



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“ESTIMACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA ATENUACIÓN
DEBIDO A LA LLUVIA PARA ENLACES SATELITALES
QUE OPERAN EN FRECUENCIAS SUPERIORES A 10
GHZ PARA LAS CIUDADES DE GUAYAQUIL Y QUITO
EN ECUADOR”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:

MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

MARÍA ANGÉLICA SANTACRUZ MARIDUEÑA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a Nuestra Madre la Santísima Virgen María, ya que bajo su manto he abrigado mi vida, agradezco a mi familia por el apoyo que me brindan cada día.

A mis compañeros y a todos los profesores de la Maestría por su amistad y conocimientos compartidos, especialmente a mi director el Dr. Michele D'Amico por la excelencia de sus enseñanzas sobre Propagación y por su apoyo permanente para alcanzar esta meta propuesta, y a todos quienes conforman la Maestría en Telecomunicaciones (MET) por su valioso trabajo contribuyen cada día al desarrollo de las telecomunicaciones en el Ecuador.

También quiero agradecer a las autoridades y personal administrativo de la FIEC y de la ESPOL, por su apoyo para culminar este trabajo, y especialmente al Ing. Sergio Flores Macías, por haber creado la MET y la carrera de pregrado en la que me formé, lo que me ha permitido vivir el sueño de ser maestra.

DEDICATORIA

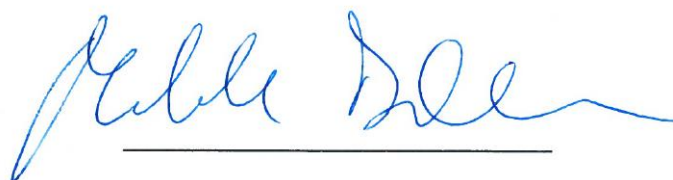
Quiero dedicar este trabajo a mis padres, la maestra Dra. Aracelly Maridueña Ruiz de Santacruz y el Abg. Walter Santacruz Vivanco, por su amor y esfuerzo permanente para darme la mejor educación, y a mi familia especialmente a mis abuelitos Tula Ruiz de la Guerra, Angélica Vivanco Vivanco y Cmdte. Raúl Maridueña Vargas, también a mi adorada tía la Lcda. Migdalia Maridueña Ruiz por ser mi valiente guerrera que hoy está luchando sin tregua contra un cáncer terminal, ellos por su inmenso amor, fe, valor y sabiduría, son y serán por siempre la estrella que guía los pasos de mi vida.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN




Miguel Yapur Auad, MSc.

DECANO FIEC



MICHELE D'AMICO, Ph.D.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



VLADIMIR SÁNCHEZ PADILLA MSc.

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"



.....

María Angélica Santacruz Maridueña

RESUMEN

En el presente trabajo se estima la atenuación debido a la lluvia en el sistema de comunicación satelital que opera en frecuencias superiores a 10 GHz para las ciudades de Guayaquil y Quito, Ecuador. Para obtener las tasas de precipitación se utilizaron las mediciones suministradas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) con tiempos de integración de 1 hora y 1 minuto, así como a las estimadas con tiempo de integración de 1 minuto, utilizando para ello el modelo matemático de Matricciani y la recomendación ITU-R P.837-6.

Se utilizan los lineamientos presentados en la Recomendación ITU-R P.618-12 para el cálculo de la atenuación por lluvia.

Se compara el impacto de la diferencia entre las intensidades de lluvia medida y estimada en la predicción de la atenuación por lluvia para ambas ciudades.

Se muestra la necesidad de disponer de bases de datos de tasas de precipitación medidas en la propia localidad para que las distribuciones acumulativas de dichas precipitaciones de 1 minuto puedan ser estimadas con mayor exactitud lo que conlleva a una estimación de la atenuación más precisa.

Se considera el efecto de la frecuencia de operación del enlace, el ángulo de elevación, la altura de la estación terrena y la polarización de la señal, sobre la atenuación. Se evalúa el impacto de dicha atenuación en el rendimiento del sistema de comunicación satelital en función de la relación portadora-ruido (C/N, Carrier to Noise).

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA.....	III
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	IV
DECLARACIÓN EXPRESA.....	V
RESUMEN	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
INTRODUCCIÓN	XII
CAPÍTULO 1	1
1. MARCO REFERENCIAL	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Importancia y justificación.....	2
1.3. Objetivos del proyecto	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Alcance y limitaciones.....	4
1.5. Metodología	4
CAPÍTULO 2	6
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Los efectos de lluvia sobre los sistemas de comunicación satelital que funcionan en frecuencias superiores a 10 GHz (i.e. atenuación).....	6
2.2. Atenuación específica en función de la frecuencia, distribución de gotas de lluvia (Drop Size Distribution, DSD).....	8
2.3. Revisión de mediciones experimentales efectuadas en regiones tropicales y ecuatoriales	11

CAPÍTULO 3	14
3. ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIÓN Y MÉTODO DE CONVERSIÓN.....	14
3.1 Descripción de la base de datos de lluvia que se ha utilizado y del tipo de instrumento de medición.....	14
3.1.1 Descripción de la base de datos de lluvia que se ha utilizado	14
3.1.2 Descripción del tipo de instrumento de medición, tasa de adquisición, resolución.....	15
3.2 Obtención de estadísticas de precipitación con tiempos de resolución de una hora.....	17
3.3 Obtención de estadísticas de precipitación con tiempos de resolución de un minuto (Método de de-integración de Matriccioni).....	20
3.4 Estadística global, estadística anual, estadística estacional (invierno y verano), el peor mes y el mejor mes.....	25
3.5 Comparación con la recomendación UIT-R P.837-6.....	30
CAPÍTULO 4	34
4. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN SATELITAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	34
4.1 Descripción de los procedimientos y de los métodos usados para evaluar el rendimiento del enlace.....	34
4.2 Resultados obtenidos y contribuciones. El efecto de frecuencia, elevación, altura sobre la tierra, polarización.....	45
4.3 Comparación entre los resultados obtenidos usando distribución de lluvia local medida y aquellos obtenidos aplicando la Recomendación -R P.837-6	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXO A.....	69
ANEXO B.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Arquitectura básica de un sistema Satelital	6
Figura 3.1	Pluviómetro en la estación meteorológica de Guayaquil	16
Figura 3.2	Distribución acumulativa, 1-hora, Guayaquil, 2012	18
Figura 3.3	Distribución acumulativa, 1-hora, Guayaquil, 2013	18
Figura 3.4	Distribución acumulativa, 1-hora, Guayaquil, 2014	19
Figura 3.5	Distribución acumulativa, 1-hora, Guayaquil, periodo 2012-2014	19
Figura 3.6	Distribución acumulativa, 1-hora (medida) y 1-minuto (Matricciani), Guayaquil, periodo 2012-2014	23
Figura 3.7	Comparación entre la pd de 1 minuto medida, la teórica obtenida con el modelo y la PR (R) real de lluvia de 1 hr, 201 a 2014	24
Figura 3.8	Distribución acumulativa medida de la estadística global (2012-2014), tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil.	25
Figura 3.9	Distribución acumulativa medida de la estadística anual 2013, tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil.	26
Figura 3.10	Distribución acumulativa medida de la estadística anual 2014, tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil.	26
Figura 3.11	Distribución acumulativa de la estadística de invierno, tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil, Global.	27
Figura 3.12	Distribución acumulativa de la estadística de verano 1 minuto, Guayaquil, Global.	27
Figura 3.13	Distribución acumulativa de la estadística de invierno, 1 minuto, Quito Global.	28
Figura 3.14	Distribución acumulativa de la estadística de verano, tiempo de integración 1 minuto, Quito Global	28
Figura 3.15	Distribución acumulativa de la estadística mensual, tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil, Global	29

Figura 3.16	Distribución acumulativa de la estadística mensual, tiempo de integración 1 minuto, Quito Global	30
Figura 3.17	Software Recomendación ITU-R P. 837-6 Anexo 3	33
Figura 3.18	Comparación entre la distribución acumulativa con tiempos de integración de 1 hora (medidos) y 1 minuto (Recomendación ITU –R P.837-6), Guayaquil Años 2012 a 2014	33
Figura 4.1	Representación de un trayecto Tierra-espacio [2]	35
Figura 4.2	Geometría para el cálculo de la pérdida por desapuntamiento.	39
Figura 4.3	Atenuación específica debida a gases atmosféricos (en dirección al zenit).	42
Figura 4.4	Temperatura de ruido debido al cielo claro (T_c).	44
Figura 4.5	Esquema para el cálculo de la temperatura de ruido de la antena de la estación terrena, en presencia de lluvia.	45
Figura 4.6	Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, con tasa de precipitación estimada por el modelo Matricciani.	47
Figura 4.7	Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, con tasa de precipitación medida con tiempo de integración de 1-hora.	48
Figura 4.8	Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, con tasa de precipitación medida con tiempo de integración de 1 minuto.	49
Figura 4.9	Atenuación por lluvia estimada en Quito, con tasa de precipitación medida con tiempo de integración de 1 minuto.	50
Figura 4.10	Variación de la atenuación por lluvia con la frecuencia.	56
Figura 4.11	Variación de la atenuación por lluvia con la altura de la estación terrena.	58
Figura 4.12	Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, 1 minuto, periodo 2012-2014.	61
Figura 4.13	Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, con tasa de precipitación 1 minuto, periodo 2012-2014.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros generales para el cálculo de la relación C/N (Guayaquil).....	51
Tabla 2. Parámetros de la estación terrena para el cálculo de la relación C/N (Guayaquil).....	51
Tabla 3. Parámetros del satélite para el cálculo de la relación C/N (Guayaquil).....	51
Tabla 4. Efecto de la atenuación por lluvias en la relación C/N (Guayaquil).....	54
Tabla 5. Efecto de la atenuación por lluvias en la relación C/N (Quito)..	55
Tabla 6. Atenuación de lluvias en función del ángulo de elevación del enlace satelital.....	57

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones satelitales tienen una creciente demanda a nivel mundial debido principalmente a su gran área de cobertura, y a su gran ancho de banda. Por ello cada vez es mayor el número de servicios provistos, tales como televisión, radiodifusión, telefonía, Internet, servicios de meteorología, prevención ante desastres naturales, búsqueda y salvamento, telemetría, educación a distancia, aplicaciones en la medicina, entre otras.

Debido a esto, un factor importante a considerar es la disponibilidad del enlace satelital que opera entre las bandas de frecuencia Ku y Ka, (frecuencias superiores a 10 GHz), ya que sobre 10 GHz la atenuación por lluvia es el factor que más afecta a las señales que se transmiten y el desempeño y disponibilidad se ven afectados por la presencia de la lluvia en alguna parte del enlace, por lo que es imprescindible analizar el impacto de la tasa de precipitación sobre el enlace (atenuación debido a la lluvia), y su dependencia de la variabilidad de la distribución acumulativa de tasa de precipitación, dependiendo de la localidad.

Otro aspecto a considerar es el efecto que tiene el tiempo de integración, (o tiempo de resolución o muestreo), con el que son medidas las estadísticas de lluvia, conociendo que según la recomendación de la ITU (*International Telecommunication Union*) el tiempo de integración requerido para la estimación de la atenuación por lluvia es de un minuto. Por ello, para poder obtener precisión en la estimación de la atenuación debido a la lluvia, se deben emplear mediciones realizadas en la misma localidad con tiempo de integración de un minuto.

En caso de tener mediciones realizadas con tiempo de resolución mayores o de no contar con mediciones realizadas en la localidad de interés, es necesario implementar modelos que permitan convertir los tiempos de integración de estadísticas de lluvia mayores (días, horas) a un minuto, como el modelo matemático de Matricciani u otros, o utilizar las recomendaciones de la ITU como la ITU-R P.837-6, que usa bases de datos de tasa de precipitación.

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto de la tasa de precipitación, en la atenuación debido a la lluvia estimada en las ciudades de Guayaquil y Quito, tanto

en términos de tiempos de integración como en la variabilidad espacial de la lluvia. Para ello, se analizan mediciones de las estadísticas de lluvia suministradas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de Ecuador. Se aplica el modelo matemático de Matricciani y el modelo de la Recomendación ITU-R P.837-6, para la conversión de los tiempos de resolución de las distribuciones acumulativas de tasas de precipitación de una hora a un minuto. Además, se implementa el modelo de la Recomendación ITU-R P.618-12 para la predicción de la atenuación por lluvias y un algoritmo de cálculo de la relación C/N en un enlace propuesto, para evaluar el efecto de la mencionada atenuación en el rendimiento o desempeño del sistema de comunicación satelital.

También se evalúa el efecto que tiene en la atenuación del enlace satelital, la frecuencia de operación, el ángulo de elevación del enlace, la altura de la estación terrena y la polarización de la señal.

CAPÍTULO 1

1. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se describen el planteamiento del problema, la justificación del mismo, los objetivos y la metodología empleada, así como los alcances del trabajo.

1.1. Descripción del problema

Los enlaces inalámbricos de telecomunicaciones terrestres y satelitales que operan en frecuencias superiores a 10 GHz tienen como principal factor limitador, en su cobertura y desempeño, la atenuación que sufre la señal debido a los eventos de lluvia. En este sentido es imprescindible poder estimar con la mayor precisión posible dicha atenuación, para evitar que se produzcan serios problemas en el sistema de telecomunicaciones una vez puesto en operación.

Por ello existen en la literatura, investigaciones y modelos que permiten realizar la estimación de las pérdidas debido a la lluvia, como los modelos de Crane [1], Recomendación UIT-R P.618-12 [2], Moupfouma [3] entre otros; en los países latinoamericanos a excepción de Brasil, o Colombia y Venezuela, no se conocen muchos estudios sobre este tema. En Ecuador a pesar de estar localizado en una zona tropical, no se conocen estudios previos de la predicción de las pérdidas por lluvias en los enlaces de comunicaciones vía satélite basado en tasas de precipitación medidas localmente.

La precisión de los modelos para predecir la atenuación debido a la lluvia, está relacionada, con la tasa de precipitación correspondiente a la localidad, en la que se planifica o dimensiona el enlace o el sistema de telecomunicaciones. En caso de no contar con estas mediciones, se deben utilizar modelos que permitan convertir, los tiempos de integración de distribuciones acumulativas de tasas de precipitación con tiempos de integración mayores, a tiempos de integración de 1 minuto, entre los principales modelos se tienen: Matricciani [4], Rice-Holmberg [5] Capsoni-Luini [6].

1.2. Importancia y justificación

El hecho de no contar en Ecuador con estudios relacionados con la atenuación por lluvias en sistemas inalámbricos de comunicaciones, que operan en frecuencias superiores a 10 GHz, (basados en la distribución acumulativa de la tasa de precipitación obtenida a partir de mediciones locales), trae como consecuencia directa que la predicción de la atenuación por lluvias en los mencionados sistemas en Ecuador sean imprecisos, lo que conlleva al sobredimensionamiento (implementación de más equipos de los realmente requeridos) o subdimensionamiento (problemas de cobertura y desempeño) de dichos sistemas.

Es importante resaltar que las ciudades de Guayaquil y Quito por encontrarse ambas en la zona ecuatorial, presentan altos índices pluviométricos en el año, posiblemente con diversos y considerables niveles de atenuación debido a la lluvia, para enlaces de telecomunicaciones que operan en frecuencias superiores a 10 GHz. Por ello a pesar que en principio se pudieran utilizar en Ecuador estudios llevados a cabo en otras latitudes con climas similares, su uso seguiría siendo una aproximación que pudiera resultar excesivamente imprecisa en diversos casos, por lo que se hace necesario realizar este estudio de manera local.

1.3. Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general

Estimar y comparar la atenuación debido a la lluvia en enlaces satelitales que operen a frecuencias superiores a 10 GHz en Ecuador, para evaluación del rendimiento de los sistemas de comunicaciones satelitales (i.e. degradación de la disponibilidad), destacando el impacto del clima local en las estadísticas de atenuación.

1.3.2. Objetivos específicos

- Obtener las estadísticas de distribución acumulativa de la lluvia para las ciudades de Guayaquil y Quito a partir de los datos pluviométricos de los tres últimos años con tiempo de resolución de una hora

proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

- Convertir las estadísticas obtenidas con tiempo de resolución de una hora, a una distribución acumulativa de lluvia con tiempo de integración de un minuto, por medio de la aplicación del Modelo matemático de de-integración de Matricciani: “Una teoría matemática de de-integración de la precipitación integrada durante un prolongado período de tiempo y su aplicación para predecir las estadísticas de las tasas de lluvia de 1 minuto” (“A mathematical theory of de-integrating long-time integrated rainfall and its application for predicting 1-min rain rate statistics”) [4].
- Comparar los valores propuestos por la recomendación UIT-P.837-6 “Características de la precipitación para obtener modelos de propagación” [7] con los datos obtenidos al aplicar el modelo matemático de de-integración de Matricciani.
- Obtener estadísticas de la atenuación del sistema de comunicación satelital para las ciudades de Guayaquil y Quito aplicando la recomendación ITU-P. 838-3: “Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción” [8].
- Evaluar el rendimiento del sistema de comunicación satelital para las ciudades de Guayaquil y Quito, aplicando la recomendación UIT-R P.618-12 “Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación tierra-espacio” [2], utilizando como entrada la información meteorológica local proporcionada por el INAMHI y modificada aplicando el modelo matemático de Matricciani.
- Desarrollar en Matlab todos los programas necesarios para realizar lo anteriormente descrito.

1.4. Alcance y limitaciones

La obtención y comparación de las estadísticas de atenuación debido a la lluvia, para las ciudades de Guayaquil y Quito que permitan evaluar el rendimiento o disponibilidad de los sistemas de comunicaciones satelitales, que operan en frecuencias superiores a 10 GHz en el Ecuador, para esto se empleará la Recomendación UIT-R P.618-12.

La obtención de alguna indicación sobre las contramedidas más eficaces que pueden ser adoptadas para contrarrestar la atenuación por lluvias en Ecuador.

1.5. Metodología

El conjunto de datos de entrada está constituido por series de tiempo obtenidas a partir de las mediciones de tasas de precipitación correspondientes a los últimos tres años recogidas por el INAMHI en las ciudades de Guayaquil y Quito. Estos datos tienen un tiempo de resolución de una hora lo que resulta demasiado espaciado para esta aplicación, por lo que se utilizará un modelo matemático más adecuado: el método de de-integración de Matricciani: "A mathematical theory of de-integrating long-time integrated rainfall and its application for predicting 1-min rain rate statistics" [4], para convertir las estadísticas (función de distribución acumulativa) obtenidas de los datos proporcionados por el INAMHI a aquellas correspondientes a una resolución de tiempo de un minuto, que son datos más precisos y que se ajustan las especificaciones requeridas por el modelo UIT-R P.618-12 . Estas nuevas estadísticas serán luego comparadas con las propuestas por la recomendación ITU-R P.837-6 para destacar las posibles discrepancias.

La estimación del desempeño del sistema de comunicación satelital será realizada aplicando la recomendación ITU-R P.618-12, utilizando como entrada la información meteorológica local descrita anteriormente. Para el estudio serán consideradas ambas ciudades, Guayaquil y Quito, y serán considerados diferentes valores de frecuencia y elevación. Por medio del análisis del nivel de atenuación excedido para un porcentaje dado de tiempo para una configuración

dada, 7será posible obtener alguna indicación sobre las contramedidas más eficaces que pueden ser adoptadas para contrarrestar la atenuación por lluvia en Ecuador.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se estudian aspectos importantes sobre la atenuación debido a la lluvia en sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, los factores que la producen y se hace una breve revisión acerca de algunos de los estudios existentes en la literatura relacionados con mediciones experimentales de la intensidad de lluvia y la atenuación por lluvia llevadas a cabo regiones tropicales y ecuatoriales.

2.1. Los efectos de lluvia sobre los sistemas de comunicación satelital que funcionan en frecuencias superiores a 10 GHz (i.e. atenuación).

Un sistema satelital básicamente está compuesto por un segmento espacial, que es el satélite, y un segmento terrestre, que son las estaciones terrenas:

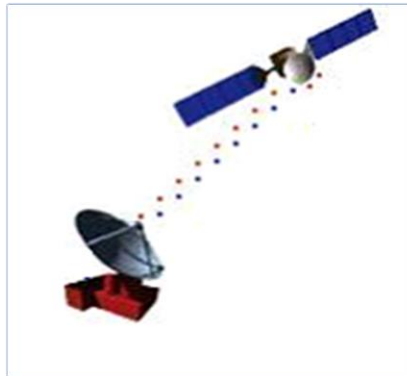


Figura 2.1 Arquitectura básica de un sistema satelital

Como se observa en la Figura 2.1 el satélite es un repetidor colocado en el espacio que se encarga de comunicar entre sí, a las estaciones terrenas. El nivel de potencia de la señal en ambas direcciones del enlace (la dirección del enlace ascendente o descendente), para sistemas operando en frecuencias superiores a 10 GHz, se ve afectado por hidrometeoros y otros factores que ocasionan pérdidas de propagación en un trayecto tierra-espacio, como lo indica la Recomendación UIT-R P.618-12 [2]:

- Atenuación por causa de las lluvias y otras precipitaciones, la nieve, la neblina y el granizo.
- Atenuación por gases atmosféricos.
- Centelleos troposféricos (que causan desvanecimientos rápidos).
- Atenuación debida a las tormentas de arena y polvo.
- Desapuntamiento de las antenas.
- Temperatura de ruido de las antenas.

De estos factores el de mayor impacto es la lluvia, debido a que las precipitaciones producen absorción y dispersión de las ondas de radio incidentes y esto causa el deterioro o pérdida de la señal recibida. Esto se produce debido a que a frecuencias superiores a 10 GHz la longitud de onda de la señal λ tiene una magnitud similar o menor al diámetro de la gota de lluvia. Por esto, la onda electromagnética incidente en la gota de lluvia, deberá cumplir con las condiciones de contorno en la superficie de separación aire-agua, por lo que, parte de la energía asociada a la onda se refracta en el agua de la gota, produciendo pérdida de la señal por absorción (calentamiento de la gota de agua), y otra parte se dispersa en direcciones diferentes de la dirección hacia el receptor (dispersión), y solo la parte restante de energía es la que alcanza al receptor. El resultado de tales efectos es la atenuación en el nivel de señal recibida, la cual aumenta a medida que aumenta la tasa de precipitación y la frecuencia de operación. Dicha atenuación deteriora la relación portadora-ruido (C/N) y la tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) del sistema receptor, pudiendo llegar a la situación de que la C/N sea menor a la mínima requerida por el receptor o el BER sea mayor al máximo valor permitido, para interpretar adecuadamente la señal recibida, lo que ocasionará la pérdida total de la recepción.

Debido a esto, existen métodos de predicción para el diseño de un sistema de telecomunicaciones tierra-espacio, como por ejemplo el descrito en la Recomendación UIT-R P.618-12, el mismo que determina la atenuación por lluvia en base a parámetros conocidos.

2.2. Atenuación específica en función de la frecuencia, distribución de gotas de lluvia (Drop Size Distribution, DSD).

La atenuación que sufre la señal electromagnética al atravesar un medio en presencia de la lluvia, se obtiene sumando las atenuaciones individuales generadas por cada gota que conforma la celda de lluvia. Por lo tanto, la atenuación por unidad de longitud, o atenuación específica debido a la lluvia, como lo cita [9] en la ecuación 5.20, está dada por:

$$\alpha = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} N(D) C_{ext}(D) dD \quad (2.1)$$

Donde:

$C_{ext}(D)$ = Área transversal de extinción (sección recta de absorción y dispersión, de diámetro D (cm^2))

$N(D)$ = Distribución del número de gotas de lluvia, por unidad de volumen ($\frac{1}{\text{m}^3 \text{ mm}}$)

La sección recta $C_{ext}(D)$ se determina recurriendo a la teoría de dispersión de Mie (que trata sobre la dispersión de una onda electromagnética plana por las partículas esféricas de cualquier material), para frecuencias superiores a 3 GHz, mientras que para frecuencias entre 1 GHz y 3 GHz se usa la aproximación de Rayleigh [10].

