recomendaciones de la UIT utilizadas se presentan en la Sección 3 y los resultados del desarrollo en la Sección 4, junto con algunos ejemplos para distintos cálculos realizados para algunas zonas de Bolivia. Finalmente, en la Sección 5 se resumen las principales conclusiones de este trabajo.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA APLICACIÓN

Motivados por los desafíos en mejorar la enseñanza de Comunicaciones Satelitales, se desarrolló la aplicación, denominada PluvioBol, que se encuentra disponible en Internet [7] y es de acceso libre. En su desarrollo, que tomó aproximadamente 6 meses de trabajo, se combinan los lenguajes de programación Python y Javascript para realizar los cálculos necesarios, y para el desarrollo de la interfaz gráfica se utilizaron HTML y CSS. Se diseñó con el objetivo de dar soporte a la enseñanza de conceptos sobre propagación atmosférica y presentar una interfaz gráfica intuitiva para los potenciales usuarios.

Los datos de entrada que se requieren para ejecutar la aplicación son (Figura 1):

- Coordenadas geográficas de la estación terrena
- Altura sobre el nivel del mar de la estación terrena
- Frecuencia del enlace y polarización
- Dirección del enlace: Uplink (UL) o Downlink (DL)

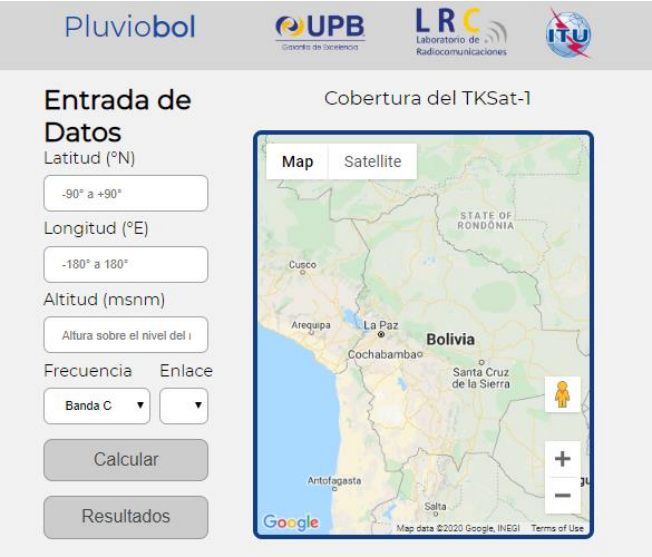


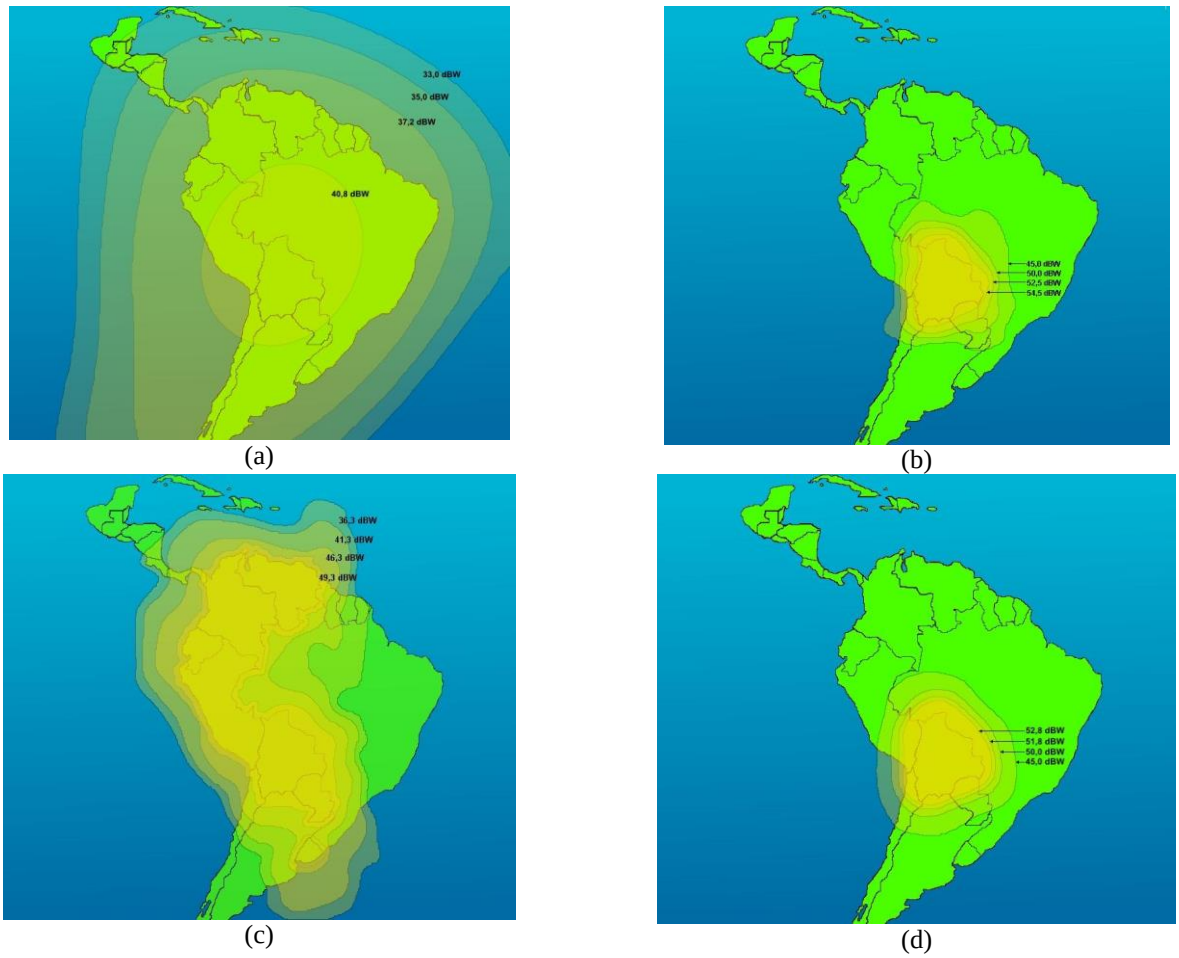
Figura 1: Aplicación web PluvioBol para cálculo de estadísticas anuales de atenuación por lluvia para enlaces con el satélite TKSat-1

