



PRONÓSTICO DE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA POR LLUVIA PARA SAN ANTONIO DEL TÁCHIRA DEL 2011 AL 2013

(Forecast of tropospheric radio attenuation by rain for San Antonio del Táchira from 2011 to 2013)

Recibido: 14/11/2012 Aceptado: 18/11/2012

García, Gustavo

Universidad Dr. Rafael Beloso Chacín, Venezuela
gegarcia@urbe.edu.ve

Durante Rincón, Carlos Alberto

Universidad del Zulia, Venezuela
durin@cantv.net

Montoya, César

Universidad Dr. Rafael Beloso Chacín, Venezuela
montoyamedero@gmail.com

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito pronosticar la radioatenuación troposférica por lluvia para San Antonio del Táchira del 2011 al 2013, utilizando los datos de lluvia para periodos anuales obtenidos del método de pronóstico Promedio Móvil Integrado de Auto Regresión (ARIMA) para series temporales. La investigación es predictiva y ex post facto, se considera según su diseño no experimental y longitudinal. Está compuesta por cuatro (4) fases de procedimiento, iniciando por la recopilación de los datos de lluvia a través del departamento de Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, seguido por la aplicación y análisis del método de pronóstico ARIMA para series temporales mediante el cual se determina la intensidad de lluvia pronosticada en mm/h, luego se procede a comparar los valores pronosticados con los valores de lluvia reales a fin de ajustar el pronóstico del 2011 al 2013, y finalmente se determina la radioatenuación troposférica mensual en los tres años estudiados. El resultado obtenido fue el pronóstico de la radioatenuación troposférica para San Antonio del Táchira desde el mes de enero del 2011 hasta diciembre del 2013. Concluyendo que la tendencia del pronóstico para el año 2011 difiere en relación a la de los años 2012 y 2013, en el primer año los meses con mayor radioatenuación son febrero, mayo, junio y diciembre, en los otros dos son abril, noviembre y diciembre. Se recomienda a empresas y organismos prestadores del servicio de telecomunicaciones tomar las previsiones necesarias, teniendo en cuenta este fenómeno meteorológico en la localidad de San Antonio del Táchira, a fin de disminuir los efectos que puedan tener sobre las ondas electromagnéticas de los radioenlaces de la citada región.

Palabras clave: Lluvia, Tropósfera, Radioatenuación, Pronóstico, ARIMA.



ABSTRACT

The purpose of this investigation was to predict the tropospheric radio attenuation by rain for San Antonio del Táchira from 2011 to 2013, using rainfall data for annual periods derived from the forecasting method Integrated Moving Average Auto Regression (ARIMA) for time series. The investigation is predictive and ex post facto, with a non-experimental and longitudinal design. It is composed by four (4) phases, initiating with the rainfall data recompilation through the department of Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, followed by the application and analysis of the ARIMA method for temporary series, by means of which the intensity of predicted rain in mm/h is determined, this predicted values are compared with the real rain values to adjust the forecast from 2011 to 2013 to finally determine the monthly tropospheric radio attenuation for the three studied years. The obtained result was the monthly forecast for the tropospheric radio attenuation for San Antonio del Táchira from January 2011 to December 2013. As a conclusion, the forecast for 2011 differs from those for 2012 and 2013, for the first year the months with higher radio attenuation are February, May, June and December, for the other two years are April, November and December. It is recommended for companies and telecommunications services providers to take the necessary precautions, taking into account this weather phenomenon in San Antonio del Táchira, in order to reduce the possible impact on the electromagnetic waves of radio links of that region.

Keywords: Rain, Troposphere, Radio attenuation, Forecast, ARIMA.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la expansión de las telecomunicaciones ha significado grandes cambios en todo el mundo, logrando tener un alto nivel de aceptabilidad entre los usuarios. Este fenómeno se aprecia en cualquier rincón del planeta, prueba de ello es el avance que ha tenido la misma en los últimos años. En las telecomunicaciones se realiza la transmisión de señales a través de una distancia para un propósito de comunicación, este proceso involucra el envío de ondas electromagnéticas mediante el uso de transmisores electrónicos. Las señales electromagnéticas pueden ser afectadas por los fenómenos atmosféricos tales como las precipitaciones en forma de lluvia.

En cuanto a los enlaces troposféricos, la lluvia en intensidades por encima de los 2 mm/hr, pueden atenuar significativamente las señales electromagnéticas. La atenuación por lluvia puede producirse tanto en el enlace de subida como en el de bajada, generando problemas y pérdidas considerables en las ganancias debido a las desconexiones temporales. No necesariamente tiene que estar lloviendo en cierta localidad para que la señal se vea afectada por la atenuación por lluvia, pues dicha señal pudo haber pasado a través de algún tipo de precipitación a kilómetros de distancia, sobre todo si la antena tiene un ángulo de elevación muy bajo.

En esta investigación, el procedimiento llevado a cabo comienza con la recolección de los datos históricos de datos de lluvia para la localidad de San Antonio del Táchira desde el 2004 hasta el 2011, proporcionados por la Fuerza Aérea Venezolana, siguiendo con la aplicación y los análisis del método de pronóstico y su posterior comparación a fin de

determinar el ajuste del modelo a los datos proporcionados por la Fuerza Aérea Venezolana. Finalmente, se realiza la aplicación del cálculo de la radioatenuación partiendo de las intensidades de lluvia de los 3 (tres) años pronosticados, del 2011 al 2013. De igual manera, se detallan las bases teóricas que describen y explican los fenómenos climatológicos y sus efectos en las telecomunicaciones, siguiendo con una breve explicación del procedimiento llevado a cabo para obtener los resultados del pronóstico y la radioatenuación. Finalmente, se discuten los resultados y se presentan las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

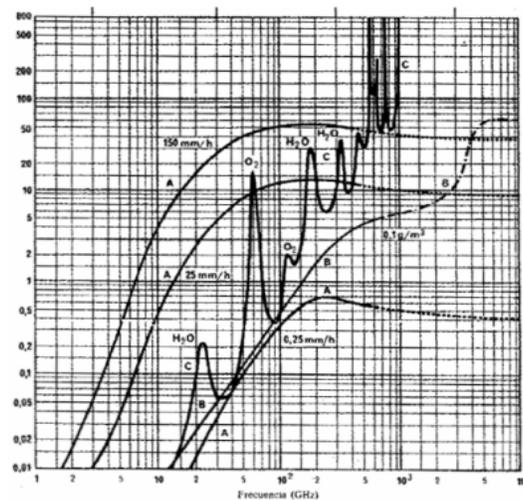
BASES TEÓRICAS

EFFECTO DE LA TROPÓSFERA Y LA RADIOATENUACIÓN

Según Cardama y otros (2004), la absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por los hidrometeoros son las principales causas de la Atenuación atmosférica. En la Figura 1 se muestra la atenuación específica (dB/km) en función de la frecuencia para un trayecto próximo a la superficie terrestre. La atenuación por absorción molecular se debe principalmente a las moléculas de oxígeno y vapor de agua. Para frecuencias por debajo de 10GHz es prácticamente despreciable, mientras que a frecuencias superiores presenta un comportamiento creciente con la frecuencia y la aparición de rayas de atenuación asociadas a las frecuencias de resonancias de las moléculas.

A partir de los 22,3 GHz y 60 GHz aparecen los primeros indicadores asociados al vapor de agua y al oxígeno respectivamente. El indicador correspondiente al oxígeno es especialmente importante por cuanto el nivel del mar presenta atenuaciones del orden de 15 dB/Km, lo que imposibilita las comunicaciones a larga distancia a esta frecuencia. A frecuencias superiores existen otros picos de absorción.

