

Estudio de los factores atmosféricos que influyen en la degradación de calidad de un enlace satelital

Rossio Nathaly Oros Molina

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana San Pablo, calle M. Marquez s/n esq. Parque J. Trigo, Tupuraya, Cochabamba

e-mail: nathaly_oros@hotmail.com

Resumen

Existen varias formas de interferencia en las comunicaciones satelitales, una de ellas es el efecto que producen los cambios atmosféricos en la calidad de las comunicaciones. En este estudio, se determinó el grado de influencia de los factores atmosféricos en un enlace satelital ubicado sobre la ciudad de Cochabamba, empleando modelos de atenuación existentes. El método aplicado consiste de cinco fases diferenciadas, mismas que permitieron definir los requerimientos del estudio, elegir los modelos de atenuación para aplicar a la ciudad de Cochabamba, para ello fue necesario desarrollar una herramienta que satisfaga los requerimientos y facilite la obtención de los resultados deseados. Los resultados indican que los fenómenos atmosféricos tienen bajo efecto de atenuación sobre las señales de comunicación satelital, en la banda de 4 GHz, que se propagan por la atmósfera.

Palabras clave: Atmósfera, Cochabamba, señal, modelo de propagación, atenuación, enlace satelital.

1 Introducción

La atmósfera es una capa gaseosa de aproximadamente 10.000 km de espesor que rodea al planeta Tierra, en la que se producen todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan al planeta. La atmósfera se divide en 5 capas importantes: troposfera, estratósfera, mesosfera, termosfera y exosfera. La troposfera es la capa inferior (la más próxima a la superficie terrestre) de la atmósfera. En esta capa suceden los fenómenos que componen lo que llamamos *clima*. Estos fenómenos son constantes y, dependiendo de su intensidad, afectan a las telecomunicaciones causando deterioro en las transmisiones vía satélite.

La importancia de la comunicación satelital radica en que casi todo el globo terráqueo puede ser cubierto y se adapta a cualquier aplicación de voz, datos, video, etc. La calidad de un enlace satelital es un aspecto muy importante a ser considerado. Para buscar formas de mejorar la calidad de un enlace es necesario estudiar los factores atmosféricos que afectan a la señal satelital.

El objetivo principal del estudio es determinar el grado de influencia de los factores atmosféricos sobre un enlace satelital, empleando modelos de atenuación existentes para mostrar el comportamiento de las señales.

2 Modelos de atenuación e implementación

La atenuación de una señal que se propaga por la atmósfera se debe a la presencia de oxígeno, vapor de agua, nubes, lluvia, dióxido de carbono, nieve, granizo, niebla. También existen: atenuación en la capa fundente (*melting layer attenuation*), atenuación por centelleos troposféricos y desvanecimiento por ángulo bajo (*low angle-fading*)

Para mostrar el comportamiento de las señales satelitales en Cochabamba, se tomaron en cuenta varios modelos de atenuación, según las características de cada uno y las características meteorológicas disponibles en la región, se seleccionaron seis modelos y se desarrolló una aplicación en MATLAB que facilita el análisis de los resultados.

La aplicación implementa los modelos de atenuación que muestran el comportamiento de señales satelitales; mediante una interfaz gráfica se tiene acceso a los seis modelos seleccionados (ver la figura 1).

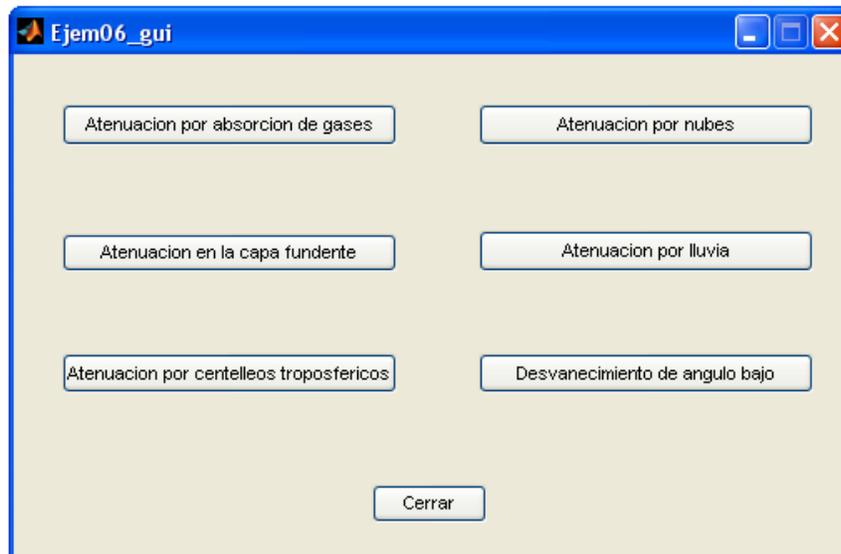


Figura 1: Menú que despliega los accesos a los seis modelos de atenuación.

Cada modelo implementado, cuenta con una ventana que despliega los resultados en forma gráfica. La figura 2 muestra la pantalla que permite ver el comportamiento de las señales, donde:

- a. En esta sección se obtienen resultados que indican los valores de atenuación para determinadas frecuencias.
- b. Los parámetros de entrada se ingresan por el teclado.
- c, d, e y f. Son los espacios donde se insertan los datos requeridos.