La atenuación específica de lluvia corresponde a la solución numérica de la integral de la ecuación (2.1) y está determinada por la frecuencia, la intensidad de lluvia R en (mm/hr) denominada tasa de precipitación, y de la temperatura T . La Recomendación UIT-R P.838-3 [8] calcula la atenuación específica γ_R (dB/km) debido a la intensidad lluvia mediante la siguiente ley potencial [8]:

$$\gamma = k R^\alpha \quad (2.2)$$

En esta ecuación, los coeficientes k y α son parámetros de regresión que dependen de la frecuencia f y de la polarización de la onda electromagnética, y se pueden calcular mediante [8]:

$$\log k = \left[\sum_{j=1}^4 a_j e^{-\left(\frac{\log f - b_j}{c_j}\right)^2} \right] + m_k \log f + c_k \quad (2.3a)$$

$$\alpha = \left[\sum_{j=1}^5 a_j e^{-\left(\frac{\log f - b_j}{c_j}\right)^2} \right] + m_\alpha \log f + c_\alpha \quad (2.3b)$$

Donde:

k = Puede ser k_h o k_v , dependiendo del tipo de polarización

α = Puede ser α_h o α_v , dependiendo del tipo de polarización

El cálculo de los coeficientes k_h , k_v , α_h y α_v , y los valores de a_j , b_j , c_j , d_j , m_k , m_α , c_k y c_α , son dados por la Recomendación UIT-R P.838.3 [28].

En la Tabla IV de [11], presenta los valores de k_h , k_v , α_h y α_v obtenidos para diferentes frecuencias.

La atenuación específica de lluvia está determinada por la frecuencia, la intensidad de lluvia R en (mm/hr) denominada tasa de precipitación, y de la temperatura T . La Recomendación UIT-R P.838-3 [8] calcula la atenuación específica debido a la intensidad lluvia γ_R (dB/km) mediante la siguiente ley potencial:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (2.4)$$

Donde:

R = Intensidad de lluvia R (mm/h)

k y α = Coeficientes que varían en función de la frecuencia y de la polarización, el cálculo de estos coeficientes para tipos de polarización horizontal o vertical lo presenta la Recomendación UIT-R P.838-3 [8].

Distribución de gotas de lluvia (Drop Size Distribution, DSD).

El diámetro de la gota de lluvia de acuerdo a [13] varía entre 0.01 mm y 6 mm, para diámetros menores a 0,01 mm las gotas se evaporan rápidamente, mientras que para diámetros superiores a 6 mm la tensión superficial sobre la

gota no es suficiente para mantener su cohesión, por lo que la gota se fracciona en gotas menores.

Entre los primeros investigadores que estimaron la distribución del tamaño de las gotas de lluvia están: Laws y Parsons [12] y Marshall y Palmer [11]. La distribución exponencial negativa de Marshall y Palmer, es recomendada para el caso de gotas pequeñas (diámetros menores a 1 mm) [13], ellos ajustaron los parámetros de la distribución del tamaño de las gotas, a la intensidad de lluvia R , para establecer una ley de la potencia, (es decir en el conteo de gotas que realizaron, encontraron una función exponencial negativa que dependía de cuanto estaba lloviendo) que cita [9] en la ecuación 5.11:

$$N(D) = N_0 \cdot e^{-\lambda D} \quad (2.5)$$

Donde:

$$\lambda = 4.1 \times R^{-0.21}$$

D = Es el diámetro de la gota de lluvia

$N_0 = 8000$ es un valor constante

R es un parámetro meteorológico que indica cuantos milímetros (mm) de agua pueden caer en una hora sobre un m^2 de superficie.

Para localidades geográficas de latitudes altas, [22] recomienda utilizar la distribución Gamma, más reciente que las anteriores.

Por otra parte a altas frecuencias las gotas de lluvia con diámetros muy pequeños, no son detectadas por algunos instrumentos, especialmente a altas frecuencias, por lo que la densidad numérica puede verse afectada por su reducida masa y velocidad de caída [15], por lo que se utilizan equipos denominados disdrómetros [16], que permiten determinar con exactitud el tamaño de las gotas. Métodos recientes como el de vídeo de alta resolución y el disdrómetro óptico, permiten medir el tamaño, velocidad y forma de las gotas de lluvia. En todo caso, la comparación de los tamaños de gotas de lluvia medidas en distintos lugares de la tierra, refleja una significativa variabilidad geográfica. En general, puede diferenciarse entre zonas tropicales donde se registran las

mayores intensidades y mayores tamaños de gotas de lluvia y las zonas templadas o de latitudes medias en las que las lluvias son menos intensas y las gotas son de menor tamaño.

2.3. Revisión de mediciones experimentales efectuadas en regiones tropicales y ecuatoriales

Entre las principales investigaciones realizadas en regiones tropicales y ecuatoriales, tanto para la tasa de precipitación, como para la atenuación debido a la lluvia para sistemas de telecomunicaciones que operan en frecuencias superiores a 10 GHz se encuentran:

- Las investigaciones realizadas en Malasia:

En la Universidad Tecnológica de Malasia, en el Sur de Malasia Peninsular, se presentó el estudio [17] donde se investigaron las características de precipitación de 1 año tomadas de estaciones meteorológicas automáticas, realizando comparaciones entre tipos de precipitación convectiva y estratiforme, para distribuciones de tasas de lluvias mensuales, las que se compararon con otras localidades con climas diferentes, se obtuvieron estadísticas estacionales, y variaciones diarias tanto de tasas de lluvia como de intensidad de lluvia, presentando de una forma más adecuada las características de precipitación locales. Lo que permitió encontrar como resultado que la mayor atenuación por lluvia ocurre durante horas de la tarde (12 pm a 6 pm), lo que representa una información significativa para proveedores de servicios que requieren garantizar niveles de Calidad de Servicio (QoS) en un determinado mes o día de mayor intensidad de lluvia, implementando mecanismos de Propagation Impairment Mitigation Techniques (PIMTs) para contrarrestar la atenuación por lluvia.

El estudio realizado en la Universiti Sains Malaysia (USM) [18], con la señal del satélite Superbird-C en la frecuencia de 12,255 GHz, se midió el nivel de potencia recibido en la estación terrena, los datos de intensidad de precipitación se registraron con un pluviómetro convencional, resultaron elevados valores de atenuación por lluvias resultantes para el 0.01%.

- Las investigaciones realizadas en Colombia:

Restrepo y colaboradores [19] presentan un resumen de varias campañas de medición de atenuación por lluvia y sus resultados. Comparan los valores estimados de atenuación por lluvia en Colombia, aplicando seis modelos de propagación para un enlace entre un satélite localizado en la longitud 304,5° Este, y una estación terrena en la ciudad de Medellín, operando en 12,6 GHz en el *downlink*. Presentan los resultados de la campaña de medición de la atenuación por lluvia realizada durante cuatro meses, en la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), generando las distribuciones acumulativas de la atenuación por lluvia para las bandas Ku y Ka, a partir de dichas mediciones,.

- Las investigaciones realizadas en Sudáfrica:

En [20] se reporta la caracterización de la tasa de precipitación utilizando la teoría de colas, en base a mediciones de intensidad de lluvia realizadas con un disdrómetro en las ciudades de Butare y Durban, localizadas en Ruanda y Sudáfrica. Presentando de esta forma un método alternativo para estimar el tamaño de la celda de lluvia, y la atenuación debido a la lluvia en enlaces terrestres y satelitales en las regiones subtropicales y ecuatoriales de África.

Una prueba de varios modelos de tasas de precipitación para estimar la atenuación por lluvia en el clima tropical de Nigeria, se presenta en [21], realizan una comparación con mediciones de intensidad de lluvia de un período de dos años, con el apoyo del NECOP (Nigeria Environmental Climatic Observatory Program), utilizan pluviómetros convencionales instalados en las ciudades de Akure y Lagos. De los modelos de tasa de precipitación evaluados, Moupfouma y la Recomendación UIT-R P.837-6, son los que presentaron el menor valor RMS (*Root Mean Square*) de error relativo.

- Las investigaciones realizadas en Venezuela:

En [22] se estima la atenuación por lluvia en varios enlaces satelitales entre puntos localizados en Venezuela y el satélite “Simón Bolívar”, en la banda Ka,

utilizando como datos de tasa de precipitación, los suministrados por las estaciones meteorológicas del país convertidos a estadísticas con tiempos de de-integración de 1 minuto, utilizando los modelos de Rice-Holmberg, Chebil-Rahman e Ito-Hosoya [23].

- Las investigaciones realizadas en Indonesia [24]:

“Design of Ka-Band Satellite Links in Indonesia”

CAPÍTULO 3

3. ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIÓN Y MÉTODO DE CONVERSIÓN

En este capítulo se utilizan las mediciones suministradas por el INAMHI para obtener las estadísticas de lluvia de las ciudades de Guayaquil y Quito de tiempos de integración de una hora y un minuto y se aplican los modelos: matemático de Matricciani y el de la Recomendación ITU-R P.837-6 para convertir las distribuciones acumulativas medidas con tiempo de resolución de una hora en distribuciones acumulativas con tiempos de integración de un minuto.

3.1 Descripción de la base de datos de lluvia que se ha utilizado y del tipo de instrumento de medición.

3.1.1 Descripción de la base de datos de lluvia que se ha utilizado

Para obtener las estadísticas de precipitación para las ciudades de Guayaquil y Quito con tiempo de resolución de 1 hora se utilizó la base de datos de tasas de precipitación suministrada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la misma se utilizó para la obtención de la distribución acumulativa de dicha tasa con tiempos de integración de 1 minuto, a partir del Modelo Matemático de Matricciani [4].

El INAMHI reporta los datos de tasa de precipitación diaria con resolución de una hora y también acumulada en 24 horas. El Instituto posee un total de 20 estaciones meteorológicas en Ecuador, incluyendo las localizadas en las ciudades de Guayaquil y Quito, específicamente en la Universidad de Guayaquil y Cumbayá, respectivamente.

Los datos suministrados para este trabajo corresponden a los periodos de tiempo transcurridos entre 2012, 2013 y 2014, para el caso de Guayaquil y 2014, 2015 y 2016 para la ciudad de Quito.

La estación meteorológica ubicada en Guayaquil tiene las coordenadas geográficas 2,173491° Norte y 79,918094 ° Oeste, y la estación localizada en Quito las coordenadas 0,225219° latitud Sur y 78,5248° longitud Oeste.

Con esta información es posible determinar la lluvia total diaria, la lluvia total anual, la lluvia total estacional y la lluvia acumulada del “mejor mes” y del “peor mes” más lluvioso del año.

3.1.2 Descripción del tipo de instrumento de medición, tasa de adquisición, resolución.

Las estaciones meteorológicas permiten obtener las mediciones de las tasas de precipitación y son de dos tipos: convencional y automática.

Estación meteorológica convencional

Este tipo de estación utiliza un pluviómetro convencional el cual puede ser de depósito basculante, de ponderación o de sifón [25].

El INAMHI emplea un pluviómetro de sifón, que es más preciso que otros pluviómetros, con un error de lectura del 2%. Además, presenta un buen desempeño aún en presencia de lluvias rápidas [26].

Un pluviómetro de sifón consiste de un sistema recolector de carga y descarga de agua, utiliza un pistón en la carga para llenar de agua un cilindro o recipiente recolector, al subir el pistón grafica o registra una medición en una faja de papel graduado, dispuesto para este efecto en un tambor giratorio que rota a una velocidad constante, esto lo realiza hasta que llega a una altura de 10 mm, una vez que llega a los 10 mm el agua se descarga mediante el tubo sifón de vidrio y devuelve la lectura a cero. El papel está graduado de forma que el eje de las abscisas se refiere al tiempo y el eje de las ordenadas la altura de la precipitación, el registro se realiza por medio de pluma que se mueve verticalmente, accionada por un flotador, marcando en el papel la altura de la lluvia.

Cuando no ocurre evento de lluvia, la pluma traza una línea horizontal en la base del papel [25].

En el caso específico del pluviómetro usado por el INAMHI, el mismo está instalado a 1,20 m de altura sobre el suelo, su cubo primario tiene un diámetro de 16 cm y una superficie recolectora de 200 cm².

La resolución del equipo es 0,1 mm y la tasa de adquisición está dada en mm/hr.

En la Figura 3.1, se muestra la estación convencional descrita, ubicada en el campo universitario de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de Guayaquil, en la ciudad de Guayaquil.



Figura 3.1. Pluviómetro en la estación meteorológica Guayaquil- Universidad Estatal en la ciudad de Guayaquil.

Estación meteorológica automática

También conocida como AWS (*Automatic Weather Station*), es una versión automatizada de la estación meteorológica convencional, que permite realizar mediciones en áreas remotas e inhóspitas, además de redundar en un ahorro de trabajo humano y hacer posible la realización de mediciones con mayor frecuencia [26].

Una estación meteorológica automática consta de un *datalogger* de alta capacidad que hace las veces del *hub* de la estación, comunicándose con cada uno de los sensores de manera individual y capturando los datos proporcionados por los mismos para almacenarlos, descargarlos, procesarlos y llevar a cabo el monitoreo. Adicionalmente, el *datalogger* permite realizar cálculos de estadísticas de las variables medidas. Por lo general, el *display* del instrumento muestra información tal como canales activos, memoria disponible, carga de la batería, entre otras.

La información capturada por el instrumento puede ser enviada a un centro de control vía comunicación satelital o comunicación celular, la batería de la estación es recargable y se conecta a un panel solar.

Para la realización de este trabajo, el INAMHI proporcionó las estadísticas de lluvia de 1 minuto de la ciudad de Guayaquil, registradas por una estación automática, se utilizó esta base de datos para realizar la comparación con las estadísticas obtenidas con tiempo de resolución de 1 minuto mediante el Modelo Matemático de Matriccioni [4].

3.2 Obtención de estadísticas de precipitación con tiempos de resolución de una hora.

Para obtener de estadísticas de precipitación para las ciudades de Guayaquil y Quito, con tiempos de resolución o de integración de 1 hora, se utilizó la base de datos de lluvia del INHAMI con tiempo de resolución de una hora.

El primer paso consistió en depurar la base de datos, eliminando los valores fuera de rango, y reemplazando con ceros las celdas que no tenían medición, de acuerdo a lo indicado por el INHAMI esto se debe a fallas en los equipos de medición, después se consolidó la información anual proporcionada en una sola hoja Excel.

El Anexo A se presenta el código Matlab, que genera el gráfico de las estadísticas de precipitación para las ciudades de Guayaquil y Quito, con tiempos de resolución de una hora y de un minuto.

En las figura 3.2, 3.3 y figura 3.4 se presentan las tasas de precipitación vs. % tiempo excedido, para los años 2012, 2013 y 2014 para la ciudad de Guayaquil, se observa que las mayores tasas de precipitación corresponden a los menores porcentajes de tiempo.

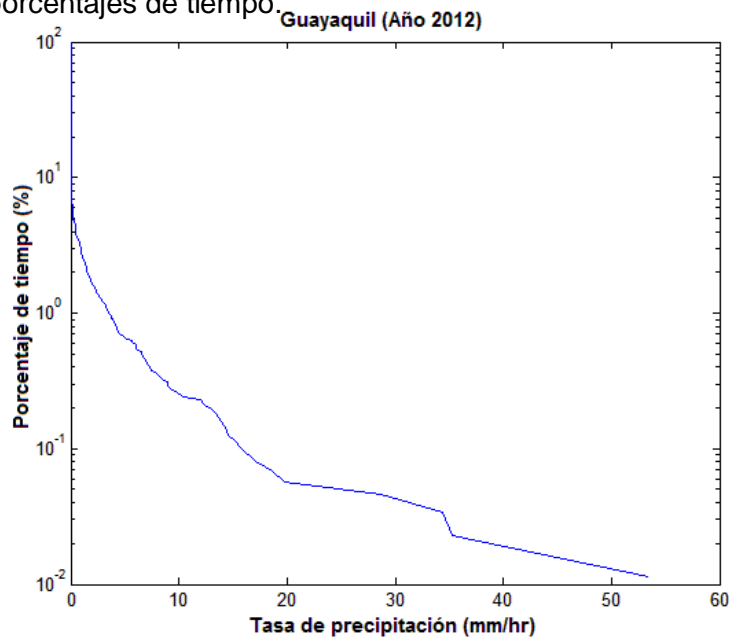


Figura 3.2. Distribución acumulativa, tiempo de integración 1-hora, Guayaquil

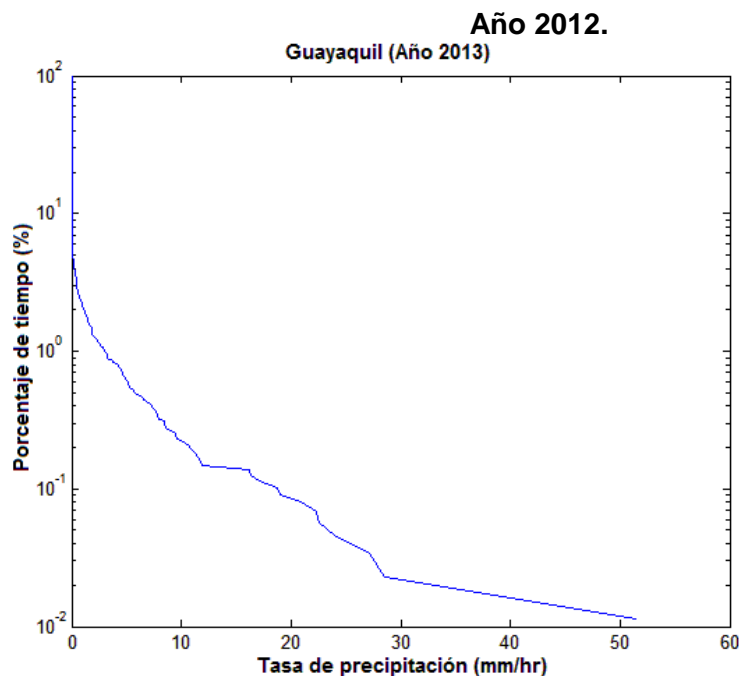


Figura 3.3. Distribución acumulativa, tiempo de integración 1-hora, Guayaquil, Año 2013.

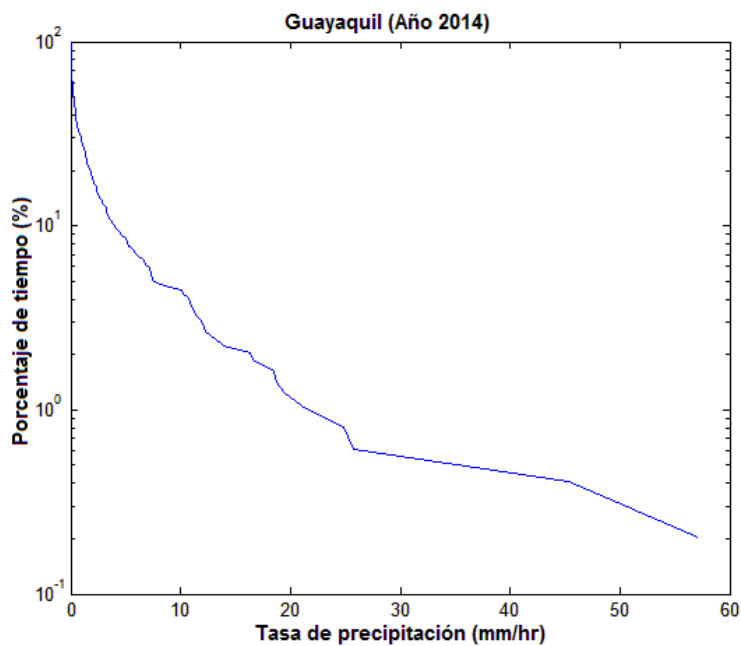


Figura 3.4. Distribución acumulativa, tiempo de integración 1 hora, Guayaquil Año 2014.

En la Figura 3.5 se observa la distribución acumulativa para el período completo, años 2012, 2013 y 2014 para la ciudad de Guayaquil.

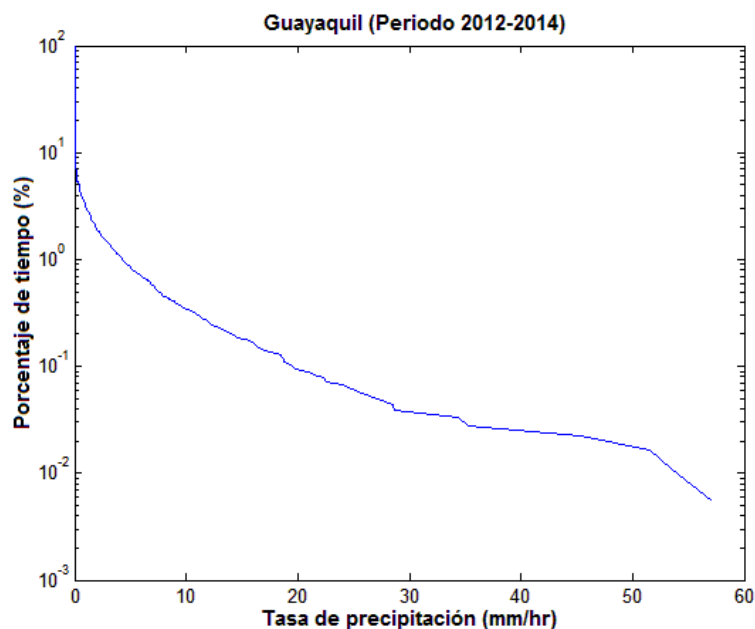


Figura 3.5. Distribución acumulativa, tiempo de integración 1-hora, Guayaquil, periodo 2012-2014.

3.3 Obtención de estadísticas de precipitación con tiempos de resolución de un minuto (Método de de-integración de Matricciani)

Para obtener las estadísticas de precipitación con tiempos de resolución de 1 minuto se utiliza al método de de-integración de Matricciani [4]. El modelo permite obtener la distribución de probabilidad (pd) de 1 minuto utilizando estadísticas de precipitación de 1 hora. El modelo obtiene la distribución de probabilidad de 1 minuto, a partir del gráfico de cuatro rangos disjuntos con tres puntos de discontinuidad derivativa, (P_1, R_1) , (P_2, R_2) y (P_3, R_3) , que definen dichos rangos. El Modelo Matemático de Matricciani fue desarrollado a partir de mediciones de estadísticas de lluvia realizadas durante un período de aproximadamente 13 años en las localidades de Spino d'Adda, Praga, Montreal, entre otras.

Los puntos de discontinuidad que definen los rangos descritos en el modelo matemático de Matricciani, han sido mencionados también por otros autores para otras localidades y climas [27, 28].

Es importante destacar que aunque el Modelo matemático ha sido probado e implementado para climas templados, no se descarta su aplicación para otras latitudes, razón por cual fue seleccionado para su aplicación en este trabajo, mediante el siguiente procedimiento:

Datos de entrada:

P_1 = Probabilidad de que un valor R de intensidad de lluvia sea excedido el 0,5% del tiempo

R_1 =Tasa de precipitación en mm/hr, correspondiente a una probabilidad de excedencia P_1

P_2 = Probabilidad de que un valor R de intensidad de lluvia sea excedido en el $1,71 \times 10^{-2}$ % del tiempo

R_2 = Tasa de precipitación en mm/hr, correspondiente a una probabilidad de excedencia P_2

P_3 = Probabilidad de que un valor R de intensidad de lluvia sea excedido el 0,002% del tiempo

R_3 = Tasa de precipitación en mm/hr, correspondiente a una probabilidad de excedencia P_3

Para generar la distribución de probabilidad de 1 minuto, se grafican los 4 rangos descritos en el modelo matemático [4] de la siguiente forma:

Rango I

El valor de R_1 se obtiene a partir de la curva de estadísticas de precipitación con tiempos de resolución de 1 hora para P_1 igual a 0,5%.

$$P_I(R) = P_{R_T}(R_T) \quad \begin{cases} 0 \leq R < R_1 \\ P_0 \leq P_R(R) < P_1 \end{cases} \quad (\%) \quad (3.1)$$

Rango II

El gráfico del rango II del modelo se obtiene a partir de la ecuación (3.2) de [4], este rango está delimitado por (P_1, R_1) y (P_2, R_2) .

El valor de R_2 se obtiene de la Figura 6 de [4], en la intersección de la curva $P_{R_T,\mu}(R_T)$ con $P_2 = 1,71 \times 10^{-2} \%$; valor que para la localidad de Spino d'Adda el modelo estima $R_2 = 36$.

$$P_{II}(R) = P_1 \left(\frac{R}{R_1}\right)^{-\lambda} \quad \begin{cases} R_1 \leq R < R_2 \\ P_1 \leq P_R(R) < P_2 \end{cases} \quad (\%) \quad (3.2)$$

Donde “ λ ” es la pendiente de $P_{II}(R)$, curva correspondiente al rango II.

$$\lambda = \frac{\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (3.3)$$

Rango III

El gráfico correspondiente al Rango III del modelo se obtiene a partir de la ecuación (3.4) de [4]. Este rango está delimitado por (P_2, R_2) y (P_3, R_3) .

