



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“OPTIMIZACIÓN DE LA RECOMENDACIÓN ITU-R P.1812-3,
PARA LA PREDICCIÓN DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN
SISTEMAS DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE (TDT)”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

ENRIQUE ISMAEL DELGADO CUADRO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTOS

Este logro lo agradezco a mi Dios Todopoderoso, quien es mi sustento y mi guiador en cada paso que doy. A mi esposa, quien ha estado a mi lado incondicionalmente.

Agradecer a mi campeón Josías, quien es la luz de mis ojos, y a mis padres que gracias a ellos soy lo que soy.

También agradecer a esta prestigiosa institución, MET- ESPOL y a mis profesores de la maestría por compartir sus conocimientos; pero en especial a mi tutor de tesis, Dr. Nelson Pérez García, por brindarme experiencia, amistad y mucho apoyo durante el desarrollo de este proyecto, ya que sin él no habría podido culminar esta etapa.


DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi salvador Jesucristo. A mi hijo Josías quien con sus juegos y sonrisas me hacen ser cada día mejor. Mi amada esposa Adriana quien desde que la conocí es el amor de mi vida, con quien quiero seguir compartiendo etapas y se demuestra que seguiremos adelante hasta llegar a viejitos.

A mis Padres Enrique y Fanny por su apoyo incondicional desde que comencé en la primaria y me han apoyado hasta la actualidad.

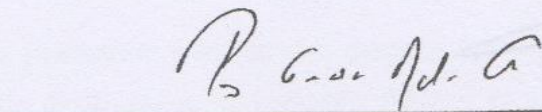
DECLARACIÓN EXPRESA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN




Dr. Sixto García Aguilar,
SUBDECANO DE LA FIEC

PRESIDENTE



Dr. Nelson A. Pérez García

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

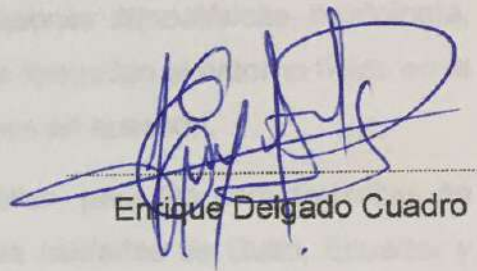


M.Sc. Vladimir Sánchez Padilla

MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"


Enrique Delgado Cuadro

RESUMEN

Los modelos de propagación desempeñan uno de los papeles más importantes en la precisión con la que se pueda predecir, por ejemplo, la cobertura de un determinado sistema inalámbrico de comunicaciones, durante el proceso de planificación y dimensionamiento (PyD) del mismo en lo que al segmento de radio propagación se refiere.

La mencionada precisión dependerá principalmente de si el modelo de propagación seleccionado para la estimación de la cobertura del sistema ha sido desarrollado o no en base a características de propagación (condiciones atmosféricas, morfología, topografía, entre otras) al menos similares a las que circundan el entorno físico en el cual se está planificando y dimensionando el sistemas en cuestión.

En ese sentido, en el presente trabajo se desarrollan, para las características de propagación propias de ambientes exteriores de las ciudades de Quito, Ecuador y Caracas, Venezuela, cuatro (4) versiones de uno de los modelos de propagación más novedosos utilizados en la PyD de sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT), también conocidos como sistemas de Televisión Digital Abierta (TDA), como lo es el de la Recomendación ITU-R P.1812-3. Para ello, se recurre a mediciones del nivel de campo eléctrico recibido (caso de Quito) y nivel de potencia recibida (caso de Caracas), realizadas para condiciones de recepción fija, con estándares de TDT, durante los procesos seguidos en ambas países para la selección del estándar base de TDT.

Para el desarrollo de dichas cuatro (4) versiones, se aplican de manera individual, a las mencionadas mediciones, las técnicas de optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*) y algoritmo genético (AG), las cuales forman parte de la familia de técnicas de inteligencia computacional.

El desempeño de dichas versiones, en términos del RMSE (*Root Mean Square Error*), en la predicción de las pérdidas de propagación en los ambientes donde se llevaron a cabo las mediciones, es comparado con el desempeño de la versión no modificada de la Recomendación ITU-R P.1812-3, resultando todas las mencionadas versiones aquí desarrolladas con un mejor desempeño.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del Problema	5
1.3. Justificación	6
1.4. Descripción de la Solución Propuesta	7
1.5. Objetivos	7
1.6. Alcances y Limitaciones	8
CAPÍTULO 2.....	10
2. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE TDT, PSO Y ALGORITMOS GENÉTICOS.....	10
2.1. Arquitectura de un Sistema TDT (Televisión Digital Terrestre)	10
2.2. Principales Aspectos de Propagación en Sistemas TDT	13
2.2.1 Múltiple Trayectoria	14
2.2.2 Desvanecimiento	15
2.2.3 Retardo en la Propagación	15
2.3. Modelos de Propagación utilizados para Sistemas de Televisión Digital	18

2.3.1. Longley-Rice.....	18
2.3.2. Irregular Terrain Model (ITM).....	20
2.3.3. Irregular Terrain with Obstructions Model (ITWOM).....	20
2.3.4. Okumura-Hata.....	21
2.3.5. Recomendación ITU-R P.1546-5.....	23
2.3.6. Recomendación ITU-R P.1812-3.....	24
2.4. Técnica PSO (Particle Swarm Optimization).....	25
2.5. Algoritmo Genético.....	29
CAPÍTULO 3	37
3. MEDICIONES DE LAS PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN SISTEMAS TDT, REALIZADAS EN CARACAS, VENEZUELA Y QUITO, ECUADOR	37
3.1. Configuración Experimental para las Mediciones.....	37
3.2. Resultados de Medición de las Pérdidas de Propagación.....	45
3.3. Comparación.....	50
3.3.1. Estimación de las Pérdidas de Propagación mediante los Modelos de Propagación.....	50
3.3.2. Comparación entre los Valores Estimados y los Valores Medidos.....	51
CAPÍTULO 4	
4. OPTIMIZACIÓN DE LA RECOMENDACIÓN ITU-R P.1812-3.....	54
4.1. Optimización con PSO.....	54
4.1.1. Función Objetivo: Modificación de la Recomendación ITU-R P.1812-3.....	54
4.1.2. Funciones de Aptitud: Desviación Estándar y RMSE....	56
4.1.3. Implementación en Matlab.....	57
4.2. Optimización con Algoritmo Genético.....	58
4.2.1. Selección, Reproducción y Mutación.....	59
4.2.2. Funciones de Costo: Desviación Estándar y RMSE.....	59
4.2.3. Implementación en Matlab.....	59

4.3. Comparación de Resultados: Valores de Desviación Estándar y RSME para el Modelo Original y el Modelo Optimizado.....	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Arquitectura básica de un sistema TDT.....	11
Figura 2.2: Red de transmisión de la señal TDT sin auxilio de satélite ...	12
Figura 2.3: Retransmisión de la señal TDT a través de satélite.....	12
Figura 2.4: Receptor de TDT.....	13
Figura 2.5: Propagación por múltiple trayectoria.....	15
Figura 2.6: Efecto de la propagación por múltiple trayectoria, en el nivel de potencia recibida.....	16
Figura 2.7: Variaciones en el nivel de potencia recibida, debido a las diferentes fuentes de desvanecimiento.....	16
Figura 2.8: Señal recibida en un canal con múltiple trayectoria.....	17
Figura 2.9: Geometría específica del trayecto para el modelo de Longley-Rice.....	19
Figura 2.10: Actualización de la posición de una partícula en PSO.....	26
Figura 2.11: Diagrama de flujo de PSO.....	28
Figura 2.12: Operadores genéticos (cada cadena de bits representa los genes de los individuos).....	31
Figura 2.13: Diagrama de flujo del algoritmo genético.....	31
Figura 2.14: Ejemplos de mecanismos de <i>crossover</i>	34
Figura 2.15: Mecanismo de <i>crossover</i> de único punto).....	34
Figura 2.16: Ejemplos de mecanismos de mutación.....	35
Figura 3.1: Arreglo de antenas utilizado en el sistema radiante en las medidas de Quito, Ecuador.....	39
Figura 3.2: Diagrama de radiación horizontal del arreglo de antenas del sistema radiante, Quito, Ecuador.....	40
Figura 3.3: Diagrama de radiación vertical del arreglo de antenas del sistema radiante, Quito, Ecuador.....	40
Figura 3.4: Ubicación geográfica de los puntos de medición en Quito, Ecuador.....	43
Figura 3.5: Localización de los puntos de medición en Caracas,	

Venezuela.....	46
Figura 3.6: Pérdidas de propagación medidas en Quito, Ecuador.....	48
Figura 3.7: Pérdidas de propagación medidas en Caracas, Venezuela..	49
Figura 3.8: Pérdidas de propagación estimadas y medidas en Quito.....	51
Figura 3.9: Pérdidas de propagación estimadas y medidas en Caracas	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de transmisión (mediciones realizadas en Quito, Ecuador).....	38
Tabla 2: Puntos de medición (Quito, Ecuador).....	42
Tabla 3: Parámetros de transmisión (mediciones realizadas en Caracas, Venezuela).....	44
Tabla 4: Parámetros de recepción (mediciones realizadas en Caracas, Venezuela).....	44
Tabla 5: Puntos de medición (Caracas, Venezuela).....	45
Tabla 6: Valores de RMSE de modelos de la literatura para Quito).....	53
Tabla 7: Valores de RMSE de modelos de la literatura para Caracas.....	53
Tabla 8: Valores de las variables “x” obtenidos para los casos de Quito y Caracas, usando PSO, con RMSE como función de costo....	61
Tabla 9: Valores de RMSE obtenidos para las cuatro versiones modificadas del modelo, para los casos de Quito y Caracas, usando PSO, con RMSE como función de costo.....	62
Tabla 10: Valores de las variables “x” obtenidos para el caso de Quito y Caracas, usando PSO, con la DE como función de costo.....	63
Tabla 11: Valores de RMSE obtenidos para las cuatro versiones modificadas del modelo para los casos de Quito y Caracas, usando PSO, con la DE como función de costo.....	63
Tabla 12: Valores de las variables “x” obtenidas para los casos de Quito y Caracas, usando AG, con RMSE como función de costo.....	64
Tabla 13: Valores de RMSE obtenidas para las cuatro versiones modificadas del modelo, para los casos de Quito y Caracas, usando AG, con RMSE como función de costo.....	65
Tabla 14: Valores de las variables “x” obtenidas para los casos de Quito y Caracas, usando AG, con la DE como función de costo.....	66
Tabla 15: Valores RMSE obtenidas para las cuatro versiones modificadas del modelo, para los casos de Quito y Caracas, usando AG, con DE como función de costo.....	66

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT), también conocidos como sistemas TDA (Televisión Digital Abierta), hoy por hoy son una de las principales alternativas tecnológicas para la verdadera inclusión social y democratización de la información. Ello en virtud de que el televisor, equipo receptor de la TDT o TDA, es el aparato electrónico que mayor porcentaje de penetración (número de televisores por cada 100 habitantes) tiene a nivel mundial, de acuerdo a cifras de la ITU (*International Telecommunication Union*) [1]. Por tanto, tomando en cuenta que para que un televisor tradicional reciba adecuadamente la señal de TDT se requiere solamente un decodificador (STB, *Set-Top Box*), las ventajas de los sistemas TDT quedan a disposición de esa enorme cantidad de usuarios.

Entre las ventajas que presenta la TDT sobre su homóloga analógica tradicional, se tiene [2]: significativa mejora en la calidad del video y audio, con la posibilidad de implementar resolución de alta definición (HD = *High Definition*), superior a la de los DVDs (*Digital Versatile Disc*) y CD (*Compact Disc*); b) aumento del número de canales de TV disponibles (se puedan alojar varios canales de TV en mismo canal de radiofrecuencia); c) transmisión simultánea de programaciones con diferentes contenidos y/o resolución, por parte de una misma operadora de TV; d) recepción en ambientes de movilidad (hasta 350 km/h); e) interactividad, (con acceso, incluso, a Internet), entre otras.

Ahora bien, para poder contar con todas esas ventajas señaladas de los sistemas TDT es necesario, entre otros aspectos, garantizar una adecuada planificación y dimensionamiento (PyD) de los mismos, etapa previa al proceso de implantación física del sistema como tal. El proceso de PyD permite estimar requerimientos tales como la distancia de cobertura para un determinado transmisor, nivel de interferencia que podrá estar presente en el sistema, antenas que pueden ser utilizadas, entre otros. Para dicha estimación, es necesario cumplir ciertos criterios relacionados, por ejemplo, con el nivel de potencia a la entrada del receptor, pérdida máxima permitida para la señal, distancia de cobertura deseada, etc., de acuerdo a los estándares de calidad del sistema establecidos por los entes reguladores.

De los requerimientos señalados en el párrafo anterior, uno de los más importantes es el de la predicción de la cobertura, el cual, en el caso específico de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, como el sistema TDT, centra su precisión principalmente en la acertada selección del modelo de propagación, en la medida que el modelo en cuestión compagine o no con las características de propagación propias de la localidad en la cual se planifique y dimensione el sistema. Un modelo de propagación que no cumpla con ese requerimiento producirá un sobredimensionamiento o subdimensionamiento en la estimación de las pérdidas de propagación del sistema. El primero redundará en una inversión económica adicional innecesaria por parte del operador (en términos de equipos), en tanto que el segundo resultará en insatisfacción para los usuarios (en términos de la cobertura del sistema) [3].

En el caso específico de los sistemas TDT, en la literatura existen algunos modelos de propagación para la estimación de las pérdidas de propagación en dichos sistemas, siendo tal vez los más resaltantes el modelo de Okumura-Hata y los modelos contenidos en las Recomendaciones ITU-R P.1546-5 [4] e ITU-R P.1812-3 [5].

En ese sentido y dado que ninguno de los mencionados modelos fue desarrollado en localidades con características de propagación propias, por ejemplo, de localidades de Ecuador y Venezuela (países de América del Sur), el presente trabajo tiene como objetivo principal optimizar el desempeño de uno de ellos, concretamente, el modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3, en base a mediciones realizadas en Quito (Ecuador) [6] y Caracas (Venezuela) [7, 8], recurriendo para ellos, a dos (2) de las técnicas conocidas de la inteligencia computacional, como lo son optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*) [9-13] y algoritmo genético [11-14].

Para un mejor entendimiento de texto del presente trabajo, el mismo ha sido dividido en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: contempla algunos de los antecedentes sobre modelos de propagación para la planificación y dimensionamiento (PyD) de sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT). Asimismo, se plantea el problema o investigación central del

presente trabajo y expone la justificación de la necesidad de resolverlo. Además, se establecen los objetivos necesarios para resolver el problema. Por último, se muestran los principales alcances del trabajo, así como las limitaciones encontradas en el desarrollo del mismo.

- Capítulo 2: abarca las generalidades de la arquitectura de red de un sistema TDT y de los aspectos que impactan la propagación en dichos sistemas. Adicionalmente, se incluye la revisión de algunos de los modelos utilizados para la estimación de pérdidas en sistemas TDT. También se hace una revisión de las técnicas de inteligencia computacional (IC) o computación inteligente (CI) utilizadas en el presente trabajo para la optimización del modelo de la Recomendación ITU-R P-1812-3, específicamente, PSO y algoritmo genético (AG).
- Capítulo 3: comprende las configuraciones experimentales implementadas para la realización de las mediciones de TDT en Quito, Ecuador y Caracas, Venezuela, así como los resultados obtenidos, de interés, para el presente trabajo. También incluye la comparación de dichos resultados con los valores arrojados por algunos de los modelos de propagación de la literatura.
- Capítulo 4: se lleva a cabo la optimización del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 utilizando las técnicas PSO y algoritmo genético. Además, se realizan las comparaciones, haciendo uso de las métrica estadísticas RMSE y DE (Desviación Estándar), del desempeño del modelo optimizado en relación a la versión original del modelo en cuestión.

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Este capítulo comprende la revisión bibliográfica de algunos de los antecedentes relacionados con los modelos de propagación aplicables al proceso de planificación y dimensionamiento (PyD) de sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT), así como del uso de las técnicas de inteligencia computacional (IC) en el desarrollo o ajuste de modelos de propagación. Asimismo, en este capítulo se plantea el problema a resolver con la correspondiente justificación del por qué la necesidad de solucionarlo. Se incluyen también los objetivos trazados para la solución del problema, los alcances y limitaciones encontradas en desenlace del trabajo y, finalmente, la metodología empleadas para el cumplimiento de los objetivos.

1.1 Antecedentes

A continuación, algunos de los antecedentes relacionados con el desarrollo de modelado de propagación para su uso en la planificación y dimensionamiento (PyD) de sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT) o Televisión Digital Abierta (TDA).

Uno de los primeros modelos de propagación conocidos en la literatura con aplicabilidad para las bandas VHF (*Very High Frequency*) y UHF (*Ultra High Frequency*) es el de Longley-Rice, también llamado por algunos autores modelo de terreno irregular (ITM, *Irregular Terrain Model*), debido a que utiliza las subrutinas del modelo ITM de la NTIA (*National Telecommunications and Information Administration*) de Estados Unidos. El modelo Longley-Rice, desarrollado originalmente en 1968 [15], es un algoritmo numérico con base en la teoría electromagnética y análisis estadísticos de las características del terreno y mediciones de campo, que permite predecir las pérdidas de propagación, para enlaces troposféricos establecidos sobre terrenos irregulares entre el transmisor y el receptor, en función de la distancia del enlace y la variabilidad temporal y espacial de la señal [16]. Aunque el modelo fue inicialmente desarrollado para la banda de frecuencia entre 20 MHz y 40 GHz, la versión actual está implementada

para frecuencias comprendidas entre 20 MHz y 20 GHz, para dos modos de predicción: punto a punto y punto-área.

Asimismo, uno de los modelos más utilizados para la PyD en sistemas TDT es el clásico modelo de Okumura-Hata [3, 17], desarrollado por Masaharu Hata en 1980. Hata estableció ecuaciones matemáticas empíricas para describir la información gráfica suministrada por el modelo de Yoshihisa Okumura, mejor conocido como “modelo de Okumura”, el cual a su vez fue desarrollado en 1968 para estimar la intensidad de campo eléctrico mediante el uso de curvas que resumen el resultado de un conjunto de mediciones realizadas por Okumura en Tokio, Japón. Dichas medidas, toman en cuenta los efectos de difracción, reflexión y dispersión producidos por las edificaciones y obstáculos en entornos urbanos, suburbanos y rurales.

Otro de los modelos frecuentemente utilizados para estimar las pérdidas de propagación o nivel de campo eléctrico recibido en sistemas TDT es el de la Recomendación ITU-R P.1546-5 [4], publicada en el año 2013 y cuya primera versión apareció en el año 2001, conocida como ITU-R P.1546-0. El método en cuestión se basa en la interpolación de valores de intensidad de campo eléctrico, obtenidos a partir de curvas que representan la intensidad de campo eléctrico para una potencia radiada aparente (p.r.a.) de 1 kW, en función de parámetros tal como la altura de la antena transmisora, para los valores nominales de frecuencia de 100 MHz, 600 MHz y 2000 MHz y para un porcentaje de tiempo de 1%, 10% y 50%. El método es del tipo punto-área y puede ser utilizado para estimar el campo eléctrico para sistemas de radiodifusión móvil terrestre y móvil marítimo, así como determinados servicios fijos (por ejemplo, los que emplean sistemas punto a multipunto) en la gama de frecuencias de 30 MHz a 3000 MHz y para distancias de 1 km a 1000 km.

Por su parte, tal como se ha dicho anteriormente, uno de los modelos de propagación que está en actualmente en el tapete para la PyD de sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT) es el contenido en la Recomendación ITU-R 1812-3 [5], publicada también el año 2013, siendo su primera versión lanzada en el año 2007, bajo el nombre de Recomendación ITU-R 1812-0.

Adicionalmente a los modelos mencionados, la literatura reporta una serie de trabajos relacionados con otros modelos de propagación que pueden ser utilizados para la estimación de las pérdidas o nivel de campo eléctrico recibido en sistemas TDT. Algunos de esos modelos son originales, por así decirlo, mientras que otros son el resultado de ajuste realizados a los ya existentes en la literatura, mediante el uso de mediciones de campo.

En [18], Pérez-Vega y Zamanillo desarrollaron en el año 2002, un modelo válido para la bandas VHF y UHF, que es una forma computacional de los datos proporcionados por las curvas de propagación F(50,50) de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC, *Federal Communications Commission*) [19]. El modelo es obtenido mediante el establecimiento de una relación empírica, dependiente de la altura del transmisor y la distancia entre transmisor y receptor, del exponente de pérdidas de propagación (γ o n), del clásico modelo de pérdidas en función del logaritmo de esa distancia. Dicho modelo, permite predecir las pérdidas medias de propagación, la potencia recibida y el nivel del campo eléctrico recibido.