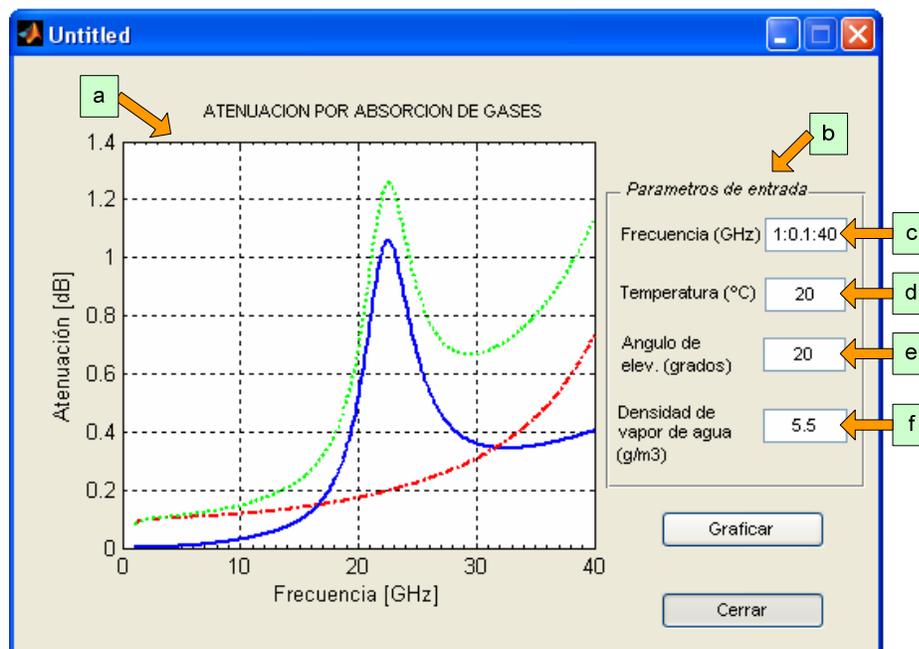


Figura 2: Herramienta que muestra los valores de atenuación calculados.

2.1 Atenuación por absorción de gases

Los mayores contribuyentes para la atenuación gaseosa son el oxígeno y el vapor de agua, la absorción gaseosa puede ser un efecto significativo en un diseño de sistema de comunicación satelital dependiendo de la frecuencia específica de operación [4].

El método y procedimiento para determinar la atenuación por absorción de gases (oxígeno y vapor de agua) está dado por la recomendación ITU-R-P.618 [5].

La fórmula general para realizar el cálculo de la atenuación está dada por:

$$A_t = A_w + A_o \quad [dB] \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde A_w es la atenuación por vapor de agua y A_o es la atenuación provocada por el oxígeno.

2.2 Atenuación por nubes

Las nubes se encuentran constantemente en la tropósfera. La atenuación por nubes se produce cuando las señales satelitales viajan a través de ellas. Existen varios modelos de atenuación por nube, que fueron desarrollados por Gun and East, Liebe, Staelin, Slobin, y Altshuler (citados por [3]).

Para el cálculo de atenuación por nubes los modelos elegidos e implementados en la aplicación son el modelo de Liebe y el modelo de Staelin, ya que ambos muestran casi el mismo comportamiento [3].

2.2.1 Modelo de Liebe (*Liebe model*)

Liebe creó el modelo en base a la aproximación de Rayleigh sobre la teoría de desvanecimiento de Mie en conjunto con un modelo de relajación que considera la permitividad del agua. El método para el cálculo de la atenuación por nubes según el modelo de Liebe se encuentra detallado en el artículo de Gerace [3].

2.2.2 Modelo de Staelin (*Staelin Model*)

El presente modelo deriva de la aproximación de Rayleigh tal como lo hace el modelo de Liebe, el método para el cálculo de la atenuación según el modelo de Staelin también se encuentra detallada en el artículo de Gerace. La fórmula general de atenuación por nubes es dada por:

$$A = \frac{1}{3} \cdot \alpha \cdot H_{ci} \quad [dB] \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

α : Atenuación específica, en dB/km.

H_{ci} : Variable de extensión vertical, en km. Depende del tipo de nube, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de nube y sus variables.

Tipo de nube	Extensión vertical (km) H_c	Extensión horizontal (km) L_c	Contenido de agua (g/m ³)
<i>Cumulonimbus</i>	3,0	4,0	1,0
<i>Cumulus</i>	2,0	3,0	0,6
<i>Nimbostratus</i>	0,8	10,0	1,0
<i>Stratus</i>	0,6	10,0	0,4

2.3 Atenuación por lluvia

Debido a que la lluvia es el factor más perjudicial en las comunicaciones satelitales, se estudiaron sus efectos. Las gotas de agua dispersas en la atmósfera interactúan con la radiación, causando atenuación. Según Gagliard, los efectos de la lluvia se vuelven más severos cuando las longitudes de onda se aproximan al tamaño de la gota de agua. Se puede decir que mientras más alta sea la frecuencia de operación, mayor será la atenuación.