Las coordenadas geográficas se obtienen de manera intuitiva utilizando la API de Google Maps, sea utilizando el formato de mapas o de vista satelital. La altura sobre el nivel del mar se obtiene automáticamente, una vez seleccionado el sitio, a través de la API de elevación de Bing Maps, accesible de manera gratuita para proyectos educativos. Una alternativa al uso de esta API puede ser el uso de los mapas digitales proporcionado por la UIT en la Recomendación UIT-R P.1511 [8]. Las frecuencias y polarizaciones del TKSat-1, además del sentido del enlace (UL o DL) se resumen en la Tabla 1. Las coberturas de estas bandas de frecuencia, se muestran en la Figura 2.

TABLA 1 – FRECUENCIAS DE OPERACIÓN Y POLARIZACIONES DE LOS TRANSPONDEDORES DEL SATÉLITE TKSAT-1

Banda	Frecuencia (GHz) - Polarización	
	Uplink	Downlink
C	6 – LHCP	4 – RHCP
Ku BSS	17 – RHCP	12 – RHCP
Ku FSS	14 – V*	12 – H*
Ka	29 – RHCP	19 – LHCP

*La versión actual de la aplicación web no considera la variante de polarización H para el Uplink y V para el Downlink, ambas utilizadas también en la banda Ku FSS. Una nueva versión incluirá estas polarizaciones.



(a) (b) (c) (d)

Figura 2: Coberturas del satélite TKSat-1, a) Banda C, b) Banda Ku BSS, c) Banda Ku FSS, y d) Banda Ka.

