

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**ANÁLISIS DE DESVANECIMIENTOS POR REFRACTIVIDAD PARA LA
ESTIMACIÓN DE ALTURAS DE ANTENAS CON DIVERSIDAD
ESPACIAL EN EL TRAMO DE INTERCONEXIÓN MICROONDAS
PACASMAYO – PAIJÁN**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: DISEÑO, INTERCONEXIÓN Y GESTIÓN DE REDES DE
COMUNICACIÓN**

AUTORES:

Br. FEDERICO PEREZ NAVARRO

Br. GONZALO ORTIZ OGOÑA

ASESOR:

Ms. EDUARDO ELMER CERNA SÁNCHEZ

**TRUJILLO - PERÚ
2019**

ACREDITACIONES

“ANÁLISIS DE DESVANECIMIENTOS POR REFRACTIVIDAD PARA LA ESTIMACIÓN DE ALTURAS DE ANTENAS CON DIVERSIDAD ESPACIAL EN EL TRAMO DE INTERCONEXIÓN MICROONDAS PACASMAYO – PAIJÁN”

Elaborado por:

Br. FEDERICO PEREZ NAVARRO.

Br. GONZALO ORTIZ OGOÑA.

Aprobado por:

Ing. MARCO TULIO TRUJILLO SILVA
PRESIDENTE
CIP N°82929

Ing. JORGE LUIS ALVA ALARCON
SECRETARIO
CIP N°214251

Ing. LUIS ENRIQUE ALVARADO RODRIGUEZ
VOCAL
CIP N°149200

Ing. EDUARDO CERNA SÁNCHEZ
ASESOR
CIP N°80252

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**ANÁLISIS DE DESVANECIMIENTOS POR REFRACTIVIDAD PARA LA
ESTIMACIÓN DE ALTURAS DE ANTENAS CON DIVERSIDAD
ESPACIAL EN EL TRAMO DE INTERCONEXIÓN MICROONDAS
PACASMAYO – PAIJÁN**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: DISEÑO, INTERCONEXIÓN Y GESTIÓN DE REDES DE
COMUNICACIÓN**

AUTORES:

Br. FEDERICO PEREZ NAVARRO

Br. GONZALO ORTIZ OGOÑA

ASESOR:

Ms. EDUARDO ELMER CERNA SÁNCHEZ

**TRUJILLO - PERÚ
2019**

DEDICATORIAS

A Dios por permitir que este objetivo sea posible en mi vida, mis padres por su apoyo incondicional y por sus consejos, a mi hermana y a mi sobrina por llenar de alegría nuestras vidas.

FEDERICO PEREZ NAVARRO

A mis padres, en especial a mis abuelos que tomaron la iniciativa en apoyarme en toda mi educación, gracias a su incondicional amor y apoyo ahora puedo finalizar una etapa importante en mi vida y empezar una vida profesional. A Dios por la salud que me brinda día a día.

GONZALO ORTIZ OGOÑA

AGRADECIMIENTO

A Dios, por habernos dado fuerzas y ganas de seguir superarnos profesionalmente para establecer objetivos, realizar metas y cumplir responsabilidades.

A nuestros padres por enseñarnos que la mejor herencia es la educación, por sus consejos, valores, motivación y amor.

Nuestra gratitud al asesor de Tesis, Ing. Eduardo Elmer Cerna Sánchez, por haber confiado en este trabajo, por su valiosa dirección y apoyo en la culminación de esta tesis, además por guiarnos como docente a lo largo de una exigente carrera universitaria.

También agradecemos a las personas que, de alguna u otra manera, han sido claves en nuestra formación profesional, tales como los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica.

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en la estimación de alturas en configuración de diversidad espacial para un radioenlace microondas sobre la zona costera desértica peruana entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján. Para ello se realizó una caracterización de los desvanecimientos que ocurren a diferentes alturas de antenas transmisoras y receptoras, identificándose los pares de alturas (principal y diversidad) en los que el comportamiento de la señal llega a ser complementario. A partir de la identificación de estos valores, se variaron las condiciones de refractividad del enlace, seleccionándose sólo los valores de altura de antenas con mejores coeficientes de correlación para las bandas de frecuencia 7 GHz y 11 GHz. Los resultados presentan las 03 soluciones con mejor coeficiente de correlación, las cuales son comparadas con una implementación ya existente, obteniéndose una diferencia promedio de 8% con los valores de altura de antena preexistentes. En la parte final del trabajo se indica las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

ABSTRACT

The present investigation focuses on the estimation of heights in configuration of spatial diversity for a microwave radio link on the Peruvian coastal desert between the cities of Pacasmayo and Paiján. To this end, a characterization of the fades occurring at different transmitting and receiving antenna heights was made, identifying the pairs of heights (principal and diversity) in which the behavior of the signal becomes complementary. From the identification of these values, the refractive conditions of the link were varied, selecting only antenna height values with better correlation coefficients for the 7 GHz and 11 GHz frequency bands. The results present the 03 solutions with the best correlation coefficient, which are compared with an existing implementation, obtaining an average difference of 8% with the pre-existing antenna height values. In the final part of the work, the corresponding conclusions and recommendations are indicated.

PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

De conformidad y en cumplimiento de los requisitos estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego y el Reglamento Interno de la Carrera Profesional de Ingeniería Electrónica para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, pongo a vuestra disposición el presente Trabajo de Tesis titulado: **“ANÁLISIS DE DESVANECIMIENTOS POR REFRACTIVIDAD PARA LA ESTIMACIÓN DE ALTURAS DE ANTENAS CON DIVERSIDAD ESPACIAL EN EL TRAMO DE INTERCONEXIÓN MICROONDAS PACASMAYO – PAIJÁN”**.

Este trabajo, es el resultado de la aplicación de los conocimientos adquiridos en la formación profesional en la Universidad, excusándome anticipadamente de los posibles errores involuntarios cometidos en su desarrollo.

Trujillo, Julio del 2019

Br. Federico Perez Navarro

Br. Gonzalo Ortiz Ogoña

INDICE

I. INTRODUCCION	7
1.1. Problema de Investigación.....	7
1.2. Objetivos de la investigación.....	9
1.3. Justificación del estudio	9
II. MARCO DE REFERENCIA.....	11
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	11
2.2. Fundamentación teórica de la investigación	13
2.2.1. Regulación de Frecuencia, canales microondas	13
2.2.2. Refracción radioeléctrica.....	14
2.2.3. Fenómeno de reflexión en enlaces microondas.....	15
2.2.4. Desvanecimientos.....	16
2.2.5. Diversidad Espacial.....	17
2.2.6. Diseño de Diversidad Espacial.....	18
2.2.7. Altura de Antenas.....	18
2.3. Marco conceptual.....	19
2.3.1. Canal de radiofrecuencia microondas	19
2.3.2. Refractividad	19
2.3.3. Desvanecimiento multitrayecto	20
2.3.4. Deep Fading	20
2.3.5. Diversidad Espacial.....	20
2.4. Hipótesis.....	20
2.4.1. General	20
2.5. Variables e Indicadores	20
2.5.1. Variables de estudio	20
2.5.2. Operacionalización de las variables	22
III. METODOLOGIA EMPLEADA.....	24
3.1. Tipo y Nivel de Investigación	24
3.2. Población y Muestra de Estudio.....	24
3.3. Diseño de investigación	24
3.4. Técnicas e instrumentos de investigación.....	25
3.4.1. Recolección de datos.....	25

3.4.1.1 Información de ruta microondas Pacasmayo y Paiján	25
3.4.1.2. Recolección de información para Bandas 7GHz y 11GHz	27
3.4.1.3. Recolección de información de Equipos de Transmisión de radio	29
3.4.2. Procesamiento de información	31
3.4.2.1. Proceso de Simulación	31
3.5. Procesamiento y Análisis de Datos	40
3.5.1. Evaluación de valores de altura de antena en banda de 7GHz	40
3.5.1.1. Transmisora de 60m	40
3.5.1.2. Transmisora de 70m	43
3.5.2. Evaluación de alturas para 11 GHz	47
3.5.2.2. Transmisora de 50m	47
3.5.2.2. Transmisora de 68m	50
IV. PRESENTACION DE RESULTADOS.....	55
4.1. Análisis e interpretación de resultados	55
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
VI. CONCLUSIONES	60
VII. RECOMENDACIONES	61
VIII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
IX. ANEXOS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de disposición del plan de frecuencia del UIT-R.....	13
Figura 2: Fenómeno de Reflexión.....	15
Figura 3: Fenómeno Reflexión Difusa.....	16
Figura 4: Esquema de Diversidad Espacial.....	17
Figura 5: Mapa del radioenlace Pacasmayo y Paiján.....	25
Figura 6: Fotografía de antena localizada en Paiján	26
Figura 7: Fotografía de antena localizada en Pacasmayo	27
Figura 8: Configuración de frecuencias	32
Figura 9: Captura de pantalla de la sección Topology	33
Figura 10: Captura de pantalla de la sección Membership.....	34
Figura 11: Captura de pantalla de la sección Membership.....	35
Figura 12: Variación de altura en antena receptora.....	36
Figura 13: Gráfica de potencia recibida a diversas alturas receptoras para transmisora 45m	37
Figura 14: Gráfica de Refractividad	38
Figura 15: Gráfica de Dispersión	39
Figura 16: Identificación de posibles alturas de recepción con diversidad espacial para altura de antena transmisora 60m	40
Figura 17: Respuesta a la variación de refractividad para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 60m).	41
Figura 18: Evaluación de coeficiente de correlación para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 60m).	42
Figura 19: Identificación de posibles alturas de recepción con diversidad espacial para altura de antena transmisora 70m	43
Figura 20: Respuesta a la variación de refractividad para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 70m).	44
Figura 21: Evaluación de coeficiente de correlación para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 70m).	45
Figura 22: Identificación de posibles alturas de recepción con diversidad espacial para altura de antena transmisora 50m	47
Figura 23: Respuesta a la variación de refractividad para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 50m).	48

Figura 24: Evaluación de coeficiente de correlación para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 50m).	49
Figura 25: Identificación de posibles alturas de recepción con diversidad espacial para altura de antena transmisora 68m	50
Figura 26: Respuesta a la variación de refractividad para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 68m).	51
Figura 27: Evaluación de coeficiente de correlación para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 68m).	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de la Variable Independiente.....	22
Tabla 2: Operacionalización de la Variable Dependiente	22
Tabla 3: Frecuencia de ida y vuelta Banda 7GHz	28
Tabla 4: Frecuencia de ida y vuelta Banda 11GHz	29
Tabla 5: Equipos de Radiotransmisión.....	30
Tabla 6: Selección de alturas con mejores coeficientes de correlación Banda 7Ghz....	46
Tabla 7: Selección de alturas con mejores coeficientes de correlación Banda 11Ghz..	53
Tabla 8: Tabla de mejores resultados seleccionados 7 GHz	55
Tabla 9: Tabla de mejores resultados seleccionados 11 GHz	56
Tabla 10: Comparación resultados finales	58

CAPÍTULO I

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de Investigación

Uno de los principales desafíos que enfrenta el diseño de redes microondas es la vulnerabilidad de la señal de radio a los fenómenos climáticos. En ese sentido se requiere una correcta predicción de los efectos que puedan ocasionar los cambios climáticos sobre la refractividad asociada a la curvatura de la onda electromagnética al propagarse de un punto a otro.

La alteración de la refractividad y su afectación en las microondas terrestres es más perceptible en zonas desérticas cercanas al mar, tales como la franja desértica existente al norte del Perú, en cuyas zonas suelen ocurrir desvanecimientos de señal que pueden hacer caer el enlace dorsal.

En este sentido una de las técnicas más empleadas para enfrentar las condiciones anómalas de propagación es la técnica de diversidad espacial. Según Manning, T. (2009) esta técnica consiste en la instalación de una antena principal y una secundaria diseñadas en condiciones de recepción de señal contrapuestas, es decir cuando la potencia recibida sea más fuerte en la antena principal, la antena secundaria tendrá una potencia débil, y viceversa. De esta manera el receptor podrá conmutar entre la señal de la antena principal y secundaria escogiendo la señal más fuerte para enfrentar los desvanecimientos.

En el caso del tramo de interconexión microondas entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján, éste se caracteriza por ser una zona desértica expuesta a cambios climáticos importantes sobre todo de temperatura y humedad, los cuales suelen afectar la propagación de los enlaces, siendo en su mayoría implementados con diversidad espacial, lo cual supone un reto de diseño para todo operador.

A partir del escenario de análisis generado en el tramo Pacasmayo y Paiján, el presente trabajo de investigación propone un estudio basado en los desvanecimientos de señal y retroactividad a fin de estimar las alturas de antenas con el empleo de diversidad espacial. en el enlace de interconexión entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján.

a. Descripción de la Realidad problemática

Uso de diversidad espacial para enfrentar los desvanecimientos generados por el clima característico de zonas desérticas y cercanas al mar en el enlace de interconexión microondas entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján.

b. Descripción del problema

Tradicionalmente, el cálculo de separación óptima de antenas con técnica de diversidad espacial se ha desarrollado en base a la teoría de rayo reflejado, como el único factor importante que contribuía al desvanecimiento de señal.

Sin embargo, otros criterios han intentado integrar numerosos factores atmosféricos y geográficos, aumentando el nivel de complejidad en el cálculo, por lo cual no se llegaba a un criterio uniforme de diseño. Por otro lado, en base a la experiencia de los ingenieros de campo, se ha observado que mientras mayor sea la separación de antenas el efecto de la diversidad tiende a mejorar, siendo una típica recomendación una separación entre 9 metros a 12 metros, considerando también no alterar los costos por aumento de altura de torres.