El dato de la tasa de caída de la lluvia R, puede ser obtenido de la institución meteorológica local y también se pueden tomar en cuenta los datos de la tabla 2, basados en la zonificación de regiones climáticas del globo terráqueo que se muestra en la figura 3 [1].

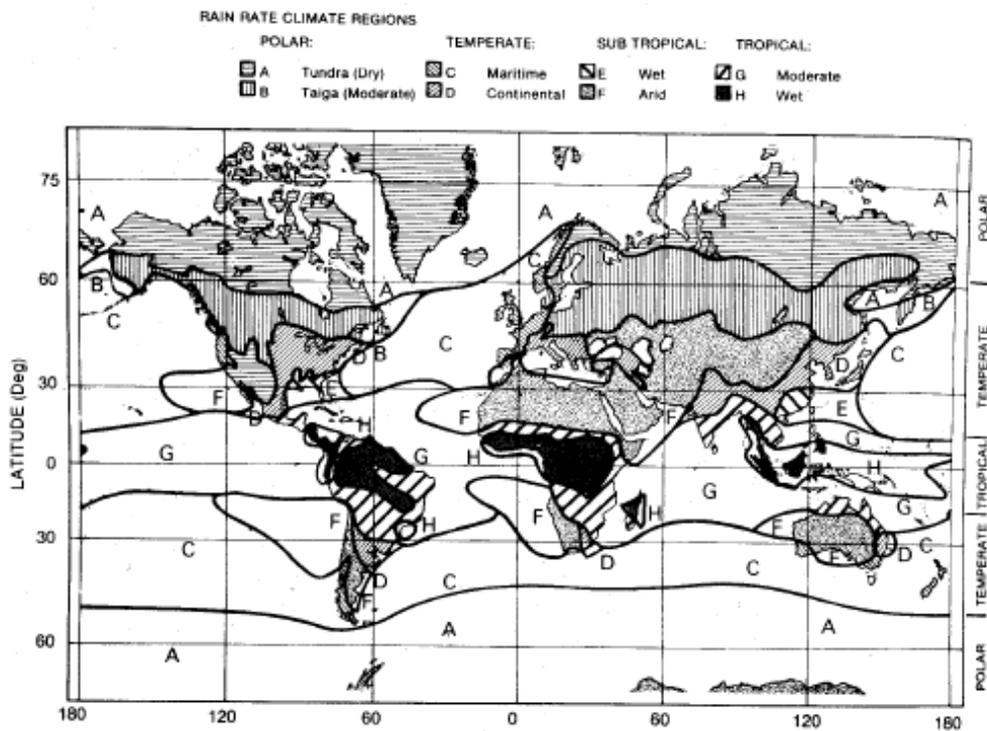


Figura 3: Regiones climáticas - NASA.

Tabla 2. Tasas de lluvia.

Porcentaje del año	Regiones Climáticas de la lluvia										Minutos por año	Horas por año
	A	B	C	D ₁	D ₂	D ₃	E	F	G	H		
0,001	28	54	80	90	102	127	164	66	129	251	5,3	0,09
0,002	24	40	62	72	86	107	144	51	109	220	10,5	0,18

0,005	19	26	41	50	64	81	117	34	85	178	26	0,44
0,01	15	19	28	37	49	63	98	23	67	147	53	0,88
0,02	12	14	18	27	35	48	77	14	51	115	105	1,75
0,05	8	9,5	11	16	22	31	52	8,0	33	77	263	4,38
0,1	6,5	6,8	7,2	11	15	22	35	5,5	22	51	526	8,77
0,2	4,0	4,8	4,8	7,5	9,5	14	21	3,8	14	31	1052	17,5
0,5	2,5	2,7	2,8	4,0	5,2	7,0	8,5	2,4	7,0	13	2630	43,8
1,0	1,7	1,8	1,9	2,2	3,0	4,0	4,0	1,7	3,7	6,4	5260	87,66
2,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,8	2,5	2,0	1,1	1,6	2,8	10520	175,3

Los parámetros más importantes para realizar el cálculo de la atenuación por lluvia se muestran en la figura 4.

