



## RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA POR LLUVIA PARA LOCALIDADES DEL SUR DEL LAGO DE MARACAIBO

(Tropospheric radioattenuation by rain for southern Maracaibo Lake locations)

### Eunice del V. Semprún O

Ingeniero en Computación

Universidad Rafael Bellos  Chac n. Maracaibo – Venezuela

Correo electrónico: [esemprun@iclam.gob.ve](mailto:esemprun@iclam.gob.ve)

### Carlos Durante

Doctor en Física

Universidad del Zulia. Maracaibo–Venezuela

Correo electrónico: [cdurante@luz.edu.ve](mailto:cdurante@luz.edu.ve)

RECIBIDO: Diciembre 2008 APROBADO: marzo 2009

### RESUMEN

El propósito fundamental de esta investigación fue determinar la radioatenuación troposférica por lluvia que sufren los radioenlaces en localidades del Sur del Lago de Maracaibo. Basados en los datos de lluvia de años anteriores, mediante la aplicación del método de pronóstico de Promedio Móvil Integrado de Auto Regresión (ARIMA), fue posible determinar la radioatenuación en función de la frecuencia y la intensidad de lluvia registrada mensualmente para los años 2006 al 2010 con índices de error confiables. Este desarrollo está relacionado directamente a los problemas que producen las precipitaciones en forma de lluvia en los enlaces de radiofrecuencias, donde se observa la pérdida en la potencia de la señal electromagnética a causa de la disipación de energía en forma de calor por las gotas de lluvia. El estudio está compuesto por 4 fases de desarrollo: la recopilación de los datos de estaciones meteorológicas de la zona, los cuales fueron suministrados por el Instituto para la Conservación del Lago de Maracaibo, la aplicación y análisis del método de pronóstico ARIMA, la estimación de la intensidad de lluvia pronosticada y, por último, el cálculo de las radioatenuaciones para cada período mensual. El tipo de investigación es de campo y predictiva con diseño no experimental. Se concluyó que La Fría es la localidad que presenta mayor radioatenuación troposférica debido a la alta intensidad de lluvia.

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

### ABSTRACT

The primary purpose of this investigation was to determine the tropospheric radio attenuation by rain that occurs in radio links in southern Maracaibo Lake locations. Based on previous year's rainfall data, using the forecasting method AutoRegressive Integrated Moving Average (ARIMA), it was possible to determine the radio attenuation



depending on the frequency and the intensity of monthly predicted rainfall for the years 2006 to 2010 with reliable error rates. This development is directly linked to the problems caused by rainfall in radio links, since there is a loss in signal strength due to the electromagnetic energy dissipation in the form of heat by the raindrops. The study consisted of 4 stages of development: the collection of data from weather stations in the area, which were provided by the Institute for the Conservation of the Maracaibo Lake, the application and analysis of ARIMA forecasting method, the estimation of the intensity of forecasted rain and, finally, the computation of radio attenuation for each monthly period. The investigation has field and predictive model whit not experimental design. It was concluded that La Fría is the town with higher tropospheric radio attenuation due to the higher rain intensity.

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

## INTRODUCCIÓN

La evolución y transformación de las necesidades de comunicación, así como la de las tecnologías de telecomunicaciones, han originado un gran número de desarrollos en el campo de las comunicaciones inalámbricas (televisión, radio, telefonía, etc.), que permiten comunicaciones a grandes distancias con un alto grado de confiabilidad.

A pesar de que las comunicaciones por satélite son una de las tecnologías más confiables pueden ser, en algunos casos, interrumpidas por causa de factores naturales, los cuales pueden ocasionar un debilitamiento de la señal a medida que pasa por el enlace. La presencia de lluvia en el trayecto de transmisión es la principal fuente de degradación de la señal. Las gotas de lluvia absorben y dispersan la energía de la onda, resultando una reducción en la amplitud de la señal transmitida (atenuación), la cual degrada la confiabilidad y el desempeño del enlace de comunicaciones.

Se han hecho grandes esfuerzos durante las últimas décadas para caracterizar los aspectos dinámicos y estadísticos de la atenuación por lluvia con el objetivo de desarrollar sistemas de comunicaciones satelitales confiables en cualquier lugar del mundo mediante el conocimiento de los rangos de frecuencia en los cuales actúe la radioatenuación por lluvia; lo que resulta crucial en regiones tropicales por causa de la gran intensidad de sus precipitaciones.

La Zona Sur del Lago de Maracaibo es una región estratégica del país para la producción de alimentos, por lo extenso de la zona y por ser tierras fértiles y aptas para la producción agropecuaria. En dicha zona se produce un fenómeno excepcional de lluvias, donde una convergencia local de los vientos crea la mayor parte del año una zona de procesos convectivos, dando lugar a chaparrones intensos que están por lo general acompañados de descargas eléctricas.

Por todo lo expuesto anteriormente y considerando que el Sur del Lago de Maracaibo no se han realizado investigaciones que permitan pronosticar la



radioatenuación troposférica por lluvia, se hizo necesario realizar este estudio para conocer el pronóstico de radioatenuación troposférica por lluvia en dB/Km.

La investigación fue desarrollada en cuatro fases, comenzando por la recopilación de series de lluvia en mm/mes de Encontrados, Santa Bárbara y la Fría, todas localidades pertenecientes al Sur del Lago de Maracaibo, las cuales fueron cedidas por el Instituto para la Conservación del Lago de Maracaibo; seguida de la aplicación y análisis del Método de Pronóstico ARIMA, el posterior cálculo de la intensidad de lluvia en mm/hr y finalmente la determinación de la radioatenuación troposférica para cada una de las localidades para los años 2006 al 2010, mediante el uso de un software desarrollado en MatLab.