El valor de R_3 se obtiene de la Figura 6 de [4], a partir de la intersección de la curva $P_{R_T,\gamma}(R_T)$ con $P_3 = 0,002 \%$. Para la localidad de Spino d'Adda, el modelo estima $R_3 = 100$ mm/hr.

$$P_{III}(R) = P_2 \frac{R_2}{R} e^{-\left[\left(\frac{R}{R_2}\right)^{\frac{-\xi}{0,7}} - 1\right]} \quad \begin{cases} R_2 \leq R < R_3 \\ P_2 \leq P_R(R) < P_3 \end{cases} \quad (\%) \quad (3.4)$$

Donde “ λ ” es la pendiente de $P_{III}(R)$, curva correspondiente al rango III.

Mientras que el valor de ξ se obtiene de la Tabla II de [4].

Rango IV

Obtenido a partir de la siguiente ecuación, con parámetros conocidos:

$$P_{IV}(R) = P_3 \frac{R_3}{R} e^{-\left[\left(\frac{R}{R_3}\right)^{\frac{-\xi}{0.7}} - 1\right]} \quad \begin{cases} R > R_3 \\ P_R(R) \leq P_3 \end{cases} \quad (\%) \quad (3.5)$$

Donde “ λ ” es la pendiente de $P_{IV}(R)$, dada por (3.4) y ξ se obtiene de la Tabla II de [4].

La distribución de probabilidad para un tiempo de muestreo de 1 minuto es:

$$P_R(R) = P_I(R) + P_{II}(R) + P_{III}(R) + P_{IV}(R) \quad (3.6)$$

A partir de esta curva obtenida con la aplicación de la ecuación (3.6), se extrae el valor la tasa de precipitación excedida para el 0,01% del tiempo, es decir, $R_{0.01}$, requerida por la Recomendación UIT-R P.618-12, que será el modelo a implementar para estimar la atenuación por lluvias en los enlaces satelitales de Guayaquil y Quito.

En la Figura 3.6 se aprecia las distribuciones acumulativas de la lluvia en Guayaquil, para el periodo 2012-2014, para tiempos de integración de 1 hora y la estadística obtenida con el modelo matemático de Matriccioni de 1minuto (curva de color rojo) y en la figura 3.7 la comparación entre las distribuciones acumulativas de 1 hora y 1 minuto medidas y 1 minuto estimada con el modelo matemático.

En el ANEXO A, se presenta el código en Matlab del procedimiento descrito, para generar las curvas de las estadísticas de precipitación para las ciudades de Guayaquil y Quito, con tiempos de resolución de 1 minuto.

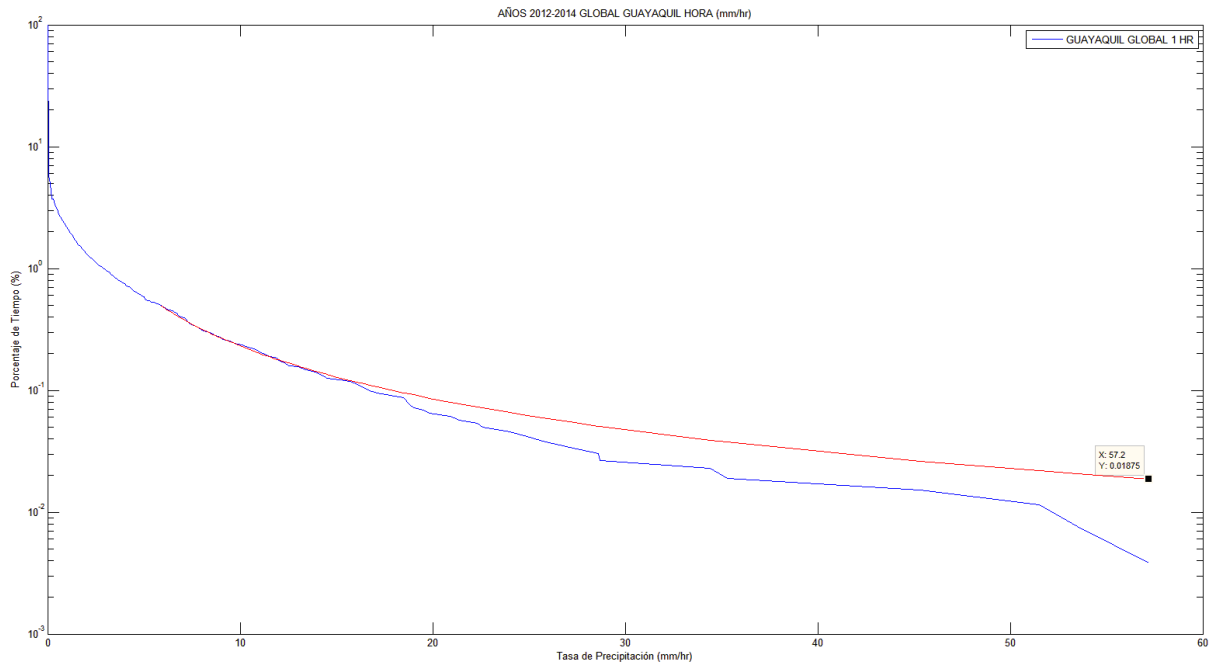


Figura 3.6. Distribución acumulativa, tiempos de integración 1 hora y 1 minuto (Modelo matemático Matricciani), Guayaquil, periodo 2012-2014.

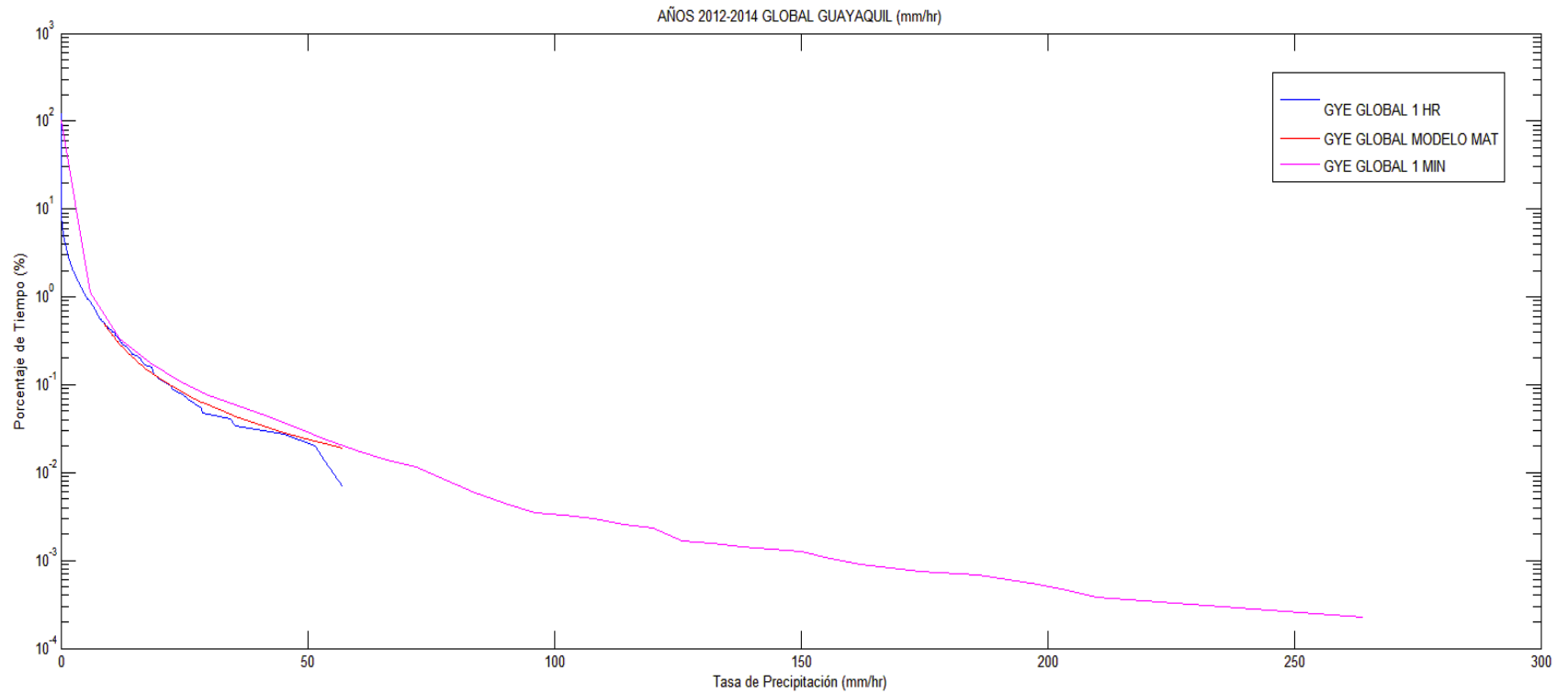


Figura 3.7. Comparación entre la pd de 1 minuto medida (curva magenta), la pd teórica obtenida con el modelo (curva roja) y la PR (R) real de lluvia de 1 hr. (curva azul), con datos medidos por el INAMHI los años 2012, 2013 y 2014

3.4 Estadística global, estadística anual, estadística estacional (invierno y verano), el peor mes y el mejor mes.

La estadística global de la tasa de precipitación se refiere a la distribución acumulativa de las tasas de precipitación considerando el intervalo completo de mediciones, es decir en este caso tres años. En la Figura 3.8 se muestra la estadística global obtenida para la ciudad de Guayaquil, con un tiempo de resolución de 1 minuto.

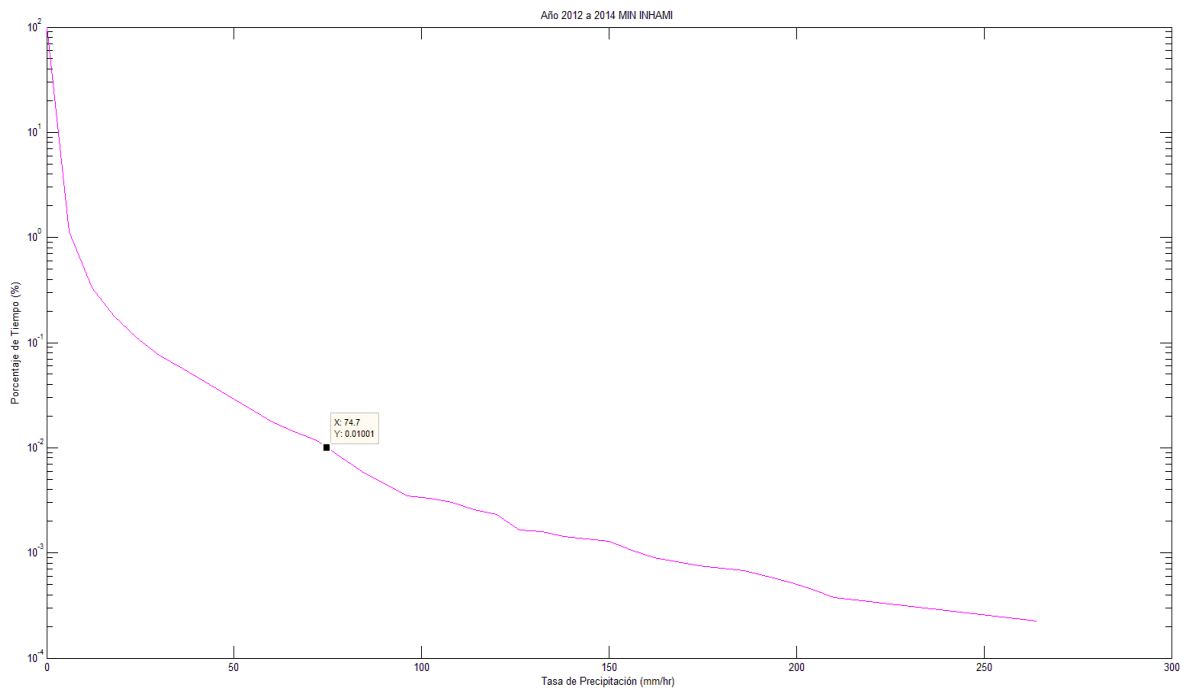


Figura 3.8. Distribución acumulativa medida de la estadística global (2012-2014), tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil.

La estadística anual refleja el comportamiento de la tasa de precipitación en períodos continuos de 12 meses, en las Figuras 3.9 y 3.10, se puede observar las estadísticas anuales de intensidad de lluvia medida, en la ciudad de Guayaquil, para los años 2013 y 2014, respectivamente, también para tiempos de integración de 1 minuto.

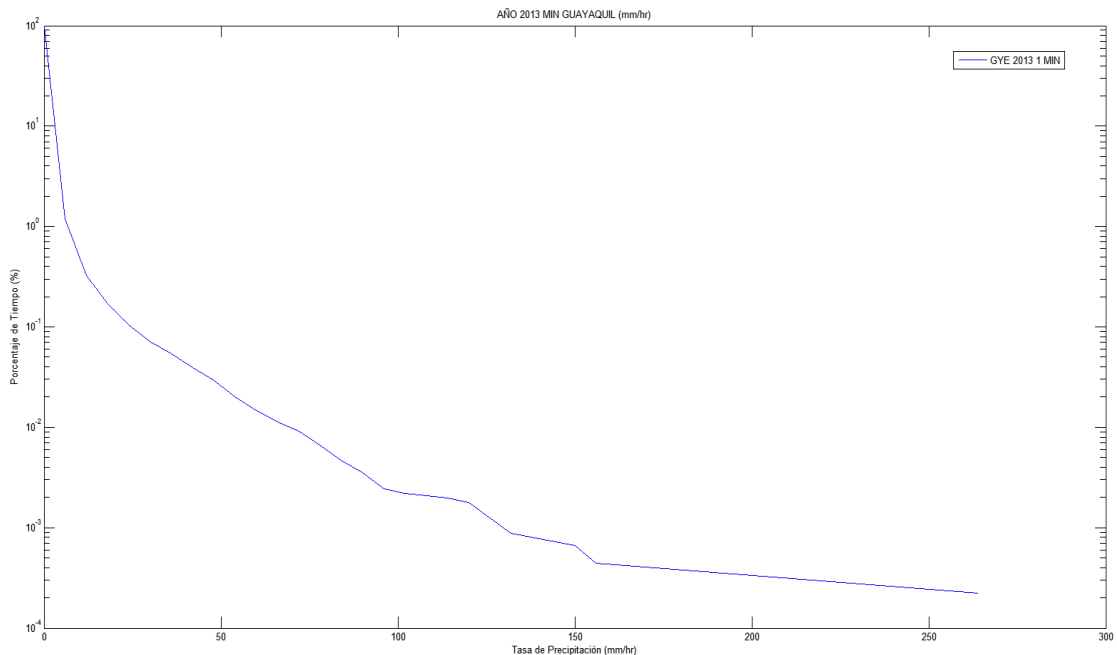


Figura 3.9. Distribución acumulativa medida de la estadística anual 2013, tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil.

Las estadísticas estacionales de tasa de precipitación consideran el comportamiento de dicha tasa de acuerdo a las estaciones del año [46]. En las Figuras 3.11 y 3.12 se muestran las estadísticas de la lluvia, para tiempos de integración de 1 minuto, para las estaciones de invierno y verano en la ciudad de Guayaquil para el año 2014 y en las Figuras 3.13 y 3.14 esta información para la ciudad de Quito.

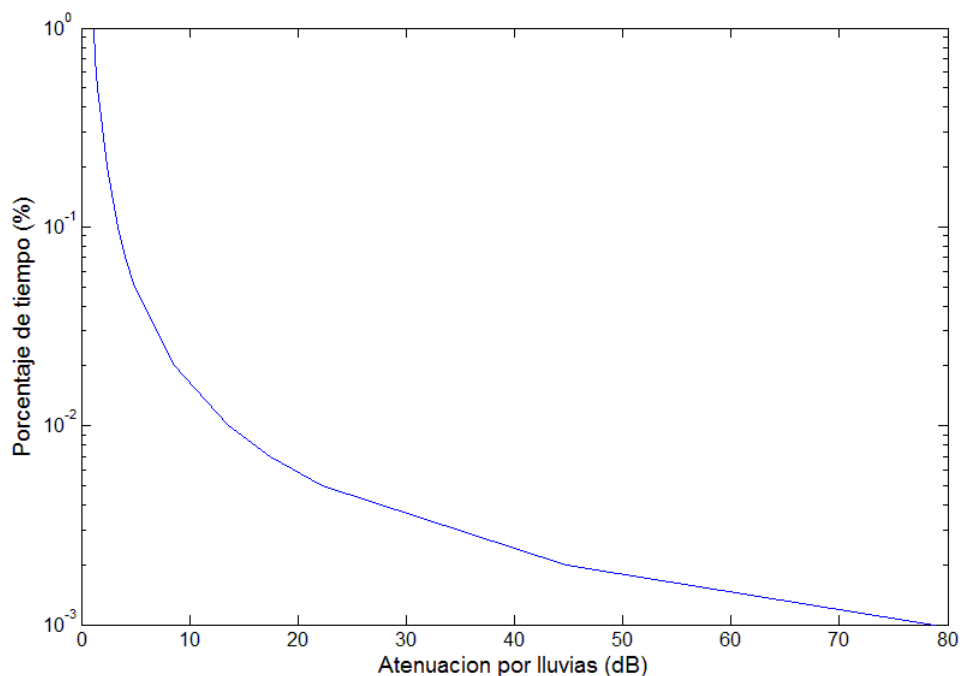


Figura 3.10. Distribución acumulativa medida de la estadística anual 2014, tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil.

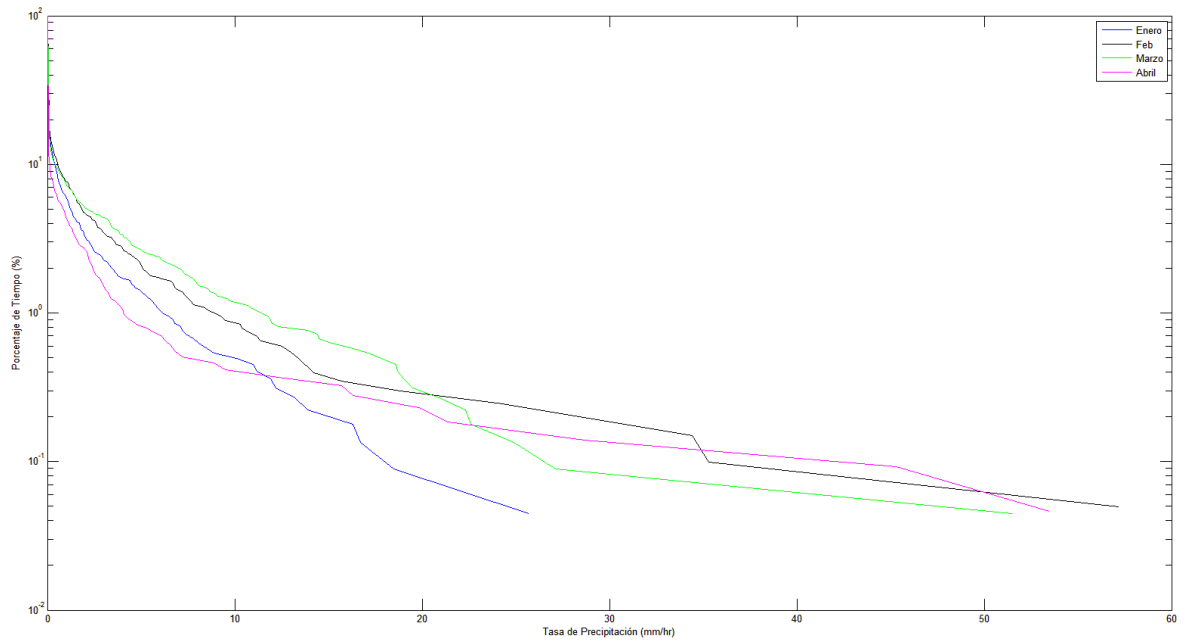


Figura 3.11. Distribución acumulativa de la estadística de invierno, tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil, Global

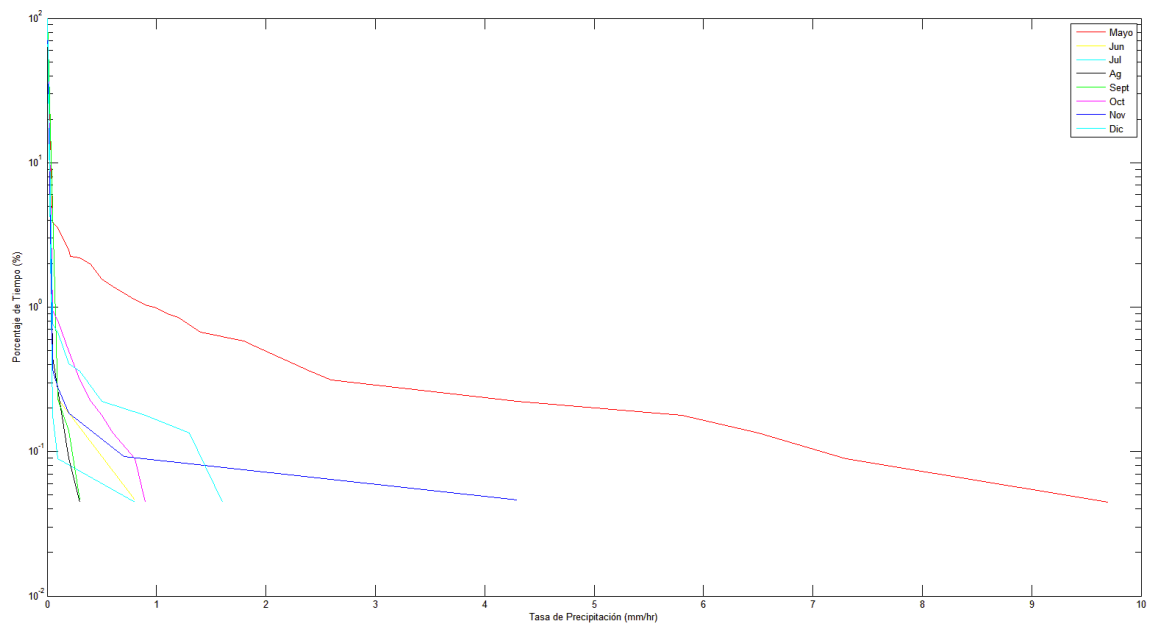


Figura 3.12. Distribución acumulativa de la estadística de verano, tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil, Global

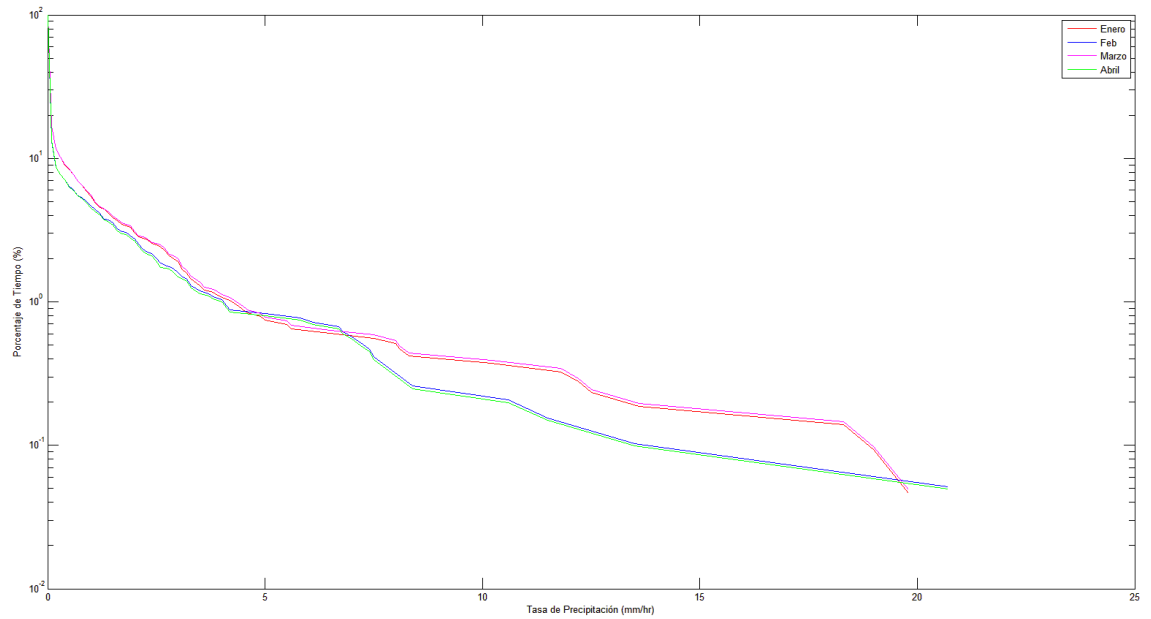


Figura 3.13. Distribución acumulativa de la estadística de invierno, tiempo de integración 1 minuto, Quito Global

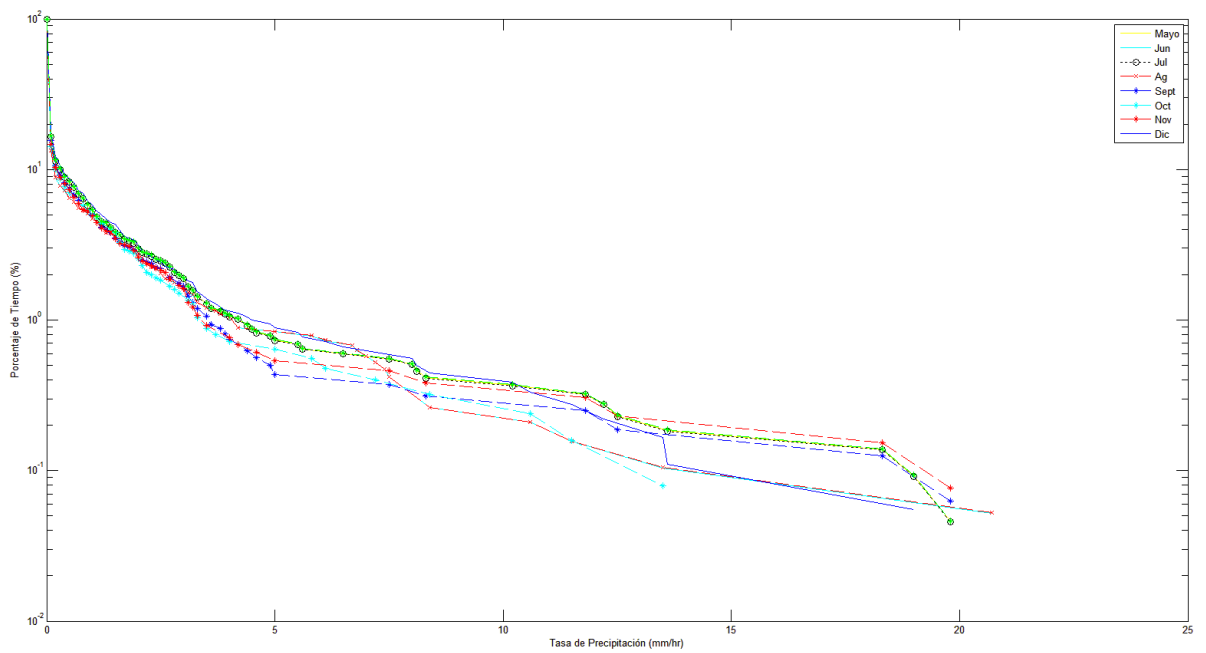


Figura 3.14. Distribución acumulativa de la estadística de verano, tiempo de integración 1 minuto, Quito Global

En las Figuras 3.11 y 3.13 se puede observar, que la intensidad de lluvia, es mayor desde el mes de meses de Enero hasta el mes de Abril, es decir en el invierno, es donde ocurren la mayor cantidad de precipitaciones en la ciudad.