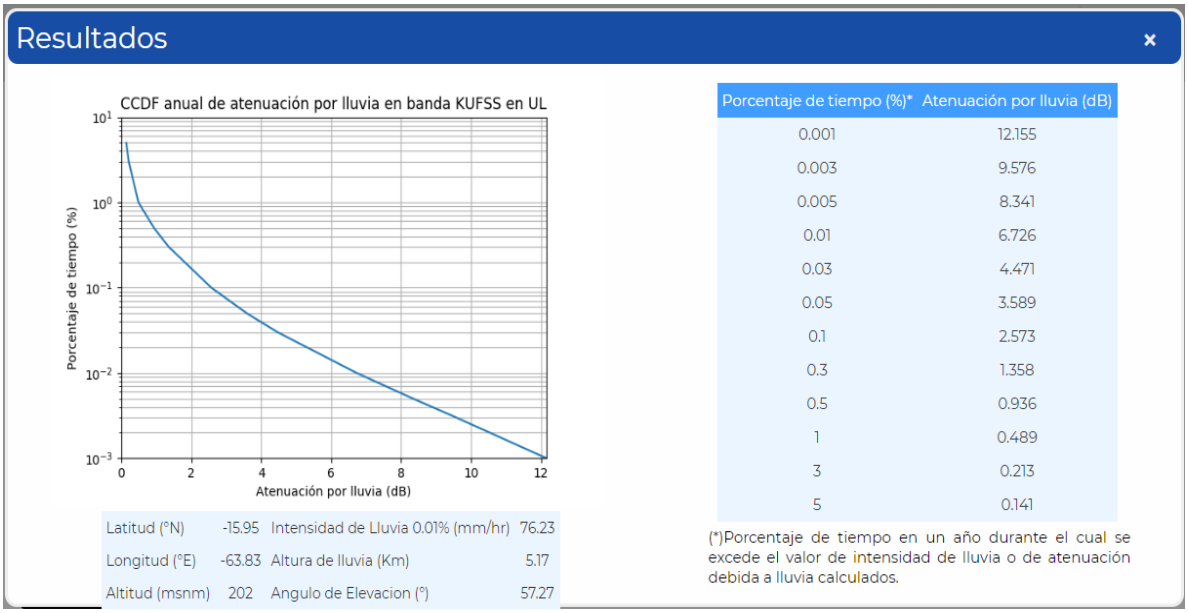


Figura 3: Página con resultados proporcionados por PluvioBol. A la izquierda, la CCDF de Atenuación por lluvia, A_p (dB) que se excede el *p%* del tiempo en un año medio, y a la derecha, resultados tabulados para valores determinados de *p%*

Para el cálculo de las soluciones se implementan las últimas Recomendaciones de la serie P, de la UIT-R. Vale la pena recordar al lector que esta serie de documentos está relacionada al ámbito de la Propagación, son propuestos por el Grupo de Estudio 3 (SG3) y sus contenidos son de acceso libre [9]. El principal resultado que PluvioBol entrega es la Función de Distribución Acumulada Complementaria (CCDF) de A_p, en forma de gráfica semilogarítmica (ver Figura 3), que permite conocer el porcentaje de tiempo, *p*, que la atenuación supera un determinado valor en un año

medio. Estos valores se presentan además en forma tabulada. La Recomendación UIT-R P.618 [10] describe paso a paso el método analítico para estimar A_p a partir de los datos de entrada mencionados previamente. Además, el cálculo requiere otros parámetros adicionales que se han calculado utilizando un conjunto adicional de Recomendaciones de la UIT que se presentan de manera resumida en la Sección 3. La utilización de los documentos de la UIT se fundamenta en el hecho de que representan métodos de referencia en el ámbito de las telecomunicaciones, con una aplicabilidad, en principio, a nivel global.

3. MARCO TEÓRICO: RECOMENDACIONES DE LA UIT-R

La Recomendación UIT-R P.618 constituye el principal documento de referencia para el cálculo de efectos ionosféricos y troposféricos en enlaces satelitales. Los primeros tienen interés en frecuencias por encima de 1 GHz, y los segundos por encima de 10 GHz. PluvioBol incluye la banda C del TKSat-1 con el fin de incluir todas sus bandas de operación e ilustrar, con fines comparativos, los menores efectos de atenuación en ésta.

El apartado 2.2.1.1 en [10] presenta el método para obtener estimaciones a largo plazo de las estadísticas de atenuación debida a lluvia sobre trayectos tierra-Espacio, para frecuencias de hasta 55 GHz, según la siguiente expresión

$$A_p = A_{0.01}\left(\frac{p}{0.01}\right)^{-(0.655 + 0.033\ln(p) - 0.045\ln(A_{0.01}) - \beta(1-p)\sin\theta)} \tag{1}$$

donde:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \tag{2}$$

y la atenuación específica debida a lluvia, γ_R (dB/km), está dada por:

$$\gamma_R = k\left(R_{0.01}\right)^{\alpha} \tag{3}$$

En (1), θ (°) es el ángulo de elevación, calculado a partir de las coordenadas geográficas y la posición orbital del TKSat-1 (87.2°W) mediante ecuaciones básicas de ángulos de apuntamiento [11], y β es un parámetro auxiliar que depende de p, θ y la latitud de la estación terrena [10].

En (2), L_E (km) es la longitud efectiva del trayecto con presencia de precipitación, y se define en base a la geometría del trayecto y al cálculo de factores de ajuste horizontal y vertical que modelan la estructura espacial de una celda de lluvia. Para esta caracterización, se introduce el concepto de altura de lluvia h_R (km), que es aquella altura por debajo de la cual, en presencia de precipitación, se comienza a producir atenuación como resultado de absorción y dispersión de energía por las gotas de agua. Juega así un rol importante conocer a partir de qué región de la atmósfera las partículas se encuentran en fase líquida o en fase sólida, siendo las primeras las que generan atenuación. El valor de h_R está así directamente relacionado a isoterma 0ºC, h_0 (km), que es la altura a la cual la atmósfera alcanza esa temperatura, y a la capa fundente (*melting layer*). En ausencia de medidas locales de largo plazo de h_0 para el sitio de interés, por ejemplo, mediante radiosondeos, la Recomendación UIT-R P.839 [12] proporciona mapas digitales globales, con una resolución de 1.5°×1.5°, con valores medios de h_0.