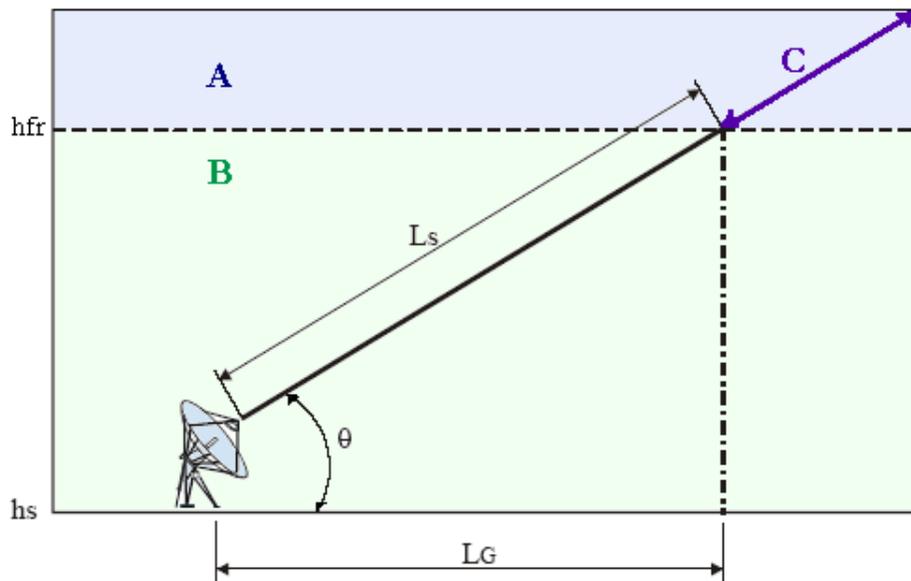


Figura 4: Parámetros de entrada para el cálculo de atenuación por lluvia.

Donde:

A: Precipitación congelada,

B: Precipitación líquida,

C: Ruta Tierra-Espacio,

h_{fr} : Altura efectiva de la lluvia,

b_s : Altitud de la estación terrena,

L_s : Longitud de ruta oblicua (*slant-path length*),

L_g : Proyección horizontal de la longitud de ruta oblicua, y

θ : Ángulo de elevación.

El modelo de atenuación por lluvia empleado en este estudio proviene de la recomendación ITU-R P.618-8 [5]. La fórmula general de atenuación por lluvia está dada por:

$$A_{0,01} = \gamma \cdot L_e \quad [dB] \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:

γ : Atenuación específica de la lluvia [dB/km] y

L_e : Longitud de ruta efectiva a través de la lluvia.

2.4 Atenuación en la capa fundente

La capa fundente es la región donde las partículas de nieve y hielo se convierten en gotas de lluvia, tiene una temperatura de 0 °C. El grosor de la capa fundente, D_m , se encuentra en el orden de 500 m. La atenuación producida por el derretimiento de partículas de hielo, puede alcanzar valores significativos, particularmente si se trata de enlaces que tienen antenas con un bajo ángulo de elevación [2]. La fórmula general de atenuación en la capa fundente está dada por:

$$A_m = \alpha_m \cdot L_m \quad [dB] \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

α_m : Atenuación específica [dB/km] y

L_m : Longitud de trayecto a través de la capa de fusión.

2.5 Centelleos troposféricos

El centelleo troposférico, es producido por las variaciones en pequeña escala del índice de refracción en la troposfera, ocasionando que las señales satelitales lleguen al receptor por medio de varios trayectos. En general el centelleo se encuentra en función de la estación, clima local, frecuencia y ángulo de elevación.

La técnica empleada en este estudio para mostrar el efecto de los centelleos troposféricos proviene de la recomendación ITU-R P.618-8 [5].

2.6 Desvanecimiento por ángulo bajo

Para ángulos de elevación por debajo de los 5°, se producen cambios de niveles de energía debido a irregularidades en gran escala del índice de refracción de la troposfera y a los cambios horizontales producidos por los vientos ligeros [5].

Se realiza un ajuste a la desviación estándar del centelleo troposférico de la recomendación ITU-R P. 618-8 [5] para proceder con el cálculo de desvanecimiento por ángulo bajo.

$$\sigma_t = \sigma + \sigma_0 \cdot (e^{a(5-\theta)} - 1) \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

σ : Desviación estándar del centelleo troposférico calculada con la ecuación 49, y

σ_0 : Desviación estándar de centelleo troposférico para una frecuencia de 4 GHz, un diámetro de antena de 4 m y a es una constante empírica igual a 0,11.

3 Resultados y discusión

3.1 Descripción del enlace satelital sometido a estudio

El enlace satelital al que se aplicó el estudio, pertenece a la empresa de telecomunicaciones COMTECO. El mismo cuenta con las características indicadas en la Tabla 3.

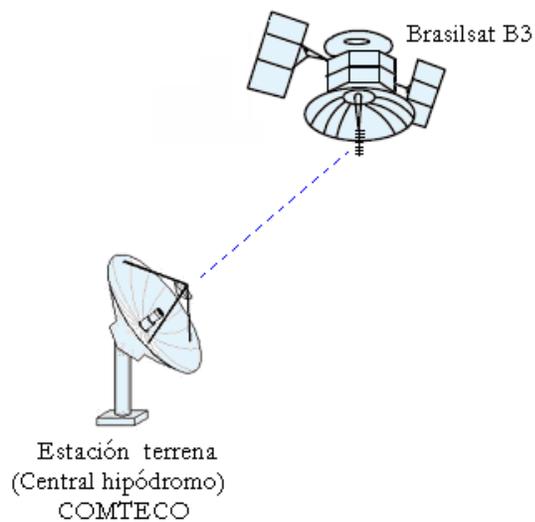


Figura 5: Enlace satelital sometido a estudio.

Debido a la ubicación de la estación terrena receptora, los datos empleados fueron extraídos de la estación meteorológica Sarco, estación que pertenece a SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología).

A continuación se muestran los resultados obtenidos del estudio realizado. Los resultados se encuentran detallados por año y por estación para cada modelo de atenuación.

Tabla 3. Datos generales de la antena receptora del enlace y del satélite con el que trabaja.