**Figura 1. Atenuación específica para un trayecto próximo a la superficie de la tierra.
A: Lluvia, B: Niebla, C: Componentes gaseosos**



Fuente: Cardama y otros (2004)

Por otra parte, en la atenuación por hidrometeoros, es primordialmente importante la lluvia, por cuanto la niebla, nieve y el granizo producen atenuaciones en las bandas de SHF (Super High Frequency) e inferiores. La atenuación por lluvia depende de la intensidad y de factores tales como el tipo de lluvia, tamaño, cantidad y velocidad de las gotas de agua. La atenuación total producida por la lluvia se obtiene multiplicando la atenuación específica por la longitud de la celda de lluvia. Para aplicaciones prácticas la atenuación específica de la lluvia, puede calcularse como:

$$\gamma_R = KR^\alpha \text{ (dB/Km)} \quad (1)$$

donde R es la intensidad de lluvia en mm/hr y K y α son funciones de la frecuencia (difieren para polarización vertical y horizontal). La atenuación para la polarización vertical es ligeramente menor a la horizontal, por cuanto las gotas de lluvia no son esféricas sino que por efectos del rozamiento del aire tienden a achatarse formando esferoides con el eje vertical menor al horizontal. La relación entre la atenuación específica oscila entre 1,05 y 1,35 dB para cada polarización en el margen de frecuencias entre 10 y 80 GHz. En el cuadro 1 se muestra el valor de los parámetros k y α para distintas frecuencias y para cada polarización.

En la Figura 2 se representa la ecuación (1) suponiendo que las gotas de lluvia son esféricas. Para frecuencias inferiores a 100 GHz la atenuación aumenta al aumentar la frecuencia, hasta alcanzar un máximo a partir del cual disminuye levemente manteniendo un valor constante a frecuencias ópticas.

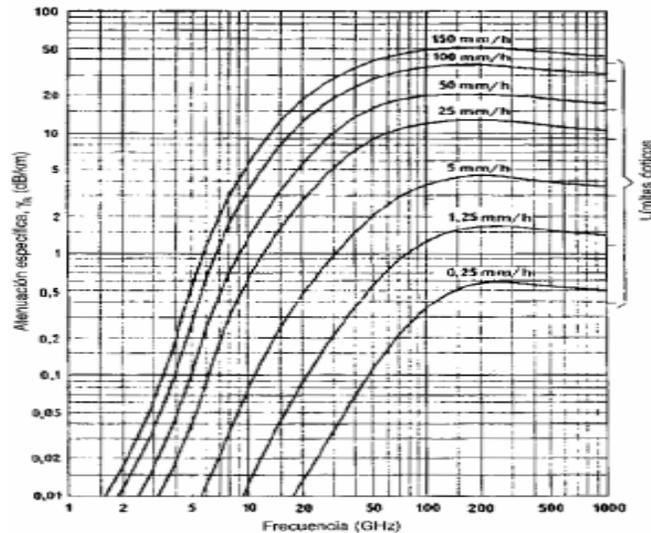
Cuadro 1. Coeficientes para estimar la atenuación específica de lluvia

FRECUENCIA (GHz)	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
30	0,187	0,167	1,021	1,000
40	0,350	0,310	0,939	0,929

Fuente: Cardama y otros (2004)

Para realizar la predicción de los efectos de la lluvia persiste el problema de conocer las características de las lluvias en la zona en la cual se realiza el enlace. Es fundamental en estos casos el disponer de los datos de observación meteorológica con el propósito de cuantificar de forma probabilística las diferentes intensidades de lluvia, para ello se requiere de series de observación largas las cuales permitan garantizar la fiabilidad estadística de los datos.

Figura 2. Atenuación específica debida a la lluvia



Fuente: Cardama y otros (200)

En los trayectos inclinados, o trayectos tierra-espacio, los valores de atenuación específica por absorción molecular mostrados en la Figura 1 no son válidos, por cuanto en función de la altura disminuyen las concentraciones de gases, y por consiguiente, la atenuación. El contenido de vapor de agua en la atmósfera disminuye considerablemente en función de la altura mientras que el contenido de oxígeno lo hace de forma más gradual.

ATENUACIÓN

Según Tomasi (2003), el espacio libre es el vacío, por lo que no hay pérdida de energía al propagarse una onda por él. Sin embargo, cuando las ondas se propagan por el espacio vacío, se dispersan y resulta una reducción de la densidad de potencia. A esto se le llama atenuación, y se presenta tanto en el espacio libre como en la atmósfera terrestre.

ATENUACIÓN DE LA ONDA

Según Tomasi (2003), la ley del cuadrado inverso de la radiación describe en forma matemática la reducción de densidad de potencia con la distancia a la fuente. A medida que se aleja un frente de onda de la fuente, el campo electromagnético continuo que irradia se dispersa. Esto es, las ondas se alejan cada vez más entre sí, y en consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor. No se pierde o disipa nada de la potencia irradiada, porque el frente de onda se aleja de la fuente; la onda solo se extiende, o se dispersa, sobre un área mayor y disminuye la densidad de potencia.

La reducción de densidad de potencia con la distancia equivale a una pérdida de potencia, y se suele denominar atenuación de la onda. Como la atenuación se debe a la



dispersión esférica de la onda, en ocasiones se le llama atenuación espacial de la onda. La atenuación de la onda se expresa generalmente en función del logaritmo común de la relación de densidades de potencia; matemáticamente se define como:

$$\gamma_{\alpha} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (2)$$

donde P_1 = potencia de salida y P_2 = potencia de entrada. La relación de densidad de potencia debida a la ley del cuadrado inverso supone que la propagación es en el espacio libre, en el vacío o casi en el vacío, y se denomina atenuación de onda. La reducción de la densidad de potencia debida a propagación en espacio no libre se denomina absorpci n.

ATENUACIÓN POR LLUVIA

Este es el efecto atmosférico que más puede afectar a un enlace satelital, por cuanto la lluvia produce una atenuación en las radio ondas por esparcimiento y por absorpci n de energía de las mismas. La atenuación por lluvia aumenta con el incremento de la frecuencia, específicamente por encima de los 3GHz. Es necesario que se transmita suficiente cantidad de potencia para contrarrestar los efectos antes mencionados y garantizar la disponibilidad de enlace.

Dependiendo de la región geográfica donde se encuentre la estación terrena, la atenuación por lluvia puede ser mayor o menor, esto basándose en las estadísticas de intensidad de lluvia, tamaño de gota y presión atmosférica. Es importante mencionar que una gran parte de la atenuación debida a las nubes y de la atenuación producida por los gases ya est  incluida en la predicción de la atenuación debida a la lluvia para porcentajes de tiempo inferiores al 1%.

Según Ramos (2012), la atenuación ocasionada por la lluvia puede despreciarse para frecuencias por debajo de 5 GHz, esta debe incluirse en los cálculos de diseño a frecuencias superiores en los cuales su importancia aumenta rápidamente.

MODELO DE LA ATENUACIÓN ESPECÍFICA DEBIDA A LA LLUVIA PARA LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN

La atenuación específica debido a la lluvia puede calcularse partiendo de la Recomendación UIT-R 838. La atenuación específica a (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h) mediante la ley exponencial ya mostrada en la ecuación (1), donde k y α son constantes que dependen de la frecuencia y de la polarización de la onda electromagnética. En la mencionada recomendación se proporciona un mayor número de valores. Para obtener valores a frecuencias intermedias se recomienda aplicar interpolación, utilizando una escala logarítmica para la frecuencia y k , así como, una escala lineal para α .