En (3), se puede ver que γ_R es función de los parámetros k y α, que a su vez dependen de la frecuencia f (GHz) y la polarización de la señal. Las expresiones para calcular ambos parámetros se encuentran en la Recomendación UIT-R P.838[13]. Además, el parámetro $R_{0.01}$ representa la intensidad de la lluvia que se supera el 0.01% del tiempo, en un año medio, en la ubicación de la estación terrena. Se puede obtener de manera experimental a partir de estadísticas anuales de intensidad de lluvia, medida con un tiempo de integración de 1 minuto, durante al menos 10 años de medidas para caracterizar apropiadamente la variabilidad interanual de R. Sin embargo, este tipo de estadísticas en base a medidas no son habituales y la UIT recomienda el uso de mapas digitales (resolución 0.125°×0.125°) para estimar R_p a partir de las coordenadas geográficas del sitio. La Recomendación UIT-R P.837 [14] proporciona un modelo digital global para la predicción de estadísticas de largo plazo de R_p con un tiempo de integración de 1-min. Como ejemplo, en la Figura 4 se ven resultados de un estudio previo comparativo de CCDF de R_p en base a diferentes versiones de esta Recomendación para el caso de Bolivia [15]. En su última versión, se requiere como datos de entrada el valor de p, y las coordenadas geográficas del punto de interés, además de estadísticas mensuales de lluvia media total y de temperatura media de superficie. En ausencia de estos últimos datos, la UIT proporciona mapas globales digitales con una resolución espacial de 0.25°×0.25°, en el primer caso [14], y de 0.75°×0.75°para el segundo [17].

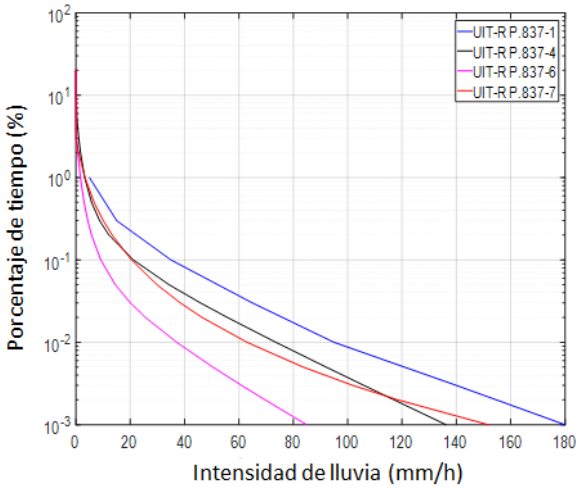


Figura 4: Ejemplo de CCDF de intensidad de lluvia, R_p (mm/h) que se excede el *p%* del tiempo en un año medio para La Guardia (Santa Cruz) [15].

Se ha mencionado previamente a los mapas globales digitales como insumos de la metodología utilizada. Este tipo de mapas proporcionan valores del parámetro de interés en puntos geográficos situados sobre una grilla que puede ser rectangular o trapezoidal, y una determinada resolución espacial. En la Figura 5 se puede observar un ejemplo para el caso de una grilla trapezoidal, donde se conocen las coordenadas geográficas de sus vértices y el parámetro de interés en cada uno de ellos. A partir de estos 4 puntos, se recurre a un procedimiento de interpolación bilineal para obtener el valor del parámetro en un punto situado dentro del trapecio. PluvioBol implementa la técnica de interpolación bilineal trapezoidal descrita en detalle en [16].

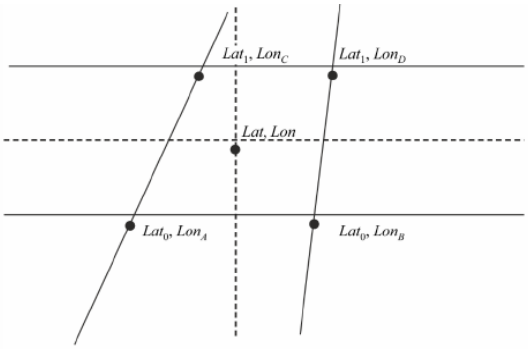


Figura 5: Escenario de aplicación de la técnica de interpolación bilineal en una grilla trapezoidal [16].

4. RESULTADOS

Con el fin de ilustrar los resultados que entrega PluvioBol, Figura 6, se han seleccionado dos emplazamientos situados en zonas geográficas distintas dentro el territorio boliviano:

- Chipiriri (-16.91ºS, -65.39ºW, 260 m.s.n.m)
- Patacamaya (-17.24ºS, -67.90ºW, 3802 m.s.n.m)

4.1. CHIPIRIRI

Los efectos de propagación en comunicaciones satelitales en zonas tropicales no han sido estudiados extensivamente en la literatura, si bien en la última década ha recibido atención por parte de la comunidad científica. Típicamente, estas zonas presentan, a lo largo del año, precipitaciones intensas cuyos efectos pueden generar desvanecimientos profundos debido a atenuación por lluvia. La localidad de Chipiriri se encuentra en el departamento de Cochabamba, provincia Chapare, caracterizada por su clima tropical, y presenta una cantidad de precipitación anual acumulada de aproximadamente 4000 mm [18].

