



RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA PRONOSTICADA PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE ELEVACIÓN DEL ENLACE EN LAS CIUDADES VALERA Y TRUJILLO ENTRE EL 2010 Y 2014

(Tropospheric radioattenuation predicted for different elevation angles of the radio link in Valera and Trujillo between 2010 and 2014)

Recibido: 12/04/2011

Aceptado: 18/07/2011

Camacho, Martha

Universidad Rafael Belloso Chacín, Venezuela

mccamacho@urbe.edu.ve

Durante, Carlos

Universidad del Zulia, Venezuela

cdurante@luz.edu.ve

RESUMEN

La finalidad de esta investigación ha sido pronosticar la radioatenuación troposférica por lluvia para las ciudades Valera y Trujillo, entre los años 2010 y 2014 modificando el ángulo de elevación del enlace con el objeto de observar la relación e influencia que éste ejerce sobre la radioatenuación, utilizando para este propósito datos históricos de precipitaciones (2000-2009) para predecir el período mencionado con el método de pronóstico ARIMA para series temporales. El tipo de investigación es de campo y predictivo, su diseño se considera no experimental, longitudinal y ex post facto. El proyecto se realizó en 5 fases, la recopilación de los datos de lluvia del Sistema Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica y el Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea de Venezuela; la aplicación del método de pronóstico; consecutivamente, se determinó la intensidad de lluvia por hora pronosticada y se calculó la radioatenuación para cada ciudad; finalmente se presentan los resultados de la relación entre dicha radioatenuación y el ángulo de elevación al producirse modificaciones en el mismo. Los resultados obtenidos evidencian que el ángulo que presenta menor radioatenuación tanto para la ciudad de Valera como la de Trujillo es el de 30° y el de mayor nivel es el de 60°, lo que no representa una tendencia de los diferentes ángulos en un mismo año.

Palabras clave: Pronóstico, Radioatenuación, Lluvia, Ángulo de elevación, Enlace.

ABSTRACT

This research's purpose has been to predict the tropospheric radioattenuation by rain for Valera and Trujillo cities, between 2010 and 2014 by changing the elevation angle of the radio link in order to observe the relationship and the influence it exerts on the radioattenuation, using rainfall's historical data (2000-2009) to obtain the prediction of subsequent periods with the forecasting method Auto Regression Integrated Moving Average (ARIMA) for temporary series. The research is field-type and predictive, its design is considered non-experimental, longitudinal and ex post fact. The project was done in several phases: based on the rainfall data provided by the National System of Hydrological



and Meteorological Information and the Meteorological Service of the Air Force of Venezuela, consecutively, the intensity of rain in mm per hour was determined and then used in the radioattenuation's calculation for each city, to finally present the results of the relationship between the radioattenuation and the elevation angle of the radio link when the latter is changed. The obtained results demonstrate that the angle with the lowest radioattenuation for Valera and Trujillo is 30° and the highest level occurs for 60° , although no tendency was observed.

Keywords: Forecast, Radioattenuation, Rain, Elevation angle, Radio link.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la propagación de ondas electromagnéticas posee una larga historia de beneficiosas aplicaciones para la humanidad. Actualmente se puede apreciar que la sociedad moderna emplea cada vez más las tecnologías de comunicaciones por medio de ondas electromagnéticas.

Dentro de estas tecnologías se encuentran los sistemas inalámbricos que en la actualidad están por todas partes. A los ya habituales sistemas de telefonía móvil, se unen las redes de datos inalámbricas, la televisión digital terrestre o los radioenlaces. Para el correcto funcionamiento de estos sistemas resulta crucial un diseño adecuado del interfaz radioeléctrico.

Para Ramos (2010), el diseño de radioenlaces es una disciplina que involucra toda una serie de factores que determinan las prestaciones de un sistema fijo de acceso inalámbrico, como: la buena situación de las antenas, la correcta planificación del enlace radioeléctrico y la elección de un canal libre de interferencias.

Sólo con una buena planificación del enlace se puede conseguir evitar las interferencias y los desvanecimientos de la señal, alcanzando una alta disponibilidad en el sistema. Esta investigación centra su estudio en la radioatenuación troposférica como causa de interferencia en los radioenlaces, puesto que también se deben tener en cuenta los factores atmosféricos y meteorológicos, en este caso especialmente la lluvia.

En los radioenlaces troposféricos se producen atenuaciones de la señal durante su propagación, causadas por la absorción y dispersión en hidrometeoros como la lluvia, la nieve, el granizo o la niebla. Como consecuencia de los inconvenientes que pueden causar las precipitaciones en las telecomunicaciones, es necesario realizar pronósticos para conocer con anticipación la radioatenuación troposférica a fin de disminuir las posibilidades de falla en la transmisión de señales de los satélites.

Aunque este tipo de esfuerzos se realizan en otros países, Venezuela carece de un estudio completo especializado que permita elaborar un mapa de atenuación en tiempo real para el territorio nacional. A partir del año 2006, en Venezuela se comienzan a realizar estudios para analizar la radioatenuación por lluvia en varios estados y ciudades; con el objeto de contribuir en el suministro de estos datos dentro del país surge esta investigación orientada específicamente a estudiar las ciudades Valera y Trujillo del



estado Trujillo, donde hasta ahora no se ha realizado este tipo de estudio.

Los cálculos de la atenuación por lluvia en un radioenlace se utilizan para efectuar el diseño de cobertura o alcance del sistema de radiocomunicaciones dando un cierto valor de disponibilidad o calidad de servicio. Para lograr esto, en esta investigación se procede a variar los ángulos de elevación del enlace para observar cómo influye este cambio en la radioatenuación.

La predicción de la atenuación producida por la lluvia se realiza a partir de información sobre las estadísticas de intensidad de precipitación de la zona a estudiar (Valera y Trujillo). El método de pronóstico utilizado es el ARIMA debido a que, en un estudio realizado anteriormente por Zsarolyani (2007) para comparar diferentes técnicas de predicción, se comprobó que es el más eficiente para pronosticar estos datos meteorológicos.

La investigación se desarrolló en cinco fases, comenzando con la recopilación de los datos de estaciones meteorológicas de la zona, los cuales fueron suministrados por el Sistema Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica (SINAIHME), en la ciudad de Trujillo; y el Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea de Venezuela en Valera hasta el año 2009.

Seguidamente se realizó la aplicación y análisis del Método de Pronóstico ARIMA, el posterior cálculo de la intensidad de lluvia en mm/h, la determinación de la radioatenuación troposférica para los diferentes ángulos en cada una de las localidades desde el año 2010 al 2014, y finalmente se estableció la relación de la radioatenuación con el ángulo de elevación del enlace.

BASES TEÓRICAS

TROPOSFERA

Para Cocco (2003), la troposfera: es la capa de aire que está en contacto con la superficie terrestre, por lo que es la más densa, pues se concentra en ella el 90% del peso de la atmósfera. Sus características principales son las corrientes verticales debidas al calor, la variación vertical de la temperatura (0,6 °C por cada 100 metros de altitud), la moderación de las oscilaciones de temperatura a causa del día y la noche, y la formación de los fenómenos meteorológicos.

Esta capa es la más importante para la meteorología, pues en ella se producen las nubes, las lluvias, las tormentas, los vientos, entre otros. La altura de la tropósfera es de más o menos 10 km, y su frontera con la capa superior se denomina tropopausa. No obstante, el confín de la tropósfera no es muy conocido, especialmente en el hemisferio sur. En el Ecuador parece llegar a una altitud de 16 km, mientras que en los polos sólo llega a los 8 km.

LLUVIA

Según el Diccionario de Términos Meteorológicos (2010), es una precipitación de agua en forma de gotas que se produce cuando éstas alcanzan un diámetro superior a los 0,5 mm y caen a la tierra por la gravedad a una velocidad superior a los 3 m/s. La lluvia se

expresa en milímetros de agua y equivale al agua que se acumularía en una superficie horizontal e impermeable de 1 metro cuadrado durante el tiempo que dure la precipitación. Actualmente, la recepción de señales se ve afectada por fenómenos atmosféricos como la lluvia, una de las principales causas que afectan la propagación de la energía electromagnética interrumpiendo la transmisión.

INTENSIDAD DE LLUVIA

Martínez (2006) expone que la intensidad de lluvia es el caudal de agua que pasa una determinada superficie, es decir, el volumen de agua caído por unidad de tiempo y superficie. La intensidad de lluvia depende de la duración de la lluvia, por lo que es necesario definir un intervalo de referencia, el cual en proyectos de saneamiento habitualmente se estudia para el caso de lluvias de corta duración.

