



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“DESEMPEÑO DE SISTEMAS DE COMUNICACIÓN  
SATELITALES EN GUAYAQUIL, USANDO LAS TÉCNICAS  
DE DIVERSIDAD DE MÚTIPLS SITIOS Y TIEMPO”**

**INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

KEVIN AGUSTÍN SALAZAR GUZMÁN

EDGAR IVÁN GUALOTO TOTOY

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestro Padre Dios, a la Virgen María y a nuestra familias que nos brindaron su apoyo incondicional y protección para seguir adelante con sabiduría en los momentos más importantes de nuestra vida universitaria.

Además, quedamos totalmente agradecidos con el Dr. Boris Ramos y el MSc. Jorge Brito por toda la ayuda brindada en este proyecto de grado.

**Kevin Agustín Salazar Guzmán**

**Edgar Iván Gualoto Totoy**

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto se lo dedico a nuestro Dios Todopoderoso y a su querida madre la Virgen María, por estar siempre conmigo en las etapas más difíciles y felices de mi vida.

En segundo lugar esta dedicatoria va hacia mis padres, hermanos, y una persona en especial mi tía Dolores Salazar, quien fue, es y será mi segunda madre por todo su apoyo incondicional.

A mis maestros de colegio y universidad; y a mis amigos. Mario, Christian, Roberto, José y Adrián, quienes estuvieron a lo largo de mi carrera profesional, anhelando siempre verme en cumplir mis sueños.

**Kevin Agustín Salazar Guzmán**

Dedico este trabajo a mis padres por sus constantes consejos los cuales sirvieron para guiarme por el camino del bien, a mis hermanos y a mis sobrinos por ser mi mayor motivación.

**Edgar Iván Gualoto Totoy**

# TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

---

**Ph.D. Boris Ramos**

PROFESOR DE MATERIA  
INTEGRADORA

---

**MSc. Verónica Soto**

TUTOR ACADÉMICO

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, no) corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

---

Kevin Salazar

---

Edgar Gualoto

## RESUMEN

En las últimas tres décadas, el diseño de los sistemas de comunicaciones satelitales han requerido un mayor desarrollo tecnológico del enlace, para proporcionar un nivel de señal adecuado en el receptor. Estos sistemas que trabajan en las bandas Ku (12/14 GHz) y Ka (20/30 GHz), brindan servicios tales como multimedia, internet o televisión [1]. En Marzo del 2016, cuatro pluviómetros fueron instalados en la ciudad de Guayaquil, en los sectores: ESPOL, Mapasingue, Kennedy y Durán; donde se recolectaron datos de lluvia durante un año aproximadamente, como parte de un proyecto de investigación denominado: *“Modelamiento de intensidad de lluvia utilizando un sistema de radio en la banda no licenciada U-NII: un experimento piloto en Guayaquil”*. Para nuestro proyecto, los datos recolectados se les dieron otro enfoque diferente, y fueron procesados mediante el software MatlabR2017b. Se realizó un estudio estadístico sobre el comportamiento de la lluvia en la ciudad, obteniendo como resultado las tasas de lluvias más intensas por cada sector. Luego, se aplicó la Técnica de la Tormenta Sintética Satelital (S-SST), teniendo las series de atenuaciones por lluvia. Con el fin de mitigar los efectos de lluvia, se implementó a manera de simulación la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios como una contramedida de estudio a las condiciones mencionadas en este proyecto. Después, se evaluó el rendimiento de la técnica, estadísticamente mediante el parámetro de ganancia de diversidad. Además, se simuló un caso real aplicando la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios y de Tiempo [2], en un día muy lluvioso para ver los efectos que se producen en la Relación Señal a Ruido (SNR) y en la Tasa de Error Binario (BER) en un sistema de comunicación satelital. Como trabajo adicional, se demostró la relación existente entre las dos técnicas de diversidades (Múltiples Sitios y Tiempo), obteniendo como resultado una relación lineal.

## **ABSTRACT**

*Satellite communications are increasingly expanding into frequencies bands above 10 GHz to fulfil capacity and availability system's requirements. These systems are subject to attenuation by several physical factors present in the atmosphere and one of them is "rain" along the propagation path. The effect of heavy rainfall in tropical regions is increases the system outage probability. Almost-perfect countermeasures that can be applied to mitigate the degradation of the signals propagation are the Multi-Site and Time Diversity Technique. In this work, the process of obtaining rain-rate time series provided by four rain gauges located in the city of Guayaquil. Then, the rainfall attenuation statistics will be obtained through the Satellite Synthetic Storm Technique (S-SST).*

*Keywords: satellite, communication, attenuation, rainfall, Multi-Site, Time, diversity, rain-rate, time series, gauges*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Contexto Ambiental.....	4
1.5 Metodología .....	5
1.6 Alcance del Proyecto.....	6
CAPÍTULO 2 .....	7
2. VISIÓN GENERAL TEÓRICA .....	7
2.1 Propagación de las señales satelitales .....	7
2.2 Atenuación de lluvia en señales satelitales .....	8
2.3 Estadística de la atenuación de lluvia.....	9
2.4 Efecto de la difracción en señales satelitales.....	11
2.5 Técnica de la Tormenta Sintética Satelital (S-SST) .....	12
2.6 Técnicas de Mitigación del deterioro de propagación (PIMTs) en Técnicas de Diversidades .....	17

2.6.1	Diversidad de Múltiples Sitios .....	18
2.6.2	Diversidad de Tiempo .....	19
2.7	Presupuesto de enlace en señales satelitales .....	21
2.7.1	Relación Señal a Ruido (SNR) .....	22
2.7.2	Tasa de Error Binario (BER) .....	23
2.8	Hipótesis .....	25
CAPÍTULO 3 .....		26
3. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL, PROCESAMIENTO DE LOS DATOS Y TÉCNICA DE LA TORMENTA SINTÉTICA SATELITAL (S-SST).....		26
3.1	Ubicación y descripción de los pluviómetros .....	26
3.2	Series Temporales de Tasas de Lluvias de un minuto.....	29
3.3	Aplicación de la Técnica de la Tormeta Sintética Satelital .....	34
CAPÍTULO 4 .....		38
4. SIMULACIONES: TÉCNICA DE DIVERSIDAD DE MÚLTIPLES SITIOS; SNR Y VER APLICANDO LAS TÉCNICAS DE DIVERSIDAD DE MÚLTIPLES SITIOS Y DE TIEMPO.....		38
4.1	Resultados de la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios .....	38
4.2	Resultados de la Simulación de la SNR: Un día lluvioso .....	47
4.3	Resultados de la Simulación de la BER: Un día lluvioso.....	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		62
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
SNR	Signal to Noise Ratio
BER	Bit Error Rate
S-SST	Satellite Synthetic Storm Technique
PIMTs	Propagation Impairment Mitigation Techniques
GPS	Global Positioning System
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
ENOS	El Niño – Southern Oscillation
RF	Radio Frecuencia
TV	Televisión
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
FSL	Free – Space Spreading Loss
AML	Antenna Misalignment Loss
AA	Atmospheric Absorption Loss
PL	Polarization Mismatch Loss
RA	Rain Attenuation
AWGN	Additive White Gaussian Noise

## SIMBOLOGÍA

GHz	gigahertz
km	kilómetros
m	metros
s	segundos
m/s	metros por segundos
dB	decibelios
dbW	decibelios watts
mbar	milibar
mm	milímetro
mm/h	milímetro por hora
°C	grados Celsius
K	Kelvin

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelo de convección, temperatura del mar y surgencia, bajo las condiciones de El Niño.....	4
Figura 2.1 Representación lineal de un trayecto tierra-espacio con distintos parámetros empleados para la determinación de la atenuación por lluvia.....	9
Figura 2.2 CCDF de atenuación de lluvia, para una frecuencia de 20 GHz (Satélite Amazonas).....	10
Figura 2.3 CCDF de atenuación de lluvia, para una frecuencia de 24 GHz (Satélite Amazonas).....	11
Figura 2.4 Representación total del trayecto tierra-espacio, donde se presenta el Modelo de la Técnica de la Tormenta Sintética Satelital.....	14
Figura 2.5 Representación gráfica de la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios (Combinación de Dos Sitios).....	19
Figura 2.6 Representación gráfica de la Técnica de Diversidad de Tiempo.....	20
Figura 3.1 Pluviómetros ubicados en la ciudad de Guayaquil.....	26
Figura 3.2 Pluviómetro de la marca Texas Electronics TR-525M.....	28
Figura 3.3 Pestaña de datos almacenados del pluviómetro ubicado en el sector ESPOL.....	28
Figura 3.4 Tasas de lluvias de un minuto medida en ESPOL, Mapasingue, Kennedy y Durán (desde el 22 de Marzo del 2016 hasta el 29 de Mayo del 2017).....	31
Figura 3.5 Gráfica de CCDFs de Tasas de lluvias de un minuto medida en ESPOL, Mapasingue, Kennedy y Durán (desde el 22 de Marzo del 2016 hasta el 29 de Mayo del 2017).....	33
Figura 3.6 Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y ángulo de elevación de $67.7^\circ$ , para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil.....	36
Figura 4.1 CCDFs de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y ángulo de elevación de $67.7^\circ$ , para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil (tomando la combinación de dos estaciones terrenas).....	39
Figura 4.2 CCDFs de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación	

de 67.7°, para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil (tomando la combinación de tres estaciones terrenas) .....	40
Figura 4.3 CCDFs de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y ángulo de elevación de 67.7°, para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil (tomando la combinación de cuatro estaciones terrenas) .....	41
Figura 4.4 Diversidad de Ganancia de Dos Sitios G en función de la atenuación de lluvia (estación ESPOL) a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de 67.7° .....	43
Figura 4.5 Divesidad de Ganancia de Tres Sitios G en función de la atenuación de lluvia (estación ESPOL) a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de 67.7° .....	44
Figura 4.6 Diversidad de Ganancia de Cuatro Sitios G en función de la atenuación de lluvia (estación ESPOL) a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de 67.7° .....	45
Figura 4.7 Tasa de lluvia de un minuto medida en ESPOL y Durán (el 03 de Febrero del 2017) .....	47
Figura 4.8 CCDF de tasa de lluvia de un minuto medida en ESPOL y Durán (el 03 de Febrero del 2017) .....	48
Figura 4.9 Atenuaciones obtenidas (el 03 de Febrero del 2017) luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de 67.7°, para las estaciones terrenas: ESPOL y Durán, ubicadas en la ciudad de Guayaquil .....	49
Figura 4.10 CCDFs de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de 67.7°, para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil (tomando la combinación de dos estaciones terrenas ESPOL + Durán) .....	50
Figura 4.11 CCDF de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de 67.7°, para la estación terrena ESPOL (tomando la combinación del tiempo de retardo de 30, 60 y 120 minutos) .....	51

Figura 4.12 Gráfica de SNR vs Tiempo de un enlace satelital (el 03 de Febrero del 2017) operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de $67.7^\circ$ , para la estación terrena ESPOL, sin aplicar ninguna técnica de diversidad.....	55
Figura 4.13 Gráfica de SNR vs Tiempo de un enlace satelital (el 03 de Febrero del 2017) operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de $67.7^\circ$ , para la estación terrena ESPOL (tomando la combinación de dos estaciones terrenas ESPOL + Durán) .....	56
Figura 4.14 Constelación QPSK con Código Gray en presencia del Ruido Aditivo Blanco Gaussiano, sin aplicar ninguna técnica de diversidad .....	58
Figura 4.15 Constelación QPSK con Código Gray en presencia del Ruido Aditivo Blanco Gaussiano, aplicando la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios .....	58
Figura 4.16 Gráfica BER vs SNR, sin aplicar ninguna técnica de diversidad, utilizando la modulación QPSK con Código Gray. ....	59
Figura 4.17 Gráfica BER vs SNR, aplicando la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios (para dos estaciones terrenas ESPOL + Durán), utilizando la modulación QPSK con Código Gray.....	60
Figura A.1 Ganancia de Diversidad de Sitio vs el porcentaje de tiempo absoluto, en diferentes distancias, a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de $67.7^\circ$ .....	
Figura A.2 Ganancia de Diversidad de Tiempo vs el porcentaje de tiempo absoluto, en tiempo de retardos diferentes, a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de $67.7^\circ$ .....	
Figura A.3 Ganancia de Diversidad de Sitio y de Tiempo vs el porcentaje de tiempo absoluto, a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de $67.7^\circ$ ....	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Sitios de los Pluviómetros .....	26
Tabla 3.2 Distancia entre cada Pluviómetro .....	27
Tabla 3.3 Muestra de Acumulaciones de llluvias por año (del 22 de Marzo del 2016 al 29 de Mayo del 2017) .....	31
Tabla 3.4 Acumulaciones de llluvias por ubicación (del 22 de Marzo del 2016 al 29 de Mayo del 2017).....	32
Tabla 3.5. Parámetros de entrada del model S-SST para ESPOL, Mapasingue, Kennedy y Durán.....	35
Tabla 4.1. Parámetros de entrada para determinar la potencia de la señal recibida..	53
Tabla 4.2. Parámetros de entrada para calcular la potencia del ruido .....	55
Tabla A.1 Velocidades efectivas (en m/s) de las combinaciones de las curvas de diversidad de sitio y de tiempo .....	
Tabla A.2 Velocidad de la tormenta (en m/s) de las combinaciones de las curvas de diversdiad de sitio y de tiempo .....	
Tabla A.3 Porcentaje de errores de la velocidad de la tormenta a 700 mbar .....	

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Los satélites tiene la capacidad de amplificar las señales recibidas desde la tierra y retransmitirlas a través de ondas electromagnéticas. Hoy en día, las personas pueden disfrutar de un programa de televisión cuya trasmisión se origina en otro lugar del planeta. Por otra parte, pueden disfrutar de contenido multimedia o conexión a internet en sus teléfonos celulares, entre otras cosas. En este tipo de comunicaciones satelitales, existen varios fenómenos que pueden perturbar la propagación de la onda. La lluvia, es considerada como una de las principales causas que alteran las características de potencia y polarización de la onda electromagnética, llegando a interrumpir la comunicación por un lapso de tiempo prologando. Por ende, es un factor dominante en cuanto a la atenuación de señales transmitidas a frecuencia mayores a 10 GHz. Esto se debe, a que la señal es absorbida y convertida en calor por las gotas lluvias, provocando que la señal se desvíe de la dirección de recepción [3].

Con el afán de mitigar los efectos de la lluvia en estas señales, se recomienda utilizar la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios como una contramedida para la reducción de atenuación general del sistema. Partiendo de que la estructura de la lluvia es irregular en el espacio, y sabiendo que las lluvias más fuertes tienen en promedio una limitada extensión de 24 km (es decir que una lluvia fuerte puede cubrir hasta 24 km de espacio terrestre), podemos decir que se reduce de forma notable la probabilidad de tener una atenuación simultáneamente en los enlaces satelitales, siempre y cuando la distancia entre las estaciones terrenas sea lo suficientemente extensa, que la distancia de auto-correlación del evento de lluvia [3].

## **1.1 Descripción del problema**

El efecto de atenuación que causa la lluvia en la propagación de señales satelitales, a frecuencias superiores a 10 GHz, en zonas tropicales como la ciudad de Guayaquil, Ecuador.

## **1.2 Justificación del problema**

En los servicios satelitales existen grandes factores que afectan las señales transmitidas, ya sea desde la tierra hacia el satélite o viceversa. Los fenómenos atmosféricos (gases e hidrómetros) que se presentan en el planeta., especialmente la lluvia, afectan de forma notable el desempeño de las comunicaciones inalámbricas. La lluvia como fenómeno natural, puede presentarse de forma imprevista en cualquier sector del planeta, por ende es la principal fuente de atenuación de la señales para estos sistemas de comunicaciones satelitales. El mecanismo de propagación que se considera para este análisis debido al comportamiento que posee la lluvia, es la propagación por onda de espacio, debido a que la atenuación por el oxígeno y vapor de agua existe gracias a las frecuencias de resonancia en las características (estructura electrónica interna) de las diversas moléculas de agua presente en la atmósfera [3]. En otras palabras, la atenuación debida a la lluvia (específicamente la cantidad global de agua en el aire), depende mucho del tamaño de la gota, su deformación al caer al suelo, el efecto joule (comportamiento natural del agua como dieléctrico), la absorción y dispersión de la energía, afecta en gran medida el desempeño y rendimiento de los enlaces satelitales [3]. Por todo lo planteado anteriormente y con el afán de brindar una herramienta eficaz a los que están involucrados en el área de las comunicaciones satelitales, el presente trabajo contempla la necesidad de encontrar la ganancia de potencia de la diversidad de Múltiples Sitios, para estudiar y analizar el rendimiento de las señales satelitales atenuadas por las lluvias fuertes, en la ciudad de Guayaquil (ciudad de clima tropical).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Encontrar la ganancia de potencia de diversidad de la lluvia, y analizar el rendimiento de una comunicación satelital mediante los parámetros de SNR y BER, en la ciudad de Guayaquil.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Obtener las Gráficas de Series de tiempo de lluvia de un minuto, medida en los 4 sectores ubicados en la ciudad de Guayaquil.
- Realizar una tabla acerca de las acumulaciones de lluvia y obtener las curvas de CCDFs de la tasa de lluvia medidas por sector.
- Aplicar la Técnica de Tormenta Sintética Satelital (S-SST).
- Aplicar la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios.
- Determina la ganancia de diversidad de Múltiples Sitios, tomando como referencia ESPOL.
- Simular un caso real de un día muy lluvioso en la ciudad de Guayaquil, para determinar el comportamiento de la SNR y el BER, en un sistema de comunicación satelital aplicando las Técnicas de Diversidad de Múltiples Sitios y de Tiempo.

## 1.4 Contexto Ambiental

En los últimos años, la ciudad de Guayaquil ha presentado una precipitación anual de 1100 *mm* (más del 80% de concentración de lluvia), entre los meses de enero a abril [2]. A pesar de que esta cantidad varía según varios factores oceanográficos y atmosféricos, el gran causante es la ocurrencia del patrón climático denominado El Niño – Oscilación del Sur (ENOS).

El Niño, es un fenómeno que provoca intensas lluvias en las regiones costeras del Pacífico Sur. Se manifiesta principalmente, por el incremento de la temperatura superficial del mar y una reducción de los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico, generando precipitaciones y cambios relevante en el clima (ver figura 1.1) [4].

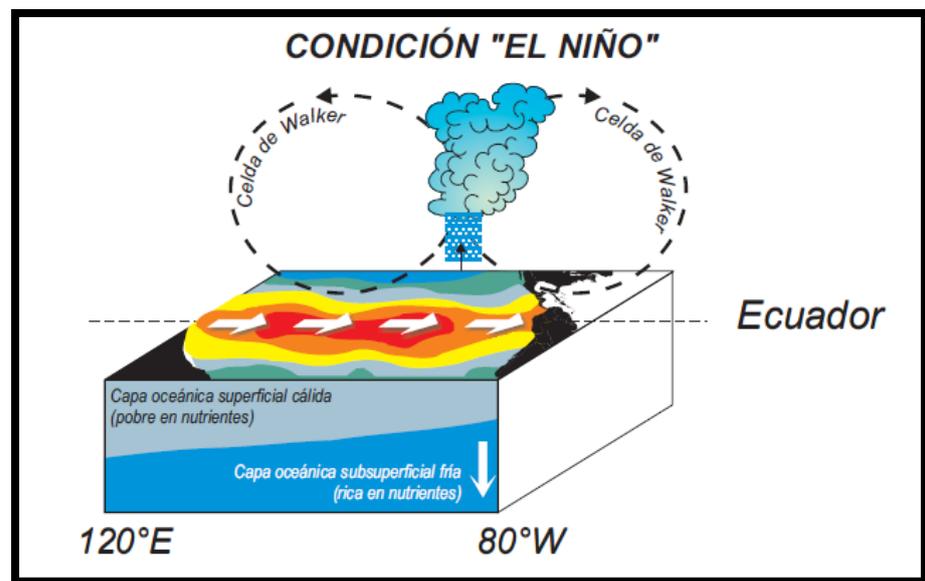


Figura 1.1 Modelo de convección, temperatura del mar y surgencia, bajo las condiciones de El Niño [4]

Los registros históricos de la ciudad de Guayaquil muestran una característica considerable en la variación de la precipitación espacial, que se puede explicar por varias razones. Primero, el factor orográfico: a

pesar de que Guayaquil es una ciudad plana, posee varias colinas, tal como es el “Cerro Azul” (507 m a.s.l) en su límite noroeste [2].

En el centro Guayaquil y en las cercanías de Durán, existe una considerable variación en la evapotranspiración, donde los patrones de viento desarrollan nubes de lluvias en los diferentes sectores de la ciudad. Como resultado, la precipitación total anual suele ser mucho mayor cerca del aeropuerto, disminuyendo considerablemente en promedio un 20% hacia el sur, aunque estos porcentajes pueden ser incluso superiores para eventos específicos [2].

Por lo tanto, es interesante observar que en Guayaquil se producen aumentos de las precipitaciones, además de las ocurrencias de eventos de lluvias intensas como consecuencia del El Niño, que afectan específicamente a los patrones de lluvia de diferentes maneras, creando escenarios ideales para las aplicaciones de estudios en este proyecto.

## **1.5 Metodología**

En el transcurso y realización del presente proyecto, se realizará un enfoque metodológico basado en técnicas cuantitativas, donde se estudiará y se analizará gráficas acerca del comportamiento de la lluvia, todo esto con la ayuda de la estadística. Se tiene como base, los datos de lluvias recolectados por los cuatro pluviómetros ubicados en los distintos puntos de la ciudad de Guayaquil durante 433 días. Estos datos pasaron por un período de prueba y fueron procesados en una investigación anterior, donde se obtuvieron series temporales de tasas de lluvias por minuto.

Utilizando el software MatlabR2017b, se procedió a convertir esas tasas de lluvias en estadística de lluvias por medio de un algoritmo de simulación denominada Técnica de la Tormenta Sintética Satelital. Luego, se procedió obtener las gráficas: CCDF de atenuaciones, con las

cuales se pueden interpretar y verificar las ganancias de atenuaciones por lluvia, misma que varía según la combinación entre sitios. Para evaluar el rendimiento de los enlaces satelitales, se aplicó la Diversidad de Múltiples Sitios, donde se realizaron combinaciones de: dos, tres y cuatro estaciones terrenas (ubicación de los pluviómetros), respectivamente.

## **1.6 Alcance del Proyecto**

Este proyecto se enfocará (mediante una simulación en el software MatlabR2017b) en analizar el desempeño y rendimiento de los sistemas de comunicaciones satelitales, en la ciudad de Guayaquil, a partir de datos recolectados de lluvia (desde el 22 de Marzo del 2016 hasta el 29 de Mayo del 2017), por cuatro pluviómetros ubicados en los sectores ESPOL, Mapasingue, Kennedy y Durán, respectivamente.