(a) (b)

Figura 6: Interfaz de ingreso de datos de PluvioBol para a) Chipiriri, b) Patacamaya.

La Tabla 2 presenta algunos parámetros intermedios calculados internamente por PluvioBol, para obtener las estadísticas de A_p. El rango aproximado de ángulos de elevación de estaciones terrenas que se apuntan al TKSat-1 es aproximadamente entre 50º y 65º, según la ubicación geográfica. Para el caso de Chipiriri, es 58.07º. En relación al valor de $R_{0.01}$ estimado por PluvioBol, 89.31 mm/h, corresponde en general a una zona de alta precipitación, si bien, como se puede ver en un mapa preliminar de $R_{0.01}$, basado en [14], Bolivia tiene zonas donde este parámetro puede alcanzar valores de aproximadamente 120 mm/h (Figura 7).

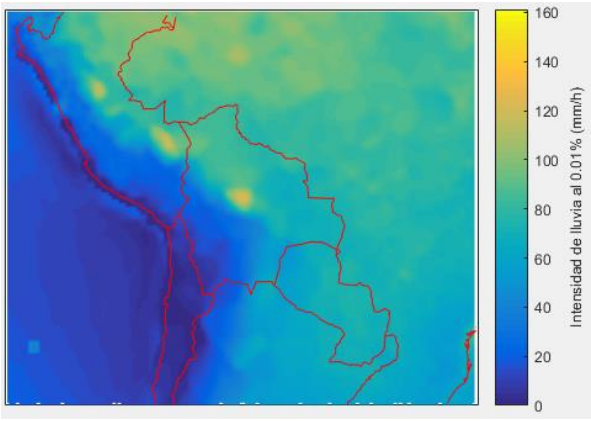


Figura 7: Mapa de intensidad de lluvia en Bolivia, según la Recomendación UIT-R P.837-7.
Fuente: Elaboración propia.

TABLA 2 – PARÁMETROS CALCULADOS POR PLUVIOBOL: CHIPIRIRI

Parámetros de cálculo	
Ángulo de elevación θ (°)	58.07
Altura de lluvia h_R (km)	5.01
Intensidad de lluvia excedida el 0.01% del tiempo $R_{0.01}$ (mm/h)	89.31

La Figura 8 muestra las CCDF de A_p para las cuatro bandas del TKSat-1, para enlaces descendentes (DL), obtenidas mediante PluvioBol. Si bien la zona de Chipiriri presenta altas precipitaciones, se confirma que en banda C el efecto de la lluvia es reducido: el 0.001% del tiempo en un año medio, i.e. 5.26 minutos/año, la atenuación por lluvia supera los 0.75 dB. Por otro lado, en banda Ku BSS, disponible para proporcionar servicios de televisión satelital (DTH, *Direct To Home*), la atenuación por lluvia se encuentra muy por encima de la estimada en banda C. Como se puede ver, durante el 0.1% del tiempo en un año medio, i.e. 8.77 horas/año, existen desvanecimientos provocados por precipitaciones que superan los 5 dB, y para porcentajes menores, por ejemplo 0.01% del tiempo, i.e. sistemas con disponibilidad de 99.99%, este valor se encuentra cerca de los 12.5 dB. La banda Ku FSS, utilizada, por ejemplo, en servicios de acceso a Internet o redes privadas satelitales, los valores están levemente por encima a los calculados en banda Ku BSS: durante el 0.1% del tiempo en un año medio, la atenuación por lluvia es mayor a 5.2 dB, y para 0.01% del tiempo se estima que está por encima de 12.8 dB. La problemática del efecto de precipitaciones en banda Ka se puede observar en los resultados obtenidos en esta frecuencia. Se puede ver que la atenuación que se supera 1% del tiempo, i.e. 3.65 días/año (99% de disponibilidad), es del orden de 3 dB, y para 0.1% el valor que se excede es 13.5 dB. Estos valores alcanzan valores mucho más elevados, por ejemplo, por encima de 30 dB para porcentajes mucho más bajos. A priori, esto claramente dificultaría establecer enlaces en esta banda de frecuencia, que es sin embargo la que permite ofrecer mayores velocidades de transmisión. Por otro lado, se debe tener en cuenta que en Bolivia existen regiones con mayores intensidades de lluvia en zonas tropicales, por tanto, estos valores estimados serán mayores.