## BASES TEÓRICAS

### PROPAGACIÓN DE RADIOFRECUENCIAS EN EL ESPACIO LIBRE

Todo sistema de telecomunicaciones debe diseñarse para que en el receptor se obtenga una relación señal-ruido mínima que garantice su funcionamiento. Los servicios de radiocomunicaciones, radiodifusión, radiolocalización, teledetección y radioayudas a la navegación, soportan la transmisión de la información mediante el empleo de ondas electromagnéticas (Cardama, Cofre, Roca, Rius, Romeo, Blanch, 2004, pag. 39). Para poder planificar correctamente cualquiera de estos sistemas es imprescindible conocer los factores que puedan alterar la propagación electromagnética, su magnitud y su influencia en las diferentes bandas de frecuencias.

La relación entre la potencia recibida y la transmitida (pérdida de transmisión) por dos antenas separadas por una distancia  $r$  en condiciones del espacio libre es:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{1}{4\pi r^2} D_T A_{efR} = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 D_T D_R = \left( \frac{1}{\lambda r} \right)^2 A_{efT} A_{efR} \quad (1)$$

Donde:

$P_R$ : Potencia Receptora

$P_T$ : Potencia Transmitida

$D_R$ : Directividad Receptora

$D_T$ : Directividad Transmitida

$A_{efR}$ :  rea Efectiva Receptora

$A_{efT}$ :  rea Efectiva Transmitida

$\lambda$ : Longitud de Onda

$r$ : Distancia entre Base Emisora y Receptora

La propagación en el espacio libre y la propagación en el vacío responden a un modelo ideal análogo, pero en el entorno terrestre muy pocas situaciones se ajustan a este modelo ya que la misma presencia de la tierra, de la atmósfera y de la ionosfera



alteran las condiciones de propagación.

Debido a la concentración de gases en la atmósfera se originan diferencias entre la propagación de las señales en el vacío y en la atmósfera. La capa más baja de la atmósfera denominada troposfera, se extiende desde el nivel del mar hasta aproximadamente unos 18 Km de altura en el ecuador, ocurriendo en ésta la mayor concentración de gases. Bajo condiciones atmosféricas normales la concentración de gases disminuye con la altura, lo que origina una variación del índice de refracción de la atmósfera en función de la altura, constituyendo la atmósfera un medio de propagación no homogéneo y provocando una curvatura de las trayectorias de propagación.

Es significativo destacar que la presencia de gases en la atmósfera origina atenuación importante debido a las moléculas de oxígeno y al vapor de agua, que son los gases de mayor presencia en la atmósfera. Adicionalmente los factores meteorológicos como la lluvia pueden ocasionar atenuaciones dependiendo de la frecuencia de trabajo y la intensidad de las precipitaciones.

### **EFFECTO DE LA TROPOSFERA Y LA RADIOATENUACIÓN**

Las principales causas de la atenuación atmosférica son la absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por hidrometeoros.

La primera es debida principalmente a las moléculas de oxígeno y vapor de agua, la cual es prácticamente despreciable para frecuencias inferiores a los 10 GHz, mientras que a frecuencias superiores muestra un comportamiento creciente con la frecuencia. A 22,3 GHz y 60 GHz se presentan los primeros indicios de atenuación debido al vapor de agua y oxígeno.

Dentro de la atenuación por hidrometeoros, la más importante es la producida por la lluvia, ya que la niebla, la nieve y el granizo producen atenuaciones menores en las bandas SHF e inferiores. La atenuación por lluvia depende de varios factores tales como: la intensidad, el tipo de lluvia y el tamaño y la velocidad de las gotas de agua.

Para calcular la atenuación total producida por la lluvia, se multiplica la atenuación específica por la longitud de la celda de lluvia. Por lo que para la planificación de un servicio es necesario sobredimensionarlo, considerando la probabilidad de que ocurra cierta intensidad de lluvia y que la atenuación adicional asociada a la intensidad no afecte el servicio.

Según la recomendación ITU-R P.838-3, la atenuación específica de la lluvia  $\gamma_R$  (dB/Km), es obtenida de la intensidad de lluvia  $R$  (mm/h) mediante la siguiente formula:

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



Donde los valores de los coeficientes  $k$  y  $\alpha$  son determinados como funciones de frecuencia en el rango de 1 a 1.000 GHz, de las ecuaciones 3 y 4.

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

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

Para el c culo de los coeficientes según su polarización,  $k_H$ ,  $k_V$  y  $\alpha_H$ ,  $\alpha_V$ , por medio de las ecuaciones 3 y 4, es necesario usar los valores correspondientes de los cuadros 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Cuadro 1. Coeficientes para  $k_H$

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

Cuadro 2. Coeficientes para  $k_V$

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

Cuadro 3. Coeficientes para  $\alpha_H$

| j | $a_j$    | $b_j$   | $c_j$    | $m_\alpha$ | $c_\alpha$ |
|---|----------|---------|----------|------------|------------|
| 1 | -0,14318 | 1,82442 | -0,55187 | 0,67849    | -1,95537   |
| 2 | 0,29591  | 0,77564 | 0,19822  |            |            |
| 3 | 0,32177  | 0,63773 | 0,13164  |            |            |
| 4 | -5,3761  | -0,9623 | 1,47828  |            |            |



|   |         |         |        |  |  |
|---|---------|---------|--------|--|--|
| 5 | 16,1721 | -3,2998 | 3,4399 |  |  |
|---|---------|---------|--------|--|--|