Considerando que el costo económico para instalar una estación base es muy alto, sólo se realizará la simulación de la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios realizando combinaciones de 2, 3 y 4 estaciones terrenas, respectivamente. Además, se encontrará la ganancia de potencia de diversidad de un enlace satelital (a una frecuencia de 20 GHz con un ángulo de elevación  $67.7^\circ$ ) a partir de series temporales de atenuación por lluvia (Técnica de la Tormenta Sintética Satelital). Para ver el rendimiento de las Técnicas de Diversidades de Múltiples Sitios y de Tiempo en un día muy lluvioso (03 de Febrero del 2017), se simulará una comunicación a tiempo real de un enlace satelital (a una frecuencia de 20 GHz con un ángulo de elevación  $67.7^\circ$ ). Además, se realizará un presupuesto de enlace, para determinar la Relación Señal a Ruido (SNR) y la Tasa de Error Binario (VER) utilizando la modulación QPSK con Código Gray.

Finalmente (en la parte de los anexos), se comprobará la relación lineal espacio-tiempo (velocidad efectiva) existente, entre las ganancias de potencia de la diversidad de Múltiples Sitios (combinación de dos estaciones) y de Tiempo.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. VISIÓN GENERAL TEÓRICA**

#### **2.1 Propagación de las señales satelitales**

Algunos fenómenos atmosféricos pueden modificar el patrón de propagación de las ondas electromagnéticas debido a la composición de las mismas, ya que contienen una componente magnética y una componente eléctrica, respectivamente. En los casos ideales y tomando en cuenta una atmósfera uniforme, las ondas de radio pueden viajar en línea recta, es decir, si hay línea de vista entre la estación emisora y la estación receptora, entonces el enlace será eficiente. Pero, si se requiere establecer una comunicación entre dos estaciones que sobrepasan el horizonte y sin línea de vista, es necesario tomar en cuenta las diferentes condiciones de propagación y elegir las frecuencias adecuadas para su correcta transmisión.

Para la transmisión de señales satelitales, se usa las bandas de frecuencias que van desde 1 GHz hasta los 30 GHz. Este rango de frecuencias, las señales satelitales son capaces de cruzar la atmósfera hacia el satélite y regresar a la tierra. Para poder conectar una estación emisora con una estación receptora, las cuales están ubicadas en distintos puntos de la tierra y sin línea de vista entre sí, es necesario establecer un enlace por medio de un satélite ya que este tipo de enlaces no requiere de una línea de vista entre las estaciones [2].

Como ya lo hemos mencionado antes, existen muchos fenómenos atmosféricos presentes en la trayectoria de una señal satelital, por lo tanto para establecer una comunicación, satélite – tierra o viceversa, las señales deben sortear los efectos causados por dichos fenómenos atmosféricos tales como: interferencia de dispersión, despolarización y atenuación.

Aparte de los efectos mencionados, cabe agregar la pérdida de coherencia espacial en el frente de onda para ondas milimétrica teniendo en cuenta de que es un efecto causado particularmente por la lluvia. Debe mencionarse que este fenómeno, es producto del movimiento rápido de las gotas de lluvia y por las múltiples reflexiones entre una gota y otra [2].

Para el estudio adecuado de estos efectos, es necesario dividirlos en dos aspectos principales: el aspecto físico (es decir los factores y condiciones del lugar en donde están ubicados los pluviómetros), y el aspecto estadístico.

Es de vital importancia recalcar que en este trabajo de investigación nos vamos a enfocar en el efecto de atenuación por lluvia en señales satelitales.

## **2.2 Atenuación de lluvia en señales satelitales**

Hoy en día, muchos de los servicios que disfrutamos en nuestros hogares, o en cualquier lugar donde estemos, son de transmisión satelital, como por ejemplo, el servicio de suscripción (TV pagada), la telefonía móvil, la ubicación GPS, entre otros. Todo esto es posible gracias a que los satélites tienen la capacidad de amplificar la señal recibida para retransmitirlas a través de ondas electromagnéticas. En los últimos años, varios estudios han determinado que la recepción de la señal satelital se puede ver afectada por los diferentes fenómenos atmosféricos, como por ejemplo la lluvia, la cual ha sido catalogada como una de las principales causas que perturban la propagación de la energía electromagnética, truncando así la transmisión [1].

Si llueve en un sitio donde está ubicada una estación base terrestre, sin importar que sea receptora o transmisora, la señal portadora que está siendo transmitida o recibida, se atenúa a medida que se propaga a través del espacio donde llueve.

En la figura 2.1, se pretende mostrar que la distancia total  $D$  que la señal recorre a través de la lluvia, depende del ángulo de elevación  $\theta$  de la antena en la estación base y de la altura  $h$  de las nubes con respecto al piso [5].

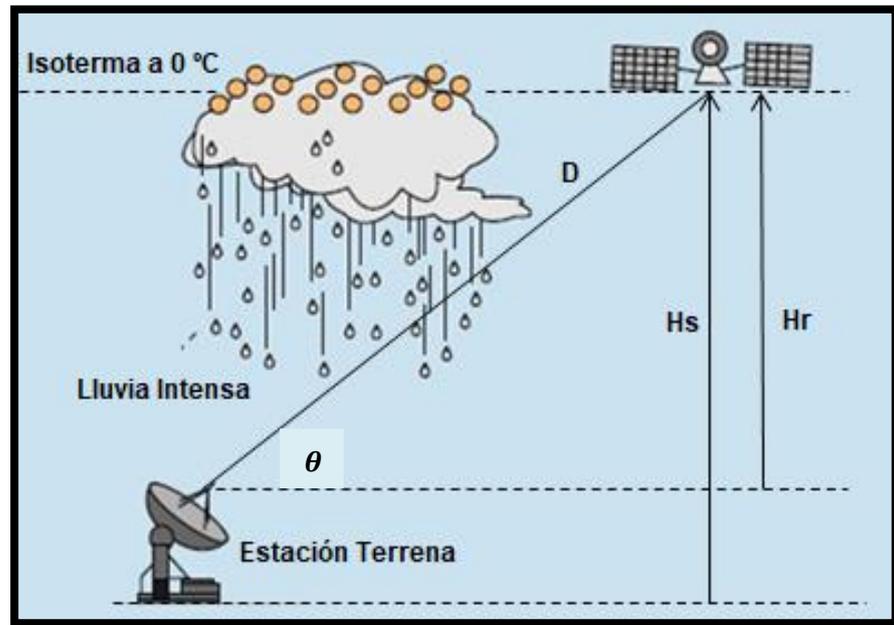


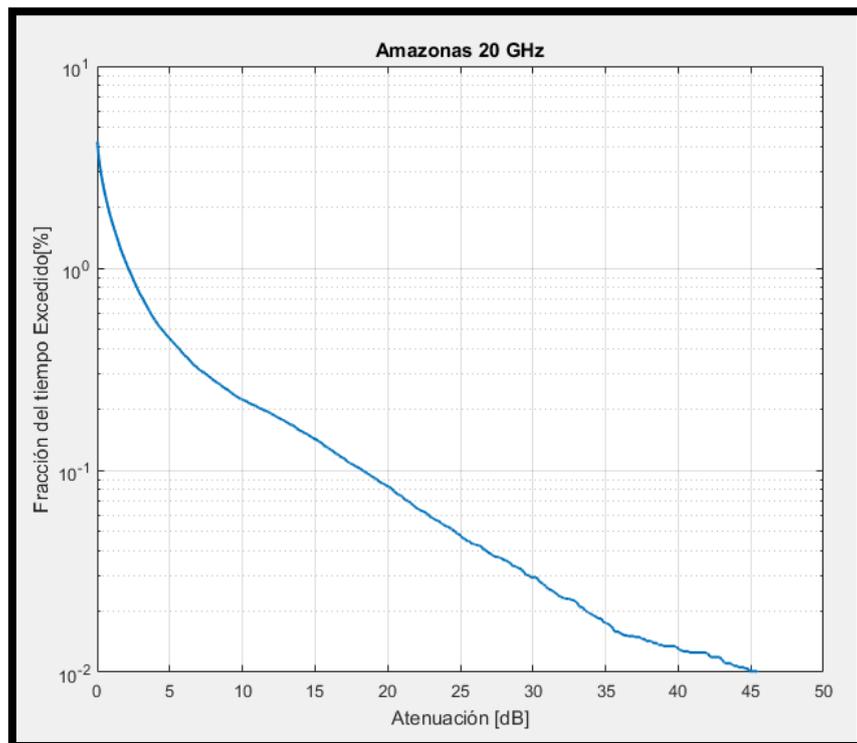
Figura 2.1 Representación lineal de un trayecto tierra-espacio con distintos parámetros empleados para la determinación de la atenuación por lluvia [5]

### 2.3 Estadística de la atenuación de lluvia

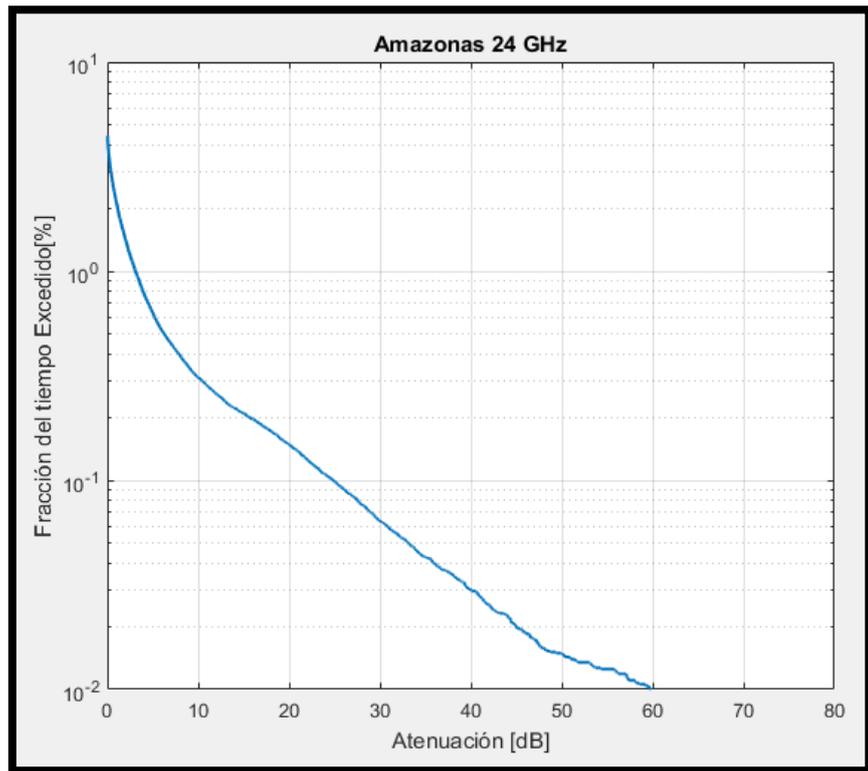
Muchas veces, el poco conocimiento de las características pluviométricas, es el principal inconveniente para poder predecir una atenuación intensa en el lugar donde se realiza una transmisión satelital. Otro inconveniente que se presenta a la hora de analizar el aspecto estadístico, es el comportamiento variable de los sucesos de lluvia tanto en tiempo como en lugar, por tal motivo, para obtener resultados más precisos es necesario recolectar datos en varios periodos de medición y áreas amplias. No obstante, cabe recalcar que la recolección de datos más importantes para estos casos, son los valores casi instantáneos que se miden en lluvias fuertes, las cuales a menudo están extremadamente localizadas. Para tener una representación gráfica de cómo se comporta

la atenuación debido a la lluvia para una probabilidad dada, se utiliza la función de distribución acumulativa (CCDF). La CCDF, es una función que acumula todas las probabilidad menores o iguales a  $x$ . En este proyecto se acumular todas las atenuaciones de lluvia por cada probabilidad dada [3].

En las figuras 2.2 y 2.3, se pretende mostrar dos ejemplos específicos del acumulado complementario de la función de distribución (CCDF) de la atenuación debido a la lluvia a cierta frecuencia de operación. Dicho de otra forma, se muestra la fracción de tiempo (en porcentaje) en que la atenuación excede el valor de abscisas. Estos datos fueron recolectados en la estación experimental de la universidad ESPOL (pluviómetro de la marca Texas Electronics TR-525M.), en la ciudad de Guayaquil (datos recolectados entre el 22 de Marzo del 2016 hasta el 29 de Mayo del 2017).



**Figura 2.2 CCDF de atenuación de lluvia, para una frecuencia de 20 GHz (Satélite Amazonas)**



**Figura 2.3 CCDF de atenuación de lluvia, para una frecuencia de 24 GHz (Satélite Amazonas)**

## 2.4 Efecto de la difracción en señales satelitales

La difracción es un fenómeno propio de las ondas, ya sean ondas sonoras, ondas de superficie de un fluido, ondas de radio y ondas electromagnéticas. Se define a la difracción como la modulación o redistribución de la energía dentro de un frente de onda al atravesar una rendija o en los límites de una superficie, es decir, debe haber un obstáculo. En otras palabras, a medida que se propaga la onda alrededor del objeto que lo obstruye (en este caso, una gota de lluvia), su dirección también cambia, debido a estas reacciones, el sistema satelital pierde parte de la potencia de la señal recibida [6].

En lluvias fuertes, la forma y el tamaño de las gotas son comparadas con la longitud de onda, provocando la pérdida de la energía electromagnética, ya que la energía es absorbida y convertida en calor

por las gotas de lluvia, generando así el desvío de la dirección de recepción de la onda [6].

## **2.5 Técnica de la Tormenta Sintética Satelital (S-SST)**

La cantidad de desvanecimiento debida a la lluvia, es una función de la frecuencia de operación y está altamente correlacionado con la tasa de lluvia. Mediante el uso de la estadística de lluvias para una región específica, es posible determinar la probabilidad de que se supere una profundidad de desvanecimiento dada. Por ende, la lluvia en un enlace de comunicación inalámbrica siempre será el complemento de la probabilidad de que se exceda el margen de desvanecimiento del enlace. Sin embargo, es importante dar a conocer los métodos y/o modelos estadísticos para predecir la atenuación debida a la lluvia, otorgando la posibilidad de dar a conocer una herramienta útil y eficaz al desempeño de las comunicaciones satelitales; y así implementar nuevos diseños de mitigación en base a los resultados obtenidos. En este proyecto se va a utilizar el método empírico, en la cual estudia la longitud efectiva del camino y la tasa de lluvia de la información obtenida, en base a los datos recolectados [1].

El método empírico utilizado, se lo conoce como Técnica de la Tormenta Sintética Satelital (S-SST). Esta técnica fue desarrollada por Matriccianien el año 1996, después de los estudios de Drufuca en el año 1974 en radio enlaces terrestres. Básicamente, es un método de propagación de ondas de radio físico-matemático, que genera series de tiempo de atenuación debida a la lluvia, mediante la conversión de una serie de tiempo de la tasa de lluvia en un sitio determinado [7].

Para analizar y evaluar el rendimiento de los sistemas de diversidad de Múltiples Sitios, es indispensable determinar la atenuación de la lluvia que experimenta el sistema de enlace satelital. El parámetro de ingreso para obtener la atenuación debida a la lluvia en las trayectorias presentadas en la simulación (es decir, las trayectorias inclinadas), es la serie temporal de

la tasa de lluvia de un minuto, adquirida por los cuatro pluviómetros. El modelo propuesto es el de los enlaces no horizontales (es decir, la estructura vertical) [2].

La estructura vertical de lluvia se la modela de la siguiente manera (ver figura 2.4): existen dos capas de precipitación con diferentes profundidades, capa de lluvia y capa de fusión. Comenzando desde el suelo (es decir, la capa inferior), encontramos la “capa de lluvia” (hidrometeoro en forma de gotas de lluvia, temperatura del agua de 20°C), donde se determina que la tasa de lluvia vertical ( $R_A$ ) (medida en milímetros por hora) permanece constante e uniforme; y está dada por la medida de los pluviómetros ( $R$ ) [7]. Tal como se aprecia en la figura 2.4, la precipitación en estado líquido se extiende desde una referencia  $H_S$  (desde el suelo) hasta una referencia denominada  $H_A$ . Por encima de capa de lluvia se encuentra una capa, denominada “capa de fusión”, cuya altura es  $h$ , donde varía desde  $H_A$  hasta  $H_B$  (donde los cristales de hielo comienzan a derretirse) [2].

Realizando una suposición física, descrita por Matricciani en el año 1991, se comprobó que la tasa de lluvia en la capa inferior está íntimamente relacionada con la “tasa aparente de lluvia” en la capa de fusión ( $R_B$ ), mediante la ecuación 2.1 [2].

$$R_B = 3.134 * R \quad (2.1)$$

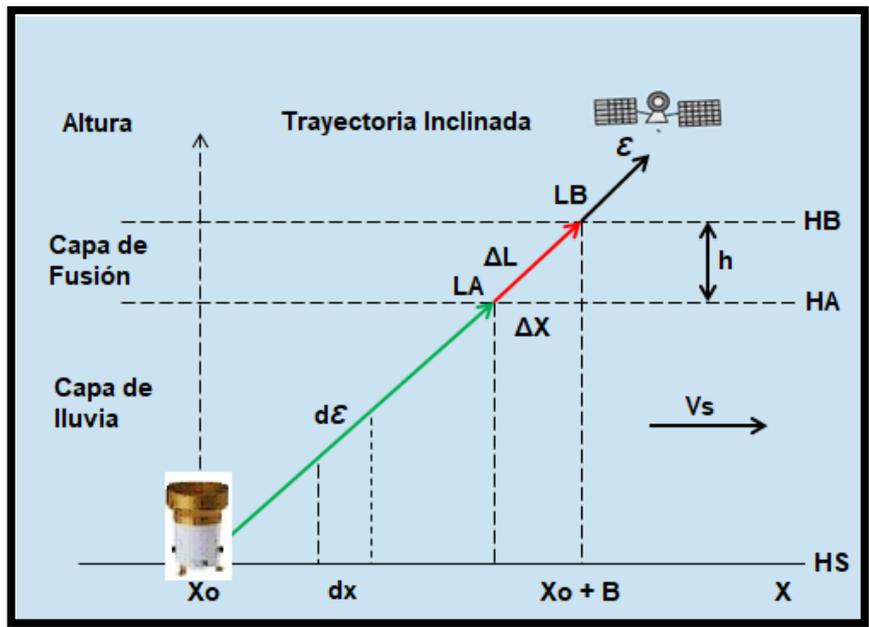


Figura 2.4 Representación total del trayecto tierra-espacio, donde se presenta el Modelo de la Técnica de la Tormenta Sintética Satelital [2]

De acuerdo a la recomendación ITU-R Rec. 839-0 (1992) [7], la altura máxima de la capa fusión  $H_B$  (km) depende del factor latitud ( $\Phi$ ) se la representa mediante la ecuación 2.2 [7].

$$H_B(\Phi) = \begin{cases} 5, & \Phi < 23 \\ 5 - 0.075 (\Phi - 23), & \Phi \geq 23 \end{cases} \quad (2.2)$$

La longitud del camino oblicuo lluvioso, está dada por la siguiente ecuación [2]:

$$L = \frac{H - H_S}{\sin \theta} \quad (2.3)$$

Si  $L = L_A$ , se obtiene [2]:

$$L_A = \frac{H_A - H_S}{\sin \theta} \quad (2.4)$$

Si  $L = L_B$ , se obtiene [2]:

$$L_B = \frac{H_B - H_S}{\sin \theta} \quad (2.5)$$

Con las ecuaciones,  $\theta$  es el ángulo de elevación de enlace de la trayectoria oblicua y depende de la posición del satélite y tiene un valor bastante elevado, debido a que la ciudad de Guayaquil está muy cerca del ecuador. La altura  $H_A$  es coincidente con la altura de la isoterma de  $0^\circ\text{C}$ , mientras que  $H_B$  es la suma entre  $H_A$  y la profundidad de la capa de fusión ( $h$ ) que es de 0.4 km, independientemente de la latitud del sitio ( $\Phi$ ), mostrado en la siguiente expresión [2]:

$$H_B(\Phi) = H_A(\Phi) + h \text{ (km)} \quad (2.6)$$

Para convertir la atenuación específica en muestra de atenuación de lluvia sintética en el tiempo  $t$  en un enlace tierra-espacio, se la determina de la siguiente manera [2]:

$$A_{\text{TOT}}(t, x_0) = \int_0^{L_A} k * R_A^\alpha(x_0, \xi, t) d\xi + \int_{L_A}^{L_B} k * R_B^\alpha(x_0, \xi, t - \Delta t) d\xi \quad (2.7)$$

donde  $x_0$  representa la posición del pluviómetro a lo largo de la proyección de la trayectoria oblicua;  $L_A$  y  $L_B$  son las longitudes del trayecto oblicuo en las dos capas de lluvia y fusión, respectivamente;  $k$  y  $\alpha$  depende la frecuencia de la onda electromagnética y la polarización de la antena transmisora, además de la distribución del tamaño de la gota de lluvia [1];  $B$  es la proyección sobre el terreno de la trayectoria inclinada estudiada por la precipitación.

La integración para determinar las muestras de atenuación se realiza a lo largo de la trayectoria inclinada  $\xi$  [2]. Dado que poseemos una muestra cada T minutos (después de promediar la tasa de lluvia instantánea, por ejemplo,  $T = 1 \text{ min}$ ), el espaciado entre dos medidas consecutivas a lo largo de x es [2]:

$$dx = V_s * T \quad (2.8)$$

mientras la dirección del espacio a lo largo de  $\xi$ , es [2]:

$$d\xi = \frac{dx}{\cos \theta} \quad (2.9)$$

el tiempo que tarda un muestra de lluvia en “alcanzar” la capa de fusión se expresa como [2]:

$$\Delta t = \frac{(x_0 + B - \Delta x)}{V_s} \quad (2.10)$$

## **2.6 Técnicas de Mitigación del deterioro de propagación (PIMTs) en Técnicas de Diversidades**

En la actualidad, desde el más joven hasta el más adulto hace uso del servicio multimedia como transmisión de audio y video en alta calidad y en tiempo real, lo cual demanda grandes velocidades de transmisión de datos de forma ininterrumpida, esto ha provocado el uso de frecuencias más altas de 10GHz en los sistemas de telecomunicaciones. El usuario tendrá anchos de banda más amplios y además tendrá mayores velocidades en la transmisión de datos. Pero trabajar en estas bandas tiene su desventaja; la lluvia fuerte afecta gravemente al rendimiento de los sistemas de telecomunicaciones satelitales, especialmente en la zonas tropicales / ecuatoriales.