Datos de la antena	
Diámetro del plato	7 [m]
Eficiencia de la antena	0,5
Polarización	Horizontal
Ángulo de elevación	61,06°
Longitud	66,17° O
Latitud	17,38° S
Altitud	2587 m.s.n.m.
Potencia ideal	50 [dB]
Satélite con el que trabaja	BRASILSAT B3
Datos del satélite BRASILSAT B3	
Longitud	84,07° O

3.2 Valores de atenuación por absorción de gases; periodo 2003-2007

Los valores más altos se dan en verano debido a la mayor cantidad de humedad relativa y densidad de vapor de agua en el ambiente. El valor de atenuación máximo obtenido en el periodo de 2003-2007 fue de 0,0470 [dB] en verano del año 2003.

Tabla 4. Atenuación por absorción de gases; resumen de resultados.

Frecuencia de bajada (4 GHz)				
Año	Atenuación [dB]			
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
2003	0,0470	0,0469	0,0467	0,0452
2004	0,0441	***	***	***
2005	0,0458	0,0450	0,0445	0,0431
2006	0,0450	0,0448	0,0446	0,0422
2007	0,0441	0,0439	0,0440	0,0421

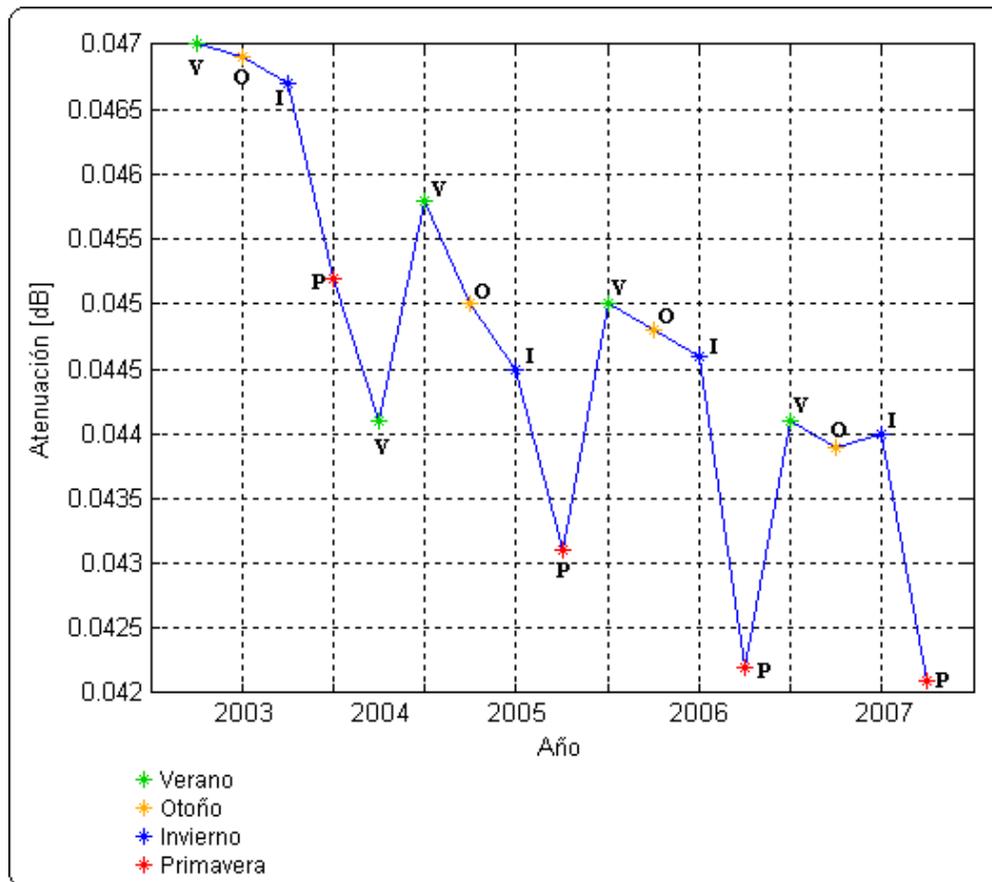


Figura 6: Variación de atenuación en el periodo (2003–2007)

3.3 Valores de atenuación por nubes; periodo 2003-2007.

Los valores altos de atenuación en este periodo también son debido a los valores altos de humedad y densidad de vapor de agua y un parámetro adicional que es el tipo de nube presente en el ambiente. El valor de atenuación máximo obtenido en el periodo de 2003-2007 fue de 0,1814 [dB] en verano del año 2003.

Tabla 5. Atenuación por nubes. Tabla resumen de resultados.