Cuadro 4. Coeficientes para  $\alpha_v$

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

Para el cálculo de los coeficientes  $k$  y  $\alpha$  con las componentes horizontales  $k_H$ ,  $\alpha_H$  y verticales  $k_V$ ,  $\alpha_V$  obtenidas, se sustituyen los valores utilizando las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V)\cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2k} \quad (6)$$

Donde:

$\theta$  = ángulo de elevación del trayecto de la onda en grados

$\tau$  = ángulo de la inclinación de la polarización en grados

Una vez obtenidos los coeficientes  $k$  y  $\alpha$ , es posible calcular el valor de la radioatenuación por efecto de la lluvia en dB/Km mediante 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, estas tienden a achatarse formando esferoides con el eje vertical menor 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) | $k_H$     | $\alpha_H$ | $k_V$     | $\alpha_V$ |
|------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| 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   | 1,2156     |
| 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     |

### SERIES TEMPORALES

Una serie temporal es un conjunto de valores observados, medidos durante períodos sucesivos. Está formada por cuatro componentes teóricas: tendencia, variaciones estacionales, variaciones cíclicas y variaciones residuales.

La primera está dada por el movimiento general a largo plazo de la serie. Las variaciones estacionales son oscilaciones que se producen con un periodo igual o inferior a un año y se reproducen de forma reconocible en los diferentes años. Las variaciones cíclicas son oscilaciones que se producen con un periodo superior a un año, debidas principalmente a la alternancia de etapas largas (ciclos), en las que se repite el comportamiento de las series. Las variaciones residuales son movimientos en la serie que no muestran un carácter periódico reconocible y que son originados por fenómenos singulares que afectan la variable en estudio de manera casual y no permanente.

### MÉTODOS DE PRONÓSTICO CUANTITATIVOS

El pronóstico es un proceso de estimación de un acontecimiento proyectando hacia el futuro datos del pasado. Éstos, se combinan sistemáticamente en forma predeterminada para hacer una estimación del futuro.

Los métodos de pronósticos cuantitativos son modelos matemáticos que se basan en datos históricos, bajo el supuesto de que son relevantes para el futuro. Estos modelos se pueden utilizar con series de tiempo.

Puede hablarse de dos clases de pronósticos: condicionales e incondicionales. El



primero se realiza mediante modelos causales, como es el caso de un modelo que relaciona dos variables, una dependiente, Y, y otra independiente, X, las predicciones de Y están condicionadas a X, es decir se predice Y dada X; el segundo es el que se hace mediante métodos autoproyectivos, que a su vez están basados en dos enfoques alternativos: el determinista o clásico, y el estocástico o moderno, el cual está basado en la metodología de Box y Jenkins.

El enfoque estocástico es más adecuado cuando las series de tiempo son de mayor tamaño (Pérez, 2005, pág 256), razón por la cual se ha seleccionado para el desarrollo de esta investigación.

### **PROMEDIO MÓVIL INTEGRADO DE AUTO REGRESIÓN (ARIMA)**

El modelo ARIMA fue desarrollado por Box y Jenkins, dicho modelo tiene en cuenta la dependencia existente entre los datos, en el cual cada observación en un momento dado es modelada en función de los valores anteriores.

El nombre ARIMA es derivado de sus tres componentes: Autoregresivo (AR), Integrado (I) y de Medias Móviles (MA). El modelo permite describir un valor como una función lineal de datos anteriores y errores debidos al azar, adicionalmente puede incluir un componente cíclico o estacional, con el objetivo de obtener un modelo adecuado que contenga todos los componentes necesarios para describir el fenómeno.

#### **MODELO AUTOREGRESIVO AR(p)**

Un modelo autoregresivo AR(p) describe una clase particular de proceso en el que las observaciones en un momento determinado son predecibles a partir de las observaciones previas del proceso más un término de error.

El proceso autorregresivo de orden p, toma la forma:

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

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.

#### **MODELO DE MEDIAS MOVILES MA(q)**

Un modelo de este tipo también describe una serie temporal estacionaria, en él el valor actual puede predecirse a partir de la componente aleatoria de este momento y en menor medida de los impulsos aleatorios anteriores.



El proceso de medias móviles de orden  $q$ , se representa de la siguiente forma:

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

En donde, como en el modelo anterior,  $e_t$  es el error o residuo y  $e_{t-1}, e_{t-2}, \dots, e_{t-q}$ , son los valores anteriores del error.

#### MODELOS ARMA (p,q)

Estos modelos incluyen términos autorregresivos, como el de medias móviles, también se denominan ARIMA (p,0,q) y se representan por la ecuación que nace de la combinación de las ecuaciones 7 y 8, 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 7, 8 y 9 podrían no ser suficientes y deben completarse con parámetros estacionales. 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:

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

#### MODELO ARIMA (p,d,q)

Un modelo ARIMA (p,d,q) permite describir una serie de observaciones después de que hayan sido diferenciadas  $d$  veces, con el objeto de extraer las posibles fuentes de no estacionariedad. Es aplicable a cualquier modelo y si alguna de las componentes p,d,q es igual a cero, se elimina el término correspondiente de la fórmula general.



Para determinar los tres parámetros del método ARIMA, ya sean los simples (p,d,q) y/o los estacionales (P,D,Q), se procede con el análisis de los datos para identificar los patrones de tendencia, ciclicidad y estacionalidad. Generalmente, utilizando la diferenciación simple o estacional de la serie de datos original, se obtiene la estacionalidad. Luego, los análisis de autocorrelación simple y parcial se efectúan para poder identificar el orden de cada parámetro del método ARIMA. Estos parámetros son elegidos según los resultados de la representación en los retardos de las gráficas de autocorrelación simple y parcial.