Un interesante trabajo, publicado en 2007 por Wang y colaboradores [20], modela otro efecto importante en la PyD de sistemas de TDT y, en general, de cualquier sistema de telecomunicaciones, como lo es el ruido. En [20], Wang y colaboradores obtienen factores de ruido, así como la desviación de la varianza para tres (3) ambientes típicos de comunicaciones, a partir de análisis de regresión no lineal de funciones acumulativas de los resultados obtenidos por ellos en mediciones de campo. Ellos demostraron que el efecto en la cobertura de ese modelo basado en distribuciones estadísticas de la interferencia es mayor que el efecto producido por el modelo basado sólo en el ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*).

En el año 2008, Shumate [21, 22] desarrolló el modelo de terreno irregular con obstrucciones (ITWOM, *Irregular Terrain with Obstructions Model*) que en realidad es una combinación de ITM con la Recomendación ITU-R P.1546-2 e incluye las leyes de Beer [23] y las leyes de Snell [24].

También en el año 2008, Paran y Noori [25] realizaron un ajuste al modelo de la Recomendación ITU-R. P.1546-1, utilizando para ello algoritmo genético y mediciones realizadas en el sistema de telefonía celular CDMA (*Code Division Multiple Access*), en Australia.

En ese sentido, se tiene, por ejemplo, el trabajo realizado en el año 2012 por Fernández y colaboradores [26], quienes recurrieron a mediciones del nivel de señal recibido en sistemas de TV Digital Terrestre, realizadas en la ciudad de Lima, Perú, para ajustar dos versiones del modelo de pérdidas de distancia con el logaritmo de la distancia [27, 28]. La primera versión de dicho modelo se ajustó mediante un proceso iterativo que minimizó el MSE (*Mean Square Error*) entre los valores medidos y los valores estimados por el modelo ajustado. Se utilizó la correlación de Pearson [29] para indicar el grado de linealidad de la relación entre las variables involucradas. Por otra parte, para el ajuste de la segunda versión del modelo original, nuevamente se emplea el MSE y se utilizan pruebas iterativas sobre distancias localizadas en dos (2) valores seleccionados dependiendo del ambiente, con la finalidad de conseguir el “punto de quiebre” (*breakpoint*) entre los dos (2) segmentos que conforman esa segunda versión del modelo.

Ahora bien, en relación a la aplicación de las técnicas de inteligencia computacional (IC), también conocida como computación inteligente (CI) [10-14], para desarrollo o ajuste de modelos de propagación destinados a la estimación de pérdidas de propagación, existen en la literatura diversos reportes.

En ese orden de ideas, en el año 2010, Ostlin y colaboradores [30] evaluaron el desempeño de varios modelos de redes neuronales artificiales (ANN, *Artificial Neural Network*) para la predicción de pérdidas de propagación. Para tal fin, utilizaron mediciones del nivel de señal recibido realizadas en Australia. El objeto fue minimizar el MSE entre los valores medidos y los estimados por los modelos desarrollados con ANN. El desempeño de esos nuevos modelos fue comparado con los arrojados utilizando la Recomendación P-1546-3, el modelo Okumura-Hata y un Modelo A [31], resultando una mejora en el MSE cuando fueron utilizados los modelos basados en ANN.

Ramesh y colaboradores [32], en 2012, ajustan el modelo de Okumura-Hata mediante el uso del método de regresión lineal en combinación con la técnica lógica difusa, en base a mediciones realizadas con el sistema CDMA en la India. Mediante la lógica difusa, en [32] se determina el valor del exponente de pérdidas, γ o "n", de un ambiente desconocido a través del uso de reglas lingüísticas obtenidas del ajuste de ambientes de propagación conocidos.

Por su parte, Benedicic y colaboradores [33], en 2014, incorporan al modelo de Okumura-Hata un factor de pérdidas debido al perfil del terreno y la forma de la Tierra y utilizan la técnica de computación inteligente conocida como algoritmo diferencial de estigmergia de hormigas (DASA, Differential Ant-Stigmergy Algorithm) para ajustar el modelo modificado en base a mediciones realizadas con el sistema LTE (*Long Term Evolution*) en Eslovenia. La función de ajuste utilizada fue el MSE.

En ese mismo año 2014, Beire y colaboradores [34], agregan la corrección por obstáculos del método de Deygout [35] al modelo de Okumura-Hata y ajustan el modelo resultante en base a mediciones realizadas en ambientes cercanos a ferrocarriles en Portugal, utilizando para ello algoritmo genético. El ajuste en cuestión fue la minimización de la raíz del error medio cuadrático (RMSE, *Root Mean Squared Error*), entre los valores medidos y los estimados por el modelo modificado.

En el año 2015, Deussom y Tonye [36] modifican el modelo de Okumura-Hata a partir de mediciones realizadas en Camerún, con el sistema de telefonía celular de tercera generación (3G) CDMA2000. Para ello, recurren a la técnica de inteligencia computacional PSO (*Particle Swarm Optimization*), para minimizar el RMSE.

1.2 Planteamiento del Problema

La planificación y dimensionamiento de un sistema de Televisión Digital Terrestre (TDT) requiere, entre otras cosas, la estimación lo más precisa posible de las pérdidas por propagación, para de esa manera poder predecir, también con el menor grado de incertidumbre posible, la cobertura del mismo.

Como en todo sistema de telecomunicaciones, el error cometido en la estimación de su cobertura redundante en un subdimensionamiento o sobredimensionamiento. En el primer caso, la cobertura real del sistema, una vez puesto en operación, será menor a la estimada; lo que trae como consecuencia insatisfacción por parte del usuario. Por su parte, el sobredimensionamiento trae como resultado la implementación de un número mayor de equipos (por ejemplo, transmisores) a los requeridos, acarreando una innecesaria inversión adicional por parte del operador del sistema.

Ahora bien, a pesar de que en la literatura se consiguen diversos modelos que permiten predecir las pérdidas de propagación en sistemas TDT [4-6, 15-22, 25-28, 30-34], dado que cada uno de ellos ha sido obtenido para un determinado conjunto de mediciones realizadas en determinados tipos de ambientes y condiciones de propagación, la utilización de los mismos arrojan resultados imprecisos cuando se aplican en otros ambientes u otras condiciones de propagación, como es el caso, por ejemplo, de las ciudades de Quito, Ecuador [6] y Caracas, Venezuela [7, 8].

1.3 Justificación

En el presente trabajo se plantea la optimización de uno de los modelos que de acuerdo a la literatura está entre más precisos en cuanto a la estimación se refiere, como lo es el de la Recomendación ITU-R P-1812-3 [5]. Las técnicas que serán aplicadas para ello serán dos de las técnicas de inteligencia computacional, específicamente, PSO (*Particle Swarm Optimization*) [9-13] y algoritmos genéticos [11-14]. Dado que para la referida optimización se recurrirá a mediciones del nivel de campo eléctrico y nivel de señal recibido realizadas en ambientes exteriores de Quito y Caracas, respectivamente, la nueva versión del mencionado modelo estimará con mayor precisión los valores de dicha potencia en ambas localidades, con lo que se minimizará el subdimensionamiento o sobredimensionamiento en el proceso de PyD de sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT) en ambas ciudades y otras localidades en el mundo con características similares de propagación.

Adicionalmente, el trabajo en cuestión tienen el valor agregado de impulsar, por una parte, el desarrollo de modelos de propagación en Ecuador que se ajusten mejor a las características propias de las localidades del país; y por otra parte, también se continúa impulsando el uso de técnicas de inteligencia computacional para la solución de problema de optimización en telecomunicaciones.

1.4 Descripción de la Solución Propuesta

Se cuenta con una base de datos de mediciones del campo eléctrico recibido y la potencia recibida en ambientes exteriores, realizadas con sistemas TDT en las ciudades de Quito (Ecuador) y Caracas (Venezuela), respectivamente. Las mediciones en cuestión son utilizadas para ajustar el modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 de manera tal que dicho modelo pueda predecir con mayor precisión las pérdidas por propagación en dichos ambientes para ambas ciudades.

Tal como ha sido mencionado, el referido ajuste se llevará a cabo mediante la utilización de dos (2) de las técnicas de computación inteligente: PSO (*Particle Swarm Optimization*) y algoritmo genético.

La mejora en la precisión de la estimación de dichas pérdidas se verifica mediante la comparación del RMSE (*Root Mean Squared Error*) que arroje el modelo ajustado y el modelo original de la Recomendación ITU-R P.1812-3.

1.5 Objetivos

General

Optimizar el desempeño de la Recomendación ITU-R P.1812-3 en la predicción de las pérdidas de cobertura de sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT), utilizando para ello las técnicas de inteligencia computacional PSO (*Particle Swarm Optimization*) y algoritmo genético (AG).

Específicos

- Estudiar los modelos de predicción mayormente utilizados para la predicción de las pérdidas de propagación en sistemas TDT, con énfasis en la Recomendación ITU-R P.1812-3.
- Examinar las técnicas de inteligencia computacional en PSO (*Particle Swarm Optimization*) y algoritmos genéticos (AG).
- Analizar los resultados de las mediciones realizadas sobre sistemas TDT en Quito, Ecuador y Caracas, Venezuela.
- Realizar los ajustes de optimización de la Recomendación ITU-R P.1812-3, utilizando PSO y algoritmo genético, en base a las mediciones realizadas sobre sistemas TDT en Quito, Ecuador y Caracas, Venezuela.
- Comparar, en términos del RMSE, el desempeño de la Recomendación ITU-R P.1812-3 original y de las versiones optimizadas de dicho modelo, ante los valores medidos.

1.6 Alcance y Limitaciones

El alcance del presente trabajo se concreta a la optimización del modelo de propagación de la Recomendación ITU-R P.1812-3, en términos del ajuste de la expresión final del modelo para la estimación de las pérdidas. Específicamente, se lleva a cabo el ajuste de cuatro (4) expresiones modificadas del modelo original, representando cada uno de ellos prácticamente un nuevo modelo para la predicción de las pérdidas de propagación en sistemas TDT.

Asimismo, el trabajo se limita a la evaluación de la efectividad, en la referida optimización, de dos (2) de las existentes técnicas de inteligencia computacional específicamente, PSO y algoritmo genético. Sin embargo, los algoritmos aquí desarrollados para la implementación de dichas técnicas en el ajuste del mencionado modelo de propagación son escalables para la optimización de otros modelos de propagación, siempre y cuando se cuente con mediciones de campo. Asimismo, los algoritmos en cuestión también pueden ser utilizados para ajustar otras variables, no sólo del modelo de propagación de la Recomendación ITU-R P.1812-3, sino de otros modelos.

En relación a las limitaciones surgidas para el desarrollo del presente trabajo, las mismas se refieren básicamente a la dificultad que contar con la base de datos

producto de mediciones de campo para TDT, bien sea que deseen realizar dichas mediciones o bien se que pretenda a acceder a resultados de mediciones realizadas por entes gubernamentales, instituciones universitarias, centros de investigación, etc. En el primer caso, es extremadamente difícil para un investigador tener acceso a los equipos necesarios para realizar mediciones de TDT, mientras que en el segundo caso la gran mayoría de las instituciones, investigadores, etc., que poseen mediciones de ese tipo no las publica debido a razones de confidencialidad, no cultura de publicación, entre otras.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE TDT, PSO Y ALGORITMOS GENÉTICOS

En este capítulo, se estudia la arquitectura de un sistema de Televisión Digital Terrestre (TDT) y los aspectos básicos de los fenómenos de propagación que tienen lugar en dichos sistemas, específicamente, múltiple trayectoria, desvanecimiento y retardo en la propagación. También son tratados algunos de los modelos de propagación existentes en la literatura que son suelen ser utilizados en la planificación y dimensionamiento (PyD) de sistemas TDT. Finalmente, se hace una revisión de los aspectos más resaltantes de las dos (2) técnicas de inteligencia computacional PSO (*Particle Swarm Optimization*) y algoritmo genético (AG), usadas en el presente trabajo para la optimización del modelo de propagación de la Recomendación ITU-R P.1812-3.

2.1 Arquitectura de un Sistema TDT (Televisión Digital Terrestre)

La arquitectura de un sistema TDT es similar a la de un sistema de TV analógica y por lo general suele ser como la mostrada en la Figura 2.1 [37, 38]. Está conformada principalmente por una cabecera o centro de gestión de contenidos, el telepuerto o centro de transmisión o difusión, centros transmisores y retransmisores locales y el subsistema receptor, el cual a su vez consta de las antenas de recepción, el decodificador, mejor conocido como STB (*Set-Top Box*), externo o integrado y las unidades de usuario propiamente dichas (televisor, celular, tabletas, etc.).

La cabecera entrega a la red del sistema de TDT la señal de video, audio y datos, ya procesada, a ser transmitida a los usuarios del servicio de TV. Dicha cabecera está conformada básicamente por el centro de producción del contenido (que puede ser producción propia o proveniente de otras fuentes) y el centro de transmisión o difusión como tal de esa señal de video, audio y datos.

Los mencionados centros de producción y de transmisión de la señal pueden estar ubicados en un mismo espacio físico, como por ejemplo, en el caso de las operadoras de TV que emiten su señal directamente hasta los usuarios, sin o con

retransmisores; pero también pueden estar ubicados en espacios físicos separados, es decir, los centros de producción de contenido se encuentran en las localidades físicas de las operadoras de TV, mientras que el centro de transmisión, también conocidos como telepuertos, puede estar físicamente localizado en instalaciones que sirvan a una o más operadoras para dicha difusión.

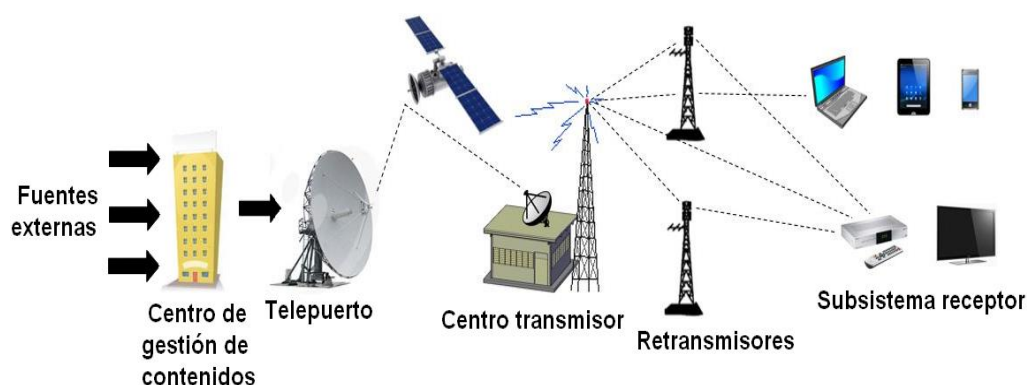


Figura 2.1: Arquitectura básica de un sistema TDT.

Es importante resaltar que la programación que se transmite al usuario puede ser generada en el centro de producción o en parte o su totalidad fuera del mismo, en ambos casos, mediante cámaras digitales o tradicionales. Si las señales de audio y video son provenientes desde lugares externos al centro de producción, las mismas son transmitidas al centro a través de sistemas de telecomunicaciones tales como radioenlaces fijos (enlaces de microondas), enlaces satelitales o enlaces de fibra óptica.

En cualquier de los casos, es decir, programación generada en su totalidad o no en el centro de producción, en éste tienen lugar los procesos del procesamiento digital de la señal, tales como compresión, multiplexación de los diferentes flujos (incluyendo el de datos, logos, marcas, etc.), re-multiplexado, codificación de canal, inserción de bytes de corrección y detección de errores. El flujo resultante se transmite al centro de difusión o telepuerto, a través de enlaces de microondas y/o enlaces de fibras ópticas.

En el centro de transmisión la señal provenientes del centro de producción de contenido se demodula para que en el transmisor como tal sea sometido al proceso OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) o COFDM (*Code OFDM*) y seguidamente al filtrado, amplificación y envío a las antenas de transmisión.

Conforme fue mencionado anteriormente, la señal proveniente desde el centro de difusión o telepuerto puede ser transmitida directamente al usuario a través de retransmisores locales (ver Figura 2.2) o ser retransmitida a un satélite de comunicaciones, para de esa manera poder transportar dicha señal hasta otras regiones de un país y desde allí, mediante centros transmisores y/o retransmisores locales, brindar señal a los usuarios, tal como muestra la Figura 2.3.

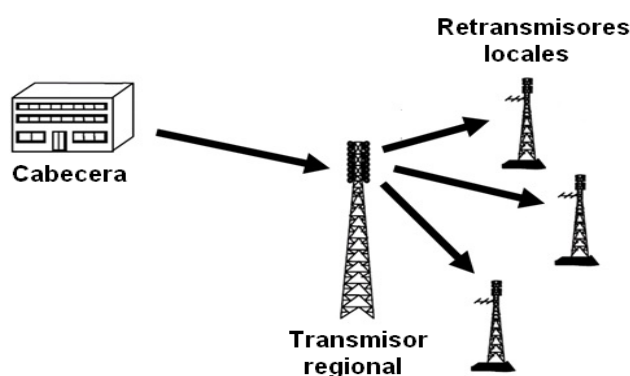


Figura 2.2: Red de trasmisión de la señal TDT sin auxilio de satélite.

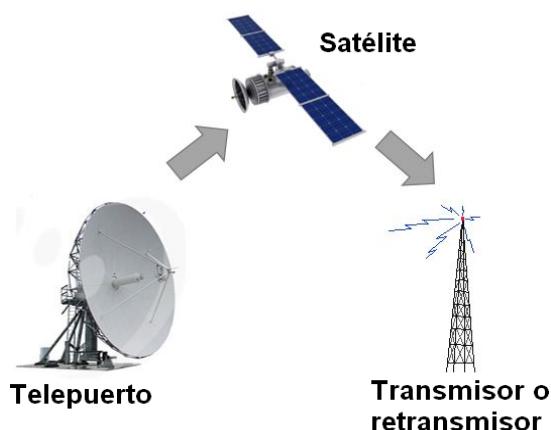


Figura 2.3. Retransmisión de la señal TDT a través de satélite.

Desde los retransmisores locales la señal se transporta, siempre de manera inalámbrica, hasta el subsistema receptor conformado, tal como ya fue mencionado, por:

- Las antenas de recepción, que pueden de exteriores (generalmente colocadas en las azoteas de las casas o edificios) o de interiores (localizadas directamente en el interior de las residencias, oficinas comerciales, etc.).
- El decodificador o STB (*Set-Top Box*), que puede ser externo o estar incorporado internamente en el televisor.
- Las unidades de usuario, es decir, televisor, computador, celular, tabletas y otros

Es oportuno destacar que se cuenta también con subsistemas receptores de TDT integrados en unidades similares a los *pendrive* para computadoras. En este caso, en dicha unidad se encuentra la antena receptora (visible o no), el decodificador y la interfaz con el computador. En la Figura 2.4, se muestra un receptor de TDT como el mencionado [39].



Figura 2.4: Receptor de TDT.

2.2 Principales Aspectos de Propagación en Sistemas TDT

Debido a las bandas de frecuencia en las que operan los sistemas de TDT, es decir, VHF (*Very High Frequency*) y, más frecuentemente, UHF (*Ultra High Frequency*), la onda electromagnética que se propaga desde los transmisores o retransmisores locales hasta el subsistema receptor, se ve sometida a [3, 40]:

- La atenuación que sufre toda señal con la frecuencia de operación y la distancia entre el transmisor y receptor.
- Los mecanismos de refracción, reflexión, difracción y dispersión.

La refracción es la desviación que sufre la onda electromagnética cuando la misma atraviesa medios con diferentes índices de refracción, tal como ocurre en la propagación troposférica, que es la que tiene lugar en los sistemas TDT.

Por su parte, la reflexión se refiere al fenómeno producido cuando una onda electromagnética incide sobre un medio eléctricamente diferente, por lo que una porción de la energía asociada a la onda es reflejada hacia el medio inicial, en otra dirección diferente a la de incidencia.

A su vez, la difracción está asociada a la redistribución que sufre la energía de la onda en varias direcciones cuando ésta pasa “rodeando” o “eléctricamente muy próxima” a un obstáculo.

Finalmente, la dispersión es similar a la difracción, pero tiene lugar cuando dicha onda se consigue en su trayectoria a un obstáculo cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda de la onda.

2.2.1 Múltiple Trayectoria

El efecto de al menos uno de los mecanismos de propagación señalados en la sección anterior, hace con que la señal recibida por la antena receptora de un sistema TDT sea, en realidad, la suma vectorial de las distintas versiones de la señal que arriban a la antena desde diversas direcciones. Este fenómeno es el conocido como múltiple trayectoria, ilustrado en la Figura 2.5.

La magnitud y fase con la que arriba cada versión de la señal al receptor es aleatoria, por lo que para fines de planificación y dimensionamiento de un sistema de telecomunicaciones sujeto a la múltiple trayectoria, se recurre a distribuciones estadísticas que tienden a representar el canal. Específicamente, cuando se trata de un canal de radio con múltiple trayectoria, se producen rápidas fluctuaciones sobre el nivel de señal recibido, por lo que la distribución estadística que mejor representa a

dicho canal es la de Rayleigh [41], debido a que no hay línea de vista entre transmisor y receptor.