Frecuencia de bajada (4 GHz)				
Año	Atenuación [dB]			
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
2003	0,1814	0,1795	0,1742	0,1647
2004	0,1480	***	***	***
2005	0,1645	0,1587	0,1505	0,1308
2006	0,1576	0,1516	0,1790	0,1221
2007	0,1428	0,1403	0,1444	0,1208

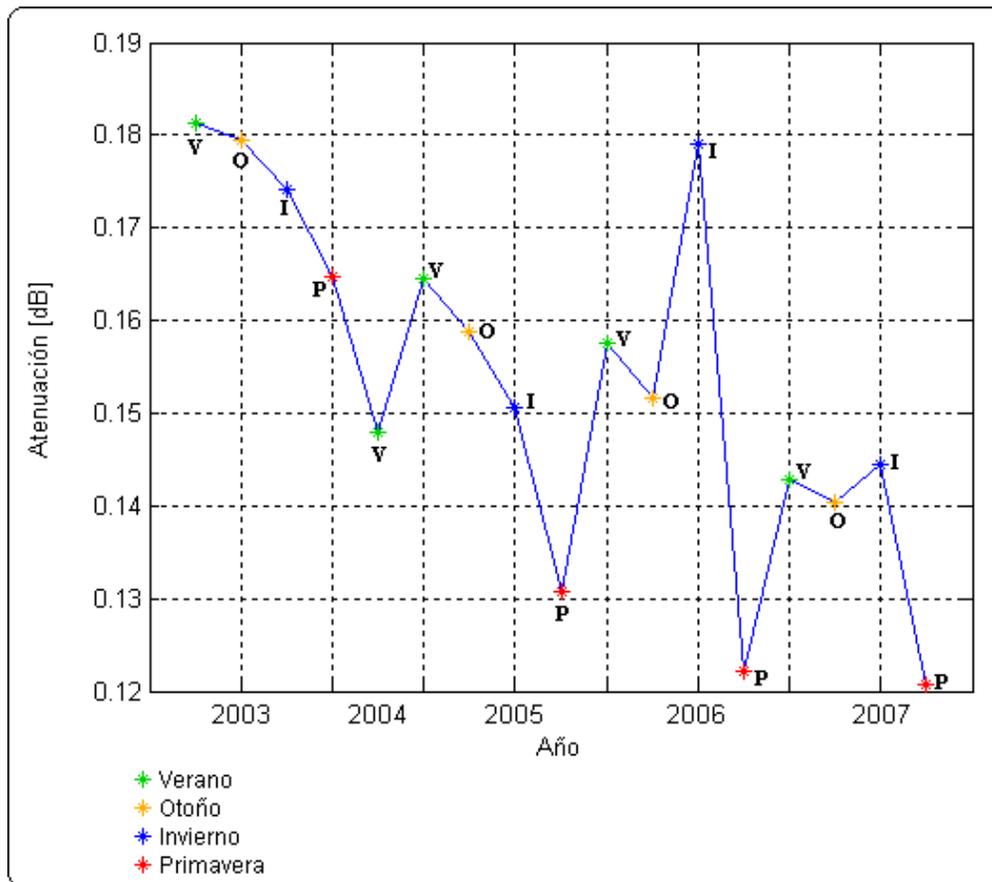


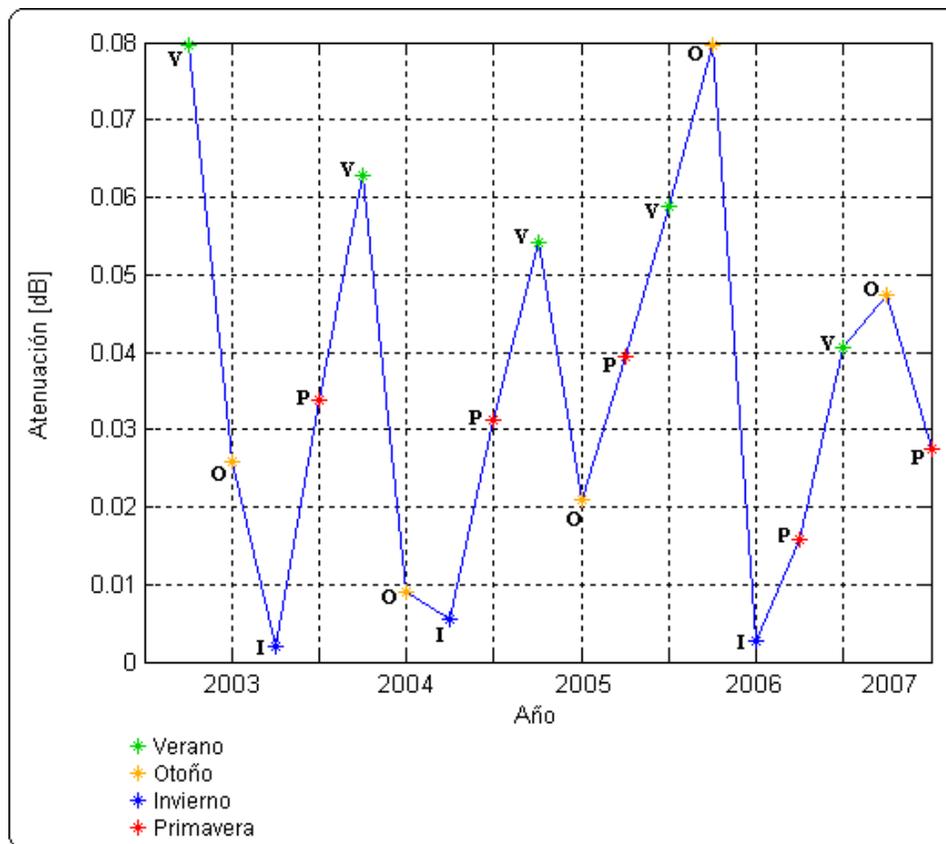
Figura 7: Variación de atenuación en el periodo 2003–2007.