### **PROCEDIMIENTO**

A continuación se resumen las cuatro fases llevadas a cabo durante en desarrollo de esta investigación para el cálculo de la radioatenuación troposférica por lluvia para localidades del Sur del Lago de Maracaibo.

### **RECOPIACIÓN DE LOS DATOS DE LLUVIA**

Para el desarrollo de esta fase fue necesario realizar visitas a varias instituciones gubernamentales en materia ambiental además de algunas paginas Web que ofrecen información meteorológica, con el fin de realizar una revisión de los datos meteorológicos disponibles sobre localidades del Sur del Lago de Maracaibo, resultando que el ICLAM posee una base de datos con información meteorológica de la Cuenca del Lago de Maracaibo, de la cual se extrajo la información correspondiente a Encontrados, Santa Bárbara y La Fría.

Los valores relativos a Encontrados corresponden a datos desde enero del año 1953 hasta diciembre de 2005. En Santa Bárbara los valores representan la lluvia de enero de 1967 a diciembre de 2005, mientras que los correspondientes a La Fría constituyen la serie de datos de enero de 1951 a diciembre de 2005. Todos los datos obtenidos constituyen valores de lluvia reales expresados por mes y años

### **APLICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DE PRONÓSTICO**

El desarrollo de esta fase lo constituyó el análisis de las series de tiempo, mediante el uso de diagramas espectrales para la determinación de la estacionalidad y período de la serie, seguido de la realización de autocorrelaciones simples y parciales con ensayos de diferentes diferenciaciones, finalmente se identifican los modelos ARIMA con los coeficientes óptimos para la realización de los pronósticos de lluvia.

La realización de los diagramas espectrales permitió identificar la estacionalidad de las localidades estudiadas y la determinación de sus períodos

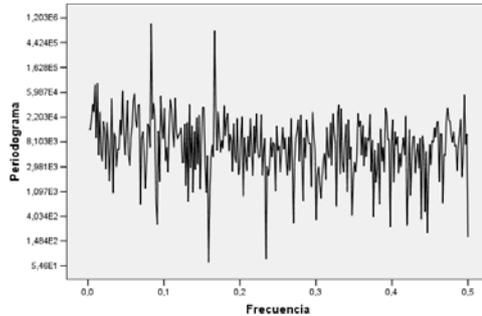


Figura 1. Diagrama Espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real. (Encontrados). Fuente: SPSS, Semprún (2008).

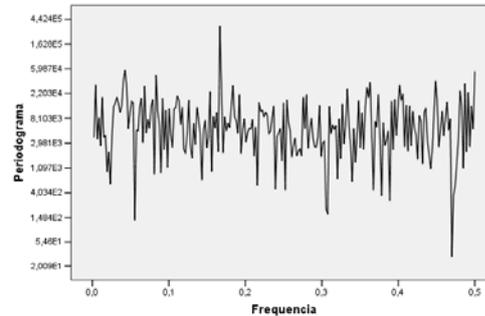


Figura 2. Diagrama Espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real. (Santa Bárbara). Fuente: SPSS, Semprún (2008).

La figura 1 muestra un pico significativo en la frecuencia 0,08, determinando que el periodo correspondiente es igual a 12 meses, resultado de calcular el inverso de la frecuencia, es decir  $1/0.08$ . La figura 2 muestra un pico destacable a una frecuencia de 0,16, lo que indica un período igual a 6 meses. La figura 3 muestra un comportamiento similar al de la figura 2, lo que significa que el periodo de la estación La fría también es igual a 6.

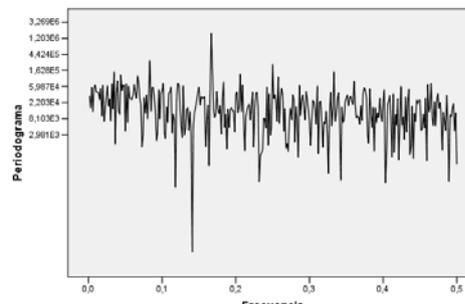


Figura 3. Diagrama Espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real. (La Fría). Fuente: SPSS, Semprún (2008).

Adicionalmente se analizaron los valores de la medias y las varianzas de las series de datos por estaciones y por años, detectándose que existen variaciones crecientes y decrecientes a lo largo de los años, lo que indicó que no existe estacionariedad en los datos y conllevó a la realización de diferentes ensayos de diferenciación a partir de los cuales fue posible identificar los modelos ARIMA correspondiente a cada uno de la localidades.

Los modelos resultantes son los siguientes:

Encontrados: ARIMA (111) (011)<sub>12</sub>,  
Santa Bárbara: ARIMA (011) (101)<sub>6</sub>  
La Fría ARIMA (110) (101)<sub>6</sub>



Los valores de lluvia estimados a partir de cada uno de los modelos pueden observarse en las figuras 4, 5 y 6, superpuestos con los valores de lluvias reales de cada una de las localidades.