En este contexto, la variedad de criterios antes descrito abren la posibilidad para la propuesta de una alternativa de diseño considerando tanto el efecto del rayo reflejado, como el efecto de condiciones climáticas modeladas bajo el parámetro de refractividad, sobre el que se basa el presente trabajo de investigación.

c. Formulación del Problema

¿Cómo estimar las alturas de diversidad espacial en el segmento de interconexión microondas entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján?

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo General

Estimar alturas de antenas con diversidad espacial para el tramo de interconexión microondas entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján mediante un análisis de desvanecimiento de señal y refractividad.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar parámetros fijos y variables para la simulación de un enlace de interconexión entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján.
- Evaluar en base a resultados de simulación y coeficientes complementarios de correlación, alturas de antenas con diversidad espacial para un enlace de interconexión entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján.
- Seleccionar en base a los coeficientes de correlación, los valores de alturas de antenas principal y diversidad recomendadas para un enlace de interconexión entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján, en dos bandas de frecuencia.
- Comparar los resultados obtenidos con una solución existente en un enlace de interconexión microondas entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján, en dos bandas de frecuencia.

1.3. Justificación del estudio

Básicamente la tesis se justifica académicamente, al buscar un aporte para el diseño de enlaces microondas terrestres con diversidad espacial, aplicando conocimientos adquiridos en la formación de pregrado para el análisis de un caso real específico.

Se puede justificar comercialmente la presente tesis porque está relacionado con la búsqueda de un correcto diseño de diversidad espacial en enlaces microondas dentro del segmento de transporte de una red de Telecomunicaciones, lo cual es el soporte al segmento final de acceso al usuario.

CAPÍTULO II

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes de la Investigación

- Burbano J. (2018) en su investigación titulada ***“Simulación y análisis del comportamiento del canal inalámbrico en base a la respuesta impulsiva considerando la recomendación UIT-R P.1816-3”*** (Tesis Pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador). implementó una herramienta que permite analizar la influencia de los fenómenos que degradan la señal transmitida además de los efectos del desvanecimiento y propagación multitrayecto. Su aporte es el estudio de los mecanismos de degradación por desvanecimientos y otros fenómenos de la señal transmitida además de las recomendaciones de la UIT-R P.1816-3 que serán empleados como referencia para el presente trabajo.
- Severino O. y Carbajal J. (2015) en la investigación denominada ***“Estudio comparativo del desvanecimiento estimado en base al modelo de dos rayos con mediciones realizadas en la ciudad de Trujillo en la frecuencia de 900 MHz al variar la altura de la antena receptora”*** (Tesis Pregrado ,UPAO, Trujillo Perú) se enfocaron en la comparación del modelo de propagación basado en dos rayos con mediciones realizadas en la banda de 900 MHz en la ciudad de Trujillo Perú, con el fin de validar la similitud entre los resultados teóricos y experimentales en esta ciudad. El principal aporte de este trabajo radica en la estimación de los desvanecimientos de potencia en base a las alturas de antenas, distancia y frecuencia del enlace de radio. La cual será empleada como referencia para el análisis requerido en el presente trabajo.
- Ayhan A. y Saltimis T. (2015) en el Paper denominado ***“Evaluating spatial diversity technique for mitigating multipath fading of fixed terrestrial point-to-point systems”***, proporcionan una evaluación del concepto de configuración de diversidad de espacio de dos antenas para enlaces de radio microondas terrestres fijo con línea de vista. Como aporte del estudio realizado en la investigación, se considera método de evaluación de la diversidad espacial en enlaces microondas fijos terrestres de punto a punto 6 GHz.

- Ekwe. O y Okoro K. (2014) en el artículo denominado ***“Effective Fading Reduction Techniques in Wireless Communication System”*** (Paper, IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, Nigeria) examinaron los fenómenos de desvanecimiento y diversos tipos. Asimismo, discutieron diferentes técnicas empleadas para reducir los efectos del desvanecimiento utilizando diversidad, receptor Rake y ecualización. Se considera como aporte al presente trabajo la descripción del desvanecimiento provocado por la propagación multitrayecto el cual es un impedimento importante cuando se transmite una señal en el canal de comunicación inalámbrica.

- Shruti S. (2014) en el paper titulado ***“Diversity: A Fading Mitigation Technique”*** (Paper, International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering) describe el estudio sobre el problema del desvanecimiento en señales inalámbricas y las diversas técnicas de diversidad para mitigar dichos efectos. Su aporte es valioso para el mayor conocimiento en el estudio de fenómenos que provocan la degradación del rendimiento general del sistema.

- Coulton P. y Khirallah C. (2003) en el paper denominado ***“Applying Spatial Diversity to a Fixed Point-to-Point Microwave Radio System”*** emplearon doble polarización para evaluar la diversidad espacial, presentando una mejora práctica en el rendimiento del sistema de radio punto a punto. Se considera como aporte el método de evaluación de la diversidad espacial.

2.2. Fundamentación teórica de la investigación

2.2.1. Regulación de Frecuencia, canales microondas

El espectro de RF forma parte del espectro electromagnético compartido, y que no puede ampliarse o recrearse y debe ser compartida entre varias aplicaciones, requiere una cuidadosa asignación y coordinación. El órgano que es globalmente responsable de esto es la Unión Internacional de telecomunicaciones (UIT) y el brazo que dirige los asuntos de los sistemas de radio de microondas es la UIT-R (Agencia de Radiocomunicaciones). Cada país tiene un regulador que es responsable de la política nacional y de elegir un plan de canal en particular para que cada banda de frecuencias se implemente en ese país. Es importante entender que sólo porque dos planes son compatibles con la UIT, no los hace compatibles, por lo que sólo se permite un plan por banda de frecuencias en cada país y se requerirá una coordinación entre fronteras en la frontera del país (Manning, 2009, pp.198).

La disposición de frecuencias establecidas por la UIT-R se muestran en la Figura 1, en donde la frecuencia central (f_0) es la frecuencia central de banda media de la cual los demás canales están dispuestos.

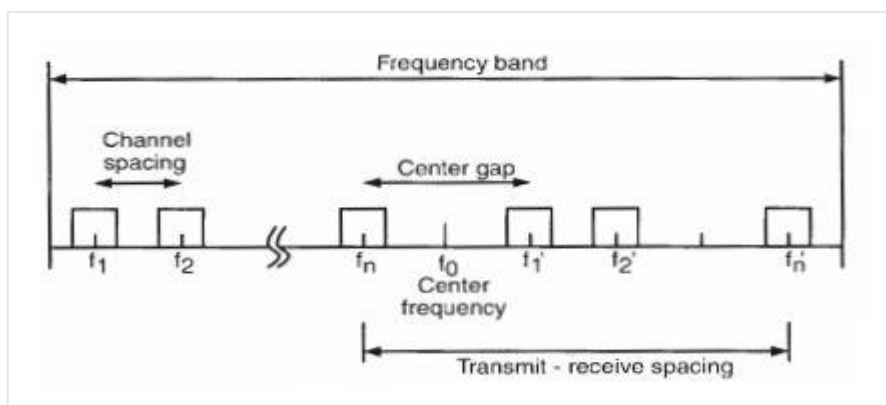


Figura 1:Diagrama de disposición del plan de frecuencia del UIT-R.

Fuente: (Manning, 2009).

Se proporciona una fórmula de la cual se calcula las frecuencias reales en sí, frecuencias reales para una conexión internacional en la banda de frecuencias comprendida desde 7425MHz hasta 7725 MHz, asumiendo para f_0 el valor inicial de 7575 MHz.

$$f_n = f_0 - 154 + 7n \quad \text{y} \quad f_n' = f_0 + 7 + 7n$$

calculando:

$$f_1 = 7575 \text{ MHz} - 154 + 7 \times 1 = 7428 \text{ MHz}$$

$$f_2 = 7575 \text{ MHz} - 154 + 7 \times 2 = 7435 \text{ MHz}$$

$$f_{1'} = 7575 \text{ MHz} + 7 + 7 \times 1 = 7589 \text{ MHz}$$

Se observa el espaciado de canales el valor de (7435MHz -7428MHz) es 7MHz

Además, el espaciado T/R (7589MHz-7428MHz) es 161MHz.

2.2.2 Refracción radioeléctrica

El índice de refracción radioeléctrica de la atmósfera, n , se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (1)$$

donde la refracción radioeléctrica, N , es:

$$N = 77,6 \frac{P_d}{T} + 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (\text{unidades N}) \quad (2)$$

siendo el término seco, N_{seco} , de la refracción radioeléctrica:

$$N_{dry} = 77,6 \frac{P_d}{T} \quad (3)$$

y el término húmedo $N_{húmedo}$, de la refracción radioeléctrica:

$$N_{wet} = 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

donde:

P_d : presión atmosférica seca

P (hPa): presión atmosférica total

e (hPa): presión del vapor de agua

T (K): temperatura absoluta

$$P = P_d + e \quad (5)$$

dado que la ecuación $P_d = P - e$ (2) puede reformularse como:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (6)$$

La ecuación (6) permitirá hacer una aproximación con menor precisión como:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (7)$$

La ecuación (7) expresa los valores de N dentro del 0,02 por ciento del valor obtenido a partir de la ecuación (2) para el rango de temperatura de -50°C a $+40^{\circ}\text{C}$. Para perfiles representativos de temperatura, presión y presión del vapor de agua, véase la Recomendación UIT-R P.835.

2.2.3 Fenómeno de reflexión en enlaces microondas

Es la misma naturaleza de la superficie terrestre y atmosfera que produce los fenómenos en las señales de microondas produciendo efectos variables en la transmisión y recepción de la información, entre ellos el fenómeno de la reflexión.

En la figura 2 se observa un rayo incidente sobre una superficie reflectora, en aquel instante dicho rayo se convierte en un rayo reflejado. Ambos rayos coinciden en el mismo valor de ángulos respecto a la normal de la superficie, es decir el valor del ángulo de incidencia es igual al valor del ángulo de reflexión.

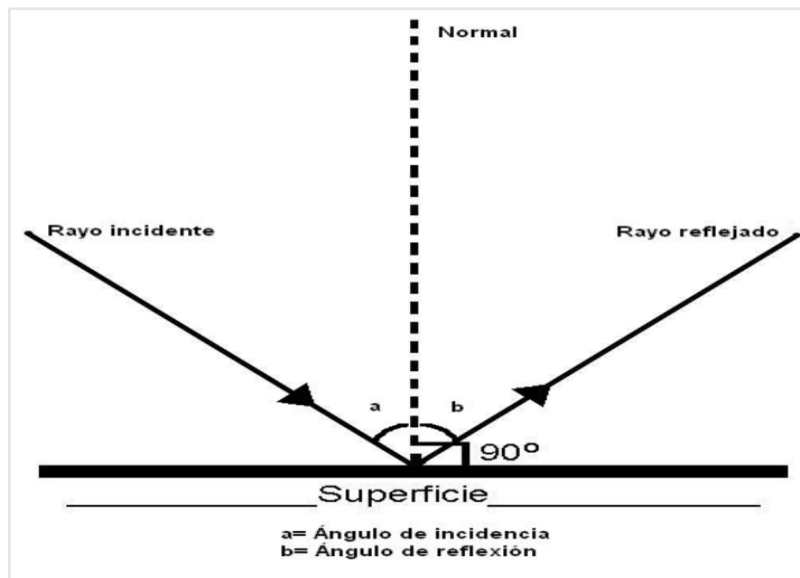


Figura 2: Fenómeno de Reflexión.

Fuente: (Blake, 2004)

Se sabe bien que la superficie de la tierra no es uniforme, así como lo indica la figura 3 los ángulos de incidencia y reflexión para cada parte de la superficie son iguales sin embargo tienen una orientación distinta dispersando la onda reflejada, a esto se le llama reflexión difusa.

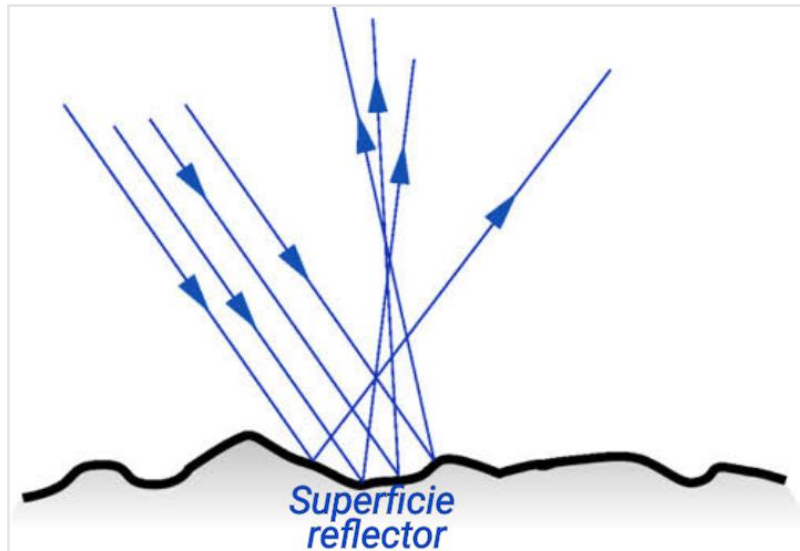


Figura 3:Fenómeno Reflexión Difusa.

Fuente: (Blake, 2004)

2.2.4 Desvanecimientos

La transmisión de señales radioeléctricas siempre está expuestas a sufrir los efectos adversos de la misma naturaleza provocando variabilidad y una caída de potencia en la recepción de la señal.

