

## ESTUDIO COMPARATIVO DE PRONÓSTICO DE RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA POR LLUVIA EN MARACAY ENTRE LOS AÑOS 2006-2015

(Comparative study of rain attenuation forecast in Maracay among the years 2006-2015)

Recibido: 22/07/2014 Aceptado: 02/05/2015

**Rojas, César**

University of Tsukuba, Japan

[cdrojas@live.com](mailto:cdrojas@live.com)

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación es la comprobación del método predictivo más adecuado y el posterior pronóstico de radioatenuación troposférica por lluvia para la ciudad de Maracay hasta el año 2015. Mediante la comparación de métodos predictivos aplicados en el pasado con la data de lluvia real registrada a partir del año 2006, se determina la exactitud del modelo para posteriormente realizar el pronóstico deseado. El estudio está desarrollado en cuatro (4) fases, comenzando por la obtención de la data de lluvia real registrada en la zona en estudio desde el año 2006 hasta la fecha más reciente disponible, a través de la colaboración del departamento de Climatología de la Aviación Militar Bolivariana de Venezuela. Seguidamente, se comprueba la efectividad del método de pronóstico de Promedio Móvil Integrado de Auto Regresión (ARIMA), mediante un análisis estadístico comparando la data estimada con la data de lluvia real; y se procede luego a realizar el nuevo pronóstico con el modelo comprobado. Finalmente, se calcula la radioatenuación troposférica pronosticada hasta el año 2015, mediante la utilización del modelo de atenuación específica por lluvia para métodos predictivos basado en la recomendación UIT-R P.838-3 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1992). Esta investigación de tipo correlacional y comparada, cuyo diseño es considerado no-experimental; concluye que, los niveles de precipitación de la zona en estudio son mayores entre los meses de abril y octubre, con un menor nivel en el resto de los meses al igual que la radioatenuación percibida. Así mismo, se observa como existe un impacto en el método predictivo por parte de fenómenos meteorológicos tales como El Niño y La Niña, lo cual podría ser tomado en cuenta en futuros estudios para la mejora del método de predicción. Se concluye que la radioatenuación registrada es relativamente baja, lo cual convierte a la región en una zona propicia para la instalación de sistemas de radioenlaces.

**Palabras clave:** radioatenuación, lluvia, ARIMA, pronóstico, clima.

### ABSTRACT

The main objective of this research is the ascertainment of the most adequate predictive method, and the following forecast of the tropospheric rain attenuation (rain fade) for the city of Maracay until the year 2015. By the comparison of past forecasting methods applied in the region with the real rain data, gathered from the year 2006 onwards, the degree of



exactness of the model is determined in order to proceed with the calculation of the desired forecast. The study is made of four (4) stages, beginning with the compilation of the rain data registered in the zone under study starting from 2006 until the most recent available data, with the collaboration of the Climate Department of the Bolivarian Military Air Force of Venezuela. Subsequently, the effectiveness of the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) method is proven by a statistical analysis, comparing the forecast data with the real one, and then proceeding to make the new forecast by the means of the proven model. Finally, the tropospheric rain fade forecast is calculated until the year 2015, by utilizing the specific model of rain attenuation for predictive methods based on the recommendation UIT-R P.838-3. This research of correlational and comparing type, which design is considered non experimental; concludes, that the levels of precipitations of the zone under study are higher between the months of April and October, with a lower level perceived during the rest of the year, just as the registered levels of rain attenuation. Furthermore, it is observable a tangible impact on the forecasting method by meteorological phenomena, such as El Niño and La Niña, which could be taken into consideration in future studies in order to improve further the predictive method. It is concluded, that the overall rain fade levels are relatively low, which makes it an appropriate zone for the installment of radio link systems.

**Keywords:** radioattenuation, rain, ARIMA, forecast, climate.

## INTRODUCCIÓN

El hombre moderno, a través de avances tecnológicos, ha logrado hacer cada vez más fácil el día a día de sus congéneres. Computadoras más potentes, medios de transporte más veloces, servicios básicos más eficaces y, sobre todo, la capacidad de comunicarse virtualmente con cualquier parte del mundo mediante los sistemas de telecomunicaciones.

Existen varios medios de comunicación disponibles, resumibles en dos grupos dependiendo del método y vía por la cual la información es transmitida, los medios guiados y los no guiados. Este último grupo es particularmente conveniente, puesto que no cuenta con las limitaciones inherentes a la existencia de un medio artificial previamente instalado para lograr la conexión entre dos puntos; dado que su principal medio de transmisión es la atmósfera terrestre a través de la propagación de ondas electromagnéticas.

Sin embargo, dicha propagación es susceptible a pérdida debido a condiciones atmosféricas, tales como la nieve, granizo o lluvia; siendo especialmente nociva esta última para la calidad de la señal.

Es por ello que en la presente investigación se busca someter a prueba un método predictivo que permita prever el comportamiento de las señales con relación a la lluvia presente en la ciudad de Maracay, para una vez comprobada la efectividad del modelo, desarrollar una predicción de la radioatenuación troposférica por lluvia hasta el año 2015. Con el fin de utilizar este método predictivo en futuros diseños de sistemas de comunicaciones a ser implementados en la ciudad. Con tal fin, se elaboró la presente



investigación con las cuatro fases metodológicas que serán descritas a continuación:

Primera fase: se lleva a cabo el planteamiento del problema, indicando la relevancia e importancia del presente estudio. Conjuntamente, se presentan los objetivos de la investigación, los procedimientos a llevarse a cabo para la consecución de los objetivos, así como la justificando del proyecto desde un punto de vista teórico-práctico. Finalmente se establece la delimitación de la investigación.

Segunda fase: se establecen los antecedentes de la investigación, bases teóricas y la definición conceptual y operacional de las variables en estudio los cuales definen el marco sobre el cual se sustenta el presente trabajo.

Tercera fase: se define el tipo de investigación, su diseño, unidades de análisis y muestreo empleadas, seguido de las fases que componen el desarrollo de la investigación en pos de la consecución de los resultados.

Cuarta fase: en esta última fase, se realiza el análisis de los resultados obtenidos, las conclusiones del investigador en base a dichos resultados, finalizando con las recomendaciones del investigador tras un análisis minucioso de los resultados obtenidos. Asimismo, se muestra el material bibliográfico relevante para el desarrollo de este trabajo de investigación.

### **PROPAGACIÓN DE ONDA EN EL ESPACIO LIBRE**

La presencia de voltaje y corriente automáticamente implica la existencia de campos magnéticos y eléctricos. Al no estar en presencia de ninguna línea de transmisión en la que puedan existir el voltaje y la corriente, los campos se pueden propagar de forma libre en el espacio, tal como lo demuestran Buck y Hayt (2006).