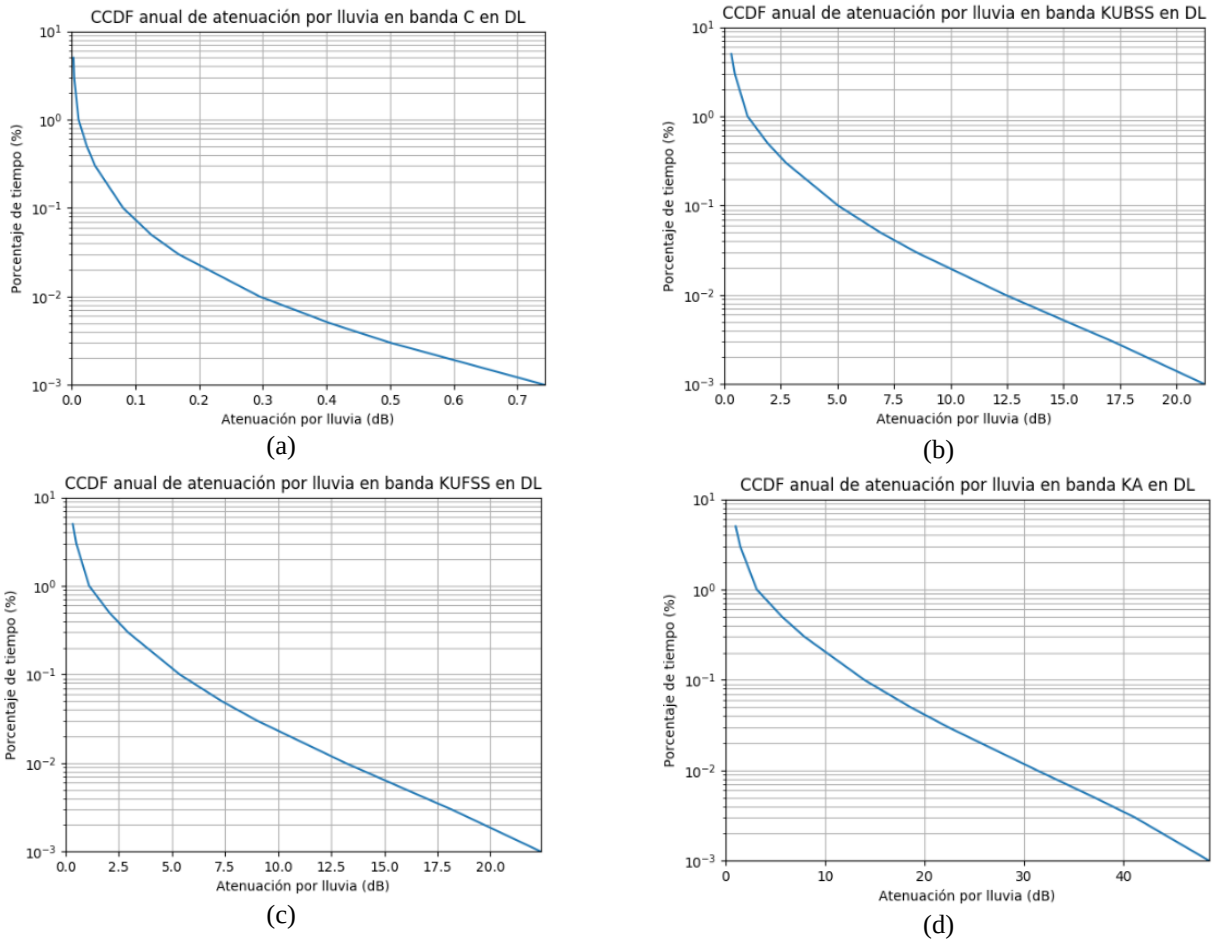


Figura 8: CCDF de atenuación por lluvia media anual en Chipiriri, a) Banda C, b) Banda Ku BSS, c) Banda Ku FSS, y d) Banda Ka.

TABLA 3 – PARÁMETROS CALCULADOS POR PLUVIOBOL: PATACAMAYA

Parámetros de cálculo	
Ángulo de elevación θ (°)	60.01
Altura de lluvia h_R (km)	5.07
Intensidad de lluvia excedida el 0.01% del tiempo $R_{0.01}$ (mm/h)	18.84

4.2. PATACAMAYA

La localidad de Patacamaya se encuentra en el departamento de La Paz, provincia Aroma, en el Altiplano boliviano, cuya altura media es aproximadamente 3800 m.s.n.m. En esta región de montaña, característica de la zona occidental de Bolivia, existen múltiples poblaciones rurales aisladas, muchas de ellas desatendidas de servicios de telecomunicaciones. Como se puede ver en la Tabla 3, el ángulo de elevación es 60.01º, mayor al caso de Chipiriri, debido a la ubicación más al oeste de Patacamaya, por tanto, más cercana a la longitud 87.2ºW del TKSat-1. En relación a la altura de lluvia, tanto en Patacamaya como en Chipiriri los valores son relativamente cercanos. El valor de $R_{0.01}$, 18.84 mm/h, es mucho menor dado que se trata de una región mucho más seca, con menor ocurrencia de precipitaciones durante el año y de menor intensidad.