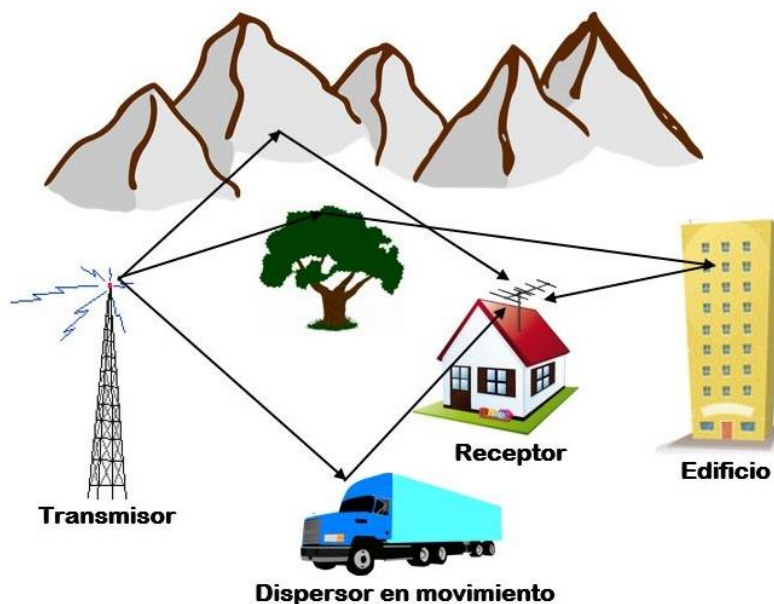


Figura 2.5: Propagación por múltiple trayectoria.

2.2.2 Desvanecimiento

Debido a que la suma de las señales que alcanzan a la antena receptora es aleatoria, el efecto de la múltiple trayectoria en el nivel de campo eléctrico o nivel de potencia en el receptor puede ser constructivo o destructivo; en este último caso, la señal recibida sufrirá desvanecimientos (*fading*) de pequeña escala (cortas duración) que puede ser de gran profundidad, ocasionando que el sistema quede fuera de operación durante los intervalos de tiempo en los que tienen lugar dicho desvanecimiento. En las Figura 2.6 y 2.7, se puede observar el efecto de la propagación por trayectoria múltiple en el nivel de señal recibido en un sistema de telecomunicaciones [42, 43].

2.2.3 Retardo en la Propagación

Cada versión de la señal que arriba a la antena del subsistema receptor sigue un camino diferente, recorriendo distancias también diferentes entre

el transmisor y el receptor, lo que provoca que cada versión de la señal alcance a la mencionada antena en instantes de tiempo diferente, es decir, llegan con retardos en relación a la primera que haga el arribo. Por ello, la señal en el receptor en realidad estará conformada por un conjunto de señales dispersos en el tiempo, tal como se muestra en la Figura 2.8 [42].

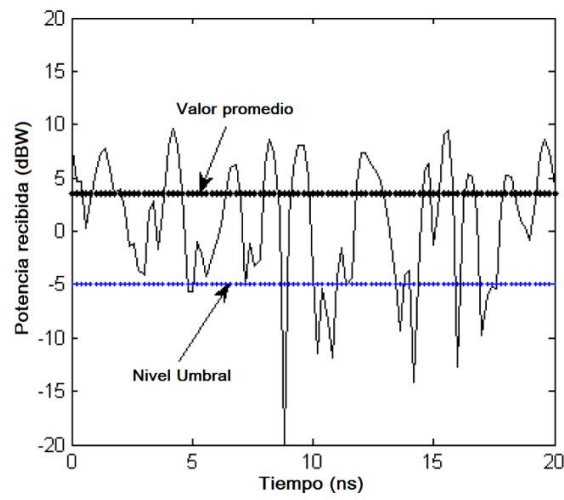


Figura 2.6: Efecto de la propagación por múltiple trayectoria, en el nivel de potencia recibida.

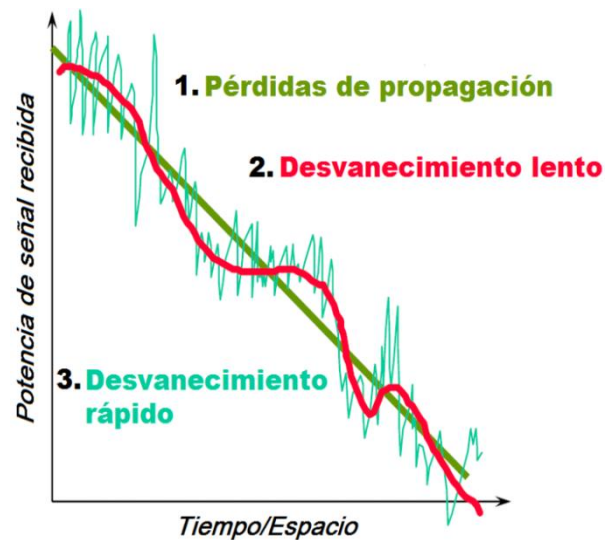


Figura 2.7: Variaciones en el nivel de potencia recibida, debido a las diferentes fuentes de desvanecimiento.

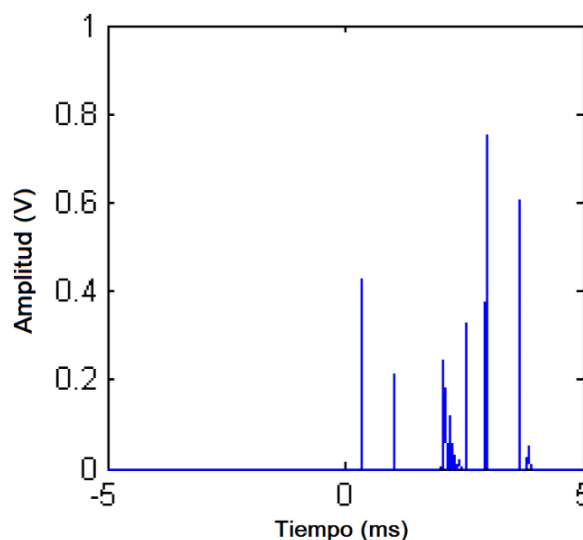


Figura 2.8: Señal recibida en un canal con múltiple trayectoria.

Si la mencionada dispersión, conocida como *delay spread*, es mayor que la duración del símbolo (relacionado con la velocidad de transmisión del sistema), se produce interferencia intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*), lo que trae como consecuencia un deterioro en el BER (*Bit Error Rate*) a la entrada del receptor que pudiera ser mayor al máximo permitido, causando interrupción de la comunicación.

Ahora bien, la técnica COFDM, mencionada en la sección 2.1, utilizada en sistemas TDT y muchos otros sistemas inalámbricos, e incluso sistemas de telecomunicaciones cableados, tiene como principal objetivo combatir el desvanecimiento por múltiple trayectoria, así como la ISI (*Intersymbol Interference*), mediante la división de la portadora en varias subportadoras de banda estrecha, transmitidas de manera simultánea (con lo cual se incrementa la duración del símbolo), así como con la adición de un código convolucional en las subportadoras y un bloque de entrelazado (*interleaving*) de bits [44, 45].

Por otra parte, el retardo de la propagación en sistemas TDT también es empleado para determinar el intervalo de guarda necesario para ayudar a combatir la ISI, de manera tal que las versiones de la señal que lleguen

con retardos mayores lo hagan dentro del intervalo de guarda, durante el cual no se transmite información útil [43].

2.3 Modelos de Propagación utilizados para Sistemas de Televisión Digital

Tal como se mencionó anteriormente, existen diversos modelos en la literatura que pueden ser utilizados para la estimación de las pérdidas de propagación en sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT). No obstante, entre los más utilizados están:

- Longley-Rice.
- *Irregular Terrain Model* (ITM).
- *Irregular Terrain with Obstructions Model* (ITWOM).
- Okumura-Hata.
- Recomendación ITU-T 1546-5.
- Recomendación ITU-T 1812-3.

2.3.1 Longley-Rice

El modelo de Longley-Rice [15-16, 27, 46] se basa en un algoritmo numérico de cálculo, válido para cualquier tipo de terreno. Fue desarrollado inicialmente por Anita G. Longley y Phil Rice, en 1968 [15], programado en lenguaje FORTRAN, para la banda de frecuencia entre 20 MHz y 40 GHz, altura de las antenas entre 0,5 km y 3 mil metros, distancias desde el transmisor de 1 km a 2mil km y refractividad del suelo entre 250 N-unidades y 400 N-unidades.

El modelo de Longley-Rice considera la geometría del camino del perfil del terreno y la refractividad de la troposfera. Para caminos con línea de horizonte, es decir, línea de vista (LOS, *Line of Sight*) se emplea principalmente el modelo de tierra plana [27], adicionando el modelo de “filo de cuchillo” en el caso de que sea necesario determinar pérdidas de propagación debido a obstáculos aislados en el trayecto [27]; mientras que, para trayectos transhorizonte o sin línea de vista (NLOS, *Non LOS*) se considera la curvatura de la tierra y se utiliza la teoría de tropodispersión, es decir, propagación por dispersión troposférica [47].

Para su aplicación del modelo Longley-Rice, además de la frecuencia de operación, la distancia entre transmisor y receptor y las alturas de las antenas del transmisor y receptor, se requiere como datos de entrada la refractividad del suelo, radio efectivo de la Tierra, conductividad y constante dieléctrica del suelo y el clima [46]. También se necesitan parámetros específicos del trayecto, tales como distancias del horizonte de las antenas (d_{Lb} y d_{Lm}), ángulos de elevación del horizonte (θ_{eb} y θ_{em}), distancia angular para un camino transhorizonte (θ_e), alturas efectivas de las antenas (h_b y h_m) y un parámetro asociado a la irregularidad del terreno. En la Figura 2.9, se muestran algunos de esos parámetros [46].

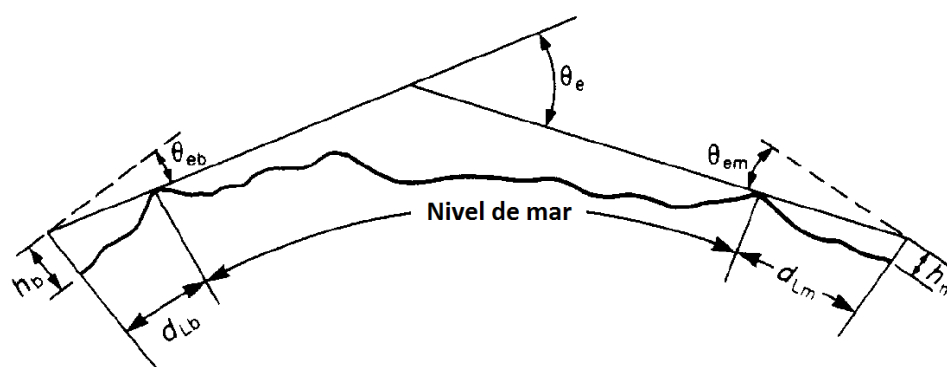


Figura 2.9. Geometría específica del trayecto para el modelo de Longley-Rice.

Desde su publicación original, el modelo de Longley-Rice ha sufrido importantes mejoras en cuanto a su grado de precisión en la predicción de pérdidas y a la variedad de situaciones reales que considera, como por ejemplo, la adición del "factor urbano" (UF, *Urban Factor*), que considera el impacto de la densidad de edificaciones en un ambiente urbano [48].

Por otra parte, es importante señalar que actualmente existen herramientas computacionales basadas en dicho modelo, disponibles para su uso gratuito, tales como Radio Mobile [49] y SPLAT (*Signal Propagation, Loss, And Terrain*) [50], para frecuencias entre 20 MHz y 20 GHz. Asimismo, la NTIA (*National Telecommunications and Information Administration*) de Estados Unidos, también tiene a disposición del

público, de forma gratuita, una herramienta computacional, conocida como ITM (*Irregular Terrain Model*), válida para el mismo rango de frecuencia (20 MHz a 20 GHz), que aplica para situaciones de punto-área (usada cuando no se cuenta con la descripción exacta del terreno) y también sistemas punto a punto (cuando se tiene a disposición el perfil del terreno entre transmisor y receptor) [51].

2.3.2 Irregular Terrain Model (ITM)

Tal como ha sido mencionado, el modelo ITM (*Irregular Terrain Model*) es una herramienta computacional implementada por la NTIA de Estados Unidos, basada en el modelo Longley-Rice, para el rango de frecuencia desde 20 MHz hasta 20 GHz. Fue desarrollado por Hufford y colaboradores en 1982 [16, 46, 51].

En líneas generales, se podría decir que ITM estima la atenuación media de la señal en función de la distancia y pérdidas adicionales debidas a refracciones en obstáculo existentes entre las antenas transmisora y receptora.

Los restantes parámetros de entrada para la aplicación de ITM están en los mismos rangos de validez del modelo Longey-Rice.

2.3.3 Irregular Terrain with Obstruction Model (ITWOM)

Longley-Rice es impreciso cuando es utilizado para predicción de las pérdidas de propagación en el rango de línea de vista y en el rango cercano a la difracción y más aún cuando se mejora la resolución de la base de datos de la altura del terreno (las herramientas computacionales basadas en ITM utilizan mapas con resolución de 30 arco-segundo, es decir, aproximadamente 1 km) [21-22, 52-53].

Para superar esa imprecisión, Shumate [21, 52] desarrolló una versión mejorada de ITM, llamada ITWOM, en la que reemplaza los cálculos que ITM hace en los rangos de línea de vista y obstáculos cercanos, por ecuaciones de transferencia radiativa (RTE, *Radiative Transfer Equations*), las cuales permiten determinar el cambio de densidad de

potencia de la onda electromagnética a lo largo de su curso en el trayecto hasta el receptor [54]. En ITWOM, las funciones RTE son usadas para calcular de manera determinística los resultados obtenidos a partir de las Figuras 1, 9 y 17 de la Recomendación ITU-R P.1546-2 [55]. Además, en ITWOM se emplean las leyes de Beer [23] y Snell [24], dispersión en el espacio libre [22], las recomendaciones ITU-R P.453-7 [56], P.530-7 [57], P.833-2 [58] y un modelo genérico aplicable a radio propagación de a través de vegetación en la banda de frecuencia de 1 GHz a 60 GHz [22].

Como datos de entrada sólo son requeridas la frecuencia de operación (entre 10 MHz y 3 GHz), las alturas de las antenas del transmisor y el receptor, así como la distancia (entre 1 km y 1000 km).

2.3.4 Okumura-Hata

El modelo de Okumura-Hata [3, 17] permite predecir el valor de la pérdida de propagación para las siguientes condiciones:

- Rango de frecuencia (f): 150 MHz a 1500 MHz.
- Altura de la antena transmisora o estación base (h_1): 30 m - 200 m.
- Altura de la antena receptora o estación móvil (h_2): 1 m - 10 m.
- Distancia transmisor al receptor (d): 1 km a 20 km.

Por otra parte, los entornos o ambientes de aplicación del modelo Okumura-Hata son:

- Áreas urbanas:
 - Ciudades grandes.
 - Ciudades pequeñas o medianas.
- Áreas suburbanas.
- Áreas rurales.

El valor medio de la pérdida básica de propagación, L_b , se obtiene mediante [3, 17]:

$$L_b(\text{dB}) = A + B \log(d) + C \quad (2.1)$$

Donde:

$$A = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_1) - a(h_2) \quad (2.2)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log(h_2) \quad (2.3)$$

Donde $a(h_2)$ es un factor de corrección dependiente de la altura de la antena receptora o estación móvil y del tipo de área de servicio; mientras que C depende de la frecuencia y del ambiente de aplicación, según:

Áreas urbanas

- Ciudades grandes:

$$a(h_2) = \begin{cases} 8,29[\log(1,54h_2)]^2 - 1,1 & f < 300 \text{ MHz} \\ 3,2[\log(11,57h_2)]^2 - 4,97 & f \geq 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$C = 0$$

- Ciudades medianas o pequeñas:

$$a(h_2) = [1,1 \log(f) - 0,7]h_2 - [1,56 \log(f) - 0,8] \quad (2.5)$$

$$C = 0$$

Áreas suburbanas

$$C = -2\left[\log\left(\frac{f}{28}\right)\right]^2 - 5,4 \quad (2.6)$$

Áreas rurales o abiertas

$$C = -4,78[\log(f)]^2 + 18,33\log(f) - 40,98 \quad (2.7)$$

Es importante resaltar que para áreas suburbanas y rurales, el valor de $a(h_2)$ se determina igual que para el caso de ciudades medianas y pequeñas de acuerdo a la expresión (2.5). Cabe resaltar que, en las expresiones (2.1) hasta (2.7), “ d ” está en km, “ f ” en MHz, mientras que h_1 y h_2 son dadas en metros.

Una variación del modelo, conocida como Modelo COST231-Hata o Modelo Hata Extendido, permite ampliar el rango de frecuencias de aplicación del modelo Okumura-Hata de 1500 MHz a 2000 MHz, mediante

la siguiente definición para los parámetros A y B de la expresión (2.1) [3, 17]:

$$A = 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_1) - a(h_2) + C_M \quad (2.8)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log(h_2) \quad (2.9)$$

Donde $a(h_2)$ se calcula con las mismas expresiones (2.4) a (2.7), según el entorno de aplicación y la frecuencia de operación; C_M igual a 0 dB en ciudades medianas y pequeñas y C_M igual a 3 dB en ciudades grandes.

Igualmente, en el Anexo 8 de la Recomendación ITU-R P.1546-5 [4], se describe una versión del modelo Okumura-Hata válida para distancias mayores a 20 km.

2.3.5 Recomendación ITU-R P.1546-5

Se trata de un método para la predicción de la intensidad de campo eléctrico en sistemas punto-área, especialmente en los servicios de radiodifusión móvil terrestre y móvil marítimo, así como determinados servicios fijos (por ejemplo, los que emplean sistemas punto a multipunto), en la banda de frecuencias de 30 MHz a 3000 MHz y para distancias entre transmisor y receptor entre 1 km y 1000 km [3, 4].

En general, el modelo consiste en la interpolación de valores de intensidad de campo eléctrico, obtenidos a partir de curvas que representan la intensidad de campo eléctrico para una potencia radiada aparente (p.r.a.) de 1 kW en función de parámetros como la altura de la antena transmisora, para los valores nominales de frecuencia de 100 MHz, 600 MHz y 2000 MHz y para porcentajes de tiempo, también nominales, de 1%, 10% y 50%.

El procedimiento o algoritmo completo para la estimación del campo eléctrico en un determinado punto localizado a cierta distancia del transmisor, es bastante minucioso y aparece en la Recomendación ITU-R P.1546-5 [4]. Un resumen de los detalles de dicho algoritmo es encontrado en el trabajo de grado de maestría de Uzcátegui [3].

En todo caso, la pérdida de propagación estimada mediante la Recomendación ITU-R P.1546-5, se puede determinar a partir de:

$$L(\text{dB}) = 139,3 - E + 20 \log(f) \quad (2.10)$$

Donde “E” corresponde al valor de intensidad de campo eléctrico ($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$) estimado por Recomendación ITU-R P.1546-5 (con las correspondientes correcciones a las que haya lugar según lo establecido por el método) y “f” es la frecuencia en MHz.

2.3.6 Recomendación ITU-R P. 1812-3

El modelo permite predecir la intensidad del campo eléctrico excedida durante un determinado porcentaje de tiempo ($p\%$) de un año promedio, en el rango de $1\% \leq p \leq 50\%$ y un porcentaje de las ubicaciones ($p_L\%$), en el rango de $1\% \leq p_L \leq 99\%$. Se aplica a sistemas terrestres de comunicaciones punto-área, operando en la gama de frecuencias de 30 MHz a 3000 MHz, con trayectos desde 250 m hasta 3000 km y con receptores ubicados hasta 3 km de altura sobre la superficie terrestre [3, 5].

La Recomendación ITU-R P.1812-3, que en realidad es considerada un complemento a la Recomendación ITU-R- P.1546-5, implica en términos generales [3, 5]:

- Cálculo de las pérdidas de transmisión básicas no excedidas durante el p (%) del tiempo.
- Cálculo de los efectos de variabilidad de la ubicación del receptor y penetración en edificios.
- Conversión de la intensidad de campo eléctrico a potencia radiada aparente (p.r.a.).

El procedimiento para la estimación de la intensidad de campo eléctrico descrito en la Recomendación ITU-R P.1812-3 se realiza en un trayecto específico; por tanto, la predicción punto-área consiste en un conjunto de predicciones punto a punto en el área de interés. Por ello, desde un punto de vista práctico, la aplicación del modelo en cuestión requiere contar con

una base de datos digital de las elevaciones del terreno en la zona de interés, lo cual hace del modelo mencionado un método más preciso para la predicción de las pérdidas de propagación que el de la Recomendación ITU-R P.1546-5.

Los factores o elementos que considera el modelo para la estimación de la intensidad de campo eléctrico son [3, 5]:

- Visibilidad directa o LOS.
- Difracción.
- Dispersión troposférica.
- Propagación por ductos, reflexión, etc.
- Variación por la ocupación del terreno y la ubicación del receptor.
- Penetración en edificios.