Otra estadística, es la del *mejor mes*, que es aquel mes de un período anual en el que la distribución acumulativa de la precipitación presenta los menores valores en comparación con los once restantes meses de ese período anual. En las Figuras 3.15 y 3.16 se aprecia que el “mejor mes” del período global 2012 a 2014, en la ciudad de Guayaquil, fue el mes de Junio.

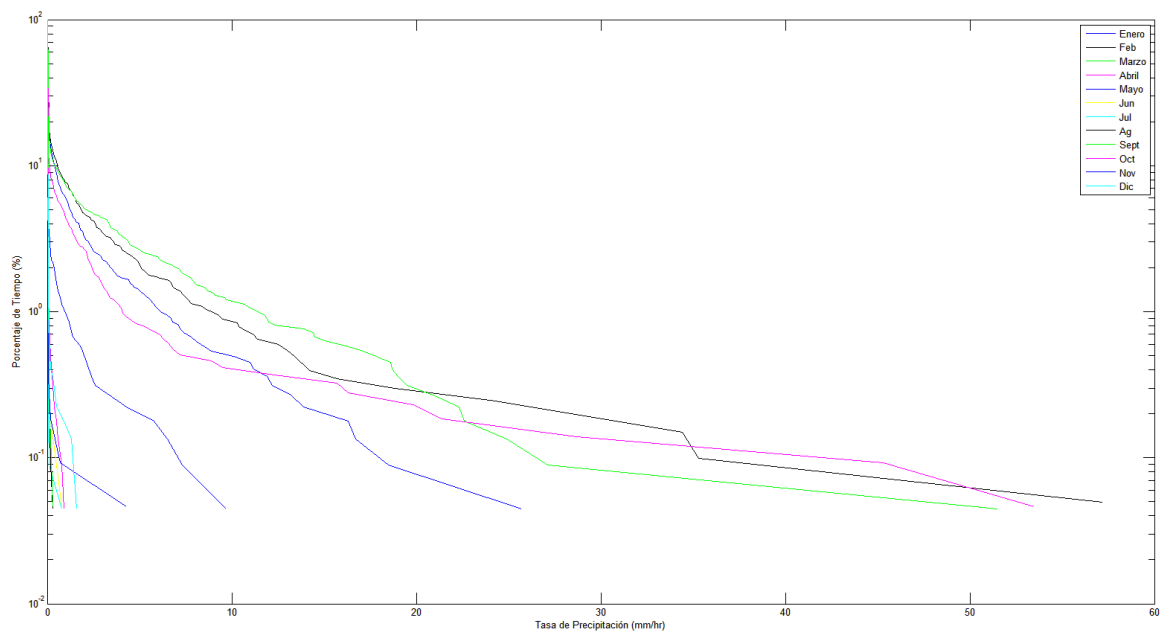


Figura 3.15. Distribución acumulativa de la estadística mensual, tiempo de integración 1 minuto, Guayaquil, Global

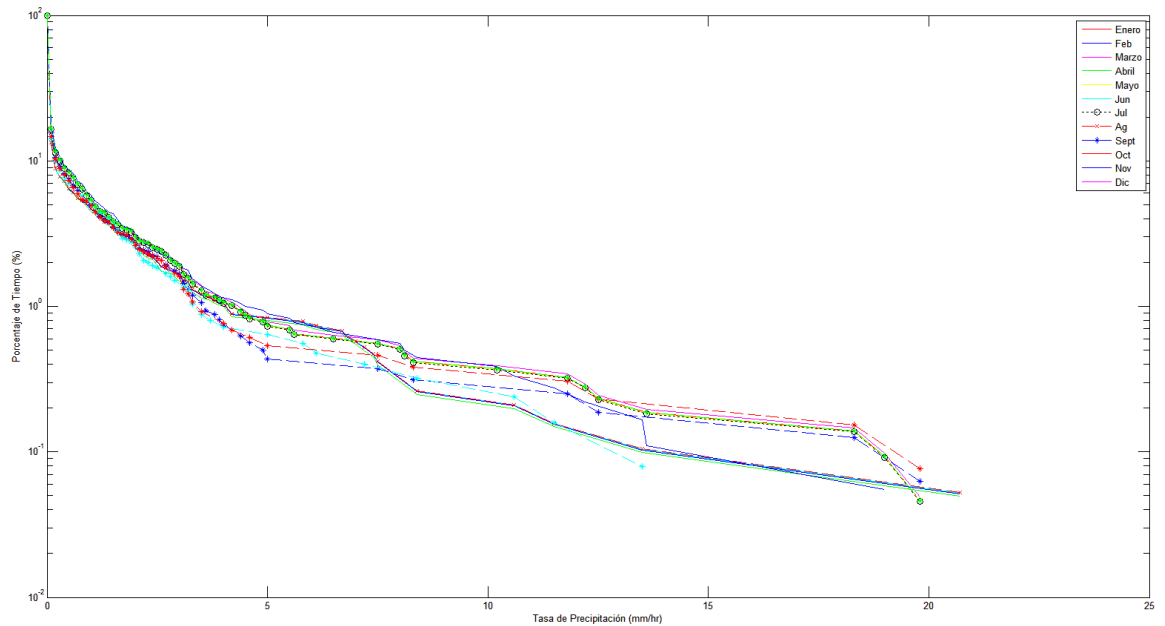


Figura 3.16. Distribución acumulativa de la estadística mensual, tiempo de integración 1 minuto, Quito Global

De acuerdo a lo indicado la estadística de la tasa de precipitación más importante para la planificación y dimensionamiento de los sistemas de comunicaciones satelitales y, en general, de los sistemas inalámbricos de telecomunicaciones operando en frecuencias superiores a 10 GHz, es la del *peor mes*, es decir, mes de un período anual que presenta los mayores valores de intensidad de lluvia en comparación con los once meses restantes de ese período anual [30]. Esto se debe a que una estadística anual arroja valores de tasa de precipitación menores al de ese “peor mes”, por lo que planificar y dimensionar un sistema en base a la estadística anual pudiera traer como consecuencia que durante ese “peor mes” del período anual considerado, la atenuación debido a la lluvia supere el margen de disponibilidad estimado para el sistema. En la Figura 3.11, se observa que el “peor mes” en el período global años 2012 a 2014, en la ciudad de Guayaquil, fue el mes de Febrero.

3.5 Comparación con la recomendación UIT-R P.837-6.

La Recomendación UIT-R P.837-6 presenta mapas con diferentes valores de intensidad de lluvia excedidos en 0.01% del tiempo en un año promedio, de acuerdo

a la figura 3.2 para el Ecuador específicamente las ciudades de Guayaquil y Quito corresponde un valor de R de en 70 mm/hr.

La Recomendación ITU-R P.837-6 ofrece un método para la conversión de estadísticas de índices de precipitación con tiempo de integración más altos en estadísticas de índice de precipitación, con tiempo de integración de un minuto [7]. La Recomendación ITU-R P.837-6 contiene mapas de parámetros meteorológicos, obtenidos utilizando la base de datos acumulados por un período de 40 años, análisis ERA-40 del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast, Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio), que se recomienda para predecir las características de precipitación en un tiempo de integración de 1 minuto cuando no se tienen disponibles mediciones locales [7].

Los mapas meteorológicos presentan referencialmente la tasa de precipitación R_p excedida durante el p% del tiempo del año; el modelo detallado en el Anexo 1 en el paso 5 de [7], indica que esta tasa de precipitación R_p está es dada por:

$$R_p(\text{Lat}, \text{Lon}) = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3.7)$$

Donde Lat y Lon son la latitud y longitud de la localidad de interés, y los parámetros A, B y C se determinan a partir de [7]:

$$A = ab \quad (3.8a)$$

$$B = a + c \ln \left[\frac{p}{P_o(\text{Lat}, \text{Lon})} \right] \quad (3.8b)$$

$$C = \ln \left[\frac{p}{P_o(\text{Lat}, \text{Lon})} \right] \quad (3.8c)$$

$$a = 1,09 \quad (3.8d)$$

$$b = \frac{[M_c(\text{Lat}, \text{Lon}) + M_s(\text{Lat}, \text{Lon})]}{21797 P_o} \quad (3.8e)$$

$$c = 26,92 b \quad (3.8f)$$

$$P_o(\text{Lat}, \text{Lon}) = P_{r6}(\text{Lat}, \text{Lon}) \left\{ 1 - e^{-0,0079 \left[\frac{M_s(\text{Lat}, \text{Lon})}{P_{r6}(\text{Lat}, \text{Lon})} \right]} \right\} \quad (3.8g)$$

$$M_c = \beta M_T \quad (3.8h)$$

$$M_s = (1 - \beta) M_T \quad (3.8i)$$

Donde pr_6 es la probabilidad de que llueva en un período de 6 horas, M_t es la cantidad de lluvia anual medida (mm) y β la relación de la cantidad de lluvia convectiva con respecto a la cantidad de lluvia total. Estos parámetros se extraen de los cuatro puntos más cercanos, en latitud y longitud a las coordenadas geográficas de la localidad deseada, utilizando la base de datos del ECMWF.

El procedimiento descrito en el Anexo 1 de [7] utiliza el software “Modelo para obtener la intensidad de lluvia rebasada para una probabilidad porcentual determinada del año medio y en un emplazamiento dado”, implementado en Matlab, pudiéndose convertir con este software las distribuciones acumulativas de tasas de precipitación obtenidas con tiempos de integración entre 5 y 60 minutos, a distribución acumulativa de tasa de precipitación para un tiempo de resolución de 1 minuto. El método requiere como datos de partida las distribuciones acumulativas y el tiempo de integración de las estadísticas del índice de precipitación de la fuente, así como las coordenadas geográficas de la localidad de interés, en este caso las ciudades de Guayaquil y Quito.

Aplicación del procedimiento descrito en [7] para la ciudad de Guayaquil:

Para aplicar este algoritmo se ingresaron diferentes valores de porcentajes de tiempo, y sus correspondientes tasas de precipitación, para tiempos de integración de 60 minutos, y se ingresaron las coordenadas geográficas de la ciudad de Guayaquil:

Latitud (grados):2.173491 y longitud (grados):79.918094

Figura3.17. Software de implementación de la Recomendación ITU-R P. 837-6 Anexo 3

En la Figura 3.18 se observan los resultados obtenidos al ingresar los parámetros de porcentajes de tiempo y tasas de precipitación medidos con un tiempo de resolución de 1 hora para la ciudad de Guayaquil, correspondiente a los años 2012 a 2014.

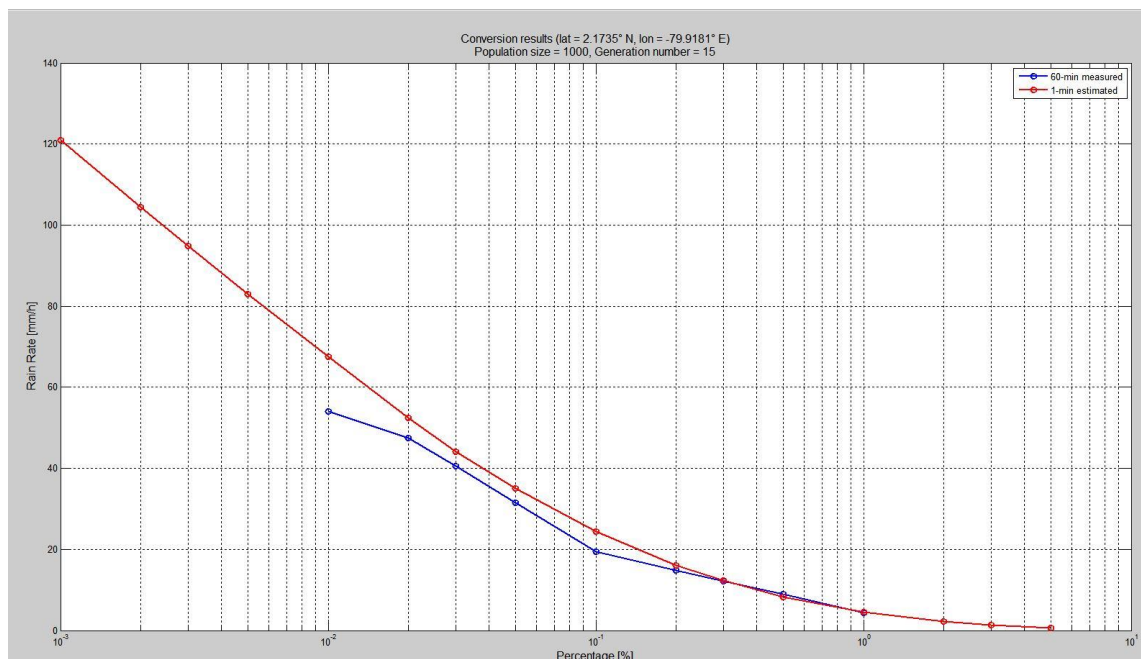


Figura 3.18. Comparación entre la distribución acumulativa con tiempos de integración de 1 hora (medidos) y 1 minuto (Recomendación ITU –R P.837-6), Guayaquil Años 2012 a 2014

CAPÍTULO 4

4. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN SATELITAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se aplican las distribuciones acumulativas de tasas de precipitación de Guayaquil y Quito con tiempo de integración de 1 minuto obtenidas en el capítulo anterior para estimar la atenuación por lluvia en el enlace de comunicación satelital utilizando la Recomendación ITU-R P.618-12, para evaluar el impacto de esta impacto de la atenuación en el rendimiento de enlaces satelitales propuestos para ambas ciudades. Se evalúa también la influencia que tienen la frecuencia de operación, la polarización de la señal, el ángulo de elevación de la estación terrena y la altura de la misma sobre el nivel del mar, en el rendimiento.

4.1 Descripción de los procedimientos y de los métodos usados para evaluar el rendimiento del enlace.

El rendimiento de un sistema de comunicación satelital está determinado principalmente por fenómenos atmosféricos, entre estos el factor más importante para el cálculo de la disponibilidad de un enlace, es la lluvia, por ello esta evaluación se realizará en términos de la relación portadora-ruido (C/N, Carrier to Noise) en el sistema receptor del enlace, en condiciones de cielo claro y en presencia de lluvia.

Primeramente se estimará la atenuación debido a la lluvia a partir de las distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1 minuto, utilizando la Recomendación ITU-R P.618-12 procedimiento que se describe a continuación. Las tasas de precipitación de 1 minuto han sido estimadas por los modelos: *Matemático de Matricciani* y *Recomendación ITU-R P.837-6*. Luego esto se implementará uno de los algoritmos clásico de cálculo de enlace de sistemas satelitales para determinar la relación C/N.

Estimación de la atenuación por lluvia

En la Figura 4.1, se presenta el diagrama del trayecto tierra-espacio, para la aplicación de la Recomendación ITU-R P-618-12.

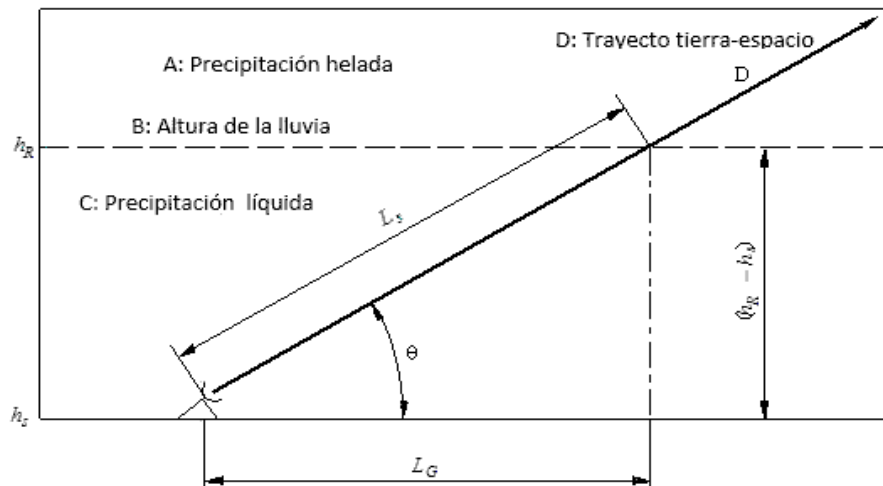


Figura 4.1. Representación de un trayecto Tierra-espacio con indicación de los parámetros que se utilizarán en el proceso de predicción de la atenuación [2]

Donde:

- h_s : es la altura media sobre el nivel del mar de la estación terrena
- θ : se refiere al ángulo de elevación de la estación terrena,
- h_R : representa la altura media anual de lluvia sobre el nivel medio del mar
- L_s : es la longitud del trayecto inclinado
- L_G : es la proyección horizontal.

EL método presentado en la Recomendación se resume en diez pasos:

Paso 1: Cálculo de la altura efectiva de la lluvia.

La altura h_R se determina usando la Recomendación ITU-R P.839-4 [30]. Esta altura está referida a la localidad donde está ubicada la estación terrena y está dada por:

$$h_R = h_0 + 0,36 \quad (\text{km}) \quad (4.1)$$

Donde h_0 es la altura media la isoterma de 0°C en relación a la localidad de la estación terrena. Esta altura depende de las coordenadas geográficas de la localidad y está indicada en la Recomendación ITU-R P.839-4 [30].

Paso 2: Cálculo de la longitud del trayecto oblicuo L_s en el espacio correspondiente a la altura de lluvia

L_s depende de la elevación:

$$L_s = \begin{cases} \frac{2(h_R - h_s)}{\sqrt{(\text{sen}\theta)^2 + \frac{2(h_R - h_s)}{R_E} + \text{sen}\theta}}, & \text{para } \theta > 5^\circ \\ \frac{h_R - h_s}{\text{sen}\theta}, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (\text{km}) \quad (4.2)$$

Donde R_E es el radio efectivo de la Tierra igual a 8500 km.

Paso 3: Cálculo de la Se calcula la proyección horizontal L_G :

$$L_G = L_s \cos\theta \quad (\text{km}) \quad (4.3)$$

Paso 4: Se obtiene la tasa de precipitación para el 0,01% del tiempo en un año promedio (con un tiempo de integración de 1 minuto)

Es decir se obtiene $R_{0,01}$, para un tiempo de integración de un 1 minuto. Este parámetro debería ser obtenido preferiblemente a partir de mediciones de la tasa de precipitación correspondientes a la localidad en el que se encuentra la estación terrena. En caso de no contar con mediciones locales, se puede recurrir a la base de datos y mapas pluviométricos de tasas de precipitación, de la Recomendación ITU-R P.837-6 [4].

Paso 5: Calcular la atenuación específica debido a la lluvia empleando los coeficientes la Recomendación . ITU-R P.838.3 y al 0,01% del año.

$$\gamma_{0,01} = k R_{0,01}^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (4.4)$$

Donde, k y α son los coeficientes dados por la Recomendación ITU-R P.838-3 [8], los cuales varían con la frecuencia de operación y el tipo de polarización de la señal.

Paso 6: Se determina el factor de reducción horizontal $r_{0,01}$, para el 0,01% del tiempo:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 - 0,38(1 - e^{-2L_G}) + \sqrt{\frac{L_G \gamma_{0,01}}{f}}} \quad (4.5)$$

Donde f es la frecuencia de operación del sistema.

Paso 7: Cálculo del factor de reducción vertical, $v_{0,01}$, para el 0,01% del tiempo:

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\text{sen}\theta} \left[31 \left(1 - e^{-\frac{\theta}{1+\chi}} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_{0,01}}{f} - 0,45} \right]} \quad (\text{grados}) \quad (4.6a)$$

Donde:

$$\chi = \begin{cases} 36 - |\varphi|, & \text{para } |\varphi| < 36^\circ \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (\text{grados}) \quad (4.6b)$$

$$L_R = \begin{cases} \frac{r_{0,01} L_G}{\cos\theta}, & \text{para } \zeta > \theta \\ \frac{h_R - h_S}{\text{sen}\theta}, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (\text{km}) \quad (4.6c)$$

$$\zeta = \arctan\left(\frac{h_R - h_S}{r_{0,01} L_G}\right) \quad (\text{grados}) \quad (4.6d)$$

φ = latitud de la estación terrena

Paso 8: Cálculo de la longitud de trayecto efectiva, L_E ,

$$L_E = L_R v_{0,01} \quad (\text{km}) \quad (4.7)$$

Paso 9: Cálculo de la atenuación, $A_{0,01}$, excedida para el 0,01% del tiempo de un año promedio:

$$A_{0,01} = \gamma_{0,01} L_E \quad (\text{dB}) \quad (4.8)$$

Paso 10.: Interpolación (ó extrapolación) a otros porcentajes de tiempo p , en el margen del 0.001% al 5%:

La atenuación por lluvia, A_p , excedida para otros porcentajes de tiempo ($p\%$), en el rango de 0,001% a 5%, es función de la atenuación, $A_{0,01}$, excedida para el 0,01% del tiempo:

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-[0,655 + 0,033 \ln(p) - 0,045 \ln A_{0,01} - \beta(1-p) \text{sen}\theta]} \quad (\text{dB}) \quad (4.9)$$

Donde:

$$\beta = \begin{cases} 0, & \text{si } p \geq 1\% \text{ ó } |\varphi| \geq 36^\circ \\ -0,005(|\varphi| - 36), & \text{si } p < 1\% \text{ y } |\varphi| < 36^\circ \text{ y } \theta \geq 25^\circ \\ -005(|\varphi| - 36) + 1,8 - 4,25 \text{ sen}\theta, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (4.10)$$

En el anexo A se presenta el código Matlab para este cálculo.