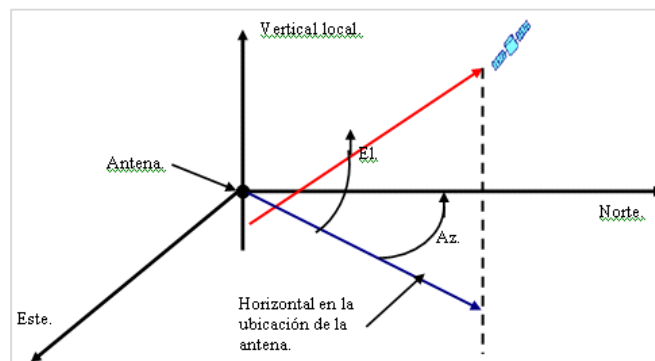
ÁNGULO DE ELEVACIÓN DEL ENLACE

Para Angulo y Hernández (2005), el ángulo de elevación es el formado entre la dirección de viaje de una onda radiada desde una antena de estación terrena y la horizontal, o el ángulo de la antena de la estación terrena entre el satélite y la horizontal, como se muestra en la Figura 1.

Entre más pequeño sea el ángulo de elevación, mayor será la distancia que una onda propagada debe pasar por la atmósfera de la Tierra. Como cualquier onda propagada a través de la atmósfera de la Tierra, sufre absorción y, también, puede contaminarse severamente por el ruido. De esta forma, si el ángulo de elevación es demasiado pequeño y la distancia de la onda que está dentro de la atmósfera de la Tierra es demasiado larga, la onda puede deteriorarse hasta el grado que proporcione una transmisión inadecuada. Generalmente, 5° es considerado como el mínimo ángulo de elevación aceptable.

El ángulo de elevación afecta severamente la intensidad de la señal de una onda propagada en las bandas de menor frecuencia. Esto se debe a las longitudes de onda más pequeñas asociadas con las frecuencias más altas. Además, en ángulos de elevación menores que 5° , la atenuación se incrementa rápidamente.

Figura 1. Ángulo de elevación (E1)



Fuente: Angulo y Hernández (2005).



La experiencia ha demostrado que si se dispone de datos de atenuación por lluvia a largo plazo en un determinado lugar, es más preciso escalar estas medidas para otra frecuencia u otro ángulo de elevación del enlace que predecir la atenuación a partir de los datos de intensidad de lluvia.

Test de visibilidad

Para que un satélite sea visible desde una estación terrena, su ángulo de elevación $\theta > 0$ grados. Lo normal es que el ángulo de elevación supere un mínimo:

- 5° en banda C
- 10° en banda Ku
- 20° en banda Ka y superiores

EFFECTO DE LA TROPOSFERA Y LA RADIOATENUACIÓN

Según Ramos (2010), en los radioenlaces troposféricos y por satélite se producen atenuaciones de la señal durante la propagación debidas a la absorción y dispersión causadas por hidrometeoros como la lluvia, la nieve, el granizo o la niebla.

Las ondas de radio que se propagan a través de una región lluviosa se atenúan como consecuencia de la absorción de potencia que se produce en un medio dieléctrico con pérdidas como es el agua. Adicionalmente, también se producen pérdidas sobre la onda transmitida debido a la dispersión por parte de la energía del haz que provocan las gotas de lluvia, aunque son menores.

Depende de la intensidad de la precipitación (medida en mm/h), de manera que cuanto más intensa es ésta mayor es la atenuación. Los radares de banda C sufren una atenuación media-alta de este tipo y por encima de los 10 cm de longitud de onda los efectos decrecen rápidamente. Se puede expresar la atenuación como:

$$K_r = K \int_0^y R(r)^\alpha \cdot dr \quad (1)$$

Los coeficientes K y α dependen principalmente de la frecuencia del radar así como de la temperatura y tipo de lluvia. Por lo tanto la atenuación depende de la longitud del camino del haz que atraviesa una zona con precipitación pero también de la intensidad de ésta. Tanto un camino largo con precipitación de intensidad moderada como un camino más corto con precipitación fuerte pueden determinar una atenuación importante.

Asimismo, la atenuación por hidrometeoros, especialmente la lluvia, depende de la intensidad, ya que a diferentes intensidades de lluvia puede resultar apropiado utilizar un método de pronóstico para obtener la probabilidad de que ocurra una precipitación, y sobredimensionando el sistema de forma que la atenuación adicional asociada a esta intensidad de lluvia no afecte al sistema.



Ramos (2010), en su trabajo de investigación afirma que aunque la atenuación causada por la lluvia puede despreciarse para frecuencias por debajo de 5 GHz, ésta debe incluirse en los cálculos de diseño a frecuencias superiores, donde su importancia aumenta rápidamente.

La atenuación específica debido a la lluvia puede calcularse a partir de la Recomendación UIT-R 838 (2005), donde la atenuación específica a (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h) mediante la ley exponencial que se muestra en la Ecuación 2, donde K y α son constantes que dependen de la frecuencia y de la polarización de la onda electromagnética.

En la Recomendación UIT-R 838 se proporcionan un mayor número de valores. Para obtener valores a frecuencias intermedias se recomienda aplicar interpolación, utilizando una escala logarítmica para la frecuencia y para K, y una escala lineal para α .

$$\gamma_R = kR^\alpha \text{ (dB / Km)} \quad (2)$$

Donde R representa la intensidad de lluvia en mm/hr, K y α son los coeficientes en función de la frecuencia dentro del rango de 1 GHz hasta los 1000 GHz, que difieren de la polarización vertical como la horizontal. Para el cálculo de los coeficientes según su polarización, K_H , K_V y α_H , α_V ; se utilizan las ecuaciones 3 y 4 con los valores de los cuadros 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

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

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

Donde:

f: frecuencia (GHz)

K: puede ser K_H o K_V

α : puede ser α_H o α_V .



Cuadro 1. Coeficientes para K_H

| j | a_j | b_j | c_j | m_k | c_k |
|---|----------|----------|---------|----------|---------|
| 1 | -5,3398 | -0,10008 | 1,13098 | | |
| 2 | -0,35351 | 1,2697 | 0,454 | | |
| 3 | -0,23789 | 0,86036 | 0,15354 | -0,18961 | 0,71147 |
| 4 | -0,94158 | 0,64552 | 0,16817 | | |

Fuente: Recommendation ITU-R P.838-3 (2005).

El Cuadro 1 indica los valores de las constantes para el coeficiente K_H de polarizaci  n horizontal, lo cual son par  metros importantes en el proceso del c  lculo de la atenuaci  n espec  fica de la lluvia. El Cuadro 2 indica los valores de las constantes para el coeficiente K_V de polarizaci  n vertical, lo cual son par  metros importantes en el proceso del c  lculo de la atenuaci  n espec  fica de la lluvia.

Cuadro 2. 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: Recommendation ITU-R P.838-3 (2005).

El Cuadro 3, indica los valores de las constantes para el coeficiente α_H de polarizaci  n horizontal, lo cual son par  metros importantes en el proceso del c  lculo de la atenuaci  n espec  fica de la lluvia.

Cuadro 3. 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 | -5,3761 | -0,9623 | 1,47828 | | |
| 5 | 16,1721 | -3,2998 | 3,4399 | | |

Fuente: Recommendation ITU-R P.838-3 (2005).

El Cuadro 4 indica los valores de las constantes para el coeficiente α_V de polarizaci  n vertical, par  metros importantes en el proceso del c  lculo de la atenuaci  n espec  fica de la lluvia.

Cuadro 4. Coeficientes para α_v

| j | a_j | b_j | c_j | m_α | c_α |
|---|----------|----------|----------|------------|------------|
| 1 | -0,07771 | 2,3384 | -0,76284 | | |
| 2 | 0,56727 | 0,95545 | 0,54039 | | |
| 3 | -0,20238 | 1,1452 | 0,26809 | | |
| 4 | -48,2991 | 0,791669 | 0,116226 | -0,053739 | 0,83433 |
| 5 | 48,5833 | 0,791459 | 0,116479 | | |

Fuente: Recommendation ITU-R P.838-3 (2005).

La ITU-R P.838-3 estipula que para la polarización lineal, circular y para cualquier geometría del trayecto, los coeficientes de la ecuación (2) pueden calcularse mediante los valores de las ecuaciones (3) y (4) utilizando las ecuaciones siguientes:

$$K = \frac{[K_H + K_V + (K_H - K_V)\cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{[K_H \alpha_H + K_V \alpha_V + (K_H \alpha_H - K_V \alpha_V)\cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2K} \quad (6)$$

Donde θ ($0 \leq \theta \leq 90$) es el ángulo de elevación del trayecto de la onda en grados y τ es la polarización en grados ($\tau = 45^\circ$ polarización circular). Finalmente, con los coeficientes K y α ya obtenidos, es posible calcular el valor de la radioatenuación por efecto de la lluvia en db/Km con la Ecuación 2 para un determinado valor de intensidad de lluvia R .