4.4. Valores de atenuación por lluvia; periodo 2003-2007.

Los valores altos de atenuación en este periodo se deben a los valores altos de la tasa de caída de la lluvia que es el parámetro principal para realizar el cálculo. El valor de atenuación máximo obtenido en el periodo de 2003-2007 fue de 0,0797 [dB] en verano del año 2003 y en otoño del año 2006.

Tabla 6. Atenuación por lluvia. Tabla resumen de resultados.

Año	Frecuencia de bajada (4 GHz)			
	Atenuación [dB]			
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
2003	0,0797	0,0258	0,0021	0,0337
2004	0,0629	0,0090	0,0055	0,0313
2005	0,0542	0,0209	***	0,0395
2006	0,0589	0,0797	0,0027	0,0159
2007	0,0405	0,0474	***	0,0274

**Figura 8:** Variación de atenuación en el periodo 2003–2007.

4.5. Valores de atenuación en la capa fundente; periodo 2003-2007.

Los valores altos de atenuación en este periodo se deben a los valores altos de la tasa de caída de la lluvia que al igual que en el modelo de atenuación por lluvia, es un parámetro importante para realizar el cálculo.

Tabla 7. Atenuación en la capa fundente; resumen de resultados.

Frecuencia de bajada (4 GHz)				
Año	Atenuación [dB]			
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
2003	0,6548	0,2114	0,0243	0,2724
2004	0,5105	0,0819	0,0538	0,2540
2005	0,4370	0,1737	***	0,3189
2006	0,4768	0,6548	0,0296	0,1353
2007	0,3267	0,3816	***	0,2234

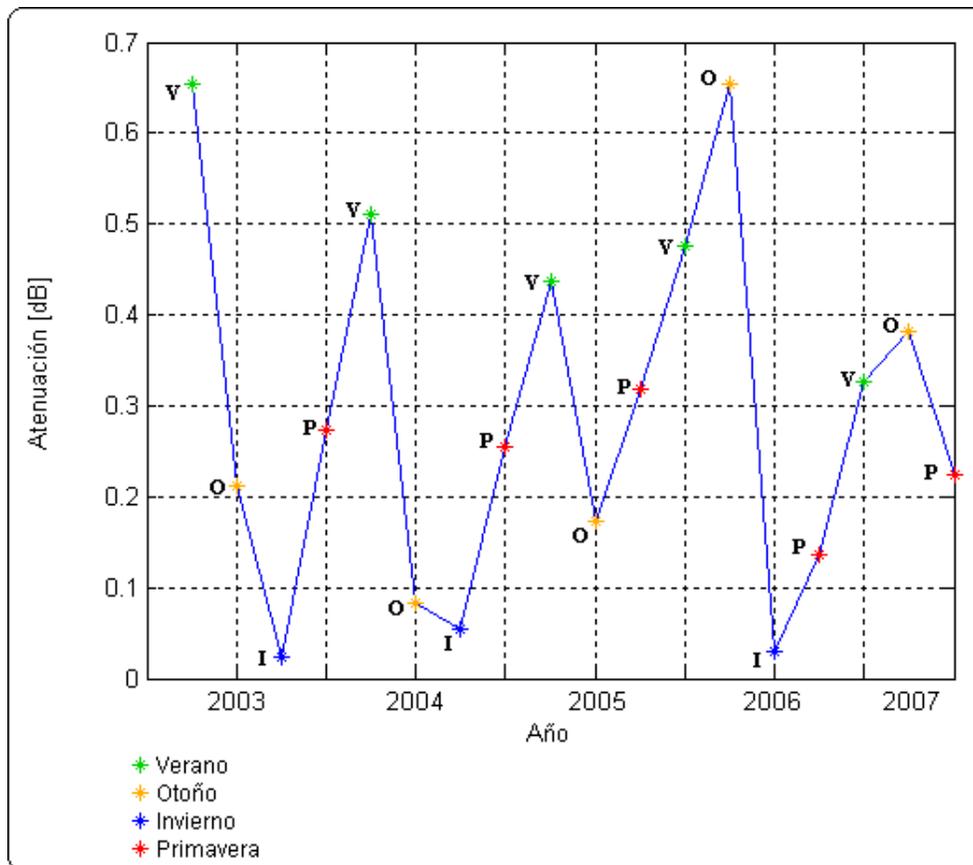


Figura 9: Variación de atenuación en el periodo 2003–2007.

El valor de atenuación máximo obtenido en el periodo de 2003-2007 fue de 0,6548 [dB] en verano del año 2003 y en otoño del año 2006.

3.4 Valores de atenuación por centelleos troposféricos; periodo 2003-2007.

Los valores altos de atenuación en este periodo se deben a los valores de temperatura y humedad relativa máxima presentes en el ambiente. El valor de atenuación máximo obtenido en el periodo de 2003-2007 fue de 0,0428 [dB] en verano y otoño del año 2003.

Tabla 8. Resultados de atenuación por centelleos troposféricos.