Los valores de los coeficientes k y α se determinan en función de la frecuencia, f (GHz), en la gama de 1 a 1000 GHz, a partir de las ecuaciones siguientes, que se han

obtenido mediante el ajuste de curvas a los coeficientes de la ley potencial derivados de cálculos de dispersión:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (3)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (4)$$

donde f es la frecuencia en(GHz), k puede ser k_H o k_V y α puede ser α_H o α_V . En el cuadro 2 se indican los valores de las constantes para el coeficiente k_H de polarización horizontal, en el cuadro 3 para el coeficiente k_V de polarización vertical. En el cuadro 4 se indican los valores de las constantes para el coeficiente α_H de polarización horizontal y en el cuadro 5 para el coeficiente α_V de polarización vertical.

Cuadro 2. Coeficientes para k_H

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098		
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354	-0,18961	0,71147
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Fuente: Unión Internacional de Telecomunicaciones (2005).

Cuadro 3. Coeficientes para k_V

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3,80595	0,56934	0,81061		
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899	-0,16398	0,63297
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Fuente: Unión Internacional de Telecomunicaciones (2005).

Cuadro 4. Coeficientes para α_H

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,14318	1,82442	-0,55187		
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164	0,67849	-1,95537
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

Fuente: Unión Internacional de Telecomunicaciones (2005).

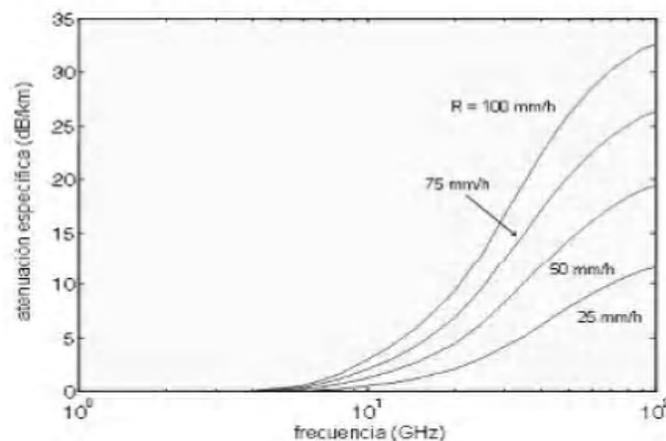
Cuadro 5. Coeficientes para α_v

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284		
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809	-0,053739	0,83433
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Fuente: Unión Internacional de Telecomunicaciones (2005).

En la figura 3, se representan curvas de atenuación específica por lluvia en función de la frecuencia y para distintos valores de precipitación. La atenuación específica crece rápidamente para frecuencias por encima de 10 GHz. Para una tasa de precipitación de $R = 50$ mm/h se obtienen valores de atenuación específica mayores de 10 dB/km para frecuencias superiores a 30 GHz. Por lo tanto, la lluvia es un problema serio en sistemas de radiocomunicaciones que operen a frecuencias milimétricas.

Figura 3. Atenuación específica para distintas intensidades de lluvia



Fuente: <http://www.radioenlaces.es>.

MÉTODOS DE PRONÓSTICO CUANTITATIVOS

Según Makridakis y otros (2008), los pronósticos cuantitativos pueden aplicarse cuando existan las siguientes condiciones: a) información disponible acerca del pasado, b) la información puede ser cuantificada, y c) el patrón de comportamiento de la información en el pasado, continuará en el futuro. Estos métodos presentan dos características:

1. Se expresan en notación matemática, por lo tanto, establecen un registro no ambiguo acerca de la forma en la cual se hace la predicción, esto permite una comunicación clara sobre el pronóstico entre aquellos a quienes interesa.



2. Mediante el uso de computadoras, un modelo se puede basar en una cantidad importante de datos.

Es importante destacar la existencia de diversas maneras de pronosticar las precipitaciones en forma de lluvia, una de ellas es mediante el uso de los m  todos cuantitativos. Para la escogencia de los m  todos es necesario conocer las diferencias entre ellos y seleccionar el que mejor se adapte al comportamiento de la serie de datos.

MODELOS AUTOREGRESIVOS (AR)

Seg  n Arce y Mah  a (2007), un modelo AR (autorregresivo) es aquel en el cual la variable end  gena de un per  odo t es explicada por las observaciones de ella misma correspondientes a per  odos anteriores (parte sistem  tica) m  s un t  rmino de error ruido blanco (innovaci  n).

Los modelos autorregresivos se abrevian con la palabra "AR" tras la que se indica el orden del modelo: AR(1), AR(2),..., el cual expresa el n  mero de observaciones retasadas de la serie temporal analizada que intervienen en la ecuaci  n. Un modelo autoregresivo tiene la forma siguiente:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t \quad (5)$$

donde Y_t es la variable dependiente y $Y_{t-1}, Y_{t-2} \dots Y_{t-p}$ son las variables independientes. En este caso, estas variables independientes son valores de la misma variable (de aqu   el nombre de auto), es decir, observaciones de per  odos anteriores. Finalmente, e_t es el error, o t  rmino residual que representa las perturbaciones aleatorias que no pueden ser explicadas por el modelo. La ecuaci  n 5 se llama autoregresiva porque se asemeja a la ecuaci  n de regresi  n ($Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p + e$). La   nica diferencia es que $X_1 = Y_{t-1}, X_2 = Y_{t-2}, \dots, X_p = Y_{t-p}$, y as   las variables independientes son simplemente valores rezagados de la variable dependiente con rezagos de tiempo $1, 2, \dots, p$ per  odos.

MODELO DE MEDIAS M  VILES (MA)

Seg  n Arce y Mah  a (2007), un modelo de medias m  viles es aquel que explica el valor de una determinada variable en un per  odo t en funci  n de un t  rmino independiente y una sucesi  n de t  rminos de error, de innovaciones correspondientes a per  odos precedentes, convenientemente ponderados. Estos modelos se denotan normalmente con las siglas MA, seguidos, como en el caso de los modelos autorregresivos, del orden entre par  ntesis, se representa de la siguiente forma:

$$Y_t = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (6)$$

En donde, como en el modelo anterior, e_t es el error o residuo y $e_{t-1}, e_{t-2} \dots e_{t-q}$, son los valores anteriores del error. Finalmente, ambas ecuaciones son semejantes con la excepci  n de que implica que la variable dependiente Y_t depende de valores previos del t  rmino de error m  s que de la variable misma.



PROMEDIO MÓVIL INTEGRADO DE AUTO REGRESIÓN (ARIMA)

Box y Jenkins (1970) desarrollaron un cuerpo metodológico destinado a identificar, estimar y diagnosticar modelos dinámicos de series temporales en los que la variable tiempo juega un papel fundamental, los modelos ARIMA (Modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil). La metodología ARIMA es solo una parte de lo que se conoce normalmente como Econometría de Series Temporales, pero sin duda alguna, una de las más utilizadas. Por otro lado, los modelos ARIMA son útiles para el pronóstico a corto plazo pero no para la comprensión estructural del fenómeno o la simulación de escenarios.

Según Peña (2005), la modelación ARIMA es uno de los métodos modernos de predicción más sofisticados para series temporales con estacionalidad. Utiliza variaciones y regresiones de datos estadísticos con el propósito de encontrar patrones para una predicción hacia el futuro.

Por otra parte, ARIMA es el método de análisis de series de tiempo más adaptable, puede tratar con cualquier patrón de datos, para todo propósito práctico, múltiples clases o tipos generales de series de tiempo pueden describir cualquier tipo de patrón de datos de series de tiempo, estos pueden ser: autoregresivos (AR), de promedio móvil (MA) y de promedio móvil autoregresivo mixto (ARMA), tanto simples como estacionales.