Entretanto, como las gotas de lluvia no son esféricas debido al efecto de rozamiento del aire, éstas tienden a achatarse formando esferoides con el eje vertical menos que el horizontal lo que significa que para la polarización vertical la atenuación es ligeramente menor que para la polarización horizontal, tal como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Coeficientes dependientes de la frecuencia para estimar la atenuación específica por lluvia

| Frecuencia (GHz) | K_H | α_H | K_V | α_V |
|------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| 1 | 0,0000259 | 0,9691 | 0,0000308 | 0,8592 |
| 5 | 0,0002162 | 1,6969 | 0,0002428 | 1,5317 |
| 10 | 0,01217 | 1,2571 | 0,01129 | 1,2158 |
| 25 | 0,1571 | 0,9991 | 0,1533 | 0,9491 |
| 50 | 0,6600 | 0,8084 | 0,6472 | 0,7871 |
| 100 | 1,3671 | 0,6815 | 1,3680 | 0,6765 |
| 200 | 1,6378 | 0,6382 | 1,6443 | 0,6343 |
| 500 | 1,5418 | 0,6253 | 1,5366 | 0,6272 |
| 1000 | 1,3795 | 0,6396 | 1,3822 | 0,6365 |

Fuente: Recommendation ITU-RP.838-3 (2005).



Para pronosticar los efectos de la lluvia sobre los enlaces en las telecomunicaciones, es fundamental disponer de los datos de observación meteorológica para establecer una forma probabilística de las diferentes intensidades de lluvia, para ello se requiere de series de observación largas para garantizar la fiabilidad estadística de los resultados.

SERIES TEMPORALES

Para Pepi  (2001), una serie temporal es un conjunto de observaciones ordenadas en el tiempo, también la evolución de un fenómeno o variable a lo largo de él. El objetivo del análisis de una serie temporal, de la que se dispone de datos en períodos regulares de tiempo, es el conocimiento de su patrón de comportamiento para prever la evolución futura, siempre bajo el supuesto de que las condiciones no cambiarán respecto a las actuales y pasadas.

MÉTODOS DE PRONÓSTICOS CUANTITATIVOS

Según Makridakis y Wheelwright (2004) una forma para pronosticar las precipitaciones en forma de lluvia es mediante el uso de los modelos cuantitativos. Estos modelos realizan el cálculo a partir de las observaciones históricas. Su propósito es que, al ser recopiladas sistemáticamente y aplicadas a un modelo que se ajuste a las características de la serie de datos, pueden proporcionar resultados más exactos que los modelos discrecionales y tecnológicos.

El modelo cuantitativo utilizado en esta investigación para series de tiempo es el Auto Regression Integrated Moving Average (ARIMA) o lo que es lo mismo, su traducción, Promedio Móvil Integrado de Auto Regresión en base a las etapas de la metodología establecida por Box-Jenkins.

PROMEDIO MÓVIL INTEGRADO DE AUTO REGRESIÓN (ARIMA)

ARIMA es el método de análisis de series de tiempo más adaptable ya que 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. Un modelo autoregresivo (AR) tiene la forma siguiente:

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

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 aquí el nombre de auto), es decir, observaciones de períodos anteriores. Por último, e_t es el error, o término residual que representa las perturbaciones aleatorias que no pueden ser explicadas por el modelo.

En el mismo orden de ideas, la Ecuación 25 se llama autoregresiva porque se asemeja a la ecuación de regresión ($Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p + e$). La  nica



diferencia es que $X_t = Y_{t-1}$, $X_2 = Y_{t-2}$, ..., $X_p = Y_p$, y así las variables independientes son simplemente valores rezagados de la variable dependiente con rezagos de tiempo 1, 2, ..., p períodos. Otro modelo posible es del tipo de promedio móvil (MA), que se representa de la siguiente forma:

$$Y_t = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (8)$$

Donde, como en el modelo anterior, e_t es el error o residuo y e_{t-1} , e_{t-2} ... e_{t-q} , son los valores anteriores del error. Finalmente ambas ecuaciones son semejantes con la excepción de que implica que la variable dependiente Y_t depende de valores previos del término de error más que de la variable misma.

Para los modelos mixtos ARMA, se parte de una combinación de las ecuaciones 13 y 14, 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:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t - \phi_1 e_{t-1} - \phi_2 e_{t-2} - \dots - \phi_q e_{t-q} \quad (9)$$

Para modelos con datos estacionales, las ecuaciones 13, 14 y 15 podrían no ser suficientes y debe completarse con parámetros estacionales. Como se ha explicado anteriormente, los modelos estacionales pueden ser: AR, MA y ARMA. Un modelo AR estacional con datos mensuales sería:

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

Para un modelo MA estacional mensual tendría la forma siguiente:

$$Y_t = e_t - \theta_{12} e_{t-12} \quad (11)$$

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

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

Estos tipos de modelos de series de tiempo han sido utilizados desde hace mucho tiempo: AR en 1926 y 1927; MA en 1937; y ARMA en 1954.

METODOLOGÍA DE BOX-JENKINS

La metodología de Box-Jenkins se basa en un método de predicción elaborado por etapas. Su propósito es de facilitar un proceso de identificación, estimación y verificación



para las series temporales que tienen en cuenta la dependencia existente entre los datos. Se utilizan cálculos y gráficas, tales como:

Las diferenciaciones, transformaciones logarítmicas, periodogramas, autocorrelaciones, frecuencias, entre otros; para así conseguir los parámetros adecuados y poder aplicar satisfactoriamente el método de pronóstico ARIMA.

En la primera etapa se postula un modelo específico que puede considerarse tentativamente como el modelo de predicción más apropiado para la situación. La segunda etapa, consiste en ajustar dicho modelo a los datos históricos disponibles y en realizar una verificación para determinar si es adecuado.

Si resulta ser un modelo no adecuado se regresa a la primera etapa y se identifica un método alternativo de los disponibles en la clase general. Finalmente, al aceptarse un modelo adecuado, la tercera etapa se lleva a cabo para el desarrollo de un pronóstico para algún período futuro.

Según Pérez (2005), el ajuste del modelo ARIMA resulta confiable cuando posee una significancia alta de sus parámetros, tomando en cuenta también las menores estimaciones del término de error del modelo y los límites inferiores y superiores de los intervalos de confianza para las predicciones.

PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

El tipo de investigación establecido para este estudio ha sido la investigación de campo enmarcada en un método predictivo, considerada a su vez como un diseño no experimental, longitudinal y ex post facto. A continuación se explica en resumen el procedimiento llevado a cabo durante las cinco fases de este proyecto, así como los resultados obtenidos en cada una de ellas.

RECOPIACIÓN DE LOS DATOS DE LLUVIA

En esta fase se conforma la recolección y el procesamiento de los registros de lluvia obtenidos del SINAIHME a través del Ministerio del Ambiente en la ciudad de Trujillo (estación Trujillo-Liceo).

Además, a través del Sistema de Climatología Computarizada perteneciente al Servicio de meteorología de la Fuerza Aérea de Venezuela, en la ciudad de Valera (estación Valera-Aeropuerto). La finalidad del levantamiento de información tuvo como objeto reunir datos que permitieran realizar el pronóstico planteado.

Los registros de las precipitaciones de lluvia que poseen estas estaciones para las ciudades Valera y Trujillo respectivamente, están medidos en mm y para la presente investigación se abarcan los datos comprendidos entre los años 2000 hasta 2009. Ambos inclusive, los cuales han sido revisados por los entes mencionados, siendo de vital importancia ya que se logra un aumento en la exactitud de los resultados para el pronóstico de la lluvia.



Cuadro 6. Muestra de medidas de lluvia mensuales de Valera (mm/mes)

| AÑO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 2000 | 217 | 86.1 | 46.2 | 85 | 76.1 | 115 | 0 | 60 | 247 | 206 | 168.4 | 46.3 |
| 2001 | 20.2 | 10.1 | 47.1 | 42.2 | 82.1 | 37 | 149 | 48 | 165 | 161 | 99.1 | 48 |
| 2002 | 15 | 46.2 | 51 | 161 | 77.1 | 59 | 23.4 | 103 | 73 | 139 | 34 | 14.2 |
| 2003 | 26.1 | 12 | 73 | 152 | 57 | 175 | 152 | 183 | 129 | 206 | 75.2 | 56 |
| 2004 | 27.3 | 12.2 | 100.2 | 201 | 98.1 | 13 | 76 | 99.2 | 234 | 144 | 182 | 28 |
| 2005 | 127 | 130.1 | 73.1 | 199.3 | 157 | 63.7 | 60.2 | 123 | 155 | 241.1 | 191 | 73.3 |
| 2006 | 134 | 41.8 | 110 | 66.9 | 101.4 | 36.6 | 65.3 | 130.2 | 101.6 | 340.9 | 64.6 | 87.2 |
| 2007 | 6.1 | 0 | 3.6 | 18 | 33 | 3 | 49.8 | 121.7 | 86.6 | 71.1 | 80.5 | 12.4 |
| 2008 | 1.3 | 129 | 13.7 | 16.8 | 53.6 | 31 | 44.4 | 200.7 | 94.8 | 183.7 | 135.1 | 15.3 |
| 2009 | 65.8 | 126.8 | 3.3 | 19.9 | 92.2 | 59.4 | 43.2 | 104.6 | 130.3 | 67.8 | 76.5 | 33.3 |

Fuente: Servicio de meteorología de la FAV.