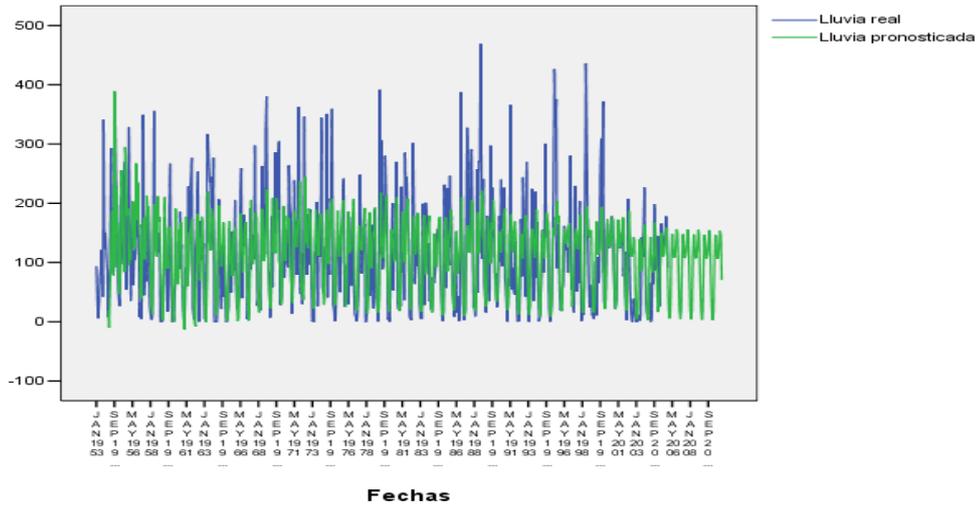


Figura 4. Valores de Lluvia real y pronosticada aplicando el Método ARIMA. (Localidad: Encuentros). Fuente: SPSS, Semprún (2008).

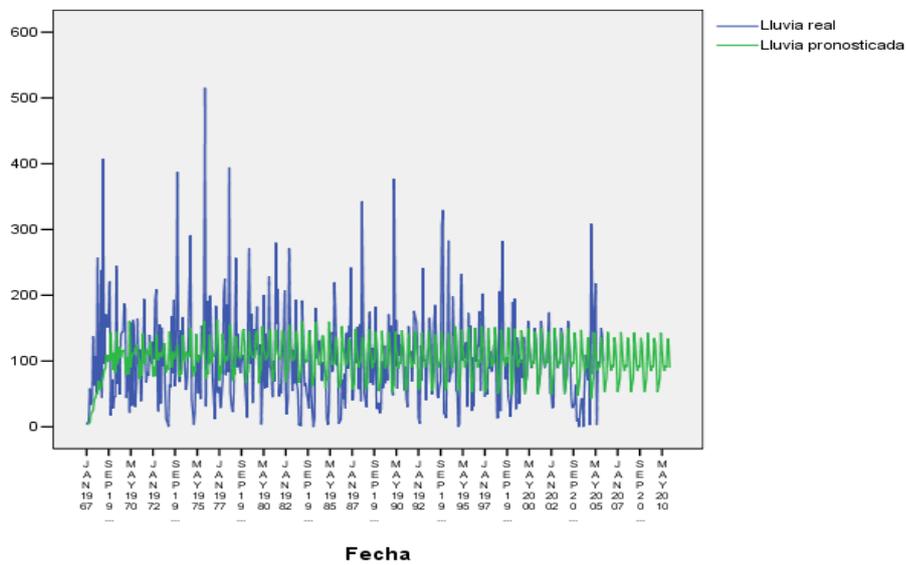


Figura 5. Valores de Lluvia real y pronosticada aplicando el Método ARIMA. (Localidad: Santa Bárbara). Fuente: SPSS, Semprún (2008).

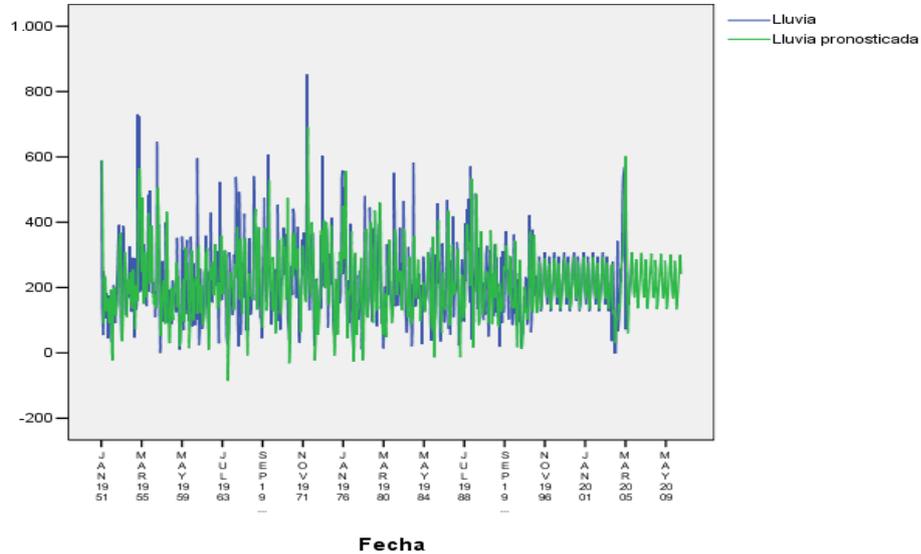


Figura 6. Valores de Lluvia real y pronosticada aplicando el Método ARIMA. (Localidad: La Fría). Fuente: SPSS, Semprún (2008).

### ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA POR HORA

El procedimiento consistió en dividir los valores de lluvia expresados en mm/mes, por el número de días correspondientes al mes, considerando los años bisiestos, que en este caso sólo ocurrió en el año 2008 y posteriormente dividirlo por el número de horas de un día (24 horas). Las unidades de los valores resultantes se expresan en mm/hr.