2.2.4.1 Clasificación de los Desvanecimientos

a) Desvanecimiento Multitrayecto

Se origina por la misma interferencia de los rayos directos y reflejados en la superficie terrestre y capa atmosférica. Provocados por la aparición de varios trayectos de propagación entre el Transmisor y Receptor, es decir las ondas de radio toman caminos diferentes desde su origen y un destino final. Este tipo de desvanecimiento provoca en los radioenlaces digitales tres tipos diferentes de efectos.

- Efecto sobre la interferencia entre símbolos.
- Efectos entre la recuperación de la portadora.
- Efectos entre la recuperación de la temporización.

b) Desvanecimiento Profundos

Este tipo de desvanecimiento se produce cuando la señal de recepción se deteriora a valores aproximados a cero en respuesta a la frecuencia de canal.

c) Desvanecimiento Selectivo

Provoca la distorsión en la amplitud y fase de la señal recibida la cual degrada la calidad del enlace.

2.2.5 Diversidad Espacial

Para evitar los “Desvanecimientos” o al menos reducir su probabilidad, se suele utilizar técnicas de Diversidad. Según (Tomasi, 2003, pág. 769) “En la diversidad espacial hay más de una ruta de transmisión entre un transmisor y un receptor. Cuando existen condiciones atmosféricas adversas en una de las rutas, es improbable que la ruta alterna tenga el mismo degradamiento (Rábanos, 1993). En consecuencia, la probabilidad de recibir una señal aceptable es mayor cuando se usa diversidad espacial que cuando no se usa”.

El esquema consiste en habilitar dos trayectos radioeléctricos, disponiendo de una antena transmisora y dos antenas receptoras separadas verticalmente alguna decena de su longitud de onda. En la figura 4 se muestra el principio del esquema.

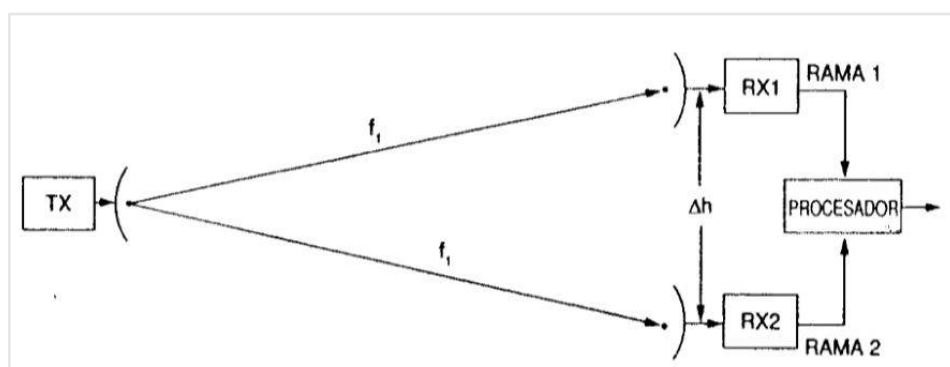


Figura 4:Esquema de Diversidad Espacial.

Fuente: (Rábanos, 1993, pág. 333)

El cálculo de separación entre las antenas se obtiene mediante:

$$\Delta h = \frac{\lambda \cdot d}{4h_1} \geq 150\lambda$$

Donde:

d(m)= longitud de la distancia.

h₁(m)=altura de la antena transmisora.

λ=longitud de onda.

Existen tres ventajas a considerar en el uso de diversidad espacial.

- ✓ Reducción del porcentaje de tiempo en el desvanecimiento
- ✓ Su redundancia permite más fiabilidad en la transmisión de una señal.
- ✓ Se puede conseguir una mejora de calidad en la relación S/N o tasa de error.

La técnica del uso de diversidad espacial resulta una medida preventiva muy eficaz contra el desvanecimiento, debido a la propagación de trayectos múltiples tanto en radioenlaces analógicos y digitales.

2.2.6. Diseño de Diversidad Espacial

Para este cálculo se considera un desfase de 180 grados entre la señal de llegada de la antena principal y la antena secundaria. En las rutas de la línea de visión, la diversidad espacial se implementa generalmente utilizando dos antenas en el receptor con una separación vertical lo suficientemente grande para proporcionar dos señales en las que las degradaciones debidas al desvanecimiento de trayectos múltiples están suficientemente correlacionadas, donde las degradaciones son la distorsión de la señal y la pérdida de potencia de señal. (ITU-R)

2.2.7 Altura de Antenas

Es importante considerar que las alturas de las antenas sobre la superficie terrestre deben ser las mínimas necesarias para lograr los siguientes objetivos a mencionar:

- Reducir la probabilidad de pérdida de visibilidad del rayo en condiciones de propagación anómalas.
- Pérdidas por difracción en situaciones de propagación cuasi normales. Era muy tradicional colocar las antenas en alturas elevadas para que en condiciones atmosféricas desfavorables no presentaran atenuación por difracción. Actualmente se determina las alturas considerando aceptar la posibilidad de interrupciones con una mínima duración de tiempo.

2.3. Marco conceptual

Se definen conceptualmente los principales términos que serán utilizados en la investigación: variables, dimensiones, indicadores, unidad de análisis.

- 2.3.1. Canal de radiofrecuencia microondas

Corresponde a un par de frecuencias portadoras para el traslado de ida y vuelta de una señal de información que se desea transmitir o recibir.

- 2.3.2. Refractividad

“La refracción sucede cuando una onda viaja por un medio y se encuentra repentinamente con otro medio y lo atraviesa, provocando cambio de dirección y ángulo” (A.Tipler, 2010)

Según (Henne,1994) citado por (Albornoz, 2014) “El fenómeno de refracción hace que bajo condiciones normales la trayectoria de una señal de microondas sea cóncava hacia abajo, aumentando el alcance de las señales”

- **2.3.3. Desvanecimiento multitrayecto**

Es el resultado de los múltiples reflejos que se originan en el trayecto radioeléctrico.

- **2.3.4. Deep Fading**

Desvanecimiento de señal mayor a los 6dB en velocidades lentas o rápidas.

Según (Rábanos, 1993) Es toda disminución de la potencia recibida de señal con relación a su valor nominal.

- **2.3.5. Diversidad Espacial**

Técnica que permite mantener estable una señal de radiofrecuencia mediante el uso de antenas en contrafase.

2.4. Hipótesis

2.4.1 General

Un análisis de desvanecimientos por refractividad permitirá estimar alturas de antenas con diversidad espacial en un enlace de interconexión microondas entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján.

2.5. Variables e Indicadores

2.5.1 Variables de estudio

2.5.1.1 Independiente

Análisis de desvanecimientos por refractividad

Definición Conceptual

El análisis de desvanecimientos por refractividad, contempla la elaboración de curvas de señal al variar la altura de antena receptora, elaboración de curvas de respuesta y estimación de coeficientes de correlación ante la variación de refractividad, conforme las capacidades de una herramienta de simulación para el enlace Pacasmayo y Paiján.

Indicadores

- Número de curvas de señal recibida versus altura antena receptora.
- Número curvas de respuesta refractividad main – diversity comparadas.
- Coeficientes de correlación obtenidos para cada curva de respuesta refractividad main – diversity.

2.5.1.2 Dependiente

- Altura de antenas con diversidad espacial

Definición Conceptual

La altura antenas con diversidad espacial, se refieren al valor de altura de antena principal y secundaria obtenidas a partir del análisis de desvanecimiento y refractividad en 02 bandas de frecuencia. En este sentido la respuesta de señal recibida en una de las antenas debe ser complementaria con la otra al variar la refractividad.

Indicadores

Altura de antenas en banda 7 GHz.

Altura de antenas en banda 11 GHz.

2.5.2 Operacionalización de las variables

Tabla N° 1: Operacionalización de la Variable Independiente.

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDAD DE MEDIDA
Análisis de desvanecimiento por refractividad	Desvanecimientos de señal con la variación de altura	Respuesta de señal recibida versus altura de antena receptora	Curvas resultantes de simulación	N° de curvas analizadas
	Respuesta ante variación de refractividad	Correlación entre curvas resultantes señal versus refractividad para antena principal y secundaria	Curvas resultantes de simulación	N° de curvas comparadas

Tabla N° 2: Operacionalización de la Variable Dependiente.

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDAD DE MEDIDA
Alturas de antenas con diversidad espacial	Alturas con diversidad espacial para banda 7 GHz	Valores de altura principal y secundaria Tx / Rx	Reporte de Diseño	metros
	Alturas con diversidad espacial para banda 11 GHz	Valores de altura principal y secundaria Tx / Rx		metros

CAPÍTULO III

III. METODOLOGIA EMPLEADA

3.1. Tipo y Nivel de Investigación

El nivel de investigación propuesto en la presente tesis es del tipo aplicada porque vamos a utilizar fundamentos y teorías ya establecidas.

El tipo de investigación es cuantitativa vamos a reportar datos usando magnitudes numéricas.

3.2. Población y Muestra de Estudio

La población está constituida por todas las observaciones de comportamiento de altura de antenas y refractividad que puedan realizarse en el enlace Pacasmayo y Paiján.

Por tratarse de una condición no determinística no se tiene un número finito de observaciones a poder realizar.

Conforme las capacidades de simulación se observarán 19 cambios de altura de antena transmisora los cuales serán sometidos a la variación de 31 cambios de antena receptora. Estas observaciones se repetirán para dos bandas de frecuencia, haciendo un total de 1178 observaciones, lo cual constituye la muestra a emplear.

3.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación propuesta en la presente tesis es de tipo documental. Se recolectó datos mediante la generación de reportes de simulación del enlace Pacasmayo y Paiján, de manera que se puedan identificar las alturas de antenas con diversidad espacial para dos bandas de frecuencia entre transmisor y receptor correspondientes.

3.4. Técnicas e instrumentos de investigación

3.4.1. Recolección de datos

3.4.1.1 Información de ruta microondas Pacasmayo y Paiján

En la figura 5 se representa el mapa del radioenlace entre las antenas Pacasmayo y Paiján, obtenida con la herramienta de simulación RadioMobile. Se aprecia las latitudes y longitudes de ambas ubicaciones, así como la distancia de dicho enlace 48.6 Km.

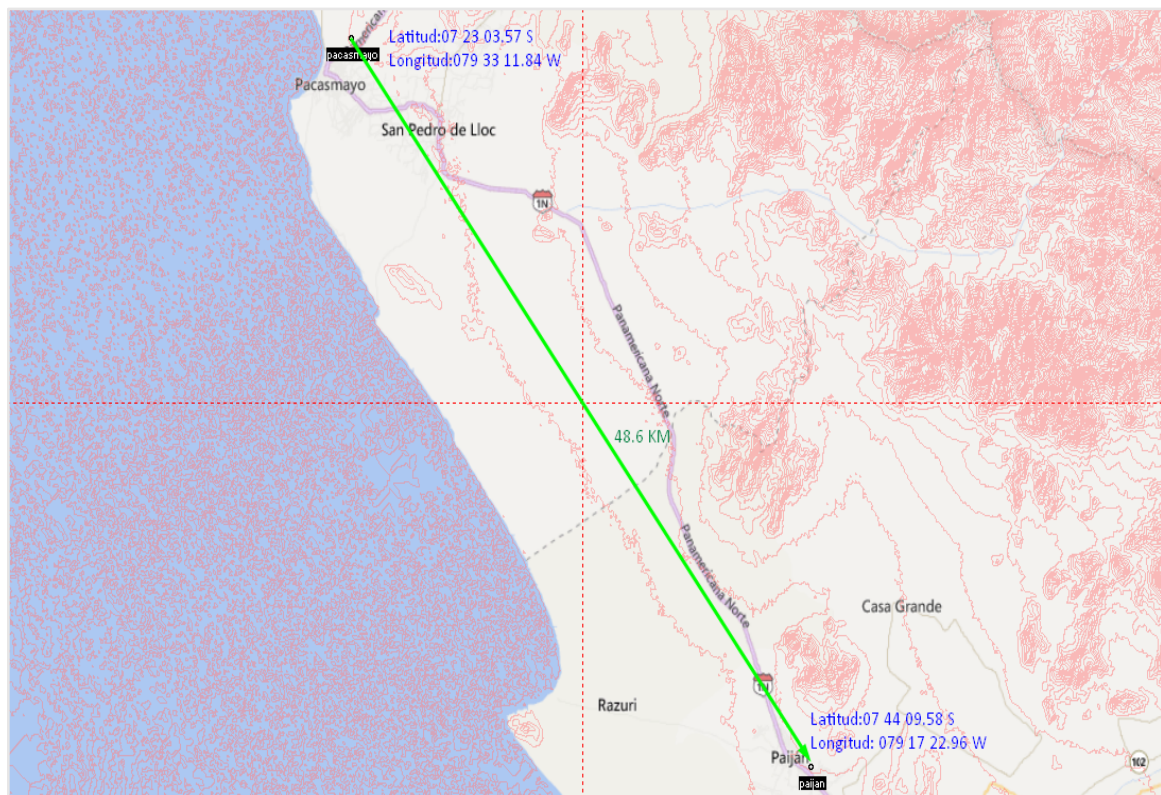


Figura 5: Mapa del radioenlace Pacasmayo y Paiján.

Fuente: software RadioMobile

En la figura 6 se presenta la fotografía de la estructura real de la antena Paiján y en la figura 7 del mismo modo se presenta la fotografía de la antena Pacasmayo.



Figura 6: Fotografía de antena localizada en Paiján.

Tal como se muestra en la Figura 6, del lado derecho se ubica el enlace hacia el sur con Chicama y hacia el lado izquierdo el enlace del norte con Pacasmayo. Los colores de la torre permiten diferenciar y aproximar las alturas en donde se encuentran las antenas microondas siendo fácilmente identificables aquellos que pertenecen a las dorsales por tener un mayor diámetro, en la torre también se aprecia paneles sectoriales para tecnologías inalámbricas 3G y 4G y antenas tambores más pequeñas altas frecuencias para enlaces de corta distancia.