Frecuencia de bajada (4 GHz)				
Año	Atenuación [dB]			
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
2003	0,0428	0,0428	0,0427	0,0427
2004	0,0425	***	***	***
2005	0,0426	0,0426	0,0425	0,0423
2006	0,0426	0,0425	0,0425	0,0422
2007	0,0424	0,0424	0,0425	0,0423

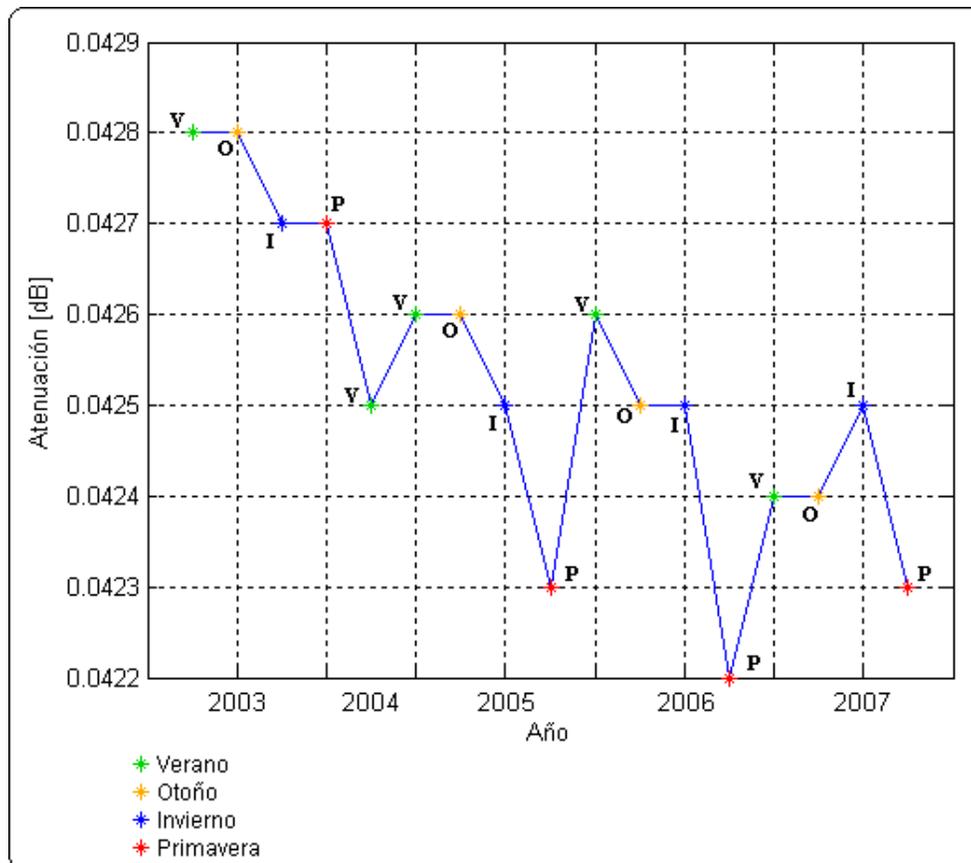


Figura 10: Variación de atenuación en el periodo 2003-2007.

La tabla 9 muestra un resumen de los resultados del estudio, detallando el porcentaje de efecto de los fenómenos atmosféricos sobre el enlace satelital elegido.

Tabla 9. Atenuación por centelleos troposféricos; resumen de resultados

Frecuencia de bajada (4 GHz)				
Año	Atenuación [%]			
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
2003	2,01 %	1,01 %	0,58 %	1,12 %
2004	1,62 %	0,18 %	0,12 %	0,57 %
2005	1,49 %	0,88 %	0,48 %	0,95 %
2006	1,56 %	1,95 %	0,60 %	0,72 %
2007	1,19 %	1,31 %	0,46 %	0,91 %

4 Conclusiones

El estudio muestra que el comportamiento de señales satelitales de un enlace satelital ubicado sobre la ciudad de Cochabamba fue afectado por fenómenos troposféricos en un periodo de 5 años.

Para el estudio se desarrolló una aplicación que implementó seis modelos que toman en cuenta características meteorológicas disponibles en Cochabamba.

Los fenómenos atmosféricos tienen bajo efecto sobre los enlaces satelitales al haberse producido atenuaciones por debajo del 2%.

Referencias

- [1] BARROS CARDOZO DA SILVA, Luciano; CHAMON, Marco Antonio. 2004 *Cálculo de enlace para sistemas de comunicación digital via satélite*. INPE, São José dos Campos.
- [2] DISSANAYAKE, Asoka; ALLNUT, Jeremy; HAIDARA, Fatim. 2002 “A Prediction Model that Combines Rain Attenuation and Other Propagation Impairments Along Earth-Satellite Paths”. *Online Journal of Space Communication*.
- [3] GERACE, G. C.; SMITH, E. K. 1990 “A comparison of cloud models”. IEEE, Colorado.
- [4] IPPOLITO Louis J. 1989 *Propagation Effects Handbook for satellite systems design*. NASA, Baltimore.
- [5] RECOMMENDATION ITU-R P.618-8. 1986-2003. *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*.