Cuadro 6. Intensidad de lluvia. Encontrados

| AÑO  | Ene<br>(mm/hr) | Feb<br>(mm/hr) | Mar<br>(mm/hr) | Abril<br>(mm/hr) | May<br>(mm/hr) | Jun<br>(mm/hr) | Jul<br>(mm/hr) | Ago<br>(mm/hr) | Sep<br>(mm/hr) | Oct<br>(mm/hr) | Nov<br>(mm/hr) | Dic<br>(mm/hr) |
|------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 2006 | 0,03           | 0,01           | 0,03           | 0,15             | 0,20           | 0,17           | 0,15           | 0,15           | 0,18           | 0,21           | 0,20           | 0,10           |
| 2007 | 0,03           | 0,01           | 0,03           | 0,15             | 0,20           | 0,17           | 0,14           | 0,15           | 0,18           | 0,21           | 0,20           | 0,10           |
| 2008 | 0,02           | 0,01           | 0,03           | 0,15             | 0,20           | 0,17           | 0,14           | 0,15           | 0,18           | 0,21           | 0,20           | 0,10           |
| 2009 | 0,02           | 0,01           | 0,03           | 0,15             | 0,20           | 0,17           | 0,14           | 0,15           | 0,18           | 0,21           | 0,20           | 0,10           |
| 2010 | 0,02           | 0,00           | 0,03           | 0,15             | 0,20           | 0,17           | 0,14           | 0,15           | 0,18           | 0,21           | 0,20           | 0,09           |

Fuente: SPSS, Semprún (2008)

El cuadro 6 refleja la mayor intensidad de lluvia durante el mes de Octubre, de los años pronosticados.



Cuadro 7. Intensidad de lluvia. Santa Bárbara

| AÑO  | Ene<br>(mm/hr) | Feb<br>(mm/hr) | Mar<br>(mm/hr) | Abril<br>(mm/hr) | May<br>(mm/hr) | Jun<br>(mm/hr) | Jul<br>(mm/hr) | Ago<br>(mm/hr) | Sep<br>(mm/hr) | Oct<br>(mm/hr) | Nov<br>(mm/hr) | Dic<br>(mm/hr) |
|------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 2006 | 0,07           | 0,10           | 0,10           | 0,20             | 0,16           | 0,13           | 0,11           | 0,13           | 0,13           | 0,18           | 0,17           | 0,12           |
| 2007 | 0,07           | 0,10           | 0,10           | 0,20             | 0,16           | 0,13           | 0,11           | 0,13           | 0,13           | 0,18           | 0,17           | 0,12           |
| 2008 | 0,07           | 0,09           | 0,10           | 0,20             | 0,16           | 0,13           | 0,11           | 0,13           | 0,13           | 0,18           | 0,17           | 0,12           |
| 2009 | 0,07           | 0,09           | 0,10           | 0,20             | 0,16           | 0,13           | 0,11           | 0,13           | 0,13           | 0,18           | 0,17           | 0,12           |
| 2010 | 0,07           | 0,09           | 0,10           | 0,20             | 0,16           | 0,13           | 0,11           | 0,13           | 0,13           | 0,18           | 0,17           | 0,12           |

Fuente: SPSS, Semprún (2008)

Los valores más elevados de intensidad de lluvia en la localidad de Santa Bárbara, corresponden al mes de mayo (ver cuadro 7).

Cuadro 8. Intensidad de lluvia. La Fría

| AÑO  | Ene<br>(mm/hr) | Feb<br>(mm/hr) | Mar<br>(mm/hr) | Abril<br>(mm/hr) | May<br>(mm/hr) | Jun<br>(mm/hr) | Jul<br>(mm/hr) | Ago<br>(mm/hr) | Sep<br>(mm/hr) | Oct<br>(mm/hr) | Nov<br>(mm/hr) | Dic<br>(mm/hr) |
|------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 2006 | 0,25           | 0,25           | 0,26           | 0,40             | 0,35           | 0,19           | 0,21           | 0,26           | 0,32           | 0,36           | 0,42           | 0,33           |
| 2007 | 0,25           | 0,25           | 0,26           | 0,40             | 0,35           | 0,19           | 0,21           | 0,26           | 0,32           | 0,36           | 0,42           | 0,33           |
| 2008 | 0,25           | 0,24           | 0,26           | 0,39             | 0,35           | 0,19           | 0,20           | 0,26           | 0,32           | 0,36           | 0,42           | 0,33           |
| 2009 | 0,25           | 0,25           | 0,26           | 0,39             | 0,34           | 0,19           | 0,20           | 0,25           | 0,32           | 0,36           | 0,42           | 0,33           |
| 2010 | 0,24           | 0,25           | 0,25           | 0,39             | 0,34           | 0,18           | 0,20           | 0,25           | 0,31           | 0,36           | 0,42           | 0,32           |

Fuente: SPSS, Semprún (2008)

El mes de noviembre corresponde al mes con mayor intensidad de lluvia en La Fría (ver cuadro 8).

#### DETERMINACIÓN DE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA.

Esta última fase de la investigación, consistió en realizar los pronósticos de radiotenuaci n por lluvia de los años 2006 hasta el 2010, de las localidades Encontrados, Santa Bárbara y La Fría.

Dicho pronóstico fue posible mediante la aplicación de cómputo MATLAB utilizando la recomendación ITU-R P.838-3, la cual arroja como resultados las gráficas para el parámetro de atenuación en función de la frecuencia y de la cantidad de lluvia en la zona.

El rango de frecuencias utilizado para el cálculo comienza desde 1 GHz hasta los 170 GHz con incrementos de 1 GHz, cubriendo todas las designaciones desde Banda L hasta la Banda D, utilizando un ángulo de elevación del trayecto de onda igual a 90  y con una polarización circular de la señal.

Dado que las intensidades de lluvias calculadas en la fase anterior presentan valores similares y en algunos casos idénticos a través de los años, los resultados de radioatenuación troposférica también resultaron con similitudes.

Seguidamente se presentan las figuras con la radioatenuación troposférica por lluvia mensual estimada para localidades del Sur del Lago de Maracaibo,

específicamente Encontrados, Santa Bárbara y La Fría, para el año 2010.