Los resultados de las CCDF de A se pueden observar en la Figura 9. En términos generales, como era de esperar, los valores de atenuación en las 4 bandas de trabajo son menores que en una zona tropical. En banda C, los niveles se encuentran en unas pocas centésimas de dB, prácticamente despreciables. En las bandas Ku BSS y FSS, para porcentajes elevados de disponibilidad como 99.999%, la atenuación que se excede el 0.001% del tiempo es menor 3.6 dB. La banda Ka, la que sufre en principio más efectos debido a precipitaciones, se puede observar que para 0.01% del tiempo en un año medio, i.e. 52.6 minutos/año, la atenuación es mayor a 3.9 dB, y en 0.001% del tiempo, se superan los 7.5 dB.

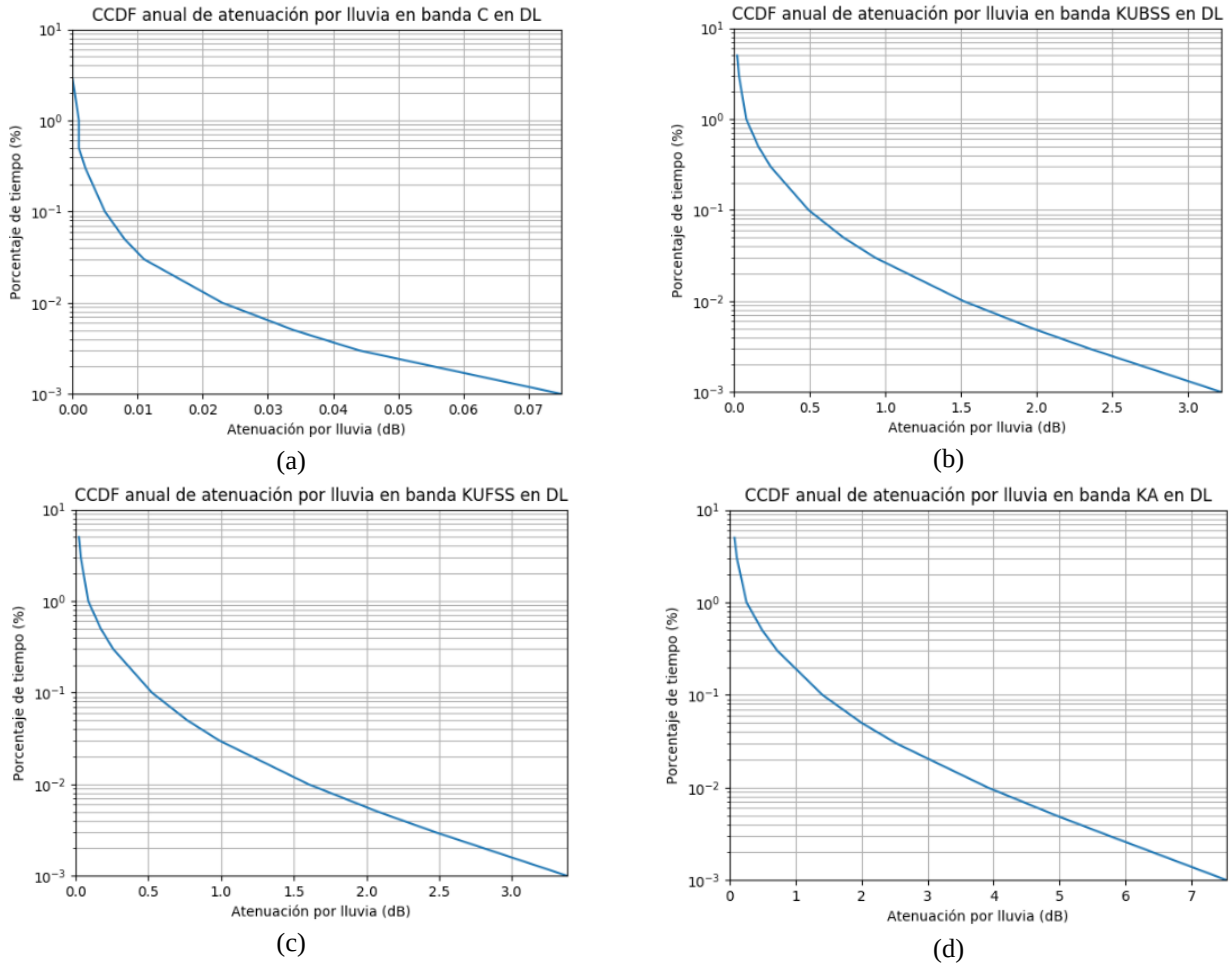


Figura 9: CCDF de atenuación por lluvia media anual en Patacamaya, a) Banda C, b) Banda Ku BSS, c) Banda Ku FSS, y d) Banda Ka.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una aplicación web, de uso libre, denominada PluvioBol, que permite obtener estadísticas de atenuación por lluvia para toda Bolivia, en enlaces satelitales con el satélite TKSat-1. Potencialmente, puede también ser usada en otras zonas donde este satélite tiene también cobertura, como zonas de Perú, Ecuador o Colombia. La aplicación pretende ser de utilidad en el ámbito académico, para una mejor enseñanza de Comunicaciones Satelitales, así como a ingenieros practicantes que requieran conocer esta información.