Para los modelos mixtos ARMA, se parte de una combinación de las ecuaciones 5 y 6, en la cual se muestra los valores futuros a partir de las observaciones pasadas y de los errores pasados entre los valores reales y pronosticados, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t - \phi_1 e_{t-1} - \phi_2 e_{t-2} - \dots - \phi_q e_{t-q} \quad (7)$$

Para modelos con datos estacionales, las ecuaciones 5, 6 y 7 podrían no ser suficientes y debe completarse con parámetros estacionales. Como lo explicado anteriormente, los modelos estacionales pueden ser: AR, MA y ARMA. Un modelo AR estacional con datos mensuales sería:

$$Y_t = \phi_{12} Y_{t-12} + e_t \quad (8)$$

Para un modelo MA estacional mensual tendría la forma siguiente:

$$Y_t = e_t - \theta_{12} e_{t-12} \quad (9)$$

Y un modelo mixto ARMA estacional mensual presentaría la siguiente ecuación:

$$Y_t = \phi_{12} Y_{t-12} + e_t - \theta_{12} e_{t-12} \quad (10)$$



PROCEDIMIENTO

A continuación se explica de forma detallada cada una de las fases que sirvieron como guía en la realización de las distintas actividades conducentes al logro del objetivo de la presente investigación.

RECOPILACIÓN DE LOS DATOS DE LLUVIA

El Servicio de Meteorología de la Aviación se crea el 10 de octubre de 1947, conformado inicialmente por trece (13) estaciones que apoyan las operaciones aéreas de la época, las cuales eran: Maiquetía, Barquisimeto, Santa Elena de Uair n, Maturín, Mérida, Ciudad Bolívar, Maracaibo, Tumeremo, Porlamar, San Antonio del Táchira, San Fernando de Apure, Coro y Guiria. Las cuales pertenecían al Observatorio de Cajigal, adscrito a la Armada Venezolana durante el año de 1948. A partir del año 1949 pasa formar parte propiamente del Servicio de la Fuerza Aérea Venezolana.

En tal sentido, su desarrollo a nivel nacional surge como una respuesta a los diferentes usuarios del país, cuyas actividades se ven afectadas por las variaciones del tiempo y su misión trasciende tomando carácter nacional e internacional, suministrando información meteorológica en apoyo a diferentes entidades públicas y privadas, y al público en general.

En atención a las exigencias impuestas por la tecnología, el Servicio de Meteorología incrementó sistemáticamente la Red de Estaciones Meteorológicas en el ámbito nacional, desarrollándose desde el año 1951, bajo las exigencias y recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Cuadro 6. Medidas de lluvia mensuales de San Antonio del Táchira

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2004	61.46	5.08	25.66	2.29	136.66	0	110.24	6.09	148.09	15.5	120.66	55.89
2005	84.32	84.07	1.02	12.2	97.29	7.88	7.11	7.11	6.86	5.08	0	10.92
2006	4.06	7.12	53.6	43.19	14.48	17.02	19.05	5.08	13.97	11.42	0	47.5
2007	3.3	0	0	0.51	34.29	6.1	0	47.51	7.38	84.58	40.13	11.18
2008	3.05	35.81	26.17	17.27	29.73	9.4	26.43	49.54	12.7	87.38	64.78	32.52
2009	6.85	25.91	2.03	0.51	25.91	13.21	9.9	10.67	9.65	16.26	13.71	0.51
2010	2.03	18.54	2.03	14.22	64	31.24	7.63	3.05	35.05	102.62	38.88	136.64
2011	71.12	93.72	29.2	159.5	94.49	35.05	12.7	0.51	15.24	45.72	228.85	108.97

Fuente: <http://www.meteorologia.mil.ve/>.

Por otra parte, este organismo posee los registros de las precipitaciones por lluvia medidas en mm correspondientes a la localidad de San Antonio del Táchira, comenzando desde el año 2004 hasta el 2011 reportados por la estación 804470(SVSA) Latitud: 7.85  Longitud: -72.45  Altitud: 377 m, los cuales han sido revisados por el ente



antes mencionado, mediante observaciones simultáneas, lo cual es de vital importancia por cuanto se logra aumentar la exactitud de los cálculos para el pronóstico de la lluvia mensual, que serán obtenidos mediante la utilización del software SPSS versión 15.0. Los valores de lluvia proporcionados por el organismo antes citado se detallan en el cuadro 6.

APLICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DE PRONÓSTICO

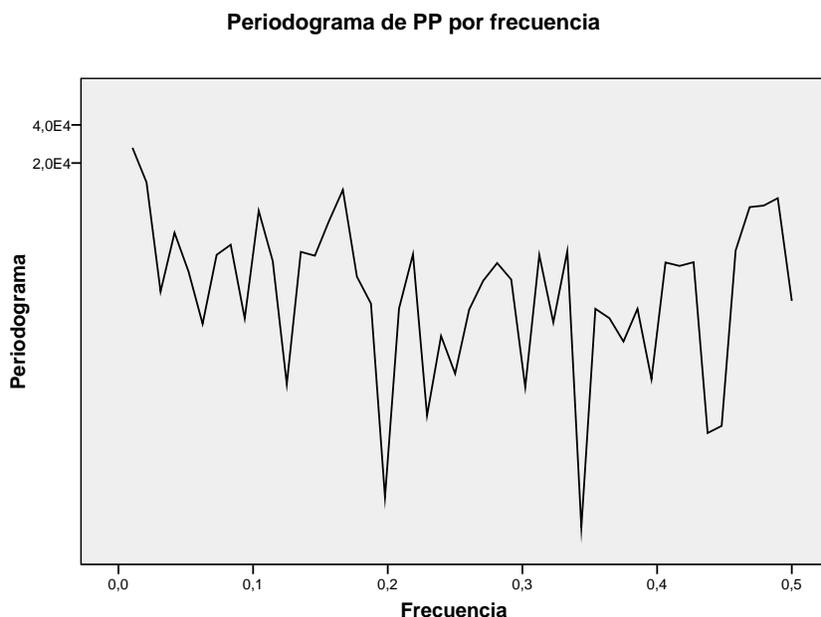
Esta fase de la investigación, se inicia con el análisis de las series de tiempo utilizando los promedios mensuales de precipitaciones por lluvia recopiladas a través del Servicio de Meteorología de la Fuerza aérea venezolana, desde el año 2004 hasta el 2011. Procediendo a realizar los cálculos para la determinación de los coeficientes óptimos y el proceso de identificación de los parámetros para la aplicación del método ARIMA, mediante la utilización de las siguientes herramientas de software: el programa estadístico SPSS versión 15 y Microsoft Excel versión 2007, mediante los cuales se pudo obtener un pronóstico para el periodo comprendido entre el 2011 y el 2013.

PROMEDIO MÓVIL INTEGRADO DE AUTO REGRESIÓN (ARIMA)

Con la finalidad de obtener un pronóstico adecuado utilizando el método ARIMA, se necesita del análisis de la serie de datos proporcionados por Servicio de Meteorología de la Fuerza aérea venezolana, mediante la aplicación de la metodología de Box-Jenkins, cuyo propósito es facilitar el proceso de identificación, estimación y verificación para las series temporales, teniendo en cuenta la dependencia existente entre los datos. Seguidamente se detalla el procedimiento realizado a fin de determinar el modelo y los parámetros para formular el pronóstico desde el año 2011 hasta el 2013.