Cálculo de la relación C/N

Para calcular la relación C/N en un sistema de comunicación satelital, se debe considerar ambos sentidos de enlace, es decir, descendente o de bajada y ascendente o de subida.

a) Relación C/N en enlace ascendente

Para el enlace de subida la relación C/N es dada por [20]:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{subida}} = \text{PIRE}_{\text{sub}} - L_{S\text{Propagacion}} + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{sat}} - 10 \log k - 10 \log B \quad (\text{dB Hz}) \quad (4.11)$$

Donde:

PIRE_{sub} = Potencia isotrópica radiada efectiva desde la estación terrena (dBW)

$L_{S\text{Propagacion}}$ = Pérdidas de la señal en el trayecto de subida (dB)

$(G/T)_{\text{sat}}$ = Figura de mérito del satélite (dBi K⁻¹)

$G = G_{\text{sat}}$ = Ganancia del sistema receptor del satélite (dB)

$T = T_{\text{sat}}$ = Temperatura de ruido en el sistema receptor del satélite (K^o)

k = Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K^o

B = Ancho de banda del canal (Hz)

La PIRE se determina a partir de:

$$\text{PIRE}_{\text{subida}} = 10 \log P_{T\text{et}} + G_{\text{etmax}} - \text{BO}_{\text{et}} - L_{T\text{et}} - L_{\alpha\text{sub}} \quad (4.12)$$

Donde:

$P_{T\text{et}}$ = Potencia de transmisión del HPA (*High Power Amplifier*) de la estación terrena (dBW)

G_{etmax} = Ganancia de la antena de la estación terrena en la dirección de máxima radiación (dBi)

BO_{et} = *Backoff* en el HPA de la estación terrena (dB)

$L_{T_{et}}$ = Pérdida en la línea de transmisión en la estación terrena (dB)

$L_{\alpha_{sub}}$ = Pérdida por desapuntamiento, referida a la dirección de máxima radiación de la antena de la estación terrena (dB)

La ganancia, G , de una antena parabólica en la dirección de máxima radiación se puede determinar mediante [21].

$$G = 10 \log \left[\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (4.13)$$

Donde η es la eficiencia de la antena de la estación terrena, D se refiere al diámetro del plato de la parábola (m) de la antena de la estación terrena y λ representa la longitud de onda de la señal (m) correspondiente al enlace de subida.

A su vez, la pérdida por desapuntamiento, que se basa en la Figura 4.2, se calcula a partir de [21]:

$$L_{\alpha_{sub}} = 12 \left(\frac{\alpha_{sub}}{\theta_{3dB_{et}}} \right)^2 \quad (4.14)$$

Donde:

α_{sub} = Ángulo de desviación medido en relación a la dirección de máxima radiación de la antena de la estación terrena (es igual a cero cuando no hay desapuntamiento).

$\theta_{3dB_{et}}$ = Ancho del haz de la antena de la estación terrena (medido entre los puntos de media potencia o 3 dB).

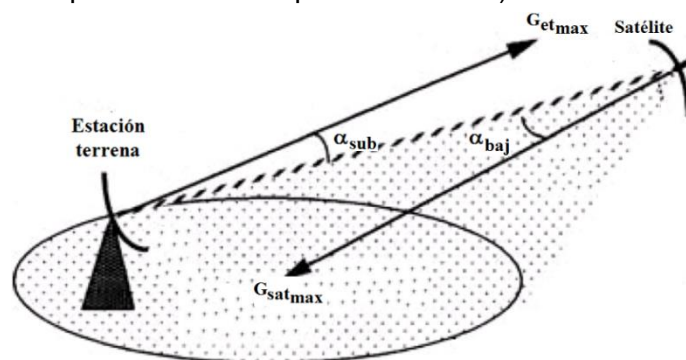


Figura 4.2. Geometría para el cálculo de la pérdida por desapuntamiento.

En la Figura 4.2, $G_{\text{sat}_{\text{max}}}$ se refiere a la ganancia de la antena del satélite en la dirección de máxima radiación (dBi) y α_{baj} es el ángulo de desviación medido en relación a la dirección de máxima radiación de la antena del satélite (es igual a cero cuando no hay desapuntamiento).

En general, el ancho del haz de una antena parabólica es dado por [20,21]:

$$\theta_{3\text{dB}} \simeq 70 \left(\frac{\lambda}{D} \right) \quad (4.15)$$

Por su parte, la ganancia del sistema receptor del satélite, G_{sat} , se determina a partir de [20,21]:

$$G_{\text{sat}} = G_{\text{sat}_{\text{max}}} - L_{T_{\text{sat}}} - L_{\alpha_{\text{baj}}} - L_{\text{pol}_{\text{sat}}} \quad (4.16)$$

Donde $L_{T_{\text{sat}}}$ es la pérdida, en dB, en la línea de transmisión en el satélite y $L_{\text{pol}_{\text{sat}}}$ se refiere a la pérdida, en dB, debido a la no alineación del plano de polarización de la antena del satélite con el plano que contiene la onda incidente.

En relación a la temperatura de ruido, T_{sat} , en el sistema receptor del satélite está dada por [20,21]:

$$T_{\text{sat}} = \frac{T_{\text{ant}_{\text{sat}}}}{L_{T_{\text{sat}}}} + T_{T_{\text{sat}}} \left(1 - \frac{1}{L_{T_{\text{sat}}}} \right) + T_{\text{LNA}_{\text{sat}}} \quad (4.17)$$

Donde:

$T_{\text{ant}_{\text{sat}}}$ = Temperatura de ruido de la antena del satélite (°K)

$T_{T_{\text{sat}}}$ = Temperatura termodinámica asociada a la línea de transmisión en el satélite (°K). Generalmente, considerada igual a 290 °K

$T_{\text{LNA}_{\text{sat}}}$ = Temperatura de ruido del amplificador de bajo ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*) del satélite (°K)

En la ecuación (4.7) todos los parámetros están expresados en unidades lineales.

La temperatura $T_{\text{ant}_{\text{sat}}}$ suele considerarse igual a 290 °K, aunque ella varía dependiendo de la localidad, mientras que la temperatura $T_{\text{LNA}_{\text{sat}}}$ se calcula como sigue:

$$T_{\text{LNA}_{\text{sat}}} = (F_{\text{sat}} - 1)T_0 \quad (4.18)$$

Donde F_{sat} representa la figura de ruido del receptor del satélite y T_o es la temperatura ambiente en el satélite (igual a 290 °K).

Por su parte, la pérdida de señal, $L_{\text{SPropagacion}}$, es dada por:

$$L_{\text{SPropagacion}} = L_{\text{el}} + A_{\text{ll}} + L_{\text{aa}} \quad (4.19)$$

Donde L_{el} es la pérdida en espacio libre, A_{ll} representa la atenuación por lluvia (en este trabajo, estimada mediante la Recomendación ITU-R P.618-12) y L_{aa} se refiere a la pérdida por absorción atmosférica.

La pérdida por espacio libre, en dB, se calculan a partir [32]:

$$L_{\text{el}} = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (4.20)$$

Donde f es la frecuencia del enlace de subida y d es la longitud del enlace estación terrena-satélite.

Las pérdidas por absorción atmosférica, en dB, que es debido a la absorción en el vapor de agua y oxígeno, son dadas por [20,21]:

$$L_{\text{aa}} = L_{\text{zenit}} \text{cosec}(\theta) \quad (4.21)$$

Donde L_{zenit} representa la pérdida por absorción debido al vapor de agua y oxígeno, en la dirección del zenit¹ y se determina mediante [20,21]:

$$L_{\text{zenit}} = \gamma_g d \quad (4.22)$$

Donde γ_g es la atenuación específica total por gases atmosféricos, obtenida mediante la Figura 4.3.

b) Relación C/N en enlace descendente

En el enlace de bajada, la relación C/N se calcula mediante:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{bajada}} = \text{PIRE}_{\text{baj}} - L_{\text{BPropagacion}} + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{et}} - 10 \log k - 10 \log B \quad (\text{dB Hz}) \quad (4.23)$$

Donde:

¹ Corresponde a un ángulo de elevación de 90° en la antena de la estación terrena, es decir, es la dirección de incidencia vertical en la Tierra desde el firmamento

$PIRE_{baj}$ = Potencia isotrópica radiada efectiva desde el satélite (dBW)

$L_{BPropagacion}$ = Pérdidas de la señal en el trayecto de bajada (dB)

$(G/T)_{et}$ = Figura de mérito de la estación terrena (dBi K⁻¹)

$G = G_{et}$ = Ganancia del sistema receptor de la estación terrena (dB)

$T = T_{et}$ = Temperatura de ruido en el sistema receptor de la estación terrena (K°)

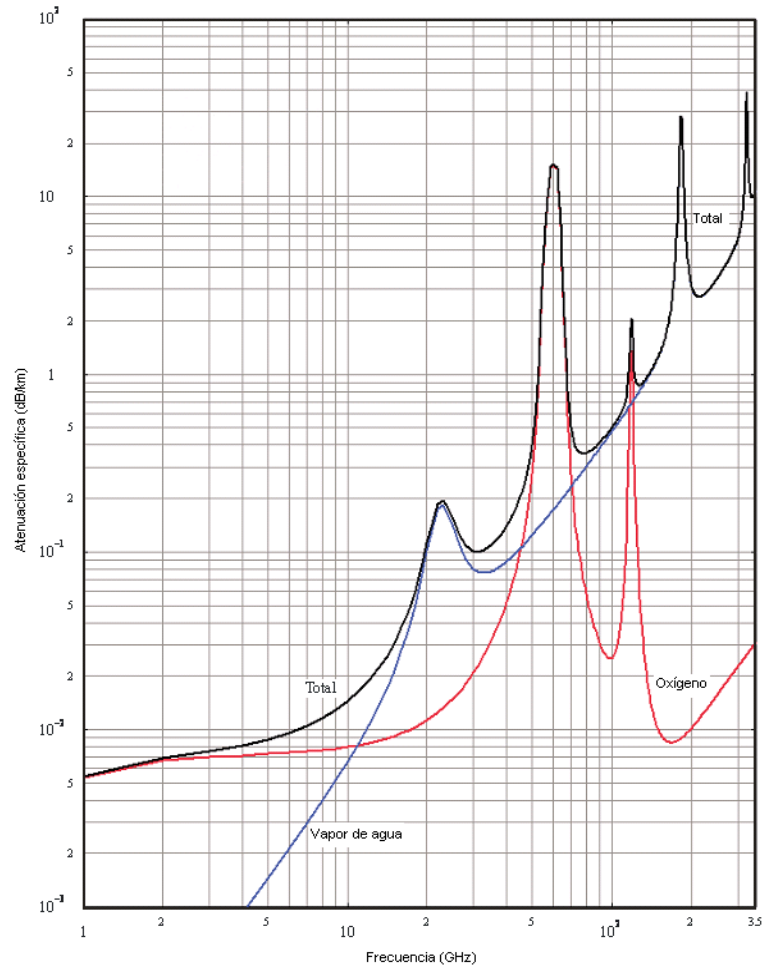


Figura 4.3. Atenuación específica debida a gases atmosféricos (en dirección al zenit).

En este caso, la PIRE es dada por:

$$PIRE_{baja} = 10 \log P_{Tsat} + G_{sat,max} - BO_{sat} - L_{Tsat} - L_{\alpha,baj} \quad (4.24)$$

Donde P_{Tsat} es la potencia de transmisión, en dBW, del HPA del satélite (dBW) y

BO_{sat} es el *backoff* en el HPA del satélite (dB).

La pérdida por desapuntamiento en el enlace de bajada, basada también en la geometría mostrada en la Figura 4.2, se determina mediante [20,21]:

$$L_{\alpha_{\text{baj}}} = 12 \left(\frac{\alpha_{\text{baj}}}{\theta_{3\text{dB}_{\text{sat}}}} \right)^2 \quad (4.25)$$

Donde $\theta_{3\text{dB}_{\text{sat}}}$ es el ancho del haz de la antena del satélite (medido entre los puntos de media potencia o 3 dB), y la ganancia del sistema receptor de la estación terrena, G_{et} , es dada por [20,21]:

$$G_{\text{et}} = G_{\text{et}_{\text{max}}} - L_{T_{\text{et}}} - L_{\alpha_{\text{sub}}} - L_{\text{pol}_{\text{et}}} \quad (4.26)$$

Donde $L_{\text{pol}_{\text{et}}}$ es la misma $L_{\text{pol}_{\text{sat}}}$.

La temperatura de ruido, T_{et} , en el sistema receptor de la estación terrena se calcula a partir de [20,21]:

$$T_{\text{sat}} = \frac{T_{\text{ant}_{\text{et}}}}{L_{T_{\text{et}}}} + T_{T_{\text{et}}} \left(1 - \frac{1}{L_{T_{\text{et}}}} \right) + T_{\text{LNA}_{\text{et}}} \quad (4.27)$$

Donde:

$T_{\text{ant}_{\text{et}}}$ = Temperatura de ruido de la antena de la estación terrena (°K)

$T_{T_{\text{et}}}$ = Temperatura termodinámica asociada a la línea de transmisión en la estación terrena (°K). Generalmente, considerada igual a 290 °K

$T_{\text{LNA}_{\text{et}}}$ = Temperatura de ruido del amplificador de bajo ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*) de la estación terrena (°K)

La temperatura $T_{\text{LNA}_{\text{et}}}$ se determina mediante:

$$T_{\text{LNA}_{\text{et}}} = (F_{\text{et}} - 1)T_0 \quad (4.28)$$

Donde F_{et} se refiere a la figura de ruido del receptor de la estación terrena y T_0 es la temperatura ambiente en la estación terrena, también igual a 290 °K.

El cálculo de la temperatura $T_{\text{ant}_{\text{et}}}$ dependerá de si se considera la propagación en cielo claro o en situación de lluvia. Si es condiciones de ausencia de lluvia, la temperatura está dada por [20,21]:

$$T_{\text{ant}_{\text{et}}} = T_{\text{C}} + T_{\text{ST}} \quad (4.29)$$

Donde T_c es la temperatura de ruido debido al cielo claro ($^{\circ}\text{K}$) y T_{ST} representa la temperatura de ruido debido a la superficie terrestre ($^{\circ}\text{K}$) (generalmente, es un dato suministrado).

La temperatura T_c de la frecuencia de operación del enlace de bajada y del ángulo de elevación de la antena de la estación terrena, y se obtiene a partir de la Figura 4.4 [31]:

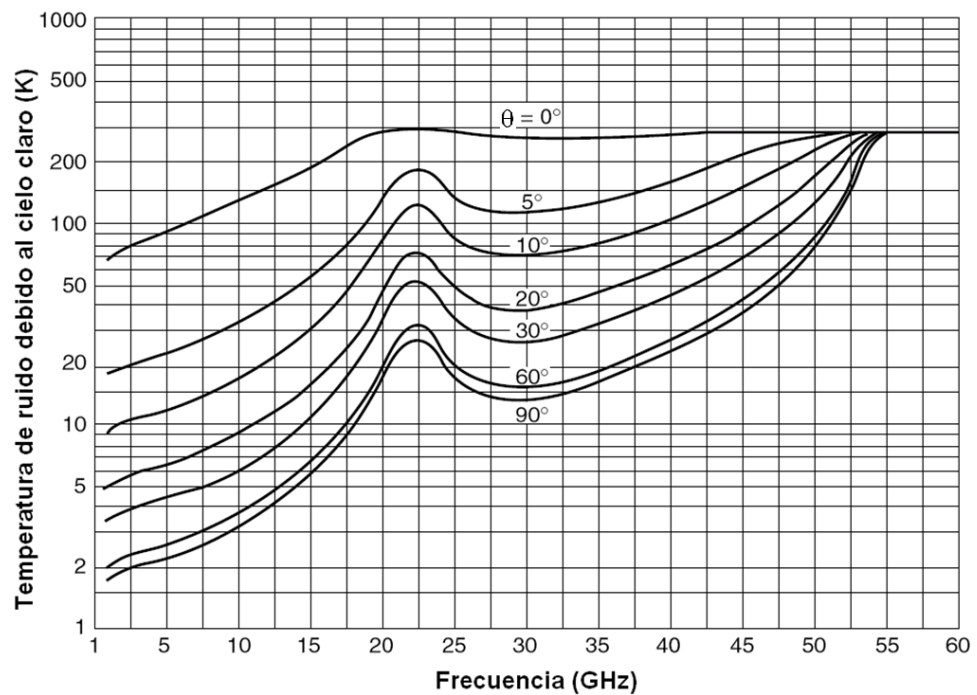


Figura 4.4. Temperatura de ruido debido al cielo claro (T_c).

En condición de propagación en presencia de lluvia, la T_{antet} obedece a esquema mostrado en la Figura 4.5 y es dada por [21]:

$$T_{antet} = \frac{T_c}{A_{ll}} + \frac{T_m}{\left(1 - \frac{1}{A_{ll}}\right)} + T_{ST} \quad (4.30)$$

Donde T_m representa la temperatura termodinámica media, en $^{\circ}\text{K}$, de las formaciones meteorológicas (lluvia, nubes, etc.).

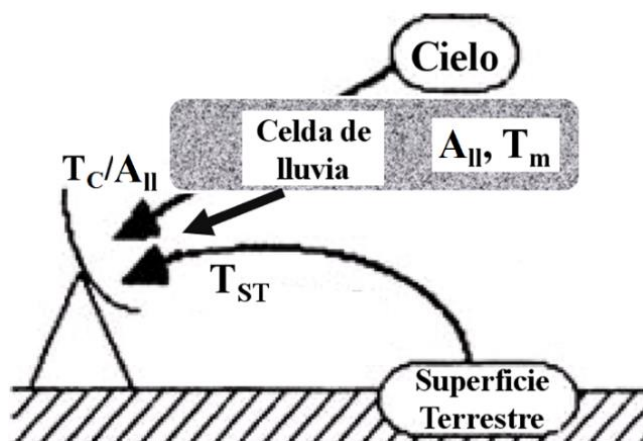


Figura 4.5. Esquema para el cálculo de la temperatura de ruido de la antena de la estación terrena, en presencia de lluvia.

De acuerdo a la ecuación (4.30), la atenuación por lluvia, disminuye el nivel de potencia de la señal recibida y el área de cobertura del sistema, teniendo una incidencia directa en el desempeño o rendimiento del mismo.

4.2 Resultados obtenidos y contribuciones. El efecto de frecuencia, elevación, altura sobre la tierra, polarización

Estimación de la atenuación por lluvia en Guayaquil y Quito

Aplicando la Recomendación ITU-RP.618-12 se obtiene la distribución acumulativa estimada de la atenuación por lluvia en enlaces satelitales de estaciones terrenas de las ciudades de Guayaquil y Quito, considerando la distribución acumulativa de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1 minuto obtenida con el modelo matemático de Matricciani.

Se detallan los parámetros del enlace de comunicación vía satélite considerado para Guayaquil:

- Latitud de la estación terrena = 2,173491° Norte
- Longitud de la estación terrena = 79,918094° Oeste
- Altura sobre el nivel del mar de la estación terrena = 68 m
- Satélite: Galaxy 17 (G-17)
 - Latitud del satélite = 0° (por ser un satélite geoestacionario)
 - Longitud del satélite = 91° Oeste

- Altura $h_o = 4,5$ m (extraída de [99])
- Frecuencia de operación = 12,15 GHz (enlace descendente)
- Polarización = Vertical
- $R_{0,01} = 57.2$ mm/hr (obtenida por el modelo matemático de Matricciani para el periodo 2012-2014)

Los resultados obtenidos de la distribución acumulativa de la atenuación por lluvia en función del porcentaje de tiempo, para la ciudad de Guayaquil se muestran en la Figura 4.6, en la que se utilizaron las estadísticas de lluvia para tiempo de resolución de 1 minuto estimadas por el modelo matemático de Matricciani. Se observa que, la atenuación por lluvia presenta un comportamiento similar al de la tasa de precipitación, ya que los mayores valores de atenuación ocurren para los menores porcentajes de tiempo. Esto significa que para enlaces en los que su porcentaje de disponibilidad es mayor, es decir, enlaces disponibles más tiempo en el año, el costo en términos de cobertura o de deterioro de la relación portadora-ruido (C/N) o de la BER (*Bit Error Rate*) será mayor, al tenerse mayor atenuación.

Algunos valores concretos de la atenuación debido a la lluvia observados en la Figura 4.6 son 69,75 dB para 0,001%, 11,88 dB para 0,01%, 2,87 dB para 0,1% y 0,97 dB para 1%.

En la Figura 4.7 se muestra la atenuación por lluvia en función del porcentaje de tiempo para Guayaquil, empleando la distribución acumulativa de la tasa de precipitación medida con un tiempo de integración de 1 hora, obtenida en la sección 3.2, para el periodo 2012-2014, la cual fue 52,14 mm/h.

En las Figuras 4.6 y 4.7, se puede observar la diferencia de valores de las distribuciones acumulativas de la atenuación por lluvia según el tiempo de integración considerado (en la Figura 4.7, la atenuación es 65,64 dB para 0,001%, 11,10 dB para 0,01%, 2,66 dB para 0,1% y 0,90 dB para 1%), lo cual permite comprobar la afirmación de que el hecho de no considerar las estadísticas de lluvia para el tiempo de resolución de 1 minuto exigido para la ITU, generará errores en la estimación de la atenuación, lo que podría ocasionar en un subdimensionamiento del enlace, toda vez que las atenuaciones obtenidas con

el tiempo de integración de 1 hora resultaron menores a las obtenidas con el tiempo de resolución de 1 minuto.

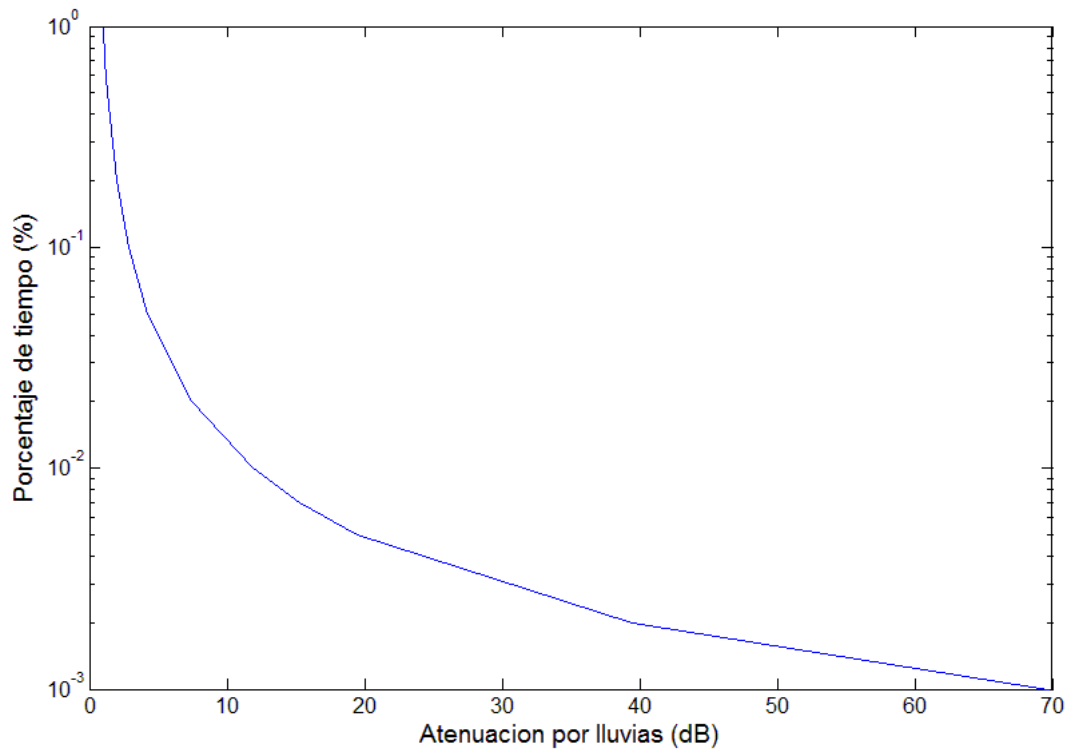


Figura 4.6. Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, con tasa de precipitación estimada por el modelo matemático de Matricciani (1 minuto).

En la Figura 4.8 se ilustra la atenuación por lluvia en Guayaquil estimada considerando la tasa de precipitación medida con un tiempo de integración de 1 minuto en el periodo 2012-2014, es decir, 74,7 mm/h. Algunos de los valores observados de la atenuación son: 87,71 dB para 0,001%, 14,37 dB para 0,01%, 3,54 dB para 0,1% y 1,22 dB para 1%.

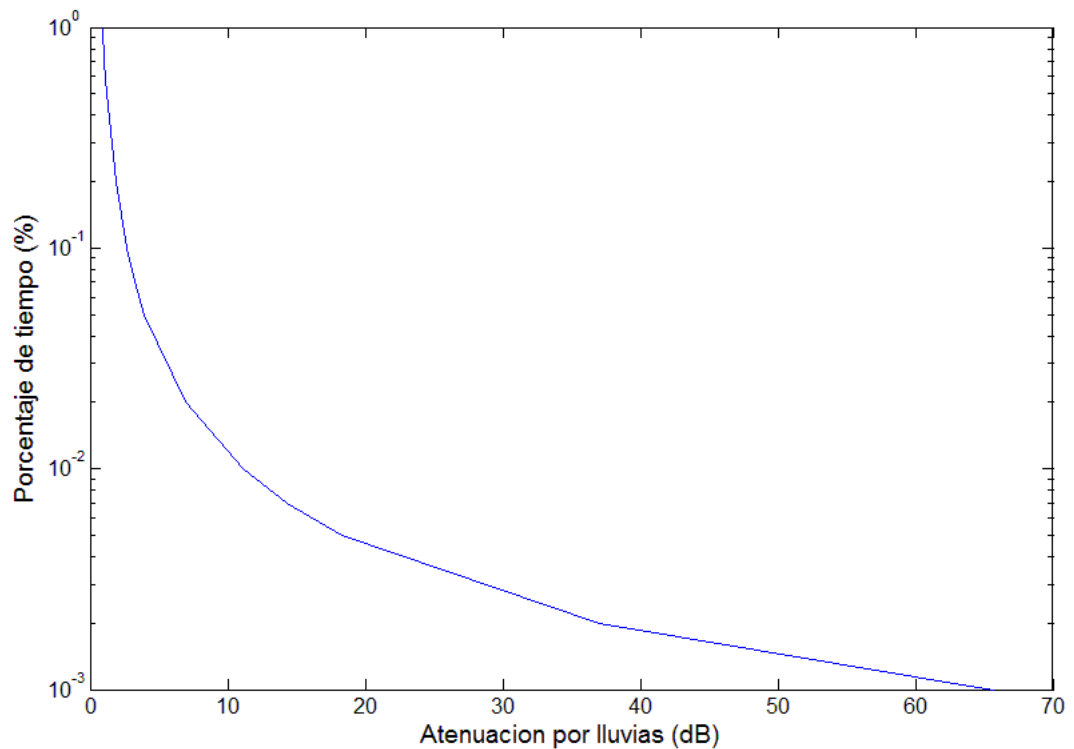


Figura 4.7. Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, con tasa de precipitación medida con tiempo de integración de 1-hora.

Como puede observarse en las Figuras 4.6 y 4.8, los valores de la atenuación por lluvia estimada en la aplicación del modelo matemático de Matricciani para un tiempo de resolución de 1 minuto, en Guayaquil, son menores que los valores de atenuación obtenidos con las estadísticas de lluvia medidas para el mismo tiempo de integración.

Para el caso de la ciudad de Quito, el enlace satelital supuesto presenta los siguientes datos:

- Latitud de la estación terrena = 0,225219° Sur
- Longitud de la estación terrena = 78,5248° Oeste
- Altura sobre el nivel del mar de la estación terrena = 2.908 m
- Satélite: Galaxy 17 (G-17)
- Altura $h_0 = 4,5$ m (extraída de 20)
- Frecuencia de operación = 12,15 GHz (enlace descendente)
- Polarización = Vertical

- $R_{0,01} = 20.37$ mm/h (obtenida de la tasa de precipitación medida, 1 hora, período 2012 a 2014)

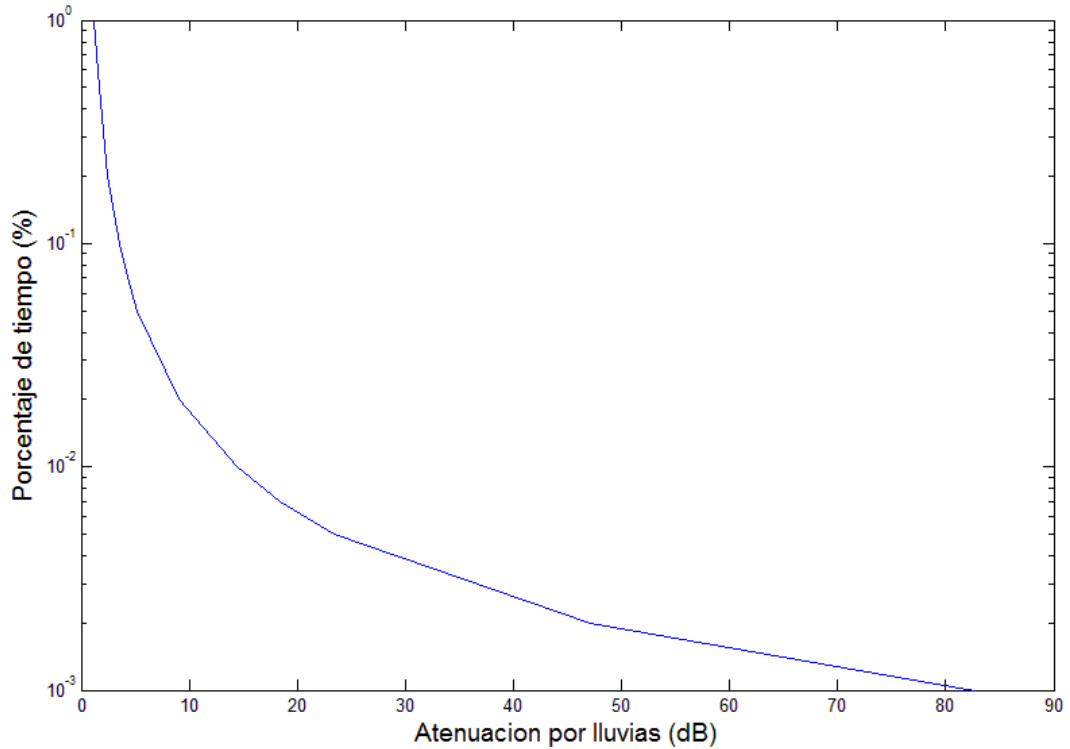


Figura 4.8. Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, con tasa de precipitación medida con tiempo de integración de 1 minuto.

En la Figura 4.9, se observa que los niveles estimados de la atenuación por lluvia (15,07 dB para 0,001%, 2,15 dB para 0,01%, 0,44 dB para 0,1% y 0,12 dB para 1%) en la ciudad de Quito, son menores a los estimados para el caso de Guayaquil, lo que muestra la influencia que tienen, sobre la atenuación por lluvia la localidad en la cual se encuentra la estación terrena, las estadísticas de precipitación propias del local, la altura sobre el nivel del mar de la estación terrena y el ángulo de elevación del enlace.

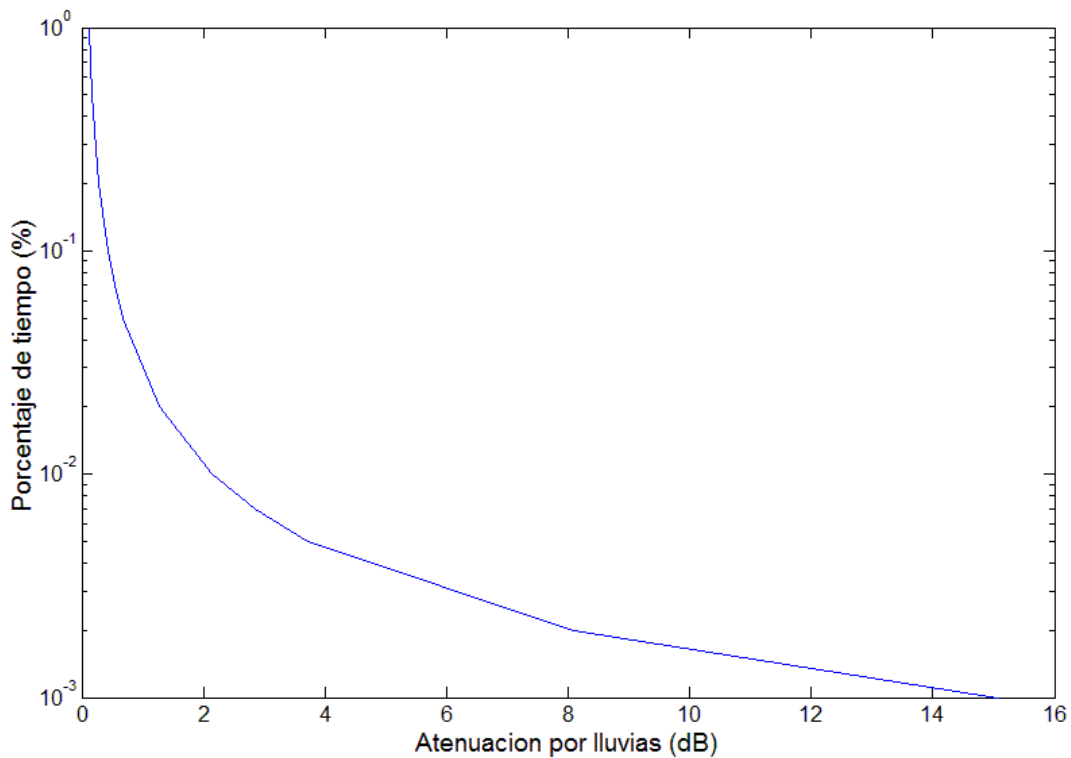


Figura 4.9. Atenuación por lluvia estimada en Quito, con tasa de precipitación medida con tiempo de integración de 1 minuto.

Cálculo de la relación portadora-ruido (C/N) en Guayaquil y Quito

El cálculo de la la relación C/N se encuentra descrito en la sección 4.1, con la implementación de las ecuaciones presentadas en este procedimiento de cálculo, se evalúa el impacto de la atenuación por lluvia en la métrica de rendimiento de las ciudades de Guayaquil y Quito. Para ambas localidades, los valores para los parámetros requeridos para la aplicación del procedimiento indicado en la sección 4.1 se detallan en las Tablas 1, 2 y 3, las mismas que representan valores de propagación referenciales y genéricos [20,21,22,33].

En primer lugar, se considera *la propagación en cielo claro* para el caso de Guayaquil, se asume la misma ubicación supuesta para la estación terrena cuando se estimó la atenuación por lluvia. Asimismo, se considera la misma ubicación para el satélite que fue asumida para dicha estimación y la distribución acumulativa de la tasa de precipitación medida con tiempo de integración de 1 minuto, año 2013, según la cual $R_{0.01}$ es igual a 69,26 dB.

Parámetro	Valor
Frecuencia enlace ascendente (GHz)	14
Frecuencia enlace descendente (GHz)	12,15
Temperatura ambiente en la estación terrena, T_o (°K)	290
Temperatura ambiente en el satélite, T_o (°K)	290
Temperatura termodinámica media, T_m (oK)	176
Distancia estación terrena-satélite (km)	35.900
Ángulo de elevación, θ (grados)	10
Temperatura de ruido debido a la superficie terrestre, T_s	45
Temperatura de ruido debido al cielo claro, T_c (°K)	20

Tabla 1. Parámetros generales propuestos para el cálculo de la relación C/N (Guayaquil)

Parámetro	Valor
Potencia del transmisor (W)	100
Pérdidas en la línea de transmisión (dB)	0,50
Diámetro de la antena (m)	4
Eficiencia de la antena	0,60
Ángulo de desapuntamiento (grados)	0,10
Figura de ruido del receptor (dB)	1
Pérdidas de polarización (dB)	0
Backoff del HPA (dB)	0

Tabla 2. Parámetros propuestos de la estación terrena, para el cálculo de la relación C/N (Guayaquil)

Parámetro	Valor
Potencia del transmisor (W)	10
Pérdidas en la línea de transmisión (dB)	1
Diámetro de la antena (m)	0,75
Eficiencia de la antena	0,55
Ángulo de desapuntamiento (grados)	1
Figura de ruido del receptor (dB)	3
Pérdidas de polarización (dB)	0
Backoff del HPA (dB)	0

Tabla 3. Parámetros del satélite propuestos para el cálculo de la relación C/N (Guayaquil)

- **Cálculo de la relación C/N (Guayaquil) con cielo claro**

Enlace ascendente

Considerando un ancho de banda del canal de 54 MHz y aplicando las ecuaciones del procedimiento descrito en la sección 4.1 y en el Anexo B, para el cálculo de la relación portadora-ruido en el enlace de subida (C/N) se obtiene:

$$G_{\text{sat}_{\text{max}}} = 38,23 \text{ dBi}$$

$$L_{\alpha_{\text{baj}}} = 3 \text{ dB}$$

$$G_{\text{sat}} = 34,23 \text{ dB}$$

$$T_{\text{LNA}_{\text{sat}}} = 288,63 \text{ °K}$$

$$T_{\text{sat}} = 27,62 \text{ dB °K}$$

$$(G/T)_{\text{sat}} = 6,60 \text{ dB}$$

$$G_{\text{et}_{\text{max}}} = 53,15 \text{ dBi}$$

$$L_{\alpha_{\text{sub}}} = 0,85 \text{ dB}$$

$$\text{PIRE}_{\text{sub}} = 71,79 \text{ dBW}$$

$$L_{\text{el}} = 206,46 \text{ dB}$$

$$L_{\text{aa}} = 0,13 \text{ dB}$$

$$L_{\text{SPropagacion}} = 206,59 \text{ dB}$$

$$\mathbf{(C/N)_{\text{subida}} = 53,87 \text{ dB}}$$

- **Enlace descendente**

Aplicando nuevamente las ecuaciones de la sección 4.1 con los parámetros propuestos para la estimación de la relación portadora-ruido en el enlace de bajada, (C/N)_{bajada}, se obtiene:

$$G_{\text{et}_{\text{max}}} = 51,91 \text{ dBi}$$

$$L_{\alpha_{\text{sub}}} = 0,64 \text{ dB}$$

$$G_{et} = 50,77 \text{ dB}$$

$$T_{ant_{et}} = 65 \text{ °K}$$

$$T_{LNA_{et}} = 75,09 \text{ °K}$$

$$T_{et} = 22,16 \text{ dB °K}$$

$$(G/T)_{et} = 28,61 \text{ dB}$$

$$L_{\alpha_{baj}} = 3 \text{ dB}$$

$$PIRE_{baj} = 44,23 \text{ dBW}$$

$$L_{el} = 205,23 \text{ dB}$$

$$L_{aa} = 0,13 \text{ dB}$$

$$L_{B_{Propagacion}} = 205,36 \text{ dB}$$

$$(C/N)_{bajada} = 49,54 \text{ dB}$$

Comparando los valores de la relación C/N obtenidos para ambas direcciones del enlace satelital, se observa que la relación es menor para el enlace de bajada, lo cual representa el peor de los casos, pues se trata del valor cercano a la relación C/N del sistema. Por ejemplo, en caso de que la relación C/N del enlace descendente sea menor a la relación C/N del sistema, el mismo no operará satisfactoriamente en la interpretación de la información recibida.

- **Cálculo de la relación C/N (Guayaquil) con presencia de lluvia**

Con la finalidad de evaluar el impacto de la atenuación por lluvia en el sistema satelital propuesto en la ciudad de Guayaquil, se considerará el *enlace descendente*, la estadística de lluvia medida con tiempo de resolución de 1 minuto, el porcentaje de tiempo de 1 % y la polarización vertical de la señal. Los valores obtenidos en este caso son:

$$G_{et_{max}} = 51,91 \text{ dBi}$$

$$L_{\alpha_{sub}} = 0,64 \text{ dB}$$

$$G_{et} = 50,77 \text{ dB}$$

$$T_{\text{ant}_{\text{et}}} = 65 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{\text{LNA}_{\text{et}}} = 75,09 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{\text{et}} = 22,16 \text{ dB }^{\circ}\text{K}$$

$$(G/T)_{\text{et}} = 28,61 \text{ dB}$$

$$L_{\alpha_{\text{baj}}} = 3 \text{ dB}$$

$$\text{PIRE}_{\text{baj}} = 44,23 \text{ dBW}$$

$$L_{\text{el}} = 205,23 \text{ dB}$$

$$L_{\text{aa}} = 0,13 \text{ dB}$$

$$A_{\parallel} = 1,15 \text{ dB (ver Figura 4.8)}$$

$$L_{\text{BPropagacion}} = 206,68 \text{ dB}$$

$$\mathbf{(C/N)_{\text{bajada}} = 41,17 \text{ dB}}$$

De las relaciones C/N obtenidas en el enlace de bajada, en cielo claro y en situación de presencia de lluvia, respectivamente, se puede apreciar que al considerar el efecto de la lluvia en el rendimiento en el sistema de comunicación vía satélite, la relación C/N disminuye a 41,17 dB. Bajo esa circunstancia, si la relación C/N del sistema fuese, por ejemplo, 42 dB, en enlace sería operativo cuando no hay presencia de lluvia en el enlace, pero inoperativo cuando ocurran eventos de lluvia. El deterioro de la relación C/N aumenta a medida que aumenta el valor de la atenuación por lluvia en enlace, tal como se puede observar en la Tabla 4.

Porcentaje de tiempo (%)	A (dB)	C/N (dB)
1	1,15	41,17
0,1	3,34	40,88
0,01	13,76	32,97

Tabla 4: Efecto de la atenuación por lluvia en la relación C/N (Guayaquil)

En relación a la ciudad de Quito, en la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para la relación C/N, en el enlace descendente, tanto en condición de

cielo claro como en situación de presencia de lluvia. Para los cálculos se consideraron los valores de los parámetros asociados a la estación terrena en esta ciudad suministrados en la sección 4.1, así como el satélite Galaxy 17, las estadísticas de lluvia medidas en el año 2014-2016, con tiempo de integración de un minuto, con porcentajes de tiempo de 0,01 %, 0,1 % y 1 % y polarización vertical.

Porcentaje de tiempo (%)	A (dB)	C/N (dB)
Cielo claro	0	49,53
1	0,37	42,97
0,1	1,20	41,24
0,01	5,38	40,43

Tabla 5: Efecto de la atenuación por lluvia en la relación C/N (Quito).

En la Tabla 5, se observa el efecto perjudicial de la atenuación por lluvia en el rendimiento del sistema de comunicación vía satélite, plasmada en la disminución de la relación C/N a medida que la atenuación aumenta.

Efecto de la frecuencia en la atenuación por lluvia y en el rendimiento del sistema de comunicación satelital

Para evaluar la variación de la atenuación por lluvia en función de la frecuencia se recurre al enlace satelital propuesto para la ciudad de Guayaquil con el satélite Galaxy 17, considerando las estadísticas de lluvia medidas con tiempo de muestreo de 1 minuto, en el año 2013. El porcentaje de tiempo se fija en 0,01% y se asume polarización vertical para la señal. Los resultados se muestran en la Figura 4.10. Se aprecia que la atenuación por lluvia se incrementa con el aumento de la frecuencia, lo que lleva a una disminución del nivel de potencia recibida. Esto significa que cuando se implementan sistemas satelitales en frecuencias de operación superiores, se tiene como beneficio para el operador el poder disponer de canales de radio de mayor ancho de banda y, por tanto, poder ofrecer mayores velocidades de transmisión, pero se tiene como inconveniente tener una menor cobertura y una disminución de la relación C/N.

Efecto del ángulo de elevación del enlace satelital en la atenuación por lluvia y en el rendimiento del sistema de comunicación satelital

El efecto del ángulo de elevación del enlace (que va desde la antena de la estación terrena respecto al plano horizontal), en la atenuación por lluvia, se evalúa considerando una misma estación terrena propuesta en la ciudad de Guayaquil y diferentes satélites. La distribución acumulativa de la tasa de precipitación utilizada es la correspondiente a la medida con tiempo de integración de 1 minuto en el año 2013. Se asume una frecuencia de operación de 12,15 GHz, polarización vertical y un porcentaje de tiempo de 0,01%. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 6, en la cual se percibe una mayor atenuación a medida que el ángulo de elevación disminuye, lo cual es debido a que a menor ángulo de elevación mayor es la longitud del trayecto inclinado recorrido por la señal en el enlace. Por lo que se concluye que a medida que el ángulo de elevación se hace menor, menor también será la cobertura del satélite y mayor será el deterioro de la relación C/N.

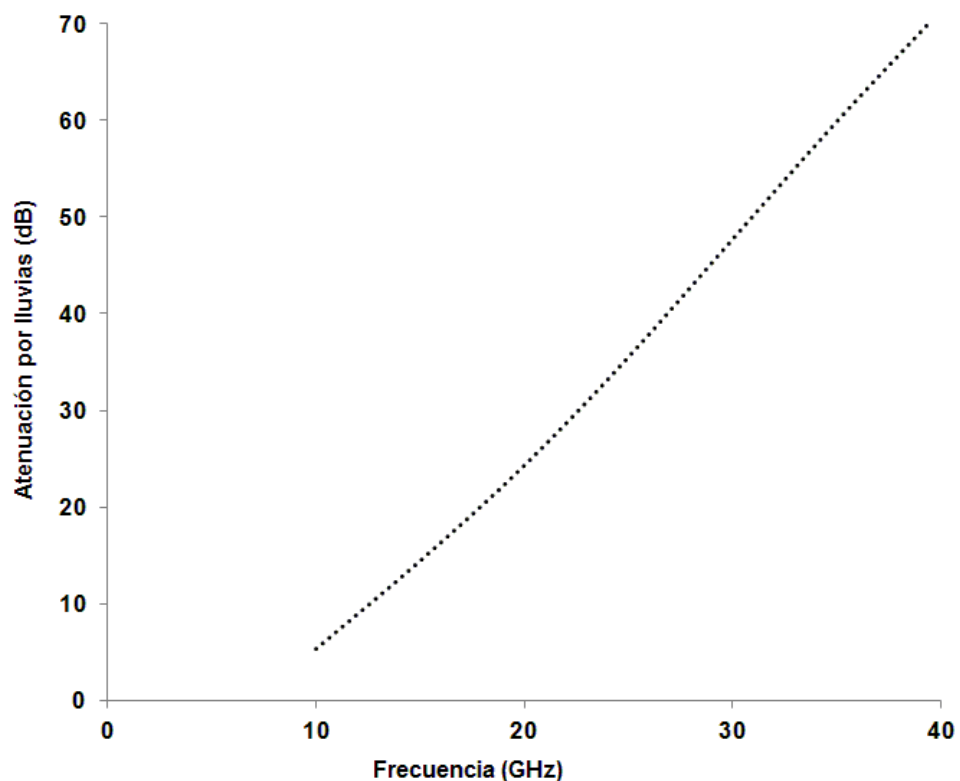


Figura 4.10. Variación de la atenuación por lluvia con la frecuencia.

Satélite	Longitud del satélite (°)	Ángulo de elevación (°)	Atenuación (dB)
Galaxy 19	97 Oeste	69,79	13,66
Galaxy 17	91 Oeste	76,72	13,63
Hispasat 84W-1	83,8 Oeste	84,76	13,36
Simón Bolívar	78 Oeste	86,59	13,18

Tabla 6: Atenuación de lluvia en función del ángulo de elevación del enlace satelital

Efecto de la altura de la estación terrena en la atenuación por lluvia y en el rendimiento del sistema de comunicación satelital

Para la evaluación de la influencia que tiene la altura de la estación terrena en la atenuación por lluvia causada en el enlace satelital, se consideran las estadísticas de lluvia medida correspondiente año 2013 con tiempo de resolución de 1 minuto de la ciudad de Guayaquil, el satélite Galaxy 17, frecuencia de operación en 12,15 GHz, porcentaje de tiempo 0,01%, polarización vertical y una variación hipotética de la altura de la estación terrena sobre una posición geográfica fija de la estación. En la Figura 4.11 se pueden observar los resultados que muestran que la atenuación por lluvia aumenta a medida que la altura disminuye, lo cual se debe a que cuanto menor es la altura mayor es la longitud del trayecto inclinado del enlace, es decir la señal recorre mayor distancia. Por esto se puede mencionar que a menor altura sobre el nivel del mar de la localidad en la que se encuentra la estación terrena, menor será la cobertura del satélite y mayor el deterioro de la relación C/N.

Efecto de polarización de la señal en la atenuación por lluvia y en el rendimiento del sistema de comunicación satelital

El efecto causado por la polarización de la señal en las pérdidas por lluvia y el rendimiento del sistema, se evalúa considerando nuevamente que la estación propuesta está localizada en Guayaquil, el satélite de servicio es el Galaxy 17, operando en 12,15 GHz, la señal polarizada verticalmente, el porcentaje de tiempo igual a 0,01% y tasa de precipitación del año 2013 con tiempo de muestreo de 1 minuto. La atenuación resultante para la polarización horizontal es mayor

(15,85 dB) que cuando se usa polarización vertical (13,76 dB), ese comportamiento se debe a que la sección recta horizontal (desde el punto de vista de la superficie terrestre) de la gota de agua, a medida que la misma cae, es mayor que su sección vertical [14]. Por tanto, cuando la polarización es horizontal, la cobertura y la relación C/N será menor que cuando se emplea polarización vertical.

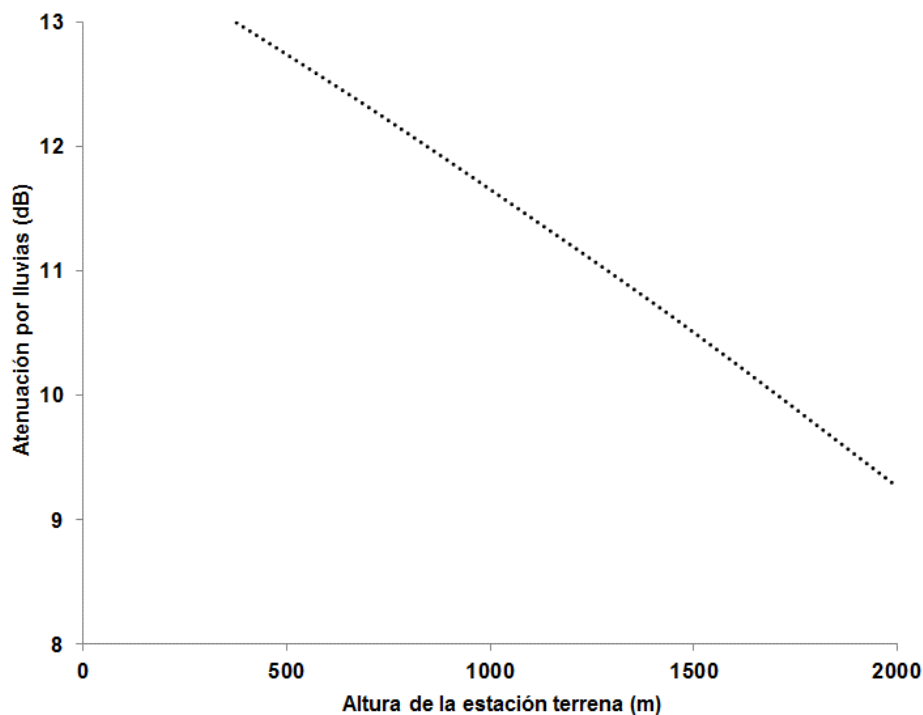


Figura 4.11. Variación de la atenuación por lluvia con la altura de la estación terrena.

Contramedidas para contrarrestar el deterioro del rendimiento del sistema de comunicación satelital debido a la atenuación por lluvia

En la literatura se han reportado investigaciones y resultados de su efecto, acerca de contramedidas que se pueden implementar para contrarrestar el efecto de la atenuación por lluvia en el rendimiento de un sistema de comunicación satelital.

En ese sentido, [22] incorpora diversidad de tiempo para introducir una ganancia en el enlace que contrarresta parte de la atenuación causada por las lluvias. El

propósito de la diversidad de tiempo se basa en el hecho de que cuando se introduce un retardo adecuado entre dos transmisiones de un mismo flujo de datos en el sistema durante la ocurrencia de eventos de lluvia, el receptor puede acumular y utilizar la información asociada a ambos instantes de tiempo para seleccionar la mejor condición de recepción entre ellos. La duración del retardo debe ser tal que se adapte lo mejor posible a las condiciones climáticas, hora del día, variaciones diurnas y nocturnas de la atenuación por lluvia y el cálculo del enlace del sistema. La ganancia es función del tiempo de retardo [22,23] y estadísticamente se define como la diferencia, para un mismo porcentaje de tiempo, de la atenuación por lluvia obtenida de la distribución acumulativa anual de la misma y la atenuación por lluvia extraída de la distribución conjunta relativa al tiempo de retardo.

Otra contramedida que puede ser aplicada para contrarrestar el desvanecimiento causado por la atenuación por lluvia y el consecuente deterioro de la relación C/N es la del control de potencia en enlace de subida (UPC, *Uplink Power Control*), cuyo principio básico de funcionamiento es sencillo, pues consiste en una unidad incorporada a la estación terrena que permite aumentar la potencia de transmisión de la estación cuando la atenuación por lluvia es tal que torna inoperativo la recepción de la señal en el satélite [24]. El aumento de la potencia irradiada hacia el satélite también se puede conseguir aumentando el tamaño de la antena de la estación terrena, y este aumento también contribuye a aumentar el nivel de potencia de potencia recibida en la estación terrena.

Por otra parte, otra de las contramedidas consiste en la aplicación de diversidad de espacio, cuyo objetivo es similar al de la diversidad de tiempo, pero la recepción de la misma señal se hace en 2 o más estaciones terrenas separadas entre sí varios kilómetros, con el fin de disminuir la correlación entre las señales recibidas y con ello aumentar la probabilidad de captar, entre estas señales, una con el nivel de potencia apropiado para el buen funcionamiento del sistema [25].

Otra alternativa como contramedida es la diversidad de frecuencia, en el respaldo para la señal consiste en un transpondedor adicional operando a una frecuencia inferior menos afectada por la atenuación por lluvia [26,27]. Esta técnica requiere

equipos adicionales para cada una de las estaciones terrenas del sistema, tales como antenas y amplificadores [27].

La diversidad orbital también es una de las técnicas que puede ser utilizada para contrarrestar el efecto nocivo de la atenuación por lluvia en el rendimiento de un sistema de comunicación satelital. Su principio básico consiste en garantizar la recepción de la misma señal en al menos dos satélites [28].

4.3 Comparación entre los resultados obtenidos usando distribución de lluvia local medida y aquellos obtenidos aplicando la Recomendación ITU-R P.837-6

En esta sección se comparan la atenuación por lluvia estimada por el modelo de la Recomendación ITU-R P.618-12 utilizando las estadísticas de lluvia medida en Guayaquil en el año 2013, tiempo de integración de 1 minuto, con la atenuación estimada por este modelo empleando la distribución de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1 minuto, obtenida cuando se aplicó la Recomendación ITU-R P.837-6 para la ciudad de Guayaquil, en la sección 3.5.

Los datos para el enlace satelital son los mismos de la sección 4.2. Además, se considera el periodo 2012-2014, con la $R_{0.01}$ igual a 74,7 mm/h, para el caso de la tasa de precipitación medida e igual a 65 mm/h para el caso de la Recomendación ITU-R P.837-6. La atenuación por lluvia resultante utilizando la distribución acumulativa medida se muestra en la Figura 4.8, siendo algunos de los valores de la atenuación 87,71 dB para 0,001%, 14,37 dB para 0,01%, 3,54 dB para 0,1% y 1,22 dB para 1%. En la Figura 4.13 se observa la atenuación obtenida usando las estadísticas de lluvia arrojadas por la Recomendación ITU-R 837-6, siendo algunos de los valores obtenidos 75,75 dB para 0,001%, 13,03 dB para 0,01%, 3,18 dB para 0,1% y 1.09 dB para 1%.

De las Figuras 4.8 y 4.13, se observa que la Recomendación ITU-R P.837-3, para el caso considerado, es decir, la ciudad de Guayaquil, es ligeramente optimista en su estimación de la tasa de precipitación para tiempo de resolución de 1 minuto, ya que arroja valores de atenuación por lluvia menores a los obtenidos

cuando se emplea las estadísticas de lluvia medidas, para el mismo tiempo de integración.

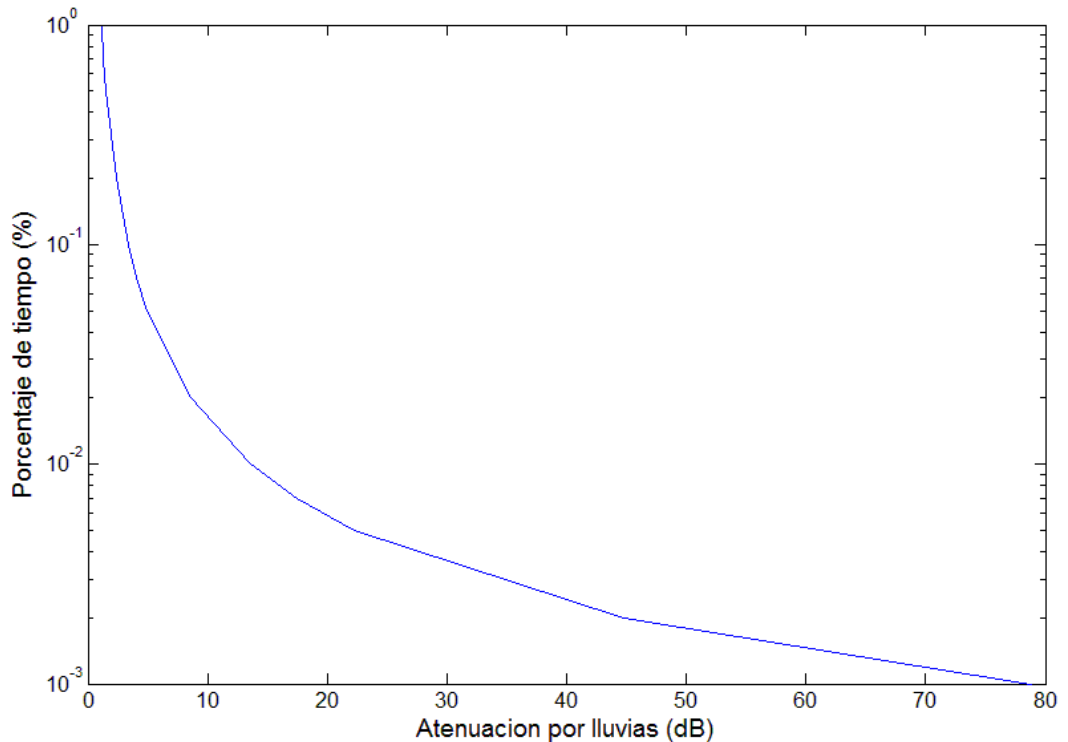


Figura 4.12. Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, con tasa de precipitación medida 618-12, con tiempo de integración de 1 minuto, periodo 2012-2014.

Para la evaluación objetiva del desempeño de la Recomendación ITU-R P.837-3, y también del modelo matemático de Matricciani, así como de cualquier otro modelo de conversión de tiempos de integración en estadísticas de lluvia, en su predicción de la tasa de precipitación para Guayaquil y cualquier otra localidad, es necesario llevar a cabo mediciones de la atenuación por lluvia en la misma localidad, a fin de comparar los valores reales de la referida atenuación con los valores estimados por los modelos de atenuación por lluvia.

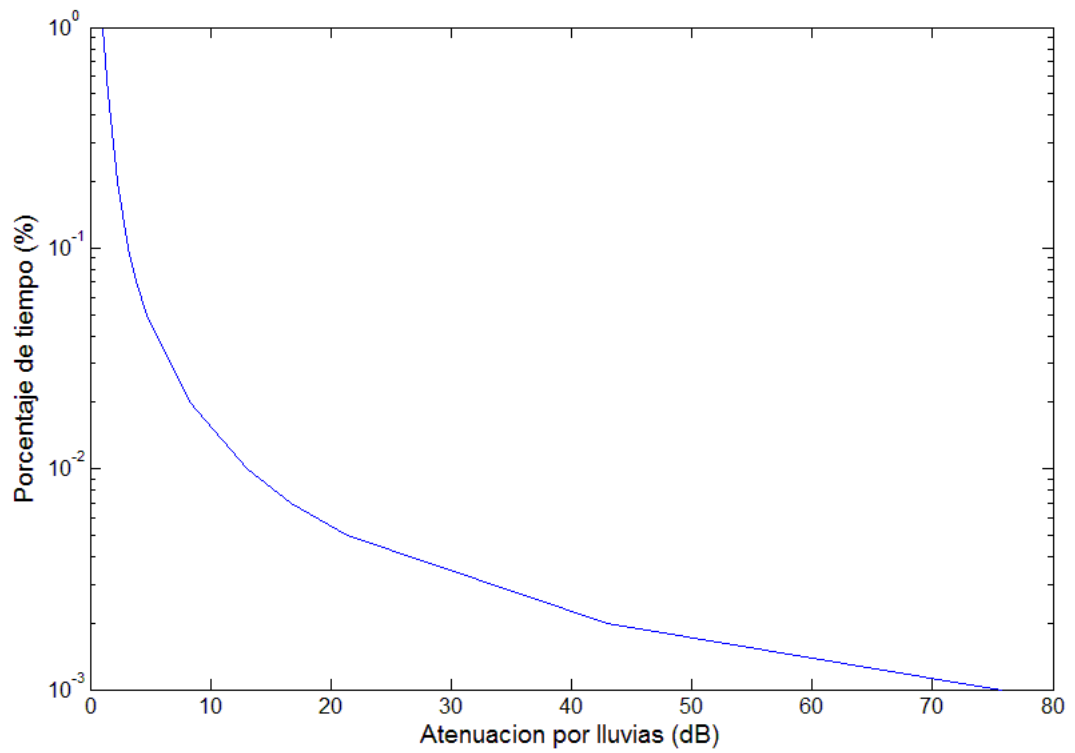


Figura 4.13. Atenuación por lluvia estimada en Guayaquil, con tasa de precipitación dada por la Recomendación ITU-R P.618-12, con tiempo de integración de 1 minuto, periodo 2012-2014.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos indican que los niveles de tasa de precipitación reales de Guayaquil son mayores que los niveles de intensidad de lluvia de Quito.

Adicionalmente, los resultados de los valores de atenuación obtenidos son diferentes ya que dependen del tiempo de resolución con el que se realizan las mediciones de la tasa de precipitación, que en este trabajo fueron de 1 hora y 1 minuto. Se evidencia también la necesidad de contar con estadísticas de lluvia obtenidas a partir de mediciones realizadas en la respectiva localidad, ya que al emplear valores de tasas de precipitación suministradas como por ejemplo las de la Recomendación ITU-R P.837-6 conllevará a estimar niveles de atenuación por lluvia diferentes de los estimados cuando se utilizan las estadísticas de precipitación locales. Esto tiene como consecuencia el sobredimensionamiento o subdimensionamiento del sistema.

Los resultados mostraron que la distribución acumulativa de tasa de precipitación de 1 minuto obtenida con el modelo matemático de Matricciani para la ciudad de Guayaquil, es más cercana a la curva medida de 1 minuto que la obtenida con la recomendación ITU-R P.837-6.

Se demostró el efecto perjudicial que produce la atenuación debido a la lluvia en el rendimiento de los sistemas de comunicaciones satelitales, efecto que se acentúa más a medida que la atenuación por lluvia aumenta.

Adicionalmente se analizó el efecto de la frecuencia de operación, el ángulo de elevación del enlace, la altura de la estación terrena sobre el nivel del mar y la polarización de la señal en la atenuación debido a la lluvia y por tanto en el desempeño del sistema. Se observó que la atenuación aumenta, a medida que aumenta la frecuencia, disminuye el ángulo de elevación, disminuye la altura de la estación terrena, o se utiliza polarización horizontal, en consecuencia la cobertura y la relación C/N disminuyen (se deteriora el desempeño del sistema),

Como principales recomendaciones se tienen: realizar este mismo estudio con una base de datos de un mayor número de años de tasas de precipitación,

correspondientes a diferentes fuentes, con esto se podría validar la información y obtener mayor exactitud en los resultados, evaluar el desempeño de modelos de conversión desde otros tiempos de integración de estadísticas de lluvia (i.e modelo de conversión de 1 día a 1 minuto, modelo matemático de Matricciani y otros), aplicar modelos de conversión desde otros tiempos de integración de estadísticas de lluvia (i.e modelo de conversión de 1 día a 1 minuto, modelo matemático de Matricciani y otros), estudiar medidas de tasas de precipitación de otras localidades en Ecuador, con el objetivo de evaluar los resultados de atenuación por lluvias en una mayor variedad de localidades del país y poder comparar las estadísticas de atenuación para diferentes localidades, desarrollar o evaluar modelos de conversión de tiempos de integración de las estadísticas de lluvia ajustados a las mediciones de la tasa de precipitación en Ecuador, siguiendo los lineamientos dados por [2].

Un avance importante en este tema sería emprender una campaña de mediciones de la atenuación por lluvias en Ecuador, a fin de desarrollar modelos de propagación que permitan mejorar la precisión en la estimación de la atenuación debido a la lluvia en el país, para lo cual se recomienda desarrollar un software que tomando como parámetros de entrada la información provista por las estaciones automáticas, prepare y procese esta información, para generar como salida los informes y gráficos contenidos en el presente trabajo y en los informes meteorológicos de los entes locales.

Implementar convenios con los organismos locales que realizan mediciones de tasas de precipitación, como por ejemplo INAMHI, INOCAR, DAC, lo que permitiría realizar futuras investigaciones y trabajos conjuntos que permitan hacer realidad lo anteriormente indicado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Crane R., IEEE, Prediction of attenuation by rain, 09 1980. [En línea]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1094844>
- [2] International Telecommunication Union (ITU), Recomendación ITU-R P618-12 : Características de precipitación para establecer modelos de, 02 2012. [En línea]. Available: en <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.837-6-201202-l/es>.
- [3] Moupfouma F., IEEEEXPLORE. Improvement of a Rain Attenuation Prediction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 32, No. 12, Diciembre 1984. [En línea]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1143248>.
- [4] E. Matriccioni, A mathematical theory of de-integrating long-time integrated rainfall and its application for predicting 1-min rain rate statistics , International Journal of Satellite Communications and Networking, p. 29, 2011.
- [5] Rice P.L., Holmberg N. Cumulative Time Statistics of Surface-Point Rainfall Rates. IEEE Transactions on Communications, Vol. 21, No. 10, October 1973, pp. 1131-1136.
- [6] Capsoni C., Luini L. 1-Min Rain Rate Statistics Predictions from 1-Hour Rain Rate Statistics Measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 56, No. 3, March 2008, pp. 885-824.
- [7] International Telecommunication Union, Recomendación UIT-R P.837-6: Características de la precipitación para establecer modelos,» 02 2012. [En línea]. Available: : <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-l/es..>
- [8] International Telecommunication Union (ITU), Recomendación UIT-R P.838-3: Modelo de atenuación específica de lluvia para ser usada en métodos de predicción 2005. [En línea]. Available: : <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-l/es>.
- [9] D'Amico M. y Paraboni A., La propagazione troposferica in presenza di precipitazioni, de *Radiopropagazione*, Milano, Italia, McGraw-Hill, 2002, pp. 73-85.

- [10] Levis C., Johnson J. y Teixeira F., Radiowave Propagation, Estados Unidos, Wiley, 2010, pp.90.
- [11] W. Zhang y N. Moayeri, IEEE, 29 10 1999. [En línea]. Available: http://www.ieee802.org/16/tg2_orig/contrib/80216cc-99_24.pdf. [Último acceso: 30 11 2014].
- [12] Laws J.O., Parsons D.A. The Relation of Raindrop-size to Intensity. Eos Transactions American Geophysical Union, Vol. 24, No. 2, October-November 1943, pp. 452-460.
- [13] Zhang W., Moayeri N., 2000. Recommendation: Use of Various Raindrop Size Distributions for Different Geographical Locations in Calculating the Rain Specific Attenuation. Document Number IEEE 16cc-99/41. [En línea]. Disponible en: http://www.ieee802.org/16/tg2_orig/contrib/80216cc-99_41.pdf (consultada en septiembre 2015).
- [14] Perez N. Modelamento de Efeitos de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-ponto e Ponto-multiponto. Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, Brasi. Junio 2003.
- [15] García del Pino P. Caracterización Experimental de la Propagación a 50 GHz en Trayecto Inclinado. Tesis de Doctorado, Escuela Técnica Superiores de Ingenieros de Ingenieros de Telecomunicaciones (ETSI), Universidad Politécnica de Madrid, España, 2003.
- [16] Sekine M., Ishii S., Hwang S.I., Sayama S. Weibull Raindrop-Size Distribution and its Application to Rain Attenuation from 30 GHz to 1000 GHz. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vo. 28, No. 5, May 2007, pp. 383-392.
- [17] D'Amico M., Siat Ling J., Hong Y., Jafri D., Analisis of precipitation characteristics over Southern peninsular Malaysia for satellite propagation application. URSI Asia-Pacific Radio Science Conference. Seoul Korea, Agosto 2016.
- [18] INHAMI, «ISSUU,» 10 11 2011. [En línea]. Available: https://issuu.com/inamhi/docs/instrumentos_met/1?e=3876143/2842956.
- [19] INHAMI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

- [20] Maral G., Bousquet M. *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*. 5th Edition, JohnWiley & Sons, Chichester, United Kingdom, 2009
- [21] Roddy D. *Satellite Communications*. 4th Edition, McGraw-Hill, New York, USA, 2006.
- [22] Matricciani E. Time Diversity as a Rain Attenuation Countermeasure in Satellite Links in the 10-100 GHz Frequency Bands. First European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006), Nice, France, November 2006.
- [23] Hodge D.B. An Improved Model for Diversity Gain on Earth-space Propagation Paths. *Radio Science*, Vol. 17, No. 6, November-December 1982, pp. 1393-1399.
- [24] MITEQ (2000). Uplink Power Control System. [En línea]. Disponible en: <http://miteq.com/docs/29TEC.PDF> (consultada en enero 2017).
- [25] Yeo J.X., Lee Y.H., Ong J.T. Performance of Site Diversity Investigated Through RADAR Derived Results. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 59, No. 10, October 2011, pp. 3890-3898.
- [26] Dossi L., Tartara G., Matricciani E. Frequency Diversity in Millimeter Wave Satellite Communications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 28, No. 2, May 1992, pp. 567-573.
- [27] Schnell M., Hugo D.V. Fade Countermeasures and Adaptive Resource Sharing for an Experimental TDMA Satellite Communications System Operating at Ka-band. *European Transactions on Telecommunications*, Vol. 9, No. 6, November-December 1998, pp. 561-568.
- [28] Panagopoulos A.D., Arapoglou P.D.M., Cottis P.G. Site versus Orbital Diversity: Performance Comparison Based on Propagation Characteristics at the Ku Band and Above. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 3, No. 1, December 2004, pp. 26-29.
- [29] Odedina M.O., Afullo T.J. Seasonal Variations of Rain Attenuation on Radio Propagation Paths in South Africa. International Union of Radio Science XXIX General Assembly (URSI GA 2008), Chicago, USA, August 2008.

[30] International Telecommunication Union (ITU). Recommendation ITU-R P.581-2: The Concept of Worst Month. Geneva, Switzerland, 1990.

[31] International Telecommunications Union (ITU). Recommendation ITU-R P.372-13: Radio Noise. Geneva, Switzerland, September 2016.

[32] International Telecommunications Union (ITU). Recommendation ITU-R P.676-11: Attenuation by Atmospheric Gases. Geneva, Switzerland, September 2016.

[33] Pérez García N. Sistemas de Comunicación Vía Satélite, Maestría en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Venezuela, Enero 2016.

ANEXO A

PROGRAMAS MATLAB

1. PROGRAMA PARA GENERAR ESTADÍSTICAS DE LLUVIA DE GUAYAQUIL CORRESPONDIENTES A LOS AÑOS 2012, 2013 Y 2014

```
clear;

clc;

mm=xlsread('ANIOSGYE1214REAL.xlsx','INHAMI1214HR','B1:Y1095');

[imax,jmax]=size(mm); %imax =365 y jmax = 24

cuenta = 0;

suma = 0;

for i=1:1:imax

    for j=1:1:jmax

        cuenta = cuenta + 1;

        valoresAnual(cuenta) = mm(i,j);

        suma = suma + mm(i,j);

    end

end

valores_ord = unique(sort(valoresAnual),'stable');

[y,x]=hist(valoresAnual,valores_ord);

hist(valoresAnual,valores_ord)

indice=max(size(y));

acum_sum(indice)=y(indice);

for i=indice-1:-1:1

    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);

end
```

```

end

acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;

figure (1)

semilogy(valores_ord,acum_sum)

title('AÑOS 2012-2104 GUAYAQUIL (mm/hr)');

xlabel('mm/hr');

ylabel('%');

```

2. PROGRAMA BASE PARA GRAFICAR LA PD DE 1 HORA DE LAS CIUDADES DE QUITO Y GUAYAQUIL

```

% PROGRAMA:GYEANIO2014HR.m
% Desarrollado por: M.A. Santacruz
%Feb 12 2017 AÑO 2014

clear all;

clc;

mm=xlsread('ANIOSGYE1214REAL.xlsx','INHAMI1214HR','B731:Y1095');

[jmax,jmax]=size(mm); %imax =365 y jmax = 24

cuenta = 0;

suma = 0;

for i=1:1:imax
    for j=1:1:jmax
        cuenta = cuenta + 1;
        valoresAnual(cuenta) = mm(i,j);
        suma = suma + mm(i,j);
    end
end

valores_ord = unique(sort(valoresAnual),'stable');

[y,x]=hist(valoresAnual,valores_ord);

hist(valoresAnual,valores_ord)

indice=max(size(y));

```

```

acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord,acum_sum)
title('AÑO 2014 HR GUAYAQUIL (mm/hr)');
xlabel('Tasa de Precipitación (mm/hr)');
ylabel('Porcentaje de Tiempo (%)');
datospd2014 = [valores_ord;acum_sum];
% %datos_rango2 = [vector_parte1;valores_ordenados1];

```

3. PROGRAMA BASE PARA GRAFICAR LA PD DE 1 –MIN A PARTIR DEL MODELO MATEMÁTICO DE MATRICCIANI

```

clear;
clc;
mm=xlsread('ANIOSGYE1214REAL.xlsx','INHAMI1214HR','B1:Y1095');
[imax,jmax]=size(mm); %imax =365 y jmax = 24
cuenta = 0;
suma = 0;
for i=1:1:imax
    for j=1:1:jmax
        cuenta = cuenta + 1;
        valoresAnual(cuenta) = mm(i,j);
        suma = suma + mm(i,j);
    end
end
valores_ord = unique(sort(valoresAnual),'stable');

```

```

[y,x]=hist(valoresAnual,valores_ord);
hist(valoresAnual,valores_ord)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
% bar(acum_sum)
figure (1)
semilogy(valores_ord,acum_sum)
title('AÑOS 2012-2104 GUAYAQUIL (mm/hr)');
xlabel('mm/hr');
ylabel('%');
hold on
%Grafico tramo Rango II y rango III
lambda = (log10(0.5/0.0171))/(log10(36/7.40));
m=size(valores_ord);
j=1;
for i = 1 : 1 : m(2)
    if (valores_ord(i)>=7.40 & valores_ord(i)<=36)
        valores_ord_1(j)=valores_ord(i);
        valores_ordenados1(j) = 0.5 .* (( valores_ord_1(j) ./ 7.40) .^(-lambda));
    elseif (valores_ord(i)>36 & valores_ord(i)<=100)
        valores_ord_1(j)=valores_ord(i);
    end
    j=j+1;
end

```

```

    valores_ordenados1(j) = 0.0171 .* (36 ./ valores_ord_1(j)).*
    2.71828182846 .^(-(((valores_ord_1(j) ./ 36) .^(lambda ./ 2))-1));

```

```

end

```

```

    j=j+1;

```

```

end

```

```

semilogy(valores_ord_1,valores_ordenados1, 'r')

```

4. PROGRAMA BASE PARA GRAFICAR LA PD DE 1 –MIN A PARTIR DE DATOS DE LLUVIA REAL PARA LA CIUDAD DE GUAYAQUIL

```

% anual 2012 A 2014 con lluvia 1 minuto lee datos **

```

```

%fEB 2017

```

```

clear

```

```

mm=xlsread('ANIO1214MEB.xlsx','HRDMIN','A1:X1008');

```

```

[imax,jmax]=size(mm);

```

```

cuenta = 0;

```

```

for i=1:1:imax

```

```

    for j=1:1:jmax

```

```

        cuenta = cuenta + 1;

```

```

        valoresEne(cuenta) = mm(i,j);

```

```

        mmHEne(jmax*(i-1)+j)=mm(i,j); %variable

```

```

    end

```

```

end

```

```

mmAnual=[mmHEne];

```

```

% valoresAnual=[valoresEne, valoresFeb, valoresMar, valoresAbr, valoresMay,
valoresJun, valoresJul, valoresAgo, valoresSep, valoresOct, valoresNov,
valoresDic];

```

```

valoresAnual=[valoresEne];
valores_ord = unique(sort(valoresAnual),'stable');
[y,x]=hist(valoresAnual,valores_ord);
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
% acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
% bar(acum_sum)
%hold on
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord,acum_sum,'M')

```

5. PROGRAMA BASE BASE PARA EL CÁLCULO DE LA ATENUACIÓN ESPECÍFICA DEBIDO A LA LLUVIA A PARTIR DE [2] [8]

```

clear all
hs=0; %altura antena
phi=40.81; %latitud de la ubicacion de la estacion terrena
hr=3.2-0.075*(phi-35); %altura isoterma
theta=39.7*pi/180; %angulo elevacion antena
Ls=(hr-hs)/sin(theta); %distancia lineal a la isoterma (hipotenusa)
Lg=Ls*cos(theta); %proyeccion de Ls a nivel de la tierra
f=12; %frec en Ghz
R=40; %intensidad de lluvia a 0.01
alpha=1.15; %const temp
k=0.022; %const temp

```



```

gamar=k*R^alpha; %atenuacion especifica
r=1/(1+0.78*sqrt((Lg*gamar)/f)-0.38*(1-exp(-2*Lg))); %Factor reduccion hori
zeta=atan((hr-hs)/Lg^r) %angulo
Lr=Lg*r/cos(theta); %distancia
v=1/(1+sqrt(sin(theta))*(31*(1-exp(-theta))*sqrt(Lr*gamar)/f^2-0.45));
Le=Lr*v;
A=gamar*Le %atenuacion por lluvia
p=0.03;
beta=-0.005*(phi-36)+1.8-4.25*sin(theta)
Ap=A*(p/0.01)^(-0.655+0.033*log(p)-0.045*log(A)-beta*(1-p)*sin(theta))

```

6. PROGRAMA BASE PARA GRAFICAR LAS ESTADISTICAS DEL MES MAS LLUVIOSO Y DEL PEOR MES DE LA CIUDAD DE QUITO Y GUAYAQUIL

```

% PROGRAMA:GYEGLOBALESMES.m
% Desarrollado por: M.A. Santacruz
%Feb 12 2017 ****GLOBAL MENSUAL
clear all;
clc;
mm11=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B1:Y31');
mm12=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B366:Y396');
mm13=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B731:Y761');
% mm = [mm11 mm12 mm13]
% [imax,jmax]=size(mm);
%Enero
cuenta = 0;
Valores=0;
for i=1:1:31
    for j=1:1:24

```

```
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm11(i,j);
    end
end
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm12(i,j);
    end
end
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm13(i,j);
    end
end

valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');

[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
```

```

semilogy(valores_ord1,acum_sum)
% title('Guayaquil 2012-2014 mensual mm/hr');
xlabel('Tasa de Precipitación (mm/hr)');
ylabel('Porcentaje de Tiempo (%)');
% datospd = [valores_ord;acum_sum];
% %datos_rango2 = [vector_parte1;valores_ordenados1];
hold on
%*****FEBRERO*****
clear all;
clc;
mm21=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B32:Y59');
mm22=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B397:Y424');
mm23=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B762:Y789');
Valores = 0;
cuenta = 0;
for i=1:1:28
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm21(i,j);
    end
end
for i=1:1:28
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm22(i,j);
    end
end
end

```

```

for i=1:1:28
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm23(i,j);
    end
end

valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'k')
% hold on
% *****MARZO*****
clear all;
clc;
mm31=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B60:Y90');
mm32=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B425:Y455');
mm33=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B790:Y820');
Valores=0;
cuenta = 0;
for i=1:1:31
    for j=1:1:24

```

```
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm31(i,j);
    end
end

for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm32(i,j);
    end
end

for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm33(i,j);
    end
end

valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'g')
```

```
%*****ABRIL*****
clear all;
clc;
mm41=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B91:Y120');
mm42=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B456:Y485');
mm43=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B821:Y850');
Valores=0;
cuenta = 0;
for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm41(i,j);
    end
end

for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm42(i,j);
    end
end

for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm43(i,j);
    end
end
```

```

valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'m')
%*****MAYO*****
clear all;
clc;
mm51=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B121:Y151');
mm52=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B486:Y516');
mm53=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B851:Y881');
Valores=0;
cuenta = 0;
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm51(i,j);
    end
end
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;

```

```

        Valores(cuenta) = mm52(i,j);
    end
end
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm53(i,j);
    end
end
valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'b')
%*****JUN*****
clear all;
clc;
mm61=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B152:Y181');
mm62=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B517:Y546');
mm63=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B882:Y911');
Valores=0;
cuenta = 0;

```



```
for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm61(i,j);
    end
end

for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm62(i,j);
    end
end

for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm63(i,j);
    end
end

valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
```

```
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'y')
%*****JUL*****
clear all;
clc;
mm71=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B182:Y212');
mm72=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B547:Y577');
mm73=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B912:Y942');
Valores=0;
cuenta = 0;
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm71(i,j);
    end
end
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm72(i,j);
    end
end
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm73(i,j);
    end
end
```

```

end
valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'c')
%*****AGOSTO*****
**

clear all;

clc;

mm81=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B213:Y243');
mm82=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B578:Y608');
mm83=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B943:Y973');

Valores=0;

cuenta = 0;

for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm81(i,j);
    end
end

end

for i=1:1:31
    for j=1:1:24

```

```

        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm82(i,j);
    end
end
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm83(i,j);
    end
end
valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'-k')

%*****SEPT*****
clear all;
clc;
mm91=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B244:Y273');
mm92=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B609:Y638');

```

```
mm93=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B974:Y1003');
Valores=0;
cuenta = 0;
for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm91(i,j);
    end
end

for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm92(i,j);
    end
end

for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm93(i,j);
    end
end

valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
```

```

for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'-g')

%*****OCT*****
clear all;
clc;
mm101=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B274:Y304');
mm102=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B639:Y669');
mm103=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B1004:Y1034');
Valores=0;
cuenta = 0;
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm101(i,j);
    end
end

for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm102(i,j);
    end
end

```

```

for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm103(i,j);
    end
end

valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'-m')
%*****NOV*****
clear all;
clc;
mm111=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B305:Y334');
mm112=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B670:Y699');
mm113=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B1035:Y1064');

Valores=0;
cuenta = 0;
for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;

```

```

        Valores(cuenta) = mm111(i,j);
    end
end
for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm112(i,j);
    end
end
for i=1:1:30
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm113(i,j);
    end
end
valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'-b')
%*****DIC*****
clear all;

```



```
clc;
mm121=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B335:Y365');
mm122=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B700:Y730');
mm123=xlsread('ANIOSGYE1214HR.xlsx','INHAMI1214HR','B1065:Y1095');
Valores=0;
cuenta = 0;
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm121(i,j);
    end
end
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm122(i,j);
    end
end
for i=1:1:31
    for j=1:1:24
        cuenta = cuenta + 1;
        Valores(cuenta) = mm123(i,j);
    end
end
valores_ord1 = unique(sort(Valores),'stable');
[y,x]=hist(Valores,valores_ord1);
% hist(Valores,valores_ord1)
```

```
indice=max(size(y));
acum_sum(indice)=y(indice);
for i=indice-1:-1:1
    acum_sum(i) = acum_sum(i+1)+y(i);
end
acum_sum=acum_sum./acum_sum(1)*100;
semilogy(valores_ord1,acum_sum,'-c')
legend1= legend('Enero','Feb','Marzo','Abril','Mayo','Jun','Jul','Ag','Sept','Oct','Nov',
'Dic');
```

ANEXO B

Cálculo de la relación C/N (Guayaquil) con cielo claro: enlace ascendente

Datos generales	
Frecuencia del enlace ascendente, f_{sub} (GHz)	14,00
Cálculo de G_{sat}	
Velocidad de la luz, c (m/s)	3,00E+08
Longitud de onda, λ (m)	0,02
Ancho del haz de la antena del satélite, $\theta_{3\text{dB}}$ (grados)	2,00
Diámetro de la parábola del plato de la antena del satélite, D_{sat} (m)	0,75
Eficiencia de la antena del satélite, η_{sat}	0,55
Ganancia máxima de la antena del satélite, $G_{\text{sat,max}}$ (dBi)	38,23
Angulo de desapuntamiento de la antena del satélite, α_{sat} (grados)	1,00
Pérdidas por desapuntamiento en la antena del satélite, L_{baj} (dB)	3,00
Pérdidas en la línea de transmisión del satélite, $L_{\text{con,sat}}$ (dB)	1,00
Pérdidas de polarización en el satélite, L_{pol} (dB)	0,00
Ganancia de la antena del satélite, G_{sat} (dBi)	34,23

Figura B.1. Cálculo de la relación C/N (Guayaquil), para cielo claro, enlace propuesto, ascendente

Cálculo de T_{sat}	
Temperatura de ruido de la antena del satélite, T_{ant_sat} ($^{\circ}K$)	290,00
Pérdidas en la línea de transmisión en el satélite, L_{con_sat} (dB)	1,00
Pérdidas en la línea de transmisión en el satélite, L_{con_sat} (unidades lineales)	1,26
Temperatura de ruido de la línea de transmisión del satélite, T_{con_sat} ($^{\circ}K$)	290,00
Figura de ruido del receptor del satélite, F (dB)	3,00
Figura de ruido del receptor del satélite, F (unidades lineales)	2,00
Temperatura ambiente en el satélite, T_o ($^{\circ}K$)	290,00
Temperatura del ruido del LNA del satélite, $TLNA_{sat}$ ($^{\circ}K$)	288,63
Temperatura de ruido del sistema receptor del satélite, T_{sat} ($^{\circ}K$)	578,63
Temperatura de ruido del sistema receptor del satélite, T_{sat} (dB $^{\circ}K$)	27,62

Figura B.1. Cálculo de la relación C/N (Guayaquil), para cielo claro, enlace propuesto, ascendente (continuación)

Cálculo de $(G/T)_{sat}$	
Figura de mérito, $(G/T)_{sat}$ (dB °K ⁻¹)	6,60
Cálculo de $(PIRE)_{sub}$	
Potencia del transmisor de la estación terrena, P_{Tet} (W)	100,00
Potencia del transmisor de la estación terrena, P_{Tet} (dBW)	20,00
Pérdidas en la línea de transmisión de la estación terrena, $L_{con_{tet}}$ (dB)	0,50
Diámetro de la parábola del plato de la antena de la estación terrena, D_{et} (m)	4,00
Eficiencia de la antena de la estación terrena, η_{et}	0,60
Ganancia máxima de la antena de la estación terrena, $G_{et_{max}}$ (dBi)	53,15
Backoff del HPA de la estación terrena (dB)	0,00
Ángulo de desapuntamiento de la antena de la estación terrena, α_{et} (grados)	0,10
Ancho del haz de la antena de la estación terrena, θ_{3dB} (grados)	0,38
Pérdidas por desapuntamiento en la antena de la estación terrena, $L\alpha_{sub}$ (dB)	0,85
PIRE de la estación terrena (dBW)	71,79
Cálculo de las pérdidas de propagación, $L_{propagsub}$	
Pérdidas en espacio libre, L_{el} (dB)	206,46
Pérdidas por absorción atmosférica, L_{aa} (dB)	0,13
Pérdidas por lluvias, L_{ll} (dB)	0,00
Pérdidas de propagación en enlace de subida, $L_{propagsub}$ (dB)	206,59
Cálculo de $(C/N_o)_{sub}$	
Constante de Boltzmann, k (J/°K)	1,38E-23
Relación portadora-ruido en el enlace de subida, $(C/N_o)_{sub}$ (dB Hz)	100,40
B	45.000,00
Relación portadora-ruido en el enlace de subida, $(C/N)_{sub}$ (dB Hz)	53,87

Figura B.2. Cálculo de la relación C/N (Guayaquil), para cielo claro, enlace propuesto, ascendente (continuación)

- **Enlace descendente**

Datos generales	
Frecuencia del enlace descendente, f_{baj} (GHz)	12,15
Cálculo de G_{et}	
Velocidad de la luz, c (m/s)	3,00E+08
Longitud de onda, λ (m)	0,02
Diámetro de la parábola del plato de la antena de la estación terrena, D_{et} (m)	4,00
Eficiencia de la antena de la estación terrena, h_{et}	0,60
Ganancia máxima de la antena de la estación terrena, $G_{\text{et,max}}$ (dBi)	51,91
Angulo de desapuntamiento de la antena de la estación terrena, a_{et} (grados)	0,10
Ancho del haz de la antena de la estación terrena, $q_{3\text{dB}}$ (grados)	0,43
Pérdidas por desapuntamiento en la antena de la estación terrena, L_{sub} (dB)	0,64
Pérdidas en la línea de transmisión de la estación terrena, $L_{\text{con}_{\text{tet}}}$ (dB)	0,50
Pérdidas de polarización en la estación terrena, L_{pol} (dB)	0,00
Ganancia de la antena de la estación terrena, G_{et} (dBi)	50,77

Figura B.3. Cálculo de la relación C/N (Guayaquil), para cielo claro, enlace propuesto, descendente (primera parte).

Cálculo de $(PIRE)_{baj}$	
Potencia del transmisor del satélite, P_{Tsat} (W)	10,00
Potencia del transmisor del satélite, P_{Tsat} (dB)	10,00
Pérdidas en la línea de transmisión del satélite, $L_{con_{sat}}$ (dB)	1,00
Ancho del haz de la antena del satélite, q_{3dB} (grados)	2,00
Diámetro de la parábola del plato de la antena del satélite, D_{sat} (m)	0,86
Eficiencia de la antena del satélite, h_{sat}	0,55
Ganancia máxima de la antena del satélite, $G_{sat_{max}}$ (dBi)	38,23
Backoff del HPA del satélite (dB)	0,00
Angulo de desapuntamiento de la antena del satélite, a_{sat} (grados)	1,00
Pérdidas por desapuntamiento en la antena del satélite, $L_{a_{baj}}$ (dB)	3,00
PIRE de la estación terrena (dBW)	44,23
Cálculo de las pérdidas de propagación, $L_{propagbaj}$	
Pérdidas en espacio libre, L_{el} (dB)	205,23
Pérdidas por absorción atmosférica, L_{aa} (dB)	0,13
Pérdidas por lluvias, L_{ll} (dB)	0,00
Pérdidas de propagación en enlace de bajada, $L_{propagbaj}$ (dB)	205,36
Cálculo de $(C/N_o)_{baj}$	
Constante de Boltzmann, k (J/°K)	1,38E-23
Relación portadora-ruido en el enlace de bajada, $(C/N_o)_{baj}$ (dB Hz)	96,07
B	45000
Relación portadora-ruido en el enlace de subida, $(C/N)_{sub}$ (dB Hz)	49,54

Figura B.4. Cálculo de la relación C/N (Guayaquil), para cielo claro, enlace propuesto, descendente (continuación)

- **Cálculo de la relación C/N (Guayaquil) con presencia de lluvia**

Datos generales	
Frecuencia del enlace descendente, f_{baj} (GHz)	12,15
Cálculo de G_{et}	
Velocidad de la luz, c (m/s)	3,00E+08
Longitud de onda, λ (m)	0,02
Diámetro de la parábola del plato de la antena de la estación terrena, D_{et} (m)	4,00
Eficiencia de la antena de la estación terrena, h_{et}	0,60
Ganancia máxima de la antena de la estación terrena, $G_{\text{et,max}}$ (dBi)	51,91
Angulo de desapuntamiento de la antena de la estación terrena, a_{et} (grados)	0,10
Ancho del haz de la antena de la estación terrena, $q_{3\text{dB}}$ (grados)	0,43
Pérdidas por desapuntamiento en la antena de la estación terrena, L_{sub} (dB)	0,64
Pérdidas en la línea de transmisión de la estación terrena, $L_{\text{con,et}}$ (dB)	0,50
Pérdidas de polarización en la estación terrena, L_{pol} (dB)	0,00
Ganancia de la antena de la estación terrena, G_{et} (dB)	50,77

Figura B.5. Cálculo de la relación C/N (Guayaquil), con presencia de lluvia, enlace propuesto, descendente (primera parte)

Cálculo de T_{et}	
Temperatura de ruido debido al cielo claro, T_C ($^{\circ}K$)	20,00
Temperatura de ruido debido a la superficie terrestre, T_S ($^{\circ}K$)	45,00
Temperatura de ruido de la antena de la estación terrena, $T_{ant_{et}}$ ($^{\circ}K$)	816,89
Pérdidas en la línea de transmisión de la estación terrena, $L_{con_{tet}}$ (dB)	0,50
Pérdidas en la línea de transmisión de la estación terrena, $L_{con_{tet}}$ (dB)	1,12
Temperatura de ruido de la línea de transmisión de la estación terrena, $T_{con_{et}}$ ($^{\circ}K$)	290,00
Figura de ruido del receptor de la estación terrena, F (dB)	1,00
Figura de ruido del receptor de la estación terrena, F (unidades lineales)	1,26
Temperatura ambiente en la estación terrena, T_o ($^{\circ}K$)	290,00
Temperatura del ruido del LNA de la estación terrena, $TLNA_{et}$ ($^{\circ}K$)	75,09
Temperatura de ruido del sistema receptor de la estación terrena, T_{et} ($^{\circ}K$)	834,68
Temperatura de ruido del sistema receptor de la estación terrena, T_{et} (dB $^{\circ}K$)	29,22

Figura B.6. Cálculo de la relación C/N (Guayaquil), con presencia de lluvia, enlace propuesto, descendente (primera parte)

Cálculo de $(PIRE)_{baj}$	
Potencia del transmisor del satélite, $P_{T_{sat}}$ (W)	10,00
Potencia del transmisor del satélite, $P_{T_{sat}}$ (dBW)	10,00
Pérdidas en la línea de transmisión del satélite, $L_{con_{sat}}$ (dB)	1,00
Ancho del haz de la antena del satélite, θ_{3dB} (grados)	2,00
Diámetro de la parábola del plato de la antena del satélite, D_{sat} (m)	0,86
Eficiencia de la antena del satélite, η_{sat}	0,55
Ganancia máxima de la antena del satélite, $G_{sat_{max}}$ (dBi)	38,23
Backoff del HPA del satélite (dB)	0,00
Angulo de desapuntamiento de la antena del satélite, α_{sat} (grados)	1,00
Pérdidas por desapuntamiento en la antena del satélite, $L_{a_{baj}}$ (dB)	3,00
PIRE de la estación terrena (dBW)	44,23
Cálculo de las pérdidas de propagación, $L_{propag_{baj}}$	
Pérdidas en espacio libre, L_{el} (dB)	205,23
Pérdidas por absorción atmosférica, L_{aa} (dB)	0,30
Pérdidas por luvias, L_{ll} (dB)	1,15
Pérdidas de propagación en enlace de bajada, $L_{propag_{baj}}$ (dB)	206,68
Cálculo de $(C/N_o)_{baj}$	
Constante de Boltzmann, k (J/°K)	1,38E-23
Relación portadora-ruido en el enlace de bajada, $(C/N_o)_{baj}$ (dB Hz)	87,70
B	45.000,00
Relación portadora-ruido en el enlace de subida, $(C/N)_{sub}$ (dB Hz)	41,17

Figura B.4. Cálculo de la relación C/N (Guayaquil), con presencia de lluvia, enlace descendente (continuación)