Figura 7: Fotografía de antena localizada en Pacasmayo.

3.4.1.2 Recolección de información para Bandas 7GHz y 11GHz

a. Banda 7 GHz

Considerando la Recomendación ITU-R F.386 (2012), se indica que, para la banda comprendida entre 7125 MHz y 8275 MHz, se tiene una frecuencia central de 7700 MHz. Las ecuaciones para el cálculo a partir de la frecuencia central consideran que, a partir de $f_0 = 7700$ MHz, se tiene:

$$f_n = f_0 - 295 + 40n$$

$$f_{n'} = f_0 + 15 + 40n$$

donde f_n y $f_{n'}$ son las frecuencias de ida y vuelta de cada canal duplexado en frecuencia (FDD) expresadas en MHz. De esta forma se presenta la Tabla N°3 donde se muestran las frecuencias y canales disponibles en la banda de operación.

Tabla N° 3: Frecuencia de ida y vuelta Banda 7GHz.

Canal		f.ida /f.vuelta		valor frecuencia	
CH	1	f_1	=	7745	MHz
		f_1'	=	8025	MHz
CH	2	f_2	=	7785	MHz
		f_2'	=	8065	MHz
CH	3	f_3	=	7825	MHz
		f_3'	=	8105	MHz
CH	4	f_4	=	7865	MHz
		f_4'	=	8145	MHz
CH	5	f_5	=	7905	MHz
		f_5'	=	8185	MHz
CH	6	f_6	=	7945	MHz
		f_6'	=	8225	MHz
CH	7	f_7	=	7985	MHz
		f_7'	=	8265	MHz

Se eligió el canal CH04, para representar las frecuencias de ida y vuelta centrales de la banda de 7GHz, los cuales serán configurados en la herramienta de simulación.

b. Banda 11GHz

Considerando la Recomendación ITU-R F.387 (2012), se indica que, para la banda comprendida entre 10700 MHz y 11700 MHz, se tiene una frecuencia central de 11200 MHz. Las ecuaciones para el cálculo a partir de la frecuencia central consideran que, a partir de $f_0 = 11200$ MHz, se tiene:

$$f_n = f_0 - 525 + 40n$$

$$f_n = f_0 + 5 + 40n$$

donde f_n y f_n' son las frecuencias de ida y vuelta de cada canal duplexado en frecuencia (FDD) expresadas en MHz. De esta forma se presenta la Tabla N°4 donde se muestran las frecuencias y canales disponibles en la banda de operación.

Tabla N° 4: Frecuencia de ida y vuelta Banda 11GHz.

Canal		f.ida/f.vuelta		valor frecuencia	
CH	1	f_1	=	10715	MHz
		f_1'	=	11245	MHz
CH	2	f_2	=	10755	MHz
		f_2'	=	11285	MHz
CH	3	f_3	=	10795	MHz
		f_3'	=	11325	MHz
CH	4	f_4	=	10835	MHz
		f_4'	=	11365	MHz
CH	5	f_5	=	10875	MHz
		f_5'	=	11405	MHz
CH	6	f_6	=	10915	MHz
		f_6'	=	11445	MHz
CH	7	f_7	=	10955	MHz
		f_7'	=	11485	MHz
CH	8	f_8	=	10995	MHz
		f_8'	=	11525	MHz
CH	9	f_9	=	11035	MHz
		f_9'	=	11565	MHz
CH	10	f_{10}	=	11075	MHz
		f_{10}'	=	11605	MHz

Se eligió el canal CH06, para representar las frecuencias de ida y vuelta centrales de la banda de 11GHz, los cuales serán configurados en la herramienta de simulación.

3.4.1.3 Recolección de información de Equipos de Transmisión de radio

A continuación, en la siguiente Tabla N°5 se presenta la descripción de los equipos de radiotransmisión sugeridos para radioenlaces, cabe destacar que estos valores son referenciales puesto que los cálculos y simulaciones se realizarán en base del modelo de propagación tomando en cuenta las diferencias obtenidas en potencia de recepción es decir las diferencias deben ser las mismas más allá de las características técnicas del equipo.

Tabla N° 5: Equipos de Radiotransmisión.

MODEL 9667 LSY	Technical Especification	
	RF Frequency Band (GHz)	6-23 GHz
	RF Channel Arrangements (ITU-R)	F.384
	RF Channel Spacing (MHz)	40MHz
	Transmission Capacity (per RF Channel)	1xSTM-1 or 2xSTM-1
	Modulation	QPSK1717QAM/32QAM/128QAM64 QAM/256QAM
	Transmitted Power (ATPC máximo) dBm	QPSK1717QAM/32QAM/128QAM64 QAM/256QAM
	Receiver Threshold 64QAM; BER 10 ⁻⁶ dBm	-74.7 dBm
	Demodulation	Coherent
	Spectrum Shaping	Raised Cosine
	Frequency Reuse	YES
	Switching Configuration	N+0; N+1;1+0:1+1;XPIC
	Switching Type	hitless
HPX8-65-D1A	Technical Especification	
	Diameter (m)	2.4m
	Operating Frequency Band (GHz)	6.425GHz – 7.125GHz
	Gain, Mid Band (dBi)	42dBi
	Front to Back Ratio (dB)	68dB
	Beamwidth (H/V) (°)	1.3
EWP64-65	Technical Especification	
	Conductor Material	Corrugated copper
	Operating Frequency Band (GHz)	6.425GHz – 7.125GHz
	Return Loss (VSWR)	1.06
	Attenuation (6.6 GHz – dB/m)	0.051dB/m

3.4.2. Procesamiento de información

3.4.2.1. Proceso de Simulación

El proceso de simulación es utilizado para realizar una estimación del comportamiento del enlace bajo diferentes condiciones de alturas posibles en la cual se puedan considerar en el diseño del enlace entre Pacasmayo y Paiján para las banda de frecuencias estudiadas, a la vez obtenidas aquellas alturas de antenas que posean el mejor perfil que permitan complementarse conforme al requerimiento de diversidad espacial se podrá evaluar el comportamiento que tengan en cuanto a su respuesta frente a condiciones climáticas cambiantes, esto es posible con el software de simulación RadioMobile.

Se procede a describir las principales pantallas de configuración asociadas a la herramienta de simulación RadioMobile. La Figura 8 muestra una captura de pantalla con la configuración utilizada para reproducir el comportamiento de la ruta Pacasmayo y Paiján en el simulador de enlaces microondas. Se muestra la configuración de la frecuencia de ida del canal microondas 04, el cual se ha dividido en la frecuencia mínima de 7865 MHz, y máxima de 8145 MHz, conforme el ancho de banda establecido por la recomendación ITU-R F.684, el cual posee un valor de 40 MHz.

Para el escenario de región Costa, buscado en la presente investigación, la herramienta de simulación ofrece la opción de configurar el tipo de clima desértico, para emular el comportamiento desértico y con altas temperaturas, propios de la región costera peruana.

En la sección **Parameters** el parámetro de refractividad se encuentra resaltado en color rojo en la Figura 8. Este parámetro se encuentra configurado en su valor por defecto 301 Nunits, lo cual indica condiciones normales de propagación. En los cuadros de color verde y color azul se configuraron las frecuencias mínimas y máximas respectivamente para el canal 4 de la banda de 7GHz.

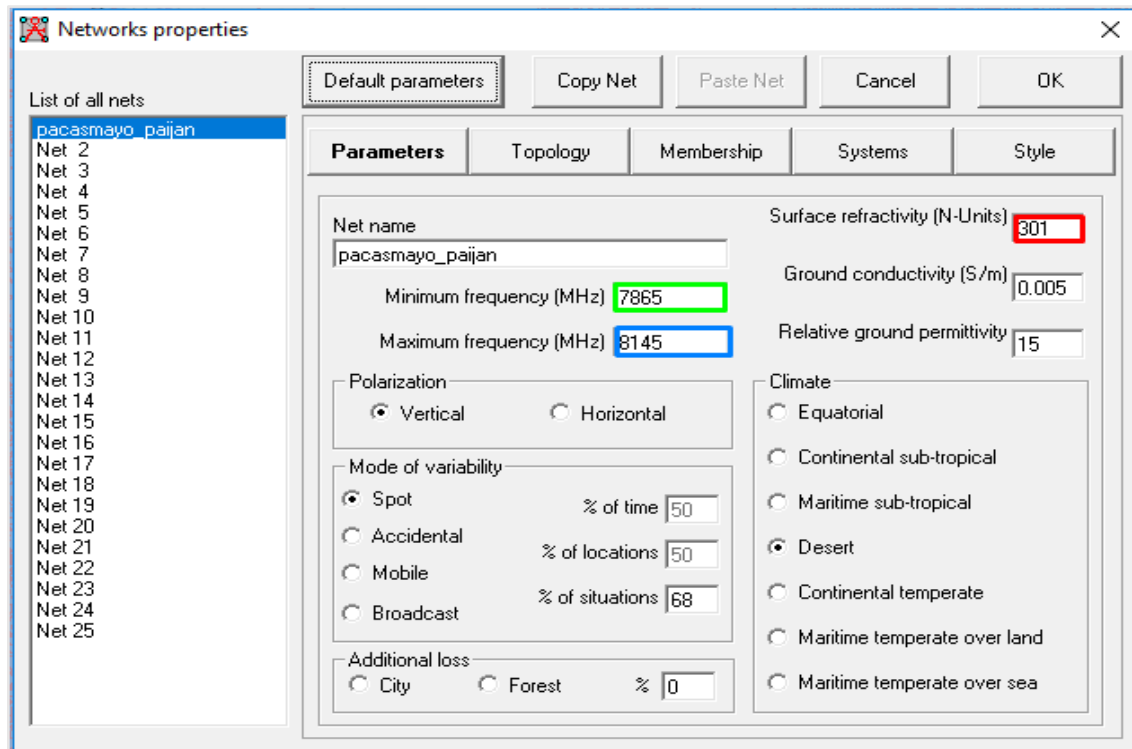


Figura 8:Configuración de frecuencias.

Se realizo el mismo proceso de configuración para la banda de 11GHz con sus frecuencias min:10915 MHz, max:11445 MHz.

La sección **Topology**, se usa para configurar la data Net por ser la más apropiada en configuraciones de redes inalámbricas punto a punto y punto multipunto. Tal como se muestra en la Figura 9.

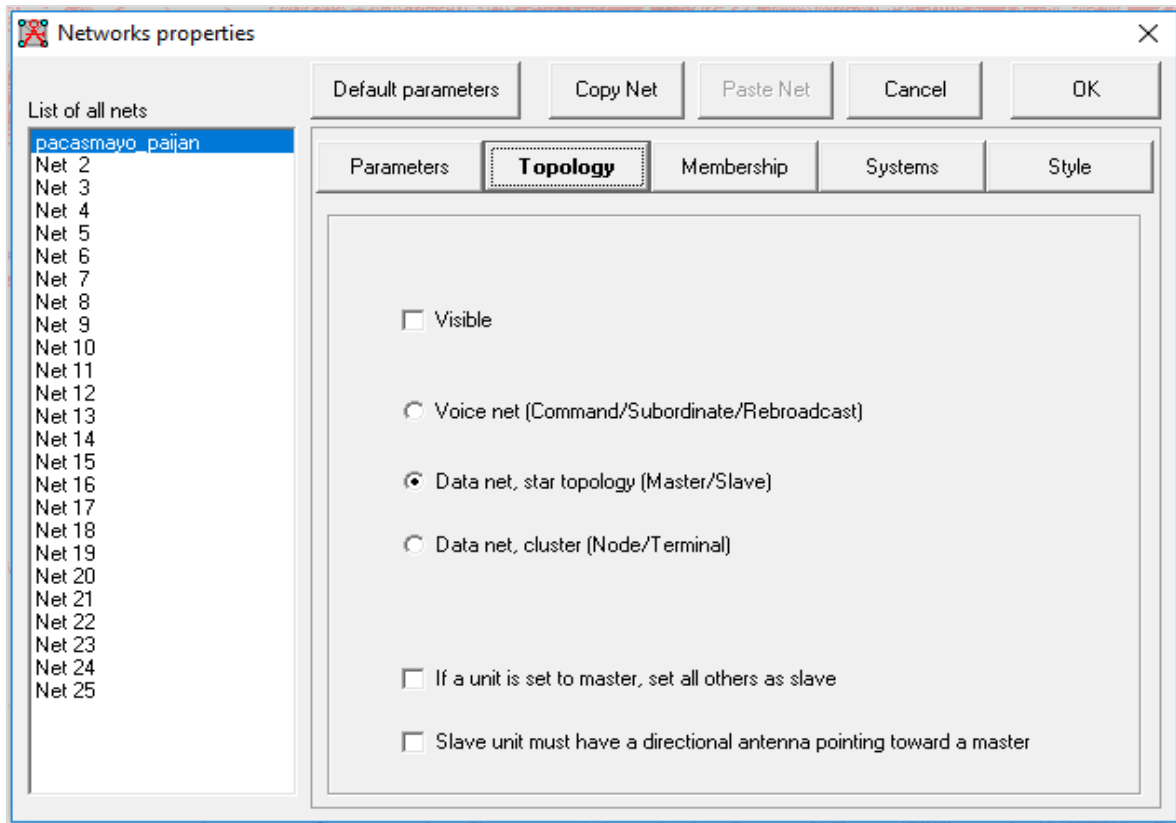


Figura 9: Captura de pantalla de la sección Topology.

En la Figura 10, se muestra la captura de pantalla de la sección **Membership**, la cual permite vincular las estaciones a sus equipamientos y a las estaciones con las cuales formaran el enlace de comunicación.