Para poder obtener las estadísticas requeridas, PluvioBol implementa últimas recomendaciones de la UIT en el ámbito de la propagación en enlaces satelitales. El punto de partida es la Recomendación UIT-R P.618, a partir de la cual se calculan varios otros parámetros intermedios utilizando las Recomendaciones P.837, P.838, P.839, P.1144 y P.1510.

Los resultados que se obtienen se presentan en forma de la CCDF de atenuación por lluvia. Los valores obtenidos pueden servir como datos de entrada para realizar balances de enlaces más completos, tomando en cuenta además la componente de ruido, además de las características de transmisión y recepción, como la PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) y la figura de mérito G/T. Un resultado intermedio de utilidad que calcula la aplicación, es la intensidad de lluvia $R_{0.01}$, parámetro muy utilizado en propagación radioeléctrica, no sólo en enlaces inclinados, sino también con aplicación en radioenlaces terrestres.

Como perspectivas futuras, el uso de PluvioBol se introducirá en la asignatura de Comunicaciones Satelitales para obtener la atenuación por lluvia para balances de enlace. Así mismo, será necesario realizar una evaluación de la aplicación por parte de los estudiantes y otros académicos.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Alex Villazón (UPB) por su colaboración y consejos en el desarrollo web de PluvioBol y a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) por proporcionar acceso gratuito a las Recomendaciones utilizadas en este trabajo.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Agence du Numérique, "Les technologies de l'Internet fixe | Agence du numérique." https://www.amenagement-numerique.gouv.fr/fr/technologies-linternet-fixe (accessed May 25, 2020).
[2] H. Fenech, A. Tomatis, S. Amos, V. Soumpholphakdy, and D. Serrano-Velarde, "Future High Throughput Satellite systems," in *2012 IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL)*, Oct. 2012, pp. 1–7, doi: 10.1109/ESTEL.2012.6400117.
[3] H. Fenech, S. Amos, A. Hirsch, and V. Soumpholphakdy, "VHTS systems: Requirements and evolution," in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Mar. 2017, pp. 2409–2412, doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928175.
[4] "Internet par satellite | Nordnet," *Nordnet, la boutique des solutions internet*. https://www.nordnet.com/connexion-internet/internet-satellite (accessed May 25, 2020).
[5] L. Luini, "Analysis tool for radio link budget," *Analysis tool for radio link budget*. http://luini.deib.polimi.it/docs/CampiEM/LinkBudget.zip (accessed May 25, 2020).
[6] "Satmaster Satellite Link Budget Software." https://www.arrowe.com/ (accessed May 25, 2020).
[7] Universidad Privada Boliviana, "Cálculo de estadísticas de atenuación por lluvia para el satélite TKSat-1." http://www.upb.edu/es/calculo-estadisticas-atenuacion-lluvia-satelite-TKSat-1 (accessed May 25, 2020).
[8] Recommendation P.1511-2, "Topography for Earth-to-space propagation modelling." ITU, Aug. 2019.
[9] "Radiowave propagation." https://www.itu.int/rec/R-REC-P/en (accessed May 26, 2020).
[10] Recommendation P.618-13, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems." ITU, Dec. 2017.
[11] G. Maral, M. Bousquet, and Z. Sun, *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*, Edición: 6. Hoboken, N.J: Wiley, 2020.
[12] Recommendation P.839-4, "Rain height model for prediction methods." ITU, Sep. 2013.
[13] Recommendation P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods." ITU, Mar. 2005.
[14] Recommendation P.837-7, "Characteristics of precipitation for propagation modelling." ITU, Jun. 2017.
[15] G. Siles and D. Chirinos, "Estimación de intensidad de lluvia para estudios de propagación radioeléctrica en Bolivia," *Investigación&Desarrollo*, vol. 18, no. 1, pp. 69–79, 2018.
[16] Recommendation P.1144-10, "Guide to the application of the propagation methods of Radiocommunication Study Group 3." ITU, Aug. 2019.
[17] Recommendation P.1510-1, "Mean surface temperature." ITU, Jun. 2017.
[18] Climate-Data, "Clima Chipiriri: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Chipiriri - Climate-Data.org." https://es.climate-data.org/america-del-sur/bolivia/cochabamba/chipiriri-719963/ (accessed May 30, 2020).