Estos datos de precipitación se utilizan posteriormente para el cálculo del pronóstico de lluvia mensual con el programa para análisis estadístico SPSS. Los valores de lluvia obtenidos por estos organismos se detallan en los cuadros 6 y 7.

Cuadro 7. Muestra de medidas de lluvia mensuales de Trujillo (mm/mes)

| AÑO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2000 | 177 | 40.9 | 97.7 | 101.7 | 7.2 | 33.7 | 26.3 | 45 | 28.1 | 154 | 48.3 | 32 |
| 2001 | 54.3 | 22.1 | 85.6 | 93 | 36 | 20.2 | 32.7 | 9.2 | 107.5 | 98 | 67.2 | 38.2 |
| 2002 | 38 | 43.1 | 62 | 85.7 | 54.2 | 34 | 39.4 | 21.8 | 83 | 76 | 11.7 | 29.3 |
| 2003 | 20.5 | 0.9 | 138.4 | 97 | 68 | 38 | 24 | 32.6 | 93.7 | 127.1 | 82.8 | 90.1 |
| 2004 | 46.5 | 59.1 | 30.1 | 191.2 | 70.7 | 12.3 | 18.4 | 35.7 | 166.9 | 210.5 | 104.6 | 95.1 |
| 2005 | 69.4 | 100.3 | 6.2 | 87.7 | 204.6 | 39.1 | 5.3 | 167.7 | 55.3 | 84.4 | 165.5 | 38.5 |
| 2006 | 28.1 | 5.9 | 157.1 | 91.1 | 87.9 | 7.8 | 14.8 | 41.6 | 27.9 | 115.9 | 55 | 46.3 |
| 2007 | 65.1 | 8.7 | 135.5 | 102 | 8.9 | 26.4 | 47.9 | 96.3 | 125.6 | 153.5 | 76.9 | 126.9 |
| 2008 | 60.8 | 35 | 106 | 117.1 | 67.8 | 30.9 | 67.5 | 69.9 | 83.2 | 278 | 351.2 | 252 |
| 2009 | 87.9 | 46.3 | 98.2 | 71.4 | 147.6 | 14.3 | 25.7 | 85.1 | 27.3 | 70.6 | 98 | 71.8 |

Fuente: SINAIHME.

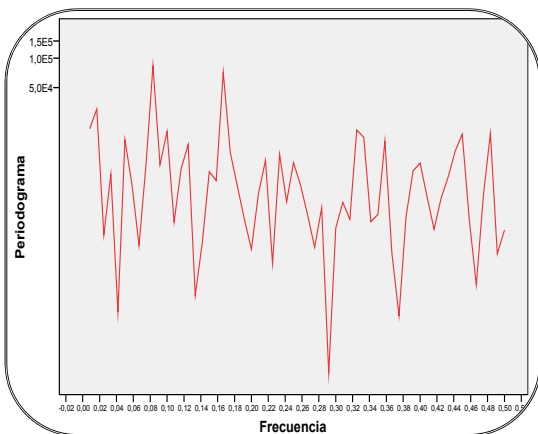
APLICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MÉTODOS DE PRONÓSTICO

En esta fase, para obtener un pronóstico apropiado con el método ARIMA se requiere el análisis de datos bajo la metodología establecida por Box-Jenkins descrita anteriormente. A continuación se detalla el procedimiento ejecutado para establecer el modelo y los parámetros para formular un pronóstico de los cinco (5) años siguientes (2010-2014), utilizando un software estadístico perteneciente a SPSS, Inc.

Primeramente se debe determinar la presencia de estacionalidad en la serie de datos

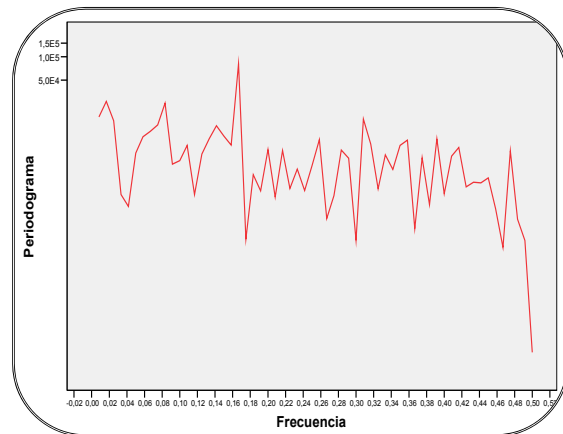
a través de la generación de un diagrama espectral. En las figuras mostradas a continuación se pudo deducir que existe estacionalidad para las dos ciudades ya que se muestra la presencia del segundo pico en la frecuencia 0.083, el cual corresponde al inverso del período utilizado que es de un año, es decir: $1/0.083 = 12$ meses.

Figura 2. Diagrama Espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real (Ciudad: Valera)



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Diagrama Espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real (Ciudad: Trujillo)

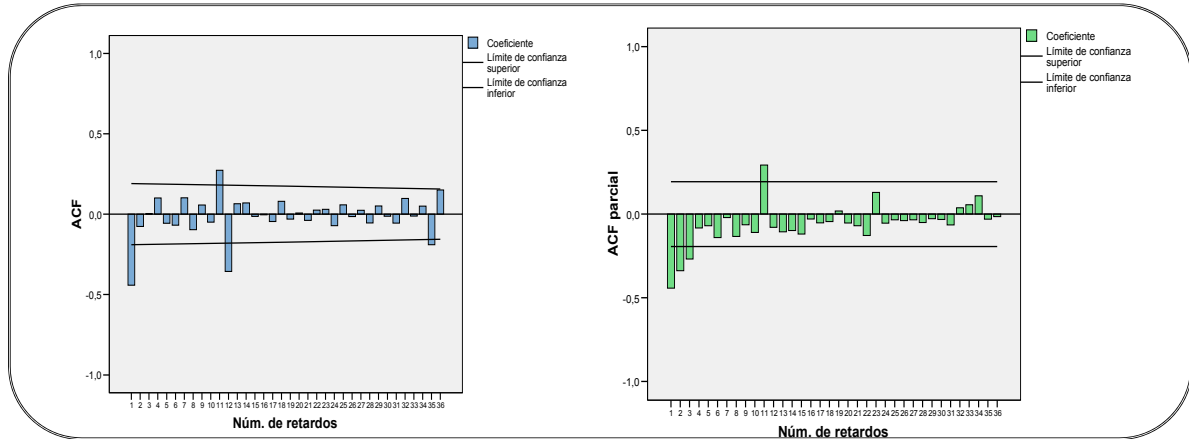


Fuente: elaboración propia.

Seguidamente se determina la existencia de estacionariedad en la serie de datos para las dos ciudades. Para esto fue necesario calcular las medias y las varianzas, las cuales difieren en los distintos años. Como no son iguales en todos los periodos, significa que no hay estacionariedad con respecto a la media y a la varianza.

Como tercer paso se aplican autocorrelaciones simples y parciales para postular una clase general de modelos ARIMA, al no visualizar un patrón válido para identificar un modelo apropiado con los datos de lluvia real para la ciudad de Valera, se efectuó otro ensayo aplicando el Logaritmo Natural, la Diferenciación No Estacional de orden 1 y la Diferenciación Cíclica de orden 1. Como se muestra en la Figura 4, se observó el decremento exponencial o tendencia a cero, logrando adquirir un patrón válido de autocorrelación.

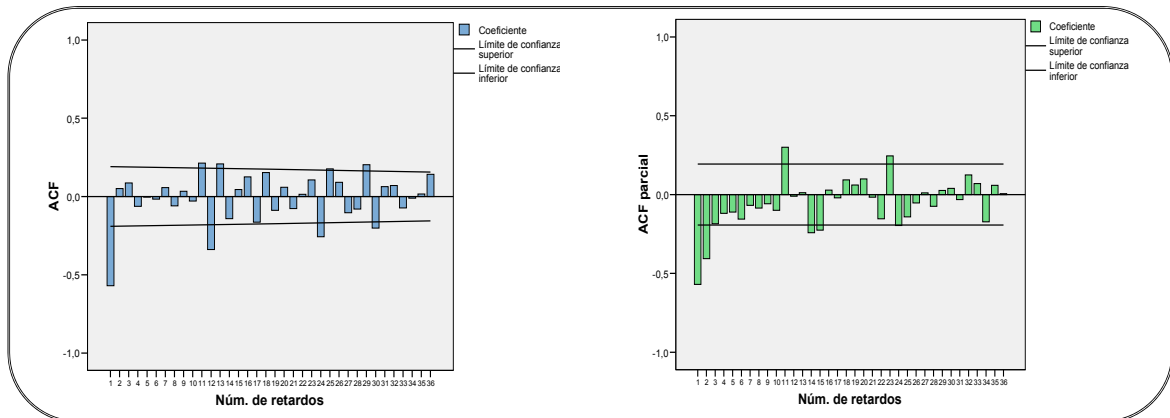
Figura 4. Autocorrelación Simple y Parcial aplicando Logaritmo Natural, Diferenciación de orden 1 y Diferenciación del ciclo de orden 1 (Ciudad: Valera)



Fuente: elaboración propia.

Igualmente para la ciudad de Trujillo se aplicaron autocorrelaciones simples y parciales para determinar el modelo ARIMA adecuado, dando como resultado el decremento exponencial que se observa en la Figura 5.

Figura 5. Autocorrelación Simple y Parcial aplicando Logaritmo Natural, Diferenciación de orden 1 y Diferenciación del ciclo de orden 1 (Ciudad: Trujillo)



Fuente: elaboración propia.

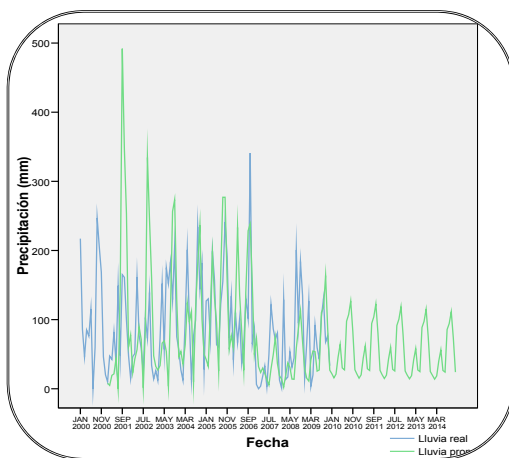
De este modo, se estimaron los parámetros para el modelo ARIMA a utilizar y se validaron a través de pruebas de diagnósticos residuales después de hacer las respectivas comparaciones, resultando los siguientes modelos adecuados para realizar el pronóstico en cada una de las localidades:

Valera: ARIMA (0, 1, 1) (0, 1, 1)

Trujillo: ARIMA (0, 1, 1) (0, 1, 1)

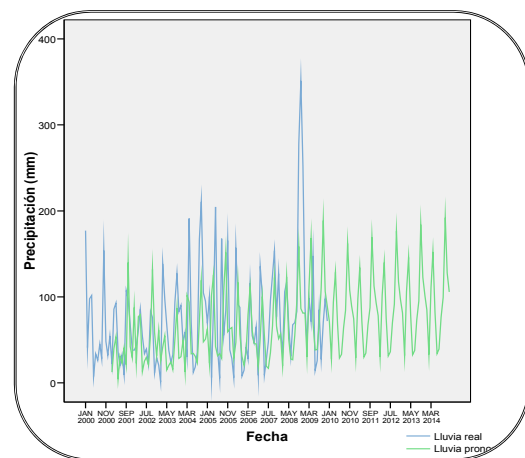
Finalmente, se realizaron los gráficos de secuencia que se muestran en las Figuras 6 y 7 para visualizar conjuntamente los valores de lluvia real y los pronosticados a partir de los modelos definidos.

Figura 6. Lluvia mensual real y pronosticada aplicando el Método de ARIMA (Ciudad: Valera)



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Lluvia mensual real y pronosticada aplicando el Método de ARIMA (Ciudad: Trujillo)



Fuente: elaboración propia.

ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA POR HORA

En esta fase, los resultados de lluvia pronosticados se dividieron entre el promedio de días de lluvia mensual (28, 29, 30 ó 31) y luego entre el número promedio de horas diarias de lluvia (24), obteniéndose así la intensidad de lluvia por hora correspondiente para cada mes en las dos ciudades y expresada en las tablas correspondientes.

Cuadro 8. Pronóstico de lluvia por hora para Valera (mm/h)

| AÑO | MESES | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2010 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| | 0,0293 | 0,0234 | 0,0281 | 0,0636 | 0,0861 | 0,0415 |
| 2011 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| | 0,0367 | 0,1311 | 0,1491 | 0,1703 | 0,1152 | 0,0369 |
| 2010 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| | 0,0283 | 0,0226 | 0,0272 | 0,0616 | 0,0833 | 0,0402 |
| 2011 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| | 0,0355 | 0,1269 | 0,1443 | 0,1649 | 0,1115 | 0,0357 |

Cuadro 8 (cont.)

| | | | | | | |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| 0 | 0,0274 | 0,0212 | 0,0263 | 0,0596 | 0,0806 | 0,0389 |
| 1 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 2 | 0,0344 | 0,1229 | 0,1397 | 0,1596 | 0,1079 | 0,0345 |
| 2 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| 0 | 0,0266 | 0,0212 | 0,0255 | 0,0577 | 0,0781 | 0,0377 |
| 1 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 3 | 0,0266 | 0,0212 | 0,0255 | 0,0577 | 0,0781 | 0,0377 |
| 2 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| 0 | 0,0257 | 0,0205 | 0,0246 | 0,0558 | 0,0756 | 0,0365 |
| 1 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 4 | 0,0322 | 0,1151 | 0,1309 | 0,1495 | 0,1011 | 0,0324 |

Fuente: elaboración propia.

En el Cuadro 8 se presentan los valores de intensidad de lluvia por hora para la ciudad de Valera. Igualmente, en el Cuadro 9 se muestran los resultados de la intensidad de lluvia por hora calculada para la ciudad de Trujillo.

Cuadro 9. Pronóstico de lluvia por hora para Trujillo (mm/h)

| AÑO | MESES | | | | | |
|------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| 0 | 0,0963 | 0,0415 | 0,1258 | 0,1786 | 0,0926 | 0,0400 |
| 1 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 0 | 0,0445 | 0,0865 | 0,1166 | 0,2179 | 0,1500 | 0,1201 |
| 2 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| 0 | 0,1004 | 0,0433 | 0,1312 | 0,1863 | 0,0966 | 0,0417 |
| 1 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | 0,0465 | 0,0903 | 0,1216 | 0,2273 | 0,1565 | 0,1253 |
| 2 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| 0 | 0,1048 | 0,0436 | 0,1369 | 0,1943 | 0,1008 | 0,0435 |
| 1 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 2 | 0,0485 | 0,0942 | 0,1269 | 0,2372 | 0,1633 | 0,1307 |
| 2 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| 0 | 0,1093 | 0,0471 | 0,1428 | 0,2027 | 0,1052 | 0,0454 |
| 1 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 3 | 0,0506 | 0,0983 | 0,1324 | 0,2474 | 0,1704 | 0,1363 |
| 2 | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN |
| 0 | 0,1140 | 0,0492 | 0,1490 | 0,2115 | 0,1097 | 0,0474 |
| 1 | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 4 | 0,0528 | 0,1025 | 0,1381 | 0,2581 | 0,1777 | 0,1422 |

Fuente: elaboración propia.

CÁLCULO DE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

En esta fase es importante destacar las características tomadas en cuenta para realizar los cálculos de radioatenuación, entre éstas cabe mencionar que para la frecuencia con que se trabaj  en esta investigación se tomaron los valores desde la banda L hasta la banda D, que representan el orden de las bandas de frecuencia de las microondas, se utiliza un rango de frecuencias comenzando desde 1 GHz hasta los 170 GHz con incrementos de 1 GHz cubriendo todas las designaciones de estas bandas.

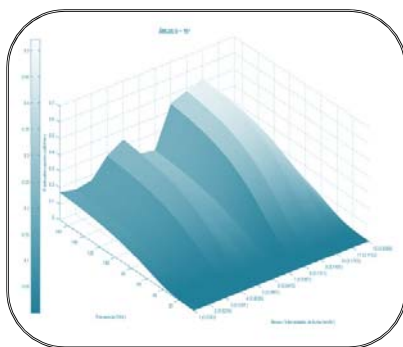
Para esto, se utilizó una polarización fija de la señal (circular de 45 ), pero se varían los ángulos de elevación del enlace (15 , 30 , 45 , 60 , 75 , 90 ) en cada año para posteriormente determinar cuál es el más conveniente de utilizar a lo largo de los próximos cinco (5) años para las ciudades Valera y Trujillo.

Todos estos datos fueron introducidos en un software matemático denominado MATLAB, desarrollado por The MathWorks, Inc. que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, dando origen así a una serie de pruebas con los diferentes casos de estudio, en los cuales al observarse similitudes casi exactas entre los gráficos de los diversos ángulos en un mismo año, se procede a continuación a mostrar por motivos de espacio, los resultados obtenidos con dos ángulos para dos años, tanto en Valera como Trujillo.

Iniciando con estos resultados se observa la Figura 8, donde la máxima radioatenuación registrada para el año 2010 en la ciudad de Valera con un ángulo de elevación de 15 , corresponde al mes de octubre con un valor de 0,52 dB/Km y con una intensidad igual a 0,17 mm/h.

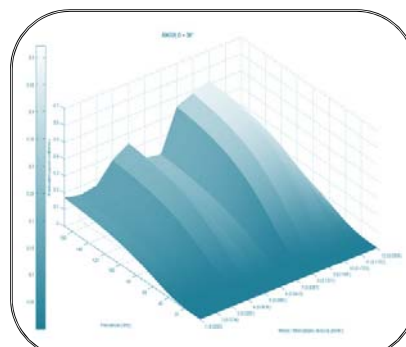
Las otras dos radioatenuaciones significativas registradas pertenecen a los meses de agosto y septiembre, con intensidades de lluvia iguales a 0,13 mm/h y 0,14 mm/h respectivamente. Tambi nse puede apreciar que en la Figura 9 ocurre lo mismo para el ángulo de 30 , dando como resultado para el mes de octubre una radioatenuación de 0,51 dB/Km, lo que conlleva a afirmar que no existen diferencias significativas en la radioatenuación al variar los ángulos.

Figura 8. Radioatenuación troposférica por lluvia con ángulo de elevación de 15  para el año 2010 (Ciudad: Valera)



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Radioatenuación troposférica por lluvia con ángulo de elevación de 30  para el año 2010 (Ciudad: Valera)



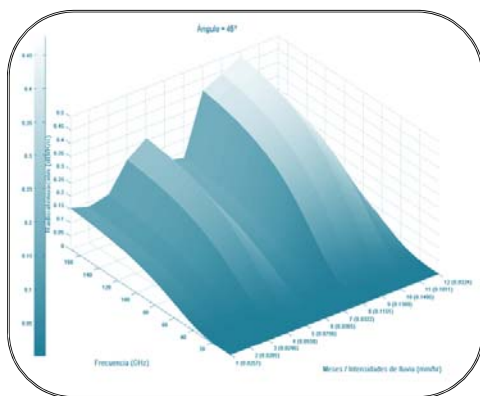
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 10 se observa que, la máxima radioatenuación registrada para el año 2014 en la ciudad de Valera con un ángulo de elevación de 45° , también corresponde al mes de octubre con un valor de 0,47 dB/Km y con una intensidad igual a 0,14 mm/h.

Las otras dos radioatenuaciones significativas registradas pertenecen a los meses de agosto y septiembre, con intensidades de lluvia iguales a 0,11 mm/h (0,40 dB/Km) y 0,13 mm/h (0,43 dB/Km) respectivamente.

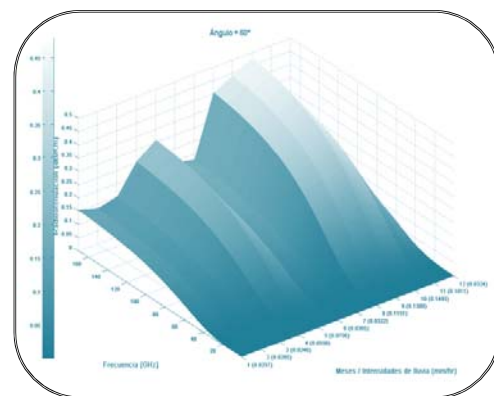
En la Figura 11, se nota que para el ángulo de 60° , se repite en el mes de octubre una radioatenuación de 0,47 dB/Km, con lo que se demuestra que aun no existen diferencias significativas en la radioatenuación al variar estos ángulos.

Figura 10. Radioatenuación troposférica por lluvia con ángulo de elevación de 45° para el año 2014 (Ciudad: Valera)



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Radioatenuación troposférica por lluvia con ángulo de elevación de 60° para el año 2014 (Ciudad: Valera)



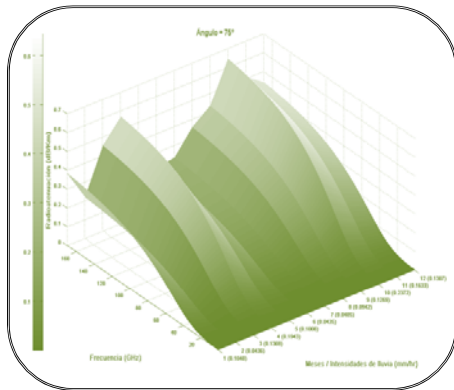
Fuente: elaboración propia.

En este orden de ideas, se procedió a realizar los mismos cálculos para la ciudad de Trujillo, dando como uno de los resultados la Figura 12, donde se observa que la máxima radioatenuación registrada para el año 2012 con un ángulo de elevación de 75° , corresponde igualmente al mes de octubre con un valor de 0,64 dB/Km y con una intensidad igual a 0,23 mm/h.

En esta ciudad las otras dos radioatenuaciones significativas registradas pertenecen a los meses de abril y noviembre, con intensidades de lluvia iguales a 0,19 mm/h (0,56 dB/Km) y 0,16 mm/h (0,50 dB/Km) respectivamente.

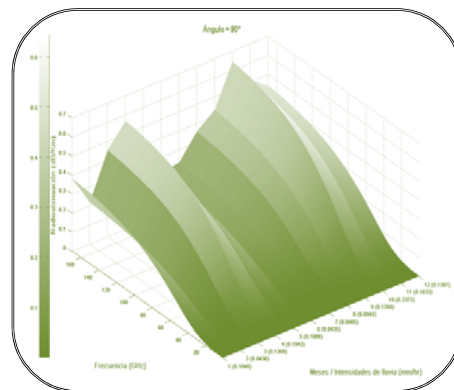
Observando la Figura 13, se puede visualizar que sucede equitativamente lo mismo para el ángulo de 90° , se muestra en el mes de octubre una radioatenuación de 0,64 dB/Km, y donde aún no existen diferencias significativas en la radioatenuación al variar estos ángulos puesto que, para los meses de abril (0,56 dB/Km) y noviembre (0,50 dB/Km) se siguen observando los mismos valores de radioatenuación.

Figura 12. Radioatenuación troposférica por lluvia con ángulo de elevación de 75° para el año 2012 (Ciudad: Trujillo)



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Radioatenuación troposférica por lluvia con ángulo de elevación de 90° para el año 2012 (Ciudad: Trujillo)

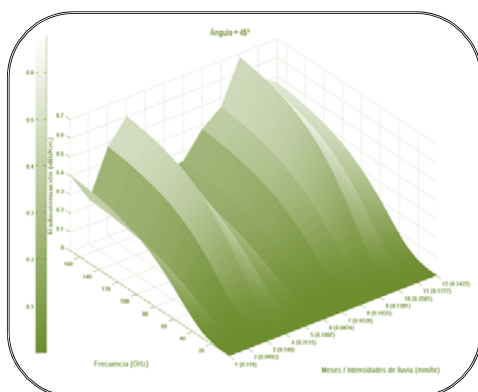


Fuente: elaboración propia.

En la Figura 14 se observa que, la máxima radioatenuación registrada para el año 2014 en la ciudad de Trujillo con un ángulo de elevación de 45°, corresponde al mes de octubre con un valor de 0,67 dB/Km y con una intensidad igual a 0,25 mm/h.

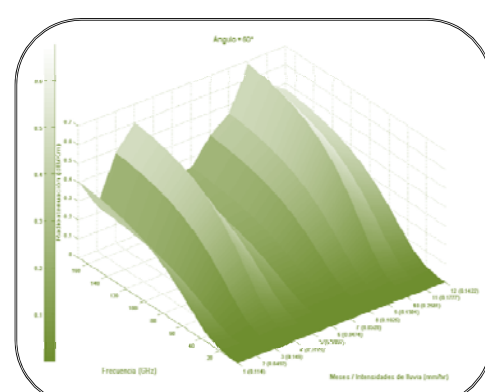
Otras radioatenuaciones significativas registradas pertenecen a los meses de abril y noviembre, con intensidades de lluvia iguales a 0,21 mm/h (0,59 dB/Km) y 0,17 mm/h (0,53 dB/Km) respectivamente. Como se puede notar en la Figura 15, ocurre lo mismo para el ángulo de 60°, en el mes de octubre una radioatenuación de 0,67 dB/Km, con lo que se demuestra que no existen diferencias significativas en la radioatenuación al variar los ángulos.

Figura 14. Radioatenuación troposférica por lluvia con ángulo de elevación de 45° para el año 2014 (Ciudad: Trujillo)



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Radioatenuación troposférica por lluvia con ángulo de elevación de 60° para el año 2014 (Ciudad: Trujillo)



Fuente: elaboración propia.



ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA Y EL ÁNGULO DE ENLACE

En esta fase se utiliza un software denominado Origin, desarrollado por OriginLab Corporation, el cual permite analizar datos y graficar los resultados con un gran acercamiento donde se pueden observar y detallar mejor las diferencias o semejanzas que puedan tener los ángulos en frecuencias específicas, para identificar la relación que éstos tengan con la radioatenuación.

Con la finalidad de profundizar en esta relación que guardan la radioatenuación y el ángulo de elevación del enlace se realizaron evaluaciones estadísticas para confirmar las observaciones gráficas, donde a simple vista no hay una diferencia significativa en la radioatenuación al realizar el cambio de ángulo para el mismo año en las ciudades de Valera y Trujillo.