Como primer paso, se determina la presencia de estacionalidad en la serie de datos, para lo cual se genera un diagrama espectral con el propósito de establecer la frecuencia de ocurrencia de cada ciclo de lluvia. En la Figura 4 se puede observar un primer pico correspondiente a la frecuencia 0,1 lo que detecta el periodo estacional de la serie, el cual corresponde al inverso de la frecuencia, es decir $1/0.1=10$ meses. Con el resultado obtenido se deduce un ciclo estacionario en la serie.

Figura 4. Diagrama espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real



Fuente: elaboración propia.

Para saber si existe estacionariedad en la serie de datos se calculan las Medias y las Varianzas, a fin de determinar si las mismas varían en los diferentes años, de manera tal que permita establecer los próximos pasos a seguir. En el cuadro 7 se presentan los valores resultantes del cálculo de la varianza y la media, por cada uno de los años. Como puede apreciarse, los valores de las medias y las varianzas son diferentes de un año a otro, en algunos casos aumentan y en otros disminuyen, de lo cual se puede inferir que no hay estacionariedad en relación a la media y la varianza.

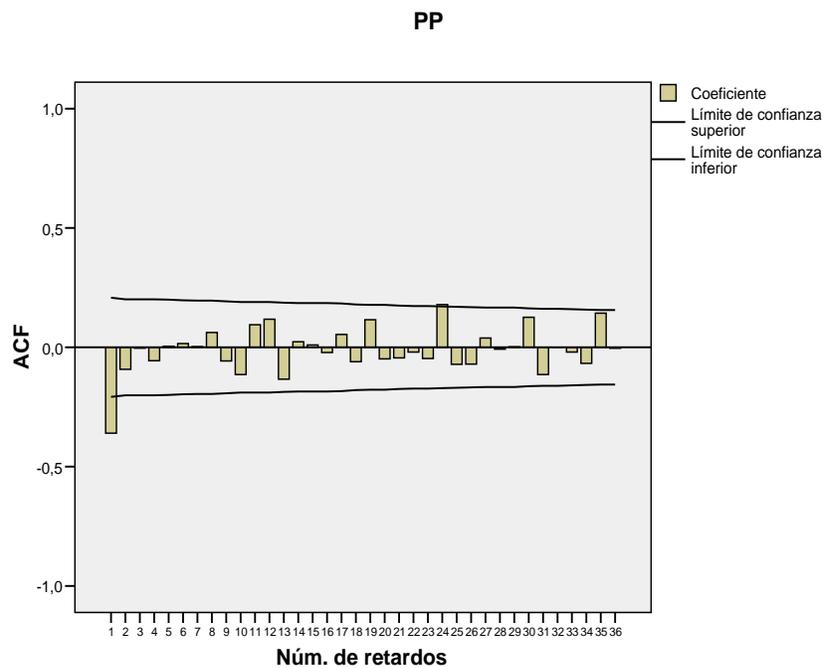
Cuadro 7. Valores de medias y varianzas

AÑO	MEDIA	VARIANZA
2004	57,30	3253,12
2005	26,99	1400,70
2006	19,71	328,62
2007	19,58	711,25
2008	32,90	587,52
2009	11,26	73,15
2010	37,99	1846,59
2011	74,59	4569,06

Fuente: elaboración propia.

A continuación se presentan los gráficos de autocorrelación simple y parcial, que permiten identificar el método ARIMA adecuado para el cálculo del pronóstico.

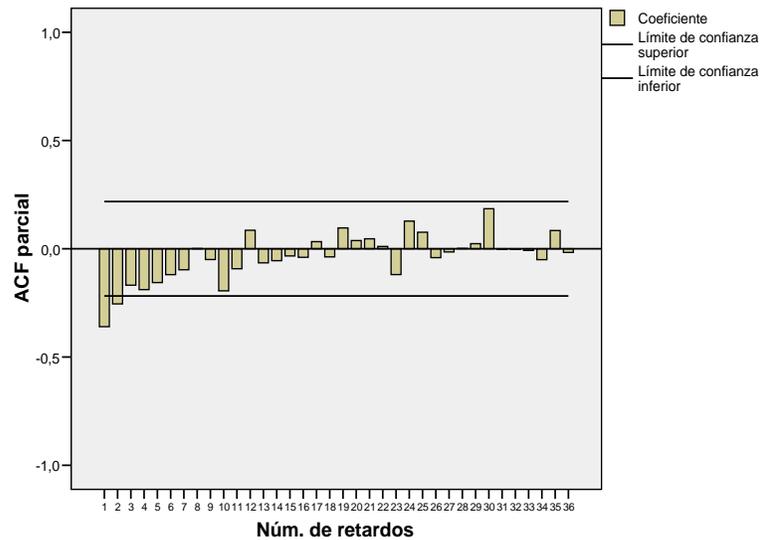
Figura 5. Autocorrelación simple aplicando transformación log natural y diferencial en orden 1



Fuente: elaboración propia.

En las Figuras 5 y 6 se puede observar que luego de utilizar los datos de lluvia real de la ciudad de San Antonio del Táchira aplicando transformación log natural y diferenciación en orden 1, no se visualiza un patrón válido mediante el cual poder identificar el modelo ARIMA apropiado, por cuanto tanto la autocorrelación simple como la parcial no decaen exponencialmente a cero, lo cual conlleva a seguir aplicando autocorrelación a fin de obtener el patrón necesario para la aplicación de los coeficientes del método antes mencionado.

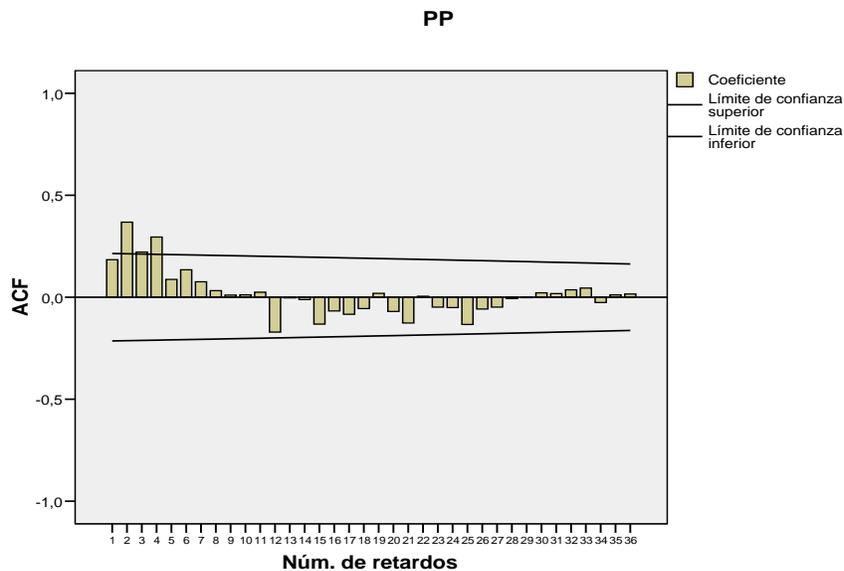
Figura 6. Autocorrelación parcial aplicando transformación log natural y diferencial en orden 1
PP



Fuente: elaboración propia.