El algoritmo para la predicción de las pérdidas de propagación del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812.-3 es incluso más minucioso que el de la Recomendación ITU-R P.1546-5. Por tanto, en este trabajo no se detalla el mismo. Sin embargo, dicho algoritmo aparece de forma completa en la Recomendación ITU-R P.1812.-3 [5], mientras que un resumen de ese algoritmo se encuentra en el trabajo de grado de maestría de Uzcátegui [3].

Finalmente, en caso de ser requerido, se puede determinar, a partir del valor de pérdidas L_b , el valor de intensidad de campo eléctrico $E \left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right)$ para una potencia radiada aparente (p.r.a) de 1 kW, según:

$$E \left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right) = 199,36 + 20 \log(f) - L_b \quad (2.11)$$

2.4 Técnica PSO (*Particle Swarm Optimization*)

La optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*) es una técnica bioinspirada en el comportamiento que exhiben ciertos seres vivos para buscar alimentos, tal es el caso de las bandadas de pájaros, cardumen de peces, enjambre de abejas e incluso hasta cierto comportamiento social de los humanos. Esta técnica, desarrollada en 1995 por el psicólogo y sociólogo James Kennedy y el ingeniero electrónico Russell Eberhart [59], consiste en un número

de partículas (pájaros, peces, abejas, etc.) que se mueven en conjunto en un espacio de búsqueda, para encontrar el óptimo global (solución) entre todas las partículas, como por ejemplo, espacio de búsqueda en donde se encuentra mayor cantidad de alimento.

Cada partícula está caracterizada por su posición y su desempeño, por ejemplo, por la posición actual de cada pájaro de la bandada y la cantidad de alimento encontrado por él en dicha posición. Dicha partícula comunica a sus “vecinas” su aptitud en la búsqueda y puede recordar su posición en la cual realizó su mejor desempeño hasta el momento. Asimismo, también puede informar la posición de la partícula vecina que está referida al mejor desempeño del grupo.

De manera similar a otras técnicas evolutivas, PSO se caracteriza por la aleatorización en la generación de la población y el empleo de una función de ajuste, también llamada función de costo, aptitud o *fitness*. No obstante, en comparación con otras técnicas bioinspiradas, en PSO la cantidad de parámetros a ser ajustados suele ser pequeña, lo cual redundaría en una implementación más simple de su algoritmo, generalmente con un menor costo de procesamiento computacional [60].

Modelo Matemático de PSO

La estrategia de la solución de un problema de optimización mediante PSO se basa en la posición de cada partícula en el cúmulo, la cual se determina por tres (3) fracciones distintas de desplazamiento, tal como se ilustra en la Figura 2.10 [11].

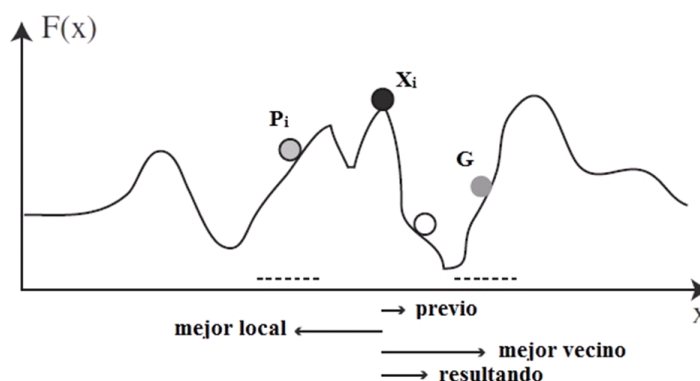


Figura 2.10: Actualización de la posición de una partícula en PSO.

Las referidas tres (3) fracciones son:

- Desplazamiento en la misma dirección que la partícula siguió en la iteración previa. Está representada por el vector de posición $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, que almacena la posición actual de la partícula "i" en la iteración "k", donde el parámetro "n" es el número de variables relacionadas con la partícula "i".
- Desplazamiento orientado hacia la posición en la cual la partícula obtuvo su mejor desempeño hasta el momento. Corresponde al vector $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$, el cual almacena la mejor posición encontrada por la partícula "i" hasta el momento.
- Desplazamiento dirigido hacia la posición de la partícula que ha mostrado mejor desempeño en el grupo hasta el momento. Está representada por vector $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$, que almacena el valor de adecuación de la partícula del grupo con mejor solución local de posición encontrada hasta el momento.

Adicionalmente, cada partícula tiene asociado un vector de velocidad $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$, el cual almacena la velocidad de la partícula "i". El vector "V_i" dirige el movimiento de la partícula y, en general, está compuesto por una componente relacionada con el movimiento actual y otra componente que suministra la dirección de búsqueda en la próxima iteración.

En definitiva, la nueva posición de cada partícula se determina considerando conjuntamente los vectores velocidad (X_i) y posición (V_i), es decir [61, 62]:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + C_1 R_1 (P_i - X_i^k) + C_2 R_2 (G_i - x_i^k) \quad (2.12)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (2.13)$$

Donde:

ω = Inercia o momento (considera el efecto de la velocidad anterior, para evitar que la partícula se mueva drásticamente de una iteración a otra).

C_1 = Parámetro cognitivo (cuantifica la experiencia propia de la partícula y se refiere a la tendencia de dicha partícula a retornar a la mejor posición encontrada).

C_2 = Parámetro social (representa la cooperación de la partícula con las restantes del grupo).

R_1 y R_2 = Números generados aleatoriamente de manera uniforme, en el intervalo (0, 1).

Algoritmo PSO Básico

En la Figura 2.11 se muestra el algoritmo general basado en PSO son [9].

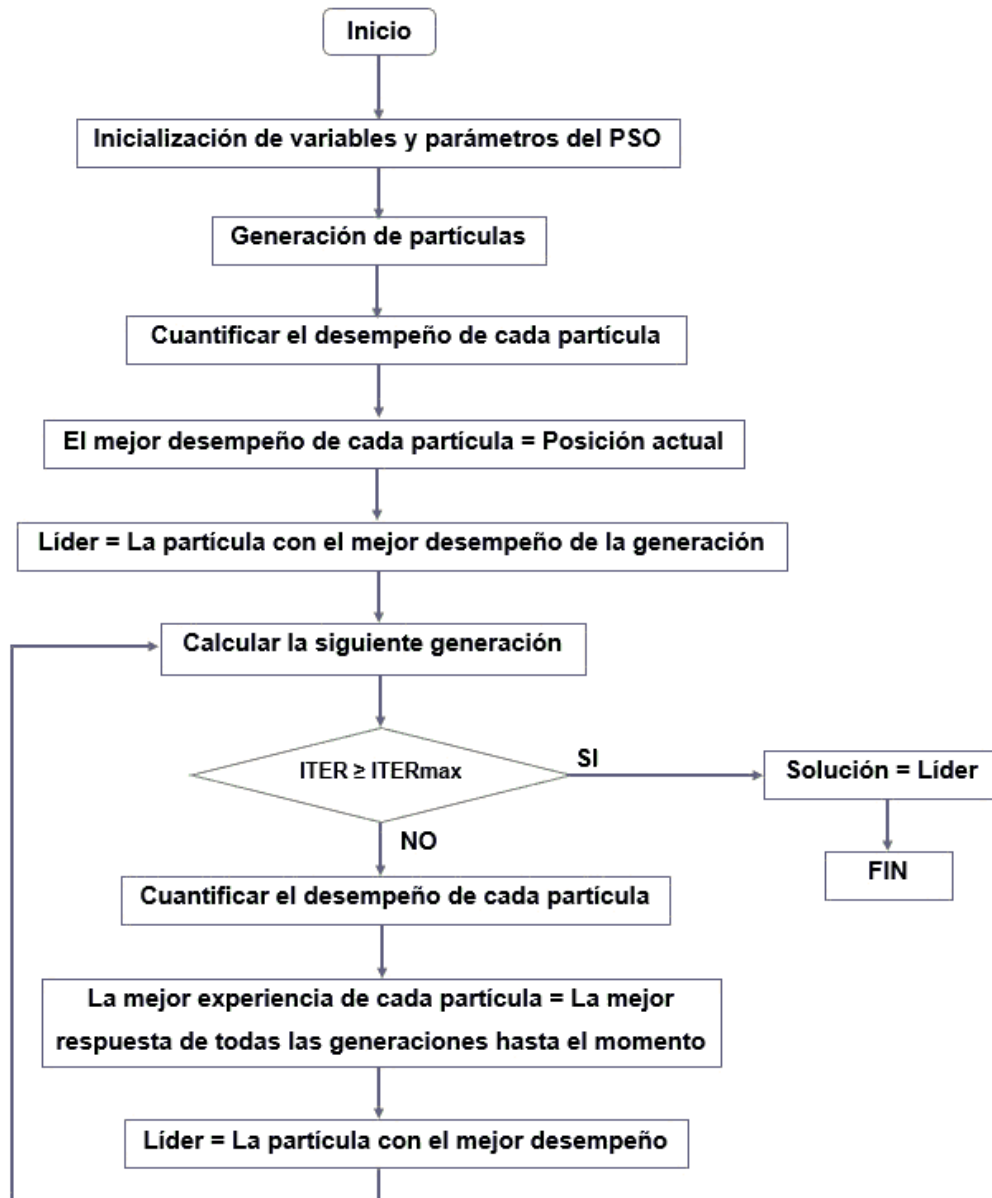


Figura 2.11: Diagrama de flujo de PSO.

A continuación se explican brevemente los principales pasos del algoritmo PSO:

1. Inicialmente (primera iteración), la experiencia de cada partícula es su posición actual. Seguidamente, se determina la siguiente posición y velocidad de acuerdo a las ecuaciones (2.12) y (2.13).
2. Se procede a cuantificar el desempeño de la partícula, la cual se refiere específicamente a la aptitud que tiene cada partícula “*i*” en relación a su mejor posición dentro del espacio de búsqueda.
3. Se realiza la búsqueda de la partícula con el mejor desempeño. Dicha partícula será la líder que guiará al resto del grupo o enjambre, es decir, se convierte en el “mejor global”.
4. Se crea una nueva generación (nueva conformación del grupo) ajustando la velocidad y posición. El proceso se repite hasta cumplir con el criterio de parada del algoritmo, que puede ser el cumplimiento con un número máximo de iteraciones fijado o la conquista de un valor de error aceptable.
5. Si en una de las generaciones existe una partícula que presenta una mejor aptitud que el líder actual, esta partícula se convertirá en el nuevo líder que guiará al resto del enjambre.

Al terminar la ejecución del algoritmo, la solución que arroja el método es la mejor posición previa encontrada por alguna partícula, es decir, la líder.

2.5 Algoritmo Genético

El algoritmo genético (AG) es una técnica de inteligencia artificial que posee la estructura de un algoritmo evolutivo y consta de un procedimiento iterativo sobre una población compuesta por individuos de diferente genética. Se trata de un método que emplea mecanismos de evolución de la naturaleza, simulando el comportamiento de individuos de una población en los cuales los más aptos o fuertes son los que sobreviven al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno.

Los individuos de la población pasan por un proceso de evolución y son representados por cromosomas; sus fenotipos son evaluados de acuerdo a una función de ajuste, calidad o *fitness*, en la cual mejores individuos son modificados

por operadores genéticos, obteniendo así nuevos y mejores genes que serán insertados en la población, sustituyendo los anteriores. El procedimiento continúa hasta que se encuentre el mejor individuo.

Establecido por John Holland a mediados de la década de los años 60 [63], el principio básico del algoritmo genético se refiere, por tanto, a la "supervivencia del más apto" entre los individuos de una generación, para resolver un problema.

Funcionamiento de un Algoritmo Genético

El algoritmo genético se implementa estudiando el desempeño o calidad de todos los individuos de la población. Una vez que la función de aptitud o calidad es evaluada, se genera una nueva población a través de los operadores genéticos, esto es, selección, recombinación (*crossover*) y/o mutación, reproducción y selección de los individuos sobrevivientes, tal como se puede observar en la Figura 2.12 [11]. En cada iteración, es creada una nueva generación de individuos, producto de la combinación de buenas características provenientes de diferentes ancestros y exclusión de los individuos no aptos de la vieja generación. Entonces, las especies y los individuos a medida que evolucionan van adquiriendo características cada vez más adaptadas al entorno en el que viven y éstos serán los mejores individuos creados por el algoritmo hasta el momento.

En la primera iteración, es decir, en la generación inicial o cero (0) del procedimiento, la población es generada aleatoriamente con elementos del dominio de la función de costo o desempeño. A partir de esto, los operadores genéticos se encargan de improvisar sobre la nueva generación de la población y el proceso se repite hasta que se encuentre un individuo con el desempeño deseado o se cumpla un criterio de parada del algoritmo [11].

Algoritmo Genético Básico

El diagrama de flujo que describe el desarrollo del algoritmo genético se observa en la Figura 2.13 [64].

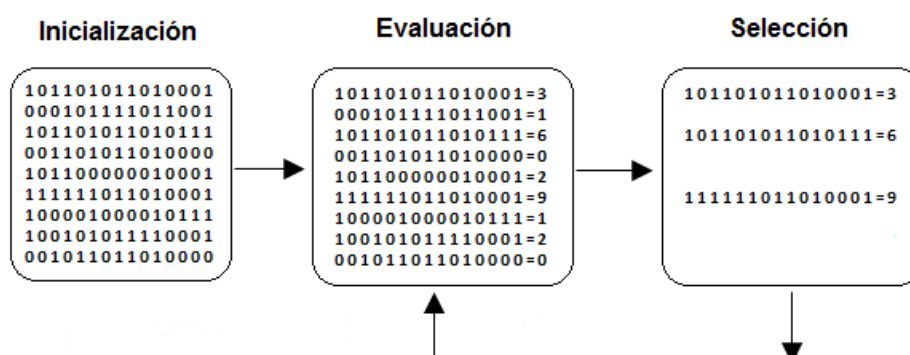


Figura 2.12: Operadores genéticos (cada cadena de bits representa los genes de los individuos).

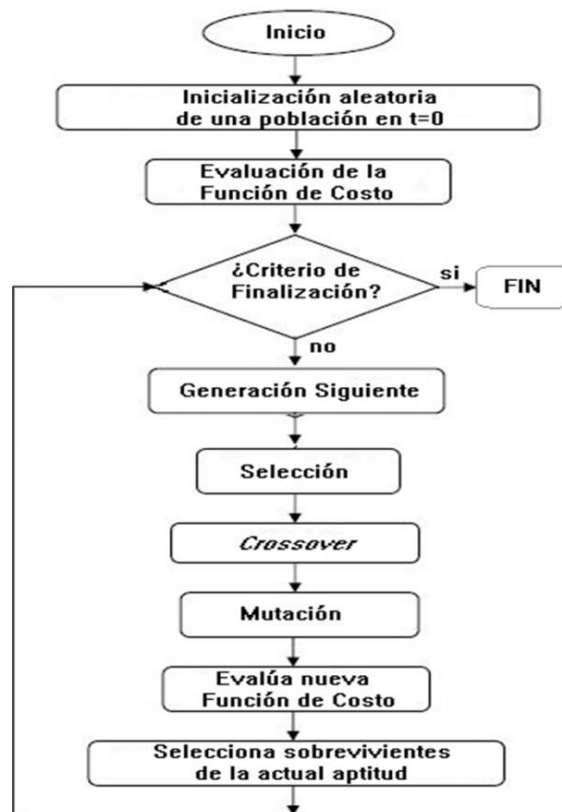


Figura 2.13: Diagrama de flujo del algoritmo genético.

Población inicial

La población inicial o primera generación debe ser lo suficientemente grande y diversa para garantizar que los individuos posean distintos valores de aptitud o desempeño, ya que, de no ser así, el proceso de selección puede no funcionar correctamente. Ello se realiza tomando en cuenta el espacio de búsqueda de la solución, el cual es generado aleatoriamente.

Cada uno de estos individuos o elementos creados representan una posible solución al problema. De igual manera, se establece el grado de aleatoriedad con el que se desea generar el espacio de búsqueda.

Función de costo o aptitud de cada individuo

La función de costo o función *fitness* es la que cuantifica las cualidades o desempeños de cada uno de los individuos. Está asociada a un valor numérico que evalúa el proceso de aprendizaje de los elementos.

La evaluación de la función de costo es un punto importante del algoritmo genético y debe ser tal que permita poner de manifiesto la aptitud de cada individuo, para el problema que se desea optimizar. Por tanto, es una de las partes de mayor consumo de tiempo durante la ejecución evolución del algoritmo. Dependiendo de las cualidades de cada uno de los individuos, se les permitirá ser o no seleccionados, bajo algún criterio previamente establecido, para luego participar en la recombinación que generará los nuevos candidatos que competirán por sobrevivir y ocupar un puesto en la siguiente generación.

Selección

El rol de la selección es escoger a los individuos más aptos de la generación actual para que sean los que generen la próxima generación, aumentando así, la probabilidad de tener individuos “aptos” durante la evolución del algoritmo. Esos son denominados “padres”.

Existen varias técnicas de selección, como lo son el “elitismo” [65], la selección aleatoria (conocida como selección por ruleta) [66, 67], selección de estado estacionario (muestreo estocástico) [66, 67] y selección de parejas según torneo (consiste en organizar un torneo sobre una pequeña selección de individuos de la población para cada individuo nuevo que será generado) [66, 67].

El proceso de selección del algoritmo genético aprovecha el conocimiento que se ha obtenido hasta el momento, eligiendo lo mejor que se haya encontrado e incrementando así el nivel de adaptación de toda la población.

Recombinación o crossover o reproducción

Este paso es aplicado una vez sean seleccionados los “padres”, generando “hijos” mediante la recombinación de sus genes, los cuales son combinados y cambiados mediante este método. El resultado se puede considerar como un conjunto de sub-soluciones producto de la combinación de los “padres”.

Existen diferentes técnicas para realizar ese cruzamiento o recombinación, todas ellos teniendo como finalidad mezclar los códigos (genes) de un individuo “A” y un individuo “B”, previamente seleccionados. El objetivo es que los sucesores hereden características deseables.

En la Figura 2.14 [11] se ilustran algunos de los mecanismos de reproducción o recombinación existentes: (a) cruce de un único punto; (b) cruce uniforme; (c) cruce aritmético; (d) cruce por secuencias y (e) cruce por árboles.

El mecanismo de *crossover* más utilizado en algoritmos genéticos es el de cruce de único punto, mostrado en la Figura 2.15 [67], el cual consiste en elegir aleatoriamente un punto (el mismo) de cruce en la cadena de genes de ambos “padres” y en base a dicho punto se intercambian las subcadenas generadas, para generar los dos “hijos” que combinan genes de ambos padres.

Mutación

La mutación es un operador que ayuda a encontrar una solución global al problema. Se basa en pequeñas modificaciones aleatorias de los genes de los individuos, para de esa manera hacer posible la evolución de los mismos, explorando variación sobre posibles soluciones ya existentes [11].

En la mutación se generan nuevos individuos que exploran regiones del dominio que probablemente aún no han sido visitadas. Al azar, se buscan nuevas soluciones posibles que tal vez consigan superar las ya encontradas hasta el momento.

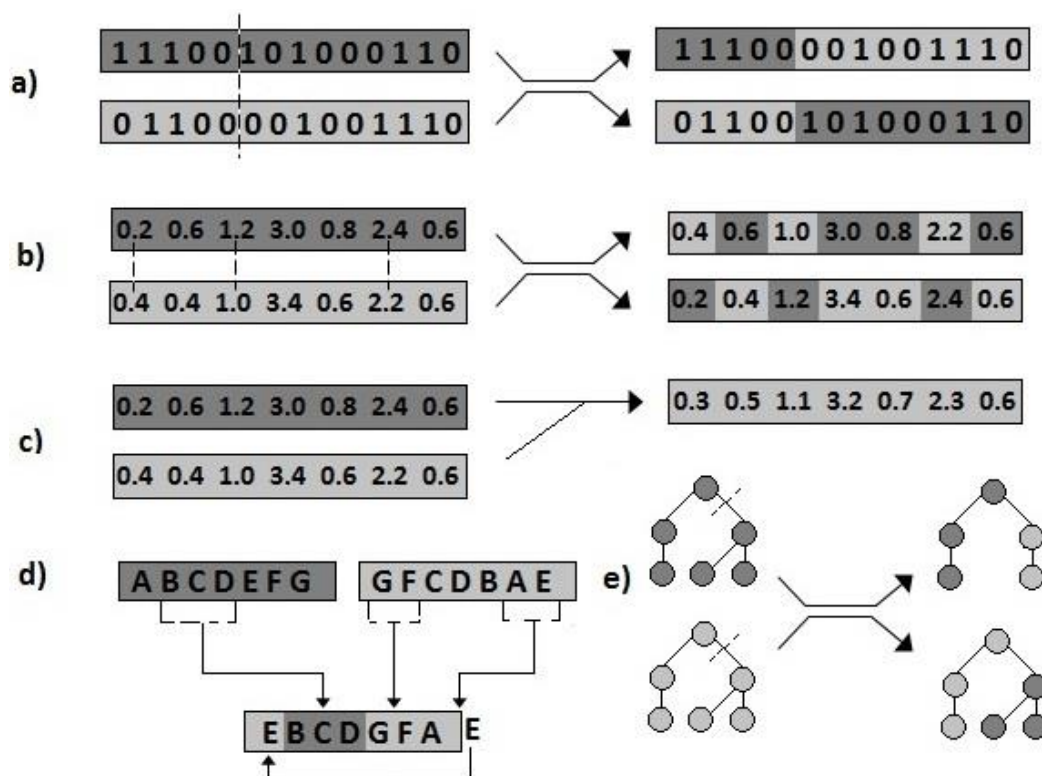


Figura 2.14: Ejemplos de mecanismos de *crossover*.

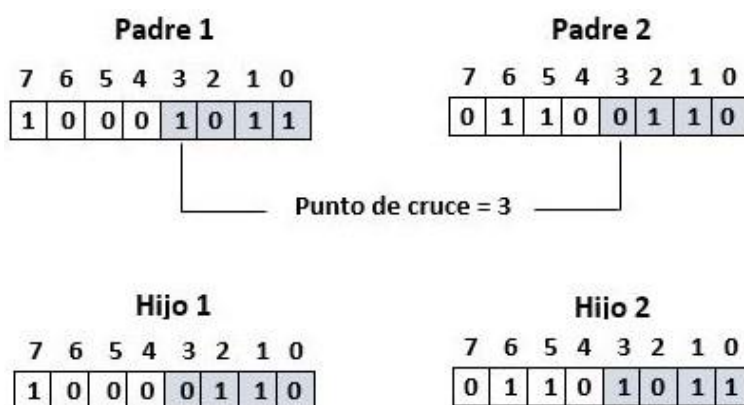


Figura 2.15: Mecanismo de *crossover* de único punto.

La Figura 2.16 [11] muestra algunos ejemplos de mecanismos de mutación: (a) intercambio de bit o sustitución puntual (que consiste en elegir al azar un punto o

gen del cromosoma y cambiar su valor a 1 a 0, o viceversa); (b) adición de un valor aleatorio a una posición en representaciones de valores reales; (c) intercambio del contenido de dos posiciones en una secuencia de representación; (d) mutación por árboles. De dichos mecanismos, el más utilizado es el de sustitución puntual.

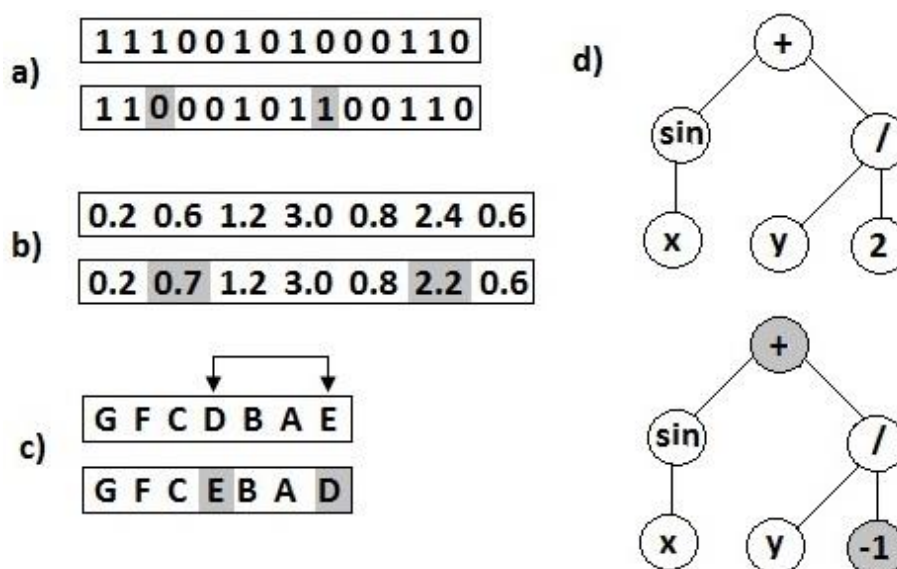


Figura 2.16: Ejemplos de mecanismos de mutación.

Generación siguiente

El siguiente paso en el algoritmo genético es seleccionar los “padres” que fueron escogidos de acuerdo a su desempeño y los “hijos” que fueron creados a partir de la reproducción o recombinación de los “padres”, así como los generados por la mutación. De esta manera, se conforma una nueva generación que cuenta con el mismo número de individuos de la generación anterior y están listos para competir por un puesto en la siguiente generación.

Criterio de finalización

Es el último paso del procedimiento. Su función es permitir que el algoritmo genético detenga la búsqueda. Al respecto, básicamente existen dos (2) criterios de finalización del algoritmo: 1) Que uno de los individuos presente las aptitudes deseadas, en cuyo caso se dice que el algoritmo genético alcanzó la solución; 2)

Que el algoritmo cumpla con un determinado número de iteraciones previamente elegidas

CAPÍTULO 3

3. MEDICIONES DE LAS PERDIDAS DE PROPAGACION EN SISTEMAS TDT, REALIZADAS EN CARACAS, VENEZUELA Y QUITO, ECUADOR

Este capítulo trata sobre las mediciones realizadas en ambientes exteriores de las ciudades de Quito, Ecuador y Caracas, Venezuela. Específicamente, las mediciones en cuestión se refieren al nivel del campo eléctrico recibido en condiciones de recepción fija, para el caso de Quito, y del nivel de señal recibido o nivel de potencia recibida, también en condiciones de recepción fija, para el caso de Caracas. Dichas mediciones se comparan con los resultados obtenidos utilizando el modelo de propagación Okumura-Hata y los modelos contenidos en las Recomendaciones ITU-R P.1812-3 e ITU-R P.1546-5.

3.1 Configuración Experimental de las Mediciones

En esta subsección se abordarán los detalles de las configuraciones experimentales implementadas en Quito y Caracas para las mediciones de Televisión Digital Terrestre (TDT) que serán utilizadas en el presente trabajo para optimización del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3.

Mediciones Realizadas en Quito

En este caso, las mediciones a ser tomadas en cuenta son las correspondientes al nivel del campo eléctrico recibido en diversos puntos del distrito Metropolitano de Quito, realizadas con los estándares ISDB-T (original japonés), ISDB-Tb (versión modificada en Brasil de ISDB-T), con motivo de las pruebas de campo que se llevaron a cabo en la mencionada localidad durante el año 2010, por parte de la entonces Superintendencia de Telecomunicaciones (SUPERTEL) del Ecuador, en el marco del proceso que conllevó a la adopción del estándar de Televisión Digital Terrestre (TDT) en el país.

Es oportuno resaltar que no se hace mención a las condiciones climatológicas, tales como lluvias, nubosidad, granizo, entre otras, bajo las cuales se llevaron a cabo las mediciones, ya que, dichas condiciones sólo son relevantes para el nivel

de potencia recibida a partir de frecuencias superiores a 10 GHz, que no es el caso de la banda UHF. Ello es debido a que, a partir de aproximadamente los 10 GHz la longitud de onda de la señal comienza a tener orden de magnitud similar a las partículas que conforman las celdas de lluvia, nubes, granizo, etc., por lo que dichas partículas dejan de ser medios electromagnéticamente “transparentes” a la onda que incide sobre ellas, por lo que dicha onda pasa a cumplir las condiciones de contorno, fenómeno que tiene lugar cuando una onda electromagnética incide en la superficie de separación existente entre dos medios eléctricamente diferentes (en este caso, el aire y por ejemplo, las gotas de agua de la celda de lluvia). Bajo esas circunstancias, parte de la señal es absorbida por la partícula y la parte restante se dispersa en diversas direcciones, siendo apenas una de ellas la dirigida hasta la antena receptora [40, 68].

Características técnicas de los equipos utilizados en las mediciones, en Quito, Ecuador

Para los dos (2) estándares considerados en las mediciones seleccionadas, las especificaciones técnicas de los equipos a nivel de transmisión, las cuales se resumen en la Tabla 1, fueron las mismas (incluso, se utilizó un mismo sistema radiante) [6].

Parámetros	Valores
Frecuencia de operación, f (MHz)	671 (canal 47 UHF)
Potencia de transmisión, P_T (W)	500
Ganancia de la antena transmisora, G_T (dBd / dBi)	11,0 dBd / 13,15 dBi
Altura del centro de radiación sobre el nivel del suelo (m)	30
Pérdida del alimentador/conectores, L_T (dB)	1,5

Tabla 1: Parámetros de transmisión (mediciones realizadas en Quito, Ecuador).

A partir de los de parámetros de la Tabla 3.1, se determina la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE), como sigue [68]:

$$\text{PIRE (dBm)} = 10 \log P_T (\text{mW}) + G_T (\text{dBi}) - L_T \quad (3.1)$$

Resultando la PIRE igual a 68,64 dBm.

Seguidamente, se determina la potencia radiada aparente (p.r.a), mediante [69]:

$$\text{p.r.a (dBm)} = \text{PIRE} - 2,15 \quad (3.2)$$

Es decir:

$$\text{p.r.a} = 66,49 \text{ dBm}$$

El transmisor se instaló en el cerro Pichincha, en las coordenadas geográficas 0,1673° latitud Sur y 78,5228 longitud Oeste y a una altura sobre el nivel del mar de 3.776 metros.

Como antena de transmisión, se empleó un arreglo de antenas, con una ganancia de 11 dBd, compuesto por cuatro (4) paneles, tal como ilustra la Figura 3.1 [6].

Los diagramas de radiación horizontal y vertical del mencionad arreglo se muestran en las Figuras 3.2 y 3.3, respectivamente [6].



Figura 3.1: Arreglo de antenas utilizado en el sistema radiante en las medidas de Quito, Ecuador.

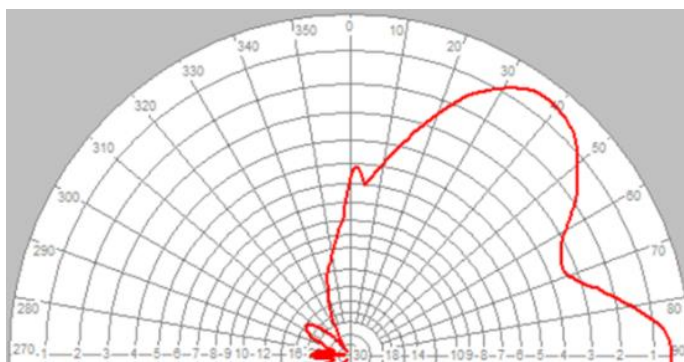


Figura 3.2: Diagrama de radiación horizontal del arreglo de antenas del sistema radiante, Quito, Ecuador.

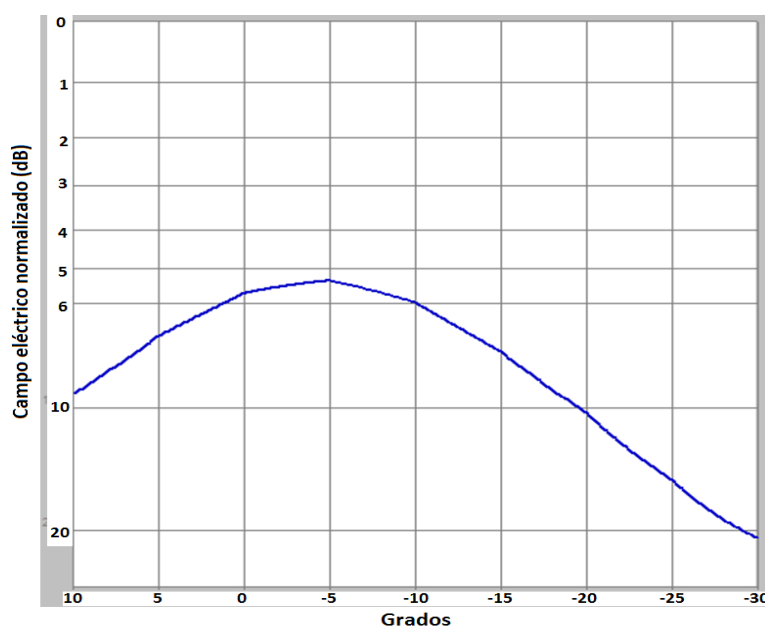


Figura 3.3: Diagrama de radiación vertical del arreglo de antenas del sistema radiante, Quito, Ecuador.

Por su parte, en la recepción se utilizó un antena Yagi de ocho (8) elementos, con una ganancia de 14 dBi (11,85 dBi), con ancho del haz estrecho [6]. Dicha

antena se colocó sobre un mástil del vehículo usado para las mediciones, a una altura de 10 metros. Las pérdidas de alimentación en el sistema receptor fueron de 2,2 dB.

Puntos de medición en Quito, Ecuador

Los puntos de medición se obtuvieron de manera aproximada mediante la intersección de veinte (20) radiales trazados desde el local del transmisor, espaciados 10° entre sí, con arcos a 2, 5 km hasta 20 km (en intervalos de 2,5 km) desde el sitio del transmisor, con este como centro.

En la Tabla 2 se muestran las coordenadas geográficas de aquellos puntos en los que se realizaron las mediciones, excluyendo los puntos que arrojaron niveles de campo eléctrico con alta dispersión respecto a la media de la población de datos.

En la Figura 3.4, se ilustra la disposición geográfica de los puntos de medición considerados en la ciudad de Quito; para ello, se recurrió a la herramienta Google Maps [70].

Mediciones Realizadas en Caracas

En Caracas, las mediciones consideradas para el presente trabajo son las referidas al nivel de potencia recibida en diversos puntos de la ciudad, realizadas en el año 2008, con los estándares DVB-T/H, ISDB-T y DTMB, en ocasión de las pruebas de campo ejecutadas por la CONATEL (Comisión Nacional de Telecomunicaciones) de Venezuela para la evaluación técnica de dichos estándares, las cuales, junto con aspectos de carácter económico, social, industrial, entre otros, condujeron a la selección del estándar ISDB-T como es el estándar base de la TDT en el país [71].

Características técnicas de los equipos utilizados en las mediciones, en Caracas, Venezuela

En las Tablas 3 y 4 se resumen las características de los equipos utilizados a nivel de transmisión y recepción en las mediciones realizadas en la ciudad de Caracas [3]. De manera similar a Quito, en el caso de Caracas se utilizó un mismo sistema radiante para los tres (3) estándares de TDT evaluados.

Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)
1	-0,103806	-78,512667	31	-0,123417	-78,471750	59	-0,208722	-78,519083
2	-0,122500	-78,512944	32	-0,172528	-78,482111	60	-0,234972	-78,524194
3	-0,083806	-78,507889	33	-0,174667	-78,497028	61	-0,241417	-78,528472
4	-0,128806	-78,511333	34	-0,184500	-78,483056	62	-0,259583	-78,522944
5	-0,111556	-78,507222	35	-0,189722	-78,469222	63	-0,272750	-78,528583
6	-0,128500	-78,503750	36	-0,196778	-78,440472	64	-0,280833	-78,526833
7	-0,114500	-78,493278	37	-0,200889	-78,462972	65	-0,244639	-78,539306
8	-0,094167	-78,482778	38	-0,211778	-78,404806	66	-0,257917	-78,542417
9	-0,094167	-78,478500	39	-0,185083	-78,498889	67	-0,272333	-78,543194
10	-0,051444	-78,457111	40	-0,191222	-78,486944	68	-0,286639	-78,545639
11	-0,033722	-78,453500	41	-0,180028	-78,516139	69	-0,257194	-78,553861
12	-0,131639	-78,499380	42	-0,186361	-78,502222	70	-0,271694	-78,558000
13	-0,118583	-78,487417	44	-0,210167	-78,482389	71	-0,297444	-78,565139
14	-0,102556	-78,473944	45	-0,189028	-78,505667	72	-0,220306	-78,512000
15	-0,120667	-78,450333	46	-0,199361	-78,497750	73	-0,185167	-78,486556
16	-0,140139	-78,493917	47	-0,219111	-78,483833	74	-0,195639	-78,492806
17	-0,126472	-78,477000	48	-0,192889	-78,511361	75	-0,308972	-78,453222
18	-0,117306	-78,457028	49	-0,204444	-78,506500	76	-0,306583	-78,449167
19	-0,103944	-78,445889	50	-0,219750	-78,499694	77	-0,291861	-78,477444
20	-0,080556	-78,418194	51	-0,232972	-78,486667	78	-0,223194	-78,489194
23	-0,116056	-78,436778	52	-0,210111	-78,509944	79	-0,004083	-78,452333
24	-0,151972	-78,488694	53	-0,223806	-78,505250	80	-0,325306	-78,520222
26	-0,159472	-78,484306	54	-0,257306	-78,491528	81	-0,117972	-78,461417
27	-0,156694	-78,463861	55	-0,214333	-78,518611	82	-0,210722	-78,489417
28	-0,166306	-78,485167	56	-0,229694	-78,514889	83	-0,374083	-78,551861
29	-0,164500	-78,447333	57	-0,244944	-78,515500	84	-0,189139	-78,339083
30	-0,157333	-78,439444	58	-0,252611	-78,509278	-	-	-

Tabla 2: Puntos de medición (Quito, Ecuador)

El transmisor fue instalado en la Estación Mecedores, del Parque Nacional El Ávila, en las coordenadas geográficas 10,5284° latitud Norte y 66,8776° longitud Oeste, a una altura sobre el nivel del mar de 1.773,6 metros.

La antena de transmisión utilizada fue similar a la empleada dos años después en las mediciones de Quito, mientras que la antena de recepción consistió en un arreglo angular de tres (03) antenas log-periódicas grilladas y espejos electromagnéticos reflectores sobre un dipolo central.

Oportuno resaltar que, en el lado receptor se implementó, intercalado entre la antena y el analizador de espectro, un sistema con amplificador de potencia de

ajuste variable, con la finalidad de la compensar las pérdidas de conectores y alimentadores para que de esa manera la potencia recibida en el analizador de espectro coincidiese en todos los puntos con la potencia de entrada en la antena receptora.

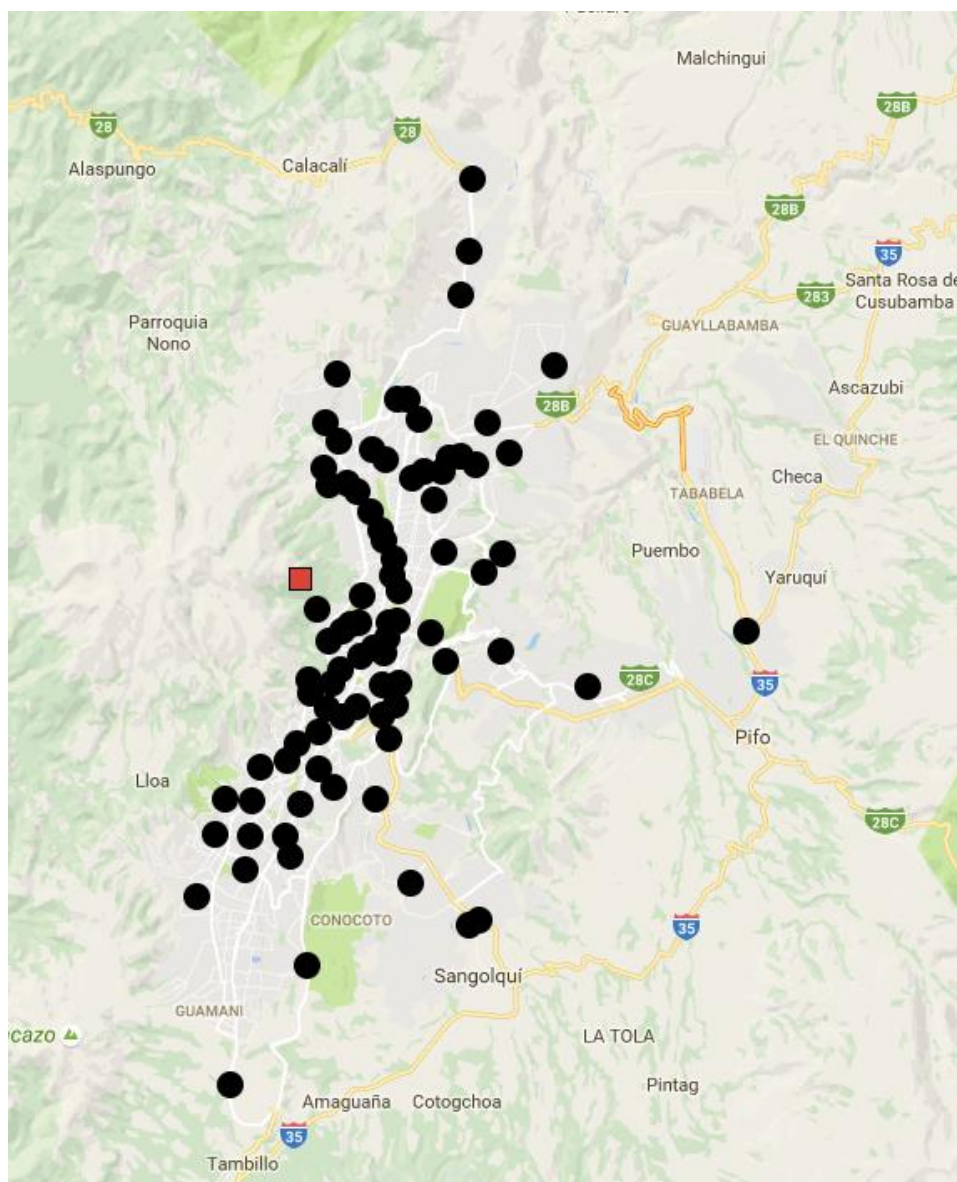


Figura 3.4: Ubicación geográfica de los puntos de medición en Quito, Ecuador.

Parámetros	Valores
Frecuencia de operación, f (MHz)	677 (canal 48 UHF)
Potencia de transmisión, P_T (W)	500
Ganancia de la antena transmisora, G_T (dBd / dBi)	11,4 dBd / 13,55 dBi
Altura del centro de radiación sobre el nivel del suelo (m)	35
Pérdida del alimentador/conectores, L_T (dB)	2
PIRE (dBm), en la dirección de máxima radiación de la antena transmisora	67,34
p.r.a. (dBm), en la dirección de máxima radiación de la antena transmisora	65,19

Tabla 3: Parámetros de transmisión (mediciones realizadas en Caracas, Venezuela).

Parámetros	Valores
Frecuencia de operación, f (MHz)	677 (canal 48 UHF)
Ganancia de la antena transmisora, G_R (dBd / dBi)	15,0 dBd / 17,15 dBi
Altura del centro de radiación sobre el nivel del suelo (m)	10
Pérdida del alimentador/conectores, L_R (dB)	0

Tabla 4: Parámetros de recepción (mediciones realizadas en Caracas, Venezuela)

Puntos de medición en Caracas, Venezuela

En este caso, los puntos de medición en los que se realizaron las mediciones fueron obtenidos, de manera aproximada, en la intersección de diez (10) radiales trazados desde el local del transmisor, espaciados 10° entre sí y arcos de circunferencia con centro en el transmisor. El receptor se ubicó a intervalos de 1 km de separación. Finalmente, fueron considerados aquellos puntos en los que la medida como tal fue factible. En la Tabla 5 se encuentran los valores de las coordenadas geográficas de los puntos de medición correspondientes a la ciudad de Caracas.

Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)
C07	10,5131	-66,8235	F08	10,4634	-66,8643	I13	10,4319	-66,9335
C09	10,5045	-66,7979	F09	10,4522	-66,8607	I16	10,4076	-66,9477
C10	10,5012	-66,7893	F12	10,4262	-66,8558	J05	10,5030	-66,9096
D04	10,5091	-66,8476	G05	10,4872	-66,8750	J09	10,4877	-66,9325
D07	10,4968	-66,8333	G07	10,4691	-66,8754	J11	10,4713	-66,9540
D09	10,4789	-66,8137	G09	10,4513	-66,8727	J13	10,4695	-66,9645
D10	10,4731	-66,8068	H06	10,4860	-66,8851	J16	10,4571	-66,9896
E06	10,4928	-66,8517	H07	10,4709	-66,8858	K04	10,5234	-66,9083
E07	10,4780	-66,8422	I06	10,4855	-66,9020	K05	10,5168	-66,9161
E09	10,4686	-66,8374	I07	10,4788	-66,9093	K07	10,5133	-66,9270
E10	10,4602	-66,8332	I10	10,4609	-66,9145	K09	10,5044	-66,9516
E11	10,4430	-66,8326	I11	10,4471	-66,9260	K11	10,4952	-66,9760
F07	10,4699	-66,8650	I12	10,4388	-66,9295	-	-	-

Tabla 5: Puntos de medición (Caracas, Venezuela)

En la Figura 3.5, se muestra la ubicación geográfica de cada uno de los puntos finalmente considerados para las mediciones en la ciudad de Caracas.

3.2 Resultado de Medición de las Pérdidas de Propagación

Con los valores medidos de los niveles de intensidad de campo eléctrico recibido y potencia recibida, en las ciudades de Quito, Ecuador y Caracas, Venezuela,

respectivamente, se pueden determinar las pérdidas de propagación, en este caso también medidas.

Para ello, es importante recordar que la ecuación del cálculo de enlace (*link budget*) viene dada por [40]:

$$L(\text{dB}) = \text{PIRE (dBm)} - P_r(\text{dBm}) \quad (3.3)$$

Donde “L” es la pérdida de propagación a ser determinada y P_r representa el nivel de potencia recibida.

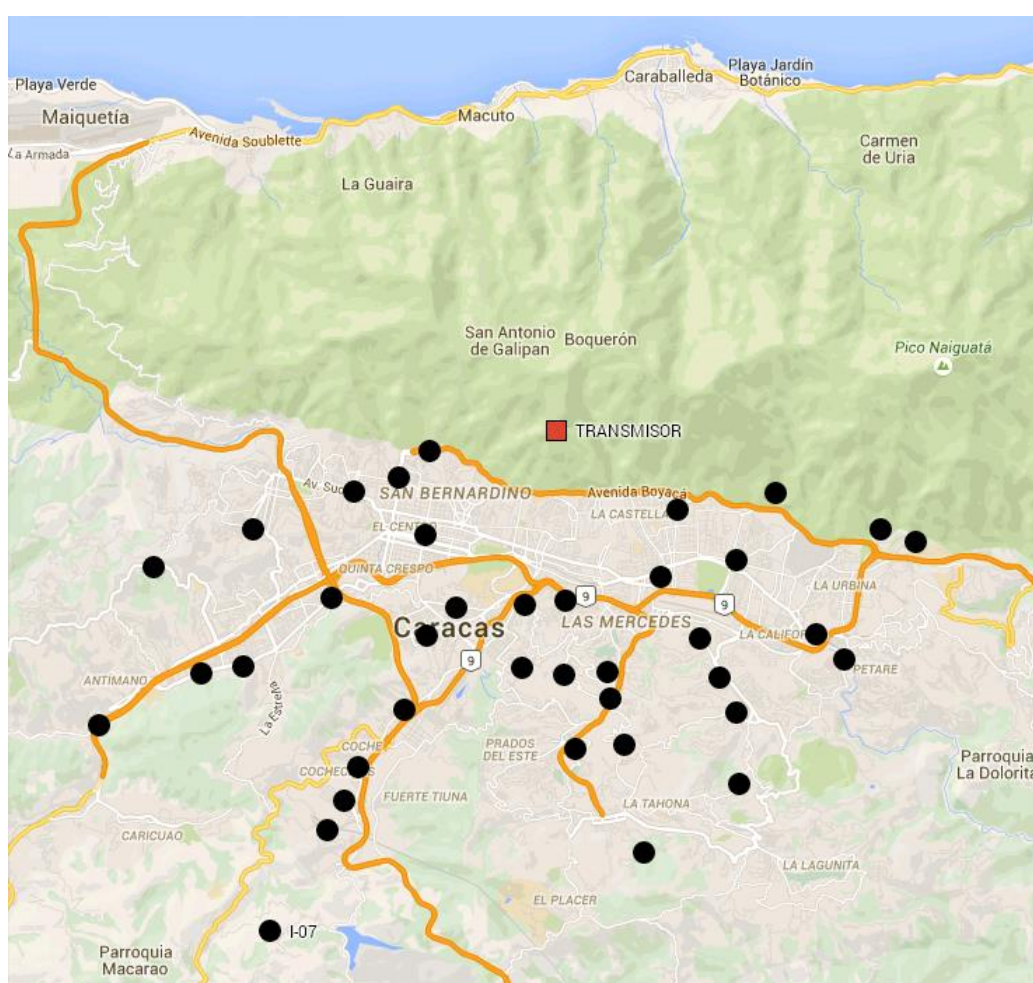


Figura 3.5: Localización de los puntos de medición en Caracas, Venezuela.

Pérdidas de Propagación Medidas en Quito, Ecuador

Dado que en este caso, las mediciones correspondieron fue al nivel de campo eléctrico recibido, se debe calcular previamente la potencia recibida a partir de [72]:

$$P_r(\text{dBW}) = E \left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right) - 20 \log f(\text{GHz}) - 167,25 \quad (3.4)$$

Donde “E” se refiere al campo eléctrico recibido.

La ecuación (4.4) es equivalente a:

$$P_r(\text{dBm}) = E \left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right) - 20 \log f(\text{GHz}) - 137,25 \quad (3.5)$$

A título de ejemplo, a continuación se calcula las pérdidas de propagación para el punto 50.

De la Tabla 4.1, se tiene que:

$$P_T = 500 \text{ W} = 500 \times 10^3 \text{ mW}$$

$$G_T = 13,15 \text{ dBi}$$

$$L_T = 1,5 \text{ dB}$$

$$f = 0,671 \text{ GHz}$$

Por tanto, de la ecuación (3.1), la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) resulta ser:

$$\text{PIRE} = 68,64 \text{ dBm}$$

Ahora bien, dado que para el punto 50 la medición reportó un campo eléctrico recibido igual a 72,15 dB μ V/m, de la ecuación (3.5) se tiene:

$$P_r = 72,15 - 20 \log(0,671) - 137,25 = -61,58 \text{ dBm}$$

Por lo que, utilizando la ecuación (3.3), las pérdidas por propagación en el mencionado punto son:

$$L = 68,64 - (-61,58) = 130,22 \text{ dB}$$

En la Figura 3.6, se observan las pérdidas de propagación medidas, en función de la distancia, para el caso de la ciudad de Quito.

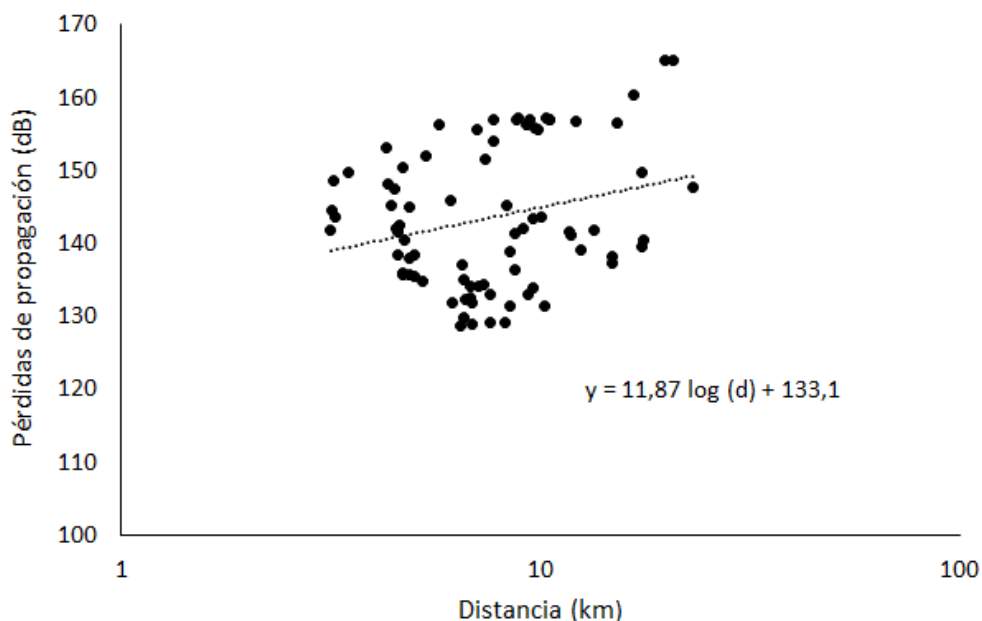


Figura 3.6: Pérdidas de propagación medidas en Quito, Ecuador.

En la Figura 3.6 se puede apreciar que, tal como era esperado, las pérdidas de propagación aumentan conforme aumenta la distancia. Este comportamiento, se puede verificar observando la ecuación de la línea de tendencia, donde “y” representa las pérdidas de propagación.

Por otra parte, de la mencionada ecuación de la línea de tendencia de la Figura 3.6, se observa que el exponente de pérdidas de la potencia es igual a $11,87/10 = 1,187$, valor menor a 2, lo cual no es común en la propagación en ambientes exteriores, excepto en caso como el que parece corresponder al ambiente de medición considerado, es decir, la ciudad de Quito, en el que se ha presentado el efecto “túnel”, producto tal vez del confinamiento de la señal en varias partes del ambiente de medición. Otra eventual causa de ese exponente de pérdidas obtenido, está relacionada con el relativamente corto intervalo de la distancia considerado en las mediciones, lo que trae como consecuencia que los datos se “agrupen”, impidiendo que la línea de tendencia considere lo que le ocurre a las pérdidas de propagación fuera de ese rango de distancia [73].

Pérdidas de Propagación Medidas en Caracas, Venezuela

Debido a que las mediciones en la ciudad de Caracas correspondieron al nivel de potencia recibido, las pérdidas de propagación en cada uno de los puntos considerados se determinan directamente a partir de la ecuación (3.3), extrayendo la información necesaria, es decir, potencia de transmisión, ganancia de la antena transmisora y pérdidas en la línea de transmisión del transmisor, de la Tabla 3.

Las pérdidas de propagación medidas, nuevamente en función de la distancia, se ilustran en la Figura 3.7 [6]. En esta figura, se verifica una vez más la tendencia de las pérdidas de propagación a aumentar con el incremento de la distancia desde el transmisor. Asimismo, se observa un exponente de pérdidas menor a 2, específicamente, 1,473, debido probablemente a las causas mencionadas para el caso de la ciudad de Quito.

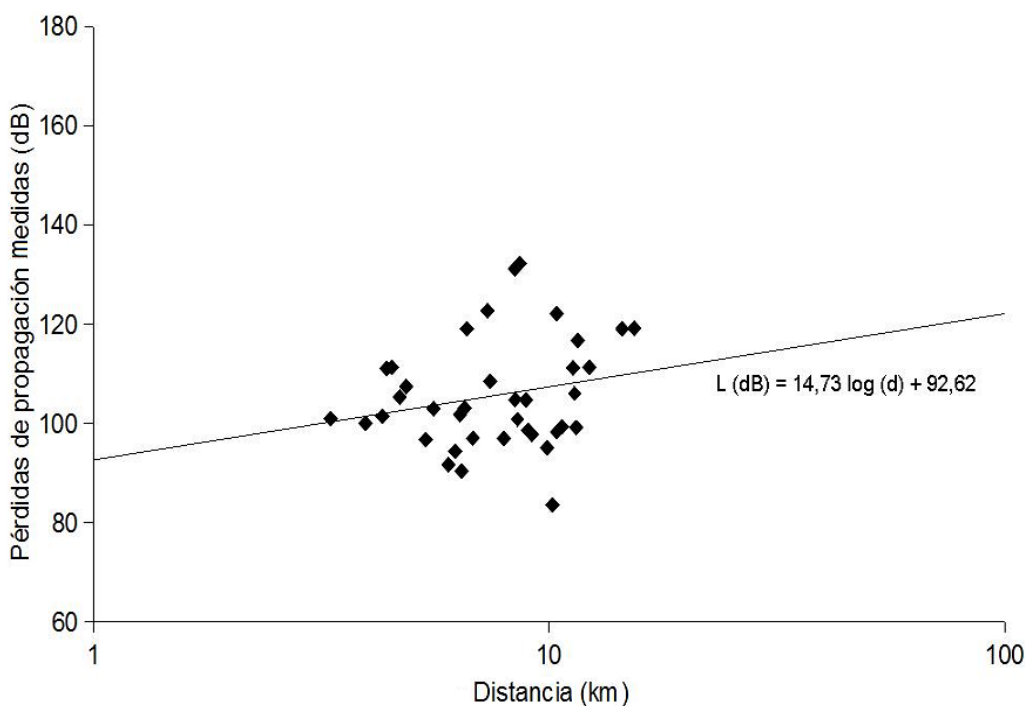


Figura 3.7: Pérdidas de propagación medidas en Caracas, Venezuela.

3.3 Comparación

Cuando se pretende desarrollar un modelo para estimar las pérdidas de propagación en una determinada frecuencia o banda de frecuencia o para un determinado sistema inalámbrico de telecomunicaciones, en base a mediciones de campo, es importante poder observar el desempeño de modelos de propagación, ya existentes en el literatura, en la predicción de las pérdidas de propagación para el mismo conjunto de puntos de recepción que fueron considerados en las mediciones. En ese sentido, en esta sección, se estiman las pérdidas de propagación (para los puntos de medición que fueron seleccionados en las ciudades de Quito y Caracas) mediante los modelos de propagación Okumura-Hata, Recomendación ITU-R P.1813-3 y Recomendación ITU-R P.1546-5, y se comparan con los resultados obtenidos a partir de las mediciones.

3.3.1 Estimación de las Pérdidas de Propagación mediante los Modelos de Propagación

Recurriendo a los algoritmos abordados en las secciones 2.3.3., 2.3.4 y 2.3.5, para el cálculo de las pérdidas de propagación usando los modelos Okumura-Hata, Recomendación ITU-R P.1813-3 y Recomendación ITU-R P.1546-5, así como a la información suministrada en la sección 3.1 acerca de la altura de las antenas transmisora y receptora, altura sobre el nivel del mar de los puntos de transmisión y recepción, entre otras, tanto para la ciudad de Quito como para la ciudad de Caracas, se obtienen los resultados mostrados las Figuras 3.8 y 3.9, en las cuales se muestran simultáneamente las pérdidas de propagación calculadas por los mencionados modelos y las pérdidas medidas, para las ciudades de Quito y Caracas, respectivamente. Asimismo, en ambas figuras se aprecian las líneas de tendencia tanto para cada una de las estimaciones como para las mediciones de pérdidas de propagación.

De manera cualitativa, de la Figura 3.8 se observa que el modelo de la literatura que predice valores de pérdidas de propagación que más se acercan a los valores medidos de la misma es el modelo de Okumura-Hata, a pesar de presentar una tendencia del exponente de pérdidas

significativamente mayor al que tiene la tendencia del exponente de pérdidas de las mediciones. A su vez, los modelos de las Recomendaciones ITU-R P.1812-3 e ITU-R P.1546-5, en ese orden, si bien presentan exponentes de pérdidas menos alejados que el de las mediciones, se notan bastante distantes en su estimación, de los valores de pérdidas de propagación medidas.

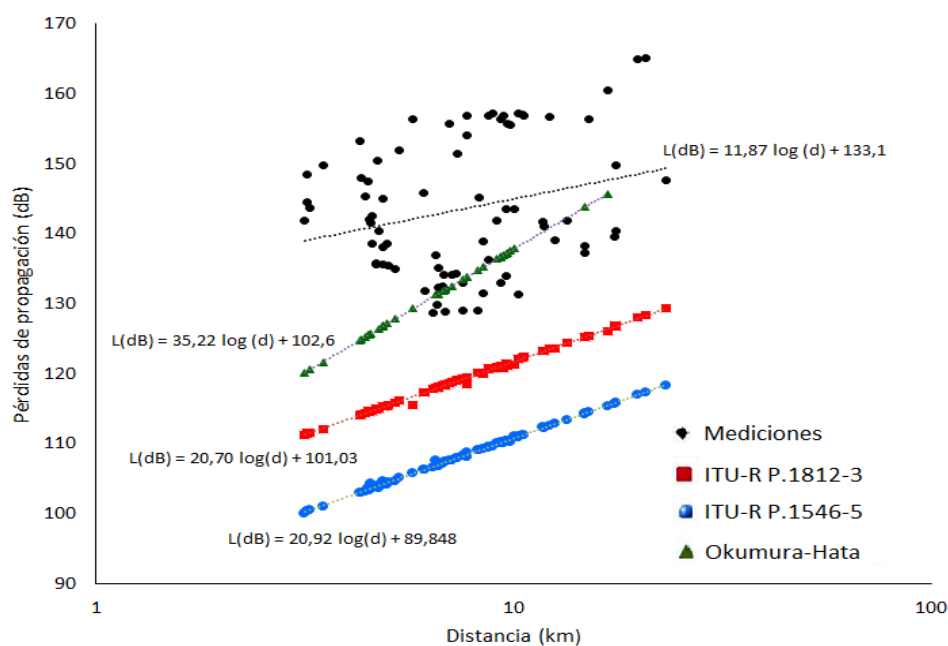


Figura 3.8: Pérdidas de propagación estimadas y medidas en Quito.

Por su parte, de la Figura 3.9, en una primera impresión, se aprecia que el modelo que más se acerca en sus predicciones de las pérdidas de propagación a las obtenidas experimentalmente es de la Recomendación ITU-R P.1546-5, mientras que el que más se aleja en dichas predicciones es el modelo de Okumura-Hata.

3.3.2 Comparación entre los Valores Estimados y los Valores Medidos

Con el fin de poder tener una apreciación más objetiva del desempeño de cada uno de los tres (3) modelos de la literatura considerados en este trabajo para su comparación con los valores experimentales, se recurre a

la métrica denominada raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE, *Root Mean Square Error*), dada por [74]:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{m,i} - V_{c,i})^2}{N-1}} \quad (3.6)$$

Donde:

$V_{m,i}$ = Valor de pérdida medida en cada punto "i".

$V_{c,i}$ = Valor de pérdida estimada en cada punto "i", por el modelo de propagación

N = Número de puntos de mediciones considerados.

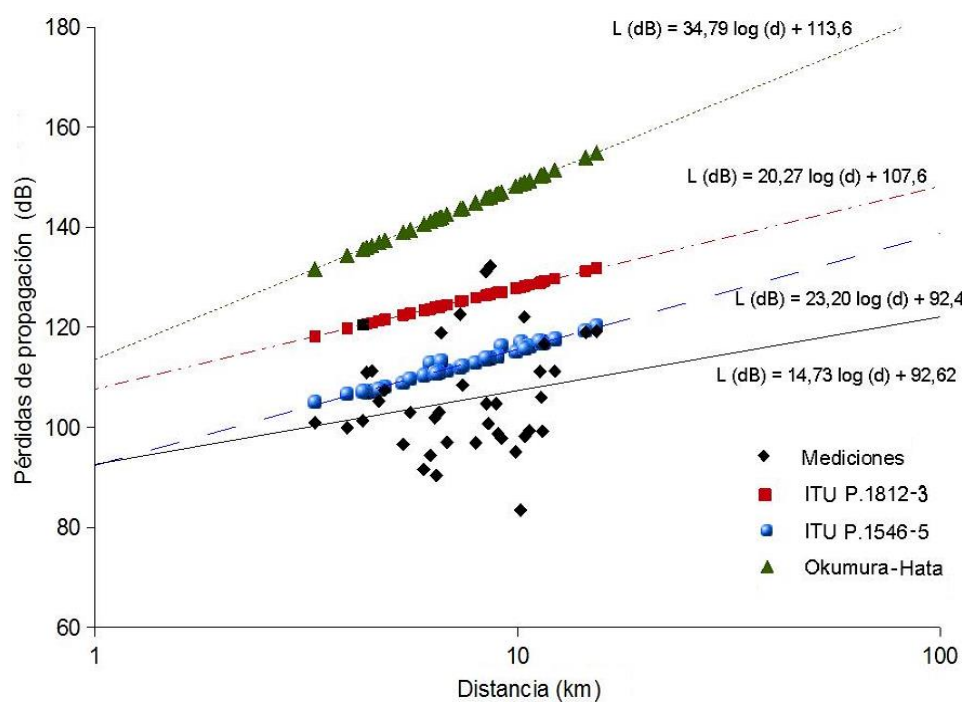


Figura 3.9: Pérdidas de propagación estimadas y medidas en Caracas.

En las Tablas 6 y 7, en las que OH se refiere al modelo Okumura-Hata, se muestran los valores del RMSE obtenidos para los tres (3) modelos de propagación, para las ciudades de Quito y Caracas, respectivamente.

	ITU-R P.1812-3	ITU-R P.1546-5	OH
RMSE (dB)	25,99	36,36	14,42

Tabla 6: Valores de RMSE de modelos de la literatura para Quito

	ITU-R P.1812-3	ITU-R P.1546-5	OH
RMSE (dB)	22,65	23,29	40,63

Tabla 7: Valores de RMSE de modelos de la literatura para Caracas

En la Tabla 6, se observa que para el caso de la ciudad de Quito el modelo de propagación que menor RMSE arroja es el de Okumura-Hata, con 14,42 dB, mientras que el modelo que presenta el desempeño más bajo en la estimación de los valores de propagación es el de la Recomendación ITU-R P.1546-5.

Para el caso de Caracas, en la Tabla 7 se observa que los modelos de propagación de las Recomendaciones ITU-R P.1812-3 y P.1546-5 son los que mejor desempeño presentan, con un error ligeramente menor (2,75%) para el primero. La Tabla 3.7 también muestra que el modelo de Okumura-Hata presenta un error altamente considerable en su estimación de las pérdidas de propagación en Caracas.

CAPÍTULO 4

4. OPTIMIZACION DE LA RECOMENDACIÓN ITU-R P. 1812-3

En este capítulo, se optimiza el modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3, mediante la aplicación de las técnicas de inteligencia computacional PSO (*Particle Swarm Optimization*) y AG (Algoritmo Genético), teniendo como objetivo la disminución del RMSE (*Root Mean Square Error*) y de la desviación estándar (DE), de manera independiente. Adicionalmente, se incluye la comparación entre los modelos resultantes de la optimización y la versión no modificada del modelo de la mencionada recomendación.

4.1 Optimización con PSO

En líneas generales, la optimización del modelo de propagación de la Recomendación ITU-R P.1812-3 mediante la técnica de optimización por enjambre de partículas o PSO, consiste en definir, en primer lugar, la función objetivo, es decir, la ecuación o ecuaciones del mencionado modelo que serán modificadas usando PSO.

Seguidamente, es necesario establecer cuál o cuáles serán las funciones de aptitud o costo que se emplearán para la aplicación de PSO, funciones que serán las utilizadas por el código programado para PSO para determinar la partícula líder del enjambre o grupo, que será aquella que al finalizar el proceso, presente la mejor aptitud.

Como resultado final, se tendrá una o más nuevas ecuaciones del modelo de la Recomendación ITU-R 1812-3 que arrojarán un mejor desempeño que la versión original, en ese caso, en términos del RMSE.

4.1.1 Función Objetivo: Modificación de la Recomendación ITU-R P. 1812-3

De las ecuaciones que rigen el modelo de propagación de la Recomendación ITU-R P.1812-3, la primera a ser considerada es la que permite determinar las pérdidas de transmisión L_{bc} (en dB), no superadas

durante el p% del tiempo y el 50% de las ubicaciones, considerando los efectos de las pérdidas por ocupación del suelo, en el que están ubicados el transmisor y el receptor, es decir [3, 5]:

$$L_{bc} = L_{bu} + A_{ht} + A_{hr} \quad (4.1)$$

Dónde:

L_{bu} : Pérdidas de transmisión (en dB), no superadas durante el p(%) del tiempo y el 50% de las ubicaciones, sin considerar los efectos de la ocupación del suelo en el que están ubicados el transmisor y el receptor

A_{ht} , A_{hr} : Pérdidas adicionales, en dB, debido a los entornos en los que están localizados el transmisor y receptor

Además, si p_L es diferente al 50%, a la ecuación (4.1) se le debe agregar una pérdida adicional producto de la pérdida por variabilidad de las ubicaciones. Un valor sugerido es 5,5 dB [5].

Si el receptor se encuentra en un ambiente interior, a la ecuación (4.1) se le debe sumar las pérdidas por penetración en edificios, las cuales oscilan entre 9 dB y 11 dB [5].

Para el caso de las ciudades de Quito, Ecuador y Caracas, Venezuela, la implementación de la Recomendación ITU-R P.1812-3 arrojó un valor de A_{ht} igual a cero. Además, no fue necesario agregar pérdidas adicionales debido a que en la aplicación del referido modelo se asumió un porcentaje de las ubicaciones, p_L , del 50% y los ambientes considerados son exteriores. Por tanto, de la ecuación (4.1) las pérdidas totales, L_b , vienen dadas por:

$$L_b = L_{bu} + A_{hr} \quad (4.2)$$

Ahora bien, en base a la ecuación (6.2) las dos primeras funciones objetivos propuestas son:

$$L_b = x_1 L_{bu} + A_{hr} \quad (4.3)$$

$$L_b = x_2 L_{bu} + x_3 A_{hr} \quad (4.4)$$

Donde x_1 , x_2 y x_3 , se determina a través del uso del PSO.

Es importante resaltar que tanto L_{bu} como A_{hr} fueron obtenidos, para cada punto considerado en las mediciones, mediante la aplicación del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3.

Por otra parte, también se considera, del mencionado modelo, la ecuación de dependencia directa con la frecuencia de operación y la distancia entre transmisor-receptor de las pérdidas L_{bu} , y por consiguiente, de las pérdidas L_b , dada por [3, 5]:

$$L_b = 92,44 + 20 \log f(\text{GHz}) + 20 \log d (\text{km}) + L_{dp} + A_{hr} \quad (4.5)$$

Donde L_{dp} representa las pérdidas por difracción no rebasadas durante el $\rho(\%)$ y también obtenida, para cada punto considerado en las mediciones, a partir del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3.

En base a la ecuación (4.6) se propone las siguientes tercera y cuarta función objetivo:

$$L_b = x_4 92,44 + 20 \log f(\text{GHz}) + 20 \log d (\text{km}) + L_{dp} + A_{hr} \quad (4.6)$$

$$L_b = x_5 92,44 + 20 \log f(\text{GHz}) + x_6 20 \log d (\text{km}) + L_{dp} + A_{hr} \quad (4.7)$$

Donde, para determinar x_4 , x_5 y x_6 , se recurre a PSO.

4.1.2 Función de Actitud: Desviación Estándar y RMSE

Tal como se ha mencionado anteriormente, las funciones aptitud, *fitness* o de costo, a ser consideradas para la optimización del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 son el RMSE y la DE, en el sentido de que las versiones modificadas del modelo muestren un mejor desempeño en la predicción de las pérdidas de propagación que el mostrado por la versión original del mismo, en términos del RMSE, es decir, que los nuevos valores del RMSE sean menores.

El RMSE es dado por la ecuación (4.6), es decir:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{m,i} - V_{c,i})^2}{N-1}} \quad (4.8)$$

Mientras que la desviación estándar (DE) es dada por [34]:

$$\text{DE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|V_{m,i} - V_{c,i}| - \mu)^2} \quad (4.9)$$

Donde “ μ ” es el error medio, determinado mediante [34]:

$$\mu = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N |V_{m,i} - V_{c,i}|} \quad (4.10)$$

4.1.3 Implementación en Matlab

Para la implementación, en el presente trabajo de grado, del algoritmo de PSO en Matlab, y en general, en cualquiera otra herramienta computacional o cualquier otro lenguaje de programación, se debe considerar lo señalado en la sección 3.1.

En ese sentido, los valores de los parámetros considerados para PSO son:

- $C_1 = C_2 = 1,3$ [9]
- $\omega = 0,45$ [9]
- R_1 y R_2 = Valores aleatorios generados por el algoritmo en un intervalo de $[0, 1]$.
- Posición de la partícula = Valor aleatorio.
- Velocidad de la partícula = Valor aleatorio.
- Número de variables a ser optimizadas = Dependiendo de la función objetivo a optimizar, varía entre 1 y 2 (x_1, x_2, x_3 , etc.)
- Número de partículas = Entre 5 y 15
- Número de iteraciones = Entre 15 y 50

Con los valores de los parámetros fijos (por ejemplo, C_1 y C_2 , número de partículas, etc.) y los valores iniciales de las variables (en este caso, x_1, x_2, x_3 , etc, iguales a la unidad), el algoritmo PSO realiza la primera iteración, de la cual se generará un nuevo conjunto de valores para las variables. Éste conjunto será tal que el grupo de partículas (conformado

por 10) se posiciona de manera tal que el nuevo RMSE (o nuevo DE), entre los valores medidos y los valores estimados por el modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3, disminuyen en relación al RMSE (o DE) arrojados por la versión original del modelo.

Seguidamente, en base a las ecuaciones (2.12) y (2.13), el algoritmo de PSO repite el procedimiento hasta que se cumpla el número máximo de iteraciones establecido, que en este caso, es 20. Si en una de las iteraciones existe una partícula con una mejor aptitud que la del líder actual, esa partícula pasará a ser la nueva líder que guiará al resto del grupo. Además, es importante señalar que, en PSO la experiencia propia de cada partícula del cúmulo va evolucionando.

En cada iteración que ofrezca un mejor ajuste de acuerdo a la función de costo (5.8), aparecerá un nuevo conjunto de valores para las variables x_1 , x_2 , x_3 , etc. Cuando el procedimiento finaliza, es decir, cuando se alcanza el número máximo de iteraciones fijado, la solución del problema de optimización estará representada por aquel conjunto de valores de las variables derivado en la iteración que mejor aptitud haya presentado, en otras palabras, de la iteración cuyo valor RMSE (o DE) haya sido el mínimo. En ese momento, a nivel del algoritmo de PSO el líder de la población representará la solución del problema de optimización.

4.2 Optimización con Algoritmo Genético

De manera similar a cuando se aplica PSO, la optimización del modelo de propagación de la Recomendación ITU-R P.1812-3 usando algoritmo genético (AG) consiste en establecer la función objetivo (función o funciones del modelo, a ser modificadas), para seguidamente definir cuál o cuáles serán las funciones de aptitud o costo que se emplearán para la aplicación de AG. Estas últimas funciones serán las utilizadas por el código programado para AG para determinar la población más, luego de ejecutados, iteración a iteración, los procesos de selección, reproducción y mutación.

Nuevamente, el resultado final será una o más nuevas ecuaciones del modelo de la Recomendación ITU-R 1812-3 que tendrán un mejor desempeño que la versión inicial, en términos del RMSE.

Es oportuno destacar que las funciones objetivo son las mismas que se establecieron cuando se aplicó PSO, esto es, las dadas por las ecuaciones (4.3), (4.4), (4.6) y (4.7).

4.2.1 Selección, Reproducción y Mutación

En base a resultados exitosos reportados en la literatura [25, 34] y después de evaluados en el presente trabajo varios de los métodos de selección, reproducción y mutación, los métodos seleccionados para tal fin resultaron ser:

- Selección de parejas según torneo [66, 67].
- Reproducción por cruce en un único punto [67].
- Mutación por intercambio de bit [11].

4.2.2 Funciones de Costo: Desviación Estándar y RMSE.

Las funciones de costo o aptitud definida para la optimización del modelo de la Recomendación ITU-R 1812-3, mediante la aplicación de algoritmo genético, son las mismas que fueron definidas cuando se implementó PSO, es decir, corresponden a las ecuaciones (4.8) y (4.9), con el mismo fin de que las nuevas versiones del modelo arrojen RMSE menores al que se tiene cuando se utiliza la versión original del modelo.

4.2.3 Implementación en Matlab.

En esta oportunidad se debe tomar en cuenta lo señalado en la sección 2.5, en la cual se encuentran los lineamientos para el establecimiento de AG, en general, en cualquier herramienta de computación similar a Matlab y/o en cualquier lenguaje de programación.

En este sentido, los valores de los parámetros seleccionados para los parámetros fueron:

- Cantidad de individuos de la población = 32

- Número de bits del cromosoma = 32 (funciones objetivos de 2 términos) y 36 (función objetivo de 5 términos)
- Probabilidad de mutación = 0,02
- Número de iteraciones = Entre 50 y 100

Una vez definidos los métodos de selección, reproducción y mutación, así como los valores de los parámetros fijos (por ejemplo, número de individuos de la población, número de bits por cromosomas, entre otros) y los valores iniciales de las variables x_1 , x_2 , x_3 , etc. (todos iguales a la unidad), el algoritmo genético procede a realizar la primera iteración, la cual creará la primera generación, conformada por la misma cantidad de individuos de población, pero está vez integrada por individuos más aptos, es decir, por aquellos que, en grupo, ofrecen un nuevo conjunto de valores x_1 , x_2 , x_3 , etc, que cumple con el ajuste establecido por la ecuación (4.8).

El proceso se repite hasta que se alcance el número máximo de iteraciones establecidas, estando representada la solución por el conjunto x_1 , x_2 , x_3 , etc, que mejor se ajuste a lo requerido en la ecuación (4.8). En ese momento, la solución del problema de optimización estará representada por la población conformada por la población de individuos más apta, entre todas poblaciones surgidas en cada iteración.

4.3 Comparación de Resultados: Valores de Desviación Estándar y RSME para el Modelo Original y el Modelo Optimizado.

En la Tabla 8, se resumen los valores de las variables x_1 , x_2 , x_3 , etc, obtenidos mediante la implementación de PSO, para las ciudades de Quito y Caracas, cuando se consideró el RMSE como función de costo. En dicha tabla, V-1, V-2, V-3 y V-4 se refieren a las versiones modificadas del modelo de la Recomendación ITU-R 1812-3, obtenidas a partir de las funciones objetivo (4.3), (4.4), (4.6) y (4.7), respectivamente.

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
-------	-------	-------	-------	-------	-------

Quito						
V-1	1,2107	-	-	-	-	-
V-2	-	1,1798	1,7928	-	-	-
V-3	-	-	-	1,2625	-	-
V-4	-	-	-	-	1,3457	0,5532
Caracas						
V-1	0,8594	-	-	-	-	-
V-2	-	0,8567	1,0885	-	-	-
V-3	-	-	-	0,8270	-	-
V-4	-	-	-	-	0,9332	0,3692

Tabla 8: Valores de las variables “x” obtenidos para los casos de Quito y Caracas, usando PSO, con RMSE como función de costo

Reemplazando los valores de x_1 , x_2 , x_3 , etc, de la Tabla 4.1 en las ecuaciones de las respectivas versiones modificadas del modelo, se obtienen los valores de RMSE mostrados en la Tabla 9, correspondientes al caso cuando se utiliza PSO con RMSE como función de aptitud, para las mediciones de Quito y Caracas.

En la Tabla 4.2, se observa que el RMSE se redujo, en el peor de los casos, hasta 9,80 dB, para el caso de Quito y 10,69 dB, para el caso de Caracas, representando una significativa mejora respecto al RMSE arrojado por la versión original del modelo, el cual, tal como se determinó en la sección 3.3.2, fue igual a 25,94 dB, para Quito y 22,75 dB, para Caracas. Asimismo, en la Tabla 9 se puede apreciar que el mejor ajuste del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 se obtuvo para su versión modificada No. 4.

RMSE (dB)				
	V-1	V-2	V-3	V-4
Quito	9,80	9,76	9,57	9,39
Caracas	10,57	10,57	10,69	10,40

Tabla 9: Valores de RMSE obtenidos para las cuatro versiones modificadas del modelo, para los casos de Quito y Caracas, usando PSO, con RMSE como función de costo

En la Tabla 10, aparecen los valores de las variables x_1 , x_2 , x_3 , etc, obtenidos mediante la implementación de PSO, para las ciudades de Quito y Caracas, pero esta vez usando la DE como función de costo.

En la Tabla 11, se resumen los valores del RMSE obtenidos para las cuatro versiones modificadas del modelo resultantes de la sustitución de los valores de x_1 , x_2 , x_3 , etc, de la Tabla 10 en las funciones objetivo (4.3), (4.4), (4.6) y (4.7). Se observa que si bien los nuevos RMSE continúan siendo significativamente menores (en el peor de los casos, 11,12 dB, para Quito y 11,82 dB, para Caracas) a los arrojados por la versión original del modelo, en esta ocasión, es decir, cuando se usa la DE como función *fitness*, los RMSE son ligeramente mayores a los obtenidos cuando se emplea el RMSE como función de costo. En la Tabla 11, también se puede apreciar que el mejor ajuste del modelo, para ambas ciudades, corresponde a su versión modificada No. 4.

Adicionalmente, de las Tablas 9 y 11 se observa que el ajuste mediante PSO, para ambas funciones de costo (RMSE y DE), resultó ligeramente más efectivo para las mediciones correspondientes a la ciudad de Quito. Ello puede ser debido probablemente a la también ligeramente mayor dispersión observada en las mediciones realizadas en Caracas (10,39 dB) respecto a la presentada por las mediciones efectuadas en Quito (9,57 dB).

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
-------	-------	-------	-------	-------	-------

Quito						
V-1	1,1660	-	-	-	-	-
V-2	-	1,1585	1,1689	-	-	-
V-3	-	-		1,2082	-	-
V-4	-	-	-	-	1,2454	0,8106
Caracas						
V-1	0,8177	-	-	-	-	-
V-2	-	0,8338	0,5747	-	-	-
V-3	-	-		0,7726	-	-
V-4	-	-	-	-	0,8815	0,3520

Tabla 10: Valores de las variables “x” obtenidos para los casos de Quito y Caracas, usando PSO, con la DE como función de costo

RMSE (dB)				
	V-1	V-2	V-3	V-4
Quito	11,08	11,12	10,83	10,67
Caracas	11,80	11,82	11,78	11,54

Tabla 11: Valores de RMSE obtenidos para las cuatro versiones modificadas del modelo, para los casos de Quito y Caracas, usando PSO, con la DE como función de costo

Ahora bien, empleando la técnica algoritmo genético (AG) para la optimización del modelo de la Recomendación ITU-R 1812-3, los valores de las variables x_1 , x_2 , x_3 , etc, obtenidos para Quito y Caracas, cuando la función de aptitud es el RMSE, se muestran en la Tabla 12.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
Quito						
V-1	1,2109	-	-	-	-	-
V-2	-	1,1523	2,4999	-	-	-
V-3	-	-		1,2625	-	-
V-4	-	-	-	-	1,4261	0,1245
Caracas						
V-1	0,8178	-	-	-	-	-
V-2	-	0,1282	19,0626	-	-	-
V-3	-	-		0,7717	-	-
V-4	-	-	-	-	0,8938	0,2882

Tabla 12: Valores de las variables “x” obtenidos para los casos de Quito y Caracas, usando AG, con RMSE como función de costo

Sustituyendo los valores de x_1 , x_2 , x_3 , etc, de la Tabla 12 en las respectivas versiones modificadas del modelo, se obtienen los valores RMSE resumidos en la Tabla 13, resultando nuevamente valores RMSE significativamente menores (9,80 dB, para Quito y 11,81 dB, para Caracas, en el peor de los casos). También

se observa que de nuevo la versión modificada del modelo con mejor desempeño es la correspondiente a la No. 4.

RMSE (dB)				
	V-1	V-2	V-3	V-4
Quito	9,80	9,73	9,57	9,56
Caracas	11,80	11,54	11,81	11,48

Tabla 13: Valores de RMSE obtenidos para las cuatro versiones modificadas del modelo, para los casos de Quito y Caracas, usando AG, con RMSE como función de costo

Cuando se recurre a la DE como función de costo y al AG como la técnica de inteligencia computacional para la optimización del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3, los valores de las variables de x_1 , x_2 , x_3 , etc, correspondientes a las respectivas cuatro versiones modificadas del modelo son los que se resumen en la Tabla 14.

Finalmente, los valores del RMSE arrojados por cada una de las cuatro versiones modificadas del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3 resultantes de reemplazar los valores de x_1 , x_2 , x_3 , etc, en las funciones objetivo (4.3), (4.4), (4.6) y (4.7), se muestran en la Tabla 15. Se puede observar que, de nuevo, a pesar de que los valores RMSE (en el peor de los casos, 11,14 dB, para Quito y 12,83 dB para Caracas) se han reducido significativamente respecto al valor RMSE obtenido con el modelo original para cada ciudad, esa reducción ha sido ligeramente menor a la obtenida cuando se empleó el RMSE como función de costo. Adicionalmente, en la Tabla 4.8 también se aprecia que el mejor desempeño para ambas ciudades es el mostrado por la versión modificada No. 4 del modelo original.

De las Tablas 13 y 15, una vez más se observa que el ajuste para ambas funciones de costo fue ligeramente mejor para el caso de las mediciones realizadas en Quito.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
Quito						
V-1	1,1648	-	-	-	-	-
V-2	-	0,5320	17,2169	-	-	-
V-3	-	-		1,2083	-	-
V-4	-	-	-	-	1,2322	0,8757
Caracas						
V-1	0,8178	-	-	-	-	-
V-2	-	0,6860	4,4939	-	-	-
V-3	-	-		0,7497	-	-
V-4	-	-	-	-	0,8913	0,3004

Tabla 14: Valores de las variables “x” obtenidos para los casos de Quito y Caracas, usando AG, con la DE como función de costo

	RMSE (dB)			
	V-1	V-2	V-3	V-4
Quito	11,14	10,79	10,82	10,74
Caracas	11,80	11,61	12,83	11,50

Tabla 15: Valores de RMSE obtenidos para las cuatro versiones modificadas del modelo, para los casos de Quito y Caracas, usando AG, con DE como función de costo

Finalmente, los resultados obtenidos también indican que cualquiera de las cuatro versiones modificadas de la Recomendación ITU-R P.1812-3, desarrolladas en el presente trabajo, presentan un mejor desempeño que el mostrado por los modelos Okumura-Hata y Recomendación ITU-R P.1546-6 (ver sección 3.3.2).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se desarrollaron cuatro (4) versiones modificadas del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3, que es uno de los modelos actualmente en el tapete para la estimación de las pérdidas de propagación en sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT).

El desarrollo se basó en el ajuste de cuatro (4) funciones o ecuaciones, extraídas del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3, para el cálculo de las pérdidas de propagación, utilizando para dicho ajuste, de forma individual, las técnicas de optimización por enjambre de partículas o PSO y algoritmo genético, ambas pertenecientes al conjunto las técnicas de computación inteligente. Como funciones de costo, aptitud o *fitness* se consideraron el RMSE y la desviación estándar (DE).

Para el ajuste en cuestión se utilizaron resultados de mediciones realizadas en ambientes exteriores, condición de recepción fija, en Quito, Ecuador y Caracas, Venezuela, en el marco del proceso de selección del estándar base de la TDT en dichos países. En Quito las mediciones consistieron en el nivel del campo eléctrico recibido, mientras que en Caracas se midió el nivel de potencia recibida.

Fueron presentadas las configuraciones experimentales correspondientes a ambos conjuntos de mediciones, así como los resultados de las mismas, los cuales permitieron verificar el aumento de las pérdidas de propagación a medida que la distancia desde el transmisor también aumenta. Para ambas ciudades, el exponente de pérdidas de potencia experimental resultó ser menor que 2, situación que no es común que tenga lugar en ambientes exteriores, Sin embargo, ello puede deberse a un posible efecto “túnel” en los ambientes de medición considerados, así como a la relativamente poca variación existente entre los valores de las distancias desde el transmisor en las cuales se llevaron a cabo las mencionadas mediciones.

Se implementaron tres de los modelos de propagación reportados en la literatura para la aplicación en sistemas TDT, específicamente, el modelo Okumura-Hata y las Recomendaciones ITU-R P.1546-5 e ITU-R P.1812-3, para estimar las pérdidas de propagación correspondiente a cada uno de los puntos considerados en las mediciones. Al comparar los valores medidos con dichos valores estimados se

observó que el modelo Okumura-Hata fue el que arrojó un menor RMSE (14,42 dB) en Quito, mientras que en Caracas el mejor desempeño se obtuvo con la Recomendación ITU-R P.1812-3, con un RMSE igual a 22,65 dB. No obstante, fueron las cuatro versiones modificadas de la Recomendación ITU-R P.1812-3 las que mostraron un significativamente mejor desempeño, con un RMSE máximo de 11,14 dB para Quito y 12,83 dB para Caracas, ambos obtenidos cuando se utilizó AG, con la desviación estándar como función de costo.

De las cuatro nuevas versiones modificadas del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3, fue la versión No. 4 la que mejor desempeño presentó en la estimación de las pérdidas de propagación.

El ajuste tanto con PSO como AG, para las dos funciones de costo consideradas, resultó un ligeramente mejor para las mediciones registradas en Quito, debido probablemente a la menor dispersión entre dichas medidas en relación a la dispersión existente entre las mediciones realizadas en Caracas.

Para futuras investigaciones, relacionadas con la abordada en el presente trabajo, se recomienda explorar la optimización del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-3, así como también de otros modelos de propagación aplicables a TDT o sistemas inalámbricos de telecomunicaciones en general, utilizando otras técnicas de inteligencia computacional, de regresión lineal múltiple, regresión no lineal, entre otras.

Asimismo, se recomienda el desarrollo de herramientas computacionales en los que se implementen los modelos desarrollados, otros por desarrollar y varios de los ya existentes en la literatura, para de esa manera agilizar los cálculos de pérdidas de propagación en el proceso de planificación y dimensionamiento de los sistemas de TDT y, en general, de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones.

Finalmente, es latente la necesidad permanente de continuar la realización de campañas de mediciones en distintas ciudades de Ecuador y otros países, para de esa manera contar cada vez más con una mayor cantidad de datos de medición que permitan validar y mejorar los resultados obtenidos en el presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Medición de la Sociedad de la Información (Resumen Ejecutivo). Ginebra, Suiza, 2013.
- [2] Pérez N. Planificación y Dimensionamiento de Sistemas de Televisión Digital Abierta (TDA). Notas de Aula, Postgrado en Telecomunicaciones, 2do Semestre 2014, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2014.
- [3] Uzcátegui J.R. Implementación de la Recomendación ITU-R P.1812-3 para la Estimación de las Pérdidas de Propagación en Televisión Digital Abierta (TDA). Tesis de Grado de Maestría en Telecomunicaciones, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2015.
- [4] International Telecommunication Union (ITU). Recommendation ITU-R P.1546-5: Method for Point-to-Area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz. Ginebra, Suiza, 2013.
- [5] International Telecommunication Union (ITU). Recommendation ITUR P.1812-3: A Path-specific Propagation Prediction Method for Point-to-area Terrestrial Services in the VHF and UHF Bands. Ginebra, Suiza, 2013.
- [6] Páez-Vásquez X.S. Evaluación Técnica del Desempeño de los Estándares de Televisión Digital Terrestre en el Distrito Metropolitano de Quito. Tesis de Grado de Maestría, Redes de Información y Conectividad, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Quito, Ecuador, 2014.
- [7] Comisión Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL). Informe Técnico sobre las Pruebas Comparativas de Desempeño en Campo de los Estándares para Televisión Digital Terrestre DVB-T e ISDB-T. Caracas, Venezuela, 2007.
- [8] Comisión Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL). Informe Técnico sobre las Pruebas Comparativas de Desempeño en Campo de los Estándares para Televisión Digital Terrestre DVB-T, ISDB-T y DTMB. Caracas, Venezuela, 2008.
- [9] Pérez T. Evaluación del Uso de PSO (Particle Swarm Optimization) para el Ajuste de Controladores PID, Aplicados al Proceso de Levantamiento de Petróleo Mediante

Bombeo Centrífugo Sumergido. Trabajo de Grado, Ingeniería de Sistemas, Universidad de Los Andes, Venezuela, 2015.

[10] Ahmed H., Glasgow J. Swarm Intelligence: Concepts, Models and Applications. Technical Report 2012-585. Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2012.

[11] Floreano D., Mattiussi C. Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and, Technologies. The MIT Press, 2008.

[12] Sumathi S., Paneerselvam S. Computational Intelligence Paradigms: Theory & Applications using MATLAB. CRC Press, 2010.

[13] Rondeau T.W. Application of Artificial Intelligence to Wireless Communications. Ph.D. Thesis, Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, United States, 2007.

[14] Rondeau T.W., Bostian C.W. Artificial Intelligence in Wireless Communications. Artech House, 2009.

[15] Longley A.G., Rice P.L. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss over Irregular Terrain. A Computer Method. ESSA Technical Report ERL 79-ITS 67. National Technical Information Service (NTIS), Washington, DC, July 1968.

[16] Hufford G.A., Longley A.G., Kissick W.A. A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Model. NTIA Report 82-100, Washington, DC, July 1982.

[17] Molish A.F. Wireless Communications. Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

[18] Pérez-Vega C., Zamanillo J. Path-Loss Model for Broadcasting Applications and Outdoor Communication Systems in the VHF and UHF Bands. IEEE Transactions on Broadcasting. Vol. 48, No. 2, June 2002, pp. 91-96.

[19] Federal Communications Commission (FCC). F(50,50), F(50,10) FM, TV Propagation Curves Graphs. F(50,90) Digital TV Curves Graphs. FM to TV Channel 6 Interference Ratios Graphs [En línea]. Disponible en: http://transition.fcc.gov/Bureaus/MB/Databases/FM_TV_DTV_Propagation_Curves_Graphs/FM_TV_DTV_propagation_curves_graphs.html (consultada en agosto 2015).

- [20] Wang Z., Jin R., Geng J. Finite Mixture Noise Models for Mobile Digital Television Channel on Urban Terrestrial Broadcasting. *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 53, No. 4, December 2007, pp. 738-745.
- [21] Shumate S. (2008). Deterministic Equations for Computer Approximation of ITU-R P.1546-2 [En línea]. Disponible en: <http://apps.fcc.gov/ecfs/document/view;jsessionid=LCfNPbSJgX1ymCcVJ1np0Np886whcnBfv5Vp7pb2J5QyHRdyvng7!-1221852939!NONE?id=7021026514> (consultada en agosto 2015).
- [22] Shumate S. Deterministic Equations for Computer Approximation of ITU-R P.1546-2. International Symposium on Advanced Radio Technologies and The Working Party Meetings for ITU-R WP3J, 3K, 3L and 3M hosted by National Institute of Standards and Technology, June 2008.
- [23] Garret P. (2006). Absorption and Transmission of Light and the Beer-Lambert Law [En línea]. Disponible en: <http://www.physics.uoquelp.h.ca/~pgarrett/teaching/PHY-1070/lecture-21.pdf> (consultada en agosto 2015).
- [24] Hayt W.H., Buck J.A. Teoría Electromagnética. Séptima Edición, McGraw Hill Interamericana, 2006.
- [25] Paran K., Noori N. Tuning of the Propagation Model ITU-R P.1546 Recommendation. *Progress in Electromagnetics Research B*, Vol. 8, pp. 243-255, 2008.
- [26] Fernández J.R. Quispe M., Kemper G., Samaniego J., Díaz D. Adjustments of Log-Distance Path Loss Model for Digital Television in Lima. XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT'12), Brasília, DF, Brasil, Setembro 2012.
- [27] Rappaport T.S. *Wireless Communications: Principles and Practice* 2nd Edition, Prentice Hall, 2002.
- [28] Feuerstein M.J., Blackard K.L., Rappaport T.S. Path Loss, Delay Spread, and Outage Models as Functions of Antenna Height for Microcellular System Design. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 43, No. 3, August 1994, pp. 487-498.

- [29] Sriram N. (2006). Decomposing the Pearson Correlation [En línea]. Disponible en: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2213946 (consultada en agosto 2015).
- [30] Ostlin E., Zepernick H.J., Suzuki H. Macrocell Path-Loss Prediction Using Artificial Neural Networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59, No. 6, July 2010, pp. 2735-2747.
- [31] Ostlin E., Suzuki H., Zepernick H.J. Evaluation of the Propagation Model Recommendation ITU-R P.1546 for Mobile Services in Rural Australia. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, No. 1, January 2008, pp. 38-51.
- [32] Ramesh V., Stephen T., Prasad J.V. An Efficient Path loss Prediction Mechanism in Wireless Communication Network Using Fuzzy Logic. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Vol. 2, No. 1, January 2012, pp. 1-6.
- [33] Benedicic L., Pesko M., Javornik T., Korosec P. A Metaheuristic Approach for Propagation-Model Tuning in LTE Networks. Informatica 38, Vol. 38, No. 3, 2014, pp. 35-143.
- [34] Beire A.R., Pita H., Cota N. Optimizing Propagation Models on Railway Communications using Genetic Algorithms. Procedia Technology, Vol. 17, 2014, pp. 50-57.
- [35] Deygout J. Multiple Knife-Edge Diffraction of Microwaves. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 14, No. 4, July 1966, pp. 480–489.
- [36] Deusom E.M., Tonye E. New Propagation Model Optimization Approach based on Particles Swarm Optimization Algorithm. International Journal of Computer Applications (IJCA), Vol. 118, No. 10, May 2015, pp. 39-47.
- [37] Calle L.R., Guzmán D.O. Migración a TDT de un Canal de TV Local: Alternativas de Uso de Espectro y Financiamiento. Informe de Materia de Graduación, Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2015.

- [38] TDA (2015). Cobertura [En línea]. Disponible en: <http://www.tdavenezuela.gob.ve/node/18> (consultada en enero 2016).
- [39] AliExpress (2015). Mini-ISDB-T-Digital-TV [En línea]. Disponible en: http://es.aliexpress.com/store/product/New-Mini-ISDB-T-Digital-TV-Stick-Video-Recorder-USB-TV-Receiver-Remote-Control/1919027_32501866769.html (consultada en enero 2016).
- [40] Pérez N. Radioenlaces. Notas de Aula, Semestre B-2104, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2014.
- [41] Garg V.K. Wireless Communications and Networking. Elsevier, 2007.
- [42] Al-Raie F.M.A. (2010). Simulation of Multipath Fading Effects in Mobile Radio Systems [En línea]. Disponible en: http://www.microwavejournal.com/ext/resources/BGDownload/1/6/Multipath_Fading.pdf?1326826600 (consultada en octubre 2015).
- [43] Olfat M. Spatial Processing, Power Control, and Channel Allocation for OFDM Wireless Communications. Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Maryland, United States, 2003.
- [44] Rahmati A. Azmi. Iterative P. Reconstruction of Oversampled OFDM Signals over Deep Fading Channels. 4th European Conference on Circuits and Systems for Communications (ECCSC 2008), Bucharest, Romania, 2008.
- [45] Marchetti N, Rahman M.I., Kumar S., Prasad R. OFDM: Principles and Challenges. Chapter 2 of New Directions in Wireless Communications Research. Springer, 2009, pp. 29-62.
- [46] Parsons, J.D. The Mobile Radio Propagation Channel. 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2000.
- [47] Atkins B (1991). Radio Propagation by Tropospheric Scattering [En línea]. Disponible en: <http://www.bobatkins.com/radio/troposcatter.html> (consultada en octubre 2015).
- [48] Longley A.G. Radio Propagation in Urban Areas. Office of Telecommunications, OT Report 78-144. US Department of Commerce, April 1978.

- [49] Coude R. (2015). Radio Mobile Freeware by VE2DBE [En línea]. Disponible en: <http://www.cplus.org/rmw/englishl.html> (consultada en octubre 2015).
- [50] Magliacane J. (2015). SPLAT! Because the World isn't Flat [En línea]. Disponible en: <http://www.qsl.net/kd2bd/splat.html> (consultada en octubre 2015).
- [51] National Telecommunications and Information Administration (NTIA). Microcomputer Spectrum Analysis Models (MSAM) [En línea]. Disponible en: <http://ntiacsd.ntia.doc.gov/msam/> (consultada en octubre 2015).
- [52] Shumate S.E. Longley-Rice and ITU-P.1546 Combined: A New International Terrain-Specific Propagation Mode. 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), Ottawa, Canada, 2010.
- [53] Kasampalis S., Lazaridis P.I., Zaharis, Z.D., Bizopoulos A., Zetlas S., Cosmas J. Comparison of Longley-Rice, ITM and ITWOM Propagation Models for DTV and FM Broadcasting. 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Atlanta City, United States of America, 2013.
- [54] Didascalou D., Younis N., Wiesbeck W. Millimeter-Wave Scattering and Penetration in Isolated Vegetation Structures. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 5, September 2000, pp. 2106-2113.
- [55] International Telecommunications Union (ITU). Recommendation ITU-R P.1546-2: Method for Point-to-Area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz. Ginebra, Suiza, 2005.
- [56] International Telecommunications Union (ITU). Recommendation ITU-R P.453-7: The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data. Ginebra, Suiza, 1999.
- [57] International Telecommunications Union (ITU). Recommendation ITU-R P.530-7: Propagation Data and Prediction Methods required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems. Ginebra, Suiza, 1997.
- [58] International Telecommunications Union (ITU). Recommendation ITU-R P.833-2: Attenuation in Vegetation. Ginebra, Suiza, 1999.
- [59] Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN 1995), Perth, Australia, 1995.

- [60] Parraguez L., Heraoui M, Rengel J.E., Entonación de Controladores mediante Optimización por Enjambre de Partículas. V Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica (V CIBELEC 2012), Mérida, Venezuela, 2012.
- [61] Franco J.A. Un Algoritmo Basado en Optimización por Enjambre de Partículas para el Problema de Asignación Axial 3-Dimensional. Tesis de Maestría, Sistemas Computacionales, Instituto Tecnológico de La Paz, Baja California Sur, México, 2011.
- [62] Nieto, J.M. (2006). Algoritmos Basados en Cúmulos de Partículas Para la Resolución de Problemas Complejos [En línea]. Disponible en: http://neo.lcc.uma.es/staff/jmgn/doc/Memoria_PFC_JMGN.pdf (consultada en junio 2015).
- [63] Holland J.H. (2005). Genetic Algorithms [En línea]. Disponible en: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/holland.GAIntro.htm> (consultada en junio 2015).
- [64] Ortiz S. Sintonización de un Controlador PID basado en un Algoritmo Heurístico para el Control de un Ball and Beam. Tesis de Maestría, Instrumentación y Control Automático, Universidad Autónoma de Querétaro, México, 2014.
- [65] Yang S. Genetic Algorithms with Elitism-Based Immigrants for Changing Optimization Problems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, pp. 627-636.
- [66] Arroyo V. Modelo de un Algoritmo Genético con Selección Discriminatoria de Individuos bajo un Esquema de Ponderación de Probabilidades de Mutación. Tesis de Pregrado, Ingeniería Informática, Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú, 2013.
- [67] Cárdenas A. Inteligencia Artificial, Métodos Bio-Inspirados: Un Enfoque Funcional para las Ciencias De La Computación. Tesis de Pregrado, Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2012.
- [68] Pérez N. Cálculo de Cobertura de Sistemas WLL e LMDS. Tesis de Maestría, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/Rio), Brasil, 2000.
- [69] Seybold J.S. Introduction to RF Propagation. John Wiley & Sons, 2005.
- [70] Google Maps [En línea]. Disponible en: <https://www.google.co.ve/maps?source=tldsi&hl=es-419> (consultada en mayo 2016).

[71] Uzcátegui J.R., Torres J.F., Pérez N., Duque L., Bruzual Z. Directrices para la Elaboración de un Plan para la Migración a Televisión Digital Terrestre (TDT) en Venezuela. TELEMATIQUE, Vol. 9. No. 2, 2010, pp. 1-11.

[72] International Telecommunications Union (ITU). Recommendation ITU-R P.525-2: Calculation of Free-Space Attenuation. Ginebra, Suiza, 1994.

[73] Papazian P, et al. Flexible Interoperable Transceiver (FIT) Program Test Range I: Radio Propagation Measurements at 440, 1360, and 1920 MHz. Edwards Air Force Base, CA. NTIA (National Telecommunications and Information Administration), Report 00-380, Washington, D.C., USA., 2000.

[74] Wu J., Yuan D. Propagation Measurements and Modeling in Jinan City. The Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Boston, MA, USA, 1998.