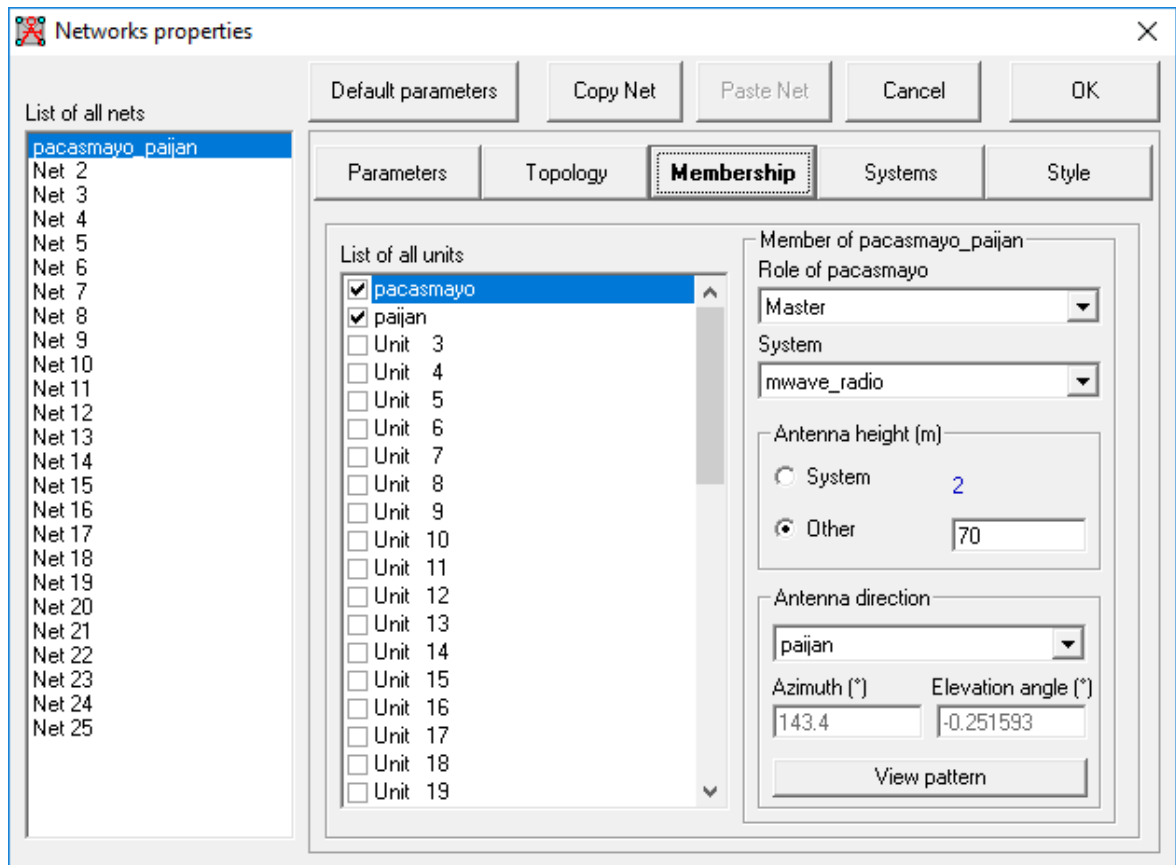


Figura 10:Captura de pantalla de la sección Membership.

La sección **Sytems** permite la configuración de características técnicas del conjunto transceptor, antena y línea de transmisión que serán empleadas en las estaciones. Así como se aprecia en la Figura 11.

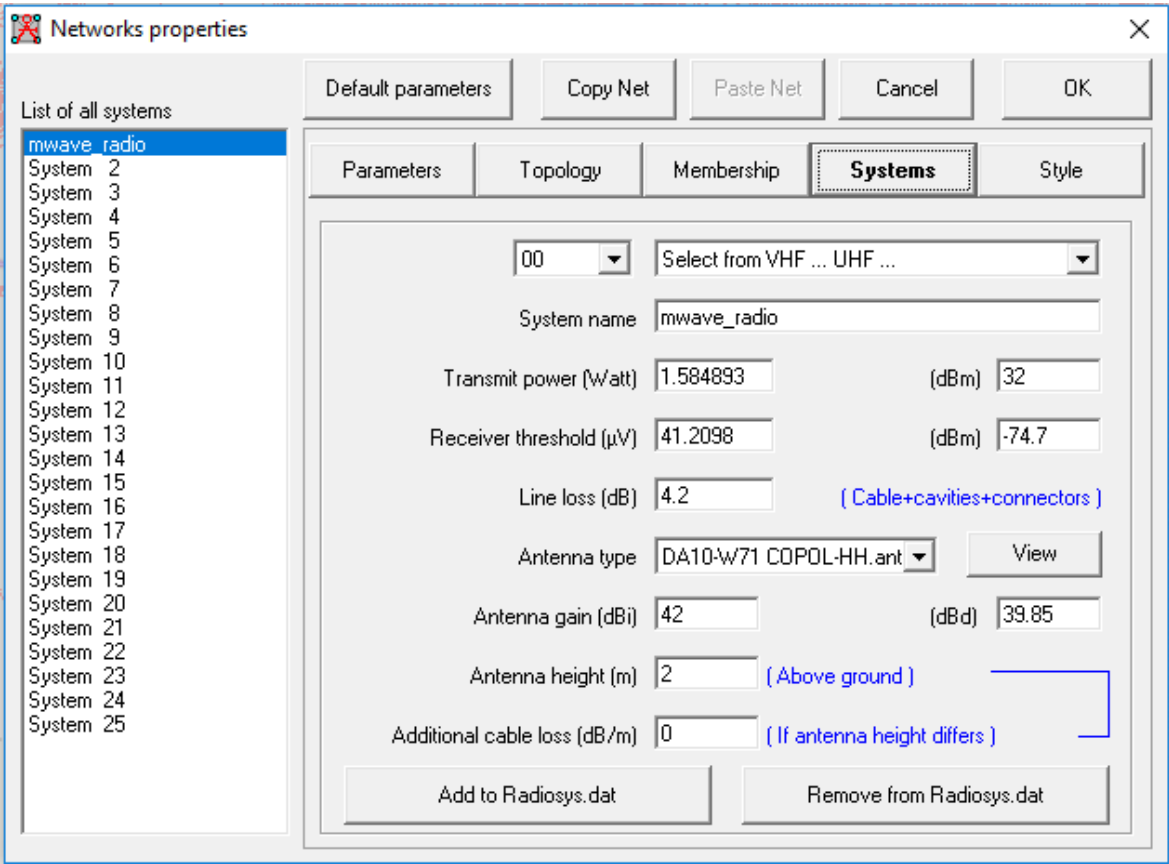


Figura 11:Captura de pantalla de la sección Membership.

A continuación, se procedió a variar las alturas para cada banda descrita anteriormente, en la cual se mantiene constante la altura de la antena transmisora entre los valores de 45 a 90 metros y en cada altura de dicha transmisora se varió la altura de las receptoras entre 30 a 90 metros con intervalos de 2 metros. En la figura 12 se muestra la variación de la altura de la receptora para la altura de la transmisora de 45 metros.

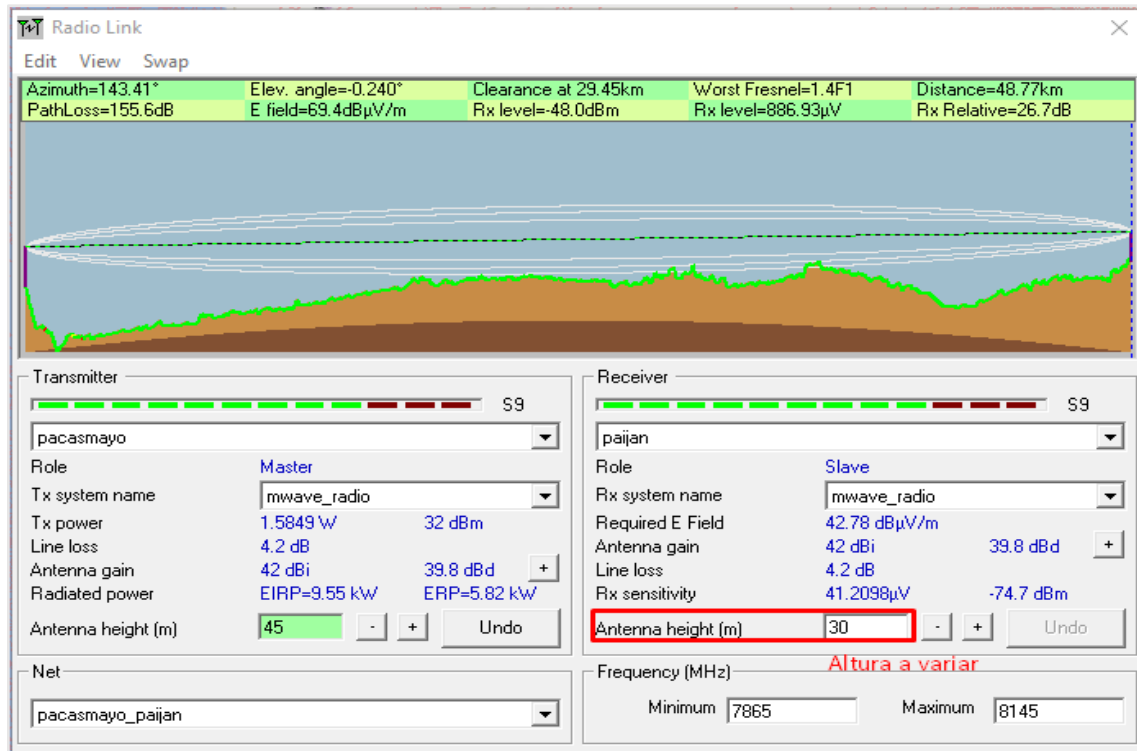


Figura 12: Variación de altura en antena receptora.

De este modo se obtiene la primera gráfica de la antena transmisora, para este caso de 45m, tal como se muestra en la figura 13.

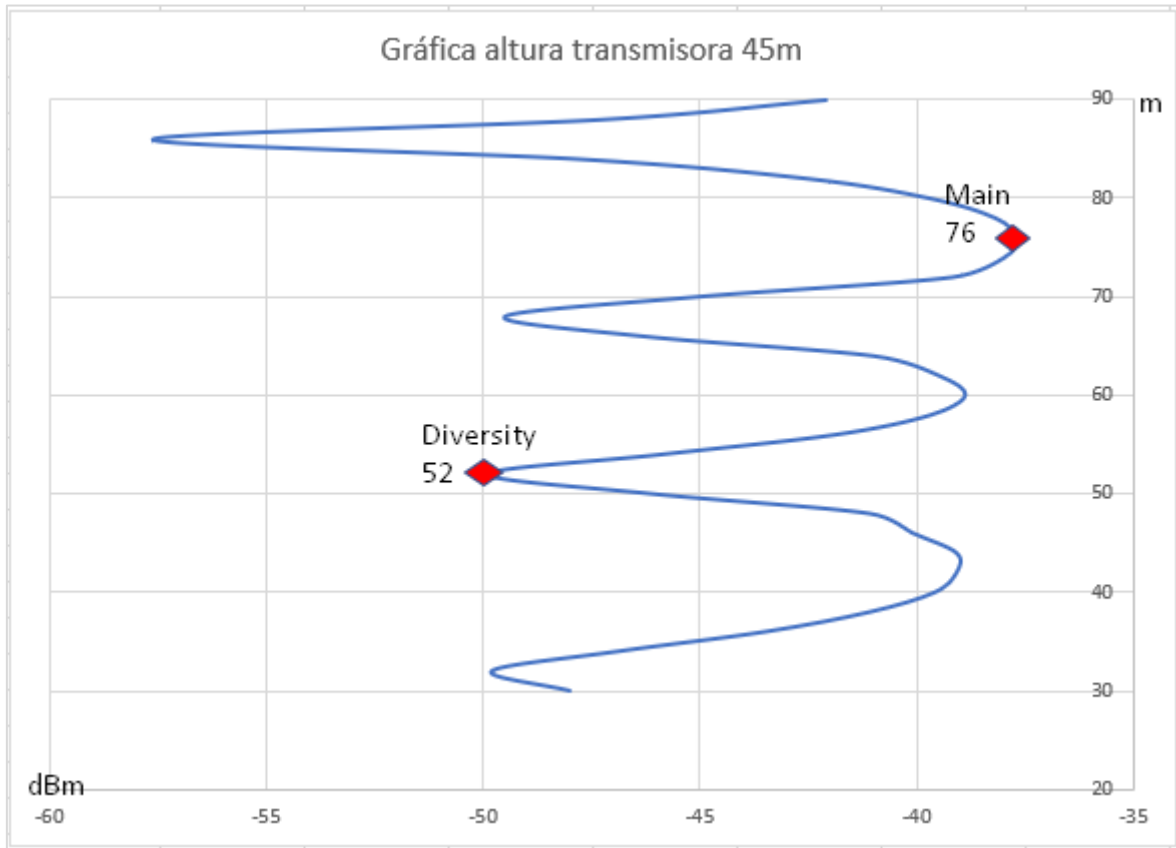


Figura 13:Gráfica de potencia recibida a diversas alturas receptoras para transmisora 45m.

En la figura 13 se resaltan las alturas de 76m para Main y 52m para Diversity, por poseer condición complementaria en cuanto a la potencia recibida en cada altura seleccionada mientras que el Main presenta una potencia alta en el escenario simulado, el Diversity posee una potencia baja, por tanto, por el principio de diversidad espacial si alguna de estas alturas decae en la potencia de su señal, la otra altura debe complementarla.