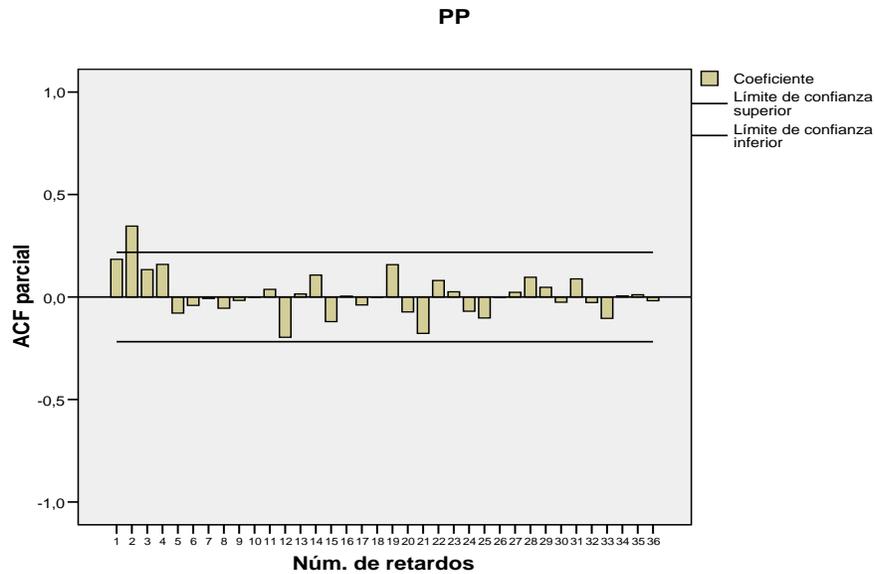
Seguidamente se procede a realizar un nuevo ensayo a fin de obtener un patrón identificable de autocorrelación, para lo cual se aplica diferenciar ciclo en orden 1, a fin de obtener un patrón válido para la aplicación del ARIMA.

Figura 7. Autocorrelación simple aplicando diferencial ciclo en orden 1.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Autocorrelación parcial aplicando diferencial ciclo en orden 1



Fuente: elaboración propia.

En las figura 7 y 8, se puede observar que luego de utilizar los datos de lluvia real aplicando diferenciación de ciclo en orden 1, se visualiza un patrón válido mediante el cual poder identificar el modelo ARIMA apropiado, por cuanto tanto la autocorrelación simple como la parcial presentan una tendencia a cero en los ciclos.

Teniendo el modelo ya definido, se procede a llevar a cabo una serie de ensayos para obtener el mejor conjunto de parámetros que representen el pronóstico con los datos de lluvia real de la localidad de San Antonio del Táchira, obteniendo como resultado el método de pronóstico ARIMA $(1,0,1)(0,1,0)_{12}$ debido a que presenta el menor error residual. Seguidamente, en el cuadro 8 se presentan los coeficientes óptimos.

Cuadro 8. Coeficientes óptimos

		Estimaciones	Error típico	t	Sig. aprox.
Retardos no estacionales	AR1	,859	,127	6,751	,000
	MA1	,665	,186	3,571	,001

Fuente: elaboración propia.

En el cuadro 8 se presentan los valores de los coeficientes óptimos obtenidos mediante la utilización del algoritmo de Melard para la estimación de lluvia. Finalmente en el cuadro 9 se presentan los valores pronosticados a partir del año 2011 hasta el año 2013, utilizando los datos de lluvia real desde el año 2004 hasta el año 2011.



Cuadro 9. Valores de lluvia real y pronosticada aplicando el método de ARIMA para la localidad de San Antonio del Táchira

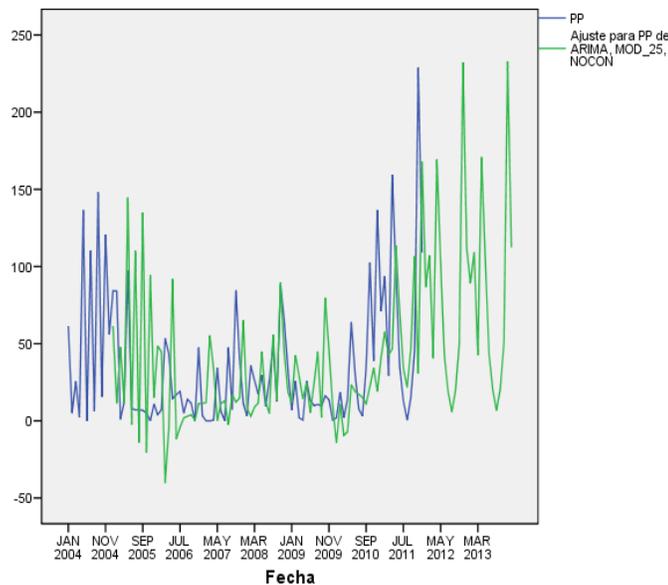
Fecha	Lluvia Real (mm)	Pronóstico (mm)
JAN 2011	71,12	40,85037
FEB 2011	93,72	57,76363
MAR 2011	29,20	42,70377
APR 2011	159,50	46,54002
MAY 2011	94,49	113,68849
JUN 2011	35,05	70,19887
JUL 2011	12,70	34,27583
AUG 2011	,51	21,75261
SEP 2011	15,24	46,99364
OCT 2011	45,72	106,71730
NOV 2011	228,85	30,56110
DEC 2011	108,97	167,97863
JAN 2012		86,58881
FEB 2012		107,00852
MAR 2012		40,61554
APR 2012		169,30655
MAY 2012		102,91434
JUN 2012		42,28695
JUL 2012		18,91692
AUG 2012		5,85066
SEP 2012		19,82791
OCT 2012		49,66125
NOV 2012		232,23574
DEC 2012		111,87853
JAN 2013		89,08739
FEB 2013		109,15493
MAR 2013		42,45942
APR 2013		170,89054
MAY 2013		104,27507
JUN 2013		43,45589
JUL 2013		19,92110
AUG 2013		6,71330
SEP 2013		20,56896
OCT 2013		50,29786
NOV 2013		232,78262
DEC 2013		112,34833

Fuente: elaboración propia.

En el cuadro 9 se pueden observar los valores pronosticados con el método ARIMA a partir del año 2011 hasta el 2013, utilizando los datos de lluvia real desde el año 2004 hasta el año 2011. En la Figura 9 se puede visualizar el resultado generado por el SPSS versión 15, donde se representan los valores de lluvia real y pronosticada. La línea oscura representa la lluvia real y la línea clara la pronosticada.

La Figura 9, muestra el comportamiento de la lluvia real con la lluvia pronosticada, observándose cierto desfase entre ambas, como lo demuestra el gráfico de secuencia generado por el SPSS versión 15, los datos pronosticados serán utilizados para realizar el cálculo de la radioatenuación troposférica.

Figura 9 Gráfico de secuencia. Lluvia real y pronosticada aplicando el Método de ARIMA



Fuente: elaboración propia.

COMPARAR LOS VALORES PRONOSTICADOS CON LOS VALORES DE LLUVIA REALES

En esta fase, luego de obtener los resultados de las predicciones de lluvia de la localidad de San Antonio del Táchira del año 2011 hasta el año 2013 mediante la aplicación del método ARIMA, se procedió a comparar el resultado obtenido para el año 2011 con los valores de lluvia real correspondientes al mismo año, con el propósito de evaluar el ajuste del modelo a los datos proporcionados por la Fuerza Aérea Venezolana, por lo cual, utilizando el SPSS, se realizó la prueba T para muestras relacionadas, a fin de establecer si es significativa o no la diferencia entre la media de los valores de lluvia real y la media de los valores pronosticados.