En el espacio libre no existe ninguna estructura que confine a los campos, es por ello que pueden tener cualquier dirección y magnitud, las cuales se definen por el dispositivo que los genere, como las antenas, por citar un ejemplo.

Así como existe libertad en cuanto a la dirección de transmisión en el espacio libre, también existe un mayor riesgo de encontrar elementos que interfieran en la trayectoria de la onda antes de llegar a su destino final, tal como la presencia de ruido o eventos meteorológicos que puedan atenuar la señal.

En el presente trabajo se busca predecir el comportamiento de las señales en el espacio libre en presencia de una precipitación troposférica en forma de lluvia, con el respectivo efecto de radioatenuación estimada, basado en antecedentes como Kelsey, Rosillo, Montoya, Durante, Cendros (2011).

### **ATENUACIÓN Y ABSORCIÓN DE ONDAS**

Conforme se aleja un frente de onda de la fuente, el campo electromagnético continuo que es radiado desde esa fuente disminuye en densidad de potencia. Al alejarse dicho



frente de onda, el número de ondas por unidad de área disminuye, tal y como lo comprueba Tomasi (2003) cuando muestra a detalle la relación entre la densidad de potencia y la distancia del elemento radiante.

Es importante resaltar que la potencia inicial de cada onda nunca disminuye o se pierde, lo que ocurre es que al disiparse el frente de onda en un área cada vez mayor, la densidad de potencia presente en un determinado espacio se ve reducida, es a esto a lo que usualmente se le conoce como atenuación de la onda.

Esta se expresa generalmente en términos del logaritmo común de relación de densidad en potencia (pérdida en decibeles dB). Por otra parte, a la pérdida de densidad de potencia en el espacio no libre se le conoce como absorción. La atmósfera terrestre no es un espacio vacío, y cuenta con diversos elementos gaseosos, líquidos y sólidos dentro de los cuales algunos tienen la capacidad de absorber las ondas electromagnéticas.

Al propagarse una onda electromagnética en el espacio, esta transmite energía a los átomos y moléculas de la atmósfera, la cual es análoga a la pérdida de potencia. La energía perdida nunca se recupera, lo que se traduce en una atenuación del voltaje y el campo magnético. La atenuación se considera insignificante para frecuencias que se encuentran por debajo de los 10 GHz, también se conoce que en el caso de presentarse lluvia u otras condiciones atmosféricas anormales la atenuación es mayor en consecuencia.

También se sabe que la distancia entre la onda y el elemento radiante no guarda relación con la atenuación de la onda, caso contrario con la distancia total que propaga la onda en sí, la cual si tiene una alta relación con la atenuación de la misma.

### MODELO DE LA ATENUACIÓN ESPECÍFICA DEBIDO A LA LLUVIA PARA LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (2005) en su recomendación P.838-3 establece que la atenuación específica  $rR$  (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de la lluvia  $R$  (mm/h) mediante la ley potencial:

$$y_R = kRa \quad (1)$$

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

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (3)$$

dónde:

$f$ : frecuencia (GHz)

$k$ : puede ser  $k_H$  o  $k_V$

$\alpha$ : puede ser  $\alpha_H$  o  $\alpha_V$ .



Los valores de los coeficientes  $k$  y  $a$ , necesarios para el cálculo de radioatenuación, obtenidos mediante el ajuste de curvas a los coeficientes de la ley potencial, derivados de cálculos de dispersión y posteriormente tomando en consideración la polarización presente se pueden obtener los valores específicos de radioatenuación por efecto de la lluvia en dB/Km. Partiendo de estos datos, se puede proceder la predicción de atenuación troposférica por lluvia para el entorno geográfico que se desee, siempre y cuando se tenga conocimiento de la data de lluvia particular de la región en estudio, tal como sucede en este trabajo.

Por tanto, para poder poner en práctica las recomendaciones aquí planteadas, es necesario recolectar previamente los datos de intensidad de lluvia característicos, obtenidos mediante procesos de medición convencionales, tal como se propone en el presente estudio.

### PROCESO ESTOCÁSTICO Y ESTACIONARIDAD

En 1970 se desarrolló un cuerpo metodológico destinado a estimar y diagnosticar modelos dinámicos de series temporales en base a variables de tiempo por Box y Jenkins (2008).

Una de las bondades que ofrece dicha metodología es que libera al investigador de la compleja tarea de identificar los modelos, y en su lugar busca que sean los propios datos temporales de la variable a estudiar los que indiquen las características de la estructura probabilística en estudio.

Según De Arce y Mahía (2007), los modelos auto-regresivos o de medias móviles requieren el dominio conceptual de lo que es el proceso estocástico. Este se define como una sucesión de variables aleatorias que se pueden definir como  $Y_t$ , en la que  $t$  puede tener cualquier valor entre  $-\infty$  y  $\infty$ . Un posible ejemplo de modelo estocástico puede ser la siguiente sucesión de variables:

$$Y_{-6}, Y_{-5}, Y_{-4}, Y_{-3}, Y_{-2}, Y_3, Y_4 \quad (4)$$

En el caso de análisis de series temporales en un proceso estocástico, el subíndice  $t$  representa el paso del tiempo. Cada variable  $Y_t$  que forma parte de un proceso estocástico, tiene su propia función de distribución con sus correspondientes momentos. De igual forma, existe una función de distribución conjunta y sus funciones de distribución marginales por cada par de variables.

Esto mismo se presenta para conjuntos más amplios de variables. De esta manera, para definir un proceso estocástico se deben especificar las funciones de distribución conjunta de un conjunto dado de variables:

$$Y_{t_1}, Y_{t_2}, Y_{t_3}, \dots, Y_{t_m} \quad (5)$$

Sin importar cuáles sean los valores concernientes a  $(Y_{t_1}, Y_{t_2}, \dots, Y_{t_m})$ , al igual que con cualquier valor de  $m$ ; por de ejemplo:



$$y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6 (t_1=1 \text{ y } m=3) \quad (6)$$

Usualmente, el conocer dichas funciones de distribuci3n es complejo de manera que, para caracterizar un proceso estocástico, es suficiente especificar la media y la varianza para cada  $y_t$  y la covarianza para variables con distintos valores de  $t$ , de modo que:

$$E[Y_t] = \mu_t \quad (7)$$

$$\sigma_t = \text{Var}(y_t) = E[(y_t - \mu_t)^2] \quad (8)$$

$$r_t = \text{Cov}(Y_y, Y_s) = E[(y_t - \mu_t)] \quad (7)$$

Teniendo en mente el concepto genérico de proceso estocástico, es posible decir que cualquier serie temporal se trata de una muestra o realizaci3n concreta, la cual se compone de valores específicos de un proceso estocástico te3rico real. Es importante tener este concepto en cuenta, dado que el presente estudio se desarrollará en base al análisis de una serie temporal.