Con aquellos valores del Main y Diversity se procede a evaluar su comportamiento ante una variación climática. Esto se realiza modificando los niveles surface refractivity (N-unit) desde 250 hasta 400 variando de 10 en 10, de este modo se logra obtener la gráfica de Refractividad, tal como se muestra en la figura 14.

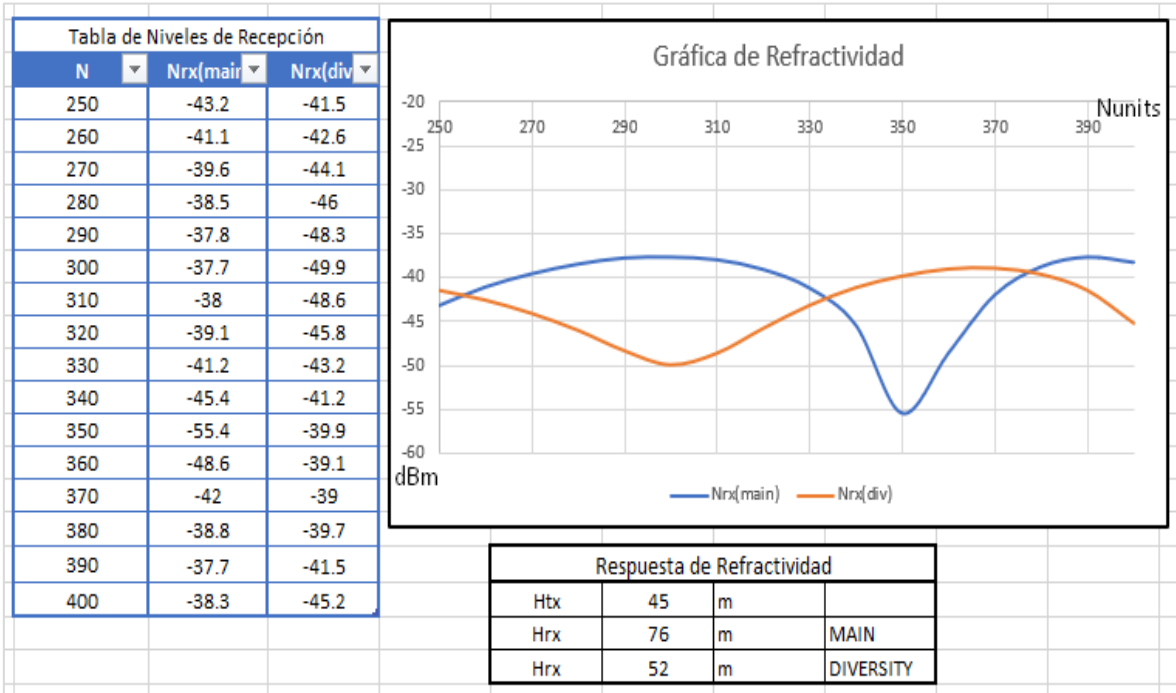


Figura 14:Gráfica de Refractividad.

En la Gráfica de Refractividad se observa que las señales correspondientes a Main y Diversity se encuentran deformadas y no se aprecia una complementación simétrica en ningún punto de cruce. Por lo tanto, no se satisfacen requerimientos esperados de diversidad espacial para la altura de 45 metros en la antena transmisora. Finalmente, en la tabla Respuesta de Refractividad se aprecia los valores de Main y Diversity para una altura fija de 45 metros de la transmisora.

Como paso final para poder estimar el grado de complemento de las respuestas de ambas antenas con los valores de los niveles de recepción de Main y Diversity, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson en el cual su valor debe ser más cercano a 1 para poder evaluar que exista una correlación perfecta o más cercana posible a una complementación ideal entre ambas alturas de antenas. De lo descrito se muestra la figura 15, donde se aprecia la Tabla de Niveles de Recepción en la cual se usará los valores para generar el Grafico de Dispersión.

En el Grafico de Dispersión se observa los puntos del cual se formará una ecuación “ $y = 0.845x - 78.136$ ” y el Coeficiente de Pearson “ $R^2 = 0.3746$ ” para este caso el valor buscado en el Coeficiente de Pearson debe ser próximo a 1.

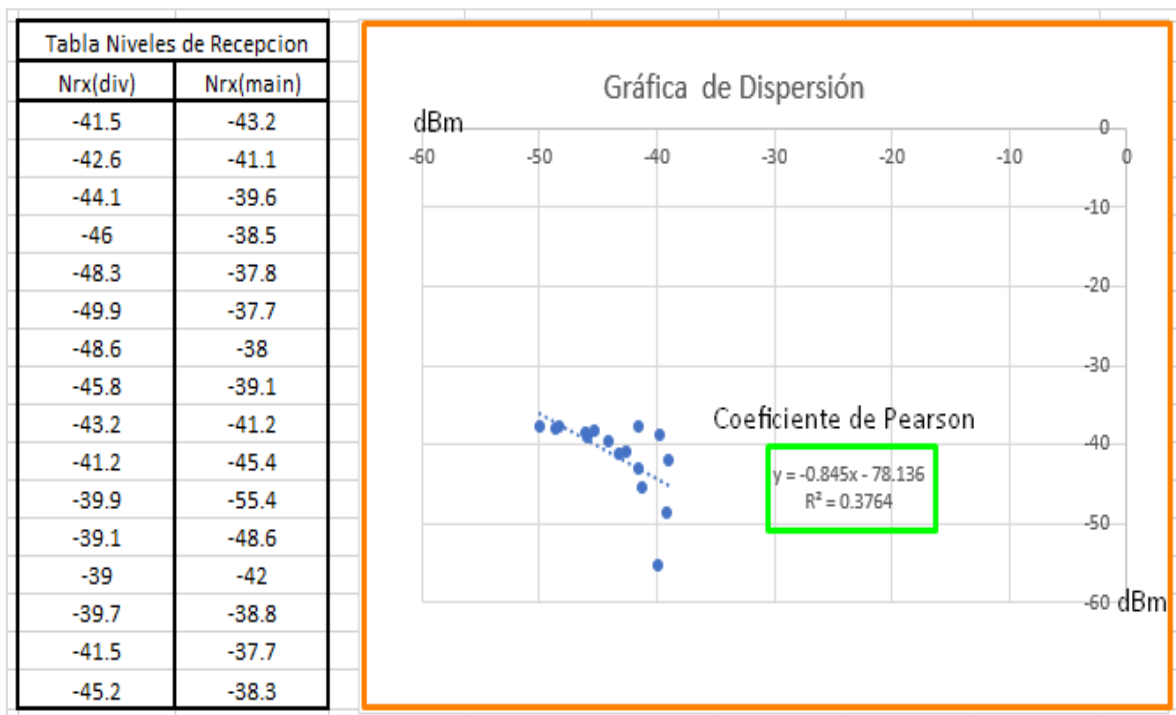


Figura 15:Gráfica de Dispersión.

3.5. Procesamiento y Análisis de Datos

3.5.1. Evaluación de valores de altura de antena en banda de 7GHz

Se describen 02 muestras obtenidas en el simulador para la banda de 7GHz en lo cual se han elegido 01 resultado no favorable de 60 metros y 01 resultado favorable de 70 metros

A continuación, se presenta en sus respectivas gráficas.

3.5.1.1. Transmisora de 60m

En la figura 16 se muestra el caso no favorable en la cual se consideró las alturas de 76m y 42m como Main y Diversity respectivamente.

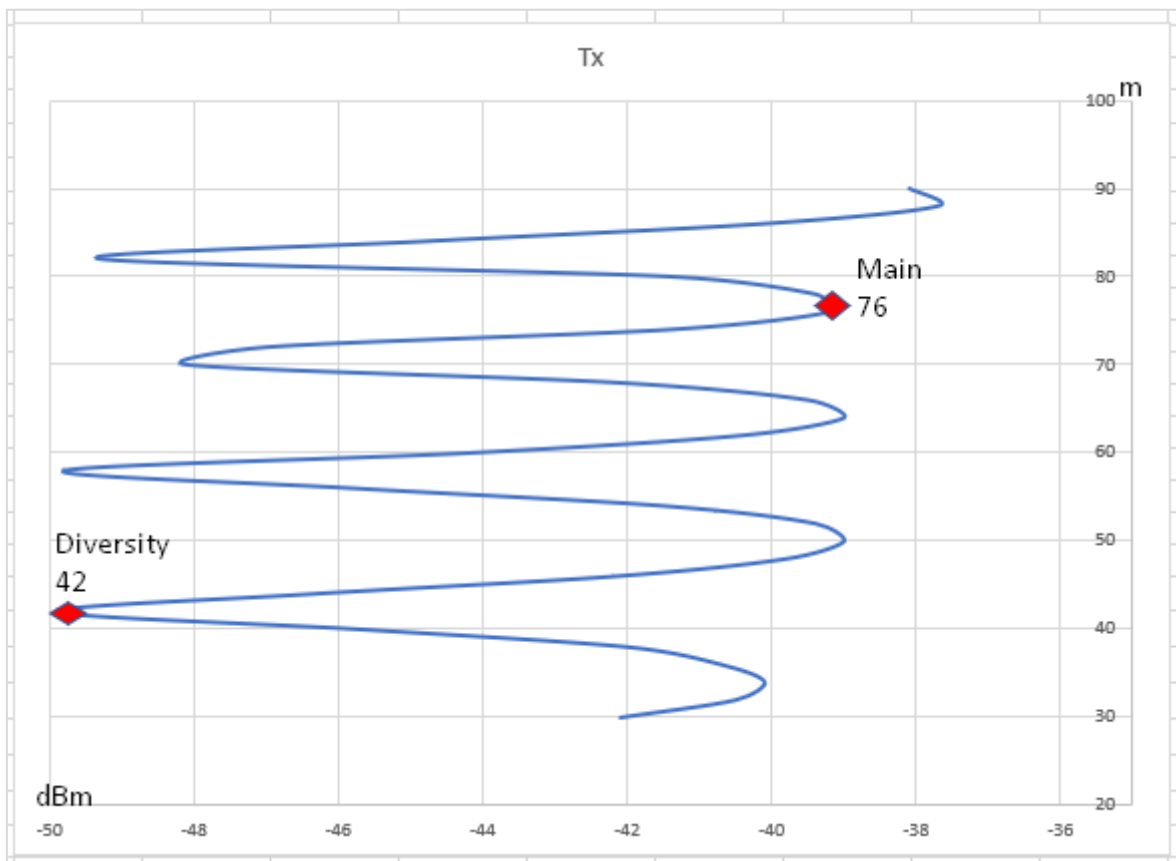


Figura 16: Identificación de posibles alturas de recepción con diversidad espacial para altura de antena transmisora 60m.

Posteriormente con los valores Main=76m y Diversity =42m, se realizó el cálculo para la gráfica de refractividad tal como se muestra en la figura 17, donde se aprecia la respectiva Tabla de niveles de recepción, así como la tabla de Respuesta de Refractividad. Para este caso se observa en la gráfica una anomalía en la complementación de las señales.

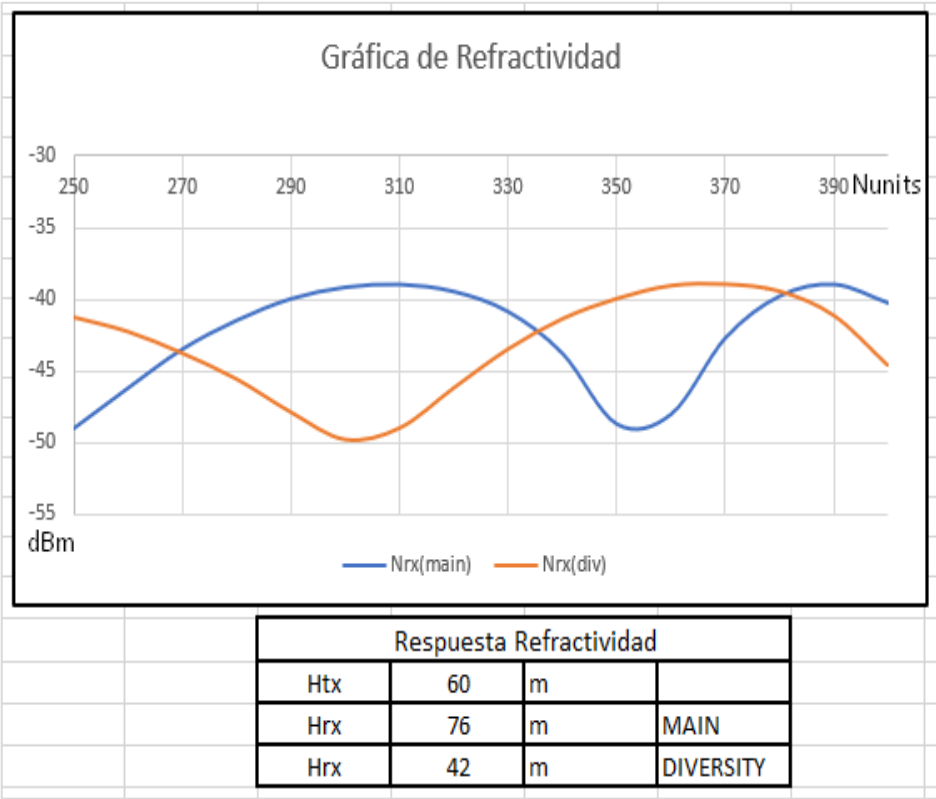


Figura 17:Respuesta a la variación de refractividad para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 60m).

Finalmente se obtuvo la gráfica de dispersión como se aprecia en la figura 18 en la cual se aprecia la tabla de Nivel de Recepción y un valor no próximo a 1.