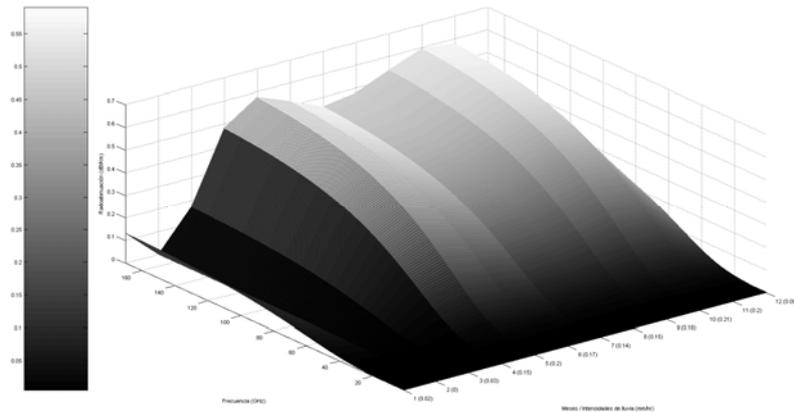


Figura 7. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2010. (Encontrados).  
Fuente: MATLAB, Semprún (2008).

Para el año 2010, se visualiza en la figura 7 que en el rango de 1 GHz a 170 GHz, los meses de mayor radioatenuación troposférica corresponden a octubre, seguido de mayo y noviembre con 0,59 dB/Km para el primero y 0,58 dB/Km para los siguientes e intensidad de lluvia de 0,21 mm/hr en el primero y 0,20 mm/hr para los sucesivos. Adicionalmente, las menores radioatenuaciones registradas fueron para los meses de febrero, enero y marzo, siendo iguales a 0,00 dB/Km y 0,13 dB/Km y 0,17 dB/Km con intensidades de lluvia de 0,00 mm/hr, 0,02 mm/hr y 0,03 mm/hr respectivamente.

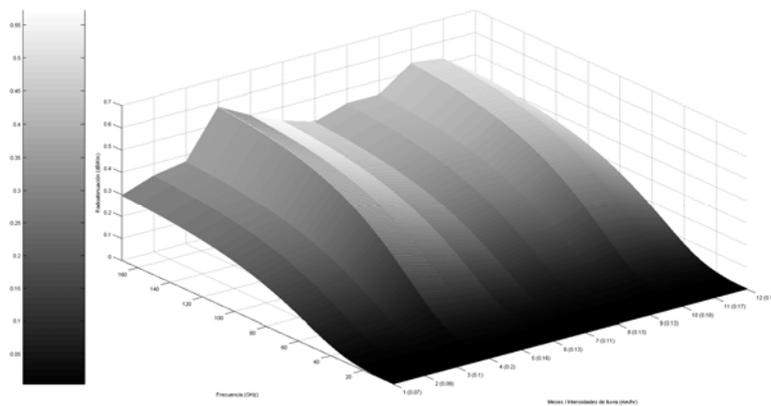


Figura 8. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2010. (Santa Bárbara).  
Fuente: MATLAB, Semprún (2008).

La figura 8 presenta la radioatenuación troposférica para el año 2010 correspondiente a Santa Bárbara, donde se aprecia que para los meses de abril y octubre se registran intensidades de lluvia de 0,20 mm/hr y 0,18 con las mayores radioatenuaciones de 0,58 dB/Km y 0,54 dB/Km. La radioatenuación más leve registrada fue para el mes de enero con 0,29 dB/Km correspondiente a una intensidad de lluvia de 0,07 mm/hr.

Finalmente mediante la figura 9 con los valores de radioatenuación para el año 2010, en la localidad La Fría, se observó que para los meses de noviembre y abril se registran intensidades de lluvia de 0,42 mm/hr y 0,39 mm/hr con las mayores radioatenuaciones de 0,93 dB/Km y 0,88 dB/Km, dentro de los 170 GHz. La radioatenuación más leve registrada fue para el mes de junio con 0,54 dB/Km correspondiente a una intensidad de lluvia de 0,18 mm/hr.

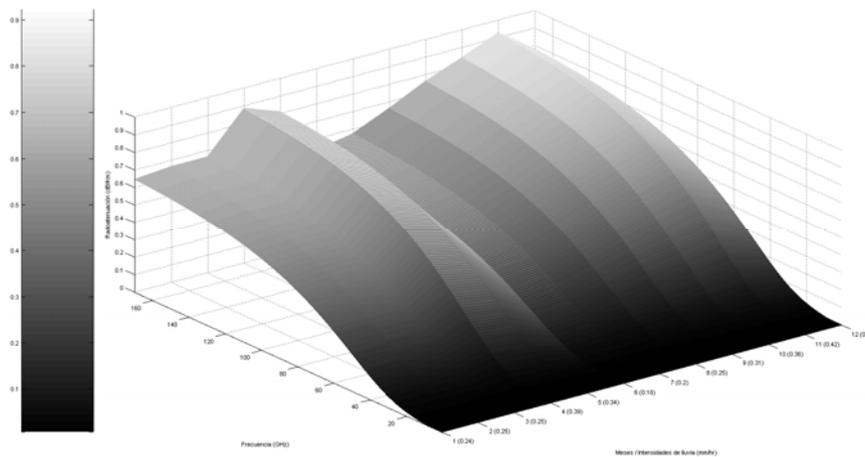


Figura 9. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2010. (La Fría) Fuente: MATLAB, Semprún (2008).

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

De los resultados obtenidos en esta investigación en cada una de las localidades estudiadas, se afirma que la radioatenuación troposférica de los enlaces aumenta en función de la intensidad de lluvia y de la frecuencia.

El método de pronósticos ARIMA empleado para pronosticar la lluvia mensual para periodos posteriores basados en el comportamiento de la serie de lluvia real de periodos anteriores, permitió estimar la lluvia desde el año 2006 al 2010 de las localidades Encontrados, Santa Bárbara y La Fría, cuyos valores se corresponden con el comportamiento real de las mismas.

En base al análisis e interpretación de los valores obtenidos en la localidad de



Encontrados, se asevera que los pronósticos de radioatenuación de los años 2006 al 2010 no presentan variaciones significativas entre un año y otro. Las radioatenuaciones más elevadas corresponden siempre al mes de octubre, resultando una radioatenuación igual a 0,59 dB/Km, seguida por los meses de mayo y noviembre con igual radioatenuación de 0,58 dB/Km, e intensidades iguales a 0,21 mm/hr para el mes de octubre y 0,20 mm/hr para los sucesivos.

Los valores resultantes del pronóstico de la localidad de Santa Bárbara para los años 2006 al 2010, presentan una máxima radioatenuación durante el mes de abril, con 0,58 dB/Km e intensidad de 0,20 mm/hr, seguida por los meses de octubre y noviembre cuya radioatenuación resultó igual a 0,54 dB/Km y 0,52 dB/Km originadas por una intensidad de 0,20 mm/hr y 0,18 mm/hr, observándose similitud entre cada uno de los años.

En cuanto a la localidad La Fría, los valores de pronóstico de radioatenuación entre los años 2006 al 2010, reflejan los valores más altos en los meses de noviembre, abril y octubre representados por 0,93 dB/Km, 0,88 dB/Km y 0,84 dB/Km e intensidades de 0,42 mm/hr, 0,39 mm/hr y 0,36 mm/hr respectivamente. Igualmente no se observaron cambios significativos entre los años.

De las tres localidades estudiadas es resaltante el hecho de que La Fría presenta los mayores valores de radiatenuación troposférica por lluvia, con un máximo correspondiente a 0,93 dB/Km e intensidad de lluvia máxima de 0,56 mm/hr. Dicha observación se correlaciona con el hecho de que los valores de la serie de lluvia real de esta localidad son mayores a los de las localidades de Encontrados y Santa Bárbara.

Es importante mencionar que el pronóstico de radioatenuación troposférica realizado, maneja cierto margen de error, ya que el cálculo de la 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, dando como resultado que de esta forma la intensidad de lluvia por hora calculada es mucho menor que la real, resultando en una radioatenuación de nivel inferior.

## CONCLUSIONES

La metodología empleada mediante el método de pronóstico ARIMA permitió identificar el modelo más adecuado, para representar los valores de lluvia futura desde el año 2006 al 2010 de las localidades de Encontrados, Santa Bárbara y La Fría pertenecientes a la Zona Sur del Lago de Maracaibo, mediante el uso del software SPSS para Windows.

Se determinó el comportamiento de cada una de las series de datos de lluvia mensual, identificando su periodo estacionalidad y su tendencia variable o aleatoria, esta última debido a los efectos de otros factores independientes del fenómeno climatológico no relacionados directamente a la lluvia.



Mediante el uso de gráficos de secuencia se determinó que el comportamiento anual de la lluvia pronosticada es similar al comportamiento de la lluvia real, garantizando la validez del pronóstico.

La determinación de la intensidad de lluvia por hora a partir de los días del mes y horas por día, fue necesaria para el cálculo de radioatenuación, resultando la Fría como la localidad que presentó el valor más elevado con intensidad igual a 0,42 mm/hr en el mes de noviembre.

Los valores más altos de radioatenuación se registraron en La Fría, siendo 0,93 dB/Km la radioatenuación correspondiente al mes de noviembre.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cardama, A. Cofre, L., R us, J. Romeu, J. Blanch S. y Ferrando, M. (2004). Antenas. México: Alfaomega.
- Fuerza Aérea. (1984). Atlas Climatológico. (101). Venezuela. Ministerio de la Defensa.
- Arias, F. (1999) El proyecto de Investigación. Guía para su elaboración. Caracas. Episteme
- Guo, G., Li, S. (2000). Study on the Vertical Profile of Refractive Index in the Troposphere. *International Journal of Infrared and Millimeters Waves*, 21(7), 1103-1111.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (1998). Metodología de la Investigación. México: McGraw-Hill.
- ITU (2005). Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Recommendation ITU-R P.838-3.
- López, B. (1999). Metodología de Investigación y Elaboración de Reportes. México: Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo.
- Makridakis, S. y Wheelwright, S. (2004). Métodos de Pronósticos. México: Limusa.
- Méndez, C. (1995). Metodología. Colombia: McGraw-Hill.
- Muñoz, A., Pacheco, R., Cubill n, N., Durante, C., Durán L., Fermín, J. (2006). Modelling tropospheric radio-attenuation parameters for tropical countries. The Venezuela case. *Ciencia*, 14(4), 428-434.
- Pérez, C. (2005). Métodos Estadísticos Avanzados con SPSS. España: Thomson.
- Risquez, G., Fuenmayor, E. y Pereira, B. (1999). Metodología de la Investigación. Maracaibo: Proeduca.



- Vargas, H. (2006). *Modelo gráfico para el cálculo de parámetros de radio atenuación troposférica*. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Beloso Chacín.
- Yeo, T., Kooi, P., Leong. M., Li, L. (2001). Tropical Raindrop Size Distribution for the Prediction of Rain Attenuation of Microwaves in the 10-40 GHz Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 49(1), 80-83.
- Zsarolyani, A. (2007). *Pronóstico de Radioatenuación Troposférica por lluvia para la ciudad de Maracay*. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Beloso Chacín.