Cuadro 10. Análisis univariante para Valera

| Fuente | Suma de cuadrados tipo III | gl | Media Cuadrática | F | Significación |
|---------------------|----------------------------|------|------------------|----------|---------------|
|  ngulo | ,000 | 5 | 6,49E-005 | ,475 | ,795 |
| Frecuencia | 163,250 | 169 | ,966 | 7061,972 | ,000 |
|  ngulo * Frecuencia | 6,95E-005 | 845 | 8,23E-008 | ,001 | 1,000 |
| Total corregida | 163,808 | 5099 | | | |

Fuente: elaboración propia.

Para demostrar esta afirmación se realizó la prueba estadística de los efectos inter sujetos expresada en el análisis univariante de los Cuadros 10 y 11, en el cual se comprobó que el ángulo no es significativo en la radioatenuación puesto que el resultado (0,795 para Valera y 0,972 para Trujillo) está asociado a un valor de significancia mayor a 0,05, indicativo de que no existen diferencias significativas entre estas dos variables.

Además se pudo notar que efectivamente la frecuencia si juega un papel muy importante en la radioatenuación al arrojar un valor de significancia (0,000) menor a 0,05 para las dos ciudades, lo que quiere decir que sí existen diferencias entre éstas, dado que al modificar la frecuencia se producen cambios significativos en la radioatenuación.

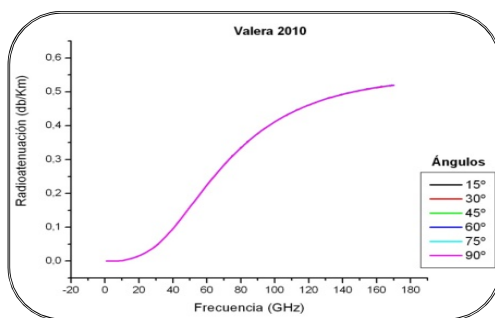
Cuadro 11. Análisis univariante para Trujillo

| Fuente | Suma de cuadrados tipo III | gl | Media Cuadrática | F | Significación |
|---------------------|----------------------------|------|------------------|----------|---------------|
|  ngulo | ,000 | 5 | 6,89E-005 | ,175 | ,972 |
| Frecuencia | 269,583 | 169 | 1,595 | 4049,172 | ,000 |
|  ngulo * Frecuencia | 9,75E-005 | 845 | 1,15E-007 | ,000 | 1,000 |
| Total corregida | 271,191 | 5099 | | | |

Fuente: elaboración propia.

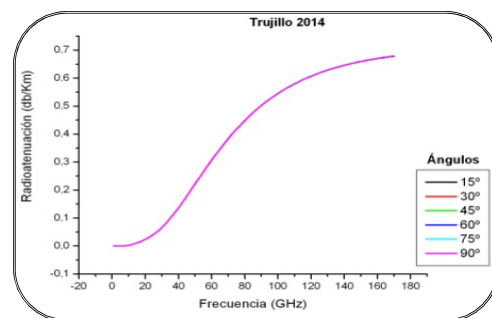
Asimismo, para la ciudad de Valera se seleccionó el año y mes más significativo con base en la intensidad de lluvia mensual pronosticada, dando como resultado el año 2010 y el mes de octubre, así como para Trujillo, el año 2014 con el mes de octubre, dando los resultados gráficos que se muestran en las Figuras 16 y 17, donde se observa que los ángulos tienen un comportamiento idéntico para las distintas frecuencias, tan exacto que sólo se alcanza a ver una sola curva ya que se dibujan una sobre otra.

Figura 16. Ángulos de elevación utilizados para Valera en el mes de octubre del año 2010



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Ángulos de elevación utilizados para Trujillo en el mes de octubre del año 2014



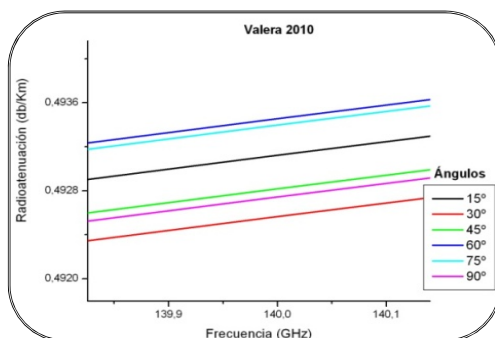
Fuente: elaboración propia.

Consecutivamente a esto, se realizó el acercamiento en una frecuencia deseada, que en este caso son las frecuencias de 140 GHz para la ciudad de Valera y 45 GHz para Trujillo, dando los resultados que se muestran en las Figuras 18 y 19.

Observando las figuras de una forma ampliada ahora si se nota que hay una diferencia al variar el ángulo pero es muy mínima, tanto que no influye significativamente en el parámetro de radioatenuación troposférica calculado anteriormente.

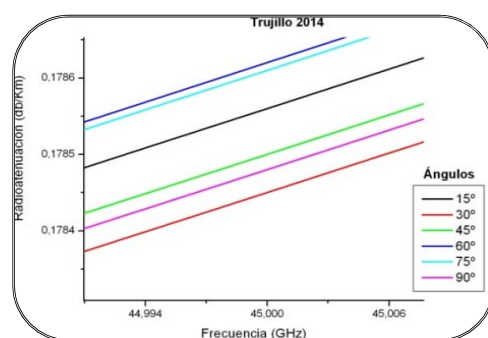
Igualmente, se logra deducir que no hay una tendencia ya que el valor de los ángulos se mantiene casi constante, la diferencia se observa es a partir de la tercera cifra significativa, lo que quiere decir que hay muy poca dispersión.

Figura 18. Diferencias entre ángulos de elevación utilizados para Valera en la frecuencia de 140 GHz



Fuente: elaboración propia.

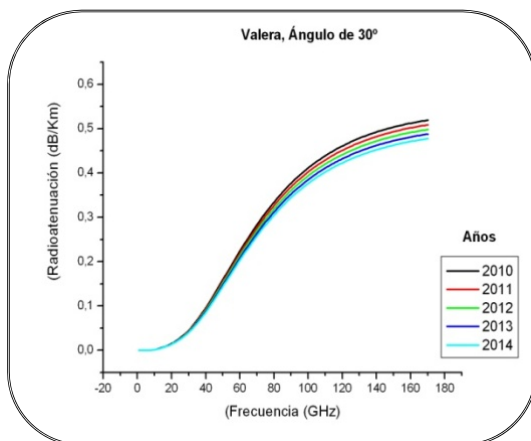
Figura 19. Diferencias entre ángulos de elevación utilizados para Trujillo en la frecuencia de 45 GHz



Fuente: elaboración propia.

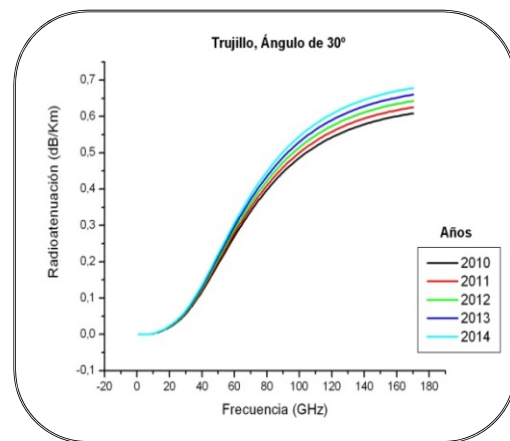
De los gráficos expuestos se puede deducir que tanto para Valera como para Trujillo, el ángulo de elevación del enlace que presentó menos radioatenuación fue el de 30° seguido por el ángulo de 90° y el que representó la mayor radioatenuación fue el de 60°.

Figura 20. Ángulo de elevación de 30° para los cinco años pronosticados en Valera



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Ángulo de elevación de 30° para los cinco años pronosticados en Trujillo



Fuente: elaboración propia.

En las Figura 20 y 21 se presenta gráficamente el ángulo de 30° para los cinco (5) años pronosticados en Valera y Trujillo, tomado como referencia por ser el que proyecta el límite inferior de la radioatenuación en comparación con los demás.

Se observa que para Valera a medida que se avanza en el tiempo desde el 2010 hasta el 2014 la atenuación tiende a decaer, mientras que para Trujillo sucede lo contrario, es decir, tiende a aumentar. Esto se explica como consecuencia de los pronósticos de lluvia obtenidos con el método ARIMA, donde se mostró que para la primera, los valores del pronóstico descienden al transcurrir los años y para la segunda, ascienden con el transcurso del tiempo.

Finalmente, después de realizar toda esta serie de pruebas se deduce que no hay diferencias significativas al momento de variar el ángulo de elevación del enlace, ahora bien, que no existan diferencias significativas no quiere decir que no exista ninguna diferencia, lo que quiere decir en realidad es que existe una diferencia pero es mínima como ya se demostró, no es observable a simple vista.

De acuerdo al estudio realizado en esta investigación el ángulo de elevación del enlace de la señal emitida no influye como una característica significativa en la radioatenuación troposférica por lluvia al momento de diseñar adecuadamente una interfaz radioeléctrica ya que, las variaciones que proporciona el cambio de ángulo son despreciables al diferenciarse entre sí solamente, por milésimas expresadas en dB/Km que no afectarían el funcionamiento de estos sistemas en base a los ángulos estudiados.



DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Después de analizar los resultados de esta investigación y comparando con las bases teóricas descritas, se procede a realizar la discusión de los mismos. Al evaluar el pronóstico con el método ARIMA para ambas ciudades, se obtuvieron los resultados de los parámetros de coeficientes óptimos, teniendo que para Valera es:

(0, 1, 1) (0, 1, 1) y casualmente para Trujillo se proyectaron los mismos resultados (0, 1, 1) (0, 1, 1) ya que dichos modelos contienen el menor error residual luego de efectuar la comparación con otro modelo posible (1, 1, 1) (1, 1, 1).

Esto comprueba lo expresado por Pérez (2005), quien indica que al comparar los modelos que más se asemejan al pronóstico requerido, por lo general se debe seleccionar el que contenga menor cantidad de error.

Analizando los resultados de la radioatenuación troposférica por lluvia, tanto para Valera como Trujillo, se observó que estadísticamente no existe una diferencia significativa al variar los seis (6) ángulos en un mismo año, lo cual quedó revelado al realizar los análisis univariantes donde se mostró que el ángulo no es influyente en la radioatenuación.

Asimismo, es importante considerar la frecuencia con la que operan los enlaces de telecomunicaciones, ya que se ha demostrado que la frecuencia es un factor muy influyente pues, a mayores frecuencias aumenta proporcionalmente la radioatenuación. Esto coincide con Cardama y otros (2005) cuando dice que, dentro de las frecuencias superiores a los 10 Ghz la atenuación en las telecomunicaciones se toma considerable, acrecentando la radioatenuación a medida que aumenta su frecuencia.

De este modo se observó que para la ciudad de Valera el mes que presentó mayor radioatenuación fue octubre para todos los años, siendo su máxima en el año 2010 con 0,52 dB/Km y para Trujillo igualmente fue el mes de octubre pero del año 2014 con 0,67 dB/Km. Se observa que efectivamente puede existir una disminución considerable de la potencia de la señal debido al efecto de la radioatenuación troposférica por lluvia.

Según Cardama y otros (2005) las concentraciones de gases como el oxígeno, vapor de agua e incluso las precipitaciones en forma de lluvia o nieve, introducen atenuaciones adicionales que disminuye la potencia de la señal durante su propagación.

Es importante mencionar que el pronóstico de radioatenuación troposférica realizado maneja cierto margen de error, ya que el cálculo de intensidad de lluvia se hizo mediante el número de días por mes y número de horas por día y no por el método de estimación del promedio de días de lluvia y horas de lluvia.

Esto dio como resultado que la intensidad de lluvia por hora calculada es mucho menor que la real, resultando en una radioatenuación de nivel inferior debido a que al calcular la misma cantidad de lluvia para todos los días del mes y todas las horas del día, hace que el pronóstico sea similar pues se trata de un promedio.



Por otra parte, para verificar la relación existente entre la radioatenuación troposférica y el ángulo de elevación del enlace se efectuaron ensayos gráficos de acercamiento a los resultados que dieron los diversos ángulos en un mismo año y mes (tomando el año y mes donde hubo mayor intensidad de precipitación) para constatar si efectivamente no había ninguna diferencia al variar el ángulo.

En estos gráficos se demostró que matemáticamente si existe una diferencia, pero resulta tan mínima que se toma como despreciable, como se explicó anteriormente, a la hora de evaluar la influencia del ángulo de elevación del enlace en la radioatenuación para las dos ciudades.

Igualmente, se pudo deducir que el ángulo que presenta menor radioatenuación es el de 30° siguiéndole en orden ascendente el de 90° , 45° , 15° , 75° y 60° para las dos ciudades. Esto indica que no existe una tendencia ya que los ángulos no aumentan ni disminuyen gradualmente de acuerdo a su valor de radioatenuación por lluvia.

Estos resultados difieren de lo que sucede cielo libre, al respecto Angulo y Hernández (2005) expresan que, entre más pequeño sea el ángulo de elevación, mayor será la distancia que una onda propagada debe pasar por la atmósfera de la Tierra, esto se traduce a que, mientras el ángulo sea más bajo se genera mayor atenuación.

Luego de conocer estos resultados se elaboró otro gráfico donde se pudo observar el ángulo que presenta menor radioatenuación (30°) a través de todos los años pronosticados, obteniendo una diferencia entre las dos ciudades. Para Valera, con el transcurso del tiempo los ángulos presentan menor radioatenuación y para Trujillo ocurre lo contrario.

Es decir, a medida que pasa el tiempo los ángulos presentan mayor radioatenuación, esto se debe a los resultados del pronóstico realizado para las precipitaciones, donde para Valera la intensidad de lluvia tiende a decaer y para la ciudad de Trujillo a aumentar. Adicionalmente a esto, Ramos (2010) concluye que también se producen pérdidas dependiendo de la intensidad de la precipitación (medida en mm/h), de manera que cuanto más intensa es ésta mayor es la atenuación.

Finalmente, es importante resaltar que para la determinación de la radioatenuación troposférica por lluvia se empleó la recomendación de la ITU, donde se tuvo la posibilidad de especificar un parámetro muy importante, tal como el grado de elevación del trayecto de la señal emitida.

CONCLUSIONES

Se presentan a continuación las conclusiones más importantes derivadas del estudio y ensayos aquí realizados:

El método de pronóstico seleccionado fue el ARIMA, por ser compatible con las características de la serie de datos real y sus patrones estacionales. Para el análisis del comportamiento de la series de datos de lluvia mensual, se identificó el patrón de estacionalidad, estacionariedad, se aplicaron las autocorrelaciones simples y parciales



pertinentes para las dos ciudades y se obtuvieron los coeficientes óptimos de ARIMA (0, 1, 1) (0, 1, 1) para realizar el pronóstico.

De esta manera, se calculó la radioatenuación troposférica para diferentes ángulos de elevación del enlace y se determinó que para Valera en el mes de octubre es donde existe mayor radioatenuación en todos los años pronosticados, logrando su pico más alto en el año 2010 (0,52 dB/Km). Igualmente, para Trujillo el mes de octubre fue el más representativo con su pico más elevado en el año 2014 (0,67 dB/Km), esto es debido a la intensidad de lluvia de los años pronosticados.

De igual forma, se logró deducir que el ángulo que representa una menor radioatenuación es el de 30° y la mayor el de 60°, tanto para Valera como para Trujillo. Esto indica que no existe tendencia pues no se mantiene un aumento ni disminución significativa en el valor de los ángulos, la diferencia sólo se observó a partir de la tercera cifra significativa, lo que quiere decir que, los valores no están tan dispersos unos de otros.

En conclusión, se puede decir que estadísticamente no hay una diferencia significativa al modificar el ángulo de enlace aunque, matemáticamente se observaron las pequeñas diferencias existentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angulo, J. y Hernández, J. (2005). Redes Satelitales. Documento en línea. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos29/redes-satelitales/redes-satelitales.shtml>
Consulta: 28/06/2010.

Cardama, A.; Jofre, L.; Rius, J.; Romeu, J.; Blanch, S. y Ferrando, M. (2005). Antenas. España. Alfaomega-Ediciones.

Cocco, A. (2003). Módulo educativo sobre la atmósfera de la tierra y las medidas a tomar en situaciones de desastres naturales. República Dominicana. ACQ.

Diccionario de Términos Meteorológicos (2010). Glosario de términos meteorológicos. Documento en línea. Disponible en: <http://www.tutiempo.net/terminos/index.htm>
Consulta: 30/06/2010.

Makridakis, S. y Wheelwright, S. (2004). Métodos de Pronósticos. México. Limusa.

Martínez, C. (2006). Diseño y cálculo de redes de saneamiento, capítulo 2. Documento en línea. Disponible en: <http://www.mailxmail.com/curso-diseno-calculo-redes-saneamiento/hidrologia-caudal-aguas-pluviales>
Consulta: 04/07/2010.

Pepió, M. (2001). Series temporales. España. Edicions UPC.

Pérez, C. (2005). Métodos Estadísticos Avanzados con SPSS. España. Thomson.



Ramos, F (2010). Radiocomunicaciones y fibra óptica: Diseño de radioenlaces. Documento en línea. Disponible en: <http://www.radioptica.com/radioenlaces> Consulta: 28/06/2010.

Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) (2005). Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods. Recommendation ITU-R P.838-3. Suiza.

Zsarolyani, A. (2007). Pronóstico de Radioatenuación Troposférica por lluvia para la ciudad de Maracay. Tesis de Maestría. Universidad Dr. Rafael Belloso Chacín. Venezuela