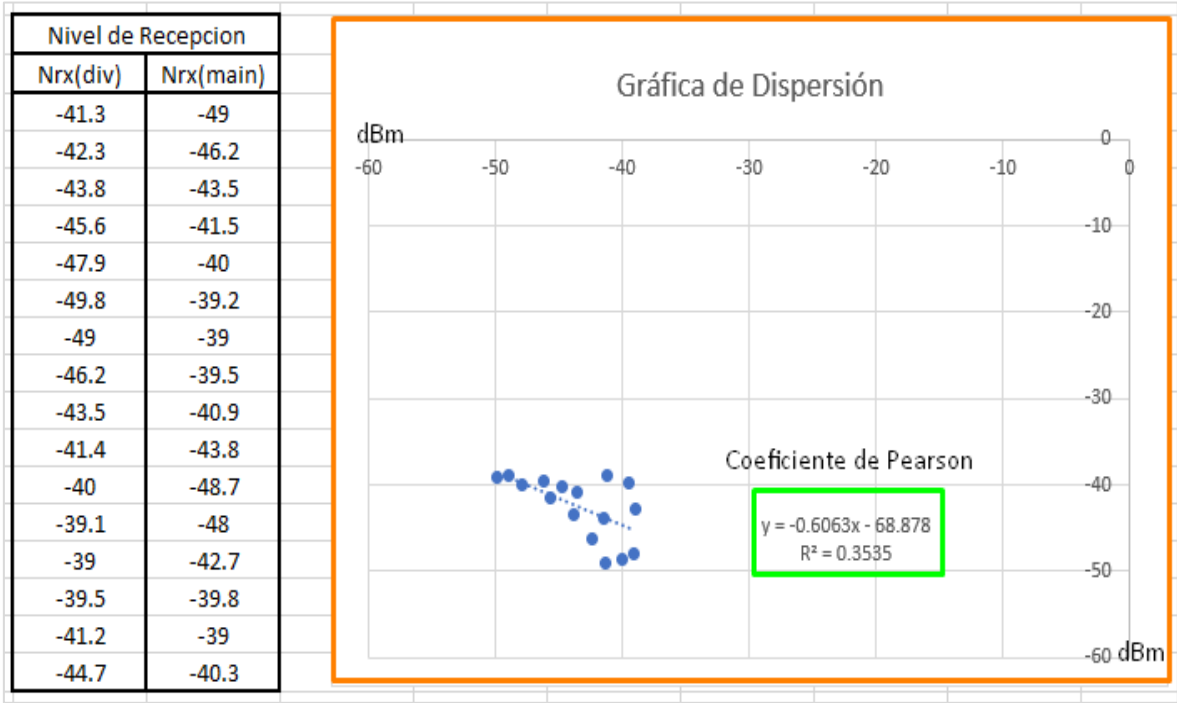


Figura 18: Evaluación de coeficiente de correlación para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 60m).

3.5.1.2. Transmisora de 70m

En la figura 19 se muestra el caso favorable en la cual se consideró las alturas de 44m y 38m como Main y Diversity respectivamente.

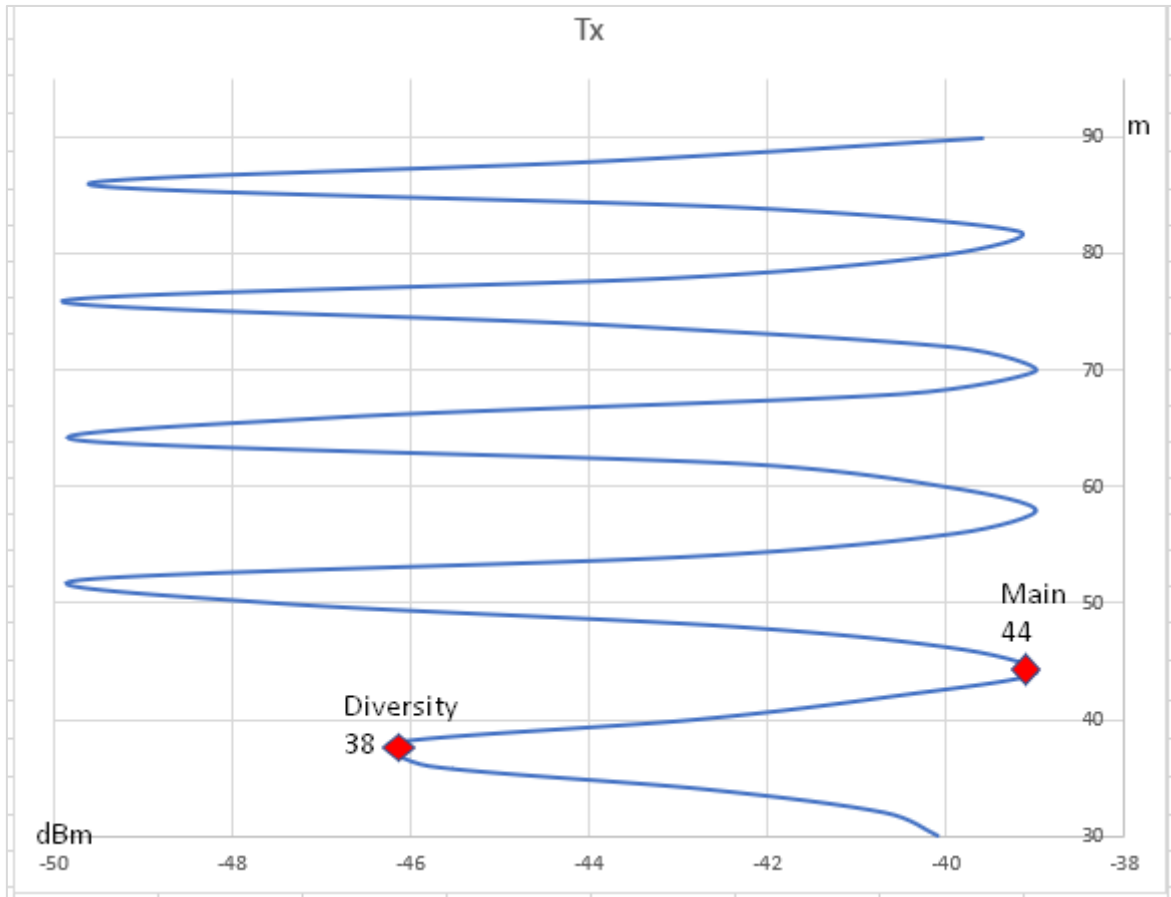


Figura 19: Identificación de posibles alturas de recepción con diversidad espacial para altura de antena transmisora 70m.

Posteriormente con los valores Main=44 y Diversity =38, se realizó el cálculo para la gráfica de refractividad, así como se muestra en la figura 20. Se aprecia la respectiva Tabla de niveles de recepción, así como la tabla de Respuesta de Refractividad. Para este caso se observa en la gráfica una mejor complementación simétrica de las señales.

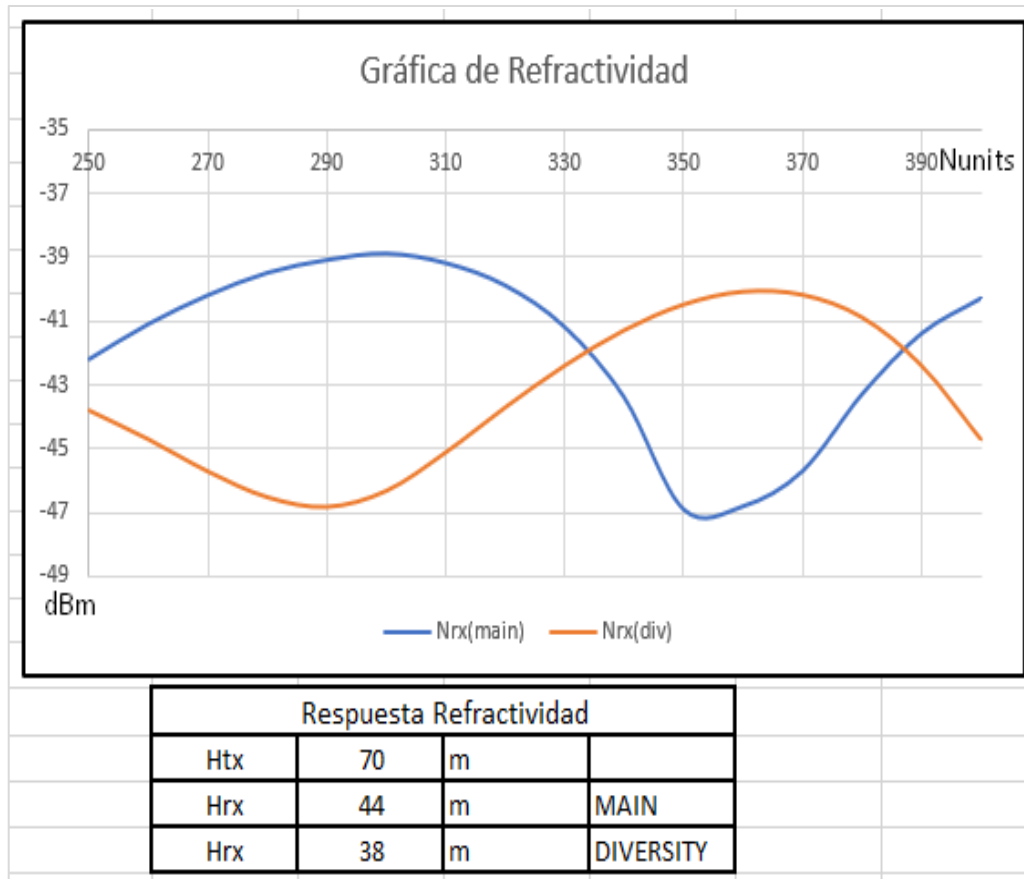


Figura 20: Respuesta a la variación de refractividad para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 70m).

Finalmente se obtuvo la gráfica de dispersión como se aprecia en la figura 21 en la cual se aprecia la tabla de Nivel de Recepción y un valor próximo a 1.

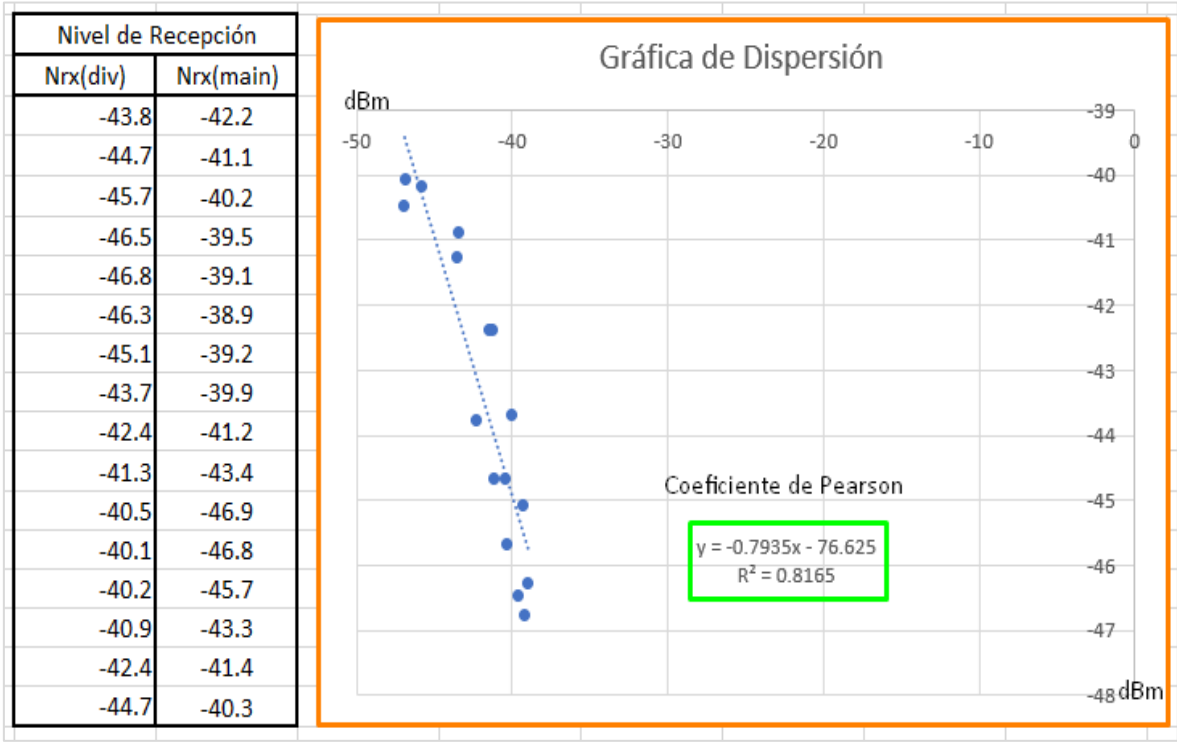


Figura 21:Evaluación de coeficiente de correlación para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 70m).

A continuación, se muestra la Tabla N°6 con los mejores resultados obtenidos en la Banda de 7GHz. Se aprecia los valores seleccionados de 60m 70m y 72m para la antena transmisora con sus respectivas alturas Main y Diversity considerando que con aquellos valores se obtuvieron los mejores coeficientes de Correlación de Pearson además porque la altura de la antena transmisora se ubica entre los rangos límites de la estructura real de una antena.

Tabla N° 6: Selección de alturas con mejores coeficientes de correlación Banda 7GHz.