En el cuadro 10, se muestra el resultado de la prueba de muestras relacionadas, distinguiéndose los siguientes valores: $t=0.435$, $gl=11$ y $Sig.=0.889$, el valor de la significancia determina que se acepta la hipótesis nula, la cual se refiere a la no existencia de diferencias significativas entre las medias, por cuanto no se cumple la regla de decisión de $p<0.05$, descartándose la hipótesis alternativa, referida a la existencia de diferencias entre las medias, finalmente se puede afirmar que no hay diferencia significativa entre la intensidad de lluvia real y la pronosticada para el año 2011.

Cuadro 10. Prueba de muestras relacionadas

Par 1	VAR00001 - VAR00002	Diferencias relacionadas				t	gl	Sig. (bilateral)	
		Media	Desviación típ.	Error típ. de la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia				
					Inferior				Superior
		9,58714	76,33581	22,03625	-38,91432	58,08861	,435	11	,672

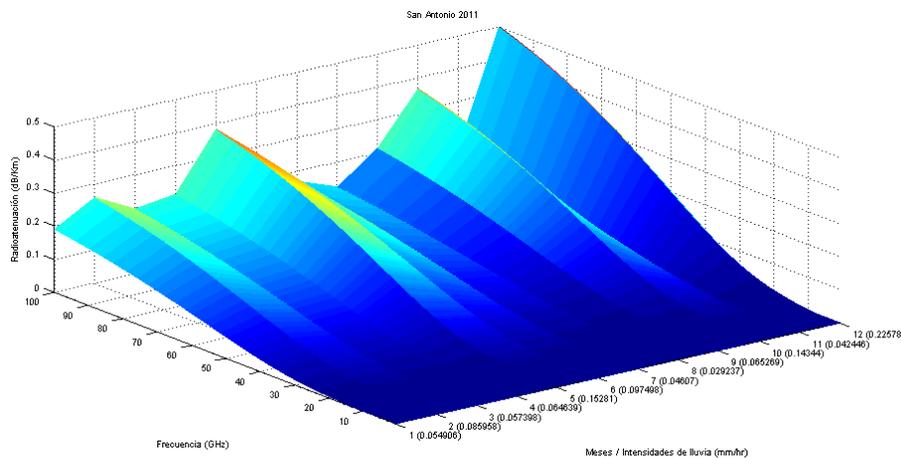
Fuente: elaboración propia.

DETERMINACIÓN DE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

En esta última fase de la investigación, se presentan los valores específicos de radioatenuación troposférica por lluvia en mm/hr, obtenidos en base a los resultados del pronóstico desde el año 2011 hasta el año 2013. El cálculo se realizó mediante la utilización del software MATLAB, el cual permite obtener una gráfica para el parámetro de atenuación en función de la frecuencia y la cantidad de lluvia en la zona.

En tal sentido, para llevar a cabo el cálculo se utiliza el rango de frecuencias comenzando desde 1 GHz hasta los 100 GHz con incrementos de 1 Ghz. De igual manera, se utilizó un ángulo de elevación del trayecto de onda igual a 90° y una polarización circular de la señal. Seguidamente se muestran las figuras con la radioatenuación troposférica por lluvia mensual estimada para la localidad de San Antonio del Táchira desde el año 2011 hasta el 2013.

Figura 10. Radioatenuación troposférica por lluvia para el año 2011

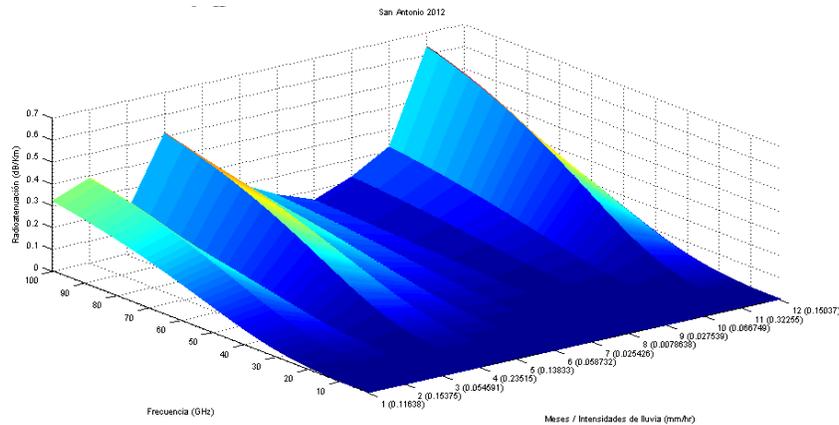


Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en la Figura 10, la máxima radioatenuación registrada para el año 2011 fue de 0,49 dB/Km correspondiente al mes de diciembre, con una intensidad de lluvia igual a 0,22 mm/hr en la frecuencia de 100 GHz. Las otras radioatenuaciones

significativas registradas pertenecen a los meses de mayo y octubre, con intensidades de 0,15 mm/hr y 0,14 mm/hr respectivamente. La radioatenuación más leve en el orden de los 100 GHz registrada para el año 2011 pertenece al mes de agosto con una radioatenuación igual a 0,12 dB/Km y una intensidad de lluvia igual a 0,02 mm/hr.

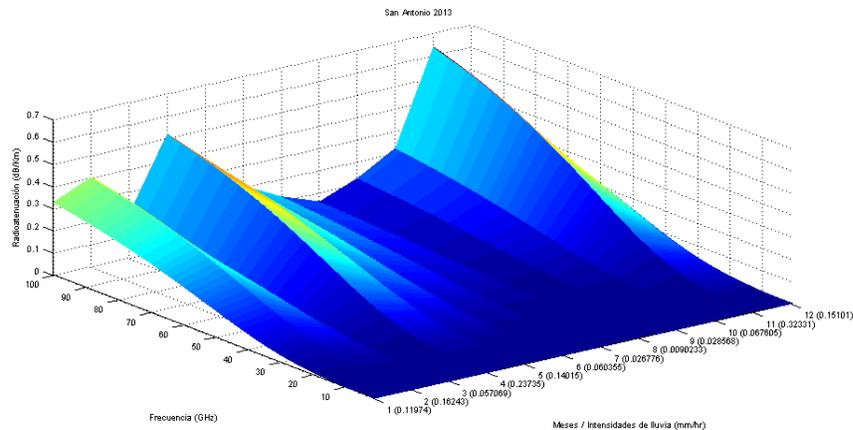
Figura 11. Radioatenuación troposférica por lluvia para el año 2012.



Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en la Figura 11, la máxima radioatenuación registrada para el año 2012 fue de 0,63 dB/Km correspondiente al mes de noviembre, con una intensidad de lluvia igual a 0,22 mm/hr en la frecuencia de 100 GHz. Las otras radioatenuaciones significativas registradas pertenecen a los meses de febrero y abril, con intensidades de lluvia iguales a 0,15 mm/hr y 0,23 mm/hr, respectivamente. La radioatenuación más leve en el orden de los 100 GHz registrada para el año 2012 pertenece al mes de agosto con una radioatenuación igual a 0,12 dB/Km y una intensidad de lluvia igual a 0,02 mm/hr.

Figura 12. Radioatenuación troposférica por lluvia para el año 2013



Fuente: elaboración propia.



En la Figura 12, la máxima radioatenuación registrada para el año 2013 fue de 0,63 dB/Km correspondiente al mes de noviembre, con una intensidad de lluvia igual a 0,32 mm/hr en la frecuencia de 100 GHz. Las otras radioatenuaciones significativas registradas pertenecen a los meses de febrero y abril, con intensidades de lluvia iguales a 0,16 mm/hr y 0,23 mm/hr respectivamente. La radioatenuación más leve en el orden de los 100 GHz registrada para el año 2013 pertenece al mes de agosto con una radioatenuación igual a 0,05 dB/Km y una intensidad de lluvia igual a 0,009 mm/hr.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La discusión de los resultados se elaboró tomando en cuenta el resultado obtenido al desarrollar cada una de las fases del procedimiento planteado para el logro de los objetivos establecidos en la investigación, a través de los cuales se observa la considerable disminución de la potencia de las señales como consecuencia de la radioatenuación troposférica causada por las precipitaciones en forma de lluvia.

En tal sentido, las diversas investigaciones utilizadas como antecedentes, conllevan a la aplicación del ARIMA como el método más adecuado de pronóstico, por cuanto está diseñado para analizar series temporales de tiempo, de igual manera, se emplea para estimar la lluvia mensual de periodos posteriores con base en el comportamiento de la serie datos de lluvia real recolectados, para efectos de esta investigación se seleccionó el modelo ARIMA (1,0,1)(0,1,0)₁₂ según Galeano (2011), quien indica que se selecciona el modelo más adecuado mediante algún criterio de selección, tales como el AIC o BIC.

Posteriormente se comparan los valores de lluvia pronosticados con los datos de lluvia real, mediante la prueba de muestras relacionadas, se acepta la hipótesis nula de no existencia de diferencias significativas entre la intensidad de lluvia real y la pronosticada para el año 2011, descartando la hipótesis alternativa de existencia de diferencias significativas entre las muestras, al no cumplir la regla de decisión: $p < 0,05$, teniendo una significancia bilateral igual a 0,672.

Lo anterior concuerda con lo planteado por Sábado (2009), cuando afirma que esta prueba se efectúa para contrastar la hipótesis nula de no existencia de diferencias significativas entre las medias de dos variables con distribución normal, medidas en los mismos sujetos, o bien la no existencia de diferencias significativas entre la medida de una misma variable en los mismos sujetos en situaciones diferentes.

Por otra parte, cabe destacar la importancia de considerar los diversos fenómenos atmosféricos que pueden afectar el comportamiento estable de los enlaces de telecomunicaciones basados en ondas electromagnéticas. Debido a la disipación de energía en forma de calor causada por los gases o las precipitaciones en forma de lluvia, nieve o granizo, entre otras. En consonancia con lo expresado por Cardama y otros (2004), quienes indican que la absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por los hidrometeoros son las principales causas de la Atenuación atmosférica.



En el cálculo del pronóstico de la radioatenuación troposférica para la localidad de San Antonio del Táchira realizado desde el año 2011 hasta el año 2013, se pone en evidencia que estos valores dependen directamente de la intensidad de lluvia, mientras mayor sea la intensidad de lluvia mayor será la radioatenuación, lo cual concuerda con lo expresado por Ramos (2012): “para la predicción de la atenuación producida por la lluvia se necesita información sobre las estadísticas de intensidad de precipitación”.

En la determinación de la radioatenuación troposférica por lluvia para la localidad de San Antonio del Táchira, se observó que la máxima radioatenuación en el orden de los 100 GHz registrada para el año 2011 fue de 0,49 dB/Km correspondiente al mes de diciembre, con una intensidad de lluvia igual a 0,22 mm/hr, y la más leve pertenece al mes de agosto con una radioatenuación igual a 0,12 dB/Km y una intensidad de lluvia igual a 0,02 m/hr. Con una radioatenuación promedio de aproximadamente 0,25 db/km.

En el mismo orden de ideas, la máxima radioatenuación registrada para el año 2012 fue de 0,63 dB/Km correspondiente al mes de noviembre, con una intensidad igual a 0,32 mm/hr en la frecuencia de 100 GHz, y la más leve pertenece al mes de agosto con una radioatenuación igual a 0,05 dB/Km y una intensidad de lluvia igual a 0,007 mm/hr. Con una radioatenuación promedio de aproximadamente 0,28 db/km.

Finalmente, la máxima radioatenuación registrada para el año 2013 fue de 0,63 dB/Km correspondiente al mes de noviembre, con una intensidad igual a 0,32 mm/hr en la frecuencia de 100 GHz, y la más leve pertenece al mes de agosto con una radioatenuación igual a 0,05 dB/Km y una intensidad de lluvia igual a 0,009 mm/hr. Con una radioatenuación promedio de aproximadamente 0,29 db/km.

CONCLUSIONES

El estudio se realizó con base en registros pertenecientes al servicio de meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, reportados por la estación: 804470(SVSA) Latitud: 7.85° Longitud: -72.45° Altitud: 377 m, con data de 8 años, desde 2004 hasta el 2011, contrastándolo con la data publicada por Tu Tiempo Network, S.L., corroborando la veracidad de la misma.

Para el análisis del pronóstico de lluvia derivado de la aplicación del método ARIMA, obteniendo los gráficos de las autocorrelaciones simples y parciales de la serie, en los cuales se pudo observar que los retrasos presentan una tendencia a cero, permitiendo obtener los coeficientes óptimos, y posteriormente generar el pronóstico de lluvia desde el año 2011 hasta el año 2013 aplicando el método de pronóstico ARIMA (1,0,1)(0,1,0)₁₂.

Por otra parte, se pudo comparar los valores obtenidos en el pronóstico correspondiente al año 2011 con los valores de lluvia real del mismo, mediante la prueba de muestras relacionadas, obteniéndose el valor de la significancia, el cual determina que se acepta la hipótesis nula de no existencia de diferencias significativas entre las medias, descartándose la hipótesis alternativa, referida a la existencia de diferencias entre las medias, por lo tanto, no hay diferencia significativa entre la intensidad de lluvia real y la pronosticada para el año antes mencionado.



Al calcular la radioatenuación troposférica con la intensidad de lluvia obtenida con el método ARIMA, para la localidad de San Antonio del Táchira, se determinó que la tendencia del pronóstico para el año 2011 difiere en cuanto a los meses de mayor precipitación de lluvia, y por ende con mayor radioatenuación con respecto a los años 2012 y 2013, en el primero son mayo, junio, octubre y diciembre, mientras en los otros dos son febrero, abril, mayo y noviembre. En relación al mes de menor precipitación de lluvia y por ende con menor radioatenuación, el resultado obtenido es similar para los tres años pronosticados, siendo este el mes de agosto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arce, R. y Mahía, R. (2007). Modelos ARIMA. Material del Programa Citius.- Técnicas de Previsión de variables financieras. España. U.D.I. Econometría e Informática.
- Box, G. y Jenkins, G. (1970). Time series analysis: forecasting and control. USA. Holden-Day.
- Cardama, A.; Jofre, L.; Rius, J.; Romeu, J.; Blanch, S. y Ferrando, M. (2004). Antenas. México. Alfaomega.
- Galeano, P. (2011). Aspectos generales sobre la presencia de datos atípicos en series temporales. Documento en línea. Disponible en: <http://atc.ugr.es/reset/ConferenciaPedroGaleano.pdf>. Consulta: 12/06/2012.
- Makridakis, S. (2008). Forecasting methods and applications. México. Limusa.
- Peña, D. (2005). Análisis de series temporales. España. Editorial Alianza.
- Ramos, F. (2012). Radiocomunicaciones y fibra óptica: diseño de radioenlaces. Documento en línea. Disponible en: <http://www.radioptica.com/radioenlaces>. Consulta: 03/02/2012.
- Sábado, J. (2009). Fundamentos de bioestadística y análisis de datos para enfermería. España. Servicio de Publicaciones Universidad Autónoma de Barcelona.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones (2005). Recomendación UIT-R P.838-3. Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción. Documento en línea. Disponible en: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf. Consulta: 03/02/2012.
- Tomasi, W. (2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas. México. Pearson Educación.