### MODELOS AUTORREGRESIVOS INTEGRADOS DE MEDIAS M3VILES (ARIMA)

De acuerdo a lo establecido por De Arce y Mahía (2007), un modelo autorregresivo es aquel en el que la variable end3gena de un período  $t$ , se puede definir mediante las observaciones de la misma en períodos anteriores, añadiéndose un término de error. Si se trata de procesos estacionarios cuya distribuci3n es normal, la teoría estadística de los procesos estocásticos establece que, bajo ciertas condiciones, toda  $Y_t$  se puede expresar como una combinaci3n lineal de sus valores pasados, la cual se denomina parte sistemática, sumándole un término de error al cual se le conoce como innovaci3n.

Los modelos autorregresivos son abreviados con las siglas AR, tras las que se indica el orden del modelo en estudio: AR(1), AR(2),...etc. El orden del modelo indica el número de observaciones retasadas de la serie temporal analizada que intervienen en la ecuaci3n. Por ejemplo, un modelo AR(1) adoptaría la expresi3n:

$$Y_t = f_0 + f_1 Y_{t-1} + a_t \quad (8)$$

Así mismo, los modelos de medias m3viles, son aquellos que explican el valor de una determinada variable en un período  $t$  en funci3n de un término independiente, y una sucesi3n de errores correspondientes a períodos precedentes ponderados de manera conveniente. Estos modelos se suelen emplear en el análisis de series temporales tal como ocurre en el estudio de data de lluvia presente a lo largo de un período de tiempo determinado.

Fase I. Recopilaci3n y Validaci3n de los datos de lluvia:

Como punto de partida para el presente trabajo, fue necesario recopilar la data de lluvia registrada en Maracay. Buscando la mayor precisi3n posible en la comparaci3n a llevarse a cabo con los datos predichos en métodos anteriores, fue necesario buscar la



data de lluvia registrada en el mismo observatorio empleado por el trabajo que serviría como punto de comparación.

El trabajo a ser utilizado como referencia es el de Zsarolyani (2006). Este autor llev o a cabo un estudio de diversos métodos comparativos, buscando determinar el método más propicio y efectivo para el caso particular de la ciudad de Maracay, para posteriormente realizar una predicción de radioatenuación troposférica por lluvia entre los años 2006 y 2010.

El observatorio meteorológico empleado por ese trabajo está ubicado en la ciudad de Maracay, en la Base Aérea Mariscal de Sucre, registro internacional número 80413, latitud 10 15'N y de longitud 67 39'W, con una elevación de 436 metros sobre el nivel del mar.

El observatorio nombrado pertenece al Servicio de Meteorología de la Aviación, Venezuela. Dicho ente es el representante de la nación en la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el cual es el organismo encargado de dictar las políticas en materias de meteorología en el ámbito mundial. Es una asociación integrada por más de 189 países, con sede en Ginebra. Para obtener los datos del observatorio se procedió a contactar directamente al alto mando de la militar de la Aviación Militar Bolivariana, quienes prestando total colaboración suministraron la data certificada por el Servicio de Meteorología, data que se puede observar en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Medidas de precipitación mensual para la ciudad de Maracay (mm/mes) desde enero del 2006 hasta julio del 2013**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2006	4.9	0.001	0.001	0.001	169.1	114	135.7	134	160	139	93	12.6
2007	26	0.2	32.9	30.6	98.8	127.3	89.6	241.3	90.6	146	8.4	2.1
2008	0.001	0.1	2.1	67.9	80.5	48.1	151	91.6	203.1	157.3	48	7.8
2009	10	3.2	2.2	16.9	90.4	58.1	102.6	137.5	145.4	0.001	0.001	0.001
2010	0.001	0.001	9.5	180.1	212.5	295.1	181	178.1	85.3	73	148.7	6.2
2011	12.1	15	3.6	58.4	131.2	130.6	238.8	217.3	140.3	106.3	61.7	41.9
2012	1.1	3.6	24.5	33.6	135.5	208.2	107.3	279	185.4	95.2	10.1	8.5
2013	0.001	0.001	8.4	89.2	58.7	101	97.4					

**Fuente:** elaboración propia (Datos aportados de la Aviación Militar Bolivariana, 2013).

De esta manera, una vez obtenido los datos oficiales de lluvia por el mismo ente emisor empleado por el trabajo utilizado como referencia, se puede entonces proceder a realizar una comparación fidedigna de la data pronosticada en contraposición a la data de lluvia real.

Fase II. Comprobación de la eficacia del método de predicción:

En la segunda fase se efectuó la comparación entre los datos predichos con el método propuesto ARIMA(2,0,2)(1,1,1)<sub>12</sub>, y la data de lluvia real registrada entre los años 2006 y 2010, los cuales son los años con los que se cuenta tanto con la data estimada como la



data de lluvia real. Para poder determinar la eficacia del método de predicción, se optó por someter a ambos grupos de datos a una prueba T Student para datos relacionados o apareados, partiendo de la premisa de que se desea calcular la relación de dos variables pertenecientes a un mismo grupo.

Para ello, se optó por el uso del software de análisis estadístico SPSS, con el cual se aplicó el procedimiento estándar para el cálculo de nivel de correlación entre dos conjuntos de valores de cantidad de lluvia mensual (mm/mes), en este caso, la data de lluvia predicha con la data de lluvia real registrada.

Luego de comprobar normalidad en la data, se procede al análisis de correlación aplicando la prueba T Student para datos relacionados, partiendo del supuesto de que se tratan de dos grupos de variables pertenecientes a un mismo grupo, en este caso, la data de lluvia presente en la ciudad de Maracay. Los resultados se aprecian en los cuadros 2 y 3. El principal punto de interés, es el determinar si al variar un grupo de datos, bien sea el concerniente a precipitación real o estimada, de igual forma el otro grupo de datos deberá variar de manera similar. A mayor grado de correlación, mayor nivel de efectividad tendrá el modelo. Para su cálculo se necesita de dos grupos de data de dimensión similar e igual número de muestras.

**Cuadro 2. Estadísticos de muestras relacionadas, Prueba T Student entre precipitación estimada y precipitación real del 2006 al 2010**

	Media	N	Desviación t��p.	Error t��p. de la media
Par 1 Precipitación estimada	74.9822	60	60.67323	7.83288
precipitación real	77.4902	60	75.40044	9.73416

**Fuente:** elaboración propia.

Tomando los doce meses de cada año para un total de sesenta meses en estudio, representados por el valor N, en el Cuadro 2 se puede observar cómo la media de la precipitación estimada con el método en estudio, cuyo valor es de 74,9822 (mm/mes), es ligeramente menor a la media registrada por el observatorio meteorológico en la región, la cual fue de 77.4902 (mm/mes).

A pesar de ser menor, es sumamente cercana al valor real, tomando en cuenta los fenómenos atmosféricos que se pudiesen presentar en el período estudiado, los cuales son sumamente difíciles de predecir, razón por la cual se tienden a discriminar en este tipo de estudios.

Sin embargo, en los meses donde se presenta mayor diferencia entre los valores de lluvia real y pronosticada, se pudo observar un interesante comportamiento en relación a la presencia de los fenómenos El Niño y La Niña, tal como se discutir   más adelante.

La similitud de las medias no es suficiente para afirmar la eficacia del método predictivo, por lo tanto se procede a observar el nivel de correlación. El   ndice de

correlación proporciona un panorama claro sobre el grado de similitud existente entre ambos grupos de datos, en donde uno (1) representa un grado de correlación perfecta; esto significa que ambos grupos de datos varían de manera exacta ante eventos y medidas de tiempo específicas.

**Cuadro 3. Correlaciones de muestras relacionadas, Prueba T Student entre precipitación estimada y precipitación real del 2006 al 2010**

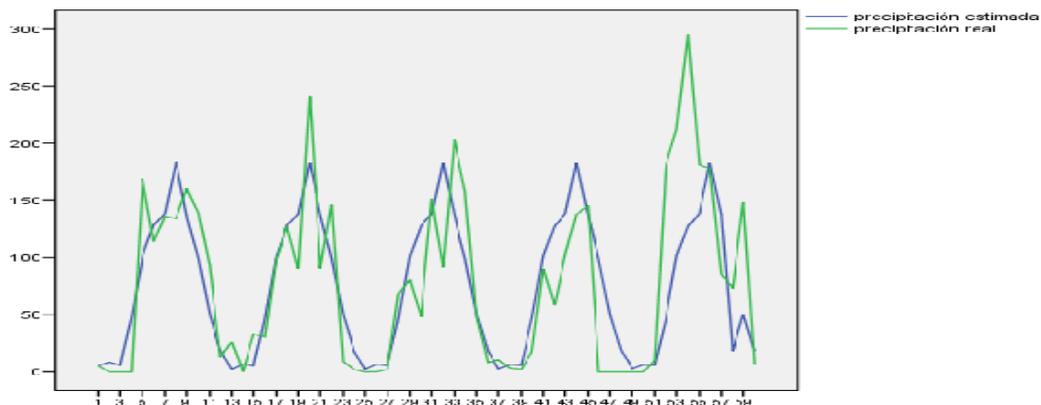
	N	Correlación	Sig.
Par 1 precipitación estimada y precipitación real	60	.749	.000

**Fuente:** elaboración propia.

En el Cuadro 3 se puede apreciar un nivel de correlación de 0.749, el cual es bastante alto, considerando lo expuesto en el párrafo anterior, donde se expresa que a medida que el índice sea más cercano a 1, o en otras palabras, cien por ciento de correlación, mayor será la similitud en el comportamiento entre ambos grupos de datos, lo que se traduce en el nivel de acierto del método de predicción.

Esto nos da a entender que en efecto ambos grupos de datos están altamente relacionados, existiendo una correlación estadística altamente significativa. Con el fin de llevar a cabo una observación detallada del nivel de acierto de manera gráfica, se procede a observar el gráfico de ambos grupos de datos superpuestos; en donde tanto los ciclos de lluvia, como los de sequía deberían presentar una frecuencia que vaya acorde a un nivel de acierto tan elevado como el arrojado en la prueba T Student para datos correlacionados. En la Figura 1 se puede observar el diagrama comparativo del comportamiento de la lluvia real y la lluvia pronosticada.

**Figura 1. Diagrama comparativo de lluvia estimada y real (mm/mes) para la ciudad de Maracay entre el año 2006 y 2010**



**Fuente:** elaboración propia.



En el diagrama de la Figura 1 se puede apreciar cómo la data de lluvia mensual estimada y la de lluvia real tienen un comportamiento similar, con un solapamiento importante entre ambos gráficos a través del tiempo, los ciclos de lluvia se repiten con gran exactitud, con ciertos picos en la lluvia real que salen del comportamiento típico, atribuibles a fenómenos atmosféricos que no forman parte del comportamiento característico del clima de la región.

Durante los meses de enero, febrero y marzo se observa una importante sequía, para luego iniciar un ciclo de lluvias entre los meses de abril y octubre, tal como lo muestra la curva de la Figura 1, para finalmente disminuir nuevamente la cantidad de lluvia registrada en los meses de noviembre y diciembre. Este comportamiento es observable tanto en la data de lluvia estimada como en la de lluvia real.

Todas estas observaciones permiten afirmar que los índices previamente seleccionados para el método predictivo empleado por el estudio que sirve de base para la presente comparación, es decir,  $ARIMA(2,0,2)(1,1,1)_{12}$  es adecuado para la predicción de lluvia en la zona en estudio, mostrándose como una herramienta importante para la predicción de lluvia en la ciudad de Maracay.

#### Fase III: Predicción de la intensidad de lluvia:

Una vez determinada la eficacia del método propuesto, se procede entonces a realizar la predicción de lluvia en la ciudad de Maracay hasta el año dos mil quince.

Para efectos de comprobación, se optó por realizar un predicción teórica partiendo como referencia desde el año dos mil seis, obteniendo como primer año predicho el año dos mil siete con la finalidad de cotejar la data real con la nueva data estimada mediante el uso del método predictivo comprobado y poder descartar posibles errores de cálculo. El método a emplear, como ya se indicó es el método de pronóstico de promedio móvil integrado de auto regresión (ARIMA) con los coeficientes determinados óptimos en la fase anterior,  $AR(1)$ ,  $AR(2)$ ,  $MA(1)$ ,  $MA(2)$ ,  $AR(1)_{12}$  y  $MA(1)_{12}$ . Nuevamente, se hace uso del SPSS para efectuar el análisis de los datos.

Se utilizan los datos obtenidos de la Fuerza Aérea en su totalidad para efectuar la predicción, partiendo del mes de enero del año 2006 hasta el mes de julio del año 2013, la data completa obtenida del Servicio de Meteorología se puede observar en el Cuadro 1.

Los nuevos datos de lluvia en base a (mm/mes) predichos hasta el 2015 mediante el uso del método  $ARIMA(2,0,2)(1,1,1)_{12}$  se pueden observar en el Cuadro 4.



**Cuadro 4. Pronóstico de precipitación estimada mensual para la ciudad de Maracay a de Agosto del 2013 a Diciembre del 2015**

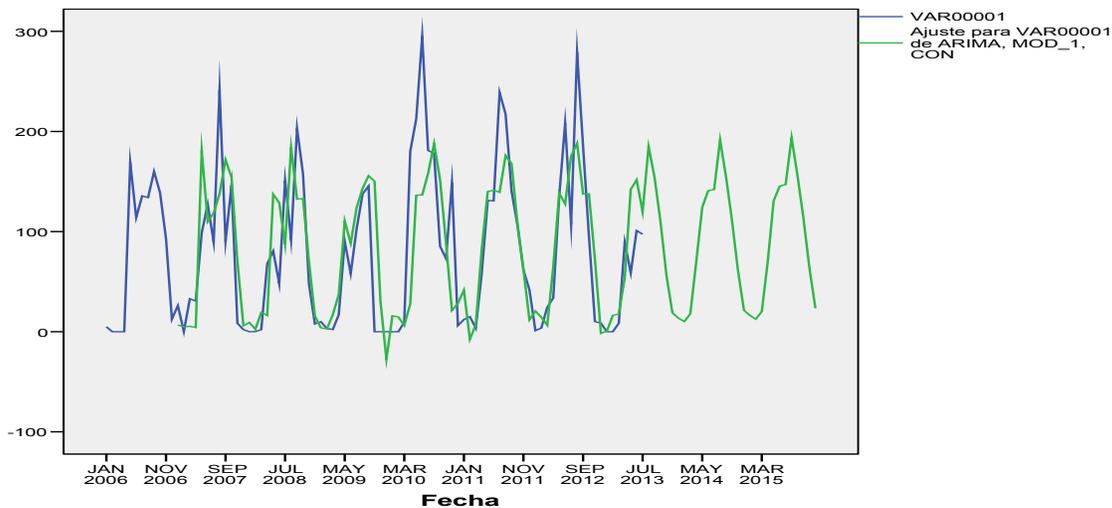
Año	Mes	(mm/mes)
2013	agosto	184.83448
2013	septiembre	154.00141
2013	octubre	110.14051
2013	noviembre	56.27151
2013	diciembre	18.80281
2014	enero	13.59277
2014	febrero	10.18315
2014	marzo	17.77642
2014	abril	69.93616
2014	mayo	124.24025
2014	junio	140.7245
2014	julio	142.05565
2014	agosto	191.64151
2014	septiembre	154.2758
2014	octubre	111.27413
2014	noviembre	61.33208
2014	diciembre	21.48619
2015	enero	16.28258
2015	febrero	12.60248
2015	marzo	20.16939
2015	abril	70.23189
2015	mayo	130.74435
2015	junio	145.33744
2015	julio	147.03043
2015	agosto	193.84342
2015	septiembre	155.99905
2015	octubre	113.06034
2015	noviembre	63.40599
2015	diciembre	23.38594

**Fuente:** elaboración propia.

Mediante el uso de la data predicha en el Cuadro 4 se procederá entonces a calcular la radioatenuación troposférica por lluvia. En la Figura 2 se puede observar el diagrama de la data de lluvia real en contraste con la data pronosticada. La predicción se realizó tomando la considerando la totalidad de la data de lluvia real disponible a partir del 2006.

El motivo por el cual se tomó en cuenta toda la data histórica disponible para la aplicación del método  $ARIMA(2,0,2)(1,1,1)_{12}$  es que en los estudios estadísticos, el nivel de exactitud y cercanía a la realidad aumenta proporcionalmente con la cantidad de muestras disponibles, en este caso, los promedios de lluvia mensual.

**Figura 2. Diagrama comparativo de lluvia pronosticada y real (mm/mes) para la ciudad de Maracay entre el año 2006 y 2015**



**Fuente:** elaboración propia.

En el diagrama comparativo de la Figura 2 se observa la data de lluvia real partiendo desde el mes de enero del 2006, en contraste con la nueva data pronosticada, la cual continúa hasta el 2015. Se observa cómo existe un correcto ajuste de la curva, observándose picos de data de lluvia real que sobresalen en períodos atribuibles a eventos meteorológicos tales como el niño y la niña. La relación y presencia de dichos fenómenos serán discutidas más adelante.

La razón por la que se realiza un pronóstico de tres años, y no más, radica en el comportamiento exponencial que presenta el modelo en cada ciclo de predicción, aumentando los valores predichos de manera constante, disminuyendo el grado de exactitud. Sin embargo, el aumento registrado en un período de 3 años es despreciable.

Una vez obtenido el promedio de lluvia pronosticada mensual, se procede a la conversión de promedio de lluvia por hora (mm/hr), necesario para el cálculo de radioatenuación troposférica, tal como lo establece la Recomendación ITU-R P.838-3 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1992).

Fase IV: Cálculo de la radioatenuación troposférica:

Para la última fase se utilizan los datos pronosticados en la fase III para el cálculo de radioatenuación troposférica por lluvia estimada hasta el año 2015.

Mediante el empleo del software matemático MATLAB, se aplica la Recomendación ITU-R P.838-3 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1992) para el cálculo de radioatenuación mensual. Para tal fin, se hace uso de un algoritmo desarrollado en la Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín (URBE) el cual permite observar de

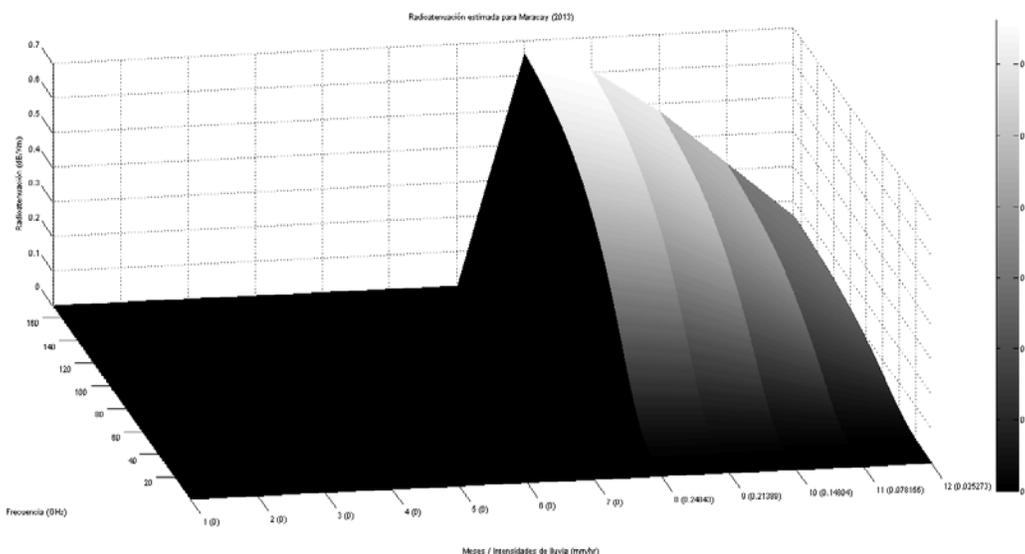
manera detallada el comportamiento de la radioatenuación troposférica por lluvia para los períodos en estudio.

Se calculó la radioatenuación anual estimada en las bandas de frecuencias comprendidas entre 1 GHz y 170 GHz para un ángulo constante de elevación del trayecto de onda igual a  $90^\circ$  y con una polarización circular de la señal, partiendo de la data de lluvia estimada desde el año 2013 hasta el año 2015, arrojando los resultados que se aprecian a continuación.

Para el año 2013 se estimó la radioatenuación a partir del mes de agosto, debido a que es el primer mes predicho en este estudio, recordando que la data real disponible usada como referencia abarca hasta el mes de julio del 2013; por lo tanto, con el fin de dar continuidad a la data estimada disponible para futuras investigaciones, se realiza una predicción que incluye meses pasados al momento de publicar la presente investigación.

Se pudo observar que la mayor radioatenuación presente para el año 2013 corresponde al mes de agosto con un valor de 0.6621 dB/Km para 170 GHz, por otra parte, ya que los sistemas inalámbricos de comunicación que operan en frecuencias superiores a 10 GHz son los más afectados por la presencia de eventos de lluvias tal como lo expresa Araujo et al. (2010), se considera significativo para fines prácticos los valores a partir de esta frecuencia, en donde el valor mínimo es en el mes de diciembre con un valor de 0.00012534 dB/Km. En la Figura 3 se puede observar la gráfica que representa la radioatenuación mensual experimentada en las distintas frecuencias.

**Figura 3. Diagrama de radioatenuación estimada para la ciudad de Maracay para el año 2013**



**Fuente:** elaboración propia.

En la Figura 3 se observa cómo la radioatenuación estimada para la ciudad de



Maracay experimenta un decremento progresivo partiendo del mes de agosto hasta el mes de diciembre; recordando que la data de enero a julio no se muestra por no formar parte de la predicción realizada en el presente estudio.

La gráfica muestra la radioatenuación en los diversos meses del año, representados numéricamente del uno (1) al doce (12); en función de la frecuencia y la radioatenuación expresada en dB/Km. Se puede observar cómo de manera constante se cumple que a mayor frecuencia tenga la señal, mayor será la radioatenuación experimentada.

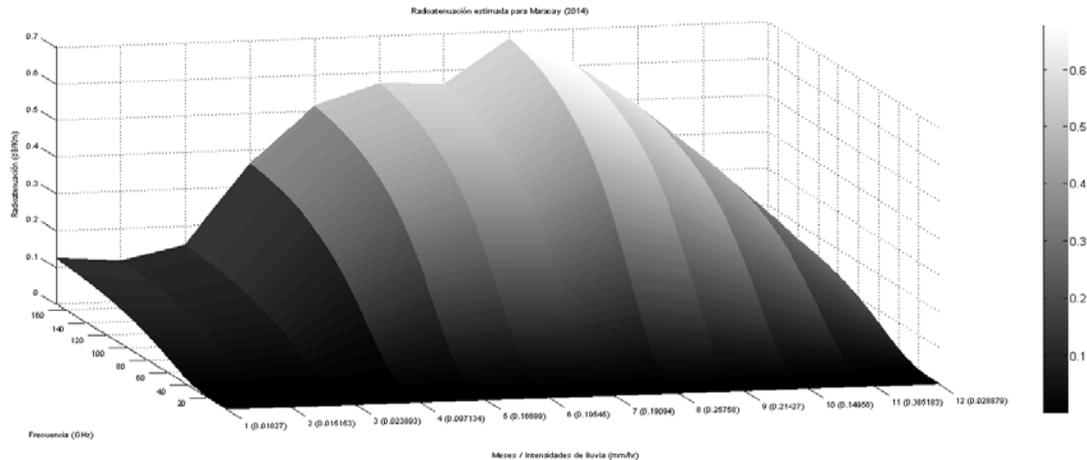
Así mismo, el nivel de radioatenuación es directamente proporcional al nivel de lluvia, dado que a mayor nivel de precipitación, mayor es el nivel de radioatenuación registrado como se puede ver si se compara los datos de radioatenuación estimada con los de la lluvia, expresados en el Cuadro 5.

Para el año 2014 se pudo apreciar cómo el mes con mayor nivel de radioatenuación estimada es agosto, al igual que en el año 2013, con un valor de 0.6777 dB/Km para la banda de 170 GHz. El menor nivel de radioatenuación significativa se experimenta en el mes de febrero, con un valor de 6.6107E-05 dB/Km para la banda de 10 GHz.

El comportamiento de la segunda mitad del año es, en general, similar al año anterior, observándose un decremento constante a partir del mes de agosto hasta el final del año. Si observamos los meses de enero y febrero, podemos apreciar cómo siguen la tendencia del año 2013 de constante decremento, para luego comenzar nuevamente a incrementarse paulatinamente hasta el mes de agosto. Esto corresponde a los ciclos de lluvia experimentados a lo largo del año en la ciudad.

Por otro lado, se cumple también la relación de que a mayor nivel de frecuencia, mayor es el nivel de radioatenuación como era de esperarse. La radioatenuación sigue el mismo patrón de comportamiento respecto a la lluvia observado en el año anterior, en donde a mayor precipitación, mayor es el nivel de radioatenuación experimentado por la señal. La Figura 4 muestra la radioatenuación calculada mensual en función de la frecuencia.

**Figura 4. Diagrama de radioatenuación estimada para la ciudad de Maracay para el año 2014**

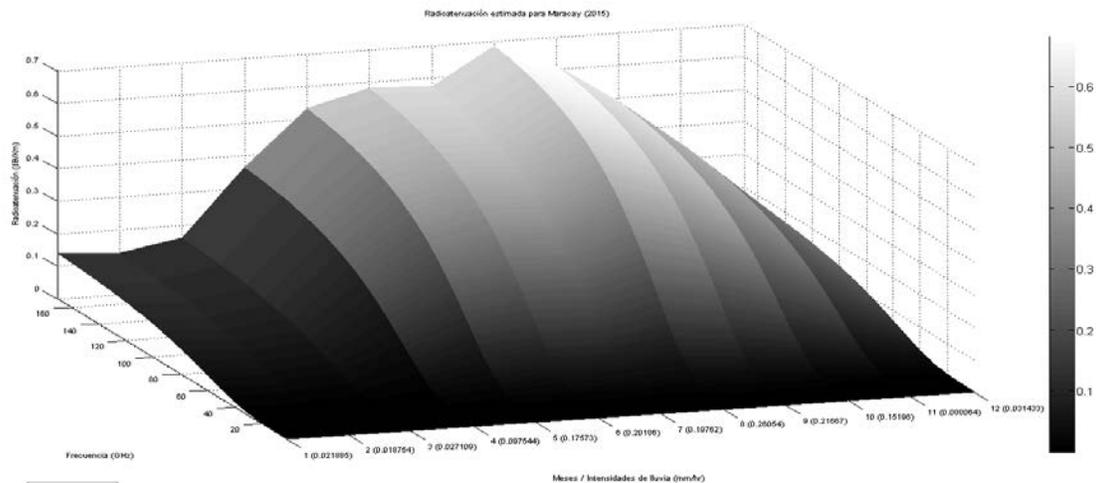


**Fuente:** elaboración propia.

Tal como se realizó para el año anterior, en la Figura 4 se puede observar cada mes representado numéricamente del uno (1) al doce (12) en el eje X, la frecuencia de la señal en GHz es observada en el eje Y de la figura, y finalmente, en el eje Z se expresa el nivel de radioatenuación en dB/Km. En la leyenda se aprecia cómo a medida que aumenta la radioatenuación, la intensidad de gris disminuye para efectos de facilitar la observación del comportamiento.

Para el año 2015, se realizó el mismo procedimiento que en los dos años previos, dando como resultado nuevamente un mayor nivel de radioatenuación en el mes de agosto con un valor de 0.68266141 dB/Km para la banda de frecuencia de 170 GHz; en cuanto a la menor radioatenuación significativa, esta se presenta en el mes de febrero, tal como ocurre en el año anterior, arrojando en este caso un valor de 8.6021E-07 dB/Km para la banda de frecuencia de 10 GHz. El patrón de comportamiento es similar a los años que lo preceden, mostrando una disminución progresiva a partir de agosto hasta fin de año, y continúa el decaimiento experimentado en diciembre del año 2014 hasta febrero del 2015, para luego experimentar nuevamente un incremento progresivo hasta llegar a la mitad del año. En la Figura 5 es apreciable la gráfica del comportamiento de la radioatenuación para la ciudad de Maracay estimada para el 2015.

**Figura 5. Diagrama de radioatenuación estimada para la ciudad de Maracay para el año 2015**



**Fuente:** elaboración propia.

Luego de observar el comportamiento de los diferentes meses, se puede determinar un patrón constante de radioatenuación entre los diferentes años, lo que puede prever el comportamiento cíclico de la radioatenuación en la zona.

### DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la presente investigación, partiendo de las bases teóricas empleadas, se demostró el posible efecto negativo al que están expuestas las señales electromagnéticas en la región en estudio a lo largo del año debido a la radioatenuación troposférica por lluvia, así como determinar el grado de efectividad del método predictivo aplicado en estudios anteriores basándonos en comparaciones con los datos históricos. Es importante resaltar la efectividad y prontitud con la que fue obtenida la data de lluvia real mediante la directa colaboración del departamento de meteorología de la Fuerza Aérea Bolivariana de Venezuela para la posterior comparación, efectuada en contraposición a la data de lluvia pronosticada por el método en estudio.

Por otra parte, es destacable el nivel de exactitud comprobado del método de pronóstico previamente propuesto para la localidad de Maracay por Zsarolyani (2006), el cual al momento de comparar los datos predichos con los reales registrados mostró un nivel muy alto de correlación con un valor de 0.749, así como un comportamiento ajustado a los ciclos de lluvia real registrados en la ciudad de Maracay.

Posteriormente, se calculó la precipitación mensual mediante la aplicación del método comprobado, lo cual permite observar la data estimada de precipitación hasta el año 2015, en donde se puede ver que el período que registra mayores precipitaciones es el comprendido entre abril y octubre, así como una disminución sensible a principios y final de año.



En este mismo orden de ideas, se puede sopesar un impacto probable de fenómenos atmosféricos anómalos no contemplados previamente en el modelo de predicción propuesto, que pudiesen afectar el nivel de exactitud del mismo; como por ejemplo el fenómeno El Niño o La Niña, los cuales si se observan los datos históricos obtenidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA) sobre la aparición de ambos fenómenos en años anteriores coinciden con períodos en los que el método predictivo arrojó valores menos exactos en relación a los reales (Cuadro 5), esto pudiera deberse a la presencia de fuertes lluvias o sequías no correspondientes al comportamiento típico estudiado hasta el momento; y por ende, no tomados en cuenta en el modelo predictivo.

**Cuadro 5. Comparativo de data de lluvia en relación a episodios del Niño/Niña según el índice oceánico del Niño (ONI) ocurridos entre el 2006 y el 2008**

Año	Mes	Precipitación estimada	Precipitación real	Cambios de temp. Oceánica (ONI)
2006	Agosto	184.09	134	0.5
2006	Septiembre	135.82	160	0.8
2006	Octubre	99.69	139	1
2006	Noviembre	50.42	93	1
2006	Diciembre	18.47	12.6	0.7
2007	Julio	137.56	89.6	-0.6
2007	Agosto	183.22	241.3	-0.8
2007	Septiembre	136.75	90.6	-1.1
2007	Octubre	99.12	146	-1.2
2007	Noviembre	50.01	8.4	-1.4
2007	Diciembre	18.26	2.1	-1.5
2008	Enero	2.39	0.001	-1.5
2008	Febrero	6.27	0.1	-1.2
2008	Marzo	5.32	2.1	-0.9
2008	Abril	46.41	67.9	-0.7
2008	Mayo	101.14	80.5	-0.5
2008	Octubre	98.94	157.3	-0.5
2008	Noviembre	50.18	48	-0.7
2008	Diciembre	18.09	7.8	-0.8
2009	Enero	2.56	10	-0.7
2009	Febrero	6.1	3.2	-0.5
2009	Junio	127.74	58.1	0.5
2009	Julio	137.89	102.6	0.6
2009	Agosto	182.88	137.5	0.8
2009	Septiembre	137.09	145.4	1.1
2009	Octubre	98.79	0.001	1.4
2009	Noviembre	50.33	0.001	1.6
2009	Diciembre	17.94	0.001	1.6
2010	Enero	2.71	0.001	1.3
2010	Febrero	5.96	0.001	1
2010	Marzo	5.64	9.5	0.6



2010	Junio	127.6	295.1	-0.9
2010	Julio	138.03	181	-1.2
2010	Agosto	182.74	178.1	-1.4
2010	Septiembre	137.23	85.3	-1.5
2010	Octubre	98,65	73	-1.5
2010	Noviembre	50.46	148.7	-1.5
2010	Diciembre	17.8	6.2	-1.4

**Fuente:** elaboración propia.

Según el Índice ONI (Climate Prediction Center, 2014), los cambios de temperatura oceánica por más de cinco grados ( $5^{\circ}$ ) en una duración mínima de tres meses consecutivos representan un episodio de El Niño en caso de temperaturas cálidas o La Niña en caso de bajas temperaturas.

Si se observa el Cuadro 5, los meses de mayor intensidad del fenómeno coinciden con los meses de mayor diferencia entre los datos de lluvia real y estimada por el método propuesto.

Para poder establecer una relación estadísticamente significativa haría falta un estudio más profundo, dado que el fenómeno tiene una frecuencia de ocurrencia mayor a un año, por lo cual para llevar a cabo un análisis con varias muestras sería necesaria la disponibilidad de datos correspondientes a varios años tanto de lluvia real como estimada, ya que tal como lo sugieren Box y otros (2008), se requieren de varias muestras de un mismo suceso en el tiempo para poder establecer una relación temporal. Sin embargo, al disponerse de dos estudios consecutivos como el de Zsarolyani (2006) y el presente trabajo, ya se dispondría de una muestra total de nueve años consecutivos, por lo que sería recomendable tomar en consideración esta relación en futuros estudios en pos de mejorar el método predictivo.

Finalmente, al calcular la radioatenuación, se comprobó que los meses de mayor precipitación presentan un mayor nivel de radioatenuación troposférica, especialmente en frecuencias altas como era de esperarse.

La mayor radioatenuación se registra en la banda de 170 GHz en el mes de agosto, con un valor de 0.6621 dB/Km para 2013, 0.6777 dB/Km en 2014 y 0.68266141 dB/Km para 2015. La radioatenuación registrada, sin embargo, es relativamente baja en general dada la intensidad de lluvia típica de la zona en estudio.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos y las experiencias adquiridas mediante el empleo de las herramientas de cálculo aplicadas, se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

Al momento de obtener los datos, se pudo acceder a los mismos mediante el contacto directo con el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana, la cual se presenta como una importante fuente de datos meteorológicos para los investigadores



que lo requieran. Para el an alisis de datos, se observó que el método ARIMA para series temporales puede ofrecer valores realmente precisos al momento de predecir el comportamiento de lluvia, específicamente, se pudo demostrar que los índices del método ARIMA  $(2,0,2)(1,1,1)_{12}$  son adecuados para la predicción de lluvia específica para la ciudad de Maracay, y que pudiese ser mejorado en el futuro de incluirse el efecto de otros fenómenos atmosféricos que no est n contemplados.

Finalmente, mediante el empleo de la norma ITU-R P.838-3 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1992) se pudo constatar cómo el comportamiento de la radioatenuación en la ciudad de Maracay es más apreciable a mayores frecuencias a mitad de año, y disminuye a principio y final del mismo.

En este orden de ideas, la aplicación de la norma mediante el algoritmo desarrollado en Matlab muestra el comportamiento detallado en distintas frecuencias, pudiéndose graficar los valores de radioatenuación, lo cual facilita la observación y el an alisis de los datos, presentándose como una importante herramienta para el estudio y posible diseño de sistemas de comunicaciones.

### RECOMENDACIONES

Al Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana: registrar el comportamiento de lluvia por hora, lo cual permitiría a los investigadores realizar pronósticos más exactos de lo que se obtiene con promedios mensuales.

A los entes interesados en implementar sistemas de comunicaciones en la región: partiendo del conocimiento del comportamiento predicho con el método propuesto, implementar medidas de contingencia como por ejemplo, las sugeridas en la recomendación ITU-R BO.794 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1992), la cual ofrece técnicas para reducir al mínimo el efecto de la influencia de la lluvia sobre el enlace de conexión, respecto a las características generales de los sistemas del servicio de radiodifusión por satélite. Esto podría representar una disminución de costos operacionales a largo plazo, así como una disminución en los costos del diseño de sistemas de comunicaciones en general.

Finalmente, a los investigadores de la Universidad Privada Dr. Rafael Bellos  Chac n (URBE) interesados en continuar la presente línea de investigación, hacer uso de la existencia de estudios de radioatenuación consecutivos en una misma región como en el caso de Maracay, lo cual permite observar fenómenos meteorológicos como El Niño o La Niña que se presentan con frecuencias mayores a un año, permitiendo la consecución de métodos predictivos más completos y exactos.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araujo, P.; Pérez, N.; Uzcátegui, J. y Paredes, J. (2010). Un nuevo modelo para la atenuación diferencial por lluvias en enlaces terrestres convergentes operando en frecuencias superiores a 10 ghz, para climas inter-tropicales, Universidad de los Andes, Venezuela. Revista Ciencia e Ingeniería. Volumen 31, número 3. (Pp. 133-142).



Box, G.; Jenkins, G. y Reinsel, G. (2008). Time Series Analysis: Forecasting and Control, Estados Unidos. Wiley.

Climate Prediction Center (2014). Changes to the Oceanic Niño Index (ONI). Documento en línea. Disponible en:  
[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_change.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_change.shtml).  
Consulta: 02/02/2014.

Kelsey, R.; Rosillo, M.; Montoya, C.; Durante, C. y Cendr s, J. (2011). Pronóstico de Radioatenuación Troposférica por lluvia en las ciudades de Bogotá y Medellín. Revista Electrónica de la Universidad Valle del Momboy. Volumen 5, edición 2. (Pp. 515-535).

De Arce, R. y Mahía, R. (2007). Modelos Arima. Documento en línea. Disponible en:  
[https://www.uam.es/personal\\_pdi/economicas/anadelsur/pdf/Box-Jenkins.PDF](https://www.uam.es/personal_pdi/economicas/anadelsur/pdf/Box-Jenkins.PDF).  
Consulta: 03/02/2014.

Unión Internacional de Telecomunicaciones (2005). Recomendación P. 838-3. Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción. Suiza. Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Unión Internacional de Telecomunicaciones (1992). Recomendación BO.794. Técnicas para reducir al mínimo el efecto de la influencia de la lluvia sobre el enlace de conexión respecto a las características generales de los sistemas del servicio de radiodifusión por sat elite. Suiza. Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Tomasi, W. (2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas. España. Pearson Educación.

Zsarolyani, A. (2006). Pronóstico de Radioatenuación Troposférica por lluvia para la ciudad de Maracay. Tesis de Maestría. Universidad Privada Dr. Rafael Bellos  Chac n. Venezuela.