Por tal motivo, para tener una comunicación fiable así como calidad satisfactoria en el servicio (QoS) es necesario la aplicación de PIMTs.

Existen tres categorías principales de los PIMTs las cuales son:

- Técnicas de control de potencia
- Técnica de procesamiento de señal
- Técnicas de diversidad

La técnica de diversidad consiste en elegir un camino o tiempo diferente para tomar ventaja de la correlación del fenómeno experimentado. Esta técnica a su vez se categoriza en:

- Diversidad de Múltiples Sitios
- Diversidad de Tiempo
- Diversidad de Frecuencia

Para nuestro trabajo es necesario profundizar en la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios y la Técnica de Diversidad de Tiempo.

### 2.6.1 Diversidad de Múltiples Sitios

La Diversidad de Múltiples Sitios, consiste en dos (o más) estaciones terrenas separadas a kilómetros de distancia, con un satélite (generalmente en la órbita geoestacionaria) (ver figura 2.5), donde cada uno presenta un margen de enlace único (es decir corresponde específicamente a la diferencia entre el valor de la señal recibida y la sensibilidad del equipo receptor) significativamente más pequeño de lo necesario, en vez de utilizar una sola estación terrena (un único solo enlace) [8].

Para poder cuantificar el rendimiento de la Técnica de Múltiples Sitios se determina un parámetro denominado ganancia de diversidad absoluta (dB) [9]:

$$G(p) = A_o(p) - A_N(p) \quad (2.11)$$

Siendo N el número de estaciones que componen al sistema;  $A_o(p)$  corresponde el nivel de atenuación de lluvia excedido con una probabilidad p en un sistema que no utiliza diversidad (se toma una referencia de una de la estaciones para el análisis); y  $A_N(p)$  corresponde el nivel de atenuación al aplicar la técnica de múltiples estaciones terrenas (es decir, 3 sitios y 4 sitios) , donde cada nivel de atenuación está representado por función de distribución acumulativa complementaria CCDF única, que es obtenida a través de datos recolectados y procesados de lluvia [9].

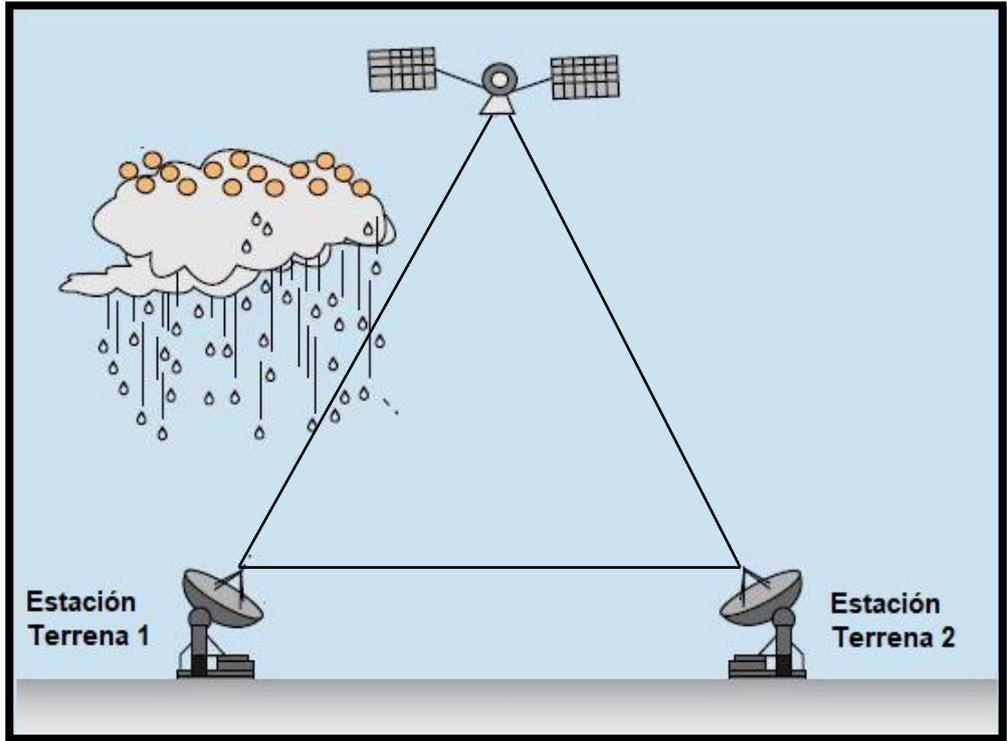


Figura 2.5 Representación gráfica de la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios (Combinación de Dos Sitios) [8]

### 2.6.2 Diversidad de Tiempo

La Diversidad de Tiempo consiste específicamente en retransmitir la misma información con un tiempo de demora confiable, entre transmisiones sucesivas (ver figura 2.6). Para determinar el rendimiento de esta técnica, se propone estudiar intervalos de tiempo de 1 minuto a 120 minutos, respectivamente. Las CCDFs de atenuación debida a la lluvia para la Diversidad de Tiempo con un retardo de tiempo  $\Delta t$  para cada instante  $t$ , se obtiene seleccionando un valor de atenuación mínimo entre  $A(t)$  y  $A(t + \Delta t)$ . Al acumular todas estas atenuaciones en una serie de tiempo se obtienen distribuciones de probabilidades conjuntas específicamente de atenuación de lluvia para retraso de tiempo [2].

El rendimiento de un sistema de diversidad de tiempo puede obtenerse a través de la ganancia de diversidad  $G$  en función de  $\Delta t$ , así como las principales características de la técnica. La ecuación que determina este rendimiento es [2]:

$$G(\Delta t, A_{0,loc}) = A_{0,loc}(p) - A_{\Delta,loc}(\Delta t, p) \quad (2.12)$$

donde  $A_{0,loc}$  y  $A_{\Delta,loc}$  son valores de atenuación debida a la lluvia (el eje de las ordenadas), por ubicación, determinados a través de la función de distribución acumulada CDDF, para un mismo nivel de probabilidad  $p$  dado. De la misma manera se puede obtener la ganancia de diversidad relativa [2], mediante la ecuación 2.13.

$$g(\Delta t, A_{0,loc}) = \frac{G(\Delta t, A_{0,loc})}{A_{0,loc}(p)} * 100[\%] \quad (2.13)$$

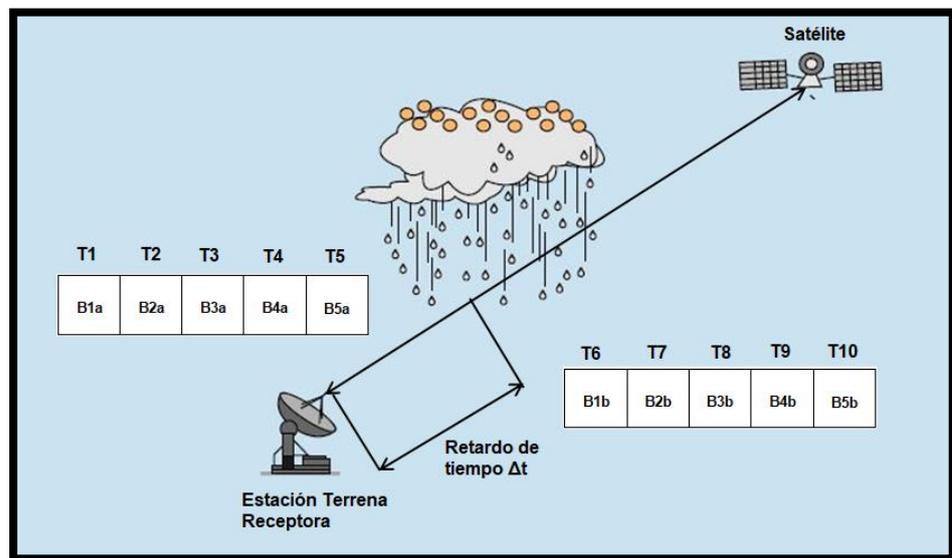


Figura 2.6 Representación gráfica de la Técnica de Diversidad de Tiempo [2]

## 2.7 Presupuesto de enlace en señales satelitales

Para determinar un presupuesto de enlace de potencia en un sistema de comunicación satelital, se realizan cálculos (en decibelio o decilog) que relaciona dos cantidades importantes que son: la potencia de transmisión y la potencia de recepción, y muestra en detalle las diferencias entre ellas [10].

Un parámetro clave en los cálculos del presupuesto de enlace es la potencia radiada isotrópica equivalente, denotada como  $[EIRP]$ . Donde la ecuación que determina esta potencia es la siguiente [10]:

$$[EIRP] = [P_{tx}] + [G_{tx}] \quad (2.14)$$

donde  $[P_{tx}]$  es la potencia de transmisión (en  $dBW$ ) y  $[G_{tx}]$  es la ganancia de la antena transmisora (en  $dB$ ).

El  $[EIRP]$  se considera como una entrada de potencia hacia un extremo del enlace de transmisión y el problema resulta encontrar la potencia recibida. Para determinar la potencia recibida, se considera unas pérdidas durante el trayecto de la señal, donde algunas de ellas presentan patrones constantes. Otras pérdidas solo pueden estimarse a través de datos estadísticos, o dependen de factores climáticos especialmente en las precipitaciones [10].

Por lo tanto la potencia de salida del enlace se lo puede determinar simplemente como [10]:

$$[P_{rx}] = [EIRP] + [G_{rx}] - [LOSSES] \quad (2.15)$$

donde  $[G_{rx}]$  es la ganancia de la antena receptora (en  $dB$ ) y  $[LOSSES]$  es la pérdida total de enlace satelital (en  $dB$ ).

Para calcular la pérdida total del sistema de comunicación se utiliza la siguiente expresión [10]:

$$[LOSSES] = [FSL] + [RFL] + [RFL] + [AML] + [AA] + [PL] + [RA] \quad (2.16)$$

donde  $[FSL]$  = pérdida de propagación en el espacio libre,  $dB$ .

$[RFL]$  = pérdida del alimentador de recepción,  $dB$ .

$[AML]$  = pérdida del desalineación de la antena,  $dB$ .

$[AA]$  = pérdida del absorción atmosférica,  $dB$ .

$[PL]$  = pérdida de coincidencia de polarización,  $dB$ .

$[RA]$  = pérdida de debido a la lluvia,  $dB$ .

El componente de pérdida de espacio libre está dado por [10]:

$$[FSL] = 10 \log \left( \frac{4\pi r f}{c} \right) \quad (2.17)$$

Donde  $f$  es la frecuencia de operación dada en  $GHz$ ,  $r$  es la distancia de enlace satelital dada en  $km$  y  $c$  es la velocidad de la luz.

### 2.7.1 Relación Señal a Ruido (SNR)

En términos generales la relación señal ruido o también conocido como SNR o S/R, es una medida que define la proporción entre la potencia de la señal deseada con la potencia del ruido que viene incluido en la señal, es decir, mientras más grande sea el valor del SNR, tenemos mejor señal y poco ruido [10]. Cabe aclarar que el ruido es una señal no deseada y corrompe la señal de interés. La SNR viene dada en decibelios (dB).

La SNR se expresa matemáticamente como [10]:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s}{P_n} \quad (2.18)$$

donde  $P_s$  es la potencia de salida en Watts y  $P_n$  es la potencia del ruido térmico en Watts, pero se la puede reescribir en forma de decibelios tal como se me muestra en la siguiente ecuación [10]:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{dB}} = 10 \log\left(\frac{P_s}{P_n}\right) \quad \text{ó} \quad (\text{SNR}) = [P_s]_{\text{dB}} - [P_n]_{\text{dB}} \quad (2.19)$$

Al analizar el desempeño de un enlace inalámbrico es fundamental encontrar el parámetro de SNR. En un enlace inalámbrico, la potencia de la señal que llega al receptor, depende de la potencia de la señal transmitida y de la atenuación sufrida en el trayecto entre transmisor y receptor, la potencia de ruido consiste en el aporte de ruido del mismo receptor y del ruido externo recibido por la antena, por lo general el ruido dominante es el del propio receptor [10].

### 2.7.2 Tasa de Error Binario (BER)

Debido algunos factores aleatorios como las condiciones atmosféricas, mal funcionamiento del equipo o atenuaciones, la transmisión y recepción de una señal satelital no es completamente perfecto. Para mejorar la calidad de transmisión y recepción del mensaje, se utilizan técnicas de modulación y codificación.

La optimización del rendimiento de un sistema suele darse en ciertos parámetros tales como ancho de banda, la intensidad de la señal, o la complejidad del procesamiento de la señal necesaria para errores en la transmisión de datos, por debajo de los límites establecidos [11].

Debido a las limitaciones e imperfecciones de un sistema de comunicación digital, durante el procesamiento de los datos se producen errores. Por ejemplo: el nivel lógico 1 puede recibirse como un 0, o viceversa. Para determinar la probabilidad de que el sistema tenga errores se expresa como la Tasa de Error Binario (BER).

La tasa de error binario, se lo calcula dividiendo el número de errores de bit por el número total de bits transferido durante un intervalo de tiempo estudiado [11].

$$BER = \frac{\text{Número de errores}}{\text{Número total de bits}} \quad (2.20)$$

La probabilidad de error de bit ( $P_b$ ) es el valor esperado de BER. La tasa de error binario en la mayoría de los casos puede considerarse como la estimación aproximada de la probabilidad de error del bit. Esta estimación se hace precisa solo para un intervalo de tiempo muy prolongado; y cuando se considera una gran cantidad de errores de bit.

La probabilidad de error según las diferentes técnicas de modulación varía. Un factor clave al determinar la  $P_b$ , es que la modulación es proporcional a relación relativa de probabilidad de error de la señal de ruido ( $E_b/N_o$ ), donde  $E_b$  es la energía de un bit y la potencia de ruido  $N_o$  está en el rango de 1 Hz [11]. .

La probabilidad de error de símbolo en demodulación M-PSK viene dada por la siguiente expresión [11]:

$$P_s = 2Q \left( \sqrt{2 \log M * \left( \frac{E_b}{N_o} \right) * \sin^2 \frac{\pi}{M}} \right), \text{ para } M \geq 4 \quad (2.21)$$

Donde la función  $Q$  se puede expresar en términos de la función de error complementario [11]:

$$Q(x) = \frac{1}{2} * \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right), \text{ para } x \geq 0 \quad (2.22)$$

Por ende la probabilidad de error de es igual a [11]:

$$P_b = \frac{1}{\log_2 M} * P_s \quad (2.23)$$

## 2.8 Hipótesis

Partiendo de que la ciudad de Guayaquil, posee un clima tropical sabana y monzón, se tiene que el patrón de lluvia, presenta una gran variación tanto en espacio como en el tiempo. Por lo tanto, la hipótesis planteada es la siguiente: *“La Diversidad de Múltiples Sitios y de Tiempo, son técnicas ideales, que permiten mitigar la atenuación debida a la lluvia, ya que ambas técnicas se basan en el estudio de forma estadística (series temporales de atenuación) sobre el efecto que causan las fuertes lluvias en los sistemas de comunicaciones satelitales (a frecuencias superiores 10 GHz), en la ciudad de Guayaquil.”*

## CAPÍTULO 3

### 3. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL, PROCESAMIENTO DE LOS DATOS Y TÉCNICA DE LA TORMENTA SINTÉTICA SATELITAL (S-SST)

#### 3.1 Ubicación y descripción de los pluviómetros

En Marzo del 2016, cuatro pluviómetros (ver figura 3.1) cuyas coordenadas están descritas en la Tabla 3.1, fueron instalados a lo largo de una línea recta ideal para satisfacer las condiciones descrito en otro proyecto (que no está relacionado con este trabajo) en la ciudad de Guayaquil, Ecuador) [9].

ID Pluviómetros	Latitud (°N)	Longitud (°E)
ESPOL	-2.1469	-79.9629
Mapasingue	-2.1516	-79.9213
Kennedy	-2.1582	-79.8992
Durán	-2.1724	-79.8057

Tabla 3.1 Sitios de los Pluviómetros [9]

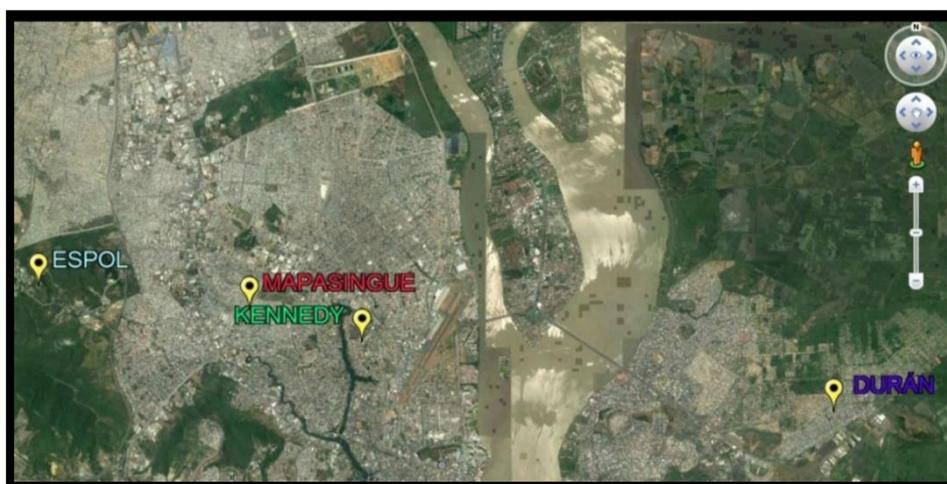


Figura 3.1 Pluviómetros ubicados en la ciudad de Guayaquil

Los pluviómetros se identificarán con el nombre de los sectores: ESPOL, Mapasingue, Kennedy y Durán (de este a oeste), respectivamente. La distancia entre cada pluviómetro están descrita en la Tabla 3.2.

ID Pluviómetros	Distancia (km)
ESPOL - Mapasingue	4.1
ESPOL – Kennedy	6.5
ESPOL – Durán	17
Mapasingue - Kennedy	2.4
Mapasingue - Durán	12.9
Kennedy - Durán	10.5

**Tabla 3.2 Distancia entre cada Pluviómetro**

Los cuatro pluviómetros utilizados en este experimento son de la marca Texas Electronics TR-525M (ver figura 3.2), específicamente del tipo cubo basculante. Recogen la lluvia por medio de una apertura relativamente grande, llamada colector (el diámetro del colector es de 24.5 cm). La precipitación cae en el colector, luego es canalizado en un dispositivo mecánico, que mide el incremento de acumulación de lluvia y provoca un cierre momentáneo de un interruptor. A medida que se colecta el agua, el cubo (capacidad de 0.1 mm) se llena hasta un punto determinado donde se vuelca. Esta acción, determina el comienzo de una nueva medición y vacía la cubeta, en la cual se envía un pulso a un registrador de datos, adjuntando la marca de tiempo en que ocurre el registro (la marca de tiempo se agrega al puso recibido con una resolución de 0.1 segundos) [2].

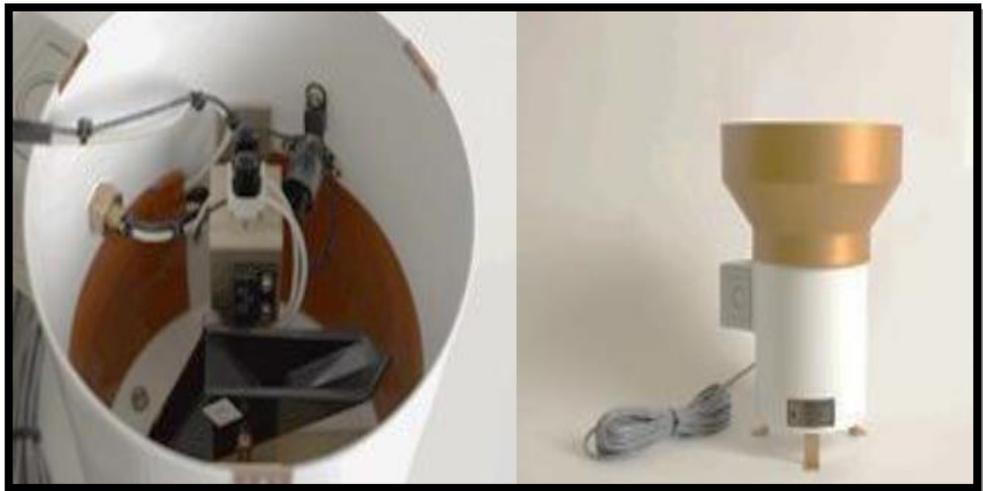


Figura 3.2 Pluviómetro de la marca Texas Electronics TR-525M [2]

La detección del pulso es realizado mediante un sensor, que está conectado al registrador de datos, en la cual permite el almacenamiento digital de la precipitación acumulada. Para la configuración de los pluviómetros y presentación de los datos grabados, se utiliza el software del dispositivo (EasyLog) y en la presentación se utiliza la pestaña de datos (bloc de notas) del almacenamiento o en documento de texto (ver figura 3.3) [2].

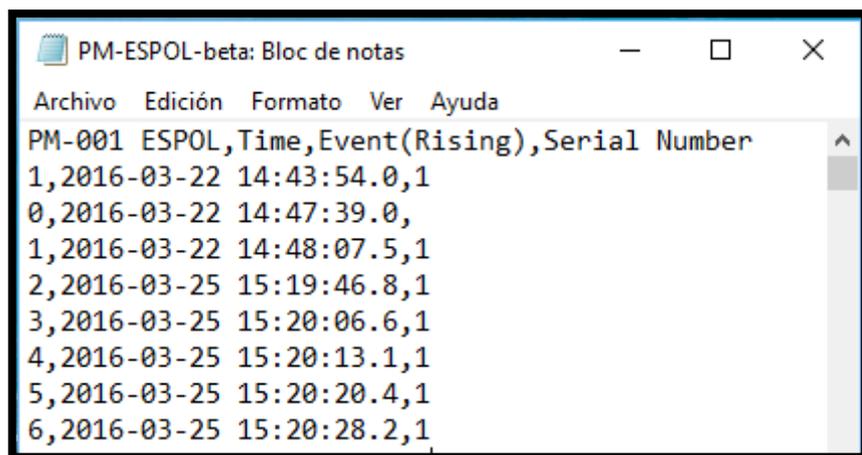


Figura 3.3 Pestaña de datos almacenados del pluviómetro ubicado en el sector ESPOL

Estas características ya mencionadas, permiten tener como parámetro la tasa de lluvia instantánea (medida en mm/h) en cada estación, con un alto grado de precisión, para los estudios de propagación (en esta caso la señales satelitales).

En la siguiente sección, se presentará el procedimiento aplicado en los datos de los pluviómetros, para obtener la serie temporal de lluvia. Cabe recalcar que el conjunto de datos es limitado, aunque puede adaptarse fácilmente a las simulaciones realizadas en este proyecto.

### **3.2 Series Temporales de Tasas de Lluvias de un minuto**

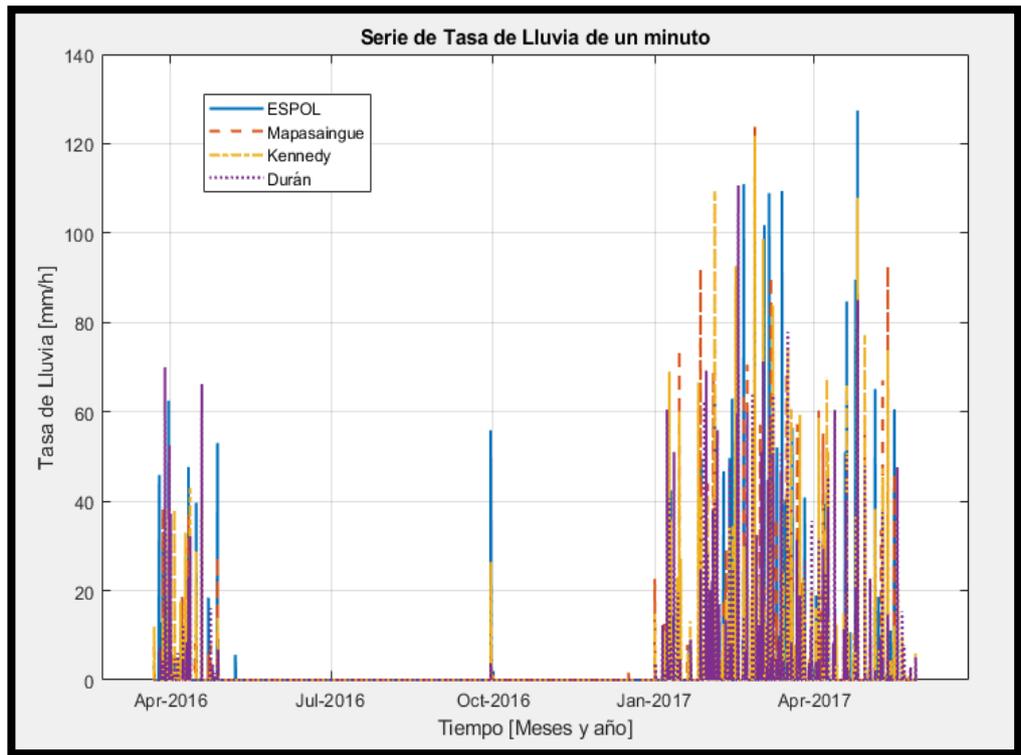
Desde la marca de tiempo conectada por el registrador de datos al pulso recibido, la tasa de lluvia “instantánea”  $R$  (mm/h), se puede obtener dividiendo la capacidad de la cubeta  $C$  (mm) por el tiempo de separación  $T$  (s), entre dos sucesos consecutivos [2], mediante la ecuación 3.1

$$R = 3600 * \frac{C}{T} \quad (3.1)$$

En este proyecto, se utiliza una serie temporal adquirida en la ciudad de Guayaquil, desde el 22 de Marzo del 2016 a las 12:00 am (hora local) hasta el 29 de Mayo del 2017 a las 12:00 pm (hora local) (periodo de 433 días), donde la resolución temporal obtenida es de una décima de segundo, que se promedia durante un minuto para disminuir la desviación estándar de las estimaciones y obtener la cantidad de datos deseados. Este conjunto de datos se ha procesado según los criterios del procedimiento denominado algoritmo “Original” [12]. El objetivo de este algoritmo es obtener la tasa de lluvia, agrupando los sucesos en eventos de lluvias. A continuación, se explica el procedimiento de agrupación de los sucesos:

- Un nuevo evento de lluvia inicia cuando ocurren dos sucesos siguientes dentro de un intervalo de tiempo menor a 1 hora: el primero de los dos sucesos (es decir el primer suceso del nuevo evento) se descarta.
- Cuando dos sucesos pertenecen al mismo evento, se asigna una tasa de lluvia de forma constante en el intervalo de tiempo delimitado, usando la ecuación 3.1, con C igual a 0.1 mm.
- si el intervalo de tiempo entre los dos sucesos es inferior a un 1 s (es decir, R es superior a 360 mm/h), entonces el segundo suceso se debe por un rebote dentro de la cubeta y por ende se lo descarta.
- promediando 600 muestras de intensidad de lluvia “instantánea” podemos obtener 1440 muestras en archivos diarios, muestreadas a razón de 1 muestra por minuto (de 00:00 a 23:59, hora local).

Una vez aplicado el algoritmo descrito anteriormente, obtuvimos las series de tiempo de lluvia de un minuto, en relación con las cuatros ubicaciones de los pluviómetros, como se muestra en figura 3.4.



**Figura 3.4 Tasas de lluvias de un minuto medida en ESPOL, Mapasaingue, Kennedy y Durán (desde el 22 de Marzo del 2016 hasta el 29 de Mayo del 2017)**

Del gráfico presentando, se puede observar que la temporada de lluvia creció (lluvias fuertes) de manera severa en el año 2017 (entre los meses de Enero y Mayo), a diferencia del año 2016 que la temporada de lluvia fue débil.

La Tabla 3.3 y Tabla 3.4, presentan las acumulaciones de lluvia por año y las acumulaciones de lluvia para cada sector, respectivamente.

Año	Precipitación (mm)
2016	45502.6
2017	161026.1

**Tabla 3.3 Muestra de Acumulaciones de lluvias por año (del 22 de Marzo del 2016 al 29 de Mayo del 2017) [2]**

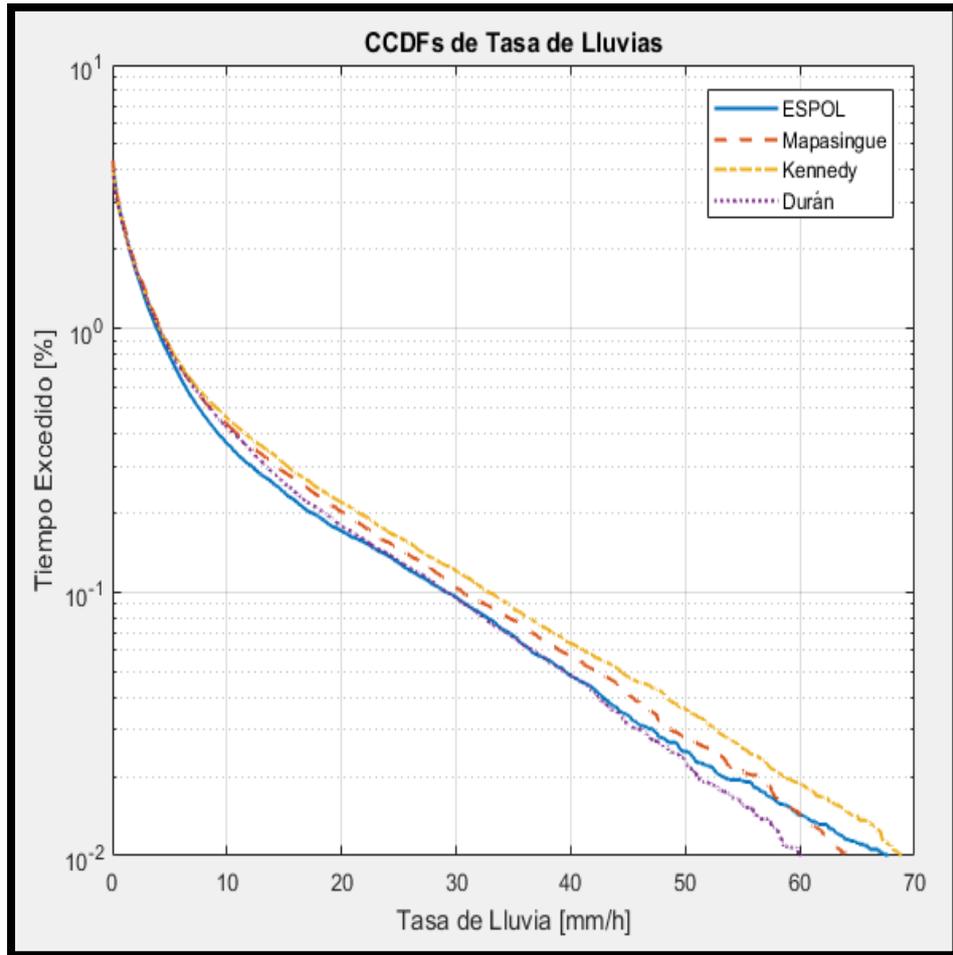
En la Tabla 3.3, muestra que la precipitación (acumulación de lluvia) en el año 2017 incremento en un 200% más, con respecto al año 2016) [2].

ID Pluviómetros	Precipitación (mm)	Evento de lluvias
ESPOL	1740.2	186
Mapasingue	1885.3	183
Kennedy	1937.6	191
Durán	1769	150

**Tabla 3.4 Acumulaciones de lluvias por ubicación (del 22 de Marzo del 2016 al 29 de Mayo del 2017) [2]**

Se puede analizar en la Tabla 3.4, que los sectores ESPOL y Kennedy obtuvieron mayores eventos de lluvias (cantidad que sobrepasa más de 185 eventos) , a diferencia de Mapasingue y Durán que presentaron menores eventos de lluvias, siendo el último sector (Durán) el menor de todos (150 eventos de lluvia).

Sin embargo, la cantidad de lluvia es más alta para los sectores Mapasingue y Kennedy, con respecto a los sectores ESPOL y Durán, que obtuvieron el 9% menos de acumulación de lluvia [2].



**Figura 3.5 Gráfica de CCDFs de Tasas de Lluvias de un minuto medida en ESPOL, Mapasingue, Kennedy y Durán (desde el 22 de Marzo del 2016 hasta el 29 de Mayo del 2017)**

Una vez obtenida las series de tiempo de lluvia en cada sector, se determinó las funciones de distribución acumulativa complementaria (CCDF), para indicar: cuál es la probabilidad de que la lluvia no exceda a un  $R_p$  (tasa de lluvia a una probabilidad dada). En la gráfica de distribución (ver figura 3.5), se traza el porcentaje de tiempo (es decir, la probabilidad multiplicada por un factor de 100%) de exceder en el eje de las ordenadas y la acumulación de tasa de lluvias en el eje de las abscisas. Además, se puede apreciar que ESPOL presenta el menor número de lluvias ligeras y reguladas, a diferencia de los otros 3 sectores, donde Mapasingue experimenta una mayor cantidad de lluvias, ya que su CCDF es muy superior a las demás. Sin embargo, en los sectores

ESPOL, Mapasingue y Kennedy presentan tasas de lluvias más intensas en el rango de 65 a 70 mm/h (a una probabilidad 0.01 %).

### **3.3 Aplicación de la Técnica de la Tormenta Sintética Satelital**

Para el desarrollo de la Técnica de la Tormenta Satelital se asume un patrón de lluvia que se mueve sobre un determinado pluviómetro debido a la advección del patrón espacial de lluvia. Luego se estima la velocidad de la tormenta ( $V_s$ ), dando como resultado la transformación de tiempo a espacio [2]. La estimación de la velocidad del patrón de lluvia que presenta una nube, se realiza mediante el uso de sondas de radio, por ende la velocidad (velocidad de viento registrada a 700 mbar de altitud) en este proyecto es de 7.8 m/s, donde esta velocidad fue encontrada en la investigación *“Modelamiento de intensidad de lluvia utilizando un sistema de radio en la banda no licenciada U-NII: un experimento piloto en Guayaquil”*, mediante el uso de sondas de radio.

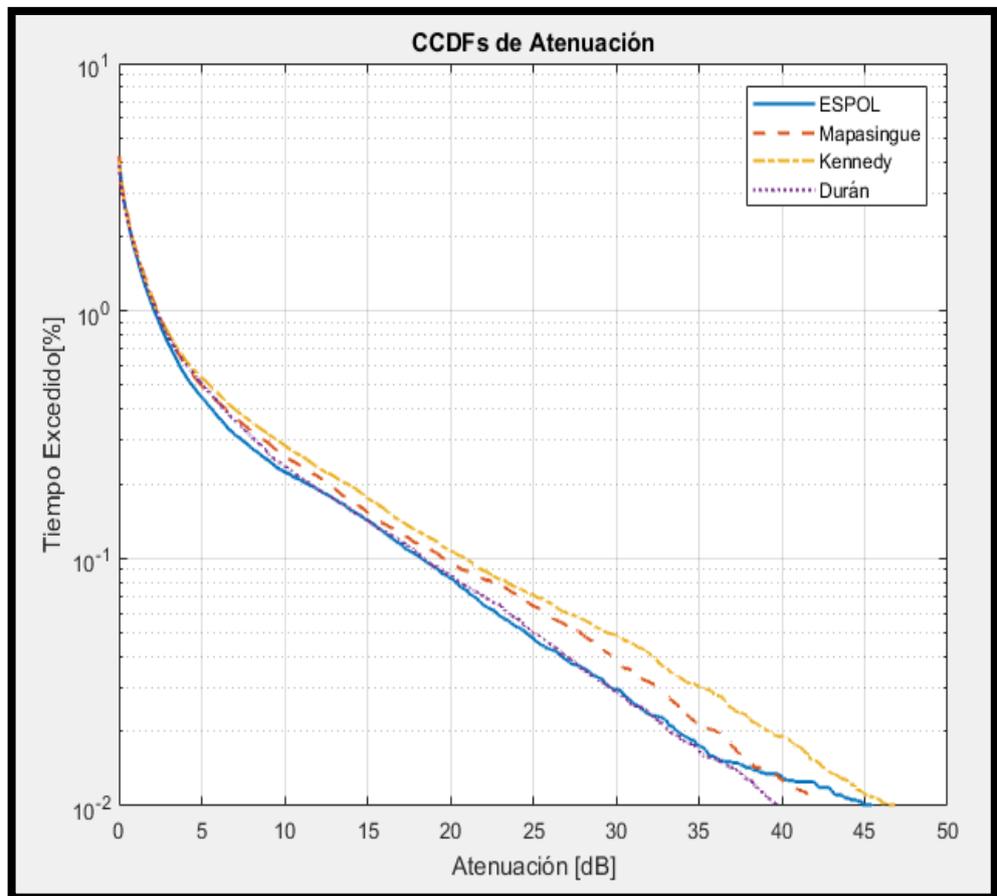
Además de las series temporales de lluvias medidas, es interesante apreciar que la técnica S-SST posee la capacidad de preservar las peculiaridades climáticas al tiempo que realiza la transformación de la serie temporal de lluvia en series de tiempo de atenuación de lluvia.

Este modelo dependerá de varios parámetros (ver Tabla 3.5), a parte de la serie temporal de lluvia de un minuto medida, tales como: latitud, longitud, velocidad de advección de la tormenta, altitud de la estación sobre el nivel medio del mar, ángulo de elevación de la inclinación del enlace, polarización de la onda electromagnética, frecuencia del enlace y altura de lluvia, así como la profundidad de la capa de fusión.

<b>ID Pluviómetros / Parámetros de Entrada</b>	<b>ESPOL</b>	<b>Mapasingue</b>	<b>Kennedy</b>	<b>Durán</b>
<b>Serie Temporales de lluvia de un minuto</b>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
<b>Velocidad de advección de la tormenta</b>	7.8 m / s			
<b>Latitud / Longitud</b>	-2.1469 °N / -79.9629°E	-2.1516 °N / -79.9213°E	-2.1582 °N / -79.8992°E	-2.1724 °N / -79.8057°E
<b>Altura medida del nivel del mar</b>	45 m	94 m	20 m	25 m
<b>Frecuencia</b>	20 GHz	20 GHz	20 GHz	20 GHz
<b>Ángulo de polarización</b>	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
<b>Ángulo de Elevación</b>	67.7°	67.7°	67.7°	67.7°
<b>Altura de Lluvia</b>	5 Km	5 Km	5 Km	5 Km
<b>Profundidad de la capa de fusión</b>	500 m	500 m	500 m	500 m

**Tabla 3.5 Parámetros de entrada del modelo S-SST para ESPOL, Mapasingue, Kennedy y Durán**

En este trabajo asumimos que las estaciones terrenas ubicadas en Guayaquil ( $\Phi = 2.2^\circ$ ), apuntan al mismo satélite geoestacionario Amazonas 2, at  $61^\circ$  W. Por ende, el modelo S-SST, puede aplicarse directamente a todas las series de tiempo de lluvia [9]. En la figura 3.6, se puede observar la utilización de la ecuación 2.7; donde cada estación terrena se obtiene una CCDF de atenuación para cada sitio en específico, que supera la atenuación a una probabilidad dada.



**Figura 3.6 Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de  $67.7^\circ$ , para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil**

Las curvas (ver figura 3.6) describen la estadística de atenuación de lluvias de un único enlace satelital de datos recolectados durante un año aproximadamente, donde  $A_{o,loc}(p)$  (eje de las abscisas), es el nivel de atenuación (dB) que se excede para un nivel de probabilidad ( $p$ ) específico (en este caso, ESPOL, Mapasingue, Kennedy y Durán). Los límites de probabilidad (el eje de las ordenadas) están entre 0.01% y el 4%, debido a que se obtuvo 62 muestras recolectadas de tasa de lluvias [2], por ende dicha cantidad fue suficiente para que las curvas (CCDF de cada estación terrena) representen un comportamiento aproximadamente uniforme por cada atenuación de lluvia correspondiente.

Además, se puede observar que la estación que presenta una mayor cantidad de atenuación es el pluviómetro ubicado en la estación Kennedy (ver figura 3.6), a diferencia de los otros 3 sectores (ESPOL, Mapasingue y Durán), donde ESPOL experimenta una menor cantidad de atenuación, ya que su CCDF es muy inferior al rango de probabilidad de 0.01% al 4%. Sin embargo, el pluviómetro ubicado en Durán tiene menor atenuación llegando a un valor de 40 dB (a una probabilidad de 0.01%), diferente de ESPOL y Kennedy, que sobrepasan los 45 dB de atenuación a la misma probabilidad del 0.01 %.

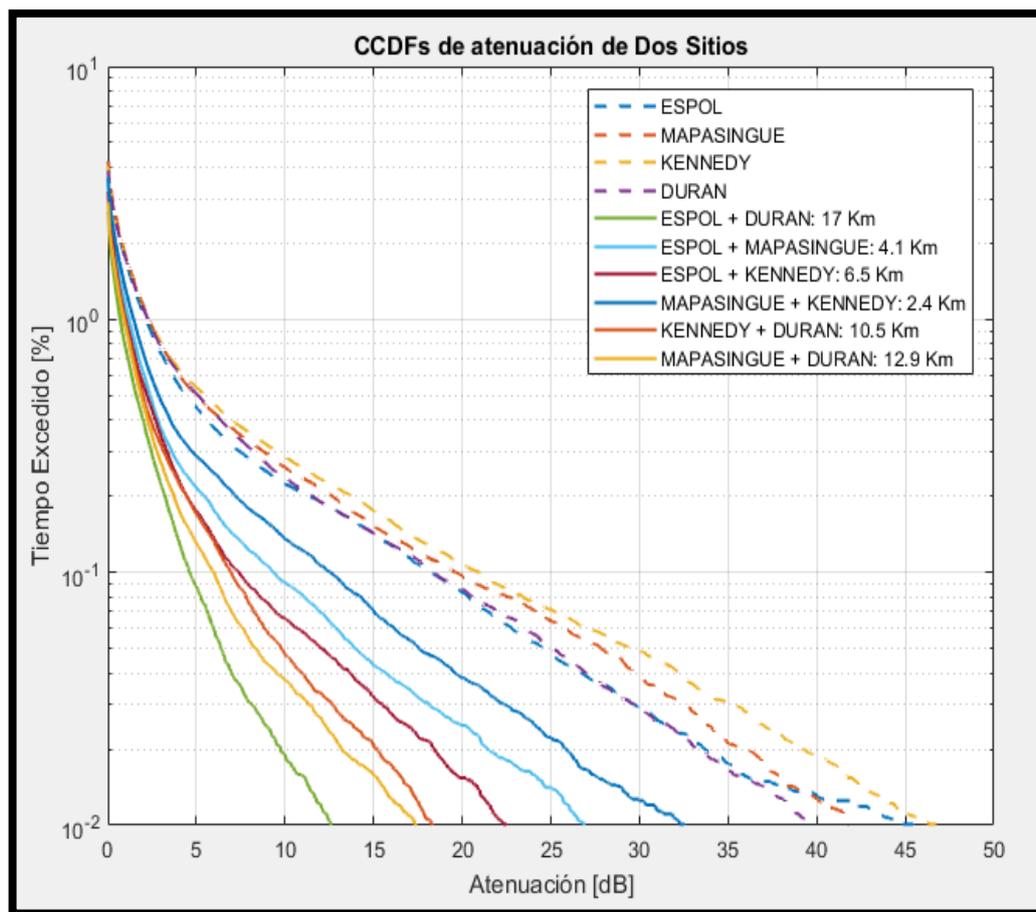
## CAPÍTULO 4

### 4. SIMULACIONES: TÉCNICA DE DIVERSIDAD DE MÚLTIPLES SITIOS; SNR Y BER APLICANDO LAS TÉCNICAS DE DIVERSIDAD DE MÚLTIPLES SITIOS Y DE TIEMPO

#### 4.1 Resultados de la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios

Para evaluar el rendimiento de los sistemas de Diversidad de Múltiples Sitios, se realizaron las combinaciones de: dos, tres y cuatro estaciones terrenas (ubicación de los pluviómetros), respectivamente. Primero se comenzó con un sistema compuesto de dos estaciones; teniendo como resultado 6 parejas posibles (ver figura 4.1). Luego se realizó un sistema compuesto de tres estaciones; teniendo como resultado 3 parejas posibles (ver figura 4.2). Y finalmente, se realizó un sistema compuesto de cuatro estaciones; teniendo como resultado una sola pareja (ver figura 4.3).

En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3, se indica las curvas CCDFs individuales y conjuntas (es decir, las curvas muestran el nivel de atenuación (dB) que se excede conjuntamente para un nivel de probabilidad  $p$  dado, considerando varios enlaces simultáneamente) [9] de las combinaciones de dos, tres y cuatro estaciones terrenas con sus respectivas distancias, obteniendo un total de 6, 3 y 1 curvas (parejas), respectivamente.

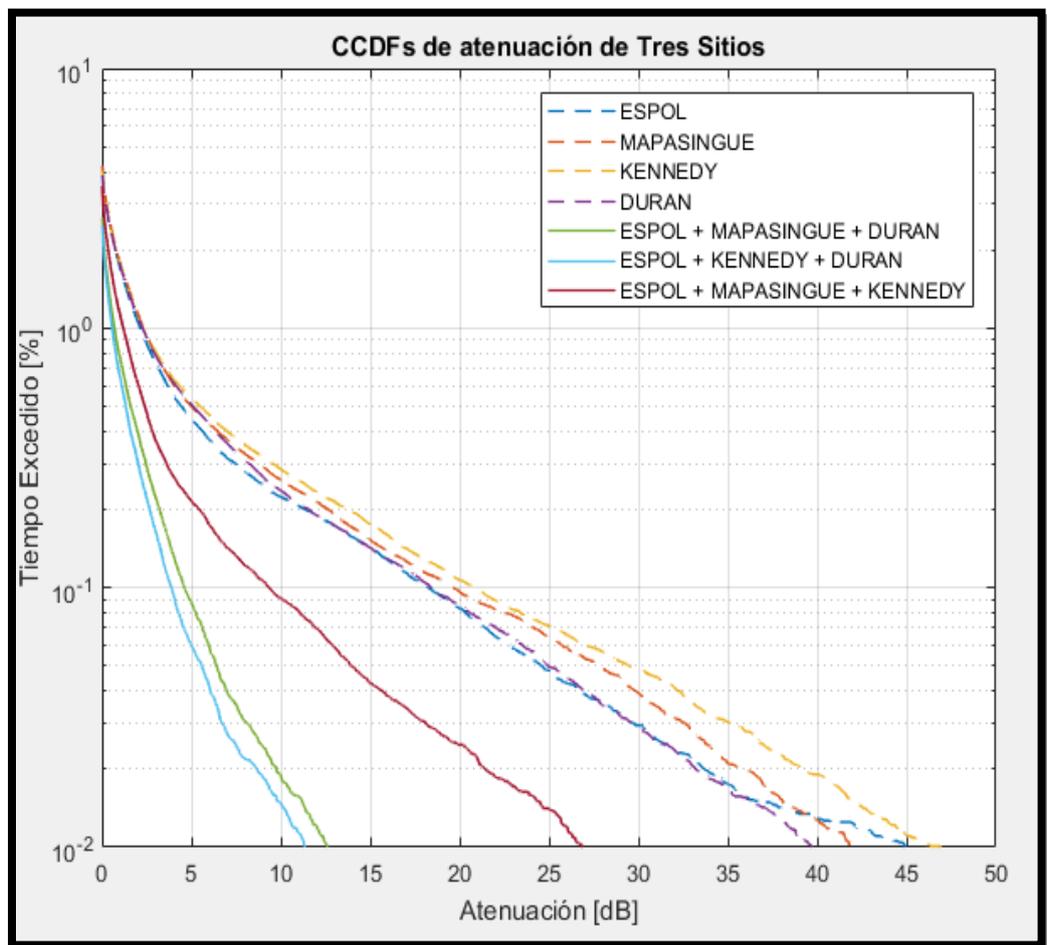


**Figura 4.1 CCDFs de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de 67.7°, para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil (tomando la combinación de dos estaciones terrenas)**

Al aplicar la Técnica de Diversidad (realizando la combinación de dos sitios) (ver figura 4.1), la mitigación del efecto de atenuación debido a la lluvia se produjo eficazmente. Todas las parejas (6 parejas), obtuvieron niveles de atenuación inferiores a las curvas originales (curvas segmentadas) obtenidas al aplicar la Técnica S-SST. A una probabilidad de 0.01%, la combinación ESPOL + Durán obtuvo una atenuación de lluvia aproximadamente de 12 dB, la combinación Mapasingue + Durán obtuvo aproximadamente una atenuación de 16 dB, Kennedy + Durán obtuvo aproximadamente una atenuación de 17 dB, ESPOL + Kennedy obtuvo aproximadamente una atenuación de 23 dB y Mapasingue +

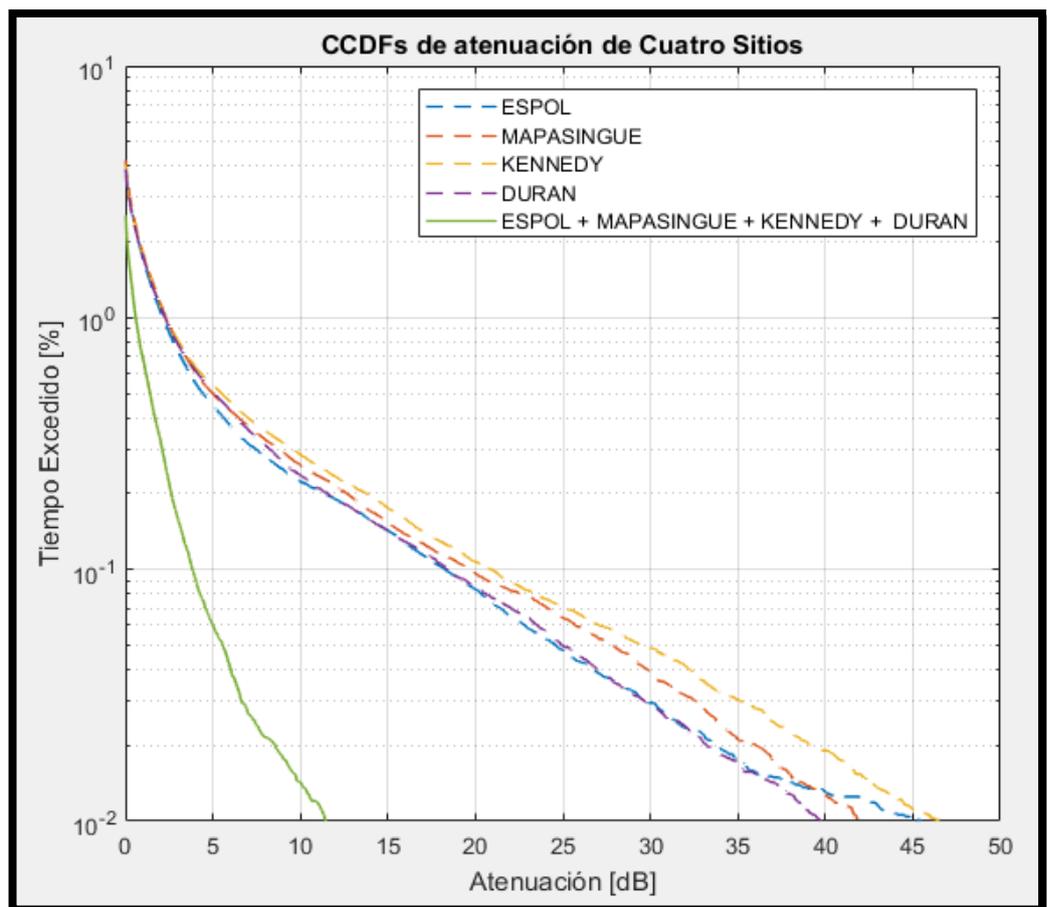
Kennedy obtuvo aproximadamente una atenuación de 33 dB, respectivamente.

Se puede observar (ver figura 4.1), que cuando la estación de Durán está incluida (curvas verde, anaranjada y roja); el sistema experimenta los niveles de atenuación más bajo, esto se debe a que la estación está lo suficientemente alejada de las otras estaciones terrenas, para beneficiarse de una mayor descorrelación de la tasa de lluvia en los sitios.



**Figura 4.2 CCDFs de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de 67.7°, para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil (tomando la combinación de tres estaciones terrenas)**

Al aplicar la Técnica de Diversidad (realizando la combinación de tres sitios) (ver figura 4.2), la mitigación del efecto de atenuación de lluvia se produjo de manera muy similar a la combinación de dos sitios. Se puede observar, que cuando la estación de Durán está incluida (curvas celeste y verde); el sistema experimenta los niveles de atenuación más bajo. A una probabilidad de 0.01%, el nivel de atenuación es de aproximadamente de 11 dB para ESPOL + Kennedy + Durán y de 12 dB para ESPOL + Mapasingue + Durán, respectivamente. A diferencia de ESPOL + Mapasingue + Kennedy, que obtuvo una atenuación aproximadamente de 27 dB al mismo nivel de probabilidad de 0.01%, donde su rendimiento fue el peor de todos, comparado con la combinación de dos sitios: Kennedy + Durán (ver figura 4.1).



**Figura 4.3 CCDFs de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de 67.7°, para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil (tomando la combinación de cuatro estaciones terrenas)**

Las mismas consideraciones se aplican al incluir la cuarta estación (ver figura 4.3). Se puede observar que la curva de color verde (combinación de las 4 estaciones) tuvo el mismo rendimiento de mitigación que las curvas ESPOL + Durán (ver figura 4.1) y ESPOL+ Kennedy + Durán (ver figura 4.2), obteniendo una atenuación de 11 dB a una probabilidad del 0.01%.

El rendimiento de la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios se puede cuantificar a través de la ganancia de potencia de diversidad. Por ende para determinar dicho rendimiento se aplica la ecuación 2.11. En las figuras 4.4, 4.5 y 4.6, se muestra las gráficas de la ganancia (G) de cada diversidad, como una función de la atenuación de lluvia de un solo sitio (tomando como referencia, el pluviómetro ubicado en la estación ESPOL) denominado  $A_{0,loc}$  (este valor se lo gráfica en el eje de las ordenadas). Por lo tanto, estas curvas representa la cantidad de atenuación de lluvia mitigada en la estación ESPOL con sus parejas (combinaciones de 2, 3 y 4 estaciones) correspondientes.

En la figura 4.4, se puede observar que la gráfica de mayor nivel ganancia de diversidad por atenuación, es la combinación ESPOL + Durán (gráfica de color azul), a diferencia de ESPOL + Mapasingue (gráfica de color rojo) siendo la menor de todas. Esto se debe a que ESPOL + Durán están lo suficientemente separadas entre sí (17 km), con respecto a ESPOL + Mapasingue que están distanciadas a 4.1 km.

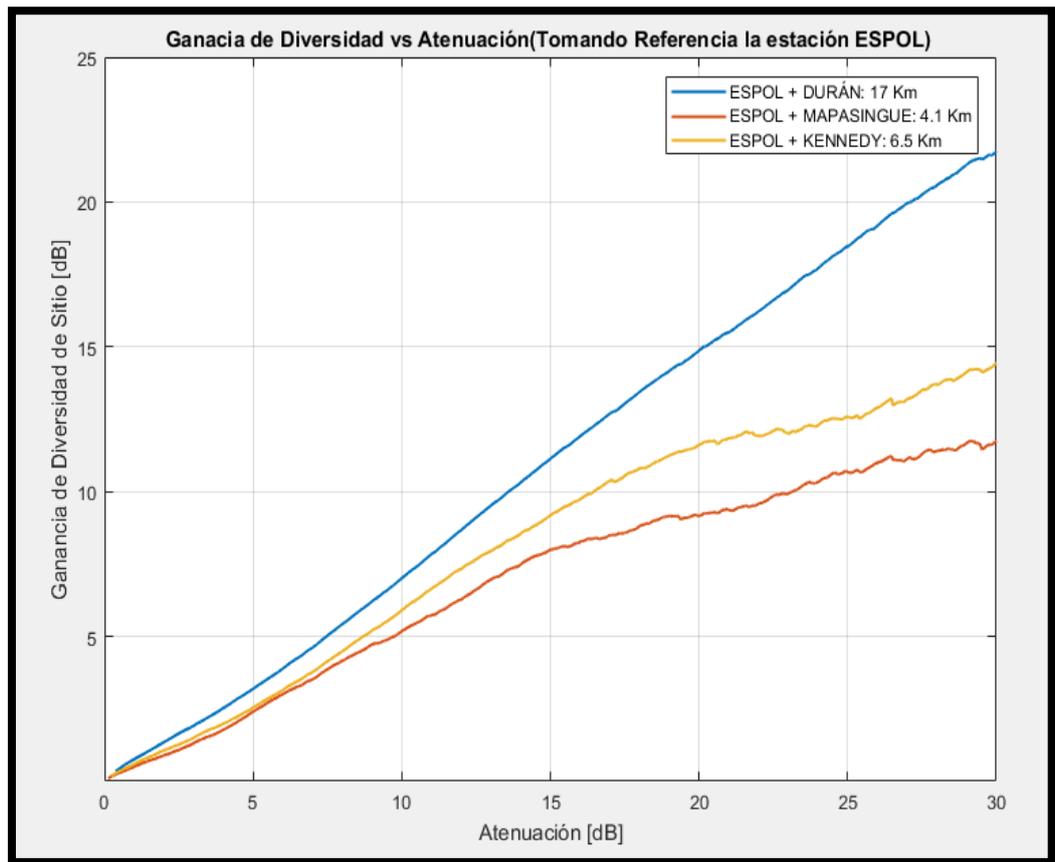
Para una ganancia de diversidad de  $G = 10$  dB, la atenuación en cada combinación de dos sitios, fue la siguiente:

$$A_{2,Espol+Durán} = 3.625 \text{ dB};$$

$$A_{2,Espol+Kennedy} = 6.475 \text{ dB};$$

$$A_{2,Espol+Mapasingue} = 13.175 \text{ dB}$$

Cabe indicar que estos valores no se aprecian muy bien en la figura 4.4, por lo cual fueron encontrados en los arreglos de atenuación (vectores de una sola dimensión correspondiente a cada combinación de dos sitios) generados por el software MatlabR2017b.



**Figura 4.4** Diversidad de Ganancia de Dos Sitios  $G$  en función de la atenuación de lluvia (estación ESPOL) a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de 67.7°

En la figura 4.5, se puede observar que la gráfica de mayor nivel ganancia de diversidad por atenuación es la combinación ESPOL + Kennedy + Durán (gráfica de color rojo), a diferencia de la combinación de ESPOL + Mapasingue + Kennedy (gráfica de color anaranjado) siendo la menor de todas.

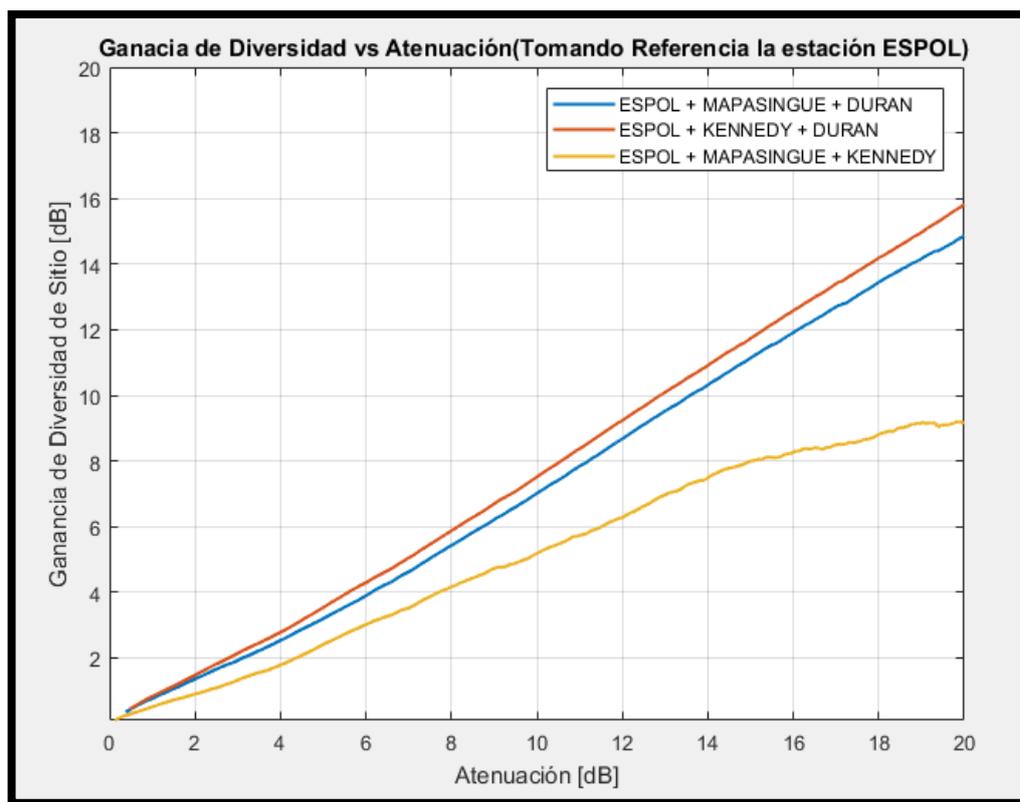


Figura 4.5 Diversidad de Ganancia de Tres Sitios  $G$  en función de la atenuación de lluvia (estación ESPOL) a una frecuencia de operación de  $20\text{ GHz}$  y ángulo de elevación de  $67.7^\circ$

Para una ganancia de diversidad de  $G = 10\text{ dB}$ , la atenuación en cada combinación de tres sitios, fue la siguiente:

$$A_{3, \text{Espol} + \text{Kennedy} + \text{Durán}} = 2.875\text{ dB};$$

$$A_{3, \text{Espol} + \text{Mapasingue} + \text{Durán}} = 3.625\text{ dB};$$

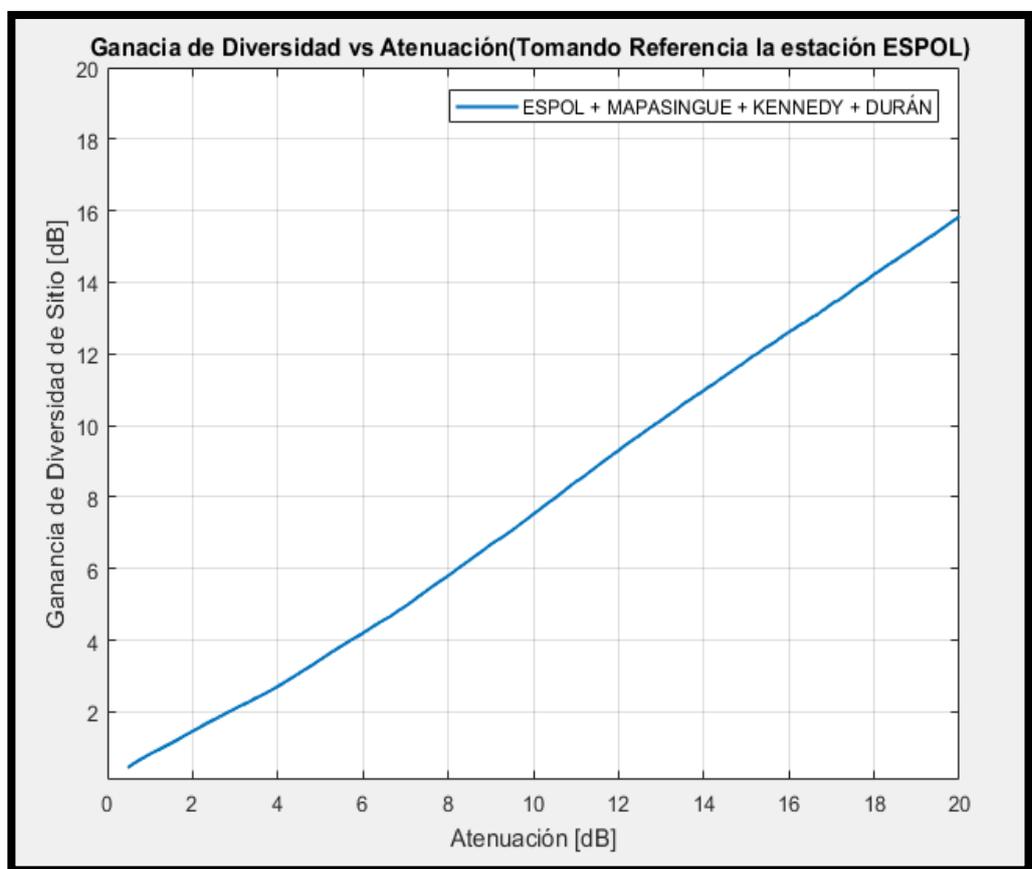
$$A_{3, \text{Espol} + \text{Mapasingue} + \text{Kennedy}} = 13.175\text{ dB}$$

Cabe indicar que estos valores no se aprecian muy bien en la figura 4.5, pero fueron encontrados en los arreglos de atenuación (vectores de una sola dimensión correspondiente a cada combinación de tres sitios) generados por el software MatlabR2017b.

En la figura 4.6, para una ganancia de diversidad de  $G = 10 \text{ dB}$ , la atenuación en la combinación de cuatro sitios, fue la siguiente:

$$A_{4,\text{Espol}+\text{Mapasingue}+\text{Kennedy}+\text{Durán}} = 2.825 \text{ dB, respectivamente.}$$

Cabe indicar que este valor no se aprecia muy bien en la figura 4.6, pero fue encontrado en el arreglo de atenuación (vector de una sola dimensión correspondiente a la combinación de cuatro sitios) generados por el software MatlabR2017b.



**Figura 4.6 Diversidad de Ganancia de Cuatro Sitios  $G$  en función de la atenuación de lluvia (estación ESPOL) a una frecuencia de operación de  $20 \text{ GHz}$  y ángulo de elevación de  $67.7^\circ$**

Se pudo comprobar que las combinaciones ESPOL + Kennedy + Durán y la combinación de 4 sitios, se obtuvo aproximadamente la misma grafica de atenuación. De igual manera, en la combinación ESPOL + Durán; y ESPOL + Mapasingue + Durán, se obtuvo aproximadamente el mismo rendimiento de mitigación. Como resultado, al añadir la estación Mapasingue en la combinación de dos sitios y tres sitios, no afectó prácticamente en nada en la mitigación de la atenuación de lluvia.

Al analizar el rendimiento entre las combinaciones ESPOL + Durán y ESPOL + Kennedy + Durán, se puede obtener la ganancia de diversidad relativa, dada por la siguiente expresión [9]:

$$g(p) = \frac{G_A(p) - G_B(p)}{G_B(p)} * 100\% \quad (4.1)$$

Para una ganancia de diversidad de  $G = 10 \text{ dB}$ , donde  $A$  representa la combinación ESPOL + Durán (ver figura 4.4) y  $B$  representa ESPOL + Kennedy + Durán (ver figura 4.5), se obtuvo una ganancia de diversidad relativa que excede del 28,32%, para cada nivel de probabilidad dado.

## 4.2 Resultados de la Simulación de la SNR: Un día lluvioso

Para estudiar a profundidad la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios y de Tiempo (la técnica de tiempo fue implementada en el proyecto “*Performance of Equatorial Time Diversity Systems Evaluated from Rain Rate Time Series*” [2]), se realizó la simulación de un caso real (comunicación a tiempo real) de un día muy lluvioso (03 de Febrero del 2017) en el sector ESPOL y Durán.

En la figura 4.7, se muestra la tasa de lluvia de cada sector (ubicación de los pluviómetros en ESPOL y Durán), en la ciudad de Guayaquil.

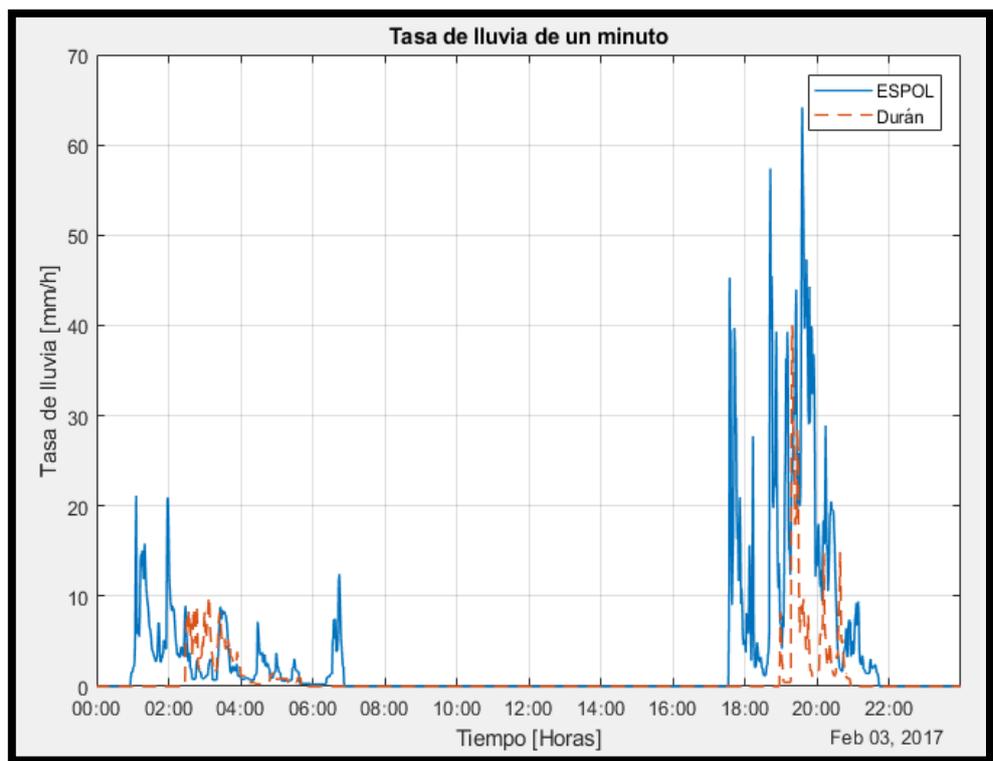


Figura 4.7 Tasa de lluvia de un minuto medida en ESPOL y Durán (el 03 de Febrero del 2017)

A partir de la figura 4.7, se puede determinar que en el sector ESPOL (gráfica de color azul), presenta la mayor tasa de lluvia (intensidad lluvia), a diferencia del sector Durán (gráfica de color anaranjado). Además, se observa que entre las 0:00 am hasta un poco más de las 7:00 am, la intensidad de lluvia instantánea entre ese lapso de tiempo, llega hasta un poco más de los 20 mm/h en el sector ESPOL, considerándolo como una lluvia fuerte moderada. Entre las 17:00 pm hasta 20:00 pm, la intensidad de lluvia instantánea llega hasta un poco más de los 50 mm/h en el sector ESPOL, considerándolo como una lluvia muy fuerte. Y por último, entre las 20:00 pm a 22:00 pm, la intensidad de lluvia instantánea llega un poco más de los 60 mm/h en el sector ESPOL, considerándolo como una lluvia torrencial. Por todo este análisis, al sector ESPOL se lo tomará como referencia, para evaluar el desempeño y rendimiento de las Técnicas de Diversidad de Múltiples Sitios y de Tiempo.

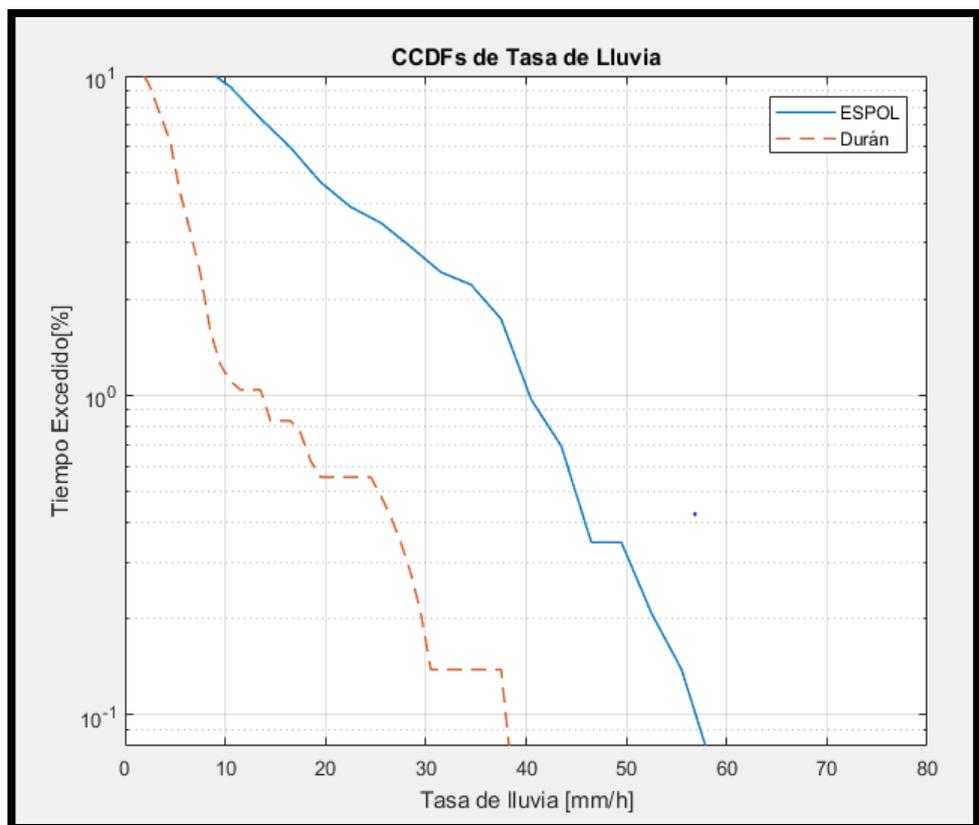
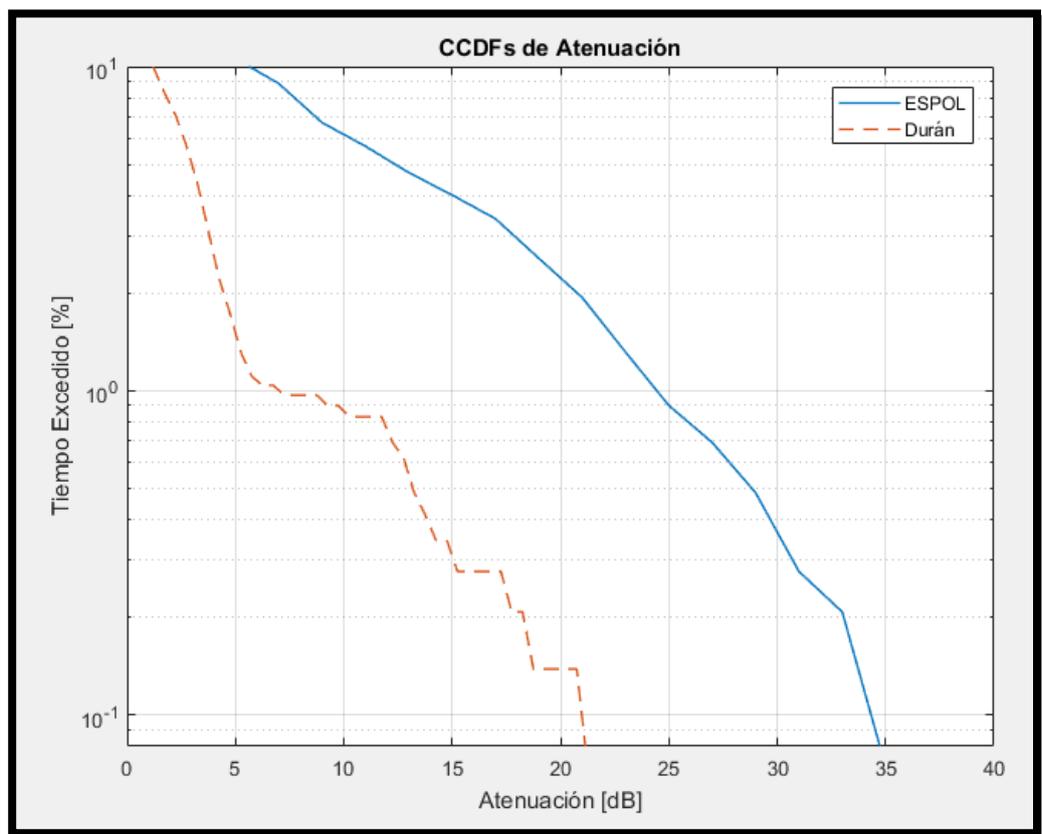


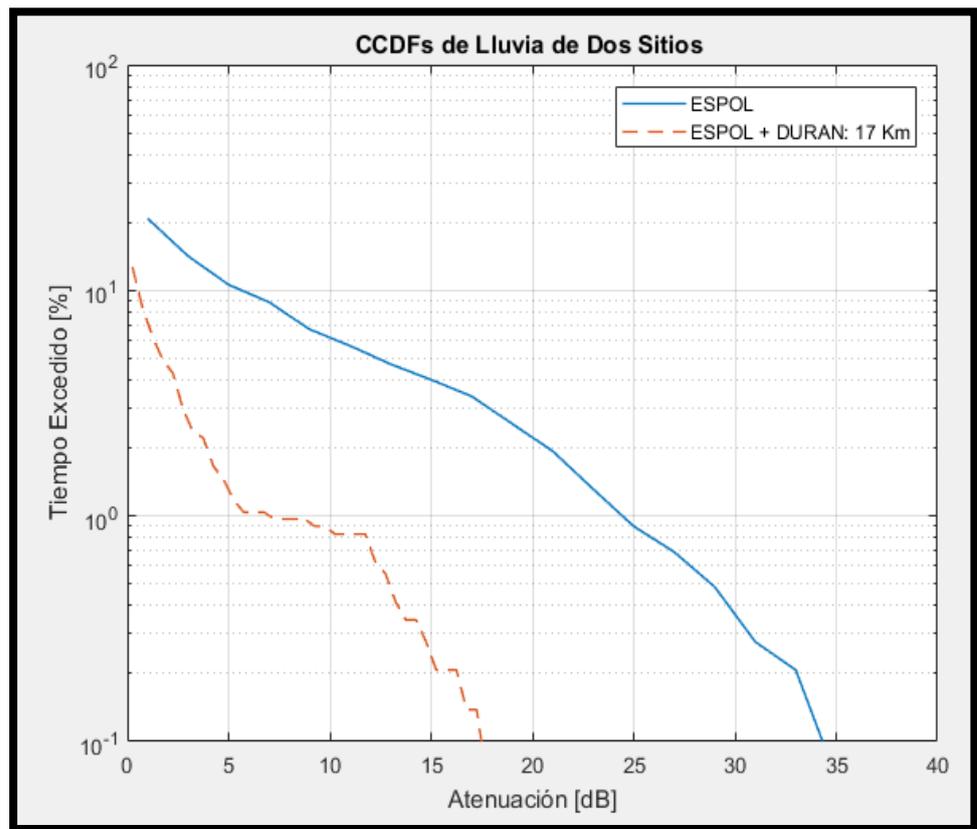
Figura 4.8 CCDF de tasa de lluvia de un minuto medida en ESPOL y Durán (el 03 de Febrero del 2017)

En la figura 4.8, se traza la gráfica de Tasa de lluvia (mm/h) vs Tiempo Excedido (%), a simple vista el sector ESPOL , presenta el mayor número de lluvias, contrario al sector Durán que experimenta una menor cantidad de lluvias. Además, en el sector ESPOL presentan una tasa de lluvia cerca de 60 mm/h (a una probabilidad mayor a 0.01%), mientras el sector Durán presenta una tasa de lluvia cerca de 40 mm/h (a una probabilidad mayor a 0.1%).



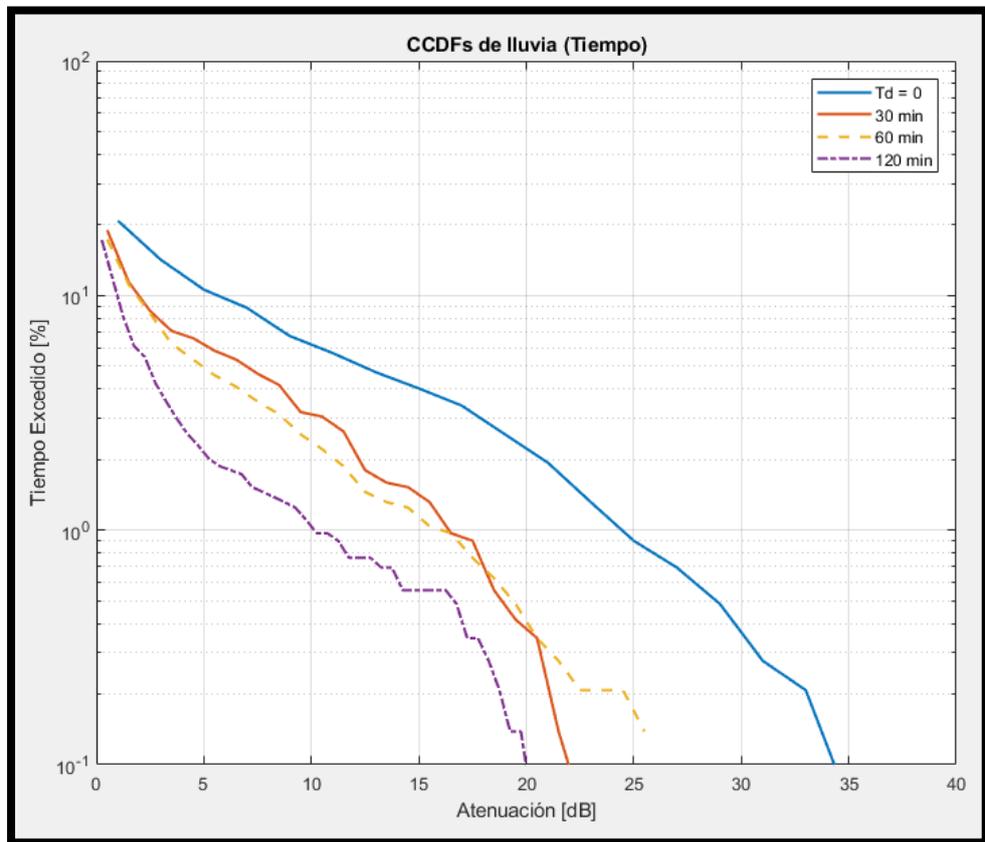
**Figura 4.9 Atenuaciones obtenidas (03 de Febrero del 2017) luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de 67.7°, para las estaciones terrenas (ESPOL y Durán) ubicadas en la ciudad de Guayaquil**

En la figura 4.9, se traza la gráfica de Atenuación (dB) vs Tiempo excedido (%). Se puede observar, que la estación que presenta mayor cantidad de atenuación es el pluviómetro ubicado ESPOL acercándose a un valor de 35 dB a una probabilidad del 0.1%, a diferencia de Durán que tiene menor atenuación sobrepasando los 20 dB a una probabilidad del 0.1%, respectivamente.



**Figura 4.10 CCDFs de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de  $67.7^\circ$ , para las estaciones terrenas ubicadas en la ciudad de Guayaquil (tomando la combinación de dos estaciones terrenas ESPOL + Durán)**

Al aplicar la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios (realizando la combinación de dos sitios, ver figura 4.10), la mitigación del efecto de atenuación debido a la lluvia, se produjo de manera muy efectiva. La combinación ESPOL + Durán, obtuvo una atenuación de 17 dB a una probabilidad del 0.1%, a diferencia con la combinación de un solo sitio que fue cercana a 35 dB (ver figura 4.9), respectivamente. Por lo tanto, se encontró que la atenuación debida a la lluvia se redujo en un 52%, al aplicar la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios a un probabilidad del 0.1%.



**Figura 4.11 CCDF de Atenuaciones obtenidas luego de aplicar el modelo S-SST en un enlace satelital operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de  $67.7^\circ$ , para la estación terrena ESPOL (tomando la combinación del tiempo de retardo de 30, 60 y 120 minutos)**

En la figura 4.11, se muestra la atenuación debida lluvia, una vez aplicada la Técnica de Diversidad de Tiempo, tomando como referencia el sector ESPOL. Se tomaron los retardos de tiempo ( $\Delta t$ ) de 30, 60 y 120 minutos, respectivamente. La mejor curva de mitigación de atenuación debido a la lluvia, es el retardo de  $\Delta t = 120 \text{ minutos}$ , teniendo una atenuación de 20 dB a una probabilidad de 0.1%, a diferencias de la curva de  $\Delta t = 30 \text{ minutos}$  que obtuvo una atenuación de 25 dB y la curva de  $\Delta t = 60 \text{ minutos}$  obtuvo una atenuación de 23 dB aproximadamente, a la misma probabilidad de 0.1%. Con el retardo  $\Delta t = 120 \text{ minutos}$ , la atenuación causada por la lluvia se redujo en un 43%.

Comparando las dos Técnicas de Diversidad, la que más efectiva fue la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios, siendo un 9% más efectiva que la Diversidad de Tiempo. Cabe recalcar, que para una comunicación inalámbrica en tiempo real, el retardo de  $\Delta t = 120 \text{ minutos}$  no es factible en una retransmisión de la información.

Una vez implementada la Técnica de Múltiples Sitios y de Tiempo, se procedió a simular las gráficas de la SNR vs Tiempo y el BER vs SNR, en cada uno de los escenarios correspondiente. Para determinar dichas gráficas, se estableció un presupuesto de enlace satelital utilizando la ecuación 2.16, obteniendo la potencia recibida con la ayuda de la ecuación 2.15.

En la siguiente Tabla 4.1, se muestra los valores utilizados en el presupuesto de enlace satelital, tales como: potencia transmitida, ganancia del transmisor, distancia entre el satélite y la estación terrena, frecuencia de operación, pérdida de espacio libre (se utiliza la ecuación 2.17), pérdida del alimentador de recepción, pérdida de desalineación de la antena y ganancia de recepción.

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Potencia Transmitida (dBW)	80
Ganancia del Transmisor (dB)	60
Distancia entre el satélite y la estación terrena (km)	36736
Frecuencia de Operación (GHz)	20
Pérdida de Espacio libre (dB)	352.60
Pérdida del alimentador de recepción (dB)	1
Pérdida de desalineación de la antena (dB)	0.5
Pérdida de desajuste de polarización (dB)	0.5
Ganancia de Recepción (dB)	60

**Tabla 4.1 Parámetros de entrada para determinar la potencia de la señal recibida.**

En la determinación de la SNR y la BER, se va a utilizar la Modulación por Desplazamiento Cuadrafásica (QPSK), modulación que varía la fase (medido en grados o radianes) de una onda portadora, una onda de amplitud y una frecuencia fija, por medio de la utilización de una señal digital, de modo que permita llevar una señal en las transmisiones de radio o televisión.

El ancho de banda de la modulación QPSK, viene siendo igual a la velocidad de transmisión  $f_b$  original (medida bits por segundo) dividida para dos, y esta expresada de la siguiente manera [11]:

$$B_N = \frac{f_b}{2} \quad (4.2)$$

Esto se debe, a que la modulación QPSK sufre cuatro cambios de fase (0, 90, 180 y 270 grados) que representa datos digitales de forma única, por la cual dos dígitos binarios, pueden ser transmitidos dentro de cada periodo de tiempo [11].

En este proyecto, se va a utilizar una velocidad de transmisión de  $f_b = 10$  Kbps, por lo tanto el ancho de banda calculado es  $B_N = 5$  KHz, respectivamente.

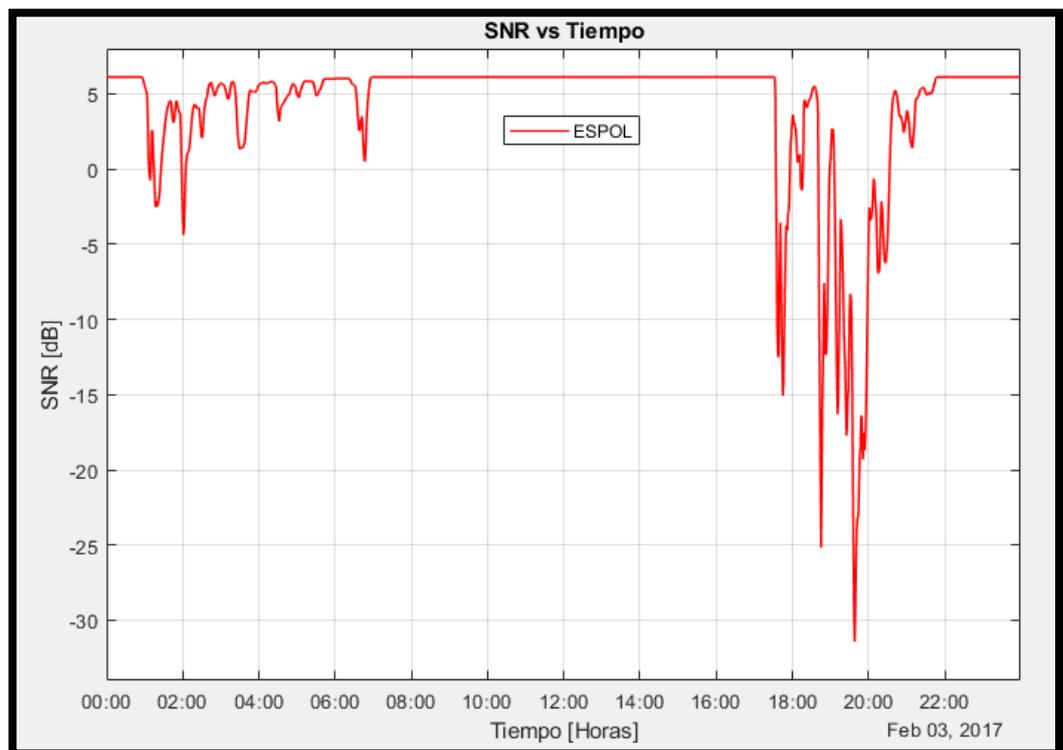
Una vez determinada el ancho de banda, se procede a calcular la potencia del ruido utilizando la función:  $NPOWER = noisepow(NBW, NF, REFTEMP)$  [13] de las funciones de MatlabR2017b, donde esta función devuelve la potencia de ruido,  $NPOWER$ , en Watts para un receptor. Este receptor tiene un ancho de banda,  $NBW$  (medido en Hz), una figura de ruido  $NF$  (medida en dB) y una temperatura de referencia  $REFTEMP$  (medido en grados K) [13]. En la Tabla 4.2, se muestra los valores para el calcular la potencia del ruido en (dB):

Parámetros	Valores
Figura de Ruido (dB)	0.9
Ancho de banda (KHz)	5
Temperatura de referencia (K)	100

**Tabla 4.2 Parámetros de entrada para calcular la potencia del ruido**

El valor obtenido de potencia de ruido es de:  $P_n = -170.7095 \text{ dB}$

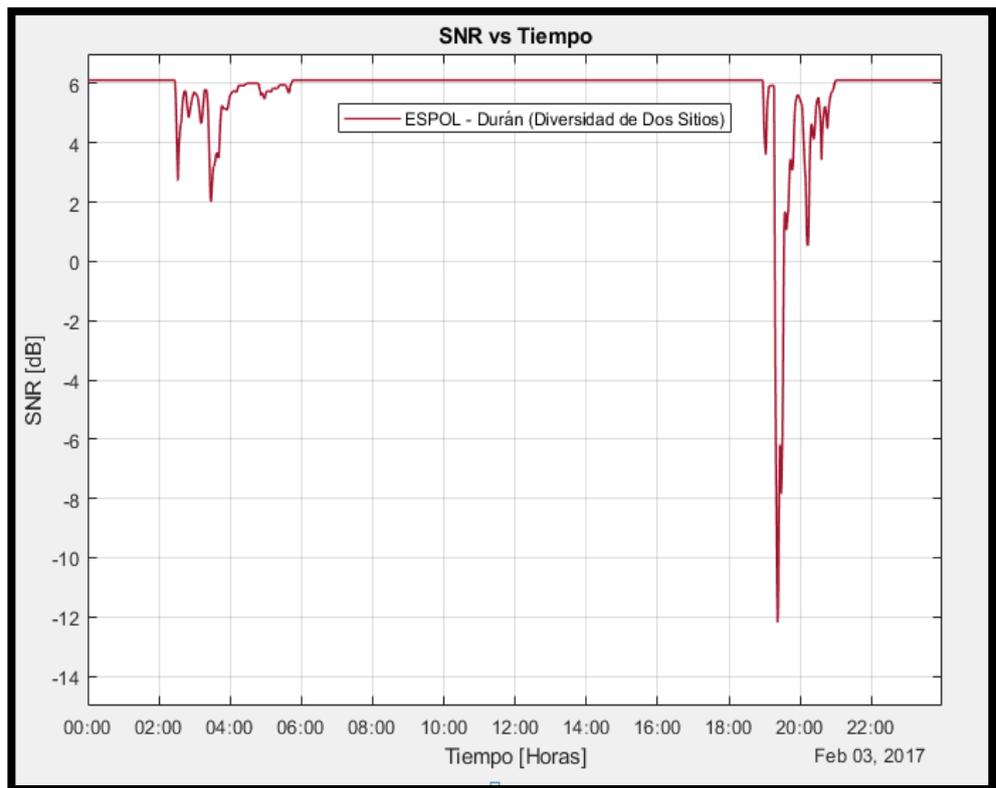
En la figura 4.12, se observa el comportamiento de la SNR con respecto al tiempo, sin haber aplicado ninguna técnica de diversidad (día 03 de Febrero del 2017).



**Figura 4.12 Gráfica de SNR vs Tiempo de un enlace satelital (03 de Febrero del 2017) operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de  $67.7^\circ$ , para la estación terrestre ESPOL, sin aplicar ninguna técnica de diversidad**

Durante la madrugada (00:00 am hasta 7:00 am) la SNR estuvo fluctuando entre los -5 dB a 6 dB. Entre la mañana y tarde (7:00 am hasta un poco más de las 17:00 pm) se mantuvo constante en 6 dB; y durante la tarde y noche (17:00 pm hasta las 22:00 pm) tuvo mayores fluctuaciones entre los -32 dB a 5 dB (ver figura 4.12) (estos valores de SNR no se aprecian muy bien en la gráfica y fueron determinados mediante el arreglo generado por el software MatlabR2017b). Además se puede observar, que durante ese día (03 de febrero del 2017) se obtuvo niveles de SNR inferiores a 0 dB (llegando a valores de -32 dB) durante un lapso de tiempo aproximado de 5 a 7 horas (ver figura 4.12).

En la figura 4.13, se observa el comportamiento de la SNR con respecto al tiempo, al aplicar la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios (día 03 de Febrero del 2017).



**Figura 4.13 Gráfica de SNR vs Tiempo de un enlace satelital (03 de Febrero del 2017) operando a una frecuencia de 20 GHz y un ángulo de elevación de 67.7°, para la estación terrena ESPOL (tomando la combinación de dos estaciones terrenas ESPOL + Durán)**

Durante la madrugada (02:00 am hasta 6:00 am) la SNR estuvo fluctuando entre los 2 dB a 6 dB. Entre la mañana y tarde (6:00 am hasta un poco más 18:00 pm) se mantuvo constante en 6 dB; durante la tarde y noche (18:00 pm hasta 21:00 pm) tuvo mayores fluctuaciones entre los -12 dB a 6 dB; y a partir de la 21:00 pm hacia adelante se mantuvo en 6 dB (ver figura 4.12) (estos valores de SNR no se aprecian muy bien en la gráfica y fueron determinados mediante el arreglo generado por el software MatlabR2017b).

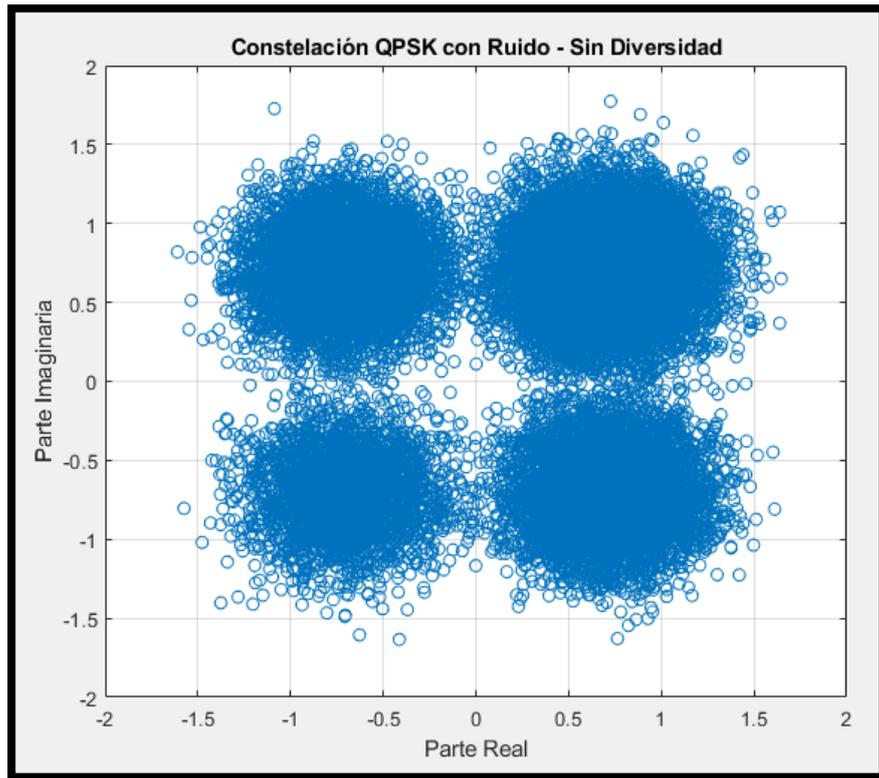
Además se puede observar, que durante ese día (03 de febrero del 2017) no se obtuvo valores de SNR inferiores a 0 dB, entre 00:00 am hasta un poco más de la 18:00 pm. A partir de las 18:00 pm hasta las 21:00 pm, se obtuvo valores de SNR inferiores a 0 dB, llegando hasta -12 dB aproximadamente (ver figura 4.13).

### **4.3 Resultados de la Simulación del BER: Un día lluvioso**

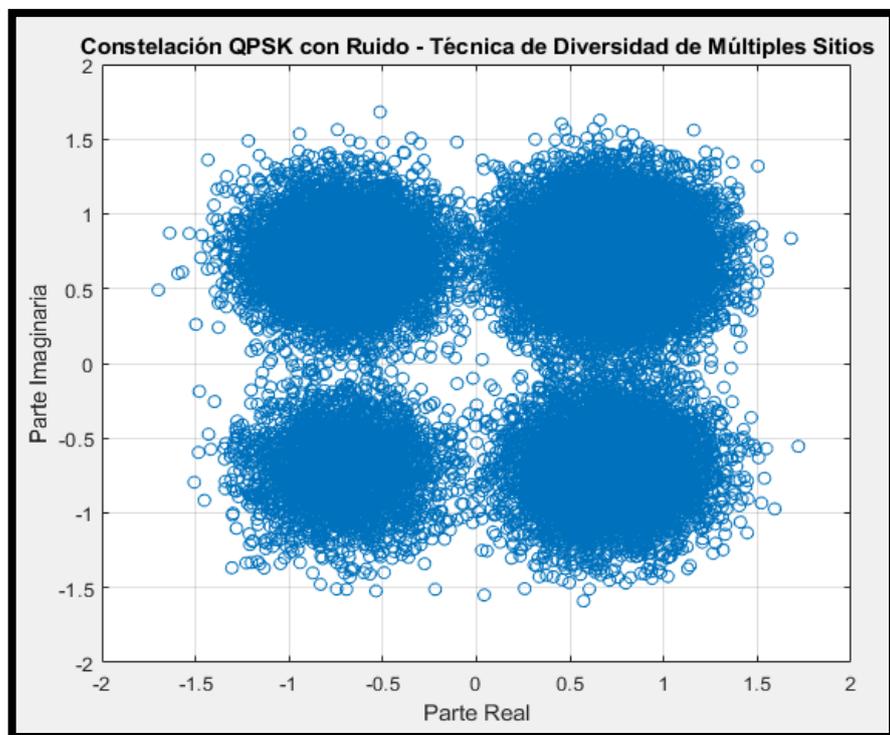
Cuando un paquete o una información tienen que ser retransmitida (a través de un enlace de datos) a causa de un error, se calcula la Tasa de Error Binario (BER) para evaluar el rendimiento del sistema de comunicación digital.

En este proyecto, se va a simular en banda base el BER, utilizando la modulación QPSK con Código Gray. El símbolo resultante, tiene un valor complejo, donde uno de los dos bits en cada símbolo QPSK, afecta a la parte real (canal I) del símbolo y el otro bit a la parte imaginaria (canal Q).

Luego, cada parte se modula posteriormente para formar el símbolo QPSK de valor complejo con Ruido Aditivo Blanco Gaussiano (AWGN), respectivamente (ver figuras 4.14 y 4.15).

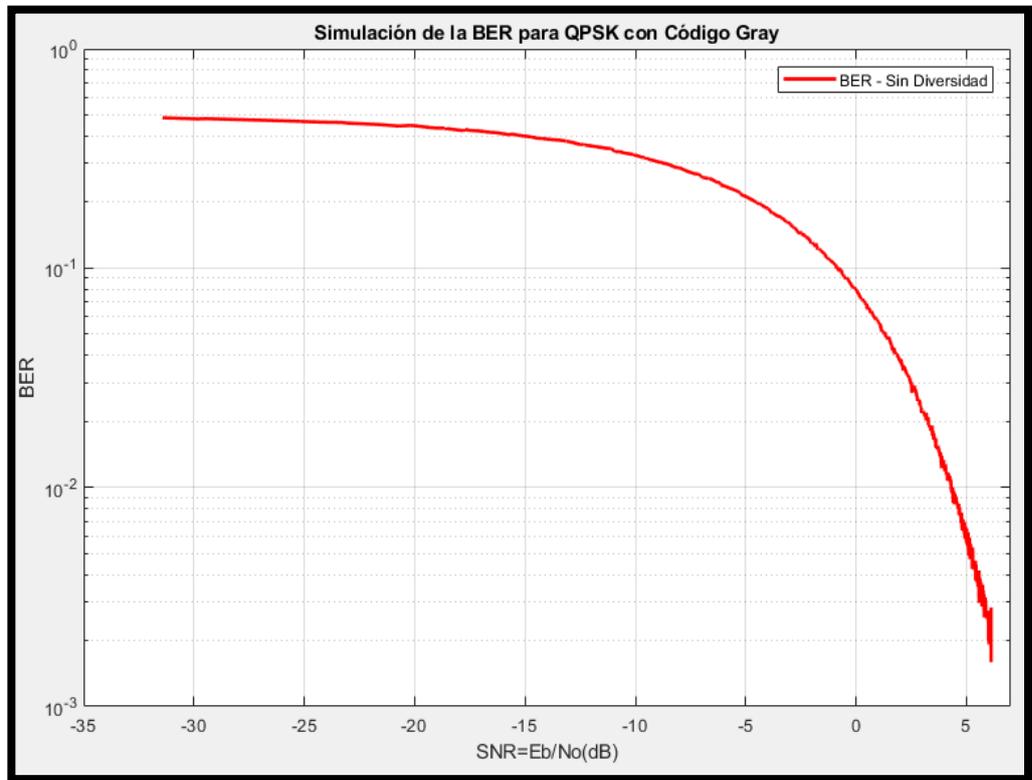


**Figura 4.14 Constelación QPSK con Código Gray en presencia del Ruido Aditivo Blanco Gaussiano, sin aplicar ninguna técnica de diversidad**



**Figura 4.15 Constelación QPSK con Código Gray en presencia del Ruido Aditivo Blanco Gaussiano, aplicando la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios**

En la figura 4.16, se muestra la simulación de la BER vs SNR, sin aplicar ninguna técnica de diversidad.



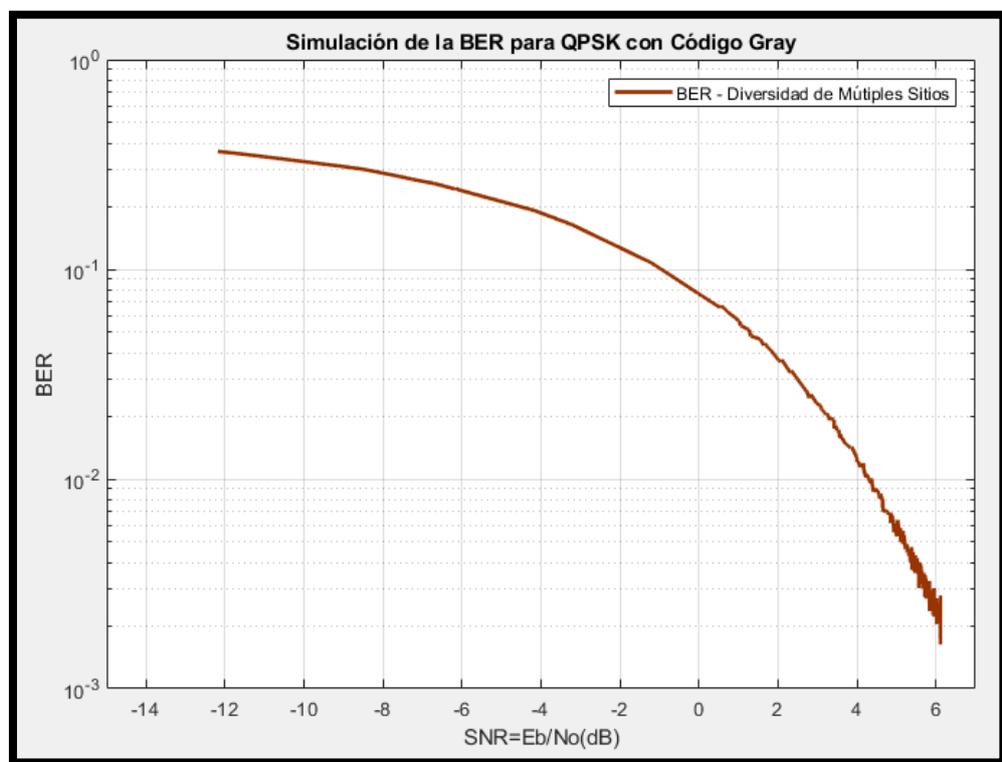
**Figura 4.16** Gráfica BER vs SNR, sin aplicar ninguna técnica de diversidad, utilizando la modulación QPSK con Código Gray

De acuerdo a la información observada en figura 4.16, tenemos:

- SNR = -20 dB, se obtuvo una probabilidad de BER aproximadamente de BER = 0.4462%.
- SNR = -10 dB, se obtuvo una probabilidad de BER aproximadamente de BER = 0.3272%.
- SNR = -5 dB, se obtuvo una probabilidad de BER aproximadamente de BER = 0.2136%.
- SNR = 0 dB, se obtuvo una probabilidad de BER aproximadamente de BER = 0.0740%.
- SNR = 2 dB, se obtuvo una probabilidad de BER aproximadamente de BER = 0.0368%.

Algunos datos encontrados de Tasa de Error Binario, no se aprecian en la gráfica 4.16, por ende fueron encontrados mediante los arreglos generados por el software MatlabR2017b. Además se encontraron 152 errores en la transmisión de los datos, sin aplicar ninguna técnica de diversidad.

En la figura 4.17, se muestra la simulación de la SNR vs BER, al aplicar la técnica de diversidad de Múltiples Sitios.



**Figura 4.17 Gráfica BER vs SNR, aplicando la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios (para dos estaciones terrenas ESPOL + Durán), utilizando la modulación QPSK con Código Gray.**

De acuerdo a la información observada en la figura 4.17, tenemos:

- SNR = -10 dB, se obtuvo una probabilidad de BER aproximadamente de BER = 0.3394%.
- SNR = 0 dB, se obtuvo una probabilidad de BER aproximadamente de BER = 0.0671%.
- SNR = 2 dB, se obtuvo una probabilidad de BER aproximadamente de BER = 0.0362%.

Algunos datos encontrados de Tasa de Error Binario no se aprecian en la gráfica 4.17, por ende fueron encontrados mediante los arreglos generados por el software MatlabR2017b. Además se encontraron 135 errores en la transmisión de los datos, al aplicar la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este proyecto se enfocó principalmente en el uso de un sistema de Diversidad de Múltiples Sitios en Guayaquil, Ecuador, debido a las constantes lluvias que azotan a la ciudad en la época invernal, provocando efectos negativos (un ejemplo es la atenuación) en la disponibilidad o calidad de servicio en los enlaces satelitales. En base al aumento en la atenuación debido a la lluvia, se aplicó la Técnica de la Tormenta Sintética Satelital (S-SST) para obtener como información las series temporales de lluvias recolectadas por la red de pluviómetros ubicados en los cuatro sectores de la ciudad, durante un período de 433 días.

Para estudiar el desempeño de la Diversidad de Múltiples Sitios, se simuló 6 combinaciones de 2 sitios, 3 combinaciones de 3 sitios y 1 combinación de 4 sitios (ver figuras 4.1, 4.2 y 4.3, respectivamente). Se determinó que para un sector donde hay fuerte lluvias, es recomendable incorporar otra estación (dos estaciones base) y así sucesivamente de acuerdo al análisis a estudiar para mitigar el efecto negativo de la lluvia al enlace satelital. En nuestro caso, al incluir la estación Durán se mejoró considerablemente la mitigación de atenuación teniendo como resultado un beneficio del +28,32% hasta +100% en la ganancia de potencia relativa entre las combinaciones ESPOL + Durán y ESPOL + Kennedy + Durán. Por ende, se encontró que la mejor combinación de las estaciones terrenas simuladas (ubicación de pluviómetros) para mitigar la atenuación, fue la combinación ESPOL+ Durán (combinación de dos sitios) con una distancia de separación entre las estaciones terrenas de 17 km. Sin embargo, el beneficio obtenido de incluir una tercera o cuarta estación terrena (ver figuras 4.2 y 4.3, respectivamente) depende mucho de que tan alejado este la estación con respecto a las otras (combinación de dos sitios).

Es verdad que los datos recolectados durante un año aproximadamente (desde el 22 de Marzo del 2016 hasta el 29 de Mayo del 2017), son datos preliminares (limitados) comparados con otros estudios de este mismo fenómeno, se puede sugerir que para la ciudad de Guayaquil, la Técnica de Diversidad de Múltiples Sitios es la forma más eficiente de contrarrestar el desvanecimiento a causa de las intensas lluvias, con la

condición de que las estaciones terrenas estén lo suficientemente separadas entre sí, hecho que se demostró al realizar una simulación de un caso real (comunicación a tiempo real) de un día muy lluvioso (03 de Febrero del 2017) en el sector ESPOL.

Donde se estudió y se analizó el rendimiento de la SNR y BER (se utilizó la modulación QPSK). Al aplicar la técnica de Diversidad de Múltiples Sitios se obtuvo 135 errores al transmitir, es decir, se redujo 17 errores de los que se tenía inicialmente (152 errores sin aplicar técnica de diversidad). Por ende la efectividad de la técnica de Diversidad de Múltiples Sitios redujo la Tasa de Error Binario, en un 11,20%

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Sridhar, K. PadmaRaju, and Ch. Srinivasa Rao, "Estimation of Rain Attenuation based on ITU-R Model in Guntur (A.P), India", ACEEE Int. J. on Communications, Vol. 03, No. 03, Nov 2012.
- [2] J. Brito, "Performance of Equatorial Time Diversity Systems Evaluated from Rain Rate Time Series," Politecnico Di Milano, Italy.
- [3] J. Fermin, "Pronóstico de la atenuación por lluvias en las comunicaciones satelitales mediante métodos de regresión," Vol 9, No 3,1, Telematique, 2010
- [4] J. Maturana, M. Bello, M. Manley "Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur," Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Errázuriz 254, Playa Ancha, Valparaíso.
- [5] D.F. Moncada, "Atenuación por lluvia en un sistema de comunicación estación – satélite," Vol 7, No 1,1, Telematique, 2008.
- [6] C. Hernandez, "Televisión satelital expuesta a condiciones climáticas y geográficas de Punta Arenas," Universidad de Mallaganes, Chile.
- [7] A K Lwas, Md R Islam, J Chebil, M H Habaebi, A F Ismail, A Zyound and H Dao. "Rain Attenuation Analysis using Synthetic Storm Technique in Malaysia," Kulliyah of Engineering International Islamic University Malaysia, Jalan Gombak, 53100 Kuala Lumpur, Malaysia .
- [8] A. Panagopoulos, P. Arapoglou, and P. Cottis. "Satellite Communication at Ku, Ka, and V bands: Propagation Impairments and Mitigation Techniques", IEEE Communications Surveys, Third Quarter 2004, Volumen 6, No.3.
- [9] M. D'Amico, A. Manzoni, B. Ramos and J. L. Santos. "Performance of Equatorial Multiple-Site Diversity Systems Evaluated from Rain Rate Time Series", 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2017).
- [10] Dennis Roddy, *Satellite Communication*, 4th ed, New York: McGraw-Hill, 2006.
- [11] M. Moskovljevic, M. Stefanovic, P. Rakonjac, "Comparison of theoretical probability error and the BER simulation of QPSK and QFSK modulation," 5th International Scientific Conference On Defensive Technologies, Belgrade, Serbia, 18-19 September 2012.

- [12] M. D'Amico, S. L. Jong and C. Riva. "*Tipping Bucket Data Processing for Propagation Application,*" Electronics Letters, Volume 49, Issue 8, pages: 569-571, 2013.
- [13] MathWorks, Documentation, Function, noisepow, R2017b. Disponibile en: [https://la.mathworks.com/help/phased/ref/noisepow.html#outputarg\\_NPOWER](https://la.mathworks.com/help/phased/ref/noisepow.html#outputarg_NPOWER)
- [14] C Capsoni, M D'Amico, R Nebuloni and C Riva. "*Performance of Site Diversity Technique Estimated From Time Diversity,*"Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico Di Milano, Italy.
- [15] C Capsoni and M D'Amico. "*Time and Site Diversity Gain: A Close Relationship,*" Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico Di Milano, Italy.
- [16] L Luini, M and C Capsoni. "*Preliminary Results From Physically – Based Methodology for the Evaluation of a Time Diversity System,*"Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico Di Milano, Italy.

## **ANEXOS**

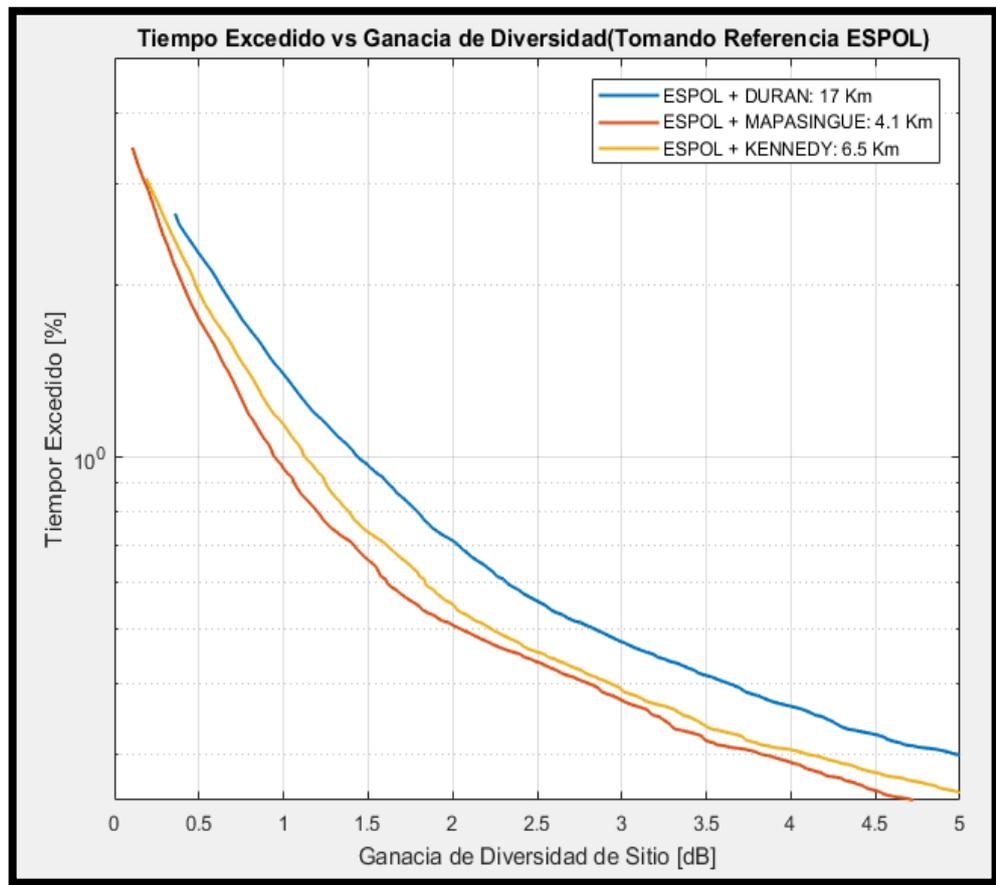
### **GANANCIA DE DIVERSIDAD DE SITIO Y DE TIEMPO: UNA RELACIÓN CERCANA**

La Diversidad de Sitio y de Tiempo son contramedidas utilizadas en enlaces satelitales para mitigar la interrupción debido a la atenuación por lluvia [14]. EL rendimiento de los sistemas de diversidad de sitios se puede vincular con el sistema de diversidad de tiempo a través de un parámetro preciso de espacio-tiempo (la velocidad promedio efectiva) [15]. .

En este capítulo se analizará las ganancias de diversidad de las dos técnicas que se calculan a partir de series de tiempo de atenuación por lluvia para dos estaciones; y luego se la relacionará para determinar la velocidad promedio efectiva de la lluvia. También se demostrará que esta velocidad puede ser derivada independientemente de las cantidades atmosféricas y en particular de la velocidad media del viento a un presión isobara de 700 *mbar* de altitud [15].

## 1. Desempeño de las Técnicas de Diversidad de Sitio y de Tiempo

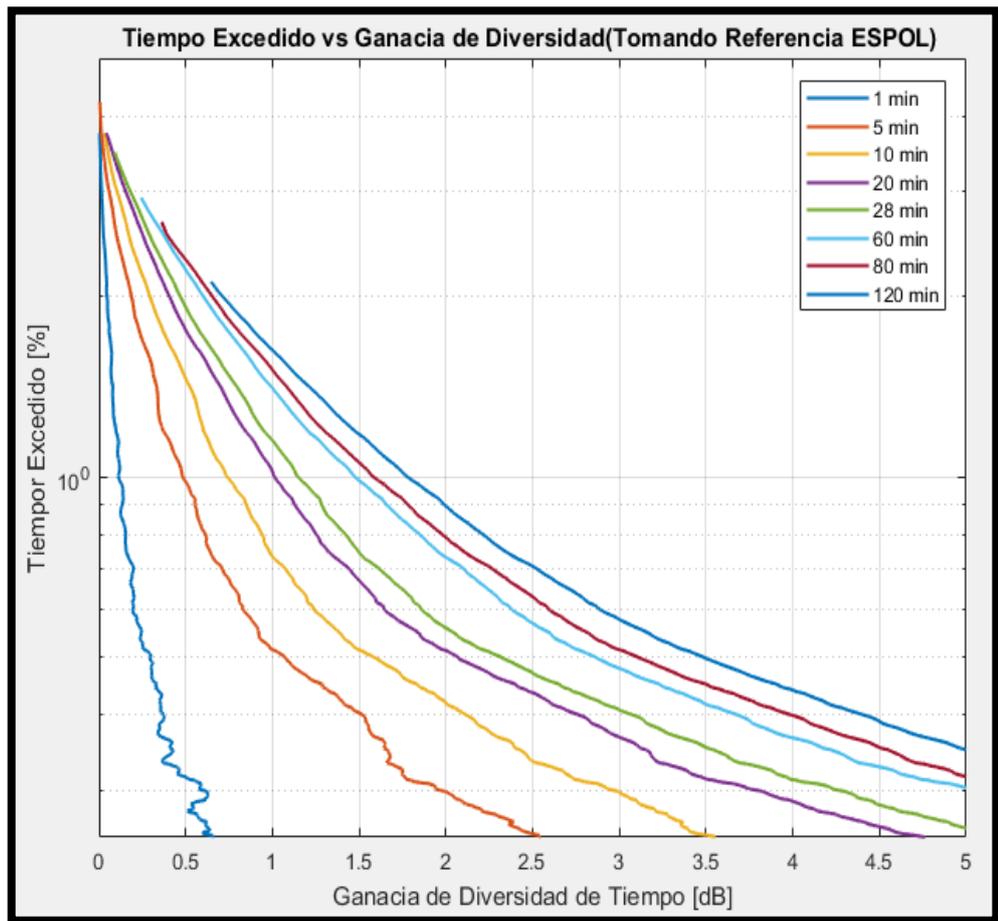
Nosotros hemos simulado un enlace satelital con una frecuencia de operación de 20 GHz, con un ángulo de elevación de 67.7°. La ganancia de diversidad de sitio se traza en la figura A.1.



**Figura A.1 Ganancia de Diversidad de Sitio vs el porcentaje de tiempo absoluto, en diferentes distancias, a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de 67.7°**

En la figura A.1, se muestra la ganancia de diversidad de sitio como una función de la probabilidad de excedencia; como se esperaba, para una nivel de probabilidad dado (es decir, atenuación absoluta) aumenta la ganancia de diversidad para valores de distancia más grandes. Para una probabilidad de 0.1% se experimenta una ganancia de 8,9100 dB en la combinación ESPOL + Mapasingue; una ganancia de 10,8430 dB en la combinación ESPOL + Kennedy; y que aumenta a 13,6267 dB en la combinación ESPOL + Durán. Se puede experimentar que el rango de probabilidades de 2% al 4%, los tres pares de combinaciones tienden a tener la misma ganancia de diversidad, a partir del 1% a 0,01% de probabilidad, la de mejor ganancia de diversidad, es la de ESPOL + Durán debido a la separación de 17 km entre ellas, a diferencia de las dos combinaciones que tienden a tener la misma ganancia de diversidad.

En la figura A.2, se muestra la ganancia de diversidad de tiempo como una función de la probabilidad de excedencia; como se esperaba, para una nivel de probabilidad dado (es decir, atenuación absoluta) aumenta la ganancia de diversidad para valores de retraso de tiempo más grandes. Para una probabilidad de 0.1% se experimenta una ganancia de 21,6250 dB durante un retraso de  $\Delta t = 20 \text{ minutos}$ ; una ganancia de 23,4850 dB durante un retraso de  $\Delta t = 28 \text{ minutos}$ ; y que aumenta a 31,0700 dB durante un retraso de  $\Delta t = 60 \text{ minutos}$ . Se puede experimentar un efecto de saturación para aumentar retardos en el tiempo, el aumento de ganancia de ir  $\Delta t = 10 \text{ minutos}$  a  $\Delta t = 28 \text{ minutos}$  es mucha más grande, yendo de  $t = 60 \text{ minutos}$  a  $\Delta t = 80 \text{ minutos}$ ; en otras palabras la técnica de diversidad de tiempo se vuelve menos efectivo al aumentos los valores de retraso.



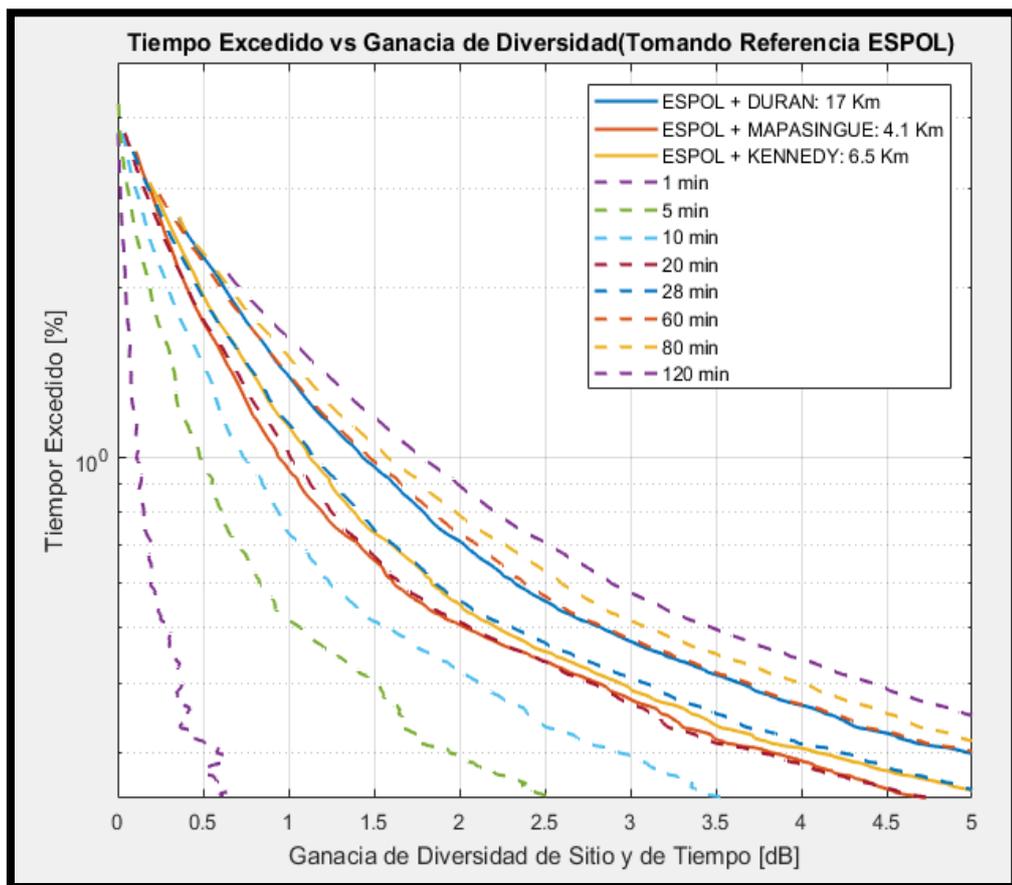
**Figura A.2 Ganancia de Diversidad de Tiempo vs el porcentaje de tiempo absoluto, en tiempo de retardos diferentes, a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de 67.7°**

## 2. Relación entre las Ganancias de Diversidad de Sitio y de Tiempo

En un trabajo reciente por el Politécnico de Milano [14], las ganancias de Diversidad de Sitio y de Tiempo habían sido comparados a través de un radar de simulaciones, donde se encontró que para un valor determinado de ganancia de diversidad, la distancia entre las dos estaciones terrenas (en diversidad de sitio) y el retraso de la transmisión (en diversidad de tiempo) son proporcionales, el coeficiente entre ellas dado como el resultado la velocidad efectiva  $v_{eff}$  [15].

Los que se está buscando es una relación del tipo  $\Delta S/\Delta t$ ; donde  $\Delta S$  es la distancia de las dos estaciones terrenas y  $\Delta t$  es el tiempo de retraso. La existencia de dicha relación es de una manera intuitiva sin pensar en los procesos físicos subyacentes (movimiento y tamaño de la tormenta) por ende,  $\Delta S$  y  $\Delta t$  serían proporcionales; y la relación sería lineal. En el mundo real, la tormenta cambia de tamaño, forma y su movimiento depende drásticamente de los campos de vientos.

En la figura A.3, las CCDFs de ganancia de diversidad de Sitio y de Tiempo se trazan juntas. Se puede observar que la curva de ESPOL + Durán  $\Delta S = 17 \text{ km}$ , está casi superpuesta a la curva de  $\Delta t = 60 \text{ minutos}$ . Luego la curva de ESPOL + Mapasingue  $\Delta S = 4.1 \text{ km}$ , tiene similitud con a la curva de  $\Delta t = 20 \text{ minutos}$ , y finalmente la curva de ESPOL + Kennedy  $\Delta S = 6.5 \text{ km}$ , se aproxima a la curva de  $\Delta t = 28 \text{ minutos}$ .



**Figura A.3 Ganancia de Diversidad de Sitio y de Tiempo vs el porcentaje de tiempo absoluto, a una frecuencia de operación de 20 GHz y ángulo de elevación de 67.7°.**

En Tabla A.1, se muestra los resultados de las velocidades efectivas determinadas de las combinaciones de la ganancia diversidad de sitio con la diversidad de tiempo. Los datos: distancia y tiempo, fueron convertidas de kilómetros a metros; y de minutos a segundos, respectivamente.

<b>ESPOL + Durán con <math>\Delta t = 60 \text{ min}</math></b>	<b>ESPOL + Kennedy con <math>\Delta t = 28 \text{ min}</math></b>	<b>ESPOL + Mapasingue con <math>\Delta t = 20 \text{ min}</math></b>
$v_{eff} = 4,722 \text{ ms}^{-1}$	$v_{eff} = 3,869 \text{ ms}^{-1}$	$v_{eff} = 3,416 \text{ ms}^{-1}$

**Tabla A.1 Velocidades efectivas (en m/s) de las combinaciones de las curvas de diversidad de sitio y de tiempo.**

En un documento realizado por Luini y Capsoni [16], idearon una metodología para obtener la velocidad efectiva  $v_{eff}$ . desde  $v_{700}$  (velocidad de viento registrada a 700 mbar de altitud). La evolución del campo de lluvia consiste específicamente en dos contribuciones fundamentales, que están íntimamente separados. La primera está asociada con la traducción del evento de precipitación (principalmente debido al viento que sopla a una gran altura); y la segunda está asociada con el nacimiento y la descomposición de la célula de lluvia (es decir, la deformación estructural general del campo). A pesar de que algunas aplicaciones puede ser suficiente solo considerar la traslación del campo de lluvia introduciendo la  $v_{eff}$ , tenemos que estar conscientes que para otras aplicaciones hay que considerar el tipo de precipitación para la contribución de la evolución del campo de lluvia [15].

Luini y Capsoni obtuvieron la velocidad efectiva reduciendo la velocidad de 700 *mbar* por un factor *k* (deformación estructural del campo), es decir [15]:

$$v_{eff} = \frac{v_{700}}{k} \quad (A.1)$$

El valor óptimo que se ha determinado para el factor de deformación estructural del campo es de  $k = 2,06$ [15]. Ese valor se obtuvo recurriendo a un extenso conjunto de datos de mapas de lluvia recolectados por el radar meteorológico de Spinod'Adda, Italia ( $lat = 45.4 N^\circ$  y  $lon = 9.5 E^\circ$ ), específicamente en la base de datos NPC (Nastri Pioggia Cartesianizzati) consisto en aproximadamente 2200 mapas de radar CAPPI (Indicador de Plan de Posición de Constante Altitud), extraídos de los eventos de lluvia en el periodo de 1988 a 1992 [15]. Para determinar la velocidad de la tormenta (a 700 *mbar* de altitud) se la despeja de la ecuación, obteniendo:

$$v_{700} = k * v_{eff} \quad (A.2)$$

Con las velocidades efectivas encontradas y utilizando el factor *k*, en la Tabla A.2 se muestra las velocidades de las tormentas de cada escenario.

<b>ESPOL + Durán con <math>\Delta t = 60 \text{ min}</math></b>	<b>ESPOL + Kennedy con <math>\Delta t = 28 \text{ min}</math></b>	<b>ESPOL + Mapasingue con <math>\Delta t = 20 \text{ min}</math></b>
$v_{700} = 9,727 \text{ ms}^{-1}$	$v_{700} = 7,970 \text{ ms}^{-1}$	$v_{700} = 7,036 \text{ ms}^{-1}$

**Tabla A.2 Velocidades de la tormenta (en m/s) de las combinaciones de las curvas de diversidad de sitio y de tiempo.**

Hay recordar que la estimación de la velocidad a 700 *mbar* real que se aplicó en la técnica de la tormenta sintética, se realizó a través de sondeos de radio, fue de 7,8 *m/s*, en Durán. Comparando ese valor con los valores obtenido en los escenarios, se puede determinar en la Tabla A.3, que el menor error porcentual fue de 2,18 % el de la combinación ESPOL + Kennedy con  $\Delta t = 28$  minutos, que es notablemente cercano al valor encontrado impediéntemente en esta tesis.

<b>ESPOL + Durán con <math>\Delta t = 60</math> min</b>	<b>ESPOL + Kennedy con <math>\Delta t = 28</math> min</b>	<b>ESPOL + Mapasingue con <math>\Delta t = 20</math> min</b>
<p style="text-align: center;">% <i>e</i> = <b>24,70</b> %</p>	<p style="text-align: center;">% <i>e</i> = 2,18 %</p>	<p style="text-align: center;">% <i>e</i> = 9,79%</p>

**Tabla A.3** Porcentajes de errores de la velocidad de la tormenta a 700 mbar

Finalmente, se pudo analizar y comprobar el rendimiento de las Técnicas de Diversidad de Múltiples Sitios y de Tiempo, se puede vincular una con la otra a través de una relación lineal (espacio – tiempo), donde la ganancia de potencia de la diversidad de Múltiples Sitios a una probabilidad *p* dada de superación de atenuación de lluvia durante el trayecto de la señal satelital, puede derivarse de la ganancia de potencia de la diversidad de Tiempo. La evidencia que se mostró en la figura A.3, demuestra que la distancia entre dos estaciones terrenas (en Diversidad de Múltiples Sitios) y el retraso de transmisión (en Diversidad de Tiempo) son inversamente proporcionales, siendo el coeficiente (velocidad efectiva) independiente de la frecuencia de operación, ángulo de elevación y de la probabilidad dada; donde el valor encontrado de velocidad efectiva para la combinación ESPOL + Durán con  $\Delta t = 60$  min fue de 4,722  $ms^{-1}$ , para la combinación ESPOL + Kennedy con  $\Delta t = 28$  min fue de 3,869  $ms^{-1}$ , y por último para la combinación ESPOL + Mapasingue con  $\Delta t = 20$  min fue de 3,416  $ms^{-1}$ .

Cabe destacar que el objetivo de esta relación lineal entre las dos técnicas era encontrar la velocidad a 700 mbar y demostrar que era cercana a  $7,8 \text{ ms}^{-1}$  (valor encontrado por sondeos de radio en la ciudad de Durán), por ende con la ayuda de un factor  $k = 2,06$  (deformación estructural del campo) encontrado en el continente europeo, se obtuvo que la velocidad a 700 mbar para cada combinación fue la siguiente: ESPOL + Durán con  $\Delta t = 60 \text{ min}$  fue de  $9,727 \text{ ms}^{-1}$ , para la combinación ESPOL + Kennedy con  $\Delta t = 28 \text{ min}$  fue de  $7,970 \text{ ms}^{-1}$ , y por último para la combinación ESPOL + Mapasingue con  $\Delta t = 20 \text{ min}$  fue de  $7,036 \text{ ms}^{-1}$ . La combinación que más se acercó a la velocidad especificada fue la de ESPOL + Kennedy (separación entre las dos estaciones terrenas de 6,5 km) con  $\Delta t = 28 \text{ min}$ , con estos resultados obtenidos, se demostró que el valor  $k = 2,06$  (demostrado en Europa) es también independiente al menos en la ciudad de Guayaquil, Ecuador.