TABLA DE RESULTADOS BANDA 7 GHZ												
TX(m)	50	55	60	64	68	70	70	70	72	78	82	84
M(m)	70	68	76	62	72	70	58	44	68	66	50	62
D(m)	64	62	70	56	66	64	52	38	62	60	44	56
$\Delta h(m)$	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
%P	70%	69%	72%	69%	70%	69%	69%	81%	72%	68%	72%	68%

Donde:

$T_x(m)$ = Altura de antena transmisora

M (m) = Altura de antena principal (Main)

D (m) = Altura de antena diversidad (Diversity)

$\Delta h(m)$ = Diferencia de altura entre Main y Diversity

% P= Porcentaje del coeficiente de Pearson

3.5.2 Evaluación de alturas para 11 GHz

Se describe 02 muestras obtenidos en el simulador de la banda de 11GHz para lo cual se han elegido 01 resultado no favorable de 50 metros y 01 resultado favorable de 68 metros

A continuación, se presenta en sus respectivas gráficas.

3.5.2.2 Transmisora de 50m

En la figura 22, se presenta el resultado no favorable en la cual se consideró las alturas de 46m y 38m como Main y Diversity respectivamente.

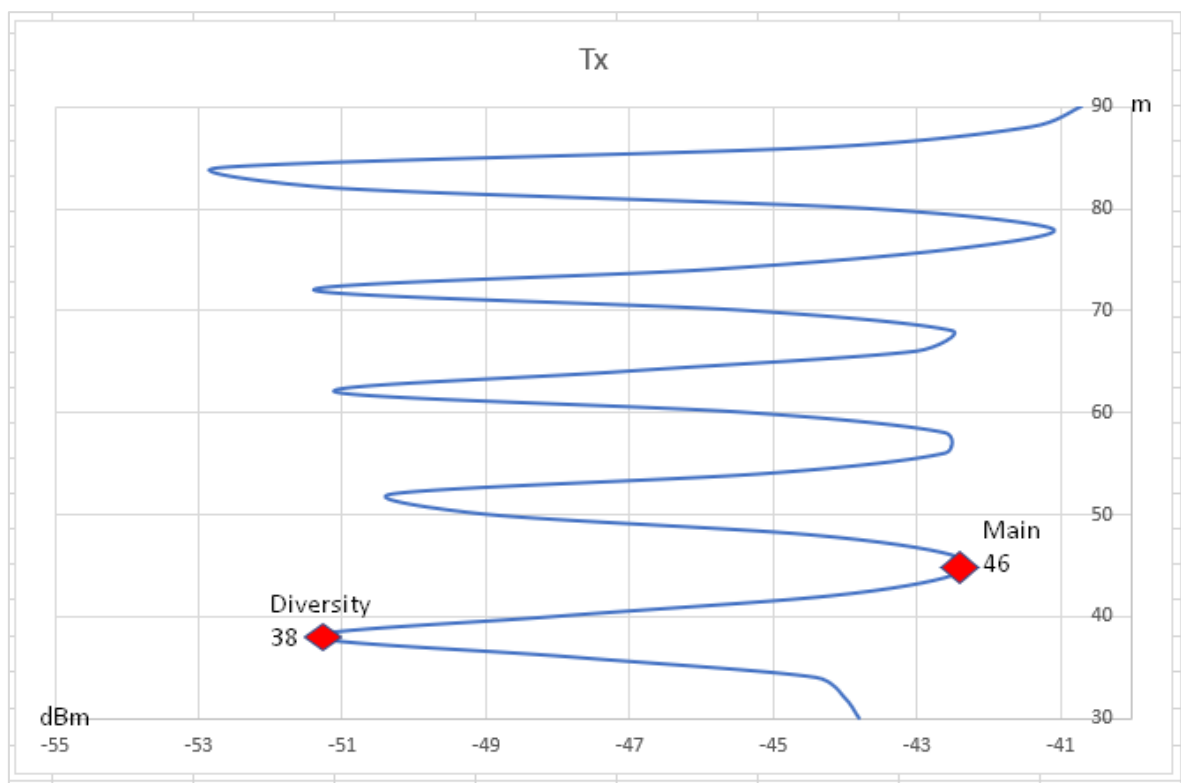


Figura 22: Identificación de posibles alturas de recepción con diversidad espacial para altura de antena transmisora 50m.

Posteriormente con los valores Main=46 y Diversity =38 se realizó el cálculo para la gráfica de refractividad, así como se muestra en la figura 23, se aprecia en la respectiva Tabla de niveles de recepción, así como la tabla de Respuesta de Refractividad. Para este caso se observa en la gráfica una anomalía en la complementación de las señales.

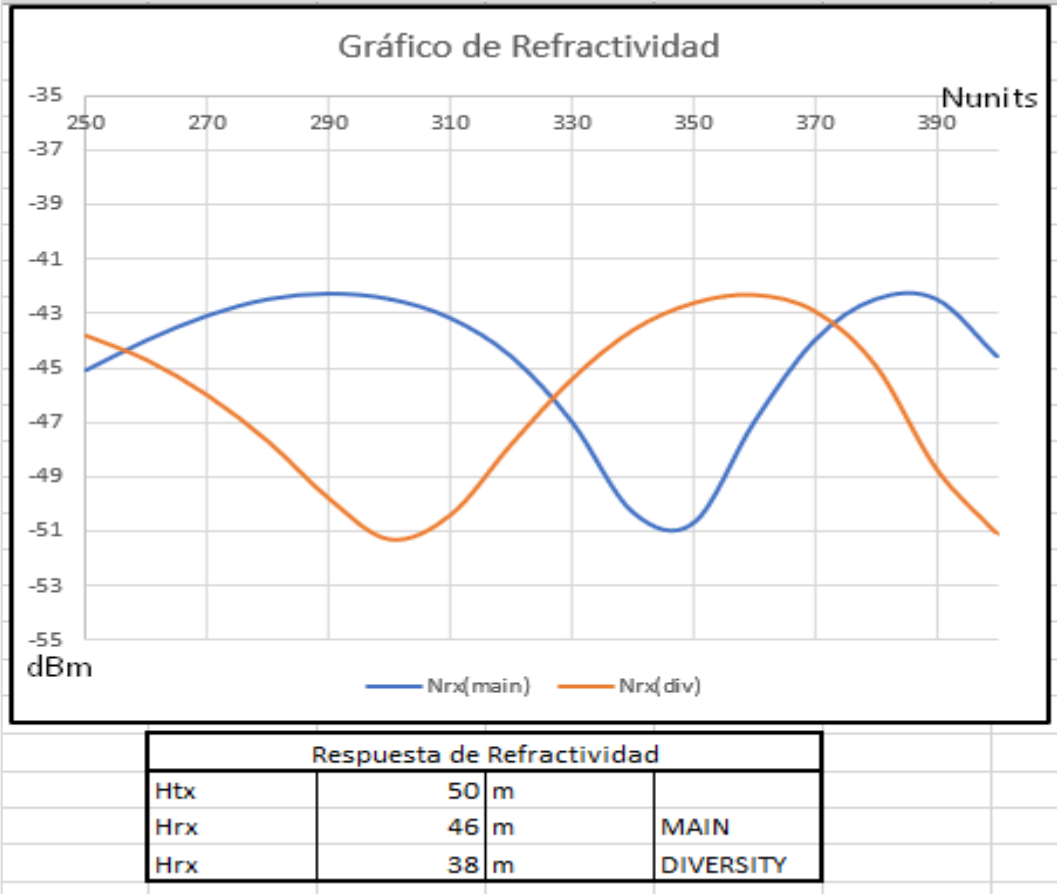


Figura 23: Respuesta a la variación de refractividad para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 50m).

Finalmente se obtuvo la gráfica de dispersión como se aprecia en la figura 24 en la cual se aprecia la tabla de Nivel de Recepción y un valor no próximo a 1.

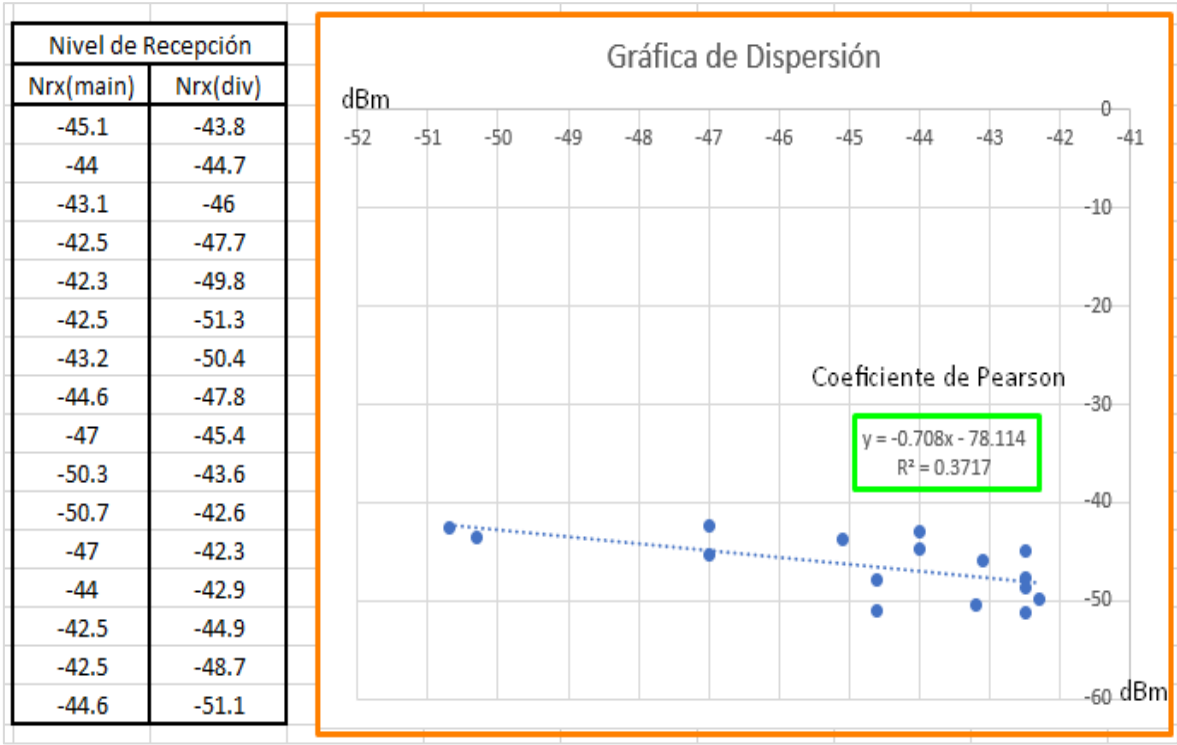


Figura 24:Evaluación de coeficiente de correlación para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 50m).

3.5.2.2. Transmisora de 68m

En la figura 25, se presenta un resultado favorable en el cual se consideró las alturas de 74m y 70m como Main y Diversity respectivamente.

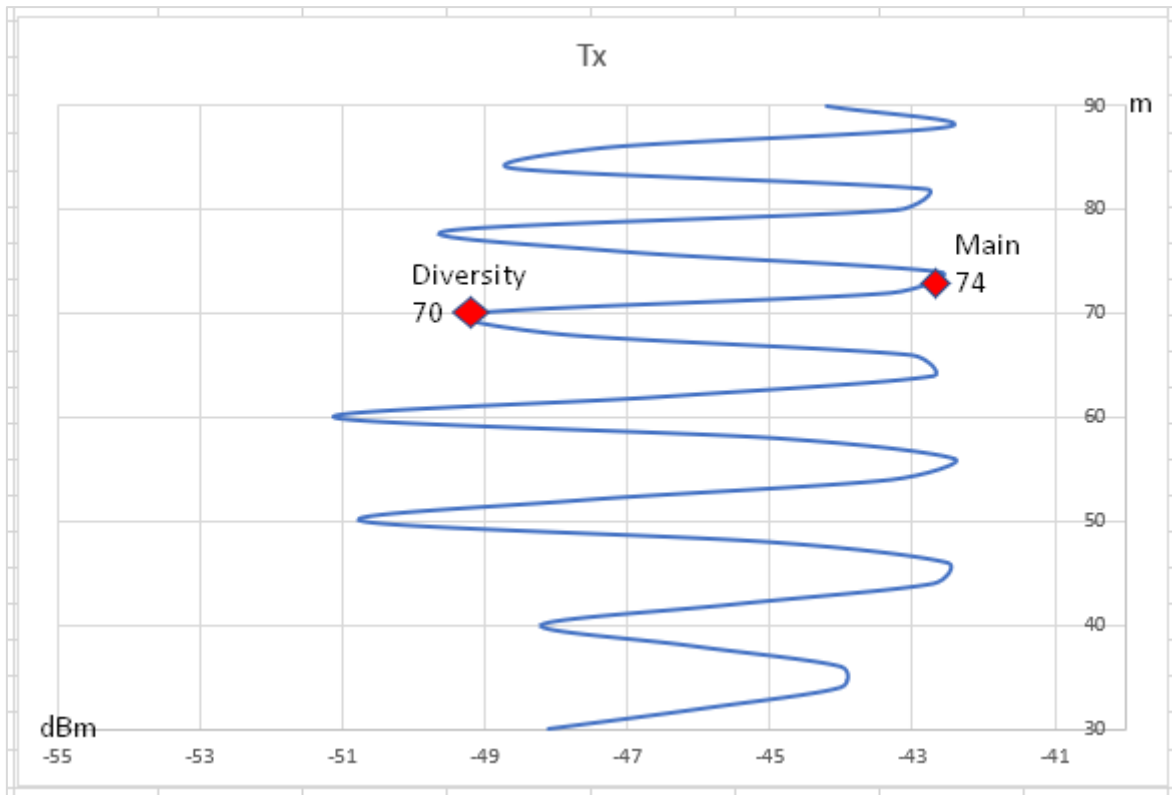


Figura 25: Identificación de posibles alturas de recepción con diