



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“MODELOS DE CONVERSIÓN DE TIEMPOS DE
INTEGRACIÓN DE DISTRIBUCIONES ACUMULATIVAS
DE TASA DE PRECIPITACIÓN PARA PLANIFICACIÓN
Y DIMENSIONAMIENTO DE ENLACES INALÁMBRICOS
TERRESTRES EN ECUADOR”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:

MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

XAVIER ANTONIO LASCANO FILIAN

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco este logro, en primer lugar, a Dios Todopoderoso por su infinita gracia y misericordia; por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente.

A mis amados padres, Sylvia y Gustavo, por dárme todo en la vida, por siempre estar presentes en cada momento de mi vida, por sostenerme y ayudarme. A mi esposa Diana, y a mis hijos, Xavier y Victoria, gracias, ustedes son los motores de mi vida.

Al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), por abrirme las puertas y brindarme las facilidades en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a la MET de esta prestigiosa institución, ESPOL, a sus directivos, autoridades y al personal administrativo de la Unidad de Post-gradados de la FIEC; a mis profesores de la carrera, por compartir sus conocimientos y experiencias; pero de manera muy especial a mi director de Trabajo de Titulación, Dr. Nelson A. Pérez García, por brindarme su amistad y por el importante aporte en cada etapa de este trabajo, ya que sin su valioso soporte y ayuda no hubiese podido culminar éste proceso.

DEDICATORIA

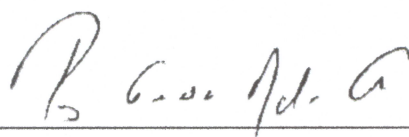
Le dedico este trabajo a mis tesoros más preciados, mis hijos, Victoria Sofía y Xavier Alejandro, por enseñarme a amar inmensamente. A mi esposa Diana, por su increíble paciencia y comprensión, por estar a mi lado en los momentos más delicados de este trabajo, por ser mi mejor amiga, por su completa entrega y amor. A mis padres, Sylvia y Gustavo, por su amor y apoyo incondicional desde siempre, por su ejemplo de honestidad, humildad y respeto. A mis hermanos, Alejandro y Jeanina; y a toda mi familia, con inmenso amor.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



DOUGLAS PLAZA, Ph.D.

PRESIDENTE



NELSON A. PÉREZ GARCÍA, Ph.D.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

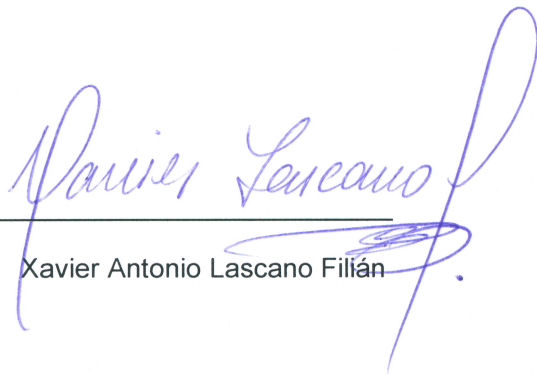


BORIS RAMOS SÁNCHEZ, Ph.D.

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 ESPOI 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".



Xavier Antonio Lascano Filián

RESUMEN

Ante la indetenible demanda por parte de los usuarios por servicios de comunicaciones de banda ancha que cada vez más requieren mayores velocidades de transmisión, el uso de frecuencias superiores a 10 GHz para la implementación de sistemas de comunicaciones ha crecido significativamente. En dichos sistemas, el efecto de mayor impacto negativo en la cobertura y desempeño de los mismos es la atenuación por lluvias, fenómeno que depende principalmente, entre otros factores, de la tasa de precipitación. El desvanecimiento por lluvias se estima, para la localidad de interés, mediante modelos que han sido desarrollados para tal fin. Por tanto, en la medida que los valores de la tasa de precipitación, utilizados para la referida predicción, sean imprecisos, también lo será la atenuación por lluvias estimada por los modelos, lo cual aumentará el porcentaje de sobredimensionamiento o subdimensionamiento del sistema. En este sentido, en este trabajo se desarrollan nuevos modelos para la conversión de tiempos de integración de estadísticas de lluvia, ajustados a las condiciones propias inherentes a la precipitación en el Ecuador, con el fin de poder estimar con mayor precisión, la distribución acumulativa de la tasa de lluvia en las distintas regiones del país, con tiempo de integración de 1-minuto, a partir de estadísticas de lluvia registradas con tiempos de integración mayores. Para ello, se utilizan técnicas de regresión no lineal y la técnica de computación inteligente PSO (*Particle Swarm Optimization*), con las cuales se sintonizan algunos de los modelos existentes en el literatura para tal fin, a las medidas de tasa de precipitación, con tiempo de integración de 1-minuto, aportadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI). Los nuevos modelos desarrollados, aquí llamados Ito-Hosoya Modificado-1, Ito-Hosoya Modificado-2, Chebil-Rahman Modificado-1 y Chebil-Rahman Modificado-2, presentaron, respecto a las versiones originales de dichos modelos, una considerable mejora de aproximadamente el 60%, en términos del valor RMSE (RMSE, *Root Mean Square Error*), en su desempeño en la estimación de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto a partir de tasas de precipitación medidas con tiempos de integración 1-hora y 1-mes.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Identificación del Problema	1
1.2 Justificación	5
1.3 Descripción de la Solución Propuesta.....	6
1.4 Objetivos del Trabajo de Titulación	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 Metodología.....	7
1.6 Alcance.....	8
CAPÍTULO 2.....	10
2. ATENUACIÓN POR LLUVIAS EN ENLACES INALAMBRICOS DE COMUNICACIONES Y ALGUNAS TÉCNICAS PARA EL AJUSTE DE DATOS	10
2.1 Absorción y Dispersión Causadas por las Gotas de Lluvia	10
2.2 Influencia del Tamaño de las Gotas de Lluvia.....	11
2.3 Efecto de la Forma y Orientación de las Gotas de Lluvia	13

2.4	Impacto de la Velocidad Terminal de las Gotas de Lluvia	14
2.5	Efecto de la Temperatura de la Lluvia.....	16
2.6	Variabilidad Espacial y Temporal de la Atenuación por Lluvias.....	17
2.7	Atenuación Específica por Lluvias	20
2.8	Algunas Técnicas para el Ajuste de Datos	29
2.8.1	Regresión No Lineal	29
2.8.2	PSO (<i>Particle Swarm Optimization</i>)	36
CAPÍTULO 3.....		40
3.	MODELOS DE CONVERSIÓN DE TIEMPOS DE INTEGRACIÓN DE DISTRIBUCIONES ACUMULATIVAS DE LLUVIA Y MODELOS DE ESTIMACIÓN DE ATENUACIÓN POR LLUVIAS	40
3.1	Modelos de Conversión de Tiempos de Integración de Distribuciones Acumulativas de Lluvia	40
3.1.1	Modelo de Rice-Holmberg	40
3.1.2	Modelo de Chebil-Rahman	41
3.1.3	Modelo de Moupfouma	42
3.1.4	Modelo de Ito-Hosoya	43
3.1.5	Modelo de Matricciani	44
3.1.6	Recomendación ITU-R P.837-6	48
3.2	Modelos de Predicción de Atenuación por Lluvias en Enlaces Inalámbricos Terrestres	50
3.2.1	Recomendación ITU-R P.530-16	50
3.2.2	Técnica de Tormenta Sintética.....	53
3.2.3	Modelo Pérez-Mello	55
CAPÍTULO 4.....		57
4.	DESARROLLO DE NUEVOS MODELOS DE CONVERSIÓN DE TIEMPOS DE INTEGRACIÓN DE DISTRIBUCIONES ACUMULATIVAS DE LLUVIA.....	57

4.1 Base de Datos de Tasa de Precipitación del INAMHI	57
4.2 Distribuciones Acumulativas de Tasa de Precipitación con Diferentes Tiempos de Integración.....	60
4.3 Distribuciones Acumulativas Estimadas de Tasa de Precipitación con Tiempo de Integración de 1-minuto	73
4.4 Desarrollo de los Nuevos Modelos de Conversión de Tiempos de Integración de Distribuciones Acumulativas de Lluvia en Ecuador	94
4.4.1 Usando Técnicas de Regresión No Lineal	95
4.4.2 Usando PSO (<i>Particle Swarm Optimization</i>)	98
4.5 Evaluación del Modelo Desarrollado en Términos de Métricas de Desviación de Valores.....	102
CAPITULO 5.....	107
5. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE CONVERSIÓN DESARROLLADOS .	107
5.1 Escenarios Considerados en la Estimación de la Atenuación por Lluvias en Ecuador	107
5.2 Predicción de la Atenuación por Lluvias mediante la Recomendación ITU-R P.530-16.....	107
5.3 Predicción de la Atenuación por Lluvias mediante la Técnica de Tormenta Sintética.....	111
5.4 Predicción de la Atenuación por Lluvias mediante el Modelo Pérez-Mello	114
5.5 Comparación de Resultados de Estimación de Atenuación por Lluvias ..	114
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
REFERENCIAS	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Comportamiento típico de la relación S/I de un sistema inalámbrico de comunicaciones ante presencia de eventos de lluvia en el enlace.....	2
Figura 1.2: Comportamiento típico de la BER de un sistema inalámbrico de comunicaciones ante presencia de eventos de lluvia en el enlace.....	2
Figura 1.3: Ejemplo de distribuciones acumulativas para varios tiempos de integración	4
Figura 2.1: Atenuación por absorción de energía en la gota de lluvia.	10
Figura 2.2: Atenuación por dispersión de energía en la gota de lluvia.	11
Figura 2.3: Variación del tamaño de la gota de agua según su velocidad terminal.	14
Figura 2.4: Tamaño de la gota de agua de lluvia según su velocidad terminal.....	15
Figura 2.5: Fraccionamiento de la gota de agua de lluvia al caer.....	16
Figura 2.6: Tasa de precipitación versus temperatura de lluvia, en Scania, Suecia (mes de abril, periodo 1961-2010).....	17
Figura 2.7: Celda de lluvia construida a partir de mediciones con radar (el valor pico de la precipitación es 30,33 mm/h y el valor umbral mínimo es 1 mm/h).	18
Figura 2.8: Ejemplo de serie temporal medida de tasa de precipitación.....	19
Figura 2.9: Ejemplo de distribución acumulativa de tasa de precipitación.	19
Figura 2.10: Onda electromagnética plana atravesando un campo de gotas esféricas de agua de lluvia.....	21
Figura 2.11: Atenuación específica para las distribuciones de tamaño de gotas L-P, M-P y J-T-W (lluvia generalizada).....	24
Figura 2.12: Valores teóricos de la atenuación específica vs. tasa de precipitación, utilizando la distribución L-P.	25
Figura 2.13: Ilustración del proceso de convergencia en el método de Newton, en la búsqueda del mínimo local de la función objetivo.	31
Figura 2.14: Algoritmo del método de Rosenbrock en acción.	37
Figura 2.15: Movimiento de una partícula en PSO.....	39
Figura 3.1: $R_{0,01}$ en un periodo anual promedio.....	52

Figura 3.2: a) Ejemplo de serie temporal de la tasa de precipitación R; b) Serie temporal de la atenuación por lluvias, A, obtenida con el método SST.	54
Figura 4.1: Ubicación de las 5 estaciones meteorológicas.....	63
Figura 4.2: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para la estación M1249 (Palesema, Esmeraldas)	65
Figura 4.3: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para la estación M1271 (Guayaquil, Guayas)	66
Figura 4.4: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para la estación M0002 (Quito, Pichincha).....	66
Figura 4.5: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación tiempo de integración 1-minuto, para la estación M0102 (El Ángel, Carchi)	67
Figura 4.6: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para la estación M0008 (Puyo, Pastaza).....	67
Figura 4.7: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para las cinco (5) estaciones	68
Figura 4.8: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (Palesema, Esmeraldas)	70
Figura 4.9: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (Guayaquil, Guayas) .	70
Figura 4.10: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (Quito, Pichincha)....	71
Figura 4.11: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (El Ángel, Carchi)	71
Figura 4.12: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (Puyo, Pastaza)	72
Figura 4.13: Distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación, medida con tiempo de integración de 60-min y estimada con tiempo de integración de 1-min, en Rango I del modelo Matricciani, estación M1271.....	77
Figura 4.14: Distribuciones acumulativas $P_a(R)$ y $P_b(R)$, escaladas (por el factor P_0/P_{R_0}), para determinar el punto (P_2, R_2) , estación M1271	79

Figura 4.15: Distribución acumulativa estimada para un tiempo de integración de 1-minuto, en los Rangos II y III del modelo de Matricciani, estación M1271	81
Figura 4.16: Distribución acumulativa estimada para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M1271, usando el modelo de Matricciani.....	81
Figura 4.17: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M1249	84
Figura 4.18: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M1271	84
Figura 4.19: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M0002	85
Figura 4.20: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M0102	85
Figura 4.21: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M0008	86
Figura 4.22: Convergencia del algoritmo PSO en la obtención del modelo Ito-Hosoya Modificado-2 (IH-M2)	100
Figura 4.23: Convergencia del algoritmo PSO en la obtención del modelo Chebil-Rahman Modificado-2 (CR-M2)	101
Figura 4.24: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M1249	103
Figura 4.25: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M1271	104
Figura 4.26: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M0002	104
Figura 4.27: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M0102	105
Figura 4.28: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M0008	105
Figura 5.1: Distribución acumulativa estimada para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M1271, usando SST	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coeficientes para k_H	27
Tabla 2: Coeficientes para k_V	27
Tabla 3: Coeficientes para α_H	27
Tabla 4: Coeficientes para α_V	27
Tabla 5: Valores de los coeficientes de regresión k y α	28
Tabla 6: Valores de los parámetros λ y γ del modelo Moupfouma y Martin refinado	43
Tabla 7: Estaciones meteorológicas de la base de datos original.....	58
Tabla 8: Estaciones meteorológicas de la base de datos original (continuación)	59
Tabla 9: Valores M_m , M y U , para las cinco (5) estaciones meteorológicas.....	72
Tabla 10: Temperatura media mensual [°C], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271.....	82
Tabla 11: Valores de MT_i [mm], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271.....	82
Tabla 12: Valores de N_i [mm], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271.....	82
Tabla 13: Valores de r_i [mm/h], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271.....	83
Tabla 14: Valores de $P0_i$ [%], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271.....	83
Tabla 15: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M1249 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos.....	89
Tabla 16: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M1271 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos.....	90
Tabla 17: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M0002 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos.....	91

Tabla 18: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M0102 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos.....	92
Tabla 19: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M0008 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos.....	93
Tabla 20: Valor RMSE global.....	94
Tabla 21: Valores de los parámetros de ajuste del modelo Ito-Hosoya Modificado-1, obtenidos mediante la técnica Cuasi-Newton	97
Tabla 22: Valores de los parámetros de ajuste del modelo Chebil-Rahman Modificado-1, obtenidos mediante la técnica Cuasi-Newton	98
Tabla 23: Valores de los parámetros de ajuste del modelo Ito-Hosoya Modificado-2, obtenidos mediante la técnica PSO	99
Tabla 24: Valores de los parámetros de ajuste del modelo Chebil-Rahman Modificado-2, obtenidos mediante la técnica PSO	101
Tabla 25: Valor RMSE global, incluyendo los nuevos modelos.....	102
Tabla 26: Atenuación para Enlace 1, utilizando el modelo ITU-Lluvia.....	111
Tabla 27: Atenuación para Enlace 2, utilizando el modelo ITU-Lluvia.....	112
Tabla 28: Valores promedio mensuales de la velocidad del viento [m/s], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271.....	113
Tabla 29: Atenuación para Enlace 1, utilizando la versión más reciente del modelo SPSP	115
Tabla 30: Atenuación para Enlace 2, utilizando la versión más reciente del modelo SPSP	116

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido una avalancha en el interés de planificar y dimensionar, así como de implementar, sistemas de comunicaciones que operen en frecuencias superiores a 10 GHz, con el objetivo de poder satisfacer la “sed” de los usuarios por múltiples servicios de telecomunicaciones de banda ancha, por ejemplo, desde sus unidades terminales.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que si bien con dichas frecuencias una operadora de telecomunicaciones tiene a su disposición una banda de espectro mayor, que le permite proporcionar a sus usuarios servicios con mayores velocidades de transmisión, el empleo de frecuencias superiores a 10 GHz exige prestar atención a la atenuación causada por las lluvias en el sistema, factor que impacta de manera significativamente negativa tanto la cobertura como el desempeño de los sistemas de comunicaciones que operan en las referidas frecuencias. Por ello, se erige como un aspecto de vital importancia en la planificación y dimensionamiento (PyD) de esos sistemas, poder estimar con la mayor precisión posible la atenuación por lluvias, para con ello poder incluir un margen de desvanecimiento adecuado en el sistema, de manera que en condiciones de lluvias el mismo siga operando satisfactoriamente.

Ahora bien, la precisión en la predicción del desvanecimiento por lluvias pasa, entre otros aspectos, por el uso en los modelos de estimación considerados para dicha predicción, de valores de tasa de precipitación lo más correlacionados posible con las características climáticas de la localidad de interés. Para ello, el caso ideal es contar con tasas de lluvia medidas con tiempo de integración de 1-minuto (que es el tiempo de integración máximo permitido por la ITU para fines de radiopropagación), en la localidad en cuestión. Pero como no siempre es posible disponer de esa información, sino de estadísticas de lluvia con tiempos de integración mayores, por ejemplo, 1-hora, 1 día y hasta, 1-mes, una alternativa es recurrir a los valores de tasa de precipitación, con tiempo de integración de 1-minuto, suministrados por la ITU para el globo terráqueo, o en su defecto, utilizar modelos existentes en la literatura para convertir distribuciones acumulativas de tasa de precipitación medida con tiempo de

integración elevados, a estadísticas de lluvia con tiempo de integración de 1-minuto. La primera de las alternativas tienen la desventaja de que los valores de tasa de precipitación aportados por la ITU para aplicaciones de radiopropagación han sido obtenidos a partir de mediciones satelitales no necesariamente precisas para varias de las localidades a nivel mundial. Por su parte, la segunda alternativa tiene la desventaja, para el caso concreto del Ecuador, de que ninguno de los modelos de conversión de tiempos de integración de estadísticas de lluvia reportados en la literatura han sido desarrollados para las condiciones climáticas propias del Ecuador, por lo que, los valores de tasa de precipitación obtenidos con esos modelos para el país, también son imprecisos.

Con el fin de disminuir la imprecisión, en el Ecuador, inherente a las dos alternativas para la estimación de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto arriba mencionadas, en este trabajo de titulación se desarrollan nuevos modelos para esa predicción, basados en las características de precipitación propias del país, materializadas en las bases de datos suministradas para tal fin por el INAMHI, con tasas de lluvia registradas con tiempo de integración de 1-minuto. La estrategia utilizada para el desarrollo de los nuevos modelos, es partir de modelos ya existentes, específicamente, los modelos Chebil-Rahman e Ito-Hosoya, y con la utilización de técnicas de regresión no lineal, así como de la técnica denominada optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*), perteneciente a la familia de inteligencia computacional, ajustar o sintonizar los mencionados modelos a las mediciones de la tasa de precipitación aportadas por el INAMHI.

Organización del texto del trabajo de titulación

En el primer capítulo, se plantea el problema a resolver, así como la justificación de su resolución y la descripción de lo que se propone para la misma. Seguidamente, se establecen los objetivos a seguir para resolver el problema y la metodología configurada para la conquista de cada uno de dichos objetivos. Este capítulo cierra con la delimitación del alcance del trabajo.

En el segundo capítulo, se abordan los aspectos más importantes del marco teórico relacionado del trabajo. De esa manera, se estudian los asuntos más resaltantes del fenómeno de atenuación por lluvias, así como el concepto de atenuación específica

por lluvias. Asimismo, se abordan de manera sucinta las técnicas de regresión no lineal empleadas en el trabajo para el desarrollo de los nuevos modelos. También se analiza brevemente la técnica bioinspirada PSO.

En el tercer capítulo, se estudian los detalles más resaltantes de los modelos para la estimación de dicha atenuación y los modelos para la conversión de tiempo de integración de estadísticas de lluvia, utilizados en el trabajo.

En el cuarto capítulo, se analizan las bases de datos de tasa de precipitación, con tiempos de integración de 1-minuto, aportadas por el INAMHI, para generar las distribuciones acumulativas de la mencionada tasa, necesarias tanto para la evaluación de los modelos de conversión de estadísticas de lluvia abordados en el tercer capítulo, como para el desarrollo de los nuevos modelos. Además, en este capítulo, se aplican las técnicas de regresión lineal y la técnica PSO, para la obtención de los nuevos modelos.

Finalmente, en el quinto capítulo, se utilizan los nuevos modelos desarrollados, para suministrar los valores de la tasa de precipitación usados por los modelos de atenuación por lluvias, también abordados en el tercer capítulo, para la estimación de dicha atenuación en enlaces inalámbricos terrestres hipotéticos en Ecuador, operando en frecuencias superiores a 10 GHz.

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Identificación del Problema

Las lluvias representan el factor que causa la mayor parte de la atenuación de la señal en sistemas inalámbricos de comunicaciones (terrestres y satelitales) que operan en frecuencias superiores a 10 GHz, deteriorando la recepción de la señal hasta tal punto que puede dejar fuera de operación al sistema de comunicaciones. Ello se debe a que, a partir de esas frecuencias, la longitud de onda de la señal, λ , disminuye tanto que su orden de magnitud es similar o menor al tamaño de las gotas de agua que conforman la celda de lluvia. Por tanto, la onda electromagnética que incide en dichas gotas deberá cumplir con las condiciones de contorno en la superficie de separación aire-agua, trayendo como consecuencia que parte de la energía electromagnética asociada a la onda se refracta dentro del agua de las gotas produciendo pérdidas de la señal por absorción (calentamiento), parte se dispersa hacia otras direcciones diferentes a la dirección hacia el receptor y la parte restante de la energía en cuestión es la que alcanza al receptor (Pérez-García, 2003; Freeman, 2007). El efecto total es la atenuación en el nivel de la señal recibido, tal como muestra la Figura 1.1 (Obiyemi, 2013), la cual aumenta, entre otros parámetros, con el incremento de la tasa de precipitación y la frecuencia de operación. Dicha atenuación deteriora la relación señal-interferencia (S/I) o la relación portadora-ruido (C/N, *Carrier-to-Noise*) así como la BER (*Bit Error Rate*), del sistema receptor, como es ilustrado en la Figura 1.2 (Noussi y Gremont, 2012), pudiendo llegar a la situación de que la S/I o la C/N sea menor a la mínima requerida por el receptor o la BER sea superior a la máxima permitida, para interpretar adecuadamente la señal recibida, lo que ocasionará la pérdida total de la recepción.

Ahora bien, la forma más eficiente de mitigar el efecto perjudicial de la atenuación por lluvias en los mencionados enlaces es estimar dicha atenuación, de la manera más precisa posible, durante la fase de planificación y dimensionamiento (PyD) de los mismos, para la localidad en la que se instalará la antena del receptor.

Para tal estimación, se recurre al uso de modelos de atenuación por lluvias, cuya precisión en la mencionada predicción dependerá de la correlación que haya entre el modelo utilizado y las características de propagación, en este caso, especialmente, la tasa de precipitación, típicas de la localidad.

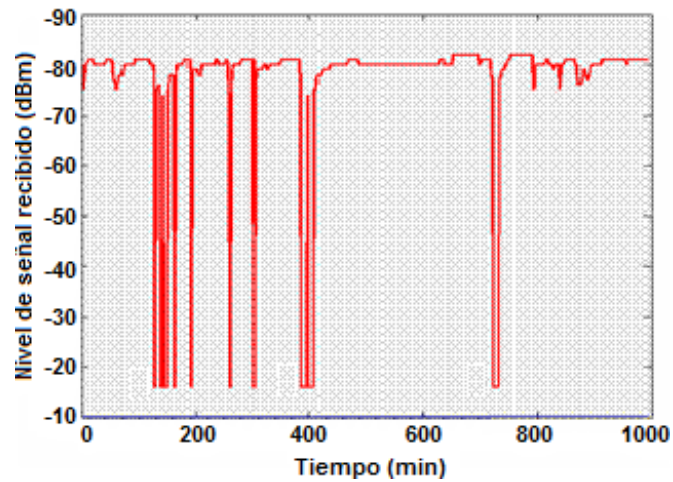


Figura 1.1: Comportamiento típico de la relación S/I de un sistema inalámbrico de comunicaciones ante presencia de eventos de lluvia en el enlace.

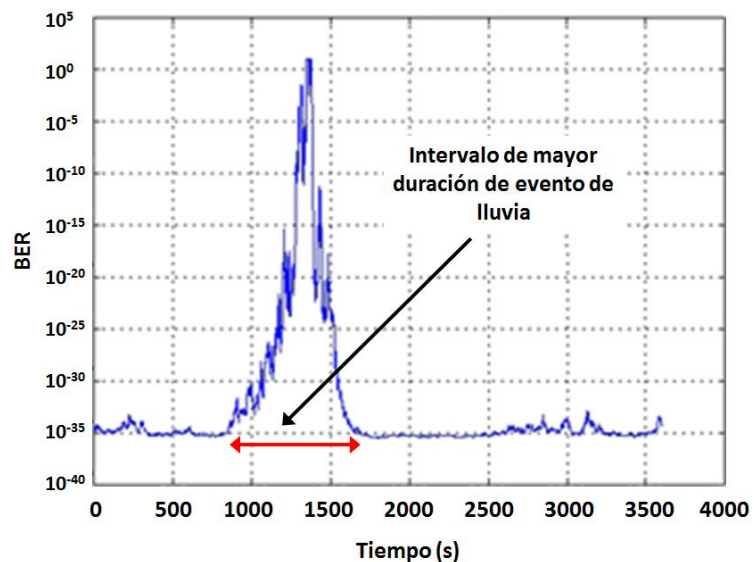


Figura 1.2: Comportamiento típico de la BER de un sistema inalámbrico de comunicaciones ante presencia de eventos de lluvia en el enlace.

Una adecuada estimación de la atenuación por lluvias permitirá dimensionar adecuadamente, por ejemplo, la potencia de los transceptores, ganancia de las antenas, entre otros. En caso contrario, el sistema podrá resultar sobredimensionado, lo que redundará en una inversión económica innecesaria (generalmente muy onerosa), debido a que se utilizarán transmisores con potencias mayores a las realmente requeridas, mayor cantidad de transmisores a los necesitados, antenas de mayor tamaño al necesario, etc. La imprecisión en la predicción de la atenuación por lluvias también puede producir un sistema subdimensionado, en cuyo caso la cobertura real del sistema, durante la ocurrencia de eventos de lluvias en alguna parte del enlace, será menor a la planificada, derivando en el deterioro parcial o total del nivel de señal recibido y, por tanto, en el perjuicio para los usuarios.

Tal como fue mencionado anteriormente, uno de los parámetros de los cuales depende la atenuación por lluvias es la tasa de precipitación; de hecho, es el que mayor impacto tiene, junto con la frecuencia de operación y la distancia transmisor-receptor. En ese sentido, además de la correlación que se desea exista entre el modelo de atenuación por lluvias utilizado y las características de precipitación de la localidad de recepción de la señal, para que la estimación de la atenuación sea lo más precisa posible también se requiere que la información de tasa de precipitación utilizada por el modelo para el cálculo de dicha atenuación sea la más parecida posible a la real, siendo la situación ideal la que corresponde a mediciones locales de la tasa de precipitación en cuestión, con tiempos de integración (muestreo) de un (1) minuto (1-minuto) o menos, según lo establecido por la ITU (*Internacional Telecommunication Union*) (ITU, 2015a, ITU, 2015b), para que de esa manera, la atenuación estimada considere la tasa de precipitación más cercana a la que realmente tiene lugar. En la Figura 1.3 (Jung y col, 2008), se puede observar la diferencia entre una distribución acumulativa de tasa de precipitación obtenida experimentalmente, por ejemplo, con un tiempo de integración de 1-minuto (curva de color rojo) y la distribución acumulativa, obtenida también de forma experimental, para tiempos de integración mayores. Esa diferencia tiene un impacto directo en los valores de atenuación por lluvias que se estimen para un determinado sistema inalámbrico de telecomunicaciones,

ya que dicha atenuación depende, como se ha dicho, entre otros factores, de la tasa de precipitación.

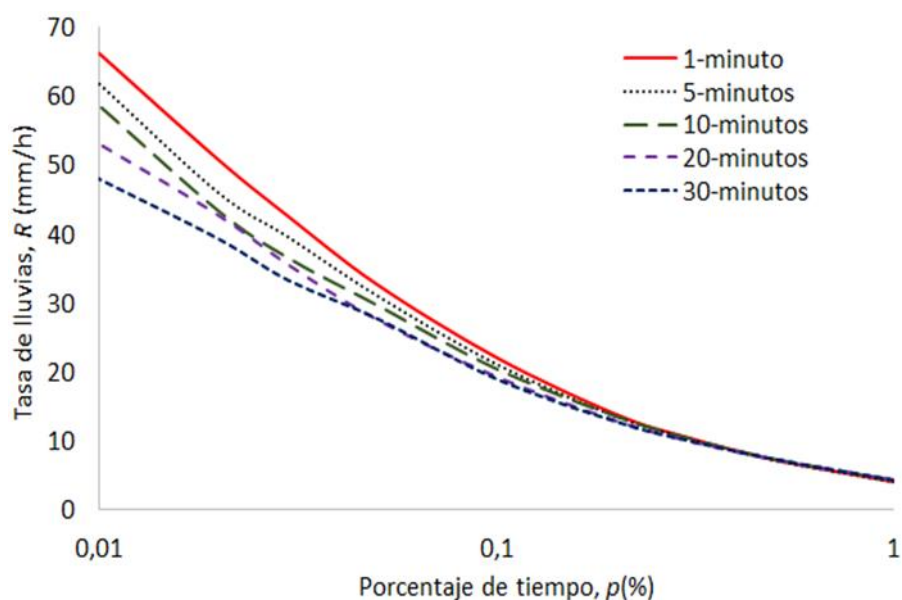


Figura 1.3: Ejemplo de distribuciones acumulativas para varios tiempos de integración

Dado que en el Ecuador no se cuenta con mediciones de la intensidad de lluvia con tiempos de integración de 1-minuto en todo el territorio, se debe recurrir a una de las siguientes alternativas para determinar las distribuciones acumulativas con ese tiempo de integración en los lugares en los que no se tengan mediciones al respecto:

- a) Distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación del modelo de la Recomendación ITU-R P.837-6 (ITU, 2012), o su versión más reciente, es decir, Recomendación ITU-R P.837-7 (2017a), cuya aplicación en el Ecuador redundará en imprecisión en la predicción de la atenuación por lluvias, ya que, la estimación de dicha tasas de lluvia, por parte de los referidos modelos, se hace en base a mediciones realizadas vía satélite y no con la precisión de las que se llevan a cabo directamente en el país.
- b) Modelos que permiten obtener distribuciones acumulativas de precipitación para tiempos de integración de 1-minuto, a partir de distribuciones

acumulativas obtenidas con tiempos de integración mayores, por ejemplo, 1-hora, 1-día o, inclusive, 1-mes. Entre esos modelos se encuentran, por ejemplo, Ajayi y Ofoche (1984), Burgueño y colaboradores (1988), Rice-Holmberg (1973), Chebil-Rahman (1999), Ito-Hosoya (2002), Matricciani (2011), Lee y colaboradores (2000), entre otros. Sin embargo, debido a que dichos modelos fueron desarrollados en base a características de precipitación de otros países, su uso para Ecuador también acarreará consigo imprecisión en la estimación de la atenuación por lluvias.

1.2 Justificación

Desde hace varias décadas, el incremento en el uso de las bandas de frecuencias de operación por encima de 10 GHz para sistemas inalámbricos de comunicaciones ha sido vertiginoso, debido principalmente a la necesidad de disponer de un ancho de banda cada vez mayor para así poder ofrecer a los usuarios mayor cantidad de servicios de manera simultánea y a velocidades de transmisión, también cada vez mayores, tal es el caso, por ejemplo, de estándar IEEE 802.11ay (Ghasempour y col, 2017), el cual opera en 60 GHz y pretende ofrecer la mayor velocidad de transmisión, hasta ahora planificada, entre los estándares IEEE 802.11, específicamente, hasta 100 Gbps.

Por ello, es fundamental poder predecir de la forma más precisa posible la atenuación que tiene lugar por causa de las lluvias en los mencionados sistemas, lo cual hace imperiosa la tarea de poder contar con un modelo que permita obtener, en Ecuador, distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación para tiempos de integración de 1-minuto, adaptado a las características de lluvia del país.

Dichos modelos serán obtenidos a partir de mediciones de la tasa de lluvia, realizadas en el país, por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), tanto con tiempos de integración de 1-minuto, como por tiempos de integración de una hora o más.

Es importante resaltar que, la presente propuesta de trabajo de titulación también usará como referencia base el trabajo de titulación Santacruz (2017), desarrollado en la Maestría en Telecomunicaciones (MET) de la ESPOL y en el

cual se estima la atenuación por lluvias en sistemas de comunicación vía satélite en Guayaquil y Quito, en base a distribuciones acumulativas de tasa de precipitación medida, así como la estimada por el método de Matricciani, ambas con tiempos de integración de 1-minuto. Sin embargo, en dicho trabajo no se desarrolla un modelo de conversión de tiempos de integración de dichas distribuciones como tal, que es el objetivo central del presente trabajo de titulación.

1.3 Descripción de la Solución Propuesta

La solución propuesta para resolver el problema planteado se basa en el empleo de técnicas de regresión no lineal y la técnica de inteligencia computacional conocida como optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*), para sintonizar o ajustar modelos existentes en la literatura para la conversión de tiempos de integración de estadísticas de lluvia, a las mediciones de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto suministradas para este trabajo por parte del INAMHI.

Las técnicas en cuestión tienen la particularidad de minimizar el error existente entre los valores medidos (en este caso, los referidos a la tasa de precipitación, con tiempo de integración de 1-minuto, derivados de la base de datos aportada por el INAMHI) y los valores estimados mediante los modelos existentes en la literatura considerados en este trabajo para su optimización.

1.4 Objetivos del Trabajo de Titulación

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar modelos para convertir distribuciones acumulativas de tasa de precipitación desde elevados tiempos de integración, a 1-minuto de tiempo de integración, en Ecuador.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar los principales aspectos teóricos relacionados con el efecto de las lluvias en el nivel de señal recibido en enlaces operando en frecuencias superiores a 10 GHz.

- Analizar diversos modelos de conversión de distribuciones acumulativas de tasa de precipitación desde diferentes tiempos de integración a un tiempo de integración de 1-minuto, existentes en la literatura.
- Estudiar técnicas de regresión no lineal y técnicas de inteligencia computacional, con miras a ser utilizadas en el desarrollo de los modelos objeto del trabajo de titulación.
- Analizar la base de datos de mediciones de la tasa de precipitación de Ecuador, para la obtención de las distribuciones acumulativas de dichas tasas que serán utilizadas en el desarrollo de los nuevos modelos de conversión de estadísticas de lluvia.
- Desarrollar, usando técnicas de regresión no lineal y la técnica bioinspirada PSO, los modelos de conversión de distribuciones acumulativas de tasa de precipitación desde tiempos de integración elevados, a un tiempo de integración de 1-minuto, en Ecuador.
- Comparar, en términos de la raíz del error medio cuadrático (RMSE, *Root Mean Square Error*), el desempeño de los modelos desarrollados y algunos de los existentes en la literatura en la predicción de las distribuciones acumulativas de tasa de precipitación para tiempos de integración 1-minuto.
- Aplicar los modelos de conversión desarrollados, en la estimación de la atenuación por lluvias en enlaces inalámbricos terrestres en Ecuador.

1.5 Metodología

La metodología utilizada está basada en investigación bibliográfica, investigación a nivel de campo y, finalmente, comparación.

La revisión bibliográfica es acerca de: a) los aspectos teóricos del efecto que tienen las lluvias sobre el nivel de señal recibido en enlaces que operan en frecuencias superiores a 10 GHz; b) diversos modelos de conversión de distribuciones acumulativas de tasa de precipitación desde diferentes tiempos de integración, a un tiempo de integración de 1-minuto; c) las técnicas de regresión

no lineal y la técnica de inteligencia computacional, que serán utilizadas para desarrollo de los modelos objeto de la investigación propuesta.

La investigación a nivel de campo está relacionada con las mediciones aportadas por INAMHI, de las distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto.

Seguidamente, se desarrollan los modelos de conversión de distribuciones acumulativas de tasa de precipitación desde diferentes tiempos de integración, a un tiempo de integración de 1-minuto, en Ecuador. Para ello, se analiza la relación existente entre las distribuciones acumulativas de lluvia, medidas en diversas localidades del país, con tiempos de resolución de 1-minuto, y las distribuciones acumulativas de dicha lluvia, medidas en las mismas localidades, con tiempos de integración mayores. Los modelos se desarrollan recurriendo a técnicas de regresión no lineal (por ejemplo, Quasi-Newton, Simplex, Hooke-Jeeves Pattern Moves y Rosenbrock Pattern Search) (2012) y utilizando la técnica de inteligencia computacional, PSO (*Particle Swarm Optimization*) (Delgado-Cuadro, 2017), para realizar ajustes a modelos de conversión existentes en la literatura, concretamente, Rice-Holmberg, Chebil-Rahman, Moupfouma-Marin e Ito-Hosoya, en base a las mediciones analizadas.

Luego, se lleva a cabo la comparación del desempeño, en términos de los valores de tasa de precipitación medidos, del modelo desarrollado en este trabajo y algunos de los modelos de la literatura. Para tal comparación se emplea como métrica la raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE, *Root Mean Square Error*).

Finalmente, se aplicarán los modelos desarrollados, en la estimación de la atenuación por lluvias en enlaces inalámbricos de comunicación en Ecuador.

1.6 Alcance

Se obtienen nuevos modelos, ajustados al caso del Ecuador, que permiten convertir distribuciones acumulativas de lluvias medidas con tiempos de integración elevados, a sus distribuciones acumulativas equivalentes con tiempo de integración de 1-minuto.

Se sistematiza una base de datos de distribuciones acumulativas de tasa de precipitación en Ecuador, con fines de aplicación en el área de telecomunicaciones.

CAPÍTULO 2

2. ATENUACIÓN POR LLUVIAS EN ENLACES INALÁMBRICOS DE COMUNICACIONES Y ALGUNAS TÉCNICAS PARA EL AJUSTE DE DATOS

2.1 Absorción y Dispersión Causadas por las Gotas de Lluvia

Cuando una onda electromagnética, cuya frecuencia, f , de portadora es igual o superior a 10 GHz, incide en las gotas de agua que conforman una celda de lluvia, la energía asociada a dicha onda se atenúa producto, por un lado, a la absorción de la energía por parte de las gotas de lluvias y, por otro lado, a la dispersión que sufre en la onda en las referidas gotas (Pérez-García, 2003). Como es sabido, a medida que la frecuencia, f , aumenta, la longitud de onda, λ , disminuye; por ello, a partir de 10 GHz, la longitud de onda de la señal que viaja entre el transmisor y receptor de un sistema inalámbrico de comunicaciones, se torna del mismo orden de magnitud de la gota de lluvia, razón por la cual la onda deja de ser “transparente” (eléctricamente hablando) para la gota debido a que ésta última pasa a comportarse como un medio dieléctrico imperfecto, lo que provoca los mencionados efectos de absorción y dispersión.

La absorción se debe a la conductividad del agua, que produce una disipación térmica, calentando la gota de lluvia, tal como se ilustra en la Figura 2.1.

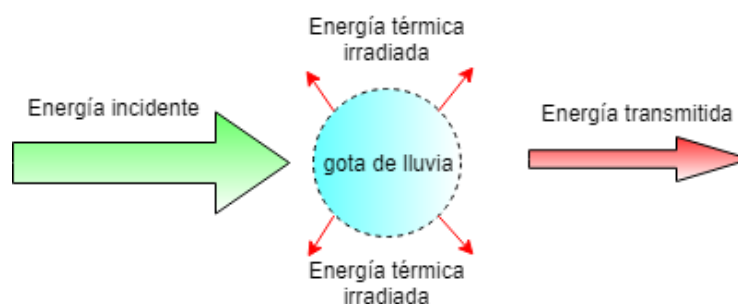


Figura 2.1: Atenuación por absorción de energía en la gota de lluvia.

Por su parte, la dispersión se debe a las modificaciones que sufre la onda electromagnética para satisfacer las condiciones de contorno de cada gota de

lluvia. En este caso no hay pérdida de energía, sino que se producen cambios en la dirección de incidencia de la onda, dirección que determina el tipo de dispersión causado por la gota:

- Dispersión inversa: es decir, en sentido contrario a la dirección de incidencia de la onda. Este mecanismo es aprovechado por radares.
- Dispersión lateral: la dirección de la onda se desvía de la trayectoria original de propagación.
- Dispersión directa: la energía de la onda es re-dirigida en la misma dirección original de incidencia en la gota.

En la Figura 2.2, se muestran las posibles direcciones que puede tomar la onda electromagnética por causa de la dispersión.

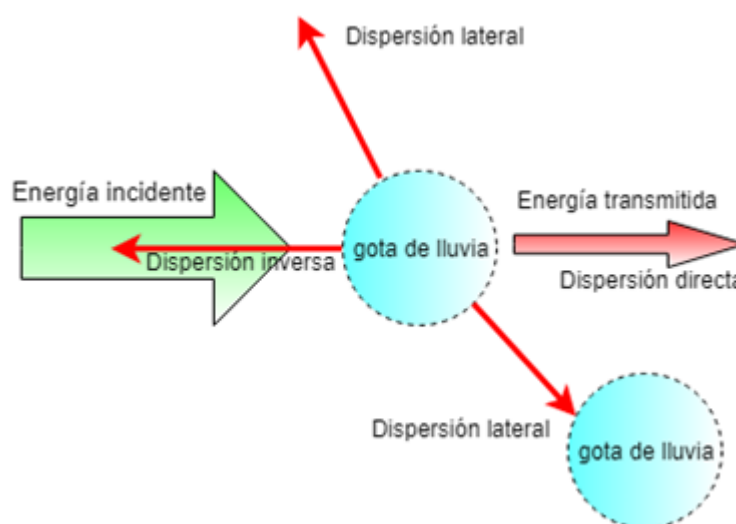


Figura 2.2: Atenuación por dispersión de energía en la gota de lluvia.

2.2 Influencia del Tamaño de las Gotas de Lluvia

La gota de lluvia se forma como tal, siempre y cuando el diámetro de la misma oscile, por lo general, entre 0,01-0,02 mm y 6-8 mm. Para diámetros inferiores a 0,01-0,02 mm, la gota se evapora rápidamente convirtiéndose en “goticas de nubes” (Pickover, 2008). Para el caso de diámetros superiores a 6 mm la tensión superficial ejercida sobre la gota no es suficiente como para mantener su

cohesión, por lo que la gota se rompe dividiéndose en gotas de menor diámetro (D'Adderio, 2014).

Entre los primeros investigadores en predecir la distribución del tamaño de las gotas de agua de las lluvias se encuentran Laws y Parsons (L-P) (Hardy, 1992; Jian y col, 1997), junto con Marshall y Palmer (M-P) (1948), quienes propusieron para la referida distribución una ley de potencia, aplicando una regresión exponencial a sus observaciones, que ajusta a la intensidad de lluvia R , los parámetros considerados por la distribución del tamaño de las gotas. La distribución L-P fue desarrollada sólo para gotas de agua de lluvia con diámetros mayores a 1 mm (Sekine y col, 1987). Por su parte, para gotas pequeñas (diámetros menores a 1 mm) se recomienda la distribución propuesta por Marshall y Palmer (Pérez-García, 2003).

Para el caso de regiones tropicales, las cuales se caracterizan por presentar lluvias intensas, se sugiere utilizar la distribución lognormal (Ajayi y Olsen, 1985; Zhang y Moayeri, 1999), mientras que para las localidades geográficas de latitudes altas, con lluvias menos intensas, se puede emplear la distribución gamma (Ulbrich, 1983; Johnson y col, 2014).

Por su parte, para lloviznas, cuyas gotas de agua tienen diámetros que oscilan entre 0,2 mm y 0,5 mm (Kovacevic y Veljovic, 2018), se puede usar distribución lognormal (vanZanten y col, 2005) o distribución de Weibull (Adetan y Afullo, 2012), mientras que para “duchas” de lluvia, cuyo diámetro de gotas de agua está alrededor de los 2 mm (Owolawi, 2006) también se puede recurrir a la distribución de Weibull (Adetan y Afullo, 2012).

Ahora bien, para el caso de las gotas de agua con diámetros muy pequeños, la valoración de su densidad numérica puede ser imprecisa si se utilizan los instrumentos habituales para la detección y registro de gotas de lluvia, debido a la masa muy pequeña de dichas gotas y su baja velocidad de caída, imprecisión que se acentúa a medida que la frecuencia de la onda electromagnética aumenta (García del Pino, 2003). Por ello, para las gotas en cuestión se suelen utilizar aparatos como los disdrómetros (Tokay y col, 2013), los cuales permiten detectar con elevada exactitud el tamaño de las gotas. Incluso, con el disdrómetro de

vídeo de alta resolución (Bringi y col, 2018) y el disdrómetro óptico (Angulo-Martinez, 2018), además del tamaño de las gotas de agua, se puede medir la velocidad y hasta la forma de las mismas.

En todo caso, los diámetros de las gotas de agua de las lluvias registradas en diversos lugares de la Tierra indican una significativa variabilidad de acuerdo a la región geográfica considerada para el estudio. En ese sentido, se tiene, por ejemplo, que las zonas tropicales tienen lugar mayores intensidades de lluvia y mayores tamaños de las gotas, mientras que para las zonas templadas o de latitudes medias, las lluvias son menos intensas y las gotas tienen menor tamaño (Pérez-García y col, 2018). En ese sentido, considerando que la atenuación específica por lluvias y, por tanto, la atenuación por lluvias, en un sistema inalámbrico de comunicaciones que opere en frecuencias superiores a 10 GHz depende, entre otros parámetros, de la tasa de precipitación, el tamaño de las gotas de agua que conforman dicha precipitación, juegan un rol fundamental en dicha atenuación (Adetan y Afullo, 2014).

2.3 Efecto de la Forma y Orientación de las Gotas de Lluvia

Cuando las gotas de agua que conforman una celda de lluvia comienzan a caer la forma de dichas gotas es aproximadamente esférica. Sin embargo, a medida que caen, las gotas adquieren forma de esferoide achatado debido a las fuerzas gravitacional y aerodinámica que actúan sobre ellas. Asimismo, la fuerza horizontal del viento que se ejerce sobre las mencionadas gotas, hacen con que éstas presenten una ligera inclinación de su eje vertical, tal como se muestra en la Figura 2.3, la cual fue tomada del trabajo realizado por Szakall y col (2009).

La Figura 2.3 se refiere a una gota de agua de lluvia de 6 mm de diámetro. Las líneas continua y punteada son formas teóricas de la gota de agua obtenidas utilizando dos modelos diferentes propuestos por Szakall y col, mientras que la imagen sombreada a la izquierda es la traslación de la foto de la gota de agua que aparece abajo y a la derecha, foto que fue captada dentro de un túnel vertical de viento.

Es oportuno mencionar que, las primeras mediciones reales llevadas a cabo para registrar la forma de las gotas de agua de las lluvias correspondieron a

Pruppacher y Pitter (1971), quienes formularon el modelo PP, en el que la ecuación de equilibrio de la presión en la superficie de las gotas de agua es resuelta mediante técnicas numéricas, para determinar formas de la gota para diversos tamaños.

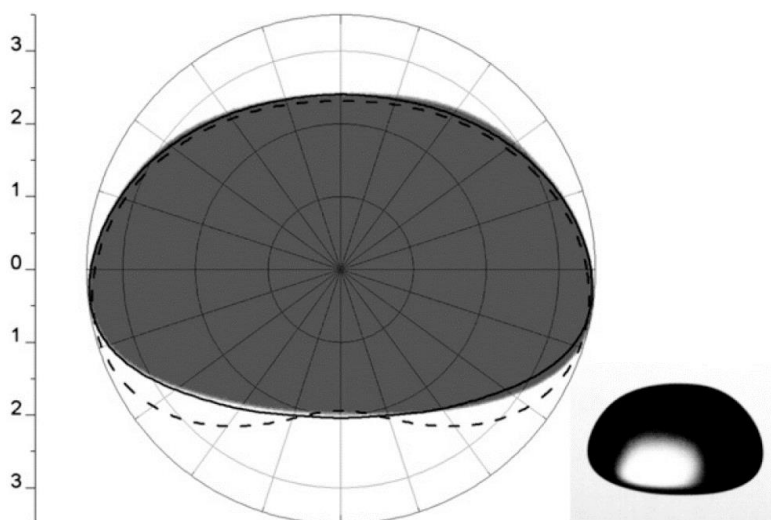


Figura 2.3: Variación del tamaño de la gota de agua según su velocidad terminal.

Debido a la forma de esferoide achatado que adquieren las gotas de agua de las lluvias a medida que caen, la atenuación específica y, por tanto, la atenuación como tal, causada por las lluvias en enlaces inalámbricos que operan en frecuencias superiores a 10 GHz, es mayor para ondas electromagnéticas polarizadas horizontalmente (Semplak, 1970; Pérez-García, 2000).

2.4 Impacto de la Velocidad Terminal de las Gotas de Lluvia

La velocidad terminal o velocidad de caída de las gotas de lluvia, parámetro que incide en la atenuación específica causada por las lluvias, depende del tamaño de la gota de agua, tal como se muestra en la Figura 2.4, que corresponde a los resultados del trabajo pionero realizado por Gunn y Kinzer (1949).

En la Figura 2.4, se observa que la velocidad de caída de la gota de agua de la lluvia aumenta progresivamente hasta que el peso de la gota se iguala a la fuerza de rozamiento del aire que actúa sobre ella. A partir de ese momento, la velocidad

se torna constante y es la denominada “velocidad límite” o “velocidad terminal”. Se puede notar que cuanto más “gorda” o pesada es la gota, más rápidamente ella cae. Para el caso de la Figura 2.4, que correspondió a gotas de agua destilada, aire estancado, presión de 760 mm, temperatura de 20 °C y humedad relativa del 50% (Gunn y Kinzer, 1949), el valor máximo de la velocidad terminal fue de aproximadamente 9 m/s.

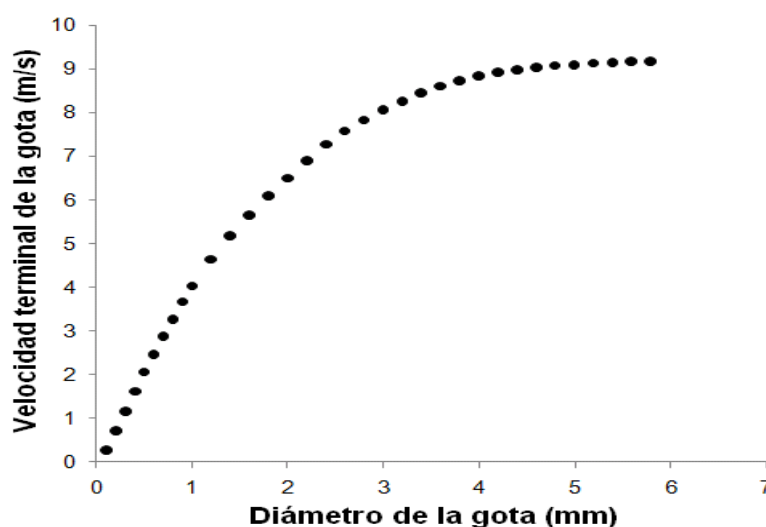


Figura 2.4: Tamaño de la gota de agua de lluvia según su velocidad terminal.

En general, valor máximo de la velocidad terminal depende no sólo del tamaño de las gotas de agua, sino también del tipo de gotas, presión atmosférica, velocidad del aire (Niu y col, 2010).

Otros autores, tales como Long y Manton (1974) han generado ecuaciones basadas, por ejemplo, en las mediciones de Gunn y Kinzer, para determinar de manera analítica la velocidad terminal de las gotas de agua de lluvia en función de la tasa de precipitación. Asimismo, más recientemente, Fraile y col (2015) proponen un modelo para la mencionada velocidad dependiente del diámetro de la gota de agua.

Cabe destacar que, la fuerza de rozamiento del aire sobre las gotas de agua de una celda de lluvia hace que dichas gotas se fraccionen, tal como se ilustra en la

Figura 2.5 (NASA, 2019), aumentando en número, el contenido de agua de dicha celda sigue siendo el mismo, por lo que, la atenuación específica varía poco con la altura debajo de la altura de lluvia (Pérez-García, 2003), es decir, la altura sobre la superficie terrestre hasta la cual existe precipitación.

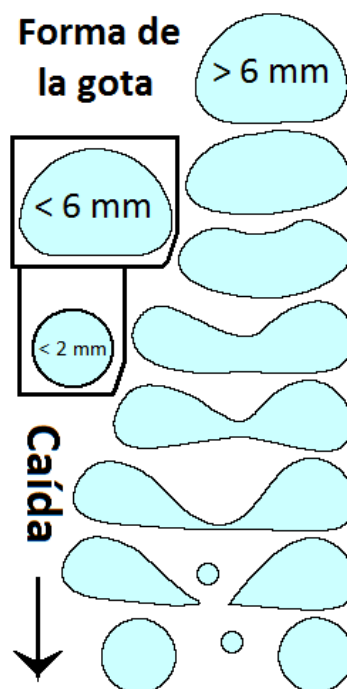


Figura 2.5: Fraccionamiento de la gota de agua de lluvia al caer.

2.5 Efecto de la Temperatura de la Lluvia

De acuerdo a la clásica teoría de dispersión de Mie (Mackowski, 2012) para gotas de agua esféricas, la atenuación específica por lluvias y, en consecuencia, la atenuación como tal, dependen, entre otros parámetros, del índice de refracción complejo del agua (Liebe y col, 1991; Odedina y col, 2010; Das y col, 2010), de manera que, si bien la parte real del referido índice disminuye a medida que aumenta la temperatura del agua, su parte imaginaria presenta un pico entre 10 GHz y 30 GHz; el cual se refleja en la atenuación específica por lluvias (Liebe y col, 1991, Pérez-García, 2003). Empero, según García del Pino (2003), el impacto de las variaciones de la temperatura de la lluvia en la atenuación específica por lluvias puede considerarse importante en sólo para frecuencias de

operación inferiores a 20 GHz, pudiéndose producir una desviación de hasta el 20% en la atenuación específica.

Por otra parte, Byers y col (1949) demostraron a medida que las gotas de lluvia caen, la temperatura de la celda de lluvia se acerca a la temperatura del aire que la circunda, mientras que Cong y Brady (2012) lograron establecer una relación entre la tasa de precipitación y la temperatura de lluvia, tal como se muestra en la Figura 2.6, mediante mediciones realizadas desde 1.961 hasta 2.010, para los meses de abril, en la provincia de Scania, Suecia.

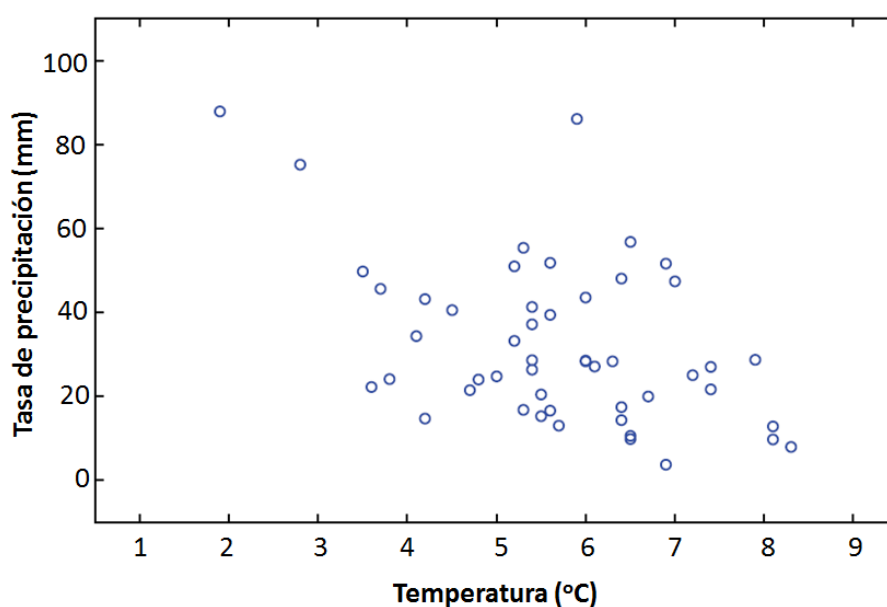


Figura 2.6: Tasa de precipitación versus temperatura de lluvia, en Scania, Suecia (mes de abril, periodo 1961-2010).

2.6 Variabilidad Espacial y Temporal de la Atenuación por Lluvias

Además de la estimación del impacto de las lluvias en un enlace de comunicaciones vía satélite operando en frecuencias superiores a 10 GHz, es de especial interés poder predecir también ese impacto en áreas más extensas, para lo cual es conveniente recurrir a modelos de la estructura de celda de lluvias, los cuales contemplan la forma de la celda y la distribución horizontal de la tasa de precipitación. Los modelos en cuestión toman en cuenta el hecho de que, en la práctica, la celda de lluvia está conformada, por un parte, por un núcleo, en el

cual la precipitación es más intensa y su diámetro es menor para tasas de precipitación más fuertes (para lluvias estratiformes el diámetro del núcleo es menor que para las lluvias convectivas o tormentosas), y por otro lado, con una extensión horizontal de la lluvia de algunos kilómetros, tal como se visualiza en la Figura 2.7 (Feral y col, 2003).

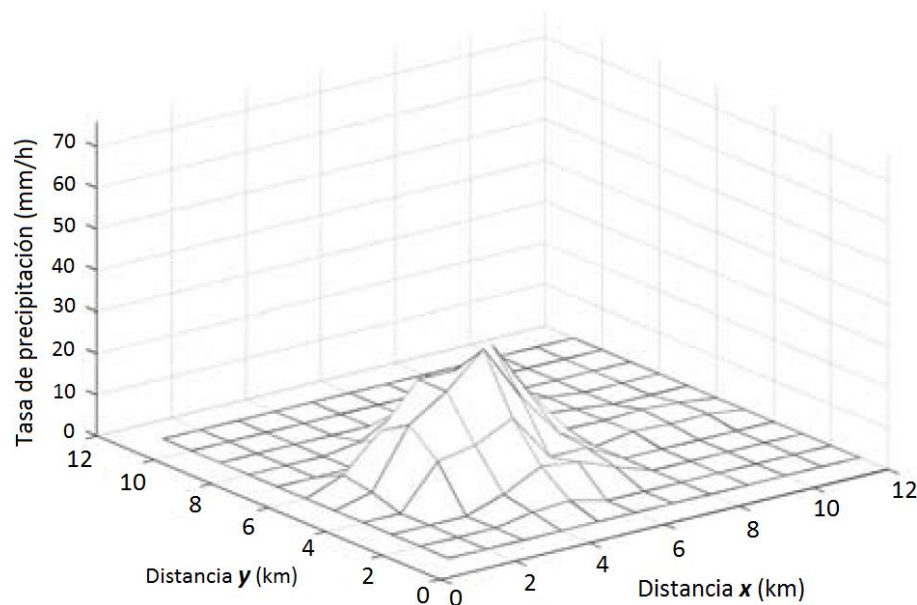


Figura 2.7: Celda de lluvia construida a partir de mediciones con radar (el valor pico de la precipitación es 30,33 mm/h y el valor umbral mínimo es 1 mm/h).

Para considerar la mencionada variación espacial de la tasa de precipitación, la mayoría de los modelos de estimación incorpora factores de corrección de la longitud del enlace (Pérez-García, 2003).

En cuanto a la variación temporal de la lluvia, una muestra de ello es la serie temporal, correspondiente a un periodo de 24 horas, mostrada en la Figura 2.8 (Pérez-García, 2003), en la cual se observa la no uniformidad en el tiempo del evento de lluvia.

La variación temporal de las lluvias es considerada en los modelos de propagación mediante el uso de la distribución acumulativa de la tasa de precipitación, la cual consiste en suministrar valores de la tasa de precipitación

excedidos durante determinado porcentajes de tiempo, los cuales corresponden a porcentajes de indisponibilidad del enlace durante un periodo anual. En la Figura 2.9, se muestra un ejemplo de una distribución acumulativa de la tasa de precipitación (Pérez-García, 2003), en ese caso, correspondiente a dos (2) periodos anuales consecutivos.

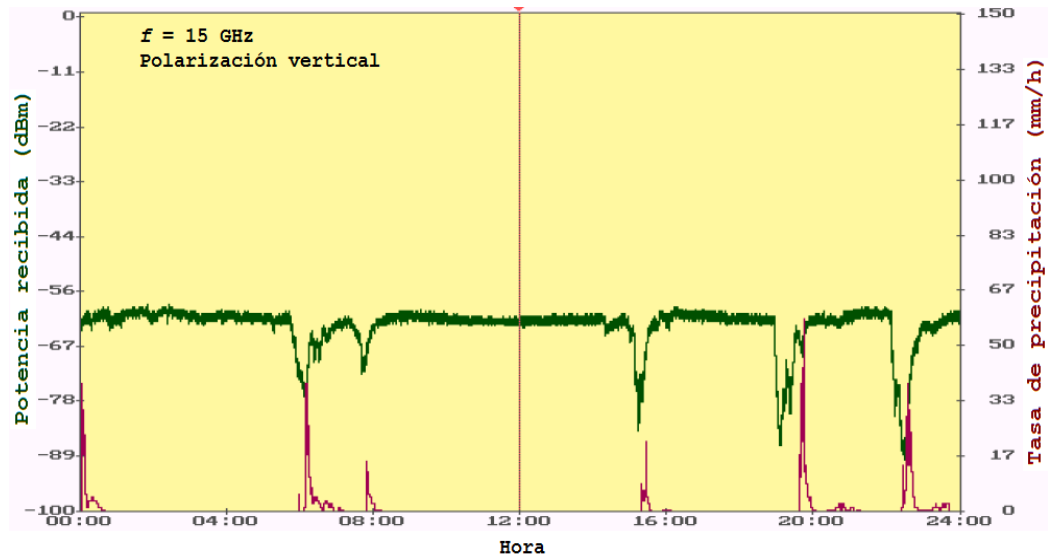


Figura 2.8: Ejemplo de serie temporal medida de tasa de precipitación.

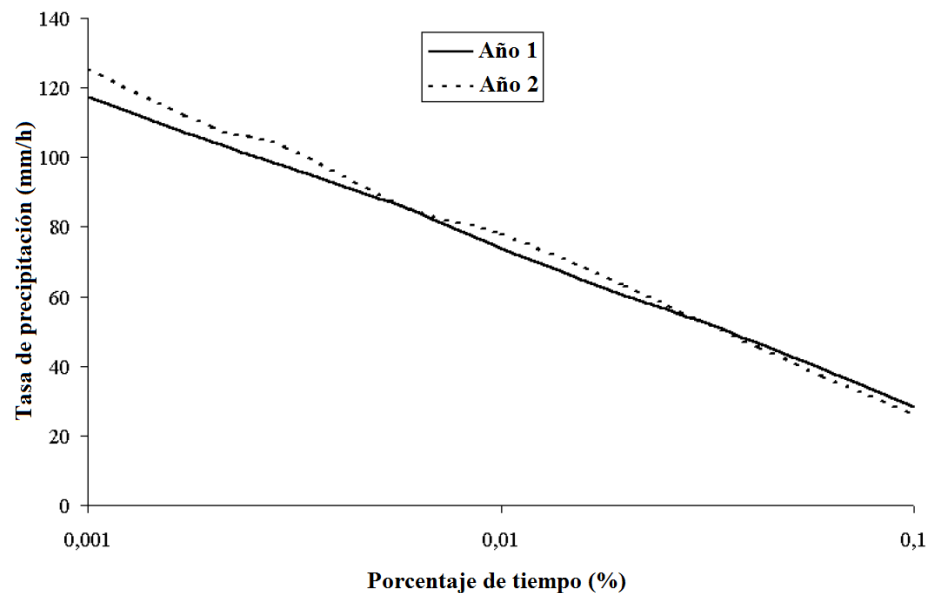


Figura 2.9: Ejemplo de distribución acumulativa de tasa de precipitación.

Finalmente, es oportuno señalar que, en la estimación de la atenuación por lluvias, en la medida de lo posible, se deben utilizar datos de tasa de lluvias que hayan sido obtenidos mediante mediciones en la localidad de interés; pero en caso de no contarse con esa información, se recomienda emplear valores de esa tasa obtenidos en regiones climáticamente similares, o en su defecto, los valores suministrados por la Recomendación ITU-R P.837-6 (2012), o por la versión más reciente de dicha recomendación (ITU, 2017).

2.7 Atenuación Específica por Lluvias

En líneas generales, el cálculo de la atenuación por lluvias en un enlace o sistema inalámbrico de comunicaciones que opere en frecuencias superiores a 10 GHz, se basa en el procedimiento propuesto por Medhurst (1965), generado de la comparación de la teoría con mediciones terrestres; procedimiento que ha sido objeto, hasta el presente, de mejoras y optimizaciones, incluso, ha sido extendido para la consideración del trayecto inclinado de enlaces satelitales.

En ese sentido, el procedimiento en cuestión está basado en los siguientes tres (3) supuestos, que describen la naturaleza de la propagación y precipitación de las ondas radioeléctricas (Ippolito, 1986):

- 1) El nivel de potencia de la onda electromagnética plana decae exponencialmente cuando la onda atraviesa el campo de lluvia.
- 2) Las gotas de agua de la lluvia son esféricas y absorben y dispersan parte de la energía de la onda que incide sobre dichas gotas.
- 3) Las contribuciones de cada gota son aditivas e independientes de las otras gotas. Esto implica, en principio, una "dispersión única" de energía; no obstante, los resultados empíricos del procedimiento permiten la incorporación de algunos efectos de "dispersión múltiple".

Dado que las lluvias constituyen un evento no uniforme ni espacial ni temporalmente hablando, la atenuación, A , de una onda electromagnética, modulada en una frecuencia superior a 10 GHz, que atraviese un campo de lluvia de extensión d [km], como el ilustrado en la Figura 2.10 (Ippolito, 2017), en su recorrido desde el transmisor hasta el receptor, puede ser determinada por:

$$A = \int_d \gamma dx \quad [\text{dB}] \quad (2.1)$$

donde γ [dB/km] es la atenuación específica por lluvias.

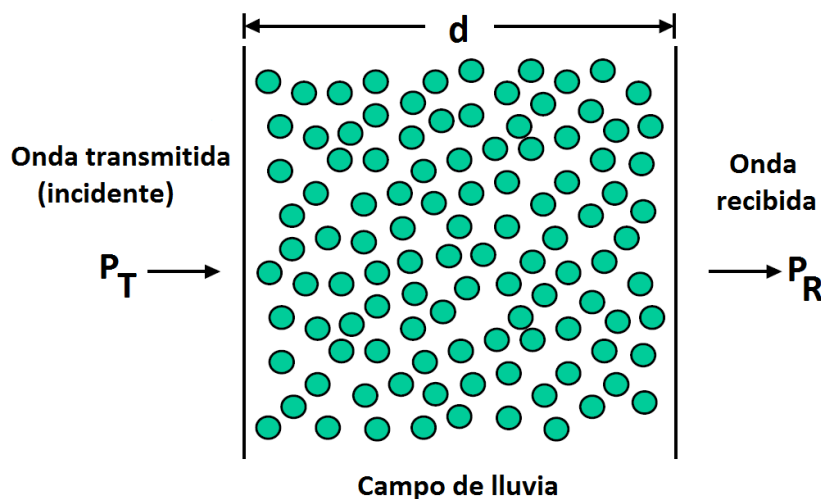


Figura 2.10: Onda electromagnética plana atravesando un campo de gotas esféricas de agua de lluvia.

En base al primero de los supuestos arriba mencionado y asumiendo que las gotas de agua del campo de lluvia están uniformemente distribuidas, cuando la onda plana incidente de potencia, P_T [W], pasa por el mencionado campo, la potencia recibida, P_R [W], después de dicho campo es dada por (Ippolito, 1986):

$$P_R = P_T e^{-kd} \quad (2.2)$$

donde k es el coeficiente de atenuación del volumen de lluvia.

A su vez, es conocido que la atenuación de la onda se determina a partir de:

$$A = 10 \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.3)$$

De las ecuaciones (2.2) y (2.3) y convirtiendo el logaritmo de la base 10 a la base del número e , se obtiene:

$$A = 4,343kd \quad [\text{dB}] \quad (2.4)$$

donde k es dada por (Ippolito, 1986):

$$k = \rho Q_t \quad (2.5)$$

Donde (Ippolito, 1986):

ρ = Densidad de gotas, es decir, el número de gotas por unidad de volumen

Q_t = Sección transversal de atenuación o extinción, expresada en unidades de área

El concepto de sección transversal fue desarrollado en los primeros estudios del radar, y describe el perfil físico que un objeto proyecta en una onda de radio. Se define como la relación entre la potencia total [W], extraída de la onda y la densidad de potencia total incidente [W/m²]; de allí, la unidad de área, m², de Q_t .

Para gotas de agua, Q_t engloba las pérdidas por absorción y dispersión causada por las gotas. En realidad, Q_t es la suma de la sección transversal de dispersión (*scattering*), Q_s , y la sección transversal de absorción (*absorption*), Q_a . La sección transversal de atenuación es función del diámetro, D , de las gotas, la longitud de onda, λ y del índice de refracción complejo del agua, m (Ippolito, 1986; Liebe y col, 1991; Odedina y col, 2010; Das y col, 2010). Por tanto:

$$Q_t = Q_s + Q_a = Q_t(D, \lambda, m) \quad (2.6)$$

Ahora bien, en un evento de lluvia las gotas de agua que conforman el campo de lluvia no son todas del mismo diámetro, por lo que, el coeficiente de atenuación se debe determinar integrando sobre todos los tamaños de gota, es decir (Ippolito, 1986):

$$k = \int_0^{D_{max}} Q_t(D, \lambda, m)N(D)dD \quad (2.7)$$

donde $N(D)$ se refiere a la distribución del tamaño de las gotas, mientras que $N(D)dD$ es el número de gotas por unidad de volumen, con diámetros entre D y $D + dD$.

De las ecuaciones (2.4) y (2.7), se obtiene la atenuación específica por lluvias, γ :

$$A/d = \gamma = 4,343 \int_0^{D_{max}} Q_t(D, \lambda, m)N(D)dD \quad [\text{dB/km}] \quad (2.8)$$

Para resolver la ecuación (2.8) se requiere del conocimiento de Q_t y $N(D)$ en función del tamaño de la gota. En ese sentido, Q_t es determinada usando la teoría

de dispersión de Mie para una onda plana que incide sobre una esfera (Mackowski, 2012). La solución de la ecuación (2.8) se ha enfocado en una expansión en serie, la que ha sido desarrollada por varios autores; así, por ejemplo, desde la solución publicada por Bohren y Huffman (1983) se tiene:

$$Q_t = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{i=1}^{\infty} (2n + 1) \text{Re}[a_n + b_n] \quad [\text{m}^2] \quad (2.9)$$

donde a_n y b_n son los coeficientes de Mie, que se tratan de funciones en números complejos que dependen de D , λ y m (Medhurst, 1965; Bohren y Huffman, 1983). Por su parte, Re indica la “parte real de”.

Si bien la ecuación (2.9) representa la solución más precisa de la sección transversal de extinción, se puede recurrir a una aproximación de dicha ecuación, conocida como aproximación de Rayleigh o dispersión de Rayleigh dependiendo del valor del parámetro de escala $\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$ (Ippolito, 1986; Li y col, 2015). Todos los estudios al respecto señalan que, la aproximación de Rayleigh aplica cuando el tamaño de la gota de agua de la lluvia es menor a la longitud de onda de radio. La diferencia entre los referidos estudios radica en el valor o intervalo de valores del parámetro α para los cuales se puede usar la dispersión de Rayleigh con resultados similares a los arrojados por la dispersión de Mie (Li y col, 2015).

En cuanto a la distribución del tamaño de las gotas, $N(D)$, diversos estudios han determinado que la misma es función de la tasa de precipitación, R , y del tipo de actividad de tormenta. Por tanto, se concluye que la atenuación específica por lluvias depende, del tamaño de las gotas de agua, la frecuencia de operación, el índice de refracción complejo del agua, la temperatura de la lluvia y la tasa de precipitación.

Es importante resaltar que, la ecuación (2.8) puede resolverse mediante métodos numéricos para valores específicos del índice de refracción, frecuencia y distribución del tamaño de las gotas. En la Figura 2.11 (Ippolito, 1986), se muestra la atenuación específica por lluvias estimada para tres (3) distribuciones de tamaño de gotas, específicamente, L-P y M-P, así como la versión para lluvia generalizada de Joss, Thams and Waldvogel (J-T-W) (Sekine y col, 2007). La estimación se hizo para una temperatura de 20°C. Se observa un incremento

rápido de la atenuación con la frecuencia hasta aproximadamente 60 GHz, luego se nivela y cae ligeramente a frecuencias más altas. También puede notarse que hasta aproximadamente 30 GHz los valores de la atenuación específica arrojada por las tres (3) distribuciones están bastante cercanos entre sí, mientras que para frecuencias más altas las distribuciones M-P y J-T-W arrojan los valores más altas de dicha atenuación.

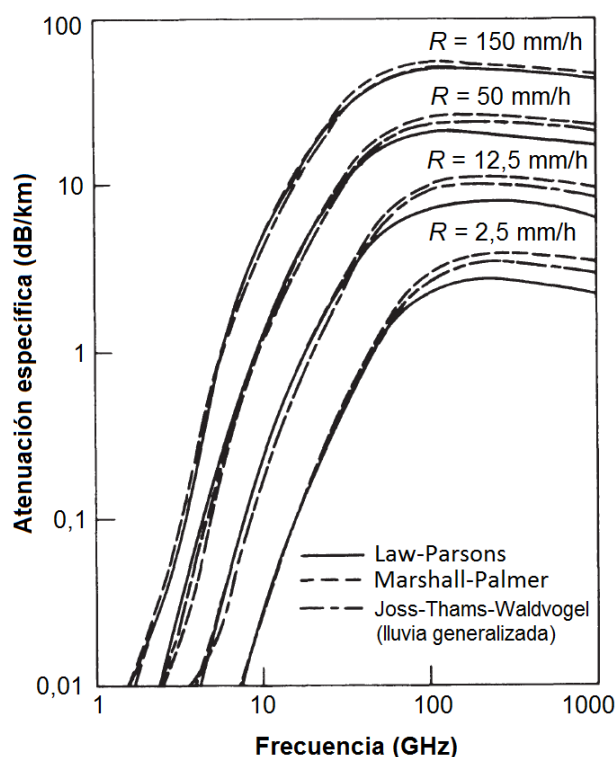


Figura 2.11: Atenuación específica para las distribuciones de tamaño de gotas L-P, M-P y J-T-W (lluvia generalizada).

De lo hasta aquí expuesto, se percibe claramente que la atenuación específica por lluvias, γ , depende, entre otros factores, de la tasa de precipitación, R . Esta dependencia ha sido estudiada desde hace varias décadas. Así, por ejemplo, en 1.944 y 1.945 Ryde y Ryde presentaron resultados teóricos de tal dependencia, para varias longitudes de onda, como los mostrados en la Figura 2.12 (Kerr, 1987), en la que los mencionados investigadores emplearon la distribución de tamaño de gotas de Law y Parsons.

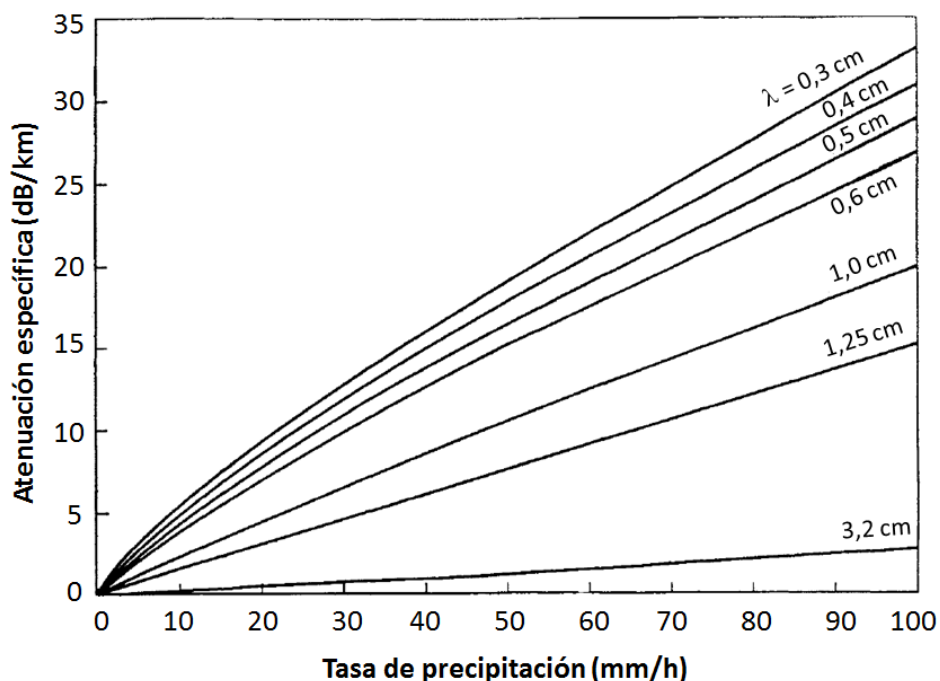


Figura 2.12: Valores teóricos de la atenuación específica vs. tasa de precipitación, utilizando la distribución L-P.

Posteriormente, fueron llevados a cabo estudios experimentales del comportamiento de la atenuación específica en función de la precipitación, tales como los de Robertson y King (1946), Mueller (1946), Anderson y col (1947), Wexler y Weinstein (1948) y Gunn y East (1954). En 1.978, Olsen y colaboradores establecieron una relación analítica entre la atenuación específica por lluvias y la tasa de precipitación, para gotas de agua esféricas basada en una ley de potencia, como sigue (Olsen y col, 1978):

$$\gamma_R = aR^b \quad [\text{dB/km}] \quad (2.10)$$

donde R está dada en mm/h y a y b son parámetros dependientes de la frecuencia de operación y la temperatura.

Más tarde, en 1.982, el CCIR (*Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones*), hoy ITU, extendió el trabajo de Olsen y colaboradores, para el caso de gotas de agua con forma de esferoide achatado, situación en la que se debe tomar en cuenta la polarización de la onda electromagnética. La

dependencia de la atenuación específica por lluvias con la frecuencia y la polarización se manifiesta en los valores a y b , ahora llamados k y α (CCIR, 1982):

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad [\text{dB/km}] \quad (2.11)$$

donde k y α tendrán subíndice H o V , dependiendo de si la polarización es horizontal o vertical, respectivamente. Los valores de k y α reportados fueron estimados para la distribución del tamaño de la gota de Law y Parsons, modelo de Gunn y Kinzer (1949) para la velocidad terminal de las gotas e índice de refracción del agua a una temperatura de 20 °C.

Posteriormente, en la ITU publicó la primera versión de la Recomendación ITU-R P.838 (ITU, 1992), contentiva del modelo propuesto por el CCIR en 1.982. En ambas publicaciones, los valores de k y α que no aparecen en las mismas se obtienen aplicando interpolación con escala logarítmica para la frecuencia y el coeficiente k mientras que la interpolación para el coeficiente α se hace en la escala lineal.

La Recomendación ITU.R P.838-3 (ITU, 2005) es la versión más reciente de la mencionada recomendación. En la misma, los valores para los parámetros k y α se determinan ajustando los parámetros (dichos parámetros obtenidos mediante cálculos de dispersión) a curvas experimentales, de γ_R versus R . Como resultado, k y α se determinan a partir de funciones de la frecuencia, f [GHz], en el intervalo desde 1 GHz hasta 1000 GHz. De esa manera, se tiene:

$$\log k = \left[\sum_{j=1}^4 a_j e^{-\left(\frac{\log f - b_j}{c_j}\right)^2} \right] + m_k \log f + c_k \quad (2.12)$$

$$\alpha = \left[\sum_{j=1}^5 a_j e^{-\left(\frac{\log f - b_j}{c_j}\right)^2} \right] + m_\alpha \log f + c_\alpha \quad (2.13)$$

donde los valores de a_j , b_j , c_j , m_k , m_α , c_k y c_α , para k_H , k_V , α_H y α_V , según sea el caso, es decir, polarización horizontal o vertical son dados en las Tablas 1 a 4 (ITU, 2005).

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Tabla 1: Coeficientes para k_H

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

Tabla 2: Coeficientes para k_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

Tabla 3: Coeficientes para α_H

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Tabla 4: Coeficientes para α_V

En general, para polarización lineal o circular, y para cualquier geometría del enlace, es decir, terrestre o satelital, los parámetros k y α de la ecuación (3.2) se calculan a través de los valores obtenidos de las ecuaciones (3.3a) y (3.3b), utilizando las ecuaciones siguientes:

$$k = \frac{1}{2}[k_H + k_V + (k_H - k_V)(\cos \theta)^2 \cos(2\tau)] \quad (2.14)$$

$$\alpha = \frac{1}{2k}[k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)(\cos \theta)^2 \cos(2\tau)] \quad (2.15)$$

donde θ representa el ángulo de elevación del enlace (en el caso de enlaces terrestres, θ es igual 0°), mientras que τ es el ángulo de inclinación de la polarización con respecto al plano horizontal ($\tau = 0^\circ$ para polarización horizontal, $\tau = 90^\circ$ para polarización vertical y $\tau = 45^\circ$ para polarización circular).

A modo de ejemplo, en la Tabla 5 se resumen algunos de los valores de los parámetros k y α , para algunos valores de frecuencia, f .

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
8	0,00412	1,3905	0,00345	1,3797
9	0,00754	1,3155	0,00669	1,2895
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
11	0,01772	1,2140	0,01731	1,1617
12	0,02386	1,1825	0,02455	1,1216
13	0,03041	1,1586	0,03266	1,0901
14	0,03738	1,1396	0,04126	1,0646
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440
16	0,05282	1,1086	0,05899	1,0273
17	0,06146	1,0949	0,06797	1,0137
19	0,08084	1,0691	0,08642	0,9930
20	0,09164	1,0568	0,09611	0,9847
22	0,11554	1,0329	0,11699	0,9700
30	0,24031	0,9485	0,22909	0,9129
40	0,44306	0,8673	0,42738	0,8421
70	1,0315	0,7345	1,0253	0,7215
90	1,28071	0,6944	1,27946	0,6876
100	1,36711	0,6815	1,36805	0,6765

Tabla 5: Valores de los coeficientes de regresión k y α

2.8 Algunas Técnicas para el Ajuste de Datos

Tal como fue mencionado en el Capítulo 1, en este trabajo se recurre a algunas técnicas para el ajuste de funciones a datos experimentales con el fin de obtener los nuevos modelos de conversión de tiempos de conversión de distribuciones acumulativas de lluvia para Ecuador. Específicamente, se usan técnicas de regresión no lineal, tales como Cuasi-Newton, *Simplex*, Hooke-Jeeves *Pattern Moves* y Rosenbrock *Pattern Search*, y la técnica bioinspirada de optimización por enjambre de partículas o PSO (*Particle Swarm Optimization*).

2.8.1 Regresión No Lineal

La regresión no lineal se refiere a algoritmos utilizados para ajustar funciones o curvas complejas e incluso arbitrarias, a datos generalmente experimentales, mediante una estimación iterativa cuando los métodos habituales de tratar con la no linealidad, como por ejemplo, los de linealización, no son efectivos (Garson, 2012).

Considérese una función f que relaciona una respuesta o variable dependiente y , a una variable x o multivariantes x_1, x_2, \dots, x_n (aleatorias o controladas) explicativas o independientes conocidas y un conjunto o vector β de parámetros desconocidos, (Seber y Wild, 2003; Ritz y Streibig, 2008; Riazoshams y col, 2019):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, \beta) \quad (2.16)$$

El objetivo de la regresión no lineal, en este caso, es determinar los valores de los parámetros desconocidos del vector β , para lo cual se recurre a una función objetivo, también conocida como función de costo o ajuste o *fitness*, la cual, por lo general, consiste en la minimización del criterio seleccionado para el ajuste de la función o curva, como por ejemplo, la minimización del error relativo entre los valores medidos o reales y los valores teóricos o estimados para la ecuación (2.16).

Entre los diversos métodos de regresión no lineal reportados en la literatura, en esta sección serán abordados sucintamente las técnicas Cuasi-Newton, *Simplex*, Hooke-Jeeves *Pattern Moves* y Rosenbrock *Pattern Search*, con

especial énfasis en la primera de ellas, por ser la que mejor resultado arrojó, entre las cuatro (4) mencionadas, en el desarrollo de los nuevos modelos de conversión de tiempos de integración de distribuciones acumulativas de lluvia para Ecuador.

Cuasi-Newton

Siendo uno de los métodos históricamente más conocidos e inicialmente enfocado para calcular las raíces de funciones y posteriormente usado también para la solución de problemas no lineales, el método de Newton tiene como objetivo encontrar el mínimo local de la función objetivo o de costo, $f(x)$ calculando de forma aproximada el punto en el que el gradiente de dicha función, $\nabla f(x)$, es igual a cero (0), es decir, en realidad el método de Newton no optimiza directamente, sino que trata de hallar la ubicación del fondo del “valle” de la curva en la que la pendiente es nula (Nash, 2014).

En el método de Newton se caracteriza por una rápida convergencia local a la solución con significativa precisión, una vez que se alcanza un acercamiento a la solución, es decir, al mínimo de la función objetivo. Por ello, la convergencia en pocas iteraciones ocurre siempre y cuando el valor x_0 , asumido inicialmente para la solución, se encuentre relativamente cerca de la solución (Douc y col, 2014; Nash, 2014).

Para conseguir el mínimo local la solución, el método de Newton recurre a aproximaciones cuadráticas, tal como se ilustra en la Figura 2.13 (Karim, 2003), las cuales son optimizadas en cada iteración del proceso.

Desde el punto de vista analítico, la mencionada aproximación cuadrática consiste en aproximar la función objetivo, f , en un punto x_c , por una función cuadrática diferenciable al menos dos (2) veces, que contiene los tres (3) primeros términos de la expansión de f en serie de Taylor (Dennis y Schnabel, 1996):

$$f(x) = f(x_c) + [\nabla f(x_c)]^T p + \frac{1}{2} p^T H(x_c) p \quad (2.17)$$

donde T se refiere a “transposición”, mientras que $\nabla f(x_c)$ y $H(x_c) = \nabla^2 f(x_c)$, representan el vector gradiente y la matriz *hessiana* de $f(x)$, respectivamente,

ambos evaluados en x_k , respecto a todas las variables independiente de f . Por su parte, p se refiere a la dirección de búsqueda que sigue el proceso de iteración para estimar el mínimo de la función f .

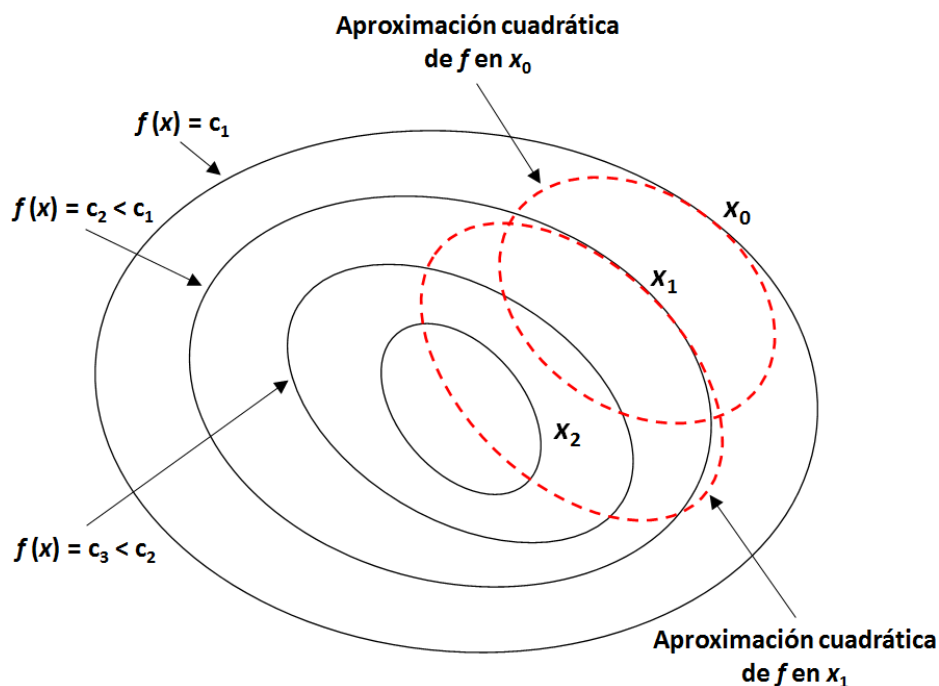


Figura 2.13: Ilustración del proceso de convergencia en el método de Newton, en la búsqueda del mínimo local de la función objetivo.

Es oportuno señalar que, los elementos de la matriz *hessiana* son las segundas derivadas parciales de la función objetivo.

La solución de la ecuación (2.17), aplicando el método de Newton, se obtiene calculando el gradiente de la función $f(x)$ e igualando a cero dicho gradiente, es decir, $\nabla f(x) = 0$. El resultado se resume en las siguientes dos (2) ecuaciones:

$$H_k p_k = -\nabla f(x_k) \Rightarrow p_k = -H_k^{-1} \nabla f(x_k) \quad (2.18a)$$

$$p_k = x_{k+1} - x_k \quad (2.18b)$$

donde k y $k+1$ se refieren a dos (2) iteraciones sucesivas y H_k^{-1} es la inversa de la matriz *hessiana*.

También es importante resaltar que, una de las desventajas del método de Newton es la acentuada divergencia que lo caracteriza cuando el valor x_0 , que se asume inicialmente para la solución, no se encuentra relativamente cerca de dicha solución (Bonnans y col, 2006). Esta desventaja puede ser mitigada incorporando un factor llamado “tamaño de paso”, α_k , a la ecuación (2.18b), como sigue (Karim, 2003; Bonnans y col, 2006; Douc y col, 2014):

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k \quad (2.19)$$

La ecuación (2.19) satisface la condición de paso descendente hacia la búsqueda del mínimo de la función objetivo, es decir, $f(x_{k+1}) \leq f(x_k)$.

El “tamaño del paso”, α_k , se puede determinar mediante métodos tales como la regla de Armijo (1966), método BB (Barzilai- Borwein) (Wen y col, 2012), regla de Goldstein (Shi y Shen, 2005), “medio paso” (Lange, 2010), Weng-Mamat-Mohd-Dasril (Wen y col, 2012), entre otros.

Otra de las desventajas del método de Newton, está asociada al elevado costo de computación y significativos requerimientos de memoria, asociado al cálculo analítico de los elementos de H_k^{-1} (Douc y col, 2014). Precisamente, esta desventaja es contrarrestada por el método Cuasi-Newton, en el cual el engorroso cálculo de H_k es reemplazado por una aproximación que es actualizada en cada iteración, sin perder la ventaja de rápida convergencia dependiendo del valor x_0 elegido. En cada iteración del proceso, el método en cuestión utiliza los cambios en el gradiente para de esa manera obtener información acerca de las segundas derivadas a lo largo de la dirección de búsqueda. Para ello, se emplean principalmente las fórmulas de recurrencia tales como las de los algoritmos DFP (Davidon-Fletcher-Powell) o BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) (Karim, 2003; Lange, 2013)

Simplex

El método *Simplex* es un método de tipo analítico, creado por Dantzig (1987) para resolver problemas de programación lineal. En ese sentido, la meta hallar los valores de los elementos del vector β para minimizar o maximizar funciones del tipo (Press y col, 2007; Vanderbei, 2014):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, \beta) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n = \sum_{j=1}^n \beta_j x_j \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, n \quad (2.20)$$

donde las variables x_1, x_2, \dots, x_n , son todas positivas, y además, se tiene la restricción:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, m \quad (2.21)$$

El primer paso en el método *Simplex* consiste en reescribir las desigualdades como igualdades, para lo cual es necesario adicionar al problema de optimización, variables llamadas “de reserva”, $w_i = x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}$, de manera que (Vanderbei, 2014):

$$w_i = x_{n+i} = b_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, m \quad (2.22)$$

Es decir, las variables de reserva se entrelazan con las variables originales y toda la colección se trata de la misma manera. Así, es conveniente tener una notación en la que las variables de reserva sean más o menos indistinguibles de las variables originales (Vanderbei, 2014):

$$(x_1, x_2, \dots, x_n, w_1, w_2, \dots, w_m) = (x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}) \quad (2.23)$$

Las ecuaciones (2.20) y (2.22) constituyen el diccionario de inicio del proceso de iteración en el método *Simplex*. El proceso en cuestión se mueve de un diccionario a otro en búsqueda de la solución óptima. Cada diccionario tienen m variables básicas y n variables no básicas, por lo que el diccionario actualizado en cada iteración será (Vanderbei, 2014):

$$y = \bar{y} + \sum_{j \in N} \bar{\beta}_j x_j \quad \text{con } N = \{1, 2, \dots, n\} \quad (2.24a)$$

$$x_i = \bar{b}_i - \sum_{j \in N} \bar{a}_{ij} x_j \quad \text{con } i \in M = \{n+1, n+2, \dots, n+m\} \quad (2.24b)$$

Los coeficientes con barras las ecuaciones (2.24a) y (2.24b) varían a medida que progresa el algoritmo del método.

El conjunto de valores de las variables x_1, x_2, \dots, x_n , que satisfacen la restricción de las ecuaciones (2.21) y (2.22), así como la condición de que dichas variables sean siempre positivas, es llamado “vector factible”. De todos los posibles “vectores factibles”, aquel que cumple con la meta perseguida con la función objetivo de (2.20) se denomina “vector factible óptimo” (Press y col, 2007).

Hooke-Jeeves *Pattern Moves*

También conocido como Hooke-Jeeves *Pattern Search*, o simplemente Hooke-Jeeves, este método es uno de los que incorpora la historia pasada de iteraciones para producir una nueva dirección de búsqueda para de esa manera acelerar la convergencia (Yang, 2008).

El método Hooke-Jeeves consiste en dos (2) movimientos: exploratorio y de patrón. Los movimientos exploratorios exploran el comportamiento local con el fin de obtener información sobre la función objetivo en la vecindad del punto base, x_k , actualizado, es decir, se identifican posibles valles en la pendiente descendiente, en caso de dichos valles existir (Hooke y Jeeves, 1961; Lai y Chan, 2007; Yang, 2008). Para cualquier incremento (cada dirección de coordenadas puede tener un incremento diferente) ε_i ($i = 1, 2, \dots, p$), el movimiento de exploración se realiza desde un punto de inicio hacia cada dirección de coordenadas, aumentando o disminuyendo $\pm \varepsilon_i$. Si el nuevo valor de la función objetivo no aumenta (para el problema de minimización), es decir, $f(x_i)_{k+1} \leq f(x_i)_k$, el movimiento exploratorio se considera exitoso; en caso contrario, el algoritmo intenta un paso en la dirección opuesta, y el resultado se actualizará sólo si se tiene éxito. Cuando se han explorado todas las coordenadas p , el punto resultante representa un nuevo punto base x_{k+1} (Hooke y Jeeves, 1961; Yang, 2008). Si $x_{k+1} = x_k$, significa que no se ha logrado la reducción de la función, por lo que es necesario reducir el tamaño del incremento (por ejemplo, en 1/10 de su valor presente) y se repite el procedimiento. Si $x_{k+1} \neq x_k$, se realiza un movimiento de patrón desde x_k . (Lai y Chan, 2007).

Por su parte, el movimiento de patrón tiene como finalidad mover la base actual x_{k+1} a través de la línea base $x_{k+1} - x_k$, desde el punto base anterior, x_k , hasta el punto base actual x_{k+1} . Ese traslado se realiza evaluando la función en el siguiente punto del patrón, dado por (Lai y Chan, 2007; Yang, 2008):

$$c_k = x_k + 2(x_{k+1} - x_k) \quad (2.25)$$

La búsqueda prosigue con una nueva secuencia de movimientos exploratorios sobre c_k . Si el valor de función más bajo obtenido es menor que $f(x_k)$, entonces

se ha alcanzado un nuevo punto base x_{k+2} . En ese caso, se realiza un segundo movimiento de patrón, usando la ecuación (2.25) con todos los subíndices incrementados en una unidad. De lo contrario, se abandona el movimiento de patrón de x_{k+1} y se continúa con una nueva secuencia de movimientos exploratorios sobre x_{k+1} . El mínimo se obtiene si la longitud del paso para cada variable se ha reducido a un determinado valor pequeño (Lai y Chan, 2007).

Rosenbrock Pattern Search

Algoritmo de minimización sin gradiente introducido en 1.960 por Howard Harry Rosenbrock (1960), que se basa en la construcción de direcciones concebidas para utilizar información obtenida durante el proceso de búsqueda, sobre la curvatura de la función objetivo. El método de Rosenbrock implica una serie de etapas, cada una de las cuales consta de una serie de búsquedas exploratorias a lo largo del conjunto de direcciones que se fijan para la etapa dada, pero que se actualizan de una etapa a otra para así hacer uso de la información previamente adquirida sobre el objetivo (Lewis y col, 2000).

La primera de las etapas del método de Rosenbrock comienza con las direcciones de coordenadas como las direcciones de búsqueda. Seguidamente, se realiza búsquedas a lo largo de esas direcciones, alternando cada una de ellas, moviéndose a nuevas iteraciones que producen pasos exitosos (un paso sin éxito es aquel que conduce a un valor menos deseable del objetivo). El proceso continúa hasta que haya al menos un paso exitoso y otro sin éxito en cada dirección de búsqueda. Una vez que ello ocurre, culmina la etapa actual. Tal como sucede en todos los métodos de búsqueda directa, no se requieren los valores numéricos del objetivo en el método de Rosenbrock en este proceso. Así siendo, el algoritmo conduce a un nuevo punto cada vez que se percibe una mejora en el objetivo.

A diferencia de los métodos de variaciones locales, en la siguiente etapa del método de Rosenbrock no se repite el proceso de búsqueda con el mismo conjunto de vectores ortogonales, sino que se rota el conjunto de direcciones para capturar información sobre el objetivo, aprovechando, específicamente, información asociada a un paso distinto de cero proveniente de la etapa previa,

información ésta que sugiere una buena dirección de descenso, o como mínimo, una dirección “prometedora”. Esa dirección particular se incluye en el conjunto de direcciones a lo largo de la cual se realizará la búsqueda en la nueva etapa. El método de Rosenbrock impone la condición de que el conjunto de direcciones de búsqueda sea siempre un conjunto ortogonal de n -vectores, de modo que el conjunto de vectores continúe siendo linealmente independiente. El nuevo conjunto de vectores ortonormales (ortogonales) se genera utilizando el procedimiento de ortonormalización de Gram-Schmidt (Grami, 2016), con la dirección “prometedora” de la etapa recién completada, utilizada como primer vector en el proceso de ortonormalización (Lewis y col, 2000; Vassiliadis y Conejeros, 2009).

Es oportuno mencionar que, el éxito en cada una de las direcciones es seguido por una expansión del tamaño de los pasos, mientras que un fracaso exige una reducción de dicho tamaño, cambiando la dirección en sentido negativo.

El método de Rosenbrock aplicado a su función de “banana” se muestra en la Figura 2.14. La iteración al comienzo de cada etapa se señala con un cuadrado. A dichas iteraciones aparecen superpuestas las direcciones de búsqueda para la nueva etapa. Puede observarse lo rápido que la búsqueda se adapta al valle estrecho, reflejándose este hecho con sólo tres (3) etapas, las direcciones de búsqueda reflejan esta característica. También se muestra cómo cambian las direcciones de búsqueda para permitir que el algoritmo gire la esquina del valle y continúe con la solución.

2.8.2 PSO (*Particle Swarm Optimization*)

Desarrollada inicialmente en 1.995 por James Kennedy y Russell Eberhart (Kennedy y Eberhart, 1995), y con una primera modificación importante introducida en 1.998 por Shi y Eberhart (1998), la técnica de optimización por enjambre de partículas o PSO (*Particle Swarm Optimization*), por su implementación relativamente fácil, rápida convergencia con soluciones aceptables (lo que redundaría en bajo procesamiento computacional), buen desempeño y pocos parámetros requeridos para el ajuste (Alsharif y col, 2015; Bonyadi y Michalewicz, 2017), es una de las técnicas de inteligencia

computacional o computación inteligente cada vez más utilizada para optimización de problemas, entre otras áreas, en telecomunicaciones (Huang y col, 2012; Somu y Rengarajan, 2014; Mera-Villavicencio, 2017; Pérez-García y col, 2017; Rajasekar y col, 2018; Santana y col, 2018).

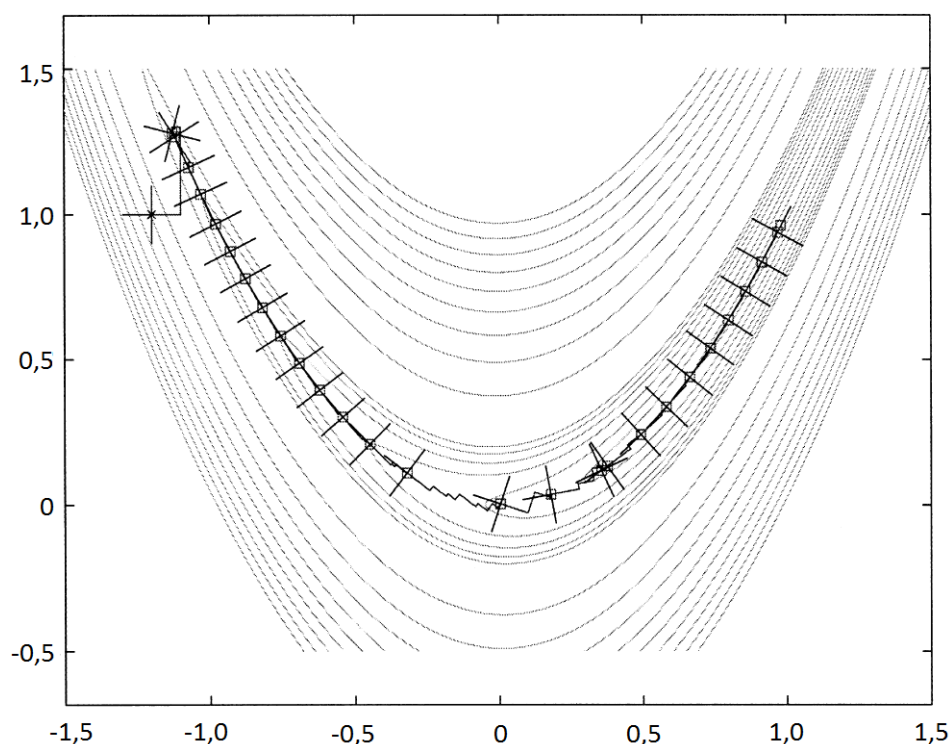


Figura 2.14: Algoritmo del método de Rosenbrock en acción.

Con un algoritmo consistente en partículas o individuos colocados en un espacio de búsqueda, que se mueven por si mismos combinando la historia de su propia posición con la solución óptima global presentada en la iteración actual, la técnica PSO se basa en el comportamiento de las aves cuando vuelan en bandadas, durante el cual cada ave ajusta su desplazamiento de acuerdo a la experiencia de vuelo tanto propia como la de sus compañeras de bandada (Shi y Eberhart, 1998). El objetivo de PSO es encontrar la mencionada solución óptima global entre todas las partículas que conforman el conjunto.

Cada partícula del enjambre está definida por tres (3) vectores de d dimensiones, los cuales son, a saber (Bonyadi y col, 2014; Perez-Garcia y col, 2017):

- Posición, X : sus elementos, x_i^k , denotan la posición de la i -ésima partícula en la k -ésima iteración; posición definida por la dirección que la partícula siguió en la $(k-1)$ -ésima iteración.
- Velocidad, V : sus elementos, v_i^k , expresan la dirección y magnitud del movimiento de la i -ésima partícula en la k -ésima iteración.
- Mejor desempeño de la partícula, P : sus elementos, p_i , denotan la mejor posición que la i -ésima partícula ha visitado en el cúmulo o vecindario, hasta la k -ésima iteración.

Adicionalmente, en el desplazamiento de la i -ésima partícula del enjambre, el algoritmo de PSO toma en cuenta la posición de aquella partícula que ha mostrado el mejor desempeño en el grupo, hasta la k -ésima iteración. La posición en cuestión determina los elementos g_i , del vector G .

La velocidad de la i -ésima partícula es actualizada de acuerdo a (Perez-Garcia y col, 2017):

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + C_1 R_1 (p_i - x_i^k) + C_2 R_2 (g_i - x_i^k) \quad (2.26)$$

Donde:

ω = Peso de inercia o momento de la partícula. Parámetro introducido por Shi y Eberhart (1998) para controlar la influencia del valor previo de la velocidad de la partícula (la componente ωv_i^k es llamada inercia o momento).

C_1 = Parámetro cognitivo o "nostalgia". Controla el efecto del vector P en el movimiento de la partícula. Un valor típico de ese parámetro es 2.

C_2 = Parámetro social. Controla el efecto del vector G en el movimiento de la partícula. Un valor típico de ese parámetro es 2.

R_1 y R_2 = Números aleatorios pertenecientes a la distribución uniforme $U(0,1)$.

Su función es explorar nuevas soluciones en torno a los mejores vectores P y G , diversificando las partículas para búsquedas más efectivas (Bonyadi y col, 2014).

Por su parte, los elementos del vector X se actualizan mediante la expresión (Perez-Garcia y col, 2017):

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.27)$$

En la Figura 2.15, se puede observar el movimiento de una determinada partícula dentro del cúmulo o vecindario, de acuerdo al modelo matemático de PSO (Esmín y col, 2015; Perez-Di Santis, 2015):

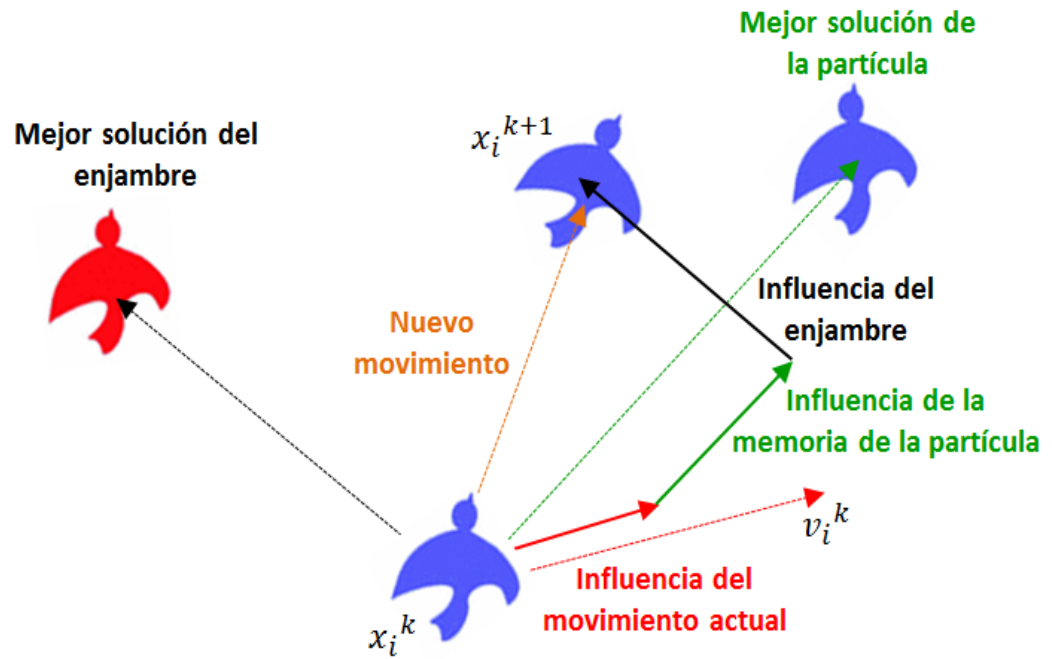


Figura 2.15: Movimiento de una partícula en PSO.

CAPÍTULO 3

3. MODELOS DE CONVERSIÓN DE TIEMPOS DE INTEGRACIÓN DE DISTRIBUCIONES ACUMULATIVAS DE LLUVIA Y MODELOS DE ESTIMACIÓN DE ATENUACIÓN POR LLUVIAS

3.1 Modelos de Conversión de Tiempos de Integración de Distribuciones Acumulativas de Lluvia

En esta sección, serán abordados algunos de los modelos existentes en la literatura que permiten convertir las estadísticas de lluvia, es decir, obtener distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación para tiempos de integración de 1-minuto a partir de distribuciones acumulativas de dicha tasa correspondientes a tiempos de integración mayores a 1-minuto.

3.1.1 Modelo de Rice-Holmberg

Considerado como un método empírico (Owolawi, 2011; Rujano-Molina y col, 2017), el modelo Rice-Holmberg (1973) se basa en la precipitación anual promedio, M , y el índice o coeficiente de tormentas eléctricas, β , para estimar la tasa de lluvia a partir de los datos climatológicos disponibles de la localidad de interés (Obiyemi y col, 2014), los cuales deben ser obtenidos preferiblemente a partir de mediciones locales o, en su defecto, de la información disponible, por ejemplo, en la base de datos de ITU-R (ITU, 2017), entre otras.

Desarrollado en 1.973 en base a mediciones realizadas en Estados Unidos, el modelo Rice-Holmberg permite estimar estadísticas de las distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación a partir de los datos suministrados por las estaciones de los Servicios Meteorológicos para una determinada localidad, con elevados tiempos de integración, por ejemplo, 1-mes (Rice y Holmberg, 1973).

La tasa de precipitación, M [mm], en un periodo anual promedio es dada por la suma de las contribuciones de la cantidad de lluvia de naturaleza convectiva o

tormentosa, M_c [mm], y la cantidad de lluvia debido a eventos estratiformes, M_s [mm], es decir (Rice y Holmberg, 1973; Emiliani y col, 2005):

$$M = M_c + M_s \quad (3.1)$$

Por su parte, el coeficiente, β , se determina a partir de la relación entre la cantidad de lluvia convectiva y la cantidad de lluvia anual (Rice y Holmberg, 1973; Emiliani y col, 2005):

$$\beta = \frac{M_c}{M} \quad (3.2)$$

El trabajo de Rice y Holmberg fue mejorado en 1.974 por Dutton y col (Owolawi, 2010), obteniéndose una expresión para el índice de tormentas eléctricas, β , que toma más en cuenta las características espaciales de la tasa de precipitación y la autocorrelación de β con dicha tasa de lluvia, que la expresión obtenida por Rice y Holmberg:

$$\beta = \left(0,03 + 0,97 e^{-5e^{-0,004M_m}}\right) \left[0,25 + 2e^{-0,35(1+0,125M)/U}\right] \quad (3.3)$$

donde M_m [mm] representa la tasa de precipitación mensual más alta en el periodo anual considerado y U es el número promedio de días con tormentas dentro del mismo periodo anual.

La función complementaria de distribución acumulativa (FCDA) de la tasa de precipitación, $P(r \geq R)$, para un tiempo de integración de 1-minuto, para el modelo Rice-Holmberg, es dada por (Owolawi, 2010; Rujano y col, 2017):

$$P(r \geq R) = \frac{M}{87,66} \left[0,03\beta^{-0,03R} + 0,2(1 - \beta)(e^{-0,258R} + 1,86 e^{-1,63R})\right] \quad (3.4)$$

3.1.2 Modelo de Chebil-Rahman

Tal como se puede desprender de la sección 3.1.1, la aplicación del modelo Rice-Holmberg requiere información que no siempre está disponible desde el servicio meteorológico de un país, tal es el caso del número días, U , del periodo anual considerado con lluvias convectivas. En ese sentido, el modelo Chebil-Rahman, también perteneciente al grupo de los modelos empíricos (Rujano y col, 2017; Ng y col, 2018) para la conversión de distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación, proporciona un método sencillo y precisión aceptable,

basado en la ley de potencia, para determinar la tasa de lluvias específicamente para un porcentaje de indisponibilidad, p , igual a 0,01%, y tiempo de integración de 1-minuto, de la siguiente manera (Chebil y Rahman, 1999; Emiliani y col, 2004; Duhujamahoro y col, 2016):

$$R_{0,01} = \alpha M^\beta \quad (3.5)$$

donde los coeficientes de regresión α y β son iguales a 12,2903 y 0,2973, respectivamente, mientras que M es el valor promedio acumulado anual de la tasa de lluvia.

El modelo de Chebil-Rahman también contempla, para cualquier porcentaje de tiempo, p , la estimación de la tasa de precipitación para un tiempo de integración de 1-min, $R_1(p)$, a partir de la tasa de precipitación correspondiente a un tiempo de integración de 60-min, es decir, 1-hora, $R_{60}(p)$, mediante (Chebil y Rahman, 1999; Chun y Madeep, 2013):

$$R_1(p) = R_{60}(p)(0,772p^{-0,041} + 1,141e^{-2,570p}) \quad (3.6)$$

donde p está comprendido entre 0,001% y 0,1%, y $R_{60}(p)$ se extrae a partir de estadísticas locales de la tasa de precipitación.

3.1.3 Modelo de Moupfouma

Para convertir distribuciones acumulativas de tasa de precipitación, obtenidas con elevados tiempos de integración (por ejemplo, 1-mes), en distribuciones acumulativas de dicha tasa con tiempos de integración de 1-min, también se puede recurrir al modelo de Moupfouma, que en realidad, es la versión mejorada o refinada del Moupfouma-Martin (Moupfouma y Martin, 1995; Ojo y Owolawi, 2014), en el cual la función complementaria de distribución acumulativa de la tasa de lluvia, $P(r > R)$, es dada por:

$$P(r > R) = 10^{-2} \left(\frac{R_{0,01} + 1}{R + 1} \right)^b e^{[u(R_{0,01} - R)]} \quad (3.7a)$$

$$b = \left(\frac{R}{R_{0,01}} - 1 \right) \ln \left(1 + \frac{R}{R_{0,01}} \right) \quad (3.7b)$$

$$u = \begin{cases} \frac{4 \ln 10}{R_{0,01}} \frac{1}{1 + \eta \left(\frac{R}{R_{0,01}}\right)^\beta}; & \text{para climas templados} \\ \frac{4 \ln 10}{R_{0,01}} e^{\left[-\lambda \left(\frac{R}{R_{0,01}}\right)^\gamma\right]}; & \text{para climas tropicales y subtropicales} \end{cases} \quad (3.7c)$$

donde los parámetros η y β son iguales a 4,56 y 1,03, respectivamente, los parámetros λ y γ son iguales a 1,066 y 0,214, respectivamente, y $R_{0,01}$ se puede extraer de mediciones locales o de la base de datos de la ITU-R (ITU, 2017) o, en su defecto, se puede estimar mediante la ecuación (3.5).

Es importante resaltar que, otros autores han reportado otros valores λ y γ de acuerdo a los resultados de sus respectivas investigaciones. Algunos de esos valores son resumidos en la Tabla 6.

Asimismo, es oportuno señalar que, el modelo Mouopfouma-Martin refinado pertenece al grupo de los modelos analíticos para la referida conversión (Owolawi, 2010; Rujano y col, 2017).

Fuente	λ	γ
Chebil y Rahman (1999) (Malasia; $M < 3000$ mm)	0,0707	0,060
Chebil y Rahman (1999) (Malasia; $M > 3000$ mm)	0,398	-0,125
Chandrika y col (2015) (India)	0,7983	0,02129
Ong y Zhu (1997) (Singapur)	Entre 0,56 y 1,51	Entre 0,01 y 0,30
Mandeep y Hassan (2008) (Papúa Nueva Guinea)	1,2	0,2

Tabla 6: Valores de los parámetros λ y γ del modelo Moupfouma y Martin refinado

3.1.4 Modelo de Ito-Hosoya

Otro de los modelos analíticos para la conversión de distribuciones acumulativas de tasa de lluvias, obtenidas con elevados tiempos de integración,

a distribuciones acumulativas de dicha tasa con tiempos de integración de 1-min, para cualquier porcentaje de tiempo es el desarrollado por Chieko Ito y Yoshio Hosoya (Ito y Hosoya, 2002; Aris y Din, 2016; Rujano y col, 2017).

Al igual que modelo Rice-Holmberg, el modelo Ito-Hosoya requiere como datos de entrada la tasa de precipitación promedio en un periodo anual, M , la tasa de lluvia mensual más elevada en dicho periodo anual, M_m y número promedio de días con lluvias convectivas en el mencionado periodo, U . La tasa de precipitación, R_p , para un tiempo de integración de 1-minuto y cualquier porcentaje de tiempo, $p(\%)$, se determina a partir de (Ito-Hosoya, 2002; Rujano y col, 2017):

$$R_p = a_p M^{b_p} \beta^{c_p} \quad (3.8a)$$

$$\begin{aligned} \log a = & 0,1574155 X^4 + 1,348171 X^3 + 3,528175 X^2 \\ & + 1,479566 X - 2,302276 \end{aligned} \quad (3.8b)$$

$$\begin{aligned} b_p = & (-4,583266 X^4 - 40,9816 X^3 - 116,2387 X^2) \times 10^{-2} \\ & + (-82,61178 X + 91,1857) \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (3.8c)$$

$$\begin{aligned} c_p = & (2,574688 X^4 + 15,4903 X^3 + 17,47827 X^2) \times 10^{-2} \\ & + (-28,46313 X + 1,255081) \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (3.8d)$$

donde $X = \log p$ y el factor β se calcula de la misma forma que en el modelo Rice-Holmberg, es decir, mediante la ecuación (3.3).

3.1.5 Modelo de Matricciani

Este modelo, desarrollado por Emilio Matricciani (2011), pertenece al grupo de modelos físicos para la estimación de la distribución acumulativa de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto a partir de distribución de la tasa de lluvia con tiempo de integración, entre otros, de 60-minutos (1-hora), que será el considerado para la aplicación del modelo en cuestión en este trabajo.

La función complementaria de distribución acumulativa (FCDA) de la tasa de precipitación, $P(r > R)$, es dada por la suma de cuatro (4) funciones distintas,

$P_I(r > R)$, $P_{II}(r > R)$, $P_{III}(r > R)$ y $P_{IV}(r > R)$, obtenidas cada una de ellas en los Rangos I, II, III y IV. Es decir (Matricciani, 2011; Santacruz, 2017):

$$P(r > R) = P_I(r > R) + P_{II}(r > R) + P_{III}(r > R) \quad (3.9)$$

A continuación se especifican cada uno de los rangos señalados:

Rango I

$$P_I(r > R) = P_{R_T, \min}(R_T) \quad \begin{cases} 0 \leq R < R_1 \\ P_o \leq P_R(r > R) < P_1 \end{cases} \quad (3.10a)$$

$$P_{R_T, \min}(R_T) = \left[(1 - p)P(R) + pP\left(T \frac{R}{T - T_o}\right) \right] \frac{P_o}{P_{R_o}} \quad (3.10b)$$

$$P_o = \frac{T_R}{T_{obs}} \quad (3.10c)$$

$$P_{R_o} = P_o + N_R \frac{(T + T_o - \tau)}{2T_{obs}} \quad (3.10d)$$

$$p_c = N_R \left(\frac{T - T_o}{T_R + T_e} \right) \quad (3.10e)$$

$$T_e = N_R \frac{(T + T_o - \tau)}{2} \quad (3.10f)$$

Donde:

R_T = Tasa de precipitación real o física (en mm/h), en el tiempo de integración, T . Esta tasa de lluvias no es observable directamente.

R = Tasa de precipitación (en mm/h) medida en el tiempo de integración, T (en este trabajo, $T = 1$ hora = 60 min).

$P_I(r > R) = P_I(R)$ = Distribución acumulativa (complementaria) de la tasa de precipitación, R ,

$P_{R_T, \min}(R_T)$ = Límite menor de la distribución acumulativa, $P_{R_T}(R_T)$. Se determina a partir de la ecuación (3.10b). Para $p \leq 0,5$ % y con el intervalo de tiempo irreductible sin lluvia, T_o , aproximadamente igual a 0 min (Matricciani, 2011), se tiene que $P_{R_T, \min}(R_T) \approx P(R) \frac{P_o}{P_{R_o}}$. El factor $\frac{P_o}{P_{R_o}}$ escala la distribución acumulativa $P(R)$ y su efecto final es que, para un determinado valor de R , el porcentaje de tiempo en que dicho valor es

rebasado, aumenta, lo cual conlleva a que en el referido intervalo del porcentaje p , la curva de $P(R)$ medida con tiempo de integración T , tienda a desplazarse hacia la curva $P(R)$ estimada con tiempo de integración 1-minuto.

P_0 = Fracción de tiempo correspondiente a la lluvia medida por medio de intervalos τ (en este trabajo, τ es igual a 1 minuto). Se calcula a partir de la ecuación (3.10c), en la cual T_R [min] representa el tiempo total de lluvia medido mediante intervalos τ , durante el periodo de observación, T_{obs} [min] (en este trabajo, T_{obs} corresponde al año promedio, es decir, 525.600 minutos).

P_{R_0} = Fracción de tiempo correspondiente a la lluvia medida mediante intervalos T , en el mismo periodo de observación, T_{obs} [min]. Se determina a partir de la ecuación (3.10d), en la cual N_R es el número de series temporales, en el periodo de observación, con eventos de lluvias.

p_c = Probabilidad (condicional) de que R_T sea diferente de R , para una determinada tasa de precipitación, R , medida.

T_e = Tiempo promedio del proceso no lluvioso, que se confunde con el tiempo lluvioso.

P_1 = Porcentaje de tiempo durante el cual la tasa de precipitación, R_1 , es rebasada. Matricciani (2011) propone $P_1 = 0,5 \%$

R_1 = Tasa de precipitación, [mm/h], correspondiente a P_1 . Se obtiene a partir de la distribución $P_{R_T, min}(R_T)$, en dicho porcentaje P_1 .

Rango II

$$P_{II}(r > R) = P_1 \left(\frac{R}{R_1} \right)^{-\lambda} \quad \begin{cases} R_1 \leq R < R_2 \\ P_1 \leq P_R(R) < P_2 \end{cases} \quad (3.11a)$$

$$\lambda = \frac{\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (3.11b)$$

Donde:

P_2 = Porcentaje de tiempo durante el cual la tasa de precipitación, R_2 , es rebasada. Matricciani (2011) propone $P_2 = 0,0171 \%$

R_2 = Tasa de precipitación, [mm/h], que corresponde a P_2 . Se obtiene a partir de la distribución dada por la ecuación (3.12a), en la que γ es un factor de mapeo dado por la ecuación (3.12b).

$$P_{R_T, \gamma}(R_T) = \left[(1-p)P(R) + pP\left(\frac{R}{\gamma}\right) \right] \frac{P_o}{P_{R_o}} \quad (3.12a)$$

$$\gamma = \frac{2T}{(\sqrt{3}-1)(T-T_o) + (\sqrt{3}+1)\tau} \quad (3.12b)$$

Es oportuno resaltar que, la dupla (P_2, R_2) , obtenida desde la distribución, $P_{R_T, \gamma}(R_T)$, tiende a aproximar aún más la distribución $P(R)$, obtenida a partir de mediciones con tiempo de integración T , a la distribución $P(R)$ estimada con tiempo de integración de 1-minuto.

Rango III

$$P_{III}(r > R) = P_2 \frac{R_2}{R} e^{-\left[\left(\frac{R}{R_2}\right)^\xi - 1\right]} \quad \begin{cases} R_2 \leq R < R_3 \\ P_2 \leq P_R(R) < P_3 \end{cases} \quad (3.13)$$

Donde:

P_3 = Porcentaje de tiempo durante el cual la tasa de precipitación, R_3 , es rebasada. Matricciani (2011) propone $P_3 = 0,002$ % del tiempo.

R_3 = Tasa de precipitación, [mm/h], para el porcentaje de tiempo P_3 , extraída de la distribución acumulativa de la ecuación (3.12a).

ξ = Factor que depende del factor λ de la ecuación (3.11b), según la Tabla II de Matricciani (2011).

Rango IV

$$P_{IV}(r > R) = P_3 \frac{R_3}{R} e^{-\left[\left(\frac{R}{R_3}\right)^{\frac{\xi}{0.7}} - 1\right]} \quad \begin{cases} R \geq R_3 \\ P_R(R) \leq P_3 \end{cases} \quad (3.14)$$

Es oportuno señalar que, si bien el modelo de Matricciani fue desarrollado básicamente para climas templados, es válido considerar su aplicación para otros tipos de climas, ya que, dicho modelo, además de partir de estadísticas de lluvia obtenidas mediante mediciones realizadas con tiempo de integración desde 60-minutos hasta 12 horas en la localidad de interés (Matricciani, 2011),

también considera, en sus cálculos, estadísticas de lluvia asociadas a mediciones llevadas a cabo en la misma localidad, con tiempo de integración 1-minuto (específicamente, los parámetros T_R y N_R). Ello hace suponer que, conocidas ambas estadísticas de lluvia, es decir, la de elevado tiempo de integración y la de tiempo de integración de 1-minuto, los cambios de pendiente de la curva de la distribución estimada, sugeridos para el inicio de los Rangos II, III y IV, representan mayores opciones de ajuste desde la curva de la distribución de elevado tiempo de integración a la curva de distribución de tiempo de integración 1-minuto a ser estimada.

3.1.6 Recomendación ITU-R P.837-6

La Recomendación ITU-R P.837.6, específicamente en su Anexo 1 (ITU, 2012), proporciona una metodología analítica para la estimación de la función cumulativa de la tasa de precipitación, $P(r > R)$, en un periodo anual promedio, con un tiempo de integración de 1-minuto, que está basada en la distribución propuesta por Salonen y Poiaras-Baptista (1997) y expuesta por Paulson (2017):

$$P(r > R) = P_0 e^{-aR \left(\frac{1+bR}{1+cR} \right)} \quad (3.14)$$

donde a es igual a 1,09 y los parámetros P_0 , b y c , dependen del clima de la localidad de interés. Dichos parámetros son dados por (ITU, 2012; Luini y col, 2017):

$$P_0 = P_{r6} \left[1 - e^{-0,0079 \frac{(1-\beta)M_t}{P_{r6}}} \right] \quad (3.15a)$$

$$b = \frac{M_t}{21797 P_0} \quad (3.15b)$$

$$c = 26,02b \quad (3.15c)$$

donde P_{r6} , β y M_t , que representan, respectivamente, la probabilidad de ocurrencia de eventos de lluvia en ranuras de 6 horas, la relación entre la lluvia convectiva y la lluvia total, y precipitación total promedio en un periodo anual, se determinan mediante interpolación bilineal de valores numéricos suministrados por la Recomendación ITU-R P.837-6 (ITU, 2012) para diversos

puntos a nivel mundial (identificados por sus coordenadas geográficas), los cuales a su vez fueron obtenidos de datos reanalizados proporcionados por el ECMRWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecast*).

Ahora bien, en la actualidad existe una versión actualizada del modelo de ITU para la conversión de estadísticas de lluvia, específicamente, la Recomendación ITU-R 837-7 (ITU, 2017), la cual tienen la ventaja sobre su predecesora de que incorpora el impacto de la precipitación mensual en el algoritmo de la predicción de la tasa de lluvia con tiempo de integración de 1-min (Luini y col, 2017).

En general, Recomendación ITU-R 837-7, en su Anexo 1, establece un modelo de predicción que involucra:

- Las coordenadas geográficas de la localidad de interés.
- La tasa de precipitación mensual promedio, MT_i , para un periodo anual total, donde i se refiere al mes 1, 2, ..., 12.
- El porcentaje de tiempo, $p(\%)$.
- La temperatura terrestre (referida a 2 metros arriba de la superficie) mensual, T_i , donde i se refiere al mes 1, 2, ..., 12.

Si los valores de MT_i no estén disponibles a partir de mediciones locales, se puede recurrir a la interpolación bilineal para valores provistos en mapas digitales en la Recomendación ITU-R P.1510-1 (ITU, 2017b).

Para el caso de los valores de T_i , si los mismos no están disponible mediante las estadísticas locales, se sugiere aplicar interpolación bilineal a valores suministrados en mapas digitales suministrados por la Recomendación ITU-R P.1144-9 (ITU, 2017c).

El modelo de la Recomendación ITU-R P.837-7 está basado en las siguientes dos (2) supuestos (Luini y col, 2017):

- a) Las tasas de precipitación mensuales están caracterizadas por una distribución log-normal, que tienen un mismo parámetro de escala, σ , constante (no depende de la localidad) e igual a 1,26.
- b) La tasa de precipitación mensual, r_i , depende de la temperatura T_i .

La función complementaria de la distribución acumulativa (FCDA) de la tasa de lluvia es dada por (ITU, 2017; Luini y col, 2017):

$$P(r > R) = \frac{\sum_{i=1}^{12} N_i P_i(r > R)}{365,25} \quad (3.16)$$

donde N_i es el número de días en cada mes, mientras que $P_i(r > R)$ es la FCDA de la tasa de precipitación correspondiente al i -ésimo mes y se determina a partir de (ITU, 2017; Luini y col, 2017):

$$P_i(r > R) = P_{0_i} Q\left(\frac{\ln R + \frac{\sigma_i^2}{2} - \ln r_i}{\sigma_i}\right) = \frac{P_{0_i}}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln R + \frac{\sigma_i^2}{2} - \ln r_i}{\sqrt{2}\sigma_i}\right) \quad (3.17a)$$

$$r_i = \begin{cases} 0.5874, & \text{for } T_i < 0^\circ \text{ C} \\ 0.5874 e^{0.0883T_i}, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.17b)$$

donde Q y erfc son las conocidas función-Q y función error complementaria, respectivamente, y P_{0_i} se refiere a la probabilidad de ocurrencia mensual de la lluvia, dada por (ITU, 2017; Luini y col, 2017):

$$P_{0_i} = 100 \frac{MT_i}{24 N_i r_i} \quad (3.18)$$

Si P_{0_i} resulta mayor que 70, entonces $P_{0_i} = 70$ y r_i se calcula por medio de (ITU, 2017; Luini y col, 2017):

$$r_i = \frac{100}{70} \frac{MT_i}{24 N_i} \quad (3.19)$$

3.2 Modelos de Predicción de Atenuación por Lluvias en Enlaces Inalámbricos Terrestres

A continuación, serán explicados sucintamente, los modelos de estimación de la atenuación por lluvias que serán utilizados en el Capítulo 5.

3.2.1 Recomendación ITU-R P.530-16

Uno de los modelos más ampliamente utilizados a nivel mundial para la predicción de la atenuación por lluvias en enlaces terrestres es el propuesto en la Recomendación ITU-R P.530-16 (ITU, 2015), cuyos datos de entrada son:

- Frecuencia de operación del sistema, f (GHz).

- Longitud del enlace, d (km).
- Porcentaje de tiempo de interés, $p(\%)$.
- Tasa de lluvias $R_{0,01}$ (dBm), excedida el 0,01% del tiempo en un año promedio, con un tiempo de integración de 1-minuto.

La aplicación del modelo de la Recomendación ITU-R P.530-16, para estimación de la atenuación por lluvias en enlaces terrestres, para cualquier porcentaje de tiempo $p(\%)$, consiste en cinco (5) pasos.

Paso 1

Se obtiene la tasa de lluvias, $R_{0,01}$ (con un tiempo de integración de 1-minuto). Preferiblemente, dicho valor debe ser obtenido a partir de mediciones locales de la tasa de lluvias realizadas en la zona de interés; empero, en caso de no contar con esas mediciones, el valor de $R_{0,01}$ puede obtenerse a partir de la información que aparece en la Recomendación ITU-R P.837-7 (ITU, 2017). En la Figura 3.1, se muestra un mapa mundial de $R_{0,01}$, a partir del cual se puede obtener visualmente dicho valor para la localidad de interés. Sin embargo, para valores más precisos de $R_{0,01}$ es necesario implementar el algoritmo establecido en la referida recomendación.

De acuerdo al mapa de la Figura 3.1, los valores de obtener $R_{0,01}$ para Ecuador oscilan aproximadamente entre 60 mm/h y 90 mm/h, dependiendo la región del país a ser considerada.

Paso 2

Se calcula la atenuación específica, γ_R [dB/km], para la frecuencia, polarización e intensidad de lluvia $R_{0,01}$, utilizando para ello, la ecuación (2.2), es decir:

$$\gamma_{0,01} = k R_{0,01}^{\alpha} \quad (3.20)$$

Paso 3

Seguidamente, se procede a determinar la longitud efectiva del trayecto del enlace d_{ef} , multiplicando la longitud real del trayecto d , por un factor de distancia r , el cual depende de la frecuencia de operación f , tasa de lluvias $R_{0,01}$, parámetro α y la misma longitud del enlace d . Así, se tiene:

$$d_{ef} = rd \quad (3.21a)$$

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,633} R_{0,01}^{0,073} \alpha f^{0,123} - 10,579(1 - e^{-0,024d})} \quad (3.21b)$$

En caso de que el denominador de la ecuación (3.20b) resulte menor que 0,4, se debe asumir que r es igual a 2,5.

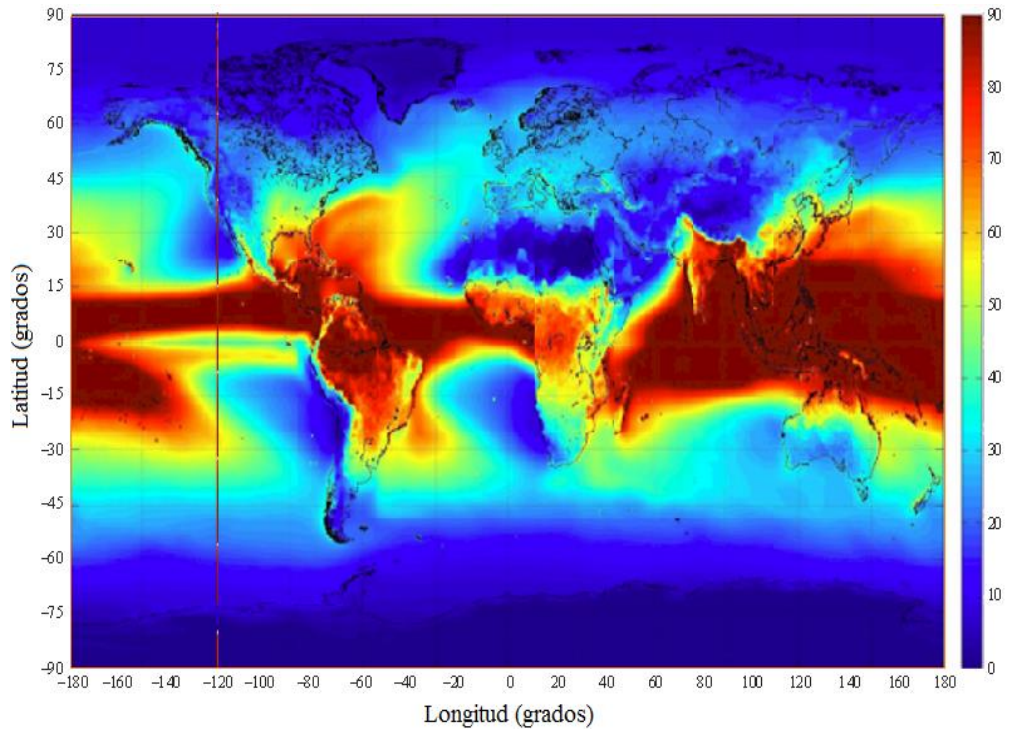


Figura 3.1: $R_{0,01}$ en un periodo anual promedio.

Cabe destacar que la longitud efectiva del enlace d_{ef} , se refiere a la variación que debe hacerse a la longitud real d , de manera que para la longitud d_{ef} , las lluvias presentes en el trayecto del enlace sean consideradas uniformes en espacio y tiempo.

Paso 4

Se procede a calcular la atenuación $A_{0,01}$, en el trayecto del enlace, excedida durante el 0,01% del tiempo de un periodo anual promedio, como sigue:

$$A_{0,01} = \gamma_{0,01} d_{ef} = k R_{0,01}^{\alpha} d_{ef} = k R_{0,01}^{\alpha} r d \quad (3.22)$$

Paso 5

Finalmente, en caso de que el porcentaje de tiempo $p(\%)$ de planificación y dimensionamiento del enlace sea diferente de 0,01%, la atenuación A_p , para el porcentaje $p(\%)$ se determina mediante la siguiente extrapolación:

$$A_p = A_{0,01} C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log p)} \quad (3.23a)$$

$$C_1 = (0,07^{C_0}) [0,12^{(1-C_0)}] \quad (3.23b)$$

$$C_2 = 0,855C_0 + 0,546(1 - C_0) \quad (3.23c)$$

$$C_3 = 0,139C_0 + 0,043(1 - C_0) \quad (3.23d)$$

$$C_0 = \begin{cases} 0,12 + 0,4 \left[\log \left(\frac{f}{10} \right)^{0,8} \right] & f \geq 10 \text{ GHz} \\ 0,12 & f < 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (3.23e)$$

El proceso de extrapolación del modelo de la Recomendación ITU-R P.530-16 es válido para porcentajes de tiempo $p(\%)$ entre 0,1% y 0,001%.

3.2.2 Técnica de Tormenta Sintética

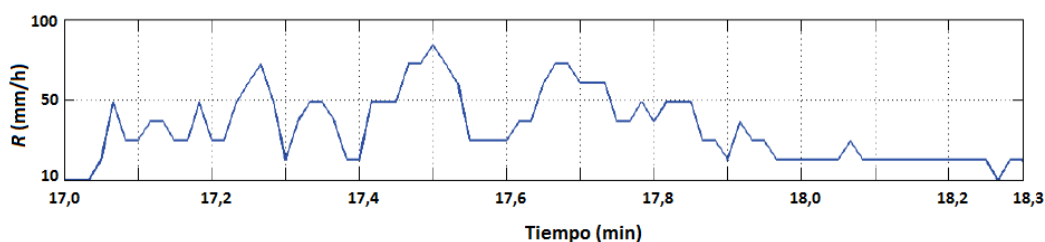
La Técnica de Tormenta Sintética o SST (*Synthetic Storm Technique*) es un método que se ha utilizado con éxito para predecir la atenuación causada por eventos de lluvia en enlaces terrestres con línea de vista (LOS, *Line of Sight*) (Mahmudah y col, 2008; Mandeep, 2009). El método SST fue introducido por primera vez por Drufuca (1973), específicamente para enlaces terrestres, bajo la premisa del concepto de "tormenta sintética" desarrollado por Hamilton y Marshall (1961). La esencia del método en cuestión, es la conversión de series temporales de tasa de precipitación registradas en una determina localidad en series temporales de atenuación de la señal debido a dichos eventos de lluvia, tal como se ilustra en la Figura 3.2a y 3.2b (Lwas y col, 2013). Para dicha conversión se requiere conocer sobre la longitud del trayecto de la señal a través de la celda de lluvia, la velocidad (llamada velocidad de advección) de la

celda de lluvia y la tasa de lluvia en la localidad de interés. En ese sentido, suponiendo que la mencionada localidad se encuentra en un punto específico, x_o , sobre el eje x (la proyección del enlace en el suelo) y que la tasa de precipitación, R [mm/h], se mide en esa localidad a nivel del suelo, la atenuación específica por lluvia, γ [dB/km], en ese punto es dado, según la Recomendación ITU-R P.838-3 (2005), por:

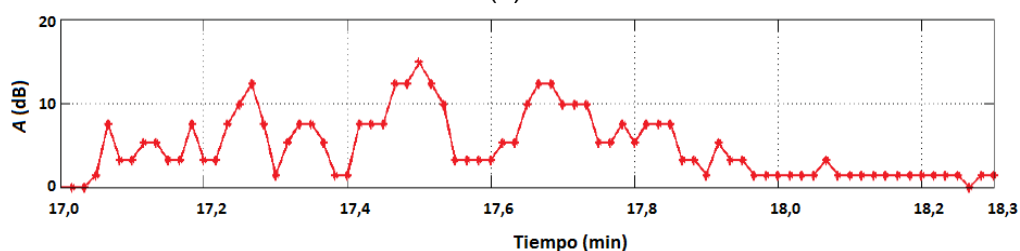
$$\gamma(x_o) = kR^\alpha(x_o) \quad (3.24)$$

Por tanto, para un enlace terrestre de longitud L en el eje x , la atenuación por lluvias se calcula como:

$$A(x_o) = \int_{x_o-L}^{x_o+L} \gamma(x_o) dx = \int_{x_o-L}^{x_o+L} aR^\alpha(x_o) dx \quad (3.25)$$



(a)



(b)

Figura 3.2: a) Ejemplo de serie temporal de la tasa de precipitación R ; b) Serie temporal de la atenuación por lluvias, A , obtenida con el método SST.

Considerando la velocidad, v [km/h], de la celda de lluvia que se interpone en la trayectoria de la señal en su recorrido hasta el receptor, se tiene (Mandeep, 2009):

$$x_o = vt \quad (3.26)$$

La ecuación (3.26) permite expresar la atenuación por lluvias como una función del tiempo, t .

Es oportuno resaltar que, el trayecto de la señal a través de la atmósfera y el movimiento de la celda de lluvia convectiva se considera contenidos en un mismo plano.

De las ecuaciones (3.25) y (3.26) se tiene que la atenuación de la señal debida a las lluvias, en x_o , se puede expresar en términos de la convolución de $R^\alpha(x)$ con un pulso rectangular de amplitud igual a la unidad y longitud L (Mandeep, 2009):

$$A(x_o) = k \int_{-\infty}^{+\infty} R^\alpha(x_o + x) \text{rect}\left(\frac{x}{L}\right) dx = k \int_{-\infty}^{+\infty} R^\alpha(x) \text{rect}\left(\frac{x_o - x}{L}\right) dx \quad (3.27)$$

3.2.3 Modelo Pérez-Mello

El modelo Pérez-Mello es uno de los métodos para la predicción de la atenuación por lluvias en enlaces terrestres, que emplea la distribución completa de la tasa de precipitación. Fue desarrollado originalmente en 2004 usando la base de datos DB-SG5 disponible en la ITU para aquella época más resultados de mediciones realizadas en Brasil (Perez-Garcia y Silva-Mello, 2004). La versión original del modelo supone que para la estimación de la distribución de probabilidad acumulativa de la atenuación por lluvias, la no uniformidad de la tasa de precipitación puede ser modelada por una celda uniforme equivalente cuya longitud depende de la tasa de precipitación.

La atenuación por lluvias excedida durante $p(\%)$ del tiempo es dada por (Perez-Garcia y Silva-Mello, 2004):

$$A_p = \gamma d_{eff} \quad (3.28)$$

donde d_{eff} es la longitud de trayecto efectiva y la atenuación específica por lluvias es función de la tasa de precipitación puntual, R_p , es decir:

$$\gamma = k R_p^\alpha \quad (3.29)$$

La longitud de trayecto efectiva es dada por:

$$d_{eff} = r d \quad (3.30)$$

donde d es la longitud real del trayecto y r es el factor de reducción de d , el cual toma en cuenta la mencionado no uniformidad de la lluvia.

El factor r se determina mediante (Perez-Garcia y Silva-Mello, 2004):

$$r = 3,445 d^{-0,164} R_p^{\left(-0,369+\frac{0,115}{d}\right)} \quad (3.31)$$

Por tanto, la atenuación por lluvias superada durante $p(\%)$ del tiempo, en el modelo Perez-Mello, es dada por:

$$A_p = 3,445k d^{-0,836} R_p^{\left(-0,369+\frac{0,115}{d}\right)} \quad (3.32)$$

En 2.007, el modelo Perez-Mello original fue modificado mediante la consideración de los conceptos de factor de reducción, r , y longitud de trayecto efectiva, d_{eff} , del método ITU existente en aquella época. En ese sentido, la nueva versión del modelo, llamada modelo Silva-Pontes-Souza-Perez o modelo SPSP (Silva-Mello y col, 2007) asume que una celda de lluvia equivalente puede interceptar el enlace en cualquier posición con igual probabilidad y que d_{eff} , que se define como la longitud media de la intersección entre la celda y el trayecto la trayectoria, y está dada por:

$$d_{eff} = rd = \frac{1}{d_0+d} \int_{-d_0}^d L(x)dx = \frac{1}{1+d/d_0} d \quad (3.33)$$

donde d_0 es el diámetro de celda equivalente.

En consecuencia, la atenuación por lluvias excedida durante $p(\%)$, se determina a partir de:

$$A_p = \gamma d_{eff} = k R_{eff}^{\alpha} \frac{d}{1+d/d_0} \quad (3.34a)$$

$$R_{eff} = 1,763 R_p^{(0,753+0,197/d)} \quad (3.34b)$$

$$d_0 = 119 R_p^{-0,244} \quad (3.34c)$$

donde R_{eff} es conocida como la tasa efectiva de lluvia y fue introducida en la nueva versión del modelo SPSP, para permitir la obtención de longitudes efectivas de enlace mayores que la longitud real del enlace.

CAPÍTULO 4

4. DESARROLLO DE NUEVOS MODELOS DE CONVERSIÓN DE TIEMPOS DE INTEGRACIÓN DE DISTRIBUCIONES ACUMULATIVAS DE LLUVIA

4.1 Base de Datos de Tasa de Precipitación del INAMHI

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) es una entidad pública del Estado ecuatoriano responsable *“de la generación y difusión de la información hidrometeorológica que sirva de sustento para la formulación y evaluación de los planes de desarrollo nacionales y locales y la realización de investigación propia o por parte de otros actores, aplicada a la vida cotidiana de los habitantes y los sectores estratégicos de la economía; apoyado en personal especializado y en una adecuada utilización de las nuevas tecnologías de la automatización, información y comunicación”* (INAMHI, 2019a).

Por ello, entre otras actividades, el INAMHI registra la tasa de lluvia que se precipita a lo largo y ancho del Ecuador, información esencial para el desarrollo del presente trabajo de titulación. Para llevar cabo dicho registro, la entidad cuenta con una red de estaciones meteorológicas, clasificadas en convencionales¹ y automáticas², distribuidas en el país, en las cuales *“se realizan las observaciones para determinar el comportamiento de la atmósfera y el medio ambiente, los parámetros que se observan en la misma son: temperatura del aire y del suelo, humedad del aire, viento, radiación solar, evaporación, precipitación, etc.”* (INAMHI, 2019b). Dentro de los instrumentos existentes en las mencionadas estaciones meteorológicas, se encuentra el destinado específicamente al registro de la tasa de precipitación, es decir, el pluviómetro.

¹ Estación meteorológica convencional es aquella en la que el registro de las lecturas diarias de los instrumentos de medición se hace de forma manual.

² Una estación meteorológica automática envía la información, producto del registro de las mediciones, de manera automática a un servidor a través de un sistema de telecomunicaciones.

En la Tablas 7 y 8, aparecen las estaciones meteorológicas de las cuales el INAMHI aportó resultados de mediciones de la precipitación para el desarrollo del este trabajo. Es oportuno resaltar que en las Tablas 7 y 8, también aparecen algunas estaciones que no son propiedad propiamente dicho de INAMHI, tal es el caso de las estaciones M0012 (La Cuca, cantón Arenillas, provincia de El Oro).

Código INAMHI	Estación o Localidad	Provincia	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)
M0002	La Tola	Pichincha	-0,231667	-78,370333	2503
M0003	Izobamba	Pichincha	-0,366089	-78,555061	3085
M0004	Rumipamba Salcedo	Cotopaxi	-1,018056	-78,592222	2680
M0006	Pichilingue	Los Ríos	-1,074361	-79,492944	81
M0008	Puyo	Pastaza	-1,5075	-77,943889	960
M0012	La Cuca	El Oro	-3,492222	-80,056944	53
M0024	Iñaquito	Pichincha	-0,175	-78,485278	2789,12
M0025	La Concordia	Esmeraldas	-0,024722	-79,380278	379
M0026	Puerto Ila	Santo Domingo	-0,476111	-79,338888	319
M0031	Cañar	Cañar	-2,552167	-78,94525	3084
M0033	Loja - La Argelia	Loja	-4,036389	-79,201111	2174
M0037	Milagro - Ingenio Valdez	Guayas	-2,118083	-79,600361	23
M0055	Quito Aeropuerto - DAC	Pichincha	-0,14	-78,485	2794
M0102	El Ángel	Carchi	0,626389	-77,943889	3000
M0103	San Gabriel	Carchi	0,604167	-77,819444	2860
M0117	Machachi	Pichincha	-0,524167	-78,540556	2944
M0124	San Juan - La Mana	Cotopaxi	-0,916389	-79,245556	215
M0146	Cariamanga	Loja	-4,333333	-79,554444	1950
M0150	Amaluza - 1	Loja	-4,584722	-79,430556	1672
M0156	Quinindé	Esmeraldas	0,316111	-79,468889	109
M0162	Chone - Univ. Católica	Manabí	-0,664167	-80,036389	36
M0168	Pedernales	Manabí	0,063806	-80,050222	22
M0188	Papallacta	Napo	-0,365	-78,144722	3150
M0258	Querochaca	Tungurahua	-1,367139	-78,605556	2892
M1036	Riobamba - Politécnica	Chimborazo	-1,65	-78,65	2740
M1040	Macas - San Isidro PNS	Morona Santiago	-2,210278	-78,161389	1110
M1094	Tomalon - Tabacundo	Pichincha	0,033333	-78,233333	2790

Tabla 7: Estaciones meteorológicas de la base de datos original

Código INAMHI	Estación o Localidad	Provincia	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)
M1107	Laguacoto	Bolívar	-1,614444	-78,998333	2622
M1128	El Ingenio	Loja	-4,414722	-79,431944	1189
M1170	Santa Elena	Santa Elena	-2,235	-80,875083	44
M1203	Lumbaqui	Sucumbios	0,040556	-77,333889	580
M1207	Nobol	Guayas	-1,9	-80,022222	7
M1208	La Teodomira	Manabí	-1,164167	-80,39	60
M1217	Bahía de Caráquez - PUCE	Manabí	-0,659444	-80,3975	12
M1219	Tena - Hda. Chaupishungo	Napo	-0,916833	-77,819028	553
M1233	Cantagallo - Granja Unesum	Manabí	-1,286944	-80,728889	64
M1240	Ibarra - 1	Imbabura	0,333889	-78,139722	2247
M1242	El Almendral - Granja Almendral	Loja	-4,039444	-79,792778	1040
M1246	Las Lajas	El Oro	-3,798722	-80,060833	422
M1247	Chuquiribamba	Loja	-3,85	-79,333333	2390
M1249	Palesema	Esmeraldas	1,305833	-78,731667	45
M1253	Puerto Hondo	Guayas	-2,1925	-80,024167	5
M1259	Macara - 1	Loja	-4,369722	-79,945	544
M1271	Guayaquil - Facultad CCNN	Guayas	-2,1465	-79,9173	21
M1273	Lloa	Pichincha	-0,229722	-78,565278	3042
M5089	El Tablón - Las Cuevas	Azuay	-2,811589	-79,324639	3661
M5090	La Lampada	Guayas	-2,528689	-79,502636	35
M5092	Gualleturo	Cañar	-2,527669	-79,134606	3078
M5133	Cuerpo de Bomberos - Divino Niño Durán	Guayas	-2,1695	-79,8334	3
M5134	Ministerio de Salud Machala - SNEM	El Oro	-3,259303	-79,954136	3
M5135	Hospital Público Huaquillas	El Oro	-3,48205	-80,2275	14
M5136	Colegio 13 de Mayo - Portovelo	El Oro	-3,720014	-79,619097	983
M5137	Extensión Universidad de Loja - Zaruma	El Oro	-3,681169	-79,625381	1475
M5147	Universidad Regional Amazónica - Ikiam	Napo	-0,950173	-77,861065	596

Tabla 8: Estaciones meteorológicas de la base de datos original (continuación)

La base de datos de tasa de precipitación puesta a disposición por parte del INAMHI para la realización del trabajo se basó en un tiempo de integración del pluviómetro de 1-minuto, que es el tiempo de integración mínimo exigido por la

ITU (*International Telecommunication Union*) para aplicaciones de radiopropagación.

4.2 Distribuciones Acumulativas de Tasa de Precipitación con Diferentes Tiempos de Integración

Tal como fue mencionado anteriormente, los valores de la tasa de precipitación, R , superados durante un determinado porcentaje de tiempo³, $p(\%)$, requeridos para la estimación de la atenuación por lluvias, tanto para enlaces terrestres como para enlaces satelitales, se obtienen a partir de la distribución acumulativa de dicha tasa de lluvia; aunque a decir verdad, debido al comportamiento de la tasa de precipitación en función del porcentaje de tiempo, $p(\%)$, el cual, de acuerdo a la Figura 2.9, muestra una disminución de la referida tasa a medida que aumenta el porcentaje de tiempo, en realidad se trata de una distribución complementaria acumulativa, ya que, como es sabido, una distribución acumulativa es creciente.

También, conforme fue dicho anteriormente, los mencionados valores de la tasa de lluvia, R , que se utilizan en los modelos de predicción de la atenuación por lluvias, serán obtenidos en este trabajo, a partir de la base de datos aportada por el INAMHI para la tasa en cuestión.

En ese sentido, dada la relativamente significativa cantidad de estaciones meteorológicas con datos de tasa de precipitación suministrados por el INAMHI para este trabajo, en primer lugar se procedió a seleccionar entre una (1) o dos (2) estaciones representativas de las tres (3) regiones climáticas del Ecuador (Castro-Loayza, 2014), dependiendo de la factibilidad de los datos disponibles. Los criterios a seguir, para llevar a cabo la mencionada selección, fueron, en el siguiente orden:

- Se descartaron las estaciones que contenían menos de un (1) periodo anual de mediciones. Esto se debe a que, tal como se ha mencionado anteriormente, para propósitos de radiopropagación, la tasa de precipitación debe ser medida al menos durante un periodo anual consecutivo para que dichas mediciones

³ Se refiere al porcentaje de indisponibilidad, durante un periodo anual promedio, proyectado para un enlace RF (radiofrecuencia) a ser planificado y dimensionado, es decir, el mencionado porcentaje de tiempo es el opuesto a la confiabilidad del enlace

incluyan todas las variaciones climáticas (estaciones, velocidad y dirección del viento, entre otras), que impactan a la tasa de lluvia, a lo largo de un periodo anual.

- De las restantes estaciones, se consideraron aquellas contentivas de al menos un intervalo de tiempo con un 95% del total de mediciones idealmente realizables durante un periodo anual promedio con un tiempo de integración del pluviómetro de 1-minuto. Ese número total ideal de mediciones es 24 horas/día x 60 minutos/hora x 365 días/año = 525.600 minutos/año, por lo que el 95% es igual a 499.320 minutos. La selección del mencionado 95% es debido a que se trata del nivel de confianza típicamente considerado como aceptable para series temporales (Konar y Bhattacharya, 2017; Mills, 2019).
- Seguidamente, se procedió a excluir, dentro de las estaciones seleccionadas en el paso inmediatamente anterior, a las estaciones en las que algunos datos de tasa de precipitación estaban corruptos, bien fuese en la fecha y/o en la hora y/o en el valor registrado en la medición, ya que, dichos datos impiden el procesamiento de la serie temporal o, en caso de los mismos ser excluidos, se puede no cumplir con el nivel de confianza del al menos el 95%.
- Se seleccionó a lo sumo, dos estaciones por provincia.

Finalmente, las estaciones meteorológicas seleccionadas, para el desarrollo del presente trabajo de titulación, resultaron ser cinco (5):

Región Costanera

Código: M1249

Instalada en terrenos de la empresa Palesema, en el cantón San Lorenzo.

Provincia: Esmeraldas.

Código: M1271

Instalada en la Facultad de Ciencias Naturales (CCNN) de la Universidad de Guayaquil.

Provincia: Guayas.

Región Andina

Código: M0002

Instalada en el barrio La Tola de Quito.

Provincia: Pichincha.

Código: M0102

Instalada en la población El Ángel, del cantón Espejo.

Provincia: Carchi.

Región Oriental

Código: M0008

Instalada en la vía Puyo-Macas, a 2 km al este de la ciudad del Puyo (Llerena-Vargas, 2009).

Provincia: Pastaza.

En la Figura 4.1, se ilustra la ubicación geográfica de las cinco (5) estaciones seleccionadas.

A continuación, algunos de los detalles resaltantes de cada una de las cinco (5) base de datos correspondientes a cada una de las cinco (5) estaciones meteorológicas escogidas:

Estación M1249 (Palesema, Esmeraldas)

Periodo anual analizado: desde las 00:00:03 horas del 01/08/2014 hasta las 23:53:04 horas del 31/07/2015

Total de medidas en el periodo anual considerado: 516.932

Máximo valor de la tasa de precipitación para tiempo de integración de 1-minuto,
 $R_{\max_1\min}$: 166,97 mm/h



Figura 4.1: Ubicación de las 5 estaciones meteorológicas

Estación M1271 (Guayaquil, Guayas)

Periodo anual analizado: desde las 12:55:03 horas del 25/07/2016 hasta las 12:55:03 horas del 25/07/2017

Total de medidas en el periodo anual considerado: 506.934

Máximo valor de la tasa de precipitación para tiempo de integración de 1-minuto,
 $R_{\max_1\text{min}}$: 134,4 mm/h

Estación M0002 (Quito, Pichincha)

Periodo anual analizado: desde las 19:29:03 horas del 20/12/2014 hasta las 19:28:03 horas del 20/12/2015

Total de medidas en el periodo anual considerado: 506.032

Máximo valor de la tasa de precipitación para tiempo de integración de 1-minuto,

$R_{\max_1\text{min}}$: 114 mm/h

Estación M0102 (El Ángel, Carchi)

Periodo anual analizado: desde las 00:00:04 horas del 01/03/2015 hasta las 23:59:04 horas del 29/02/2016

Total de medidas en el periodo anual considerado: 507.463

Máximo valor de la tasa de precipitación para tiempo de integración de 1-minuto,

$R_{\max_1\text{min}}$: 96 mm/h

Estación M0008 (Puyo, Pastaza)

Periodo anual analizado: desde las 19:29:03 horas del 20/12/2014 hasta las 19:28:03 horas del 20/12/2015

Total de medidas en el periodo anual considerado: 517.500

Máximo valor de la tasa de precipitación para tiempo de integración de 1-minuto,

$R_{\max_1\text{min}}$: 162 mm/h

La distribución complementaria acumulativa, $F_R(R)$ de la tasa de precipitación para un tiempo de integración de 1-minuto se obtiene fijando un determinado valor R para dicha tasa, que se encuentre dentro del intervalo de valores de ese parámetro, el cual está comprendido hasta el máximo valor $R_{\max_1\text{min}}$ de la base de datos correspondiente y, obteniendo la fracción de tiempo (en minutos), del tiempo total de la medición (en minutos), que la tasa de precipitación excede dicho valor R . Esa fracción de tiempo se expresa en términos de porcentaje. El procedimiento se repite para otros valores de R , dentro del intervalo permitido. En otras palabras, se tiene que (Pérez-García, 2003):

$$F_R(R) = \frac{\text{Tiempo total en que la tasa de precipitación excede el valor } R(\text{mm/h})}{\text{Tiempo total de la medición}} \quad (4.1)$$

En las Figuras 4.2 a 4.6, se muestran las distribuciones complementarias acumulativas de la tasa de precipitación, obtenidas con un tiempo de integración de 1-minuto, para las estaciones M1249, M1271, M0002, M0102 y M0008, respectivamente.

Por su parte, en la Figura 4.7, se observan, de forma conjunta, las mencionadas distribuciones complementarias acumulativas de las cinco (5) estaciones meteorológicas en cuestión.

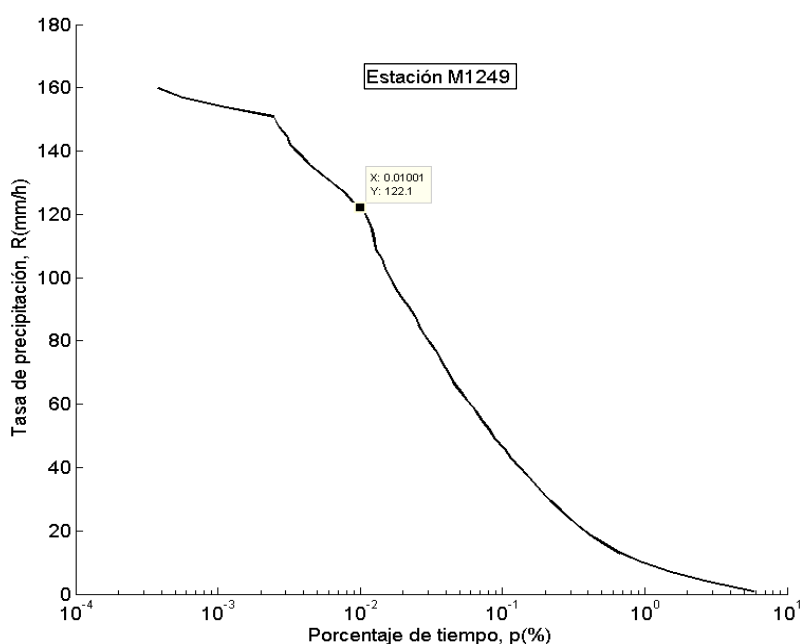


Figura 4.2: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para la estación M1249 (Palesema, Esmeraldas)

En las Figuras 4.2 a 4.6, se verifica el comportamiento esperado desde la Figura 2.9 para la variación de la tasa de precipitación en función del porcentaje de tiempo, p (%), es decir, las lluvias son más intensas para los porcentajes de tiempo menores y disminuyen a medida que dicho porcentaje se incrementa, comportamiento que es de especial importancia en la planificación y dimensionamiento de los sistemas inalámbricos de telecomunicaciones que operan en frecuencias superiores a 10 GHz.

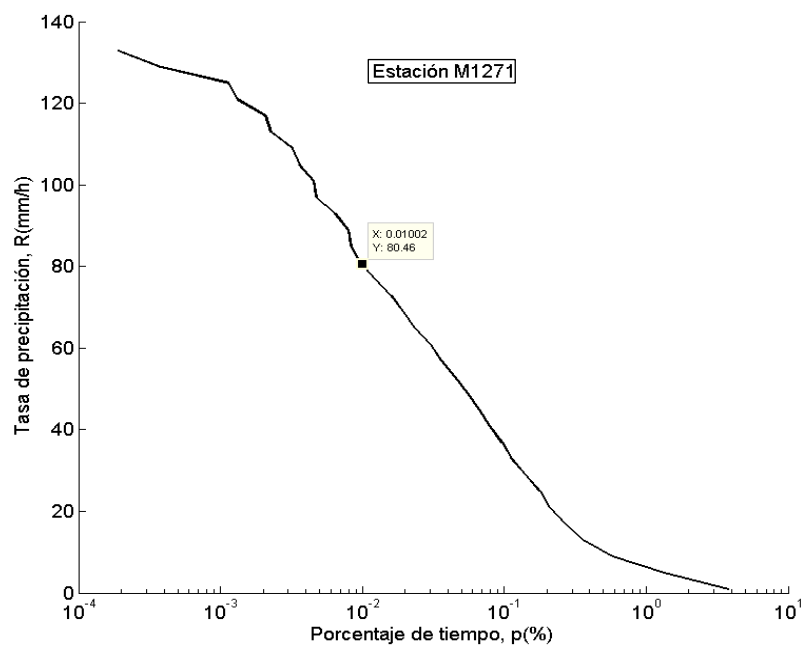


Figura 4.3: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para la estación M1271 (Guayaquil, Guayas)

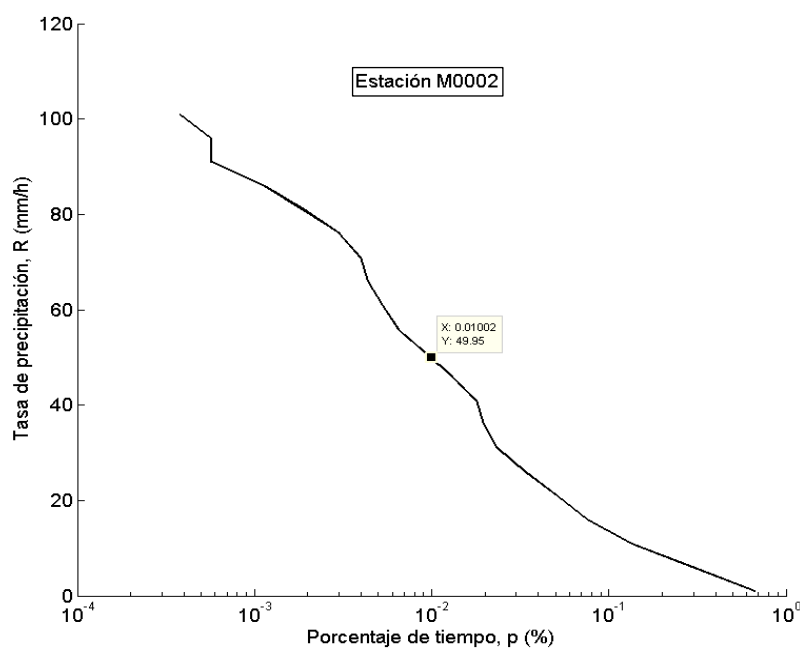


Figura 4.4: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para la estación M0002 (Quito, Pichincha)

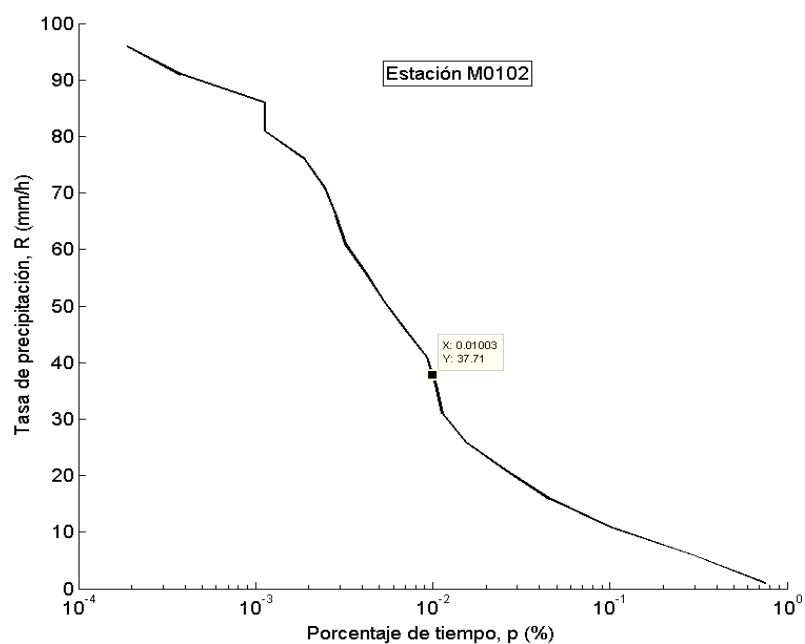


Figura 4.5: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación tiempo de integración 1-minuto, para la estación M0102 (El Ángel, Carchi)

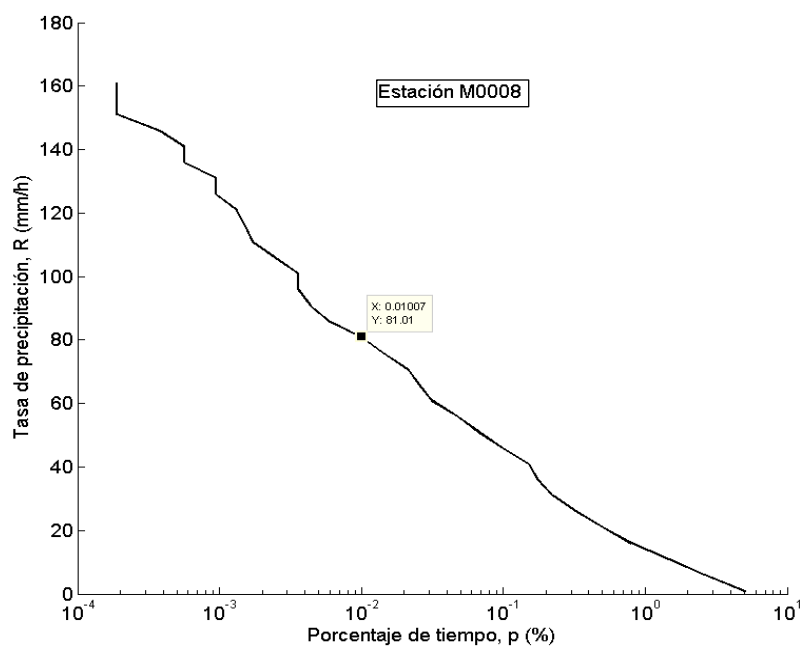


Figura 4.6: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para la estación M0008 (Puyo, Pastaza)

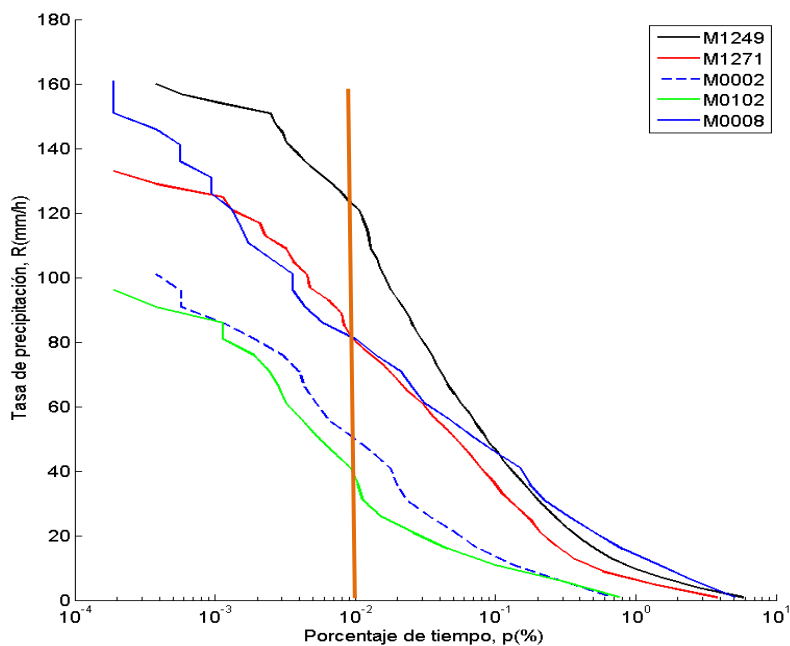


Figura 4.7: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempo de integración 1-minuto, para las cinco (5) estaciones

En las Figuras 4.2 a 4.6, también se pueden observar los valores de la tasa de precipitación, $R_{0,01}$, para el 0,01% del tiempo del año, valor utilizado por algunos de los modelos de conversión de estadísticas de lluvias y también por algunos de los modelos para la estimación de la atenuación por lluvias. Específicamente, para las localidades consideradas en las Figuras 4.2 a 4.6, los valores en cuestión son:

- M1249 (Palesema, Esmeraldas): $R_{0,01} = 122,1$ mm/h
- M1271 (Guayaquil, Guayas): $R_{0,01} = 80,46$ mm/h
- M0002 (Quito, Pichincha): $R_{0,01} = 49,95$ mm/h
- M0102 (El Ángel, Carchi): $R_{0,01} = 37,71$ mm/h
- M0008 (Puyo, Pastaza): $R_{0,01} = 81,01$ mm/h

También en las Figuras 4.2 a 4.6, se puede notar que el hecho de que la tasa de precipitación $R_{0,01}$ sea mayor en una determinada distribución complementaria acumulativa de la tasa de precipitación de una localidad en comparación con la

distribución de dicha tasa de otra localidad, no significa que necesariamente esa relación sea la misma para los restantes porcentajes de tiempo.

Finalmente, en la Figura 4.7, si bien la misma no se puede considerar conclusiva respecto a los regímenes pluviométricos anuales de las regiones costanera, andina y oriental del Ecuador, además de que no es objetivo de este trabajo, si se observa, de manera general, concordancia respecto al hecho de que el régimen pluviométrico de la región andina, en un periodo anual, es menor en relación a los que se presentan en las regiones costanera y oriental (INAMHI, 2015).

Ahora bien, de la base de datos de tasa de precipitación correspondiente a cada una de las cinco (5) estaciones meteorológicas que finalmente resultaron seleccionadas para el desarrollo del este trabajo de titulación, también se obtienen las distribuciones complementarias acumulativas de la referida tasa para tiempos de integración de 15-minutos, 30-minutos y 60-minutos. En las Figuras 4.8 a 4.12, se muestran los resultados obtenidos para las cinco (5) estaciones. En cada una de dichas figuras también se incluye la distribución complementaria acumulativa de la tasa de lluvia para tiempo de integración de 1-minuto, ya obtenida en las Figuras 4.2 a 4.6.

En las Figuras 4.8 a 4.12, se observa el impacto anteriormente descrito en el Capítulo 1, en relación a los mayores valores de la tasa de precipitación a los que tiende la distribución acumulativa a medida que el tiempo de integración disminuye, tendencia que se manifiesta de forma más clara para los menores porcentajes de tiempo. Por ello, también como ha sido dicho anteriormente, se estaría incurriendo en un error, el cual será de significativas proporciones en la medida que los porcentajes de tiempo considerados para la estimación de la atenuación por lluvias sean más exigentes, es decir, menores, si en lugar de utilizar un tiempo de integración, como máximo, de 1-minuto, tal como lo establece la ITU, se utilizan tiempos de integración mayores.

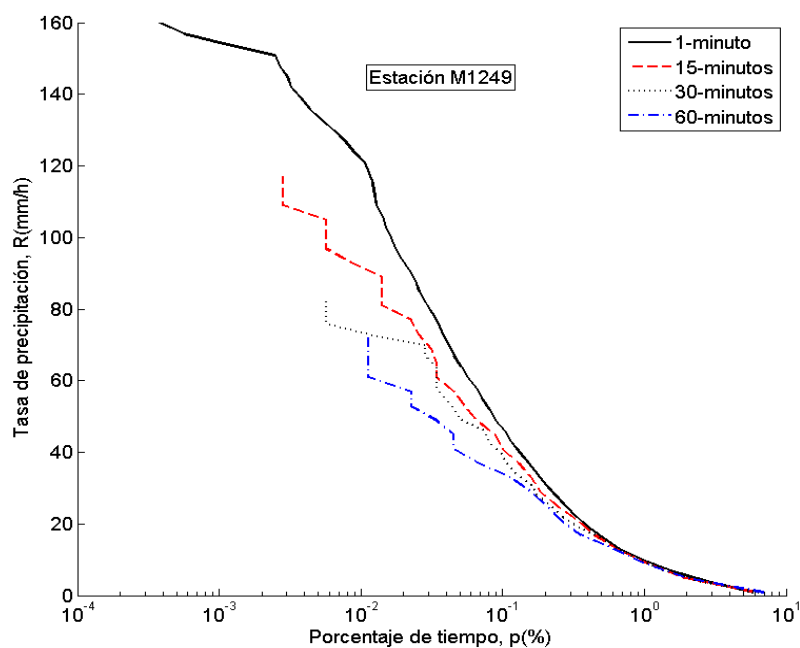


Figura 4.8: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (Palesema, Esmeraldas)

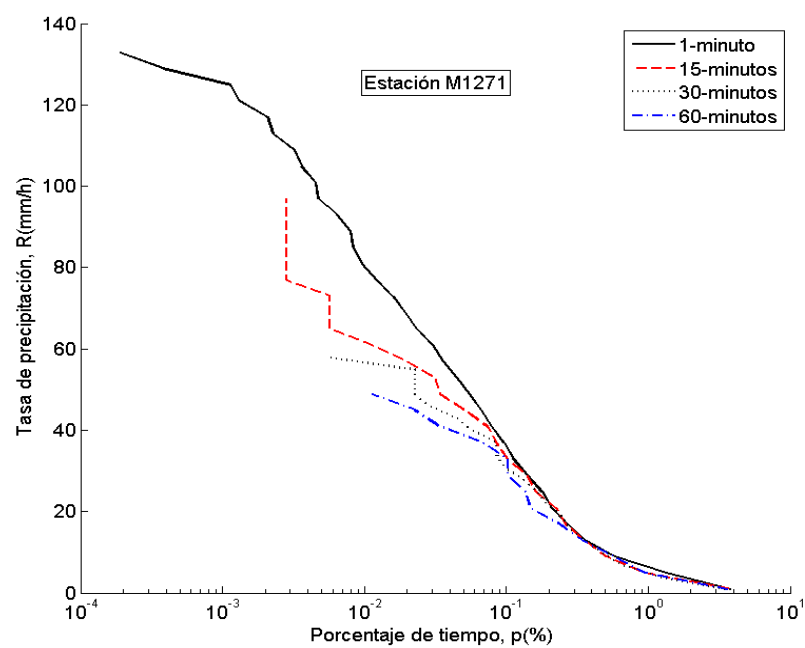


Figura 4.9: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (Guayaquil, Guayas)

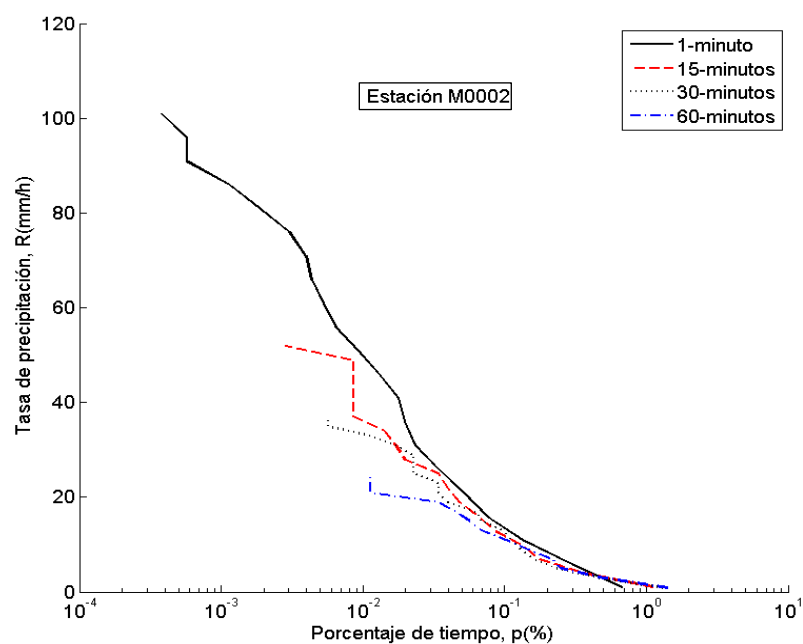


Figura 4.10: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (Quito, Pichincha)

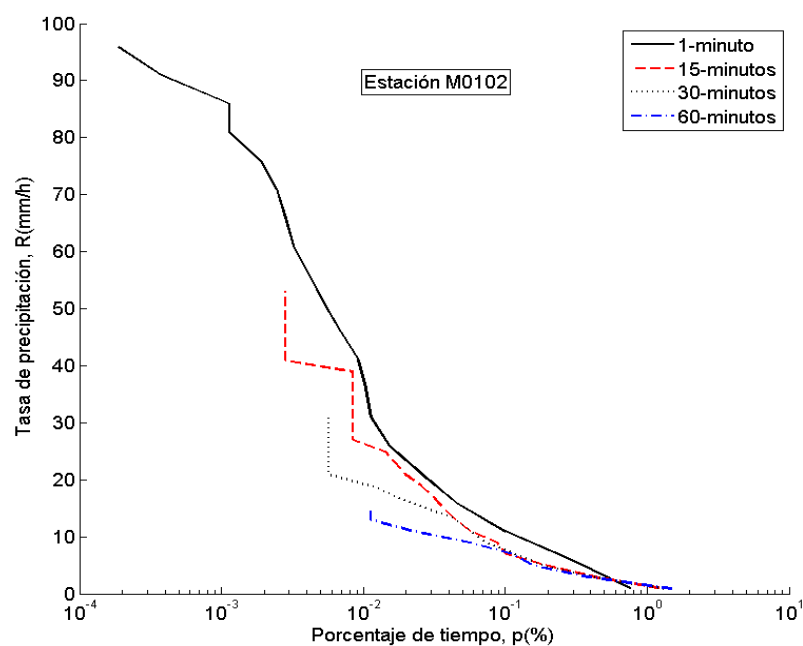


Figura 4.11: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (El Ángel, Carchi)

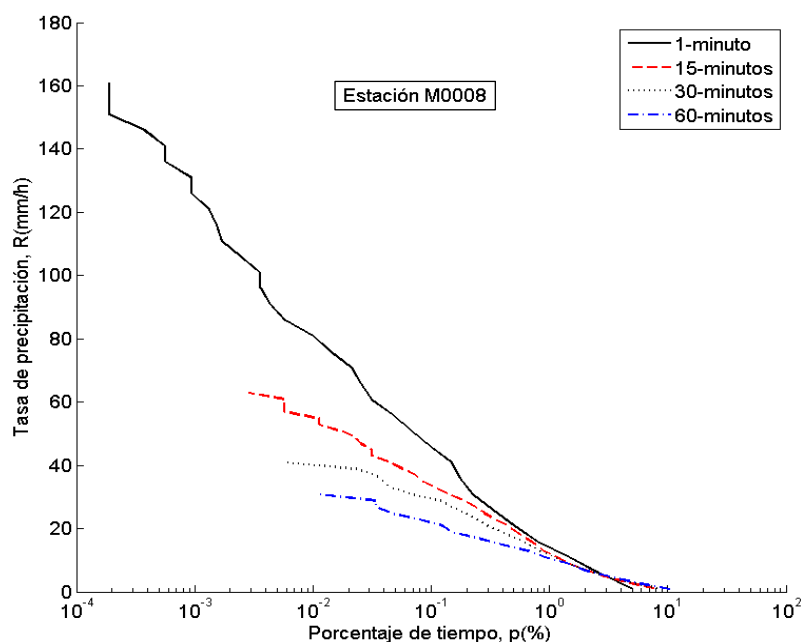


Figura 4.12: Distribución acumulativa de la tasa de precipitación, tiempos de integración de 1-min, 15-min, 30-min y 60-min (Puyo, Pastaza)

Por otra parte, en meteorológicas en estudio, los valores de la tasa de precipitación, M_m , acumulada anual, la máxima tasa de lluvia mensual, M , en ese periodo anual y el número de días, U , con lluvias convectivas en ese mismo periodo, resaltando que éste último dato, si bien no fue suministrado como tal en ninguna de las bases de datos suministradas por el INAMHI para la realización de este trabajo de titulación, el mismo fue obtenido de forma aproximada a partir de uno de los mapas isoceráunicos reportados en la literatura (Verdugo, 2018).

Código	Estación	M_m (mm)	M (mm)	U
M1249	Palesema, Esmeraldas	3678,4	669,7	30
M1271	Guayaquil, Guayas	2268,4	500,4	30
M0002	Quito, Pichincha	553,4	156,5	30
M0102	El Ángel, Carchi	517,2	125	30
M0008	Puyo, Pastaza	4656,2	598,3	30

Tabla 9: Valores M_m , M y U , para las cinco (5) estaciones meteorológicas

En la Tabla 9, se observa una vez más, específicamente según los valores de la tasa de lluvia, M_m , acumulada anual de cada estación meteorológica, una

tendencia acorde con la información reportada en la literatura en relación al menor régimen pluviométrico anual de la región andina en comparación con la cantidad de lluvia acumulada anual en las regiones costanera y oriental. Incluso, esos mismos valores de M_m también están en concordancia con el reporte acerca de que en la región oriente la lluvia acumulada anual es la mayor en todo el Ecuador (INAMHI, 2015).

4.3 Distribuciones Acumulativas Estimadas de Tasa de Precipitación con Tiempo de Integración de 1-minuto

En esta sección, se implementarán los modelos de conversión de tiempo de integración de estadísticas de lluvia abordados en el Capítulo 3, para estimar la distribución (complementaria) acumulativa de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, para las 5 localidades del Ecuador en estudio, a partir de mediciones de dicha tasa con tiempos de integración mayores, específicamente, 1-mes ó 1-hora. Para ello, a modo de ejemplo, a continuación se realizarán los cálculos correspondientes a la implementación en cuestión, para la localidad de la estación M1271, ubicada en Guayaquil, provincia del Guayas, en las coordenadas 2,1465 latitud Sur y 79,9173 longitud Oeste, tal como se desprende de la Tabla 8.

Modelo de Rice-Holmberg (Modelo RH)

Los parámetros de la estadística anual de la tasa de precipitación de la localidad de la estación M1271, a ser utilizados en la implementación del modelo RH se obtienen de la Tabla 9:

- Tasa de precipitación anual, M : 2268,4 mm
- Tasa de precipitación máxima mensual, M_m : 500,4 mm/h
- Número de días con lluvias convectivas, U : 30

De la ecuación (3.3), se tiene:

$$\beta = (0,03 + 0,97 e^{-5e^{-0,004 \times 500,4}})[0,25 + 2e^{-0,35(1+0,125 \times 2268,4)/30}] = 0,168764$$

Reemplazando el valor de β en la ecuación (3.4), resulta:

$$P(r \geq R) = 25,87725[0,00506e^{-0,03R} + 0,16625(e^{-0,258R} + 1,86 e^{-1,63R})] \quad (4.2)$$

Conocido el valor del porcentaje de tiempo, $p(\%)$, la ecuación (4.2) permite hallar el correspondiente valor de R .

Dado que la ecuación (4.2) no es lineal, en este trabajo se recurre a la herramienta computacional *Solver* del *Excel Microsoft Office*, para determinar el valor de R . Así, por ejemplo, para p igual al 0,05%, se obtiene un valor de R igual a 32,73 mm/h.

Modelo de Chebil-Rahman (Modelo CR)

En este caso, se requiere, como dato de entrada, la tasa de lluvia, $R_{60}(p)$, rebasada un $p(\%)$, obtenida a partir de estadísticas de lluvia correspondientes a mediciones realizadas con tiempo de integración de 60-minutos (1-hora), porcentaje de tiempo que es el mismo para el cual se desea estimar la tasa de precipitación con un tiempo de integración de 1-minuto, de acuerdo a la ecuación (3.6).

En ese sentido, para la localidad de la estación meteorológica M1271 y un porcentaje de tiempo igual a 0,5%, el valor de $R_{60}(0,5)$ se extrae de la curva correspondiente al tiempo de integración de 60-minutos (curva de color azul) de la Figura 4.9, resultando ser aproximadamente 38,81 mm/h. Por tanto, de la ecuación (3.6), se tiene:

$$R_1(0,05) = 38,81[0,772 (0,05)^{-0,041} + 1,141e^{-2,570 \times 0,05}] = 82,04 \quad [\text{mm/h}]$$

Modelo de Moupfouma-Martin Refinado (Modelo MM-R)

Para la aplicación del modelo MM-R, dado que se cuenta con los valores experimentales de la tasa de precipitación, $R_{0,01}$, rebasada durante el 0,01% del tiempo en un año promedio, no es necesario recurrir a la ecuación (3.5), la cual es de utilidad cuando no se tiene el valor de $R_{0,01}$ derivado de mediciones locales. Para la localidad considerada para el caso ejemplo, de la Figura 4.3 se tiene que $R_{0,01}$ es igual a 80,46 mm/h. Por tanto, de la ecuación (3.7b), se obtiene:

$$b = \left(\frac{R}{80,46} - 1 \right) \ln \left(1 + \frac{R}{80,46} \right)$$

Por su parte, de la ecuación (3.7c), para climas tropicales y subtropicales, resulta:

$$u = 0,11447 e^{\left[-1,066\left(\frac{R}{80,46}\right)^{0,214}\right]}$$

Reemplazando las expresiones de b y u en la ecuación (3.7a), se tiene:

$$P(r > R) = 10^{-2} \left(\frac{80,46+1}{R+1}\right) \left(\frac{R}{80,46}-1\right) \ln\left(1+\frac{R}{80,46}\right) e^{\left[0,11447 e^{\left[-1,066\left(\frac{R}{80,46}\right)^{0,214}\right]}(80,46-R)\right]} \quad (4.3)$$

La ecuación (4.3) también es del tipo no lineal, por lo que, nuevamente se recurre a la herramienta computacional *Solver* del *Excel Microsoft Office*, para hallar los valores de R para por los porcentajes de tiempo deseados. De esa manera, por ejemplo, para p igual al 0,05%, el valor resultante de R es igual a 42,07 mm/h.

Modelo de Ito-Hosoya (Modelo IH)

Para la misma estación M1271, el valor del factor β es el mismo que fue obtenido para el modelo Rice-Holmberg, es decir, igual a 0,168764.

Por su parte, para el porcentaje de tiempo, p , igual a 0,05%, se tiene que $X = \log(0,05) = -1,30103$. Por tanto, de la ecuación (3.8b), se obtiene:

$$\begin{aligned} \log a_{0,05} &= 0,1574155 (-1,30103)^4 + 1,348171 (-1,30103)^3 + 3,528175(-1,30103)^2 \\ &\quad + 1,479566 (-1,30103) - 2,302276 = -0,77312 \end{aligned}$$

de donde resulta $a = 0,16861$

Ahora bien, de las ecuaciones (3.8c) y (3.8d), se obtiene los factores b_p y c_p , como sigue:

$$\begin{aligned} b_{0,05} &= [-4,583266 (-1,30103)^4 - 40,9816 (-1,30103)^3] \times 10^{-2} \\ &\quad + [-166,2387(-1,30103)^2 - 82,61178 (-1,30103) + 91,1857] \times 10^{-2} = 0,79030 \\ c_{0,05} &= [2,574688 (-1,30103)^4 + 15,4903 (-1,30103)^3] \times 10^{-2} \\ &\quad + [17,47827(-1,30103)^2 - 28,46313 (-1,30103) + 1,255081] \times 10^{-2} = 0,41135 \end{aligned}$$

Finalmente,

$$R_{0,05} = 0,16861(2288,4)^{0,79030}(0,168764)^{0,41135} = 36,40 \quad [\text{mm/h}]$$

Modelo de Matricciani

Para la implementación de este modelo, se considera la conversión desde las estadísticas de lluvia obtenidas experimentalmente con tiempo de integración de 60-minutos. No obstante, también se acude a las estadísticas de lluvia con tiempo de integración de 1-min, es decir, τ igual a un (1) minuto, para obtener el tiempo, T_R , que es el tiempo total de lluvia medido mediante intervalos τ , durante el periodo de observación, T_{obs} (525.600 min). Para la localidad de la estación meteorológica M1271, resulta:

$$T_R = 21.812,6333 \text{ min}$$

Por tanto, de la ecuación (3.10c) se tiene que:

$$P_o = \frac{21812,6333}{525600} = 0,04150 = 4,150 \%$$

Sustituyendo en la ecuación (3-10d) y con T (tiempo de integración de las estadísticas a ser convertidas) y T_o iguales a 60 min y 0 min, respectivamente, y N_R , es decir, el número de series temporales de lluvia en el periodo de observación obtenido a partir para las mediciones reportadas por el INAMHI para la estación M1271, igual a 325, se tiene:

$$P_{R_o} = 0,04150 + 325 \frac{(60 + 0 - 1)}{2 \times 525600} = 0,05974 = 5,975 \%$$

Por tanto, la relación $\frac{P_o}{P_{R_o}}$ resulta igual a 0,69467

Rango I

Dado que para este rango $P_{R_T, min}(R_T) \approx P(R) \frac{P_o}{P_{R_o}}$, con R siendo la tasa de precipitación medida con tiempo de integración, en este ejemplo, igual a 60-minutos, la distribución (complementaria) acumulativa de dicha tasa, R , estimada para un tiempo de integración de 1-minuto, es la misma distribución correspondiente a la curva de color azul de la Figura 4.9, con el porcentaje de tiempo escalado en función del valor de la relación $\frac{P_o}{P_{R_o}}$, para la estación M1271.

En la Figura 4.13, se muestra la distribución (complementaria) acumulativa, estimada para un tiempo de integración 1-minuto para el Rango I.

Rango II

Para el porcentaje de tiempo, P_1 , de finalización del Rango I e inicio del Rango II, es decir, porcentaje de tiempo que marca el primer cambio de pendiente en la curva de distribución (complementaria) acumulativa de la tasa de precipitación estimada para un tiempo de integración de 1-minuto, no se considera apropiado, para el caso específico de las medidas correspondientes a la estación M1271, seleccionar el valor recomendado por el modelo de Matricciani (P_1 igual 0,5%), sino 0,23%, tal como se observa en la Figura 4.13. El valor R_1 asociado a dicho porcentaje de tiempo se obtiene de la curva de color rojo de la Figura 4.13, resultando ser, aproximadamente, 19,56 mm/h.

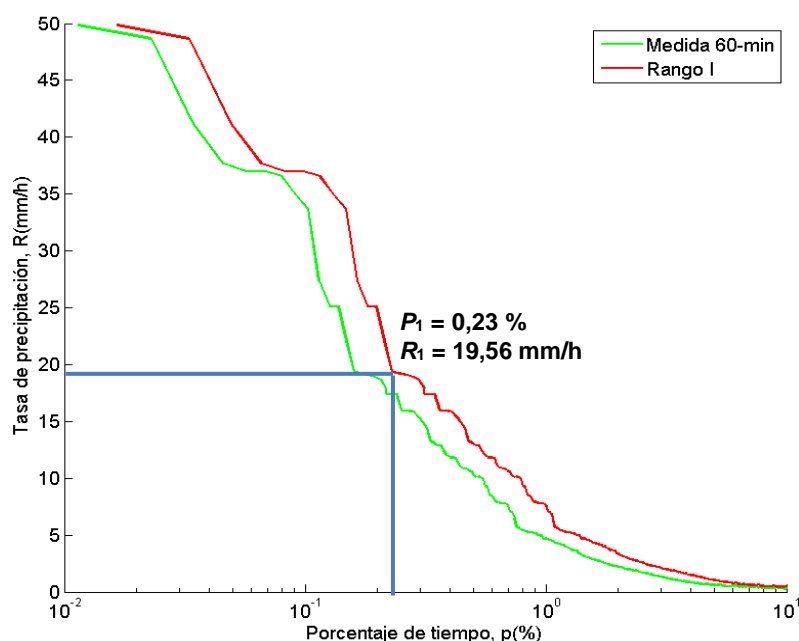


Figura 4.13: Distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación, medida con tiempo de integración de 60-min y estimada con tiempo de integración de 1-min, en Rango I del modelo Matricciani, estación M1271

Por otra parte, el porcentaje de tiempo, P_2 , que marca la finalización del Rango II y el comienzo del Rango III, es decir, porcentaje de tiempo que determina el

segundo cambio de pendiente en la curva de distribución estimada para tiempo de integración de 1-minuto, es necesario calcular previamente los parámetros T_e , p_c y γ , mediante las ecuaciones (3.10f), (3.10e) y (3.12b), respectivamente:

$$T_e = 325 \frac{(60 - 0 - 1)}{2} = 9587,5$$

$$p_c = 325 \left(\frac{60 - 0}{21.812,6333 + 9587,5} \right) = 0,62102$$

$$\gamma = \frac{2 \times 60}{(\sqrt{3} - 1)(60 - 0) + (\sqrt{3} + 1) \times 1} = 2,57207$$

La distribución acumulativa para determinar el punto (P_2, R_2) del segundo cambio de pendiente de la curva de distribución acumulativa estimada para tiempo de integración de 1-minuto, se obtiene escalando la distribución entre corchetes de la ecuación (3.12a), por el factor $\frac{P_o}{P_{R_o}}$.

Ahora bien, la distribución dada por la ecuación (3.12a) se puede considerar como la suma de dos (2) distribuciones acumulativas (las que están entre corchetes), cada una de ellas escaladas en el porcentaje de tiempo por el valor de la relación $\frac{P_o}{P_{R_o}}$. En ese sentido, las distribuciones dentro del corchete son:

$$P_a(R) = (1 - 0,62102) P(R) = 0,37898P(R) \quad (4.4a)$$

$$P_b(R) = 0,62102 P\left(\frac{R}{2,57207}\right) \quad (4.4b)$$

En la ecuación (4.4a), $P(R)$ es la distribución acumulativa original resultante de las estadísticas de lluvia con tiempo de integración de 60-minutos, mientras que en la ecuación (4.4b), la distribución $P\left(\frac{R}{2,57207}\right)$ se obtiene considerando como variable aleatoria la tasa de precipitación, R , medida con tiempo de integración de 60-minutos, dividida por el valor de γ . En la Figura 4.14, se muestran ambas distribuciones $P_a(R)$ y $P_b(R)$ escaladas por el factor $\frac{P_o}{P_{R_o}}$.

En la Figura 4.14, se observa que para el valor de P_2 fue seleccionado 0,05%. Esto se debió a que, como se nota en dicha figura, el límite superior del menor intervalo de valores del porcentaje de tiempo, que en este caso, corresponde a

la distribución (complementaria) acumulada $P_a(R)$ escalada, está bastante distante del valor sugerido por Matriccioni (2011) para el porcentaje en cuestión, es decir, 0,0171%. Por ello, se optó por elegir, para el segundo cambio de pendiente de la curva de distribución estimada como tiempo de integración de 1-minuto, el valor P_2 más cercano posible a 0,0171%, dentro del menor intervalo de valores de porcentaje disponible. En la Figura 4.14, también se observa que los valores de R_a y R_b , resultantes para P_2 igual a 0,05%, para las distribuciones $P_a(R)$ y $P_b(R)$ escaladas, son aproximadamente R_a igual a 49,67 mm/h y R_b igual a 19,98 mm/h, por lo que el valor de R_2 , que es la suma de R_a más R_b , es 69,65 mm/h.

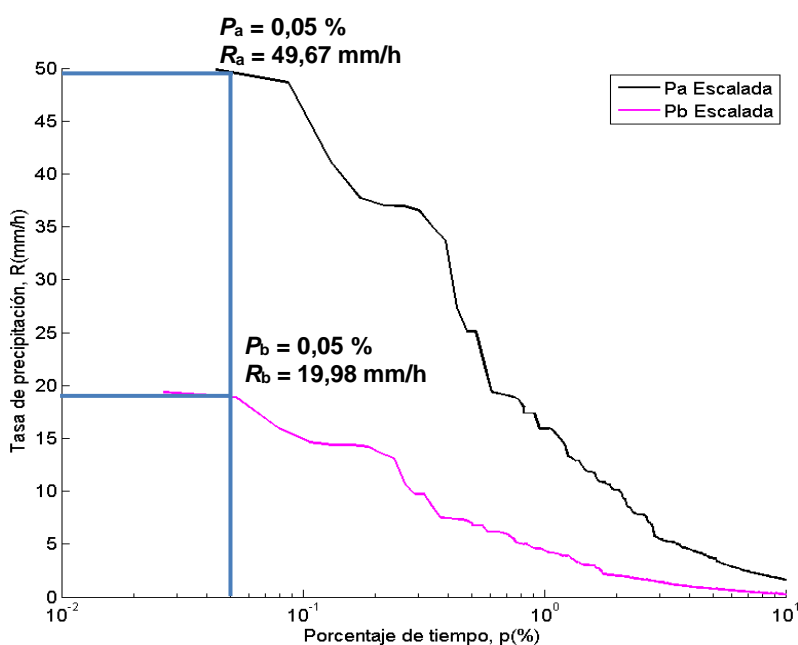


Figura 4.14: Distribuciones acumulativas $P_a(R)$ y $P_b(R)$, escaladas (por el factor P_0/P_{R0}), para determinar el punto (P_2, R_2) , estación M1271

Por tanto, aplicando la ecuación (3.11b), se tiene que:

$$\lambda = \frac{\log\left(\frac{0,23}{0,05}\right)}{\log\left(\frac{69,65}{19,56}\right)} = 1,20162$$

Por lo que, la distribución, P_{II} , correspondiente al Rango II, dada por la ecuación (3.11a), resulta:

$$P_{II}(r > R) = 0,23 \left(\frac{R}{19,56} \right)^{-1,20162} \quad \begin{cases} 19,56 \leq R < 69,65 \\ 0,23 \leq P_R(R) < 0,05 \end{cases}$$

Rango III

Considerando que, según lo mostrado en la Figura 4.14, los cambios de pendiente de la curva de distribución acumulativa estimada se agotan en el punto (P_2, R_2) , el Rango III inicia en dicho punto y se extiende hasta el último valor de tasa de precipitación posible dentro del intervalo de valores de la misma. En consecuencia, de la ecuación (3.13), con ξ igual a $\lambda/2$ (de acuerdo a la Tabla II de Matriccioni), se tiene que la distribución acumulativa estimada correspondiente al Rango III es dada por la ecuación:

$$P_{III}(r > R) = \frac{1399}{R} e^{-\left[\left(\frac{R}{69,95} \right)^{1,20162/2} - 1 \right]} \quad \begin{cases} R > 69,95 \\ P_R(R) \geq P_2 \end{cases}$$

En la Figura 4.15, se observa la distribución acumulativa correspondiente a los Rangos II y III, mientras que en la Figura 4.16, se muestra la distribución acumulativa estimada con tiempo de integración de 1-minuto, resultante de los Rangos I, II y III.

Recomendación ITU-R P.837-7

Tal como se mencionó en el Capítulo III, la Recomendación ITU-R P.837-7 (2017), es la versión más reciente del modelo ITU-R para la estimación de la distribución (complementaria) acumulativa de la tasa de precipitación, con tiempo de integración de 1-minuto, para una determinada localidad.

Para la localidad de la estación meteorológica M1271, los valores de la temperatura terrestre mensual, T_i [°C], en un periodo anual promedio, son extraídos del portal Climate-Data.Org (2019) y resumen en la Tabla 10.

A modo también de ejemplo, con la temperatura media correspondiente al mes de junio, es decir, el subíndice i igual a 6, y aplicando la ecuación (3.17b), se tiene que el valor de r_6 correspondiente resulta:

$$r_6 = 0,5874 e^{0,0883 \times 25} = 5,3412 \quad [\text{mm/h}]$$

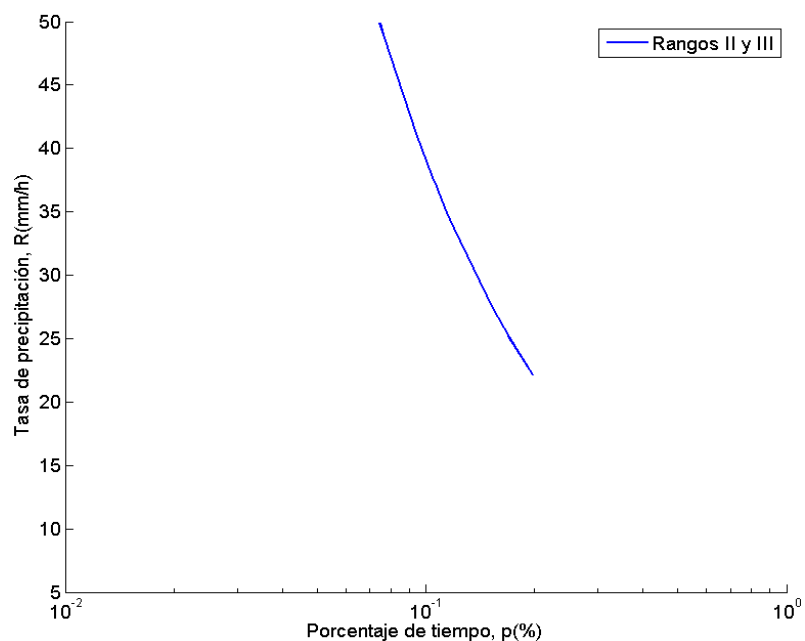


Figura 4.15: Distribución acumulativa estimada para un tiempo de integración de 1-minuto, en los Rangos II y III del modelo de Matricciani, estación M1271

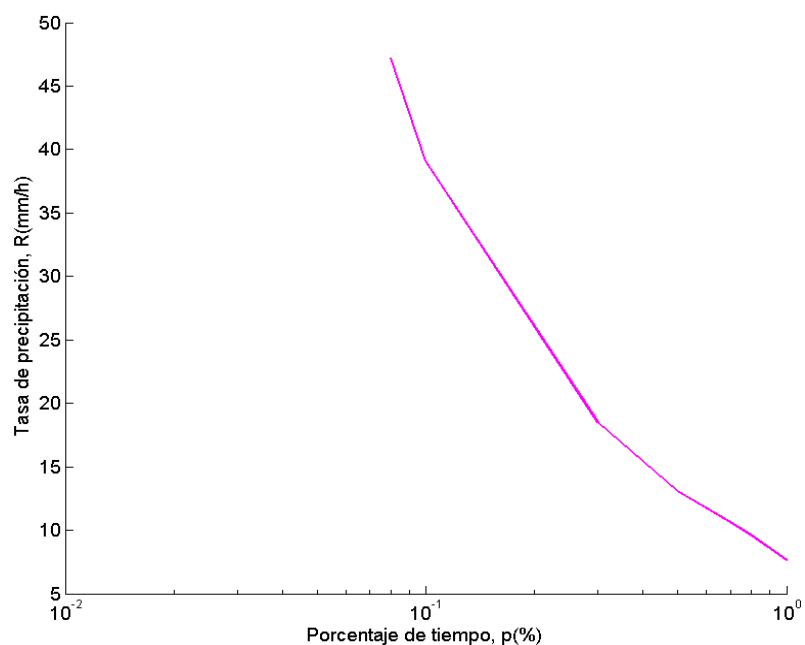


Figura 4.16: Distribución acumulativa estimada para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M1271, usando el modelo de Matricciani

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
26,4	26,7	27,1	26,9	26,4	25,0	24,2	24,4	24,8	25,1	25,5	26,2

Tabla 10: Temperatura media mensual [°C], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271

Es importante resaltar que, el valor r_6 obtenido es temporal, según la condición de la Recomendación ITU-R P.837-7 señalada en el Capítulo 3 en relación al valor de la probabilidad mensual de lluvia, P_{0_i} , es decir, si esta probabilidad resulta mayor que 70 %, la misma será igual a 70 % y r_i se determina mediante la ecuación (3.19).

Ahora bien, para hallar la mencionada probabilidad de lluvia, P_{0_i} , para cada mes, es necesario conocer la cantidad de lluvia acumulada, MT_i [mm], por mes, así como el número de días, N_i , correspondiente a cada mes. La primera información se obtiene, en este trabajo, a partir de las estadísticas de lluvia suministradas por el INAMHI para la estación meteorológica en cuestión, mientras que la segunda información es suministrada por la Recomendación ITU-R P.837-7. Ambas informaciones son resumidas en las Tablas 11 y 12, respectivamente.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
338,09	448,96	500,45	480,62	244,82	72,5	138,3	8,5	10,6	12,5	8,3	4,8

Tabla 11: Valores de MT_i [mm], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
31	28,25	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31

Tabla 12: Valores de N_i [mm], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271

Por tanto, para el mes de junio y la localidad considerada, la probabilidad mensual de lluvia, en este caso, P_{0_6} , se determina a partir de la ecuación (3.18), como sigue:

$$P_{0_i} = 100 \frac{72,5}{24 \times 30 \times 5,3412} = 1,8852 \%$$

En las Tablas 13 y 14, se resumen los valores definitivos de r_i y P_{0_i} , para todos los meses del año promedio, en la localidad de la estación M1271.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
6,0440	6,2063	6,4294	6,3169	6,0440	5,3412	4,9769	5,0656	5,2477	5,3886	5,5823	5,9382

Tabla 13: Valores de r_i [mm/h], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
7,5185	10,6696	10,4621	10,5674	5,4444	1,8852	3,7350	0,2255	0,2805	0,3118	0,2065	0,1086

Tabla 14: Valores de P_{0_i} [%], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271

Repitiendo los cálculos anteriores para los demás meses del año e implementando la parte restante del algoritmo de este modelo ITU-R en la herramienta computacional *Matlab*, se hallan los valores de la tasa de precipitación, con un tiempo de integración de 1-minuto, para cada uno de los porcentajes de tiempo, $p(\%)$, de interés. Así, por ejemplo para p igual 0,5%, la tasa de precipitación estimada para la localidad de la estación M1271, resulta igual a 12,27 mm/h.

Comparación de Resultados

Después de implementar los modelos seleccionados en este trabajo para la conversión de tiempo de integración de las estadísticas de lluvia, para las cinco (5) estaciones meteorológicas consideradas, es decir, M1249, M1271, M0002, M0102 y M0008, y para un intervalo de valores de porcentaje de tiempo comprendidos entre 0,001% y 1%, los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 4.17 a 4.21, para las mencionadas estaciones, respectivamente.

Cualitativamente hablando, se observa, de la Figura 4.17, que para la localidad de la estación M1249, es decir, Palesema, provincia de Esmeraldas, todos los modelos de conversión de estadísticas de lluvia implementados en este trabajo, excepto Chebil-Rahman (CR), predicen con aparente poca dispersión la tasa de precipitación para un tiempo de integración de 1-minuto entre aproximadamente 0,8% y 1% del tiempo del periodo anual promedio.

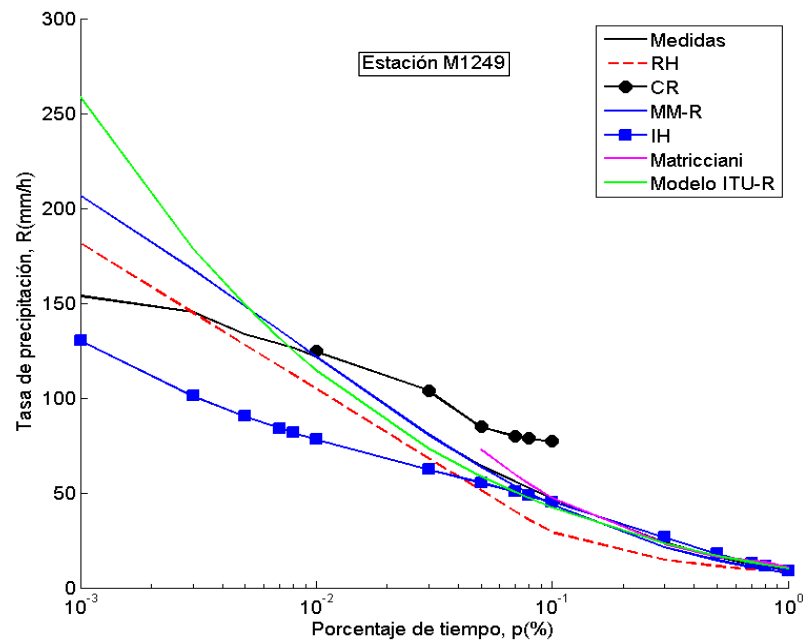


Figura 4.17: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M1249

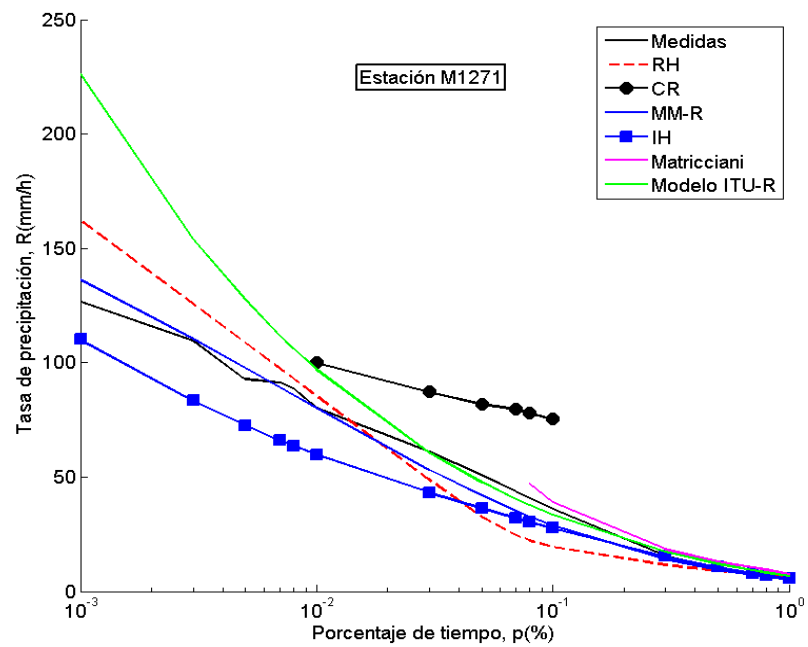


Figura 4.18: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M1271

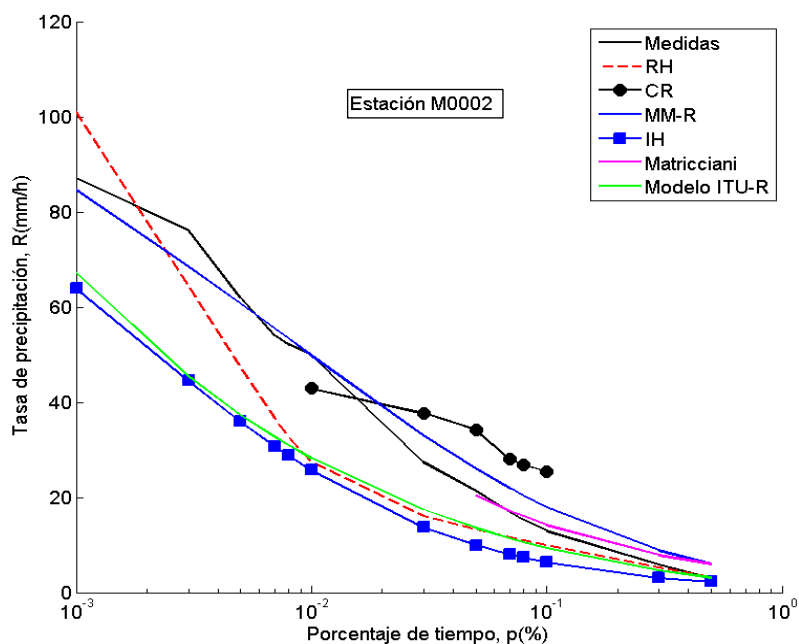


Figura 4.19: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M0002

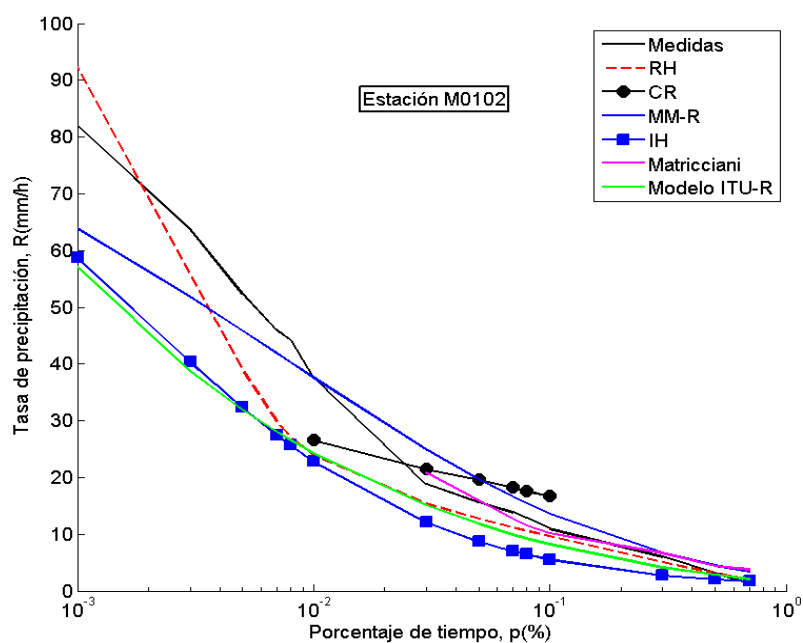


Figura 4.20: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M0102

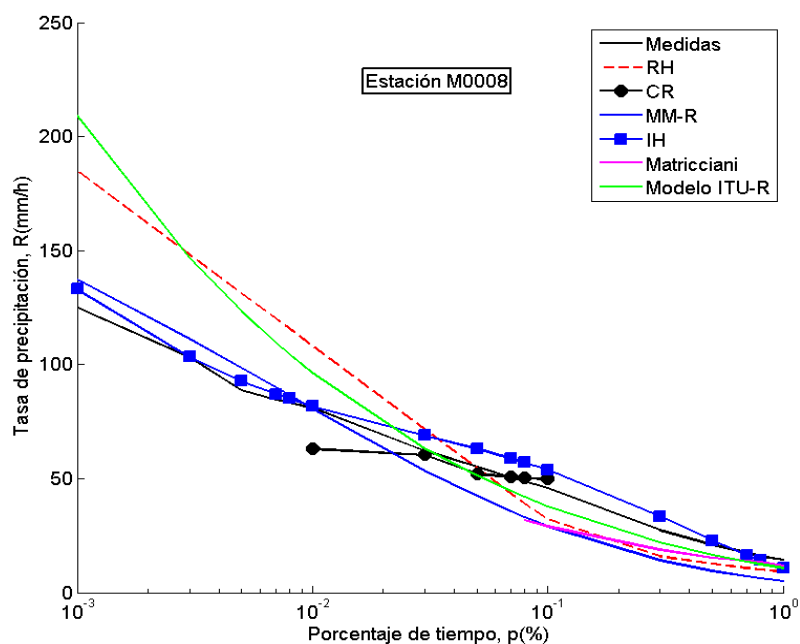


Figura 4.21: Distribuciones acumulativas estimadas para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M0008

Continuando con la Figura 4.17, para el intervalo 0,1% a 0,8%, los modelos que aparentemente presentan mejor desempeño en la predicción de la tasa de lluvia para la localidad de Palesema son los modelos Moupfouma-Martin Refinado (MM-R), Ito-Hosoya (IH), Matricciani e ITU, mientras que entre aproximadamente 0,01% y 0,1%, el mejor modelo es MM-R parece ser el que mejor predice los valores de la tasa de precipitación, seguido por el modelo ITU. Para valores menores 0,1% del tiempo del periodo anual promedio, todos los seis (6) modelos arrojan valores aparentemente bastante dispersos a los medidos. Por otra parte, los modelos que parecen presentar el peor desempeño son, al parecer, los modelos Rice-Holmberg (RH), Ito-Hosoya (para porcentajes de tiempo menores a 0,1%) y Chebil-Rahman (excepto para 0,01%, en el que el valor estimado se aproxima bastante al medido).

En el caso de la localidad de la estación M1271, es decir, Guayaquil (provincia del Guayas), de acuerdo a la Figura 4.18, desde aproximadamente 0,5% hasta 1% del tiempo, todos los modelos considerados en este trabajo, excepto CR y Matricciani, parecen presentar el mejor desempeño en la predicción de la tasa de precipitación para tiempo de integración de 1-minuto. Entre aproximadamente

0,3% y 0,5%, los modelos que aparentemente mejor predicen la mencionada tasa son los modelos MM-R, IH e ITU, mientras que entre 0,1% y 0,3% del tiempo, al parecer el modelo ITU arroja los resultados menos dispersos, seguido por el modelo de Matricciani. Desde 0,03% hasta 0,1%, aparentemente sólo el modelo ITU presenta un desempeño aceptable y entre 0,001% y 0,01%, el modelo MM-R parece presentar el mejor desempeño. Por su parte, el peor desempeño, en general, lo presentan los modelos CR, RH (para valores menores a 0,5%) e IH (para valores menores a 0,3%).

Para el caso de las restantes estaciones, cuyas distribuciones acumulativas estimadas de la tasa de lluvia para un tiempo de integración de 1-minuto se muestran en las Figuras 4.19 a 4.21, el análisis de dichas figuras presenta resultados variados tal como los presentados por las estaciones M1249 y M1271. Sin embargo, en líneas generales, se puede decir que aparentemente el modelo que, en general, ofrece el mejor desempeño en la estimación de la tasa de precipitación para las estaciones M0002 y M0008 para la mayor parte de los porcentajes de tiempo es el modelo Moupfouma-Martin Refinado, mientras que para la estación M0102, a excepción del modelo de Matricciani (entre aproximadamente 0,03% y 1% del tiempo) y el modelo Rice-Holmberg (en el intervalo aproximado de porcentaje de tiempo entre 0,1% y 1%), los restantes modelos no presentan un buen desempeño en la referida estimación.

Asimismo, en cuanto a los modelos con peor desempeño, los resultados también son variados, dependiendo del intervalo de tiempo que sea considerado. En ese sentido, para el caso de la estación M0002, los modelos Rice-Holmberg, Ito-Hosoya e ITU aparentemente son los que tienen el peor desempeño en la predicción de la tasa de precipitación prácticamente en todo el intervalo considerado para el porcentaje de tiempo. Por su parte, para la estación M0102, se aprecia una mayor dispersión en los valores estimados por parte de los modelos Ito-Hosoya e ITU, también en toda la extensión del porcentaje de tiempo considerada, mientras que para la estación M0008, los modelos de Matricciani (desde aproximadamente 0,1% hasta 1%) y el modelo ITU-R (en todo el intervalo de porcentaje de tiempo), son lo que parecen presentar el peor desempeño en la estimación de la tasa

Para superar la dificultad del análisis cualitativo de las Figuras 4.17 a 4.21, y la poca utilidad de los resultados de dicho análisis, se recurre a una de las métricas de evaluación estadística en procesos aleatorios más utilizada, como lo es la raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE, *Root Mean Square Error*), la cual indica el orden de magnitud de la dispersión de los valores estimados respecto a los valores medidos de una variable aleatoria. El valor RMSE para un conjunto de resultados N comparados entre mediciones y estimaciones, es dada por (Delgado-Cuadros, 2017):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (V_{m,k} - V_{e,k})^2}{N-1}} \quad (4.5)$$

Donde:

$V_{m,k}$ = k -ésimo valor medido de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-min.

$V_{e,k}$ = k -ésimo valor estimado, por el modelo de conversión de estadística de lluvia, para la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-min.

En las Tablas 15 a 19, se resumen la tasa de precipitación estimada por cada uno de los modelos, para las localidades de las estaciones M1249, M1271, M0002, M0102 y M0008, respectivamente, en el intervalo de valores de porcentaje de tiempo comprendidos entre 0,001% y 1%, junto con el valor RMSE arrojando por cada uno de los modelos en la predicción de la mencionada tasa.

En la Tabla 15, referida a localidad de la estación M1249, es decir, Palesema, provincia de Esmeraldas, se observa que el mejor desempeño en la estimación de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto lo presentó el modelo de Matricciani, seguido de los modelos Rice-Holmberg (RH) y Moupfouma-Martin Refinado (MM-R); mientras que el desempeño más bajo en dicha predicción fue el que se obtuvo con el modelo de la Recomendación ITU-R P.837-7 (modelo ITU), seguido por los modelos Ito-Hosoya (IH) y Chebil-Rahman (CR).

Tasa de precipitación, R (mm/h)						
$p(\%)$	RH	CR	MM-R	IH	Matricciani	ITU
0,001	181,92	-	207,00	130,50	-	258,99
0,003	145,27	-	167,82	101,25	-	178,93
0,005	128,25	-	148,67	90,31	-	149,12
0,007	117,04	-	135,82	84,05	-	131,72
0,008	112,59	-	130,69	81,75	-	125,27
0,01	105,15	124,61	122,10	78,11	-	115,05
0,03	68,53	103,94	80,99	62,50	-	73,70
0,05	51,51	84,78	63,83	55,53	73,08	58,86
0,07	40,38	79,94	53,66	50,69	59,70	50,39
0,08	36,09	78,80	49,90	48,69	54,96	47,29
0,1	29,53	77,19	44,00	45,24	47,42	42,41
0,3	14,81	-	21,66	26,60	23,27	23,48
0,5	11,69	-	14,65	18,08	16,67	17,08
0,7	9,94	-	11,02	13,12	14,37	13,56
0,8	9,28	-	9,76	11,35	13,60	12,31
1	8,23	-	7,90	8,71	10,80	10,37
RMSE (dB)	13,31	25,16	15,54	26,84	3,61	28,95

Tabla 15: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M1249 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos

Para el caso de la localidad de la estación M1271, es decir, Guayaquil, provincia del Guayas, cuyos resultados son los resumidos en la Tabla 16, se puede notar que nuevamente el modelo de Matricciani es el que arroja valores estimados de la tasa de lluvia con menor dispersión de los valores medidos, seguido, en ese mejor desempeño, por el modelo MM-R. En cuanto al desempeño más bajo en la predicción de la tasa de precipitación, se observa que el modelo CR es más impreciso en dicha estimación, seguido por el modelo ITU.

Tasa de precipitación, R (mm/h)						
$\rho(\%)$	RH	CR	MM-R	IH	Matricciani	ITU
0,001	162,52	-	136,44	110,13	-	226,47
0,003	125,89	-	110,59	83,35	-	154,30
0,005	108,86	-	97,98	72,54	-	127,60
0,007	97,65	-	89,50	66,10	-	112,08
0,008	93,20	-	86,12	63,69	-	106,35
0,01	85,76	100,09	80,46	59,81	-	97,27
0,03	49,15	87,37	53,38	43,18	-	60,82
0,05	32,73	82,04	42,07	36,40	-	47,88
0,07	24,65	79,83	35,38	32,14	-	40,54
0,08	22,44	78,11	32,91	30,48	47,23	37,87
0,1	19,62	75,44	29,02	27,77	39,12	33,68
0,3	11,74	-	14,30	15,48	18,55	17,60
0,5	9,20	-	9,68	10,68	13,09	12,29
0,7	7,66	-	7,28	7,99	10,68	9,41
0,8	7,07	-	6,45	7,04	9,63	8,39
1	6,10	-	5,22	5,60	7,67	6,83
RMSE (dB)	14,94	35,40	5,55	16,24	3,67	30,74

Tabla 16: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M1271 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos

En la localidad de la estación meteorológica M0002, es decir, Quito, provincia de Pichincha, se observa, en la Tabla 17, que una vez más el modelo que presenta el mejor desempeño en la predicción de la tasa de precipitación es de Matricciani, seguido del modelo MM-R; mientras que el desempeño más bajo es el arrojado por los modelos IH e ITU.

Por su parte, en la Tabla 18, que corresponde a los resultados obtenidos para la localidad de la estación M0102, es decir, El Ángel, provincia de Carchi, se puede observar que los modelos con mejor desempeño en la estimación de la tasa de

precipitación son el modelo de Matricciani, seguido por los modelos Chebil-Rahman y Moupfouma Martin - Refinado, y los que arrojan mayor imprecisión son los modelos Ito-Hosoya y la Recomendación ITU-R P.838-7 (modelo ITU).

Tasa de precipitación, R (mm/h)						
p (%)	RH	CR	MM-R	IH	Matricciani	ITU
0,001	101,12	-	84,73	63,90	-	67,33
0,003	64,51	-	68,67	44,60	-	45,49
0,005	47,52	-	60,83	36,00	-	37,45
0,007	36,68	-	55,57	30,77	-	32,78
0,008	32,82	-	53,47	28,82	-	31,06
0,01	27,58	42,90	49,95	25,72	-	28,34
0,03	16,20	37,69	33,15	13,77	-	17,45
0,05	13,33	34,22	26,14	10,00	20,51	13,61
0,07	11,67	27,98	21,99	8,04	17,23	11,44
0,08	11,04	26,93	20,45	7,37	16,05	10,65
0,1	10,03	25,41	18,04	6,37	14,25	9,42
0,3	5,36	-	8,90	3,11	7,96	4,73
0,5	3,36	-	6,03	2,26	6,07	3,20
RMSE (dB)	12,81	12,03	4,22	19,16	1,79	17,16

Tabla 17: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M0002 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos

Para la localidad de la estación M0008, es decir, Puyo, provincia de Pastaza, cuyas tasas de precipitación estimadas por los modelos son los que aparecen en la Tabla 19, se puede notar que el modelo con el mejor desempeño en la mencionada predicción es el modelo Ito-Hosoya, seguido por el modelo Chebil-Rahman, mientras que el menor desempeño es el presentado por el modelo ITU, seguido del modelo Rice-Holmberg.

Tasa de precipitación, R (mm/h)						
$p(\%)$	RH	CR	MM-R	IH	Matricciani	ITU
0,001	92,46	-	63,99	58,70	-	57,25
0,003	55,86	-	51,85	40,42	-	38,84
0,005	39,13	-	45,92	32,35	-	32,05
0,007	29,95	-	41,95	27,49	-	28,10
0,008	27,31	-	40,36	25,69	-	26,65
0,01	24,00	26,56	37,71	22,85	-	24,34
0,03	15,45	21,49	25,03	12,08	20,91	15,10
0,05	12,84	19,61	19,74	8,76	16,06	11,84
0,07	11,27	18,24	16,61	7,05	12,84	9,98
0,08	10,67	17,66	15,46	6,47	11,57	9,31
0,1	9,69	16,71	13,64	5,59	10,23	8,26
0,3	5,13	-	6,74	2,78	6,74	4,23
0,5	3,17	-	4,57	2,06	4,50	2,91
0,7	2,12	-	3,44	1,72	3,87	2,19
RMSE (dB)	9,25	6,64	6,95	14,23	1,52	13,97

Tabla 18: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M0102 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos

Es importante resaltar que, si bien el modelo de Matricciani fue el que presentó el mejor desempeño en la predicción de la tasa de precipitación para todas las localidades consideradas, excepto la correspondiente al Puyo, no se puede concluir que dicho modelo fue el de mejor desempeño en la estimación para las restantes cuatro (4) localidades y/o que su desempeño en la predicción de la tasa de precipitación de la estación M0008 fue bajo, toda vez que el intervalo de porcentaje de tiempo para los cuales fue posible estimar dicha tasa mediante el modelo en cuestión fue apenas, en líneas generales, el comprendido entre 0,08% y 1%, es decir, aproximadamente, sólo un tercio del intervalo completo de porcentaje considerado para la comparación de resultados. Análisis similar aplica

para la valoración del desempeño del modelo Chebil-Rahman, en cuanto a que sólo aportó estimaciones en un tercio del intervalo completo de porcentaje.

Tasa de precipitación, R (mm/h)						
p(%)	RH	CR	MM-R	IH	Matricciani	ITU
0,001	185,24	-	137,36	133,10	-	209,61
0,003	148,61	-	111,35	103,46	-	147,06
0,005	131,58	-	98,64	92,90	-	123,59
0,007	120,36	-	90,12	87,11	-	109,83
0,008	115,91	-	86,71	85,04	-	104,72
0,01	108,47	63,33	81,01	81,84	-	96,60
0,03	71,85	60,41	53,74	69,00	-	63,48
0,05	54,83	52,17	42,36	63,26	-	51,47
0,07	43,66	50,95	35,62	59,02	-	44,55
0,08	39,31	50,43	33,13	57,18	31,98	42,01
0,1	32,42	49,91	29,22	53,88	29,26	38,00
0,3	16,09	-	14,39	33,45	18,97	22,22
0,5	12,84	-	9,74	22,90	15,50	16,77
0,7	11,05	-	7,33	16,52	14,07	13,74
0,8	10,39	-	6,50	14,23	13,71	12,64
1	9,32	-	5,25	10,78	12,02	10,94
RMSE (dB)	27,41	8,33	11,38	5,45	10,85	28,06

Tabla 19: Valores estimados de la tasa de precipitación, para tiempo de integración de 1-minuto, estación M0008 y el valor RMSE arrojado por cada uno de los modelos

Otro aspecto también a resaltar en relación al modelo de Matricciani, es que el mismo presenta la limitante de que para el procedimiento de conversión de la distribución (complementaria) acumulativa de la tasa de lluvia con tiempos de integración elevados a un tiempo de integración de 1-minuto, se requiere, precisamente, información relacionada con las estadísticas de lluvia de la localidad con tiempo de integración de 1-minuto, información que se supone es

la que no se tendría y, que por ello es que se está recurriendo a modelos de conversión de tiempos de integración de las distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación.

Finalmente, en la Tabla 20, se resume el valor RMSE global (todas las localidades de estaciones meteorológica), arrojado por cada uno de los modelos implementados en este trabajo para la conversión del tiempo de integración, para la totalidad de las tasas de precipitación medidas y estimadas por dichos modelos, ambas tasas para un tiempo de integración de 1-minuto.

	RH	CR	MM-R	IH	Matricciani	ITU
RMSE (dB)	16,59	19,22	9,63	17,34	5,07	24,56

Tabla 20: Valor RMSE global

De la Tabla 20, se observa que, sin considerar el modelo de Matricciani y el modelo de Chebil-Rahman, cuya valoración en la comparación con los restantes modelos no es procedente en este trabajo por las razones arriba señaladas, el modelo de mejor desempeño en la estimación de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, para el conjunto de las cinco (5) localidades consideradas en este trabajo, es el modelo Moupfouma-Martin Refinado. Los modelos Rice-Holmberg e Ito-Hosoya presentan un desempeño más bajo que el modelo MM-R, pero mejor que el comportamiento observado en el modelo ITU en dicha predicción.

4.4 Desarrollo de los Nuevos Modelos de Conversión de Tiempos de Integración de Distribuciones Acumulativas de Lluvia en Ecuador

Tal como fue mencionado en el Capítulo 1, el desarrollo del(los) nuevo(s) modelo(s) para la conversión de la distribución (complementaria) acumulativa de la tasa de precipitación con tiempos de integración elevados a un tiempo de integración de 1-minuto, en base a las mediciones de la mencionada tasa realizadas en Ecuador y suministradas por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), se llevará a cabo mediante dos (2) enfoques: usando técnicas de regresión no lineal y utilizando la técnica de inteligencia

computacional conocida como optimización por enjambre de partículas o PSO (*Particle Swarm Optimization*).

4.4.1 Usando Técnicas de Regresión No Lineal

Para este enfoque, se optó por ajustar, mediante técnicas de regresión no lineal, los modelos Rice-Holmberg, Chebil-Rahman, Moupfouma-Martin Refinado e Ito-Hosoya se excluyó del ajuste en cuestión, al modelo de Matricciani debido a que el mismo, para su implementación, requiere, tal como fue mencionado anteriormente, de estadísticas de lluvia experimentales con tiempo de integración de 1-minuto, las cuales se supone que no se tendrían a disposición cuando se requiere convertir distribuciones (complementarias) acumulativas de la tasa de precipitación desde elevados tiempos de integración a un tiempo de integración de 1-minuto. Asimismo, tampoco fue considerado para el ajuste objeto de esta sección, el modelo ITU-R debido a que el algoritmo del mismo torna imposible llevar a cabo dicho ajuste, al menos en lo que respecta al alcance del presente trabajo.

Ahora bien, el objetivo del mencionado ajuste es minimizar el valor RMSE global arrojado por cada uno de los modelos de la Tabla 4.13 (excepto, como fue dicho, el modelo de Matricciani y el modelo ITU-R). Para ello, en los referidos modelos se incorporaron parámetros de ajuste que cambiaron el valor de una o más de las constantes que aparecen en cada uno de los esos modelos. Incluso, en algunas ocasiones, se probó con la adición, a la ecuación o algoritmo original de cada modelo, de uno o más factores dependiente de una o más variables independientes.

Fueron probadas las cuatro (4) técnicas de regresión no lineal abordadas en el Capítulo 2, es decir, Cuasi-Newton, Simplex, Hooke-Jeeves *Pattern Moves*, Rosenbrock *Pattern Search*.

Por otra parte, en relación a los cuatro (4) modelos considerados para el ajuste a las mediciones de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, dicho ajuste fue direccionado en dos (2) grupos:

- Grupo 1: los modelos que en la sección 4.3 arrojaron resultados para al menos la mayor parte del intervalo completo de porcentajes considerados para el análisis de los resultados en esa sección, es decir, los modelos RH, MM-R e IH. Coincidentalmente, se trata de modelos que se basan en estadísticas de lluvia con tiempo de integración de 1-mes.
- Grupo 2: en este caso, conformado sólo por el modelo CR.

Después de un significativo número de pruebas en relación al ajuste de los modelos del Grupo 1, se consiguió que solamente el modelo Ito-Hosoya fue el que presentó mejoría en términos del valor RMSE global, mientras que con los modelos Rice-Holmberg y Moupfouma-Martin Refinado, el ajuste disminuyó el desempeño de los mismos, es decir, el RMSE global se incrementó. Asimismo, la técnica de regresión lineal que mejor resultado arrojó en la sintonización, en este caso, del modelo Ito-Hosoya, fue el método Cuasi-Newton, el cual, por cierto, es la técnica por defecto en la que se basa la herramienta computacional *Solver* del *Excel Microsoft Office* (Muzzammil y col, 2018), bajo el método de resolución GRG (*Generalized Reduced Gradient*) Nonlinear.

En resumen, el nuevo modelo de predicción de tasa de lluvia con tiempo de integración de 1-minuto, a partir de estadísticas de lluvia con tiempo de integración de 1-mes, modelo que será llamado Ito-Hosoya Modificado-1 (IH-M1), fue obtenido a partir del ajuste del siguiente algoritmo:

$$R_p = C_{x1} a_p M^{C_{x2} b_p} \beta^{C_{x3} c_p} \quad (4.6a)$$

$$\log a_p = C_{x4} X^4 + C_{x5} X^3 + C_{x6} X^2 + C_{x7} X - 2,302276 \quad (4.6b)$$

$$b_p = (-4,583266 X^4 - 40,9816 X^3 - 116,2387 X^2) \times 10^{-2} \\ + (-82,61178 X + 91,1857) \times 10^{-2} \quad (4.6c)$$

$$c_p = (2,574688 X^4 + 15,4903 X^3 + 17,47827 X^2) \times 10^{-2} \\ + (-28,46313 X + 1,255081) \times 10^{-2} \quad (4.6d)$$

Tal como puede observarse, las modificaciones consideradas en el modelo Ito-Hosoya original, que produjeron el mejor resultado, fueron las implementadas en las ecuaciones (3.8a) y (3.8b), para calcular la tasa de precipitación “ R_p ” y el

factor “ $\log(a_p)$ ”, respectivamente, mientras que las restantes ecuaciones del algoritmo, es decir, las ecuaciones (3.8c) y (3.8d), para calcular los parámetros b_p y c_p , respectivamente, no fueron modificadas. Los parámetros de ajuste son C_{x1} , C_{x2}, \dots, C_{x7} , cuyos valores obtenidos con la técnica Cuasi-Newton, se resumen en la Tabla 21.

C_{x1}	C_{x2}	C_{x3}	C_{x4}	C_{x5}	C_{x6}	C_{x7}
124,925848	0,387911	1,958897	0,102598	0,795783	1,738663	0,00

Tabla 21: Valores de los parámetros de ajuste del modelo Ito-Hosoya Modificado-1, obtenidos mediante la técnica Cuasi-Newton

Es oportuno destacar que, los valores reportados en la Tabla 21, fueron obtenidos con un límite de convergencia de 10^{-6} , población igual a 300 y un número de iteraciones igual a 900 iteraciones. Asimismo, también es importante señalar que, al igual que la versión original del modelo Ito-Hosoya, el parámetro $X = \log p$ y el factor β es el mismo del modelo Rice-Holmberg, es decir, se calcula a partir de la ecuación (3.3). Por último, conviene mencionar que la versión modificada del modelo Ito-Hosoya aquí obtenida, es decir, IH-M1, es válida desde 0,001% hasta 1%.

En la sección 4.5, se evaluará, en términos del valor RMSE, el desempeño del modelo Ito-Hosoya Modificado-1.

Por otra parte, después de haber también llevado a cabo una gran cantidad de pruebas para el ajuste, se obtuvo la siguiente versión del modelo CR, que será llamado modelo Chebil-Rahman Modificado-1 (CR-M1). Nuevamente, el mejor resultado en la sintonización del modelo fue el arrojado con la técnica Cuasi-Newton:

$$R_1(p) = R_{60}(p)(D_{x1}p^{D_{x2}} + D_{x3}e^{D_{x4}}) \quad (4.7)$$

donde $R_{60}(p)$ es la tasa de precipitación excedida el porcentaje de tiempo, $p(\%)$, obtenida de mediciones de la tasa en cuestión con tiempo de integración de 60-minutos.

Se puede notar, en la ecuación (4.7), que la versión modificada del modelo obtenida en este trabajo conserva la misma forma del modelo original, dada por la ecuación (3.6), cambiando los valores de todas las constantes que aparecen en dicha versión original. Sin embargo, es importante resaltar que, en el ajuste del modelo aquí realizado, a diferencia del modelo original, se adicionaron los valores de la tasa de precipitación obtenidos de forma experimental, con tiempo de integración de 60-minutos, desde 1% del tiempo, con lo cual el nuevo modelo, es decir, CR-M1, se puede considerar válido para el intervalo de porcentaje de tiempo desde 0,01% hasta 1%.

Los valores de los parámetros de ajuste, D_{x1} , D_{x2} , D_{x3} y D_{x4} , del modelo Chebil-Rahman Modificado-1, aparecen en la Tabla 22. Dichos valores fueron obtenidos con un límite de convergencia de 10^{-3} , una población igual a 300 y un número de iteraciones igual a 100.

D_{x1}	D_{x2}	D_{x3}	D_{x4}
0,183610	-0,374965	0,969810	0,085733

Tabla 22: Valores de los parámetros de ajuste del modelo Chebil-Rahman Modificado-1, obtenidos mediante la técnica Cuasi-Newton

El desempeño del modelo CR-M1, en relación a las mediciones de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, será evaluado en la sección 4.5.

4.4.2 Usando PSO (*Particle Swarm Optimization*)

De manera similar a la estrategia empleada en la sección 4.4.1, en esta ocasión se volvieron a considerar los dos (2) grupos de modelos establecidos para el ajuste mediante técnicas de regresión no lineal. Nuevamente, de los modelos del Grupo 1 el único que mostró una reducción en el valor RMSE global fue el modelo Ito-Hosoya, por lo cual, la versión modificada de dicho modelo obtenida en esta sección será denominada Ito-Hosoya Modificada-2 (IH-M2), la cual se obtuvo sintonizando a las mediciones, las ecuaciones (3.8a) y (3.8b) de la versión original del modelo Ito-Hosoya, de manera similar a las ecuaciones (4.6a) y (4.6b), manteniendo inalterables las dos (2) ecuaciones restantes del

algoritmo, es decir, las ecuaciones (3.8c) y (3.8d). Por tanto, el algoritmo para la estimación de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, mediante el nuevo modelo IH-M2, es dado por:

$$R_p = F_{x1} a_p M^{F_{x2} b_p} \beta^{F_{x3} c_p} \quad (4.8a)$$

$$\log a_p = F_{x4} X^4 + F_{x5} X^3 + F_{x6} X^2 + F_{x7} X - 2,302276 \quad (4.8b)$$

$$b_p = (-4,583266 X^4 - 40,9816 X^3 - 116,2387 X^2) \times 10^{-2} \\ + (-82,61178 X + 91,1857) \times 10^{-2} \quad (4.8c)$$

$$c_p = (2,574688 X^4 + 15,4903 X^3 + 17,47827 X^2) \times 10^{-2} \\ + (-28,46313 X + 1,255081) \times 10^{-2} \quad (4.8d)$$

Los parámetros de ajuste son F_{x1} , F_{x2} , ..., F_{x7} , cuyos valores obtenidos con la técnica PSO, implementada en la herramienta computacional *Matlab*, se resumen en la Tabla 23.

F_{x1}	F_{x2}	F_{x3}	F_{x4}	F_{x5}	F_{x6}	F_{x7}
152,999566	0,316187	2,163423	0,046058	0,379938	0,700031	-0,907245

Tabla 23: Valores de los parámetros de ajuste del modelo Ito-Hosoya Modificado-2, obtenidos mediante la técnica PSO

Es importante destacar que, el ajuste del modelo Ito-Hosoya mediante el uso de PSO, que condujo a los valores de los parámetros de ajuste que aparecen en la Tabla 23, fue obtenido con los siguientes parámetros de PSO:

- Número de partículas, $n = 300$
- Número de iteraciones, $n_iter = 1000$
- Número de variables, $n_var = 7$ (correspondientes al número de parámetros de ajuste del modelo IH-M2)
- $\omega = 0,9$
- $C_1 = C_2 = 2$
- Valor inicial de la posición de cada partícula = aleatorio
- Valor inicial de la velocidad de cada partícula = aleatorio

En la Figura 4.22, se puede observar el proceso de convergencia del algoritmo PSO, en el ajuste de los parámetros $F_{x1}, F_{x2}, \dots, F_{xT}$.

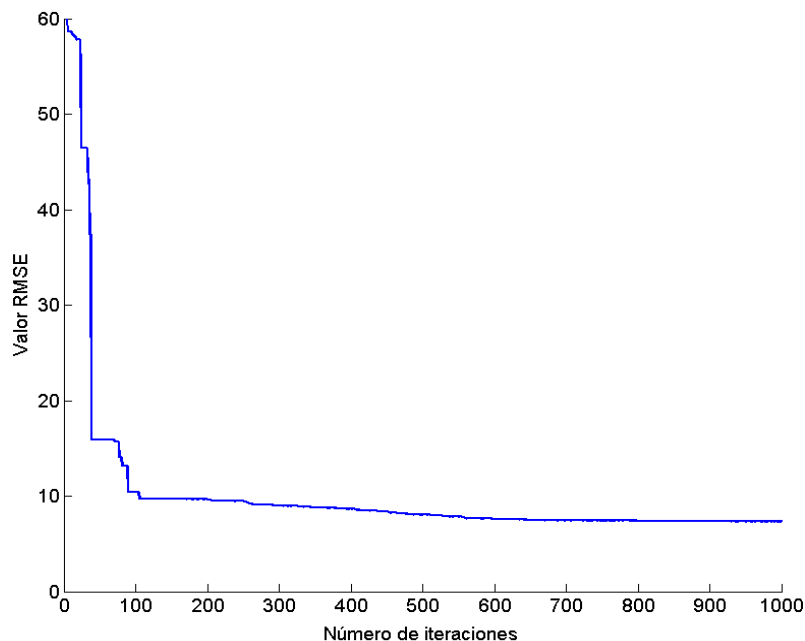


Figura 4.22: Convergencia del algoritmo PSO en la obtención del modelo Ito-Hosoya Modificado-2 (IH-M2)

Para el caso del único modelo del Grupo 2, es decir, el modelo Chebil-Rahman, de nuevo se tuvo éxito en el ajuste, esta vez llevado a cabo usando la técnica PSO. El algoritmo de la nueva versión del modelo CR obtenida en este caso, que será llamada modelo Chebil-Rahman Modificado-2 (CR-M2), mantiene la misma forma del modelo original y del modelo CR-M1, es decir:

$$R_1(p) = R_{60}(p)(G_{x1}p^{G_{x2}} + G_{x3}e^{G_{x4}}) \quad (4.9)$$

Los parámetros de PSO utilizados para el ajuste de la ecuación (4.9) a las medidas de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, reportadas por el INAMHI para las cinco (5) estaciones meteorológicas consideradas en este trabajo, fueron:

- Número de partículas, $n = 25$
- Número de iteraciones, $n_iter = 100$

- Número de variables, $n_var = 4$ (correspondientes al número de parámetros de ajuste del modelo CR-M2)
- $\omega = 0,7$
- $C_1 = C_2 = 1,6$
- Valor inicial de la posición de cada partícula = aleatorio
- Valor inicial de la velocidad de cada partícula = aleatorio

La convergencia del algoritmo PSO para el ajuste de la ecuación (4.9), es mostrada en la Figura 4.23, mientras que los valores obtenidos para los parámetros de ajuste de dicha ecuación, usando la técnica PSO se resumen en la Tabla 24.

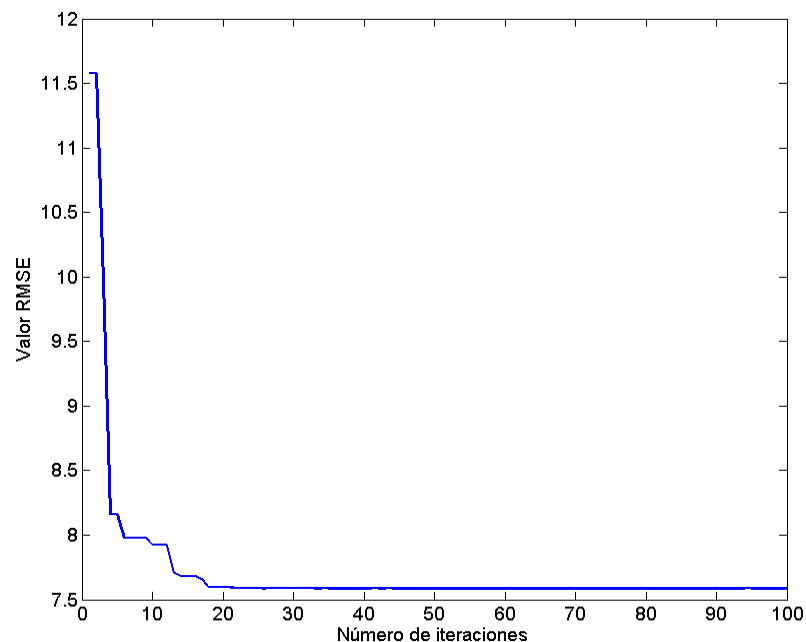


Figura 4.23: Convergencia del algoritmo PSO en la obtención del modelo Chebil-Rahman Modificado-2 (CR-M2)

G_{x1}	G_{x2}	G_{x3}	G_{x4}
0,934589	-0,150843	0,018104	1,700731

Tabla 24: Valores de los parámetros de ajuste del modelo Chebil-Rahman Modificado-2, obtenidos mediante la técnica PSO

4.5 Evaluación del Modelo Desarrollado en Términos de Métricas de Desviación de Valores

Tal como ha sido dicho arriba, la evaluación del desempeño de los nuevos modelos desarrollados en su predicción de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, se llevará a cabo mediante el valor RMSE global arrojado por cada uno de los modelos en cuestión. En ese sentido, los valores RMSE globales obtenidos por los modelos, Ito-Hosoya Modificado-1 (IH-M1), Ito-Hosoya Modificado-2 (IH-M2), Chebil-Rahman Modificado-1 (CR-M1) y Chebil-Rahman Modificado-2 (CR-M2), se resume en la Tabla 25, en la cual también aparecen los valores RMSE arrojados por los modelos Rice-Holmberg (RH), Moupfouma-Martin Refinado (MM-R), Ito-Hosoya original (IH) y la Recomendación ITU-R P.837-7 (modelo ITU)

	RH	MM-R	IH	ITU	IH-M1	IH-M2	CR-M1	CR-M2
RMSE (dB)	16,59	9,63	17,34	24,56	7,36	7,41	7,51	7,81

Tabla 25: Valor RMSE global, incluyendo los nuevos modelos

En la Tabla 25, se puede observar la significativa mejora, en términos del valor RMSE, del desempeño global de las nuevas versiones de los modelos Ito-Hosoya y Chebil-Rahman en la estimación de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, para las localidades del Ecuador consideradas en este trabajo, en comparación con el desempeño presentado por las versiones originales de dichos modelos. Concretamente, se observa, de manera general, una mejora de un poco más del 57,27%, para el caso del modelo Ito-Hosoya, y de cerca del 60%, para el caso del modelo Chebil-Rahman. Además, tal como se puede notar también en la Tabla 25, la mejora del desempeño presentado por los nuevos modelos desarrollados es tal que dichas versiones superan en ese desempeño al modelo Moupfouma-Martin Refinado, el cual era, originalmente, el que presentaba el mejor de los desempeños para las consideraciones de este trabajo, según lo muestra la Tabla 20.

Adicionalmente, es importante señalar que las nuevas versiones del modelo Chebil-Rahman, es decir, CR-M1 y CR-M2, tienen como ventaja, respecto a la

versión original del referido modelo, el hecho de que para las medidas de tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-hora, que en este trabajo resultaron todas válidas para intervalos de porcentaje de tiempo, $p(\%)$, cortos (aproximadamente sólo un tercio del intervalo completo de $p(\%)$ considerado para el análisis), las nuevas versiones en cuestión, del modelo Chebil-Rahman, incorporaron en su desarrollo un intervalo de porcentaje de tiempo disponible en las mencionadas estadísticas experimentales de lluvias con tiempo de integración de 1-minuto que el modelo original no consideró, específicamente, el intervalo desde 1 % hasta el 0,1% del tiempo del año.

Finalmente, en las Figuras 4.24 a 4.28, se muestra, para las localidades de las cinco (5) estaciones meteorológicas consideradas, la distribución acumulativa de la tasa de precipitación estimada para un tiempo de integración de 1-min, mediante los nuevos modelos, así como de las versiones originales de los mismos, en conjunto con la distribución acumulativa obtenida a partir de las mediciones de la mencionada tasa con tiempo de integración de 1-minuto.

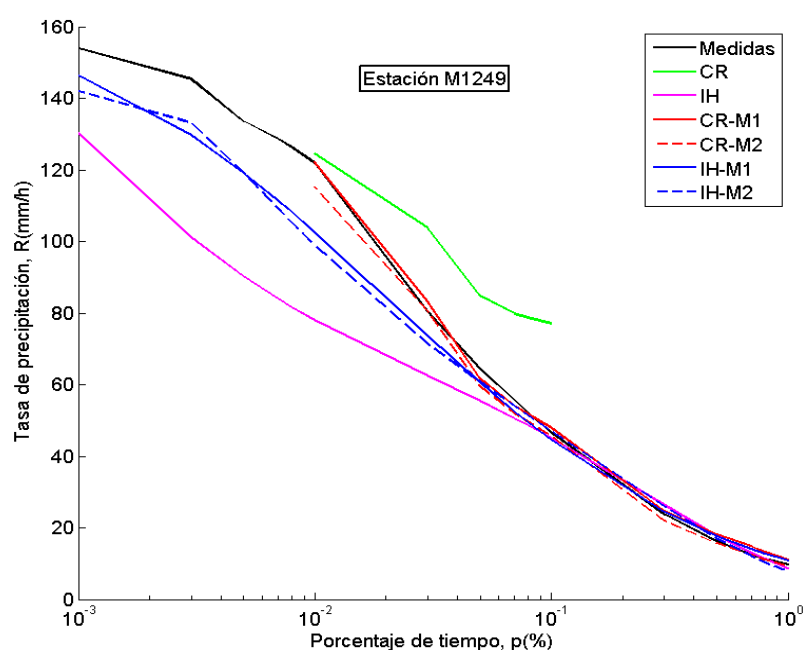


Figura 4.24: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M1249

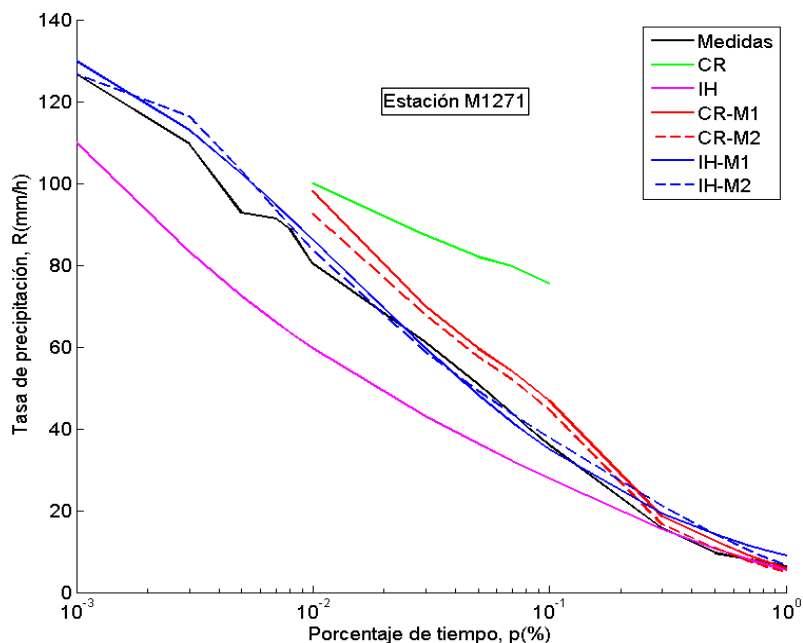


Figura 4.25: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M1271

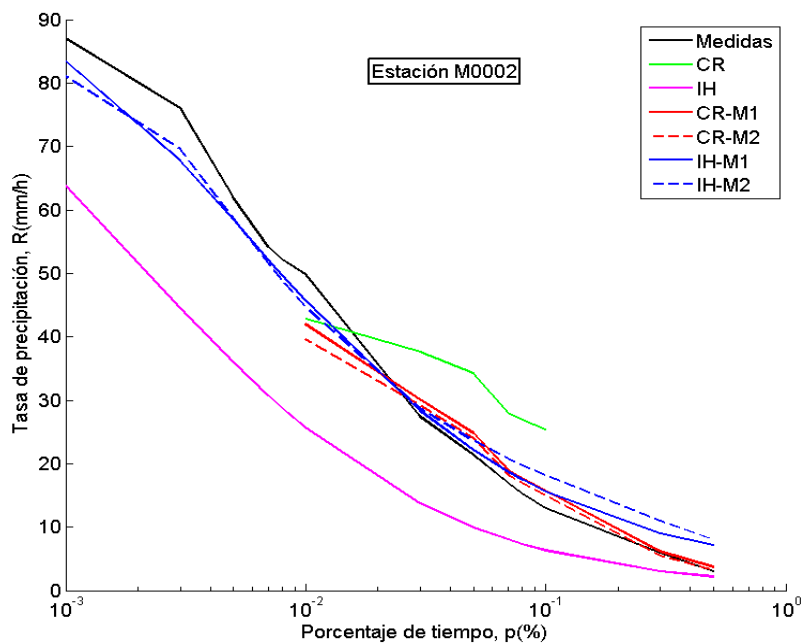


Figura 4.26: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M0002

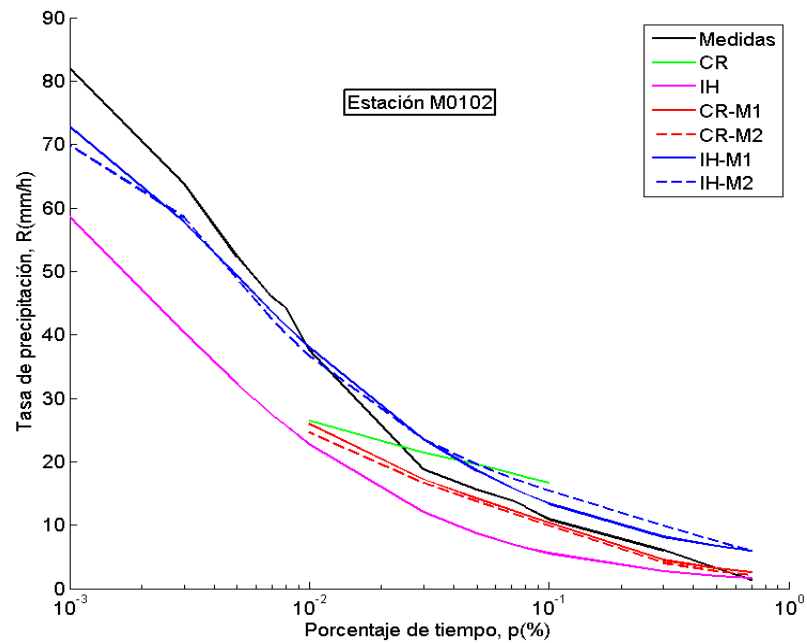


Figura 4.27: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M0102

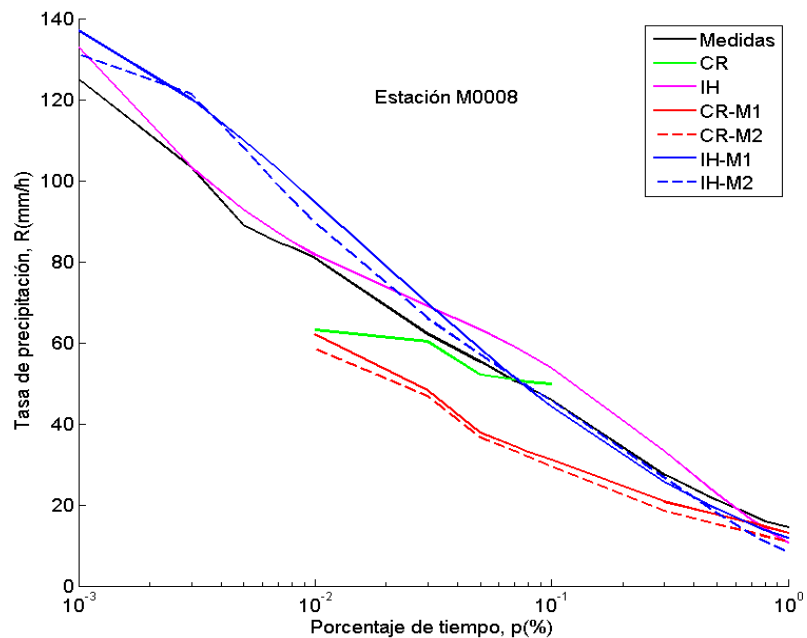


Figura 4.28: Distribuciones acumulativas estimadas (incluyendo los nuevos modelos) y medida, para tiempo de integración de 1-min, estación M0008

En las Figuras 4.24 a 4.28, se puede constatar, en general, la mejora arriba mencionada en relación al desempeño del nuevos modelos, es decir, IH-M1, IH-M2, CR-M1 y CR-M2, en la estimación de la tasa de precipitación para tiempos de integración de 1-min; especialmente el modelo CR-M1 para las localidades de las estaciones M1249, M0002 y M0102, modelo CR-M2 para las localidades de las estaciones M0002 y M0102, los modelos IH-M1 e IH-M2 para las localidades de las estaciones M1271, M0002 y M0008.

CAPITULO 5

5. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE CONVERSIÓN DESARROLLADOS

5.1 Escenarios Considerados en la Estimación de la Atenuación por Lluvias en Ecuador

Con la finalidad de aplicar los modelos para la conversión de tiempos de integración de estadísticas de lluvia, desarrollados en el Capítulo 4, en la estimación de la atenuación por lluvias en enlaces terrestres en Ecuador, se considerarán dos (2) enlaces hipotéticos, con las siguientes características:

- Enlace 1

Localización: Guayaquil, provincia del Guayas

Longitud: 5 km

Frecuencia de operación: 11,07 GHz

Polarización: horizontal (H)

- Enlace 2

Localización: El Ángel, Carchi

Longitud: 12 km

Frecuencia de operación: 28 GHz

Polarización: vertical (V)

5.2 Predicción de la Atenuación por Lluvias mediante la Recomendación ITU-R P.530-16

En la actualidad, el modelo ITU para la estimación de la atenuación por lluvias en enlaces terrestres que forma parte de la Recomendación ITU-R P.530-16 (ITU, 2015), también se encuentra en la versión más reciente de dicha recomendación, es decir, Recomendación ITU-R P.530-17 (ITU, 2017d). El modelo en cuestión será denominado en este trabajo modelo ITU-Lluvia.

A título de ejemplo, para la aplicación de los modelos de conversión de estadísticas de lluvia desarrollados en el Capítulo 4, se explicará el cálculo de la atenuación por lluvias en el Enlace 1, es decir, la ciudad de Guayaquil, mediante la Recomendación ITU-R P.530-17, considerando el modelo Ito-Hosoya Modificado-1 (IH-M1) para la estimación de la tasa de precipitación, $R_{0,01}$, excedida el 0,01% del tiempo de un periodo anual, valor empleado por el modelo ITU-Lluvia. Además, se estipulará, para este ejemplo, una disponibilidad para el enlace de 99,95%.

Paso 1

De la aplicación del modelo IH-M1, se obtiene la tasa de precipitación, $R_{0,01}$, como sigue:

- La ciudad de Guayaquil corresponde a la localidad de estación meteorológica M1271. Por tanto, el valor del factor β es el mismo que fue obtenido para el modelo Rice-Holmberg en el ejemplo de aplicación de éste modelo, desarrollado en el Capítulo 3, es decir, β igual a 0,168764.
- Para el porcentaje de tiempo, p , igual a 0,01%, se tiene que X es igual a $\log(0,01)$, es decir, $X = -2$.
- De la ecuación (4.6b), se obtiene:

$$a_{0,01} = 10^{0,102598(-2)^4 + 0,795783(-2)^3 + 1,738663(-2)^2 - 2,302276} = 0,84662$$

- De las ecuaciones (4.6c) y (4.6d), se calculan los factores b_p y c_p :

$$b_{0,01} = [-4,583266(-2)^4 - 40,9816(-2)^3 - 16,2387(-2)^2] \times 10^{-2} \\ + [-82,61178(-2) + 91,1857] \times 10^{-2} = 0,459750$$

$$c_{0,01} = [2,574688(-2)^4 + 15,4903(-2)^3 + 17,47827(-2)^2] \times 10^{-2} \\ + [-28,46313(-2) + 1,255081] \times 10^{-2} = 0,453670$$

- Finalmente, la tasa de precipitación, $R_{0,01}$, es dada por la ecuación (4.6a):

$$R_{0,01} = 124,925848 \times 0,84662 (2288,4)^{0,387911 \times 0,459750} \\ \times (0,168764)^{1,958897 \times 0,453670} = 86,32 \text{ [mm/h]}$$

Paso 2

Usando la ecuación (3.20), se obtiene la atenuación específica por lluvias, $\gamma_{0,01}$, para 0,01% del tiempo. Sin embargo, antes es necesario calcular los valores de los parámetros k y α , mediante la Recomendación ITU-R P.838-3, para la frecuencia y polarización especificadas para el Enlace 1.

En ese sentido, dado que la frecuencia considerada, es decir, 11,07 GHz no aparece en la Tabla 2.5, se recurre a las ecuaciones (2.12) y (2.13), tomando en cuenta que la polarización es horizontal, resultando:

$$k = 0,0181$$

$$\alpha = 1,2115$$

Por tanto, la atenuación específica por lluvias, $\gamma_{0,01}$, es:

$$\gamma_{0,01} = 0,0181 (86,32)^{1,2115} = 4,01794 \quad [\text{dB/km}]$$

Paso 3

Se determina el factor de distancia, r , utilizando la ecuación (3.21b):

$$r = \frac{1}{0,477(5)^{0,633} (86,32)^{0,073 \times 1,2115} (11,07)^{0,123} - 10,579(1 - e^{-0,024 \times 5})} = 0,6955$$

Seguidamente, a partir de la ecuación (3.21a), se tiene que la longitud efectiva del trayecto del enlace, d_{ef} , es:

$$d_{ef} = 0,6955 \times 5 = 3,4776 \quad [\text{km}]$$

Paso 4

La atenuación por lluvias, $A_{0,01}$, sobrepasada durante el 0,01% del tiempo, se halla utilizando la ecuación (3.22), como sigue:

$$A_{0,01} = 4,01794 \times 3,4776 = 13,9729 \quad [\text{dB}]$$

Paso 5

Finalmente, como el porcentaje de tiempo de interés es distinto a 0,01%, es necesario acudir al proceso de extrapolación conformado por las ecuaciones (3.23a) a (3.23e). Antes, es importante aclarar que, debido a que la confiabilidad

estipulada para el Enlace 1 es del 99,95%, la indisponibilidad, que es valor del porcentaje p , prevista para dicho enlace es igual a 0,05%.

$$C_0 = 0,12 + 0,4 \left[\log \left(\frac{f}{10} \right)^{0,8} \right] = 0,12 + 0,4 \left[\log \left(\frac{11,07}{10} \right)^{0,8} \right] = 0,1341$$

$$C_1 = (0,07^{0,1341}) [0,12^{(1-0,1341)}] = 0,11116$$

$$C_2 = 0,855 \times 0,1341 + 0,546(1 - 0,1341) = 0,5974$$

$$C_3 = 0,139 \times 0,1341 + 0,043(1 - 0,1341) = 0,0559$$

$$A_p = 13,9729 \times 0,11116 \times [0,05^{-(0,5974+0,0559 \log 0,05)}] = 7,29 \quad [\text{dB}]$$

En las Tablas 26 y 27, aparecen los valores de atenuación por lluvias estimados para los Enlaces 1 y 2, respectivamente, usando la Recomendación ITU-R P.530-17 (Modelo ITU-Lluvia), y considerando, para el valor de la tasa de precipitación, $R_{0,01}$, el calculado mediante los modelos IH-M1 y CR-M1, así como el valor de dicha tasa obtenido de las mediciones de ese parámetro con tiempo de integración de 1-minuto, para un intervalo de porcentaje de tiempo desde 0,001% hasta 1%. Es importante resaltar que, no se toman en cuenta los modelos IH-M2 y CR-M2, debido a que los mismo, tal como se observó en el Capítulo 3, producen valores de tasa de precipitación similares a los obtenidos con los modelos IH-M1 y CR-M1.

En las Tablas 26 y 27, se observa que para la mayor parte de los porcentajes de tiempo considerados, la atenuación estimada en base al valor de la tasa de precipitación, $R_{0,01}$, calculado a partir del modelo Ito-Hosoya Modificado-1, se aproxima más a la atenuación estimada en base al valor de dicha tasa, $R_{0,01}$, obtenido desde las medidas de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, que la atenuación calculada tomando como valor de $R_{0,01}$, el arrojado por el modelo Chebil-Rahman Modificado-1. Sin embargo, ante la falta de valores de atenuación por lluvias medidas como tal para la localidad en cuestión, no es posible concluir que el modelo IH-M1 tiene un mejor desempeño que el modelo CR-M1, o viceversa, como insumo del valor de la tasa de precipitación, $R_{0,01}$, requerido por la Recomendación ITU-R P.530-17.

$p(\%)$	Atenuación (dB)		
	Con R_{medida}	Con R_{IH-M1}	Con R_{CR-M1}
0,001	26,33	28,35	30,53
0,003	19,38	20,87	22,47
0,005	16,48	17,74	19,1
0,007	14,7	15,83	17,05
0,008	14,03	15,11	16,27
0,01	12,95	13,95	15,02
0,03	8,43	9,08	9,78
0,05	6,77	7,29	7,85
0,07	5,82	6,266	6,75
0,08	5,47	5,89	6,34
0,1	4,93	5,30	5,71
0,3	2,84	3,05	3,29
0,5	2,15	2,32	2,49
0,7	1,78	1,92	2,06
0,8	1,65	1,78	1,91
1	1,45	1,56	1,68

Tabla 26: Atenuación para Enlace 1, utilizando el modelo ITU-Lluvia

5.3 Predicción de la Atenuación por Lluvias mediante la Técnica de Tormenta Sintética

Para la implementación de este modelo, también se considera el Enlace 1, tomando en cuenta la base de datos completa de las series temporales de tasa de lluvia, con tiempo de integración de 1-minuto, aportada por el INAMHI, específicamente para la localidad de la estación meteorológica M1271, es decir, la ciudad de Guayaquil.

De acuerdo a como fue señalado en la sección 3.2.2, la técnica de tormenta sintética (SST, *Synthetic Storm Technique*), permite obtener series temporales de atenuación por lluvias a partir de series temporales de tasa de precipitación.

$p(\%)$	Atenuación (dB)		
	Con R_{medida}	Con R_{IH-M1}	Con R_{CR-M1}
0,001	73,95	74,58	53,5
0,003	56,17	56,65	40,64
0,005	48,24	48,65	34,9
0,007	43,27	43,64	31,3
0,008	41,37	41,71	29,93
0,01	38,28	38,6	27,69
0,03	25,03	25,24	18,1
0,05	20,04	20,21	14,5
0,07	17,17	17,32	12,42
0,08	16,12	16,26	11,66
0,1	14,47	14,59	10,47
0,3	8,14	8,21	5,89
0,5	6,08	6,13	4,4
0,7	4,98	5,02	3,6
0,8	4,59	4,63	3,32
1	3,99	4,03	2,89

Tabla 27: Atenuación para Enlace 2, utilizando el modelo ITU-Lluvia

SST está basado en un complejo algoritmo, el cual fue implementado en este trabajo en la herramienta computacional *Matlab*, con los siguientes parámetros generales:

- Intervalo de tiempo entre 2 muestras de cada una de las series temporales, ΔT : 60 seg
- Ángulo de elevación modificado para enlaces terrestres: 30°
- Ancho de la capa de fusión: 4 km
- Número de adiciones a la integral de la atenuación por lluvias en la capa B: 10

Por su parte, ante la imposibilidad de obtener desde las bases de datos suministradas por el INAMHI los valores de la velocidad del viento para la localidad de la estación M1271, se utilizaron, de forma aproximada, los valores publicados por el FONAG (Fondo para la Protección del Agua) (2018). En la Tabla

28, se resumen los valores promedio mensuales de la velocidad del viento, en la ciudad de Guayaquil.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
0,82	2,16	1,32	1,05	0,78	2,44	5,2	2,16	1,48	3,46	1,36	2,12

Tabla 28: Valores promedio mensuales de la velocidad del viento [m/s], en un año promedio, en la localidad de la estación M1271

En la Figura 5.1, se muestra la distribución (complementaria) acumulativa de la atenuación por lluvias, para un tiempo de integración de 1-minuto, obtenida mediante SST para el Enlace 1.

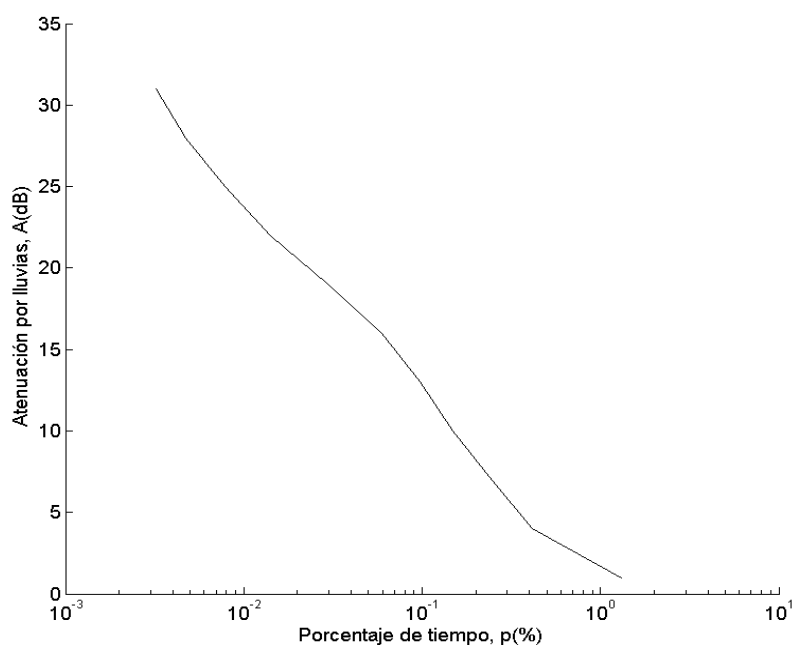


Figura 5.1: Distribución acumulativa estimada para un tiempo de integración de 1-minuto, para la estación M1271, usando SST

Es importante destacar que, en la implementación del método SST para la predicción de la atenuación por lluvias, no son de utilidad las distribuciones acumulativas de la tasa de precipitación, estimadas a partir de los modelos de conversión de tiempo de integración de las estadísticas de lluvia desarrollados en este trabajo, inclusive, tampoco ninguno de los existentes en la literatura para tal fin, ya que, SST requiere series temporales como insumo, es decir, información

de la variación temporal de dicha tasa de lluvia y no información estadística/estocástica.

5.4 Predicción de la Atenuación por Lluvias mediante el Modelo Pérez-Mello

En este caso, se implementará la versión más reciente del modelo Pérez-Mello, es decir, el modelo Silva-Pontes-Souza-Perez o modelo SPSP (Silva-Mello y col, 2007). Para ello, considerando nuevamente el Enlace 1 y la tasa de precipitación estimada a partir del modelo Ito-Hosoya Modificado-1, se tiene, para el caso específico p igual a 0,05% (recordando que la disponibilidad prevista para el Enlace 1, en el ejemplo de aplicación, es del 99,95%), que la tasa de precipitación, $R_{0,05}$, es igual a 48,41 mm/h.

De la ecuación (3.34b), se calcula la tasa de precipitación efectiva, R_{eff} :

$$R_{eff} = 1,763 (48,41)^{(0,753+0,197/5)} = 37,26406 \quad [\text{mm/h}]$$

Por su parte, el diámetro de celda equivalente, d_o , es dada por la ecuación (3.34c):

$$d_o = 119(48,41)^{-0,244} = 74,11527 \quad [\text{km}]$$

Finalmente, la atenuación por lluvias para p igual a 0,05%, se calcula a partir de la ecuación (3.34a):

$$A_{0,05} = 0,0181(37,26406)^{1,2115} \frac{5}{1+5/74,11527} = 6,80 \quad [\text{dB}]$$

En las Tablas 29 y 30, se resumen los valores de la atenuación por lluvias calculados para los Enlaces 1 y 2, respectivamente, usando el modelo SPSP, y considerando, para los valores de la tasa de precipitación los estimados mediante los modelos IH-M1 y CR-M1, así como el valor de dicha tasa obtenido a partir de las mediciones de ese parámetro con tiempo de integración de 1-minuto.

5.5 Comparación de Resultados de Estimación de Atenuación por Lluvias

En comparación con los valores de atenuación por lluvias, para el Enlace 1, estimados por la Recomendación ITU-R P.530-17 (ver Tabla 26), se observa que los valores de atenuación por lluvias, para el mismo enlace, arrojados por el

modelo SST son significativamente menores (ver Figura 5.1), para porcentajes de tiempo menores a 0,1%.

$p(\%)$	Atenuación (dB)		
	Con R_{medida}	Con R_{IH-M1}	Con R_{CR-M1}
0,001	16,75	17,15	-
0,003	14,63	15,06	-
0,005	12,53	13,73	-
0,007	12,35	12,77	-
0,008	12,02	12,37	-
0,01	10,95	11,69	12,49
0,03	8,47	8,29	9,34
0,05	7,15	6,8	8,03
0,07	6,2	5,9	7,28
0,08	5,8	5,56	6,91
0,1	5,17	5,02	6,31
0,3	2,37	2,87	2,5
0,5	1,5	2,15	1,67
0,7	1,28	1,76	1,21
0,8	1,19	1,63	1,04
1	1,03	1,42	0,8

Tabla 29: Atenuación para Enlace 1, utilizando la versión más reciente del modelo SPSP

A su vez, de las Tablas 29 y 30, en comparación con las Tablas 26 y 27 y la Figura 5.1, se observa que los valores de atenuación por lluvias estimados a partir del modelo SPSP también resultaron menores que los arrojados usando el modelo ITU-Lluvia. Incluso, comparando los valores de la Tabla 29 con los valores mostrados en la Figura 5.1, estos últimos correspondientes a los valores de atenuación por lluvia obtenidos con el método SST para el Enlace 1, se puede notar que los valores estimados por modelo SPSP, para dicho enlace, también resultaron menores a los arrojados por SST.

$p(\%)$	Atenuación (dB)		
	Con R_{medida}	Con R_{IH-M1}	Con R_{CR-M1}
0,001	77,54	71,55	-
0,003	65,41	61,21	-
0,005	57,25	54,95	-
0,007	52,43	50,67	-
0,008	51,01	48,97	-
0,01	45,8	46,14	34,22
0,03	28,55	33,33	26,28
0,05	25,18	28,32	23,07
0,07	23,22	25,41	20,84
0,08	22,07	24,33	19,91
0,1	19,72	22,65	18,36
0,3	13,16	16,18	10,01
0,5	8,41	14,08	7,73
0,7	4,77	12,98	6,53

Tabla 30: Atenuación para Enlace 2, utilizando la versión más reciente del modelo SPSP

Respecto a la diferencia en el orden de magnitud de los mencionados valores de atenuación por lluvias obtenidos con cada uno de los tres (3) modelos implementados en este capítulo, concretamente para el Enlace 1, si bien nuevamente es oportuno resaltar que ante la falta de mediciones de la atenuación por lluvias en la localidad en estudio, no es posible concluir cuál de los modelos de atenuación por lluvias presenta en el mejor desempeño en la predicción de dicho desvanecimiento, el hecho de que la atenuación por lluvias estimada mediante SST considera la totalidad de las series temporales en un periodo anual promedio, obtenidas mediante mediciones, pudiera interpretarse como que la imprecisión, en este trabajo, en los valores estimados de la atenuación por lluvias usando el método SST es menor que los valores obtenidos utilizando la Recomendación ITU-R P.530-17 y el modelo SPSP.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo, se desarrollaron cuatro nuevos modelos para la estimación, en el Ecuador, de distribuciones acumulativas de tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, a partir de estadísticas de lluvia experimentales, con tiempo de integración mayores, específicamente, 1-hora y 1-mes. Para el desarrollo de los mencionados modelos, que fueron denominados Chebil-Rahman Modificado-1, Chebil-Rahman Modificado-2, Ito-Hosoya Modificado-1 e Ito-Hosoya Modificado-2, se utilizaron bases de datos de tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto suministradas por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). En concreto, fueron empleadas, para el trabajo, las bases de datos de cinco estaciones meteorológicas, representativas en conjunto, de las tres regiones del país, a saber, región costanera, región andina y región oriental.

Las bases de datos en cuestión consistieron en el registro de cantidad de lluvia por minuto en cada una de las estaciones. Junto con ese registro, también se registró la fecha y hora de cada medición. Con esa información, se generaron distribuciones acumulativas experimentales de la tasa de precipitación, con tiempos de integración desde 1-minuto hasta 1-hora. Asimismo, se obtuvieron estadísticas, también experimentales, mensuales y anuales de dicha tasa.

Las distribuciones (complementarias) experimentales de la tasa de precipitación, permitieron, por una parte, evaluar el desempeño del conjunto de modelos existentes en la literatura implementados en este trabajo para la conversión de tiempos de integración de estadísticas de lluvia experimentales del Ecuador derivadas de las bases de datos del INAMHI para tiempos de integración de 1-hora y 1-mes, a estadísticas de lluvia estimadas con tiempo de tiempo de integración de 1-minuto. La referida evaluación de desempeño se llevó a cabo en términos del valor RMSE, dando como resultado que, exceptuando el modelo de Matricciani, el cual a pesar de haber arrojado los menores valores RMSE para las cinco localidades consideradas, la valoración de su desempeño no aplica para las mediciones de tasa de precipitación analizadas de las bases de datos del INAMHI, el modelo que en líneas generales

mostró mejor desempeño en la predicción de la distribución acumulativa de la tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, fue el modelo Moupfouma-Martin Refinado.

Asimismo, las distribuciones (complementarias) experimentales de la tasa de precipitación, tanto para tiempo de integración de 1-minuto como para tiempos de integración de 60-minutos, también fueron el principal insumo para el desarrollo de los nuevos cuatro modelos arriba mencionados, los cuales presentaron una considerable mejora, respecto a las versiones originales de los modelos Chebil-Rahman e Ito-Hosoya, con una disminución cercana al 60% en el valor RMSE. Adicionalmente, ese valor RMSE resultó ser mejor (más bajo) que el arrojado por el modelo Moupfouma-Martin Refinado.

En cuanto a la atenuación por lluvias en los enlaces inalámbricos terrestres hipotéticos en Ecuador, operando en frecuencias superiores a 10 GHz, la falta de mediciones de ese parámetro en las localidades seleccionadas para la estimación del mismo no permite concluir cuál de los nuevos modelos desarrollados en este trabajo presenta el mejor desempeño y tampoco hace posible concluir cuál de los modelos de atenuación por lluvias implementado predice con mayor precisión dicho desvanecimiento.

Finalmente, como recomendaciones para la realización de trabajos futuros que con extiendan el alcance de este trabajo, se tienen:

- Incorporar más base de datos de tasa de precipitación con tiempo de integración de 1-minuto, obtenidas por el INAMHI más recientemente, con la finalidad de incrementar la precisión de los modelos desarrollados en este trabajo y de modelos que estén por desarrollarse.
- Realizar pruebas de ajustes de otros modelos de conversión de tiempo de integración de estadísticas de lluvias no considerados en este trabajo.
- Realizar el ajuste con otras técnicas de inteligencia computacional.
- Desarrollar herramientas computacionales que permitan sistematizar automáticamente el uso de modelos de conversión de tiempo de integración de estadísticas de lluvias, así como también, el proceso de ajuste de modelos.
- Realizar mediciones de atenuación por lluvias a lo largo y ancho del Ecuador.

REFERENCIAS

- Adetan O., Afullo T.J. (2012). **Comparison of Two Methods to Evaluate the Lognormal Raindrop Size Distribution Model in Durban**. Southern Africa Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC), George, South Africa, September 2012.
- Adetan O., Afullo T.J. (2014). **Raindrop Size Distribution and Rainfall Attenuation Modeling in Equatorial and Subtropical Africa: The Critical Diameters**. *Annals of Telecommunications - Annales des Télécommunications*, Vol. 69, No. 11-12, pp. 607-619, December 2014.
- Ajayi G.O., Ofoche E.B.C. (1984). **Some Tropical Rainfall Rate Characteristics at Ile-Ife for Microwave and Millimetre Wave Applications**. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 23, No. 4, pp. 562-567, April 1984.
- Ajayi G.O., Olsen R.L. (1985). **Modeling of a Tropical Raindrop Size Distribution for Microwave and Millimeter Wave Applications**. *Radio Science*, Vol. 20, No. 2, pp. 193-202, March-April 1985.
- Alsharif M.H., Nordin R., Ismail M. (2015). **Cell-Coverage-Area Optimization Based on Particle Swarm Optimization (PSO) for Green Macro Long-Term Evolution (LTE) Cellular Networks**, in *Bio-Inspired Computation in Telecommunications*, Yang X.S., Chien S.F., Ting T.O., Waltham, MA, USA: Elsevier, 2015, pp. 245-262.
- Anderson L.J., Day J.P., Freres C.H., Stokes A.P.D. (1947). **Attenuation of 1.25-centimeter Radiation through Rain**. *Proceedings of IRE*, Vol. 35, No. 4, pp. 351-354, April 1947.
- Angulo-Martínez M., Beguería S., Latorre B., Fernández-Raga M. (2018). **Comparison of Precipitation Measurements by OTT Parsivel² and Thies LPM Optical Disdrometers**. *Hydrology and Earth System Sciences*, pp. 2811-2837, Vol. 22, No. 5, Mayo 2018.
- Aris N.A.M., Din J. (2016). **One-Minute Rain Rate Statistics Prediction Using Ito-Hosoya Model in Malaysia**. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 11, pp. 3396-3396, March 2016.

- Armijo L. (1966). **Minimization of Functions Having Lipschitz-continuous First Partial Derivatives**. Pacific Journal of Mathematics, Vol. 16, No. 1, pp. 1-3, November 1966.
- Bohren C.F., Huffman D.R. (1983). **Absorption and Scattering of Light by Small Particles**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1983.
- Bonnans J.F., Gilbert J.C., Lemaréchal C., Sagastizábal C.A. (2006). **Numerical Optimization Theoretical and Practical Aspects**. 2nd Edition. Heidelberg, Germany: Springer, 2006.
- Bonyadi M.R., Michalewicz Z., Li X. (2014). **An Analysis of the Velocity Updating Rule of the Particle Swarm Optimization Algorithm**. Journal of Heuristics, Vol. 20, No. 4, pp. 417-452, August 2014.
- Bonyadi M.R., Michalewicz Z. (2017). **Particle Swarm Optimization for Single Objective Continuous Space Problems: A Review**. Evolutionary Computation, Vol. 25, No. 1, pp. 1-54, Spring 2017.
- Burgueño A, Puigcerver M., Vilar E. (1988). **Influence of Rain Gauge Rate Statistics used in Integration Microwave Time on the Rain Communications**. Annales Des Télécommunications, Vol. 43, No. 9, pp. 522-527, September 1988.
- Byers H.R., Moses H., Harney P.J. (1949). **Measurement of Rain Temperature**. Journal of Meteorology, Vol. 6, No. 1, pp. 51-55, February 1949.
- Castro-Loaiza E.S (2014). Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 Mensual) en Región Costa, Sierra y Oriente del Ecuador. Tesis de Pregrado, Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2014.
- CCIR (Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones). (1982). **Report 721-1: Attenuation by Hydrometeors in Particular Precipitation and other Atmospheric Particles**, in *Volume V, Propagation in Non-Ionized Media, Recommendations and Reports of the CCIR-1982*, Geneva: Switzerland, 1982, pp. 167-181.
- Chandrika P., Vijaya S., Kirankumar N.V.P, Narayana T. (2015). **Review and Testing Analysis of Moupfouma Rain Rate Model for Southern India**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 132, pp. 33-36, September 2015.

- Chebil J., Rahman T.A. (1999). **Development of 1 min Rain Rate Contour Maps for Microwave Applications in Malaysia Peninsula**. Electronics Letters, Vol. 35, No. 20, pp. 1172-1174, September 1999.
- Chun O.W., Mandeep J.S. (2013). **Empirical Methods for converting Rainfall Rate Distribution from Several Higher Integration Times into a 1-minute Integration Time in Malaysia**. GEOFIZIKA, Vol. 30, No. 2, pp. 143-154, July-December 2013.
- Climate-Data.Org (2019). **Clima Guayaquil** [En línea]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-del-guayas/guayaquil-2962/> (consultada el 18 de mayo de 2018).
- Cong R.G., Brady M. (2012). **The Interdependence between Rainfall and Temperature: Copula Analyses**. The Scientific World Journal, Vol. 2012, Article ID 405675, pp-1-11, 2012.
- D'Adderio L.P. (2014). **Raindrop Size Distribution Variability from High Resolution Disdrometer Networks**. Tesi di Dottorato, Fisica, Università degli Studi di Ferrara, Italia, 2014.
- Dantzig J.B. (1987). **Origins of the Simplex Method**. Technical Report SOL 87-5, Systems Optimization Laboratory, Department of Operations Research, Stanford University, USA, 1987.
- Das S., Matra A., Shukla A.K. (2010). **Rain Attenuation Modeling in the 10–100 GHz Frequency using Drop Size Distributions For Different Climatic Zones In Tropical India**. Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 25, pp. 211-224, 2010.
- Delgado-Cuadro E.I. (2017). **Optimización de la Recomendación ITU-R P.1812-3, para la Predicción de Pérdidas de Propagación en Sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT)**. Trabajo de Titulación, Maestría en Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- Dennis Jr. J.E., Schnabel R.B. (1996). **Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations**. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1996.

- Douc R., Moulines E., Stoffer D. (2014). **Nonlinear Time Series. Theory, Methods, and Applications with R Examples**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- Drufuca G. (1973). **Rain Attenuation Studies**. Scientific Report No. 3, Air Force Cambridge Research Laboratories, United States Air Force, USA, 1973.
- Duhujamahoro C., Twizere C., Mazimpaka P., Shema T.O., Pascal N. (2016). **Performances of existing Rain Rate Models in Equatorial Region**. World Journal of Engineering and Technology, vol. 4, No. 1, pp. 71-81, February 2016.
- Emiliani L.D., Agudelo J., Gutierrez E., Fradique-Mendez C. (2004). **Development of Rain-attenuation and Rain-rate Maps for Satellite System Design in the Ku and Ka bands in Colombia**. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 46, No. 6, pp. 54-68, November 2004.
- Emiliani L.D., Castanet L., Féral L. (2005). **Review and Testing Analysis of Rain Rate and Rain Attenuation Prediction Models for Satellite Applications in the Aburrá Valley in the Country of Colombia**. 11th Ka and Broadband Communications Conference & 23rd AAA International Communications Satellite Systems Conference, Rome, Italy, September 2005.
- Esmín A.A.A., Coelho R.A., Matwin S. (2015). **A Review on Particle Swarm Optimization Algorithm and its Variants to Clustering High-dimensional Data**. Artificial Intelligence Review, Vol. 44, No. 1, pp. 23-45, June 2015.
- Féral L., Sauvageot H., Castanet L., Lemorton J. (2003). **HYCELL - A New Hybrid Model of the Rain Horizontal Distribution for Propagation Studies: 1. Modeling of the Rain Cell**. Radio Science, Vol. 38, No. 3, pp. 1-19, June 2003.
- FONAG (Fondo para la Protección del Agua). **Anuario Hidrometeorológico 2017**. [En línea]. Disponible en: <http://www.fonag.org.ec/web/wp-content/uploads/2018/06/Anuario-Meteorolo%CC%81gico-2017.pdf> (consultada el 08 de agosto de 2019).
- Fraile R., Castro A., González-Colino M., Alonso-Blanco E., Fernández-Raga M., et al. (2015). **Vertical Raindrop Size Distribution in Central Spain: A Case Study**. Advances in Meteorology, Vol. 2015, Article ID 647647, pp. 1-9, 2015.
- Freeman R.L. (2007). **Radio System Design for Telecommunications**. Third Edition. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2007.

- Freitas-Fagundes I. (2014). **Previsão da Atenuação por Chuvas a partir de Dados Meteorológicos Globais**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/Rio), Brasil, 2014.
- García del Pino P. (2003). **Caracterización Experimental de la Propagación a 50 GHz en Trayecto Inclinado**. Tesis Doctoral, Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2003.
- Garson G.D. (2012). **Curve Fitting & Nonlinear Regression**. 2012 Edition. Raleigh, NC, USA: Statistical Associates Publishing, 2012.
- Ghasempour Y., Da Silva C.R.C.M., Cordeiro C., Knightly E.W. (2017). **IEEE 802.11ay: Next-Generation 60 GHz Communication for 100 Gb/s Wi-Fi**. IEEE Communications Magazine, Vol. 55, No. 12, pp. 186-192, December 2017.
- Grami A. (2016). **Introduction to Digital Communications**. London, United Kingdom: Elsevier, 2016.
- Griffin C. (2012). **Numerical Optimization: Penn State Math**. [En línea]. Disponible en <http://www.personal.psu.edu/cxg286/Math555.pdf> (consultada el 31 de marzo de 2018).
- Gunn K.L.S., East T.W.R. (1954). **The Microwave Properties of Precipitation Particles**. Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 80, No. 346, pp. 522-545, October 1954.
- Gunn R., Kinzer G.D. (1949). **The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air**. Journal of Meteorology, Vol. 6, No. 4, pp. 243-248, August 1949.
- Hamilton P., Marshall J. (1961). **Weather-Radar Attenuation Estimates from Rain gauge Statistics**. Scientific Report MW-32, Geophysics Research Directorate, United States Air Force, USA, 1961.
- Hardy K.R. (1962). **Study of Raindrop-Size Distributions and Their Variation with Height**. Scientific Report No. 1, Department of Engineering Mechanics Meteorological Laboratories, University of Michigan, USA, 1962.
- Hooke R., Jeeves T.A. (1961). **“Direct Search” Solution of Numerical and Statistical Problems**. Journal of the ACM, Vol. 8, No. 2, pp. 212-229, April 1961.

- Huang L., Chen X., Gao Z., Cai H. (2012). **Online Propagation Model Correction based on PSO Algorithm in LTE SON System**. 6th International Conference on Anti-Counterfeiting, Security and Identification (ASID 2012), Taipei, Taiwan, August 2012.
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) (2015). **Determinación de Ecuaciones para el Cálculo de Intensidades Máximas de Precipitación**. Disponible en: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/valores-mision-vision/> (consultada en 17 de abril de 2019).
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) (2019a). **Valores / Misión / Visión**. [En línea]. Disponible en: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/valores-mision-vision/> (consultada en 15 de marzo de 2019).
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) (2019b). **Varios Dirección Red Nacional de Observación HM**. [En línea]. Disponible en: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/varios-direccion-red-nacional-de-observacion-hm/> (consultada en 15 de marzo de 2019).
- Ippolito L.J. (1986). **Radiowave Propagation in Satellite Communications**. New York, NY, USA: Van Nostrand Reinhold Company, 1986.
- Ippolito L.J. (2017). **Satellite Communications Systems Engineering. Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance**. 2nd Edition. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2017.
- Ito C., Hosoya Y. (2002). **The Thunderstorm Ratio as a Regional Climatic Parameter: Its Effects on Different-integration-time Rain Rate Conversion, Rain Attenuation, Site-diversity and Rain Depolarization**. International Union of Radio Science - XXVIIth General Assembly (URSI GA 2002), Commission F, pp. 1-4, Netherlands, August 2002.
- ITU (International Telecommunication Union) (2005). **Recommendation ITU-R P.838: Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods**. Geneva, Switzerland, 1992.
- ITU (International Telecommunication Union) (2005). **Recommendation ITU-R P.838-3: Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods**. Geneva, Switzerland, 2005.

- ITU (International Telecommunication Union). (2012). **ITU-R Recommendation P.837-6: Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling**. Geneva, Switzerland, 2012.
- ITU (International Telecommunication Union) (2015a). **ITU-R Recommendation P.530-16: Propagation Data and Prediction Methods required for the Design of Terrestrial Line-of-sight Systems**. Geneva, Switzerland, 2015.
- ITU (International Telecommunication Union) (2015b). **Recommendation ITU-R P.618-12: Propagation Data and Prediction Methods required for the Design of Earth-space Telecommunication Systems**. Geneva, Switzerland, 2015.
- ITU (International Telecommunication Union) (2017a). **ITU-R Recommendation P.837-7: Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling**. Geneva, Switzerland, 2017.
- ITU (International Telecommunication Union) (2017b). **ITU-R Recommendation P.1510-1: Mean Surface Temperature**. Geneva, Switzerland, 2017.
- ITU (International Telecommunication Union) (2017c). **ITU-R Recommendation P.1144-9: Guide to the Application of the Propagation Methods of Radiocommunication Study Group 3**. Geneva, Switzerland, 2017.
- ITU (International Telecommunication Union) (2017d). **ITU-R Recommendation P.530-17: Propagation Data and Prediction Methods required for the Design of Terrestrial Line-of-sight Systems**. Geneva, Switzerland, 2017.
- Jiang H., Sano M., Sekine M. (1997). **Weibull Raindrop-size Distribution and its Application to Rain Attenuation**. IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation, Vol. 144, No. 3, 197-200, June 1997.
- Johnson R.W., Kliche D.V., Smith P.L. (2014). **Maximum Likelihood Estimation of Gamma Parameters for Coarsely Binned and Truncated Raindrop Size Data**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 40, No. 681, pp. 1245-1256, April 2014.
- Jung M.W., Han I.T., Choi M.Y., Lee J.H., Pack J.K. (2008). **Empirical Prediction Models of 1-min Rain Rate Distribution or Various Integration Time**. Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 8, No. 2, pp. 84-89, June 2008.

- Karim A. (2003). **Nonlinear Optimization - Theory and Practice**. [En línea]. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.133.6517&rep=rep1&type=pdf> (consultada el 24 de agosto de 2018).
- Kennedy J., Eberhart R. (1995). **Particle Swarm Optimization**. IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN 1995), Perth, Australia, November-December 1995.
- Kerr D.E. (1987) **Propagation of Short Radio Waves**. London, United Kingdom: Peter Peregrinus Ltd, 1987.
- Konar A., Bhattacharya D. (2017). **Time-Series Prediction and Applications. A Machine Intelligence Approach**. Basel, Switzerland: Springer, 2017.
- Kovacevic N., Veljovic J. (2018). **Impact of Drizzle-Sized Cloud Particles on Production of Precipitation in Hailstorms: A Sensitivity Study**. Atmosphere, Vol. 9, No. 1, pp. 1-22, January 2018.
- Lai L.L., Chan T.F. (2007). **Distributed Generation: Induction and Permanent Magnet Generators**. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2007.
- Lange K. (2010). **Numerical Analysis for Statisticians**. 2nd Edition. New York, NY, USA: Springer, 2010.
- Lange K. (2013). **Optimization**. 2nd Edition. New York, NY, USA: Springer, 2013.
- Lee J.H., Kim Y.S., Kim J.H., Choi Y.S. (2000). **Empirical Conversion Process of Rain Rate Distribution for Various Integration Time**. 2000 Asia-Pacific Microwave Conference, Sidney, Australia, December 2000.
- Li N., Zhu Y., Wang Z. (2015). **A Discussion on the Applicable Condition of Rayleigh Scattering**. International Journal of Remote Sensing Applications, Vol. 5, pp. 62-66, 2015.
- Liebe H.J., Hufford G.A., Manabe T. (1991). **A Model for the Complex Permittivity of Water at Frequencies below 1 THz**. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 12, No. 7, pp. 659-675, July 1991.
- Llerena-Vargas H.G. (2009). **Influencia del Cambio Climático en el Caudal del Rio Puyo y sus Efectos en la Cuenca Hidrográfica de la Provincia de Pastaza en Ecuador**. Tesis de Pregrado, Ingeniería Ambiental, Universidad Estatal Amazónica, 2009.

- Long A.B., Manton M.J. (1974). **On the Evaluation of the Collection Kernel for the Coalescence of Water Droplets**. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 31, No. 4, pp. 1053-1057, May 1974.
- Luini L., Emiliani L., Boulanger X., Riva C., Jeannin N. (2017). **Rainfall Rate Prediction for Propagation Applications: Model Performance at Regional Level Over Ireland**. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 65, No. 11, pp. 6185-6189, November 2017.
- Lwas A.K. Islam M.R., Chebil J., Habaebi M.H., Ismail A.F., et al. (2013). **Rain Attenuation Analysis using Synthetic Storm Technique in Malaysia**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 53, Conference 1, pp. 1-6, 2013.
- Mackowski D. (2012). **The Extension of Mie Theory to Multiple Spheres**, in *The Mie Theory: Basics and Applications*, Hergert W., Wriedt T., Heidelberg, Germany: Springer, 2012, pp. 223-256.
- Mahmudah H., Wijayanti A., Mauludiyanto A., Hendranto G., Matsushima A. (2008). **Analysis of Tropical Attenuation Statistics using Synthetic Storm for Millimeter-Wave Wireless Network Design**. 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN 2008), Surabaya, Indonesia, May 2008.
- Mandeep J.I., Hasaan I.S. (2008). **60- to 1-Min Rainfall-Rate Conversion: Comparison of Existing Prediction Methods with Data Obtained in the Southeast Asia Region**. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* Vol. 47, No. 3, pp. 925-930, March 2008.
- Mandeep J.S. (2009). **Rain Attenuation Statistics over a Terrestrial Link at 32.6 GHz at Malaysia**. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 3, No. 7, pp. 1086-1093, October 2009.
- Marshall J.S., Palmer W.M. (1948). **The Distribution of Raindrops with Size**. *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 5, No. 4, pp. 165-166, August 1948.
- Matricciani E. (2011). **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*, Vol. 29, No. 6, pp. 501-530, November-December 2011.

- Medhurst R. (1965). **Rainfall Attenuation of Centimeter Waves: Comparison of Theory and Measurement**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 13, No. 4, pp. 550-564, July 1965.
- Mera-Villavicencio D.G. (2016). **Optimización de Parámetros Mixtos de Arreglos de Antenas, utilizando Técnicas de Computación Inteligente**. Trabajo de Titulación, Maestría en Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2016.
- Mills T.C. (2019). Applied Time Series Analysis. A Practical Guide to Modeling and Forecasting. London, United Kingdom: Academic Press, 2019.
- Moupfouma F., Martin L. (1995). **Modelling of the Rainfall Rate Cumulative Distribution for the Design of Satellite and Terrestrial Communication Systems**. International Journal of Satellite Communications and Networking, Vol.13, No. 2, pp. 105-115, March-April 1995.
- Mueller G.E. (1946). **Propagation of 6-millimeter Waves**. Proceedings of the IRE and Waves and Electrons, Vol. 34, No. 4, pp. 181p-183p, April 1946.
- Muzzammil M., Alam J., Zakwan M. (2018). **A Spreadsheet Approach for Prediction of Rating Curve Parameters**, in *Hydrologic Modeling. Select Proceedings of ICWEES-2016*, Sing V.P., Yadav S., Yadava R.N., Singapore, Singapore: Springer, 2018, pp. 525-533.
- NASA (2019). **The Shape of a Raindrop**. [En línea]. Disponible en: <https://pmm.nasa.gov/education/articles/shape-of-a-raindrop> (consultada en 06 de febrero de 2019).
- Nash J.C. (2014). **Nonlinear Parameter Optimization Using R Tools**. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2014.
- Ng Y.Y., Sing M.S.J., Thiruchelvam V. (2018). **Performance Analysis of 60-min to 1-min Integration Time Rain Rate Conversion Models in Malaysia**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 167, pp. 13-22, January 2018.
- Noussi E., Gremont B. (2012). **Adaptive MF-TDMA as a Rain Fade Countermeasure: Application to DVB-RCS**. [En línea]. Disponible en: <http://www.port.ac.uk/research/telecoms/researchareas/satellitecommunications/broadbandsatellitelinks/> (consultada en febrero 2018).

- Niu S., Jia X., Sang J., Liu X., Lu C., Liu Y. (2010). **Distributions of Raindrop Sizes and Fall Velocities in a Semiarid Plateau Climate: Convective versus Stratiform Rains**. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 49, No. 4, pp. 632-645, April 2010.
- Obiyemi O.O., Afullo T.J.O., Ibiyemi T.S. (2013). **Evaluation of Rain Degraded Digital Satellite Television Reception in Tropical Regions**. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 4, No. 12, pp. 790-799, December 2013.
- Obiyemi O.O., Ojo J.S., Ibiyemi T.S. (2014). **Performance Analysis of Rain Rate Models for Microwave Propagation Designs over Tropical Climate**. *Progress in Electromagnetics Research M*, Vol. 39, pp. 115-122, 2014.
- Odedina M.O., Afullo T.J. (2010). **Determination of Rain Attenuation from Electromagnetic Scattering by Spherical Raindrops: Theory and Experiment**. *Radio Science*, Vol. 45, No. 1, pp. 1-15, February 2010.
- Olsen R.L., Rogers D.V., Hodge D.B. (1978). **The aR^b Relation in the Calculation of Rain Attenuation**. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 26, No. 2, pp. 318-329, March 1978.
- Ong J.T., Zhu C.N. (1997). **Rain Rate Measurements by a Rain Gauge Network in Singapore**. *Electronics Letters*, Vol. 33, No. 3, pp. 240-242, January 1997.
- Owolawi P.A. (2006). **Rain Rate and Rain Drop Size Distribution Models for Line-Of-Sight Millimetric Systems in South Africa**. Master Thesis, Electrical Engineering in Telecommunications and Information Technology, University of Kwazulu-Natal, Durban, South Africa, 2006.
- Owolawi P.A. (2010). **Characteristics of Rain at Microwave and Millimetric Bands for Terrestrial and Satellite Links Attenuation in South Africa and Surrounding Islands**. Ph.D. Thesis, Electronic Engineering, University of Kwazulu-Natal, Durban, South Africa, 2010.
- Owolawi P.A. (2011). **Rainfall Rate Probability Density Evaluation and Mapping for the Estimation of Rain Attenuation in South Africa and Surrounding Islands**. *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 112, pp. 155-181, 2011.
- Paulson K.S. (2017). **Estimating 1 min Rain Rate Distributions from Numerical Weather Prediction**. *Radio Science*, Vol. 52, No. 1, pp. 176-184, January 2017.

- Pérez-Di Santis T. (2015). **Evaluación del uso de PSO (*Particle Swarm Optimization*) para el Ajuste de Controladores PID, Aplicados al Proceso de Levantamiento de Petróleo Mediante Bombeo Centrífugo Sumergido.** Trabajo de Grado, Ingeniería de Sistemas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2015.
- Pérez-García N.A. (2000). **Cálculo de Cobertura de Sistemas WLL e LMDS.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- Pérez-García N.A. (2003). **Modelamento de Efeitos de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-ponto e Ponto-multiponto.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- Perez-Garcia N.A., Silva-Mello L.A.R. (2004). **Improved Method for Prediction of Rain Attenuation in Terrestrial Link.** Electronics Letters, Vol. 40, No. 11, pp. 683-684, May 2004.
- Pérez-García N.A., Pinto A.D., Torres J.M., Rengel J.E., Rujano L.M., Robles-Camargo N., Donoso Y. (2017). **Improved ITU-R Model for Digital Terrestrial Television Propagation Path Loss Prediction.** Electronics Letters, Vol. 53, No. 13, pp. 832-834, June 2017.
- Pérez-García N.A., et al. (2018). **Fenómenos Atmosféricos que afectan a las Comunicaciones Vía Satélite,** en *Planificación y Dimensionamiento de Sistemas de Comunicación Vía Satélite*, Pérez-García N.A., Pinto-Mangones A.D., Torres-Tovio J.M., Ramirez E.J., Montería, Colombia: Sello Editorial Corporación Universidad del Sinú, 2018, pp. 72-121.
- Pickover C.A. (2008). **Archimedes to Hawking: Laws of Science and the Great Minds behind Them.** New York, NY, USA: Oxford University Press, 2008.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. (2007). **Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing.** 3rd Edition. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007.
- Pruppacher H.R., Pitter R.L. (1971). **A Semi-empirical Determination of the Shape of Cloud and Raindrops.** Journal of Atmospheric Science, Vol. 28, No. 1, pp. 86-94, January 1971.

- Rajasekar L., Prabha N.A. (2018). **Carrier Interference Compensation using PSO Algorithm**. International Journal of Pure and Applied Mathematics, Special Issue, Vol. 118, No. 18E, pp. 4031-4037, 2018.
- Riazoshams L., Midi H., Ghilagaber G. (2019). **Robust Nonlinear Regression with Applications using R**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2019.
- Rice P.L., Holmberg N. (1973). **Cumulative Time Statistics of Surface-Point Rainfall Rates**. IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-21, No. 10, pp. 1131-1136, October 1973.
- Ritz C., Streibig J.C. (2008). **Nonlinear Regression with R**. New York, NY, USA: Springer, 2008.
- Robertson S.D., King A.P. (1946). **The Effect of Rain upon the Propagation of Waves in the 1- and 3-centimeter Regions**. Proceedings of the IRE and Waves and Electron, Vol. 34, No. 4, pp. 178p-180p, April 1946.
- Rosenbrock H.H. (1960). **An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function**. The Computer Journal, Vol. 3, No. 3, pp. 175-184, January 1960.
- Rujano-Molina L.M., Pérez-García N.A., Nariño-González T. (2017). **Distribuciones Acumulativas de la Tasa de Lluvias con Tiempo de Integración de 1-minuto en Venezuela**. Ingeniería Al Día, Vol. 3, No. 1, pp. 24-44, Enero-Junio 2017.
- Salonen E.T., Poiars-Baptista J.P.V. (1997). **A New Global Rainfall Rate Model**. Tenth International Conference on Antennas and Propagation, Edinburgh, UK, April 1997.
- Santacruz M.A. (2017). **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, Maestría en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC), Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), 2017.
- Santana G.A., Durand F., Abrão T. (2018). **Power Allocation in PON-OCDMA with Improved Chaos Particle Swarm Optimization**. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 17, No. 2, pp. 268-283, June 2018.

- Seber G.A.F., Wild C.J. (2003). **Nonlinear Regression Analysis and its Applications**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2003.
- Sekine M., Chen C.D., Musha T. (1987). **Rain Attenuation from Log-normal and Weibull Raindrop-size Distributions**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 35. No. 3, pp. 358-359, March 1987.
- Sekine M., Ishii S., Hwang S.I., Sayama S. (2007). **Weibull Raindrop-Size Distribution and its Application to Rain Attenuation from 30 GHz to 1000 GHz**. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 28, No. 5, pp. 383-392, May 2007.
- Semplak R.A. (1970). **Effect of Oblate Raindrops on Attenuation at 30.9 GHz**. Radio Science, Vol. 5, No. 3, pp. 559-564, March 1970.
- Shi Y., Eberhart R. (1998). **A Modified Particle Swarm Optimizer**. Fifth IEEE Conference on Evolutionary Computation, in IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 1998), Anchorage, AK, USA, May 1998.
- Shi Z.J., Shen J. (2005). **Estimation for Unconstrained Optimization Methods**. Computational & Applied Mathematics, Vol. 24, No. 3, pp. 399-416, September-December 2005.
- Silva-Mello L.A.R., Pontes M.S., Souza R.M., Perez-Garcia N.A. (2007). **Prediction of Rain Attenuation in Terrestrial Links using Full Rainfall Rate Distribution**. Electronics Letters, Vol. 43, No. 25, pp. 1442-1443, December 2007.
- Somu M., Rengarajan N. (2014). **An Improved Particle Swarm Optimization Based on Deluge Approach for Enhanced Hierarchical Cache Optimization in IPTV Networks**. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol. 7, No. 19, pp. 4018-4028, May 2014.
- Szakall M., Diehl K., Mitra S.K., Borrmann S. (2009). **A Wind Tunnel Study on the Shape, Oscillation, and Internal Circulation of Large Raindrops with Sizes between 2.5 and 7.5 mm**. Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 66, No. 3, pp. 755-765, March 2009.
- Tokay A., Petersen W.A., Gatlin P., Wingo M. (2013). **Comparison of Raindrop Size Distribution Measurements by Collocated Disdrometers**. Journal of

- Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 30, No. 8, pp. 1672-1690, August 2013.
- Ulbrich C.W. (1983). **Natural Variation in the Analytical form of the Raindrop Size Distribution**. Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol. 22, No. 10, pp. 1764-1775, October 1983.
- Vanderbei R.J. (2014). **Linear Programming. Foundations and Extensions**. 4th Edition. New York, NY, USA: Springer, 2014.
- vanZanten M.C., Stevens B., Vali G., Lenschow D.H. (2005). **Observations of Drizzle in Nocturnal Marine Stratocumulus**. Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 62, No. 1, pp. 88-106, January 2005.
- Vassiliadis V.S., Conejeros R. (2009). **Rosenbrock Method (RM)**, in *Encyclopedia of Optimization*, 2nd Edition, Floudas C.A., Pardalos P.M., New York, NY, USA: Springer, 2009, pp.3343-3345.
- Verdugo K., Aires L, Machado H. (2018). **Contribución para la Implementación de una Red de Detección de Rayos en Ecuador**. Revista Politécnica, Vol. 41, No. 1, pp. 1-7, Abril 2018.
- Wen G.K., Mamat M., Mohd I.B., Dasril Y. (2012). **A Novel of Step Size Selection Procedures for Steepest Descent Method**. Applied Mathematical Sciences, Vol. 6, No. 51, pp. 2507-2518, 2012.
- Wexler R., Weinstein J. (1948). **Rainfall Intensities and Attenuation of Centimeter Electromagnetic Waves**. Proceedings of IRE, Vol. 36, No. 3, pp. 353-355, March 1948.
- Yang X.S. (2008). **Introduction to Mathematical Optimization - From Linear Programming to Metaheuristics**. Cambridge, United Kingdom: Cambridge International Science Publishing, 2008.
- Zhang W., Moayeri N. (1999). **Power-Law Parameters of Rain Specific Attenuation**. Document Number IEEE 802.16cc-99/24. [En línea]. Disponible en http://www.ieee802.org/16/tq2_orig/contrib/80216cc-99_41.pdf (consultada el 06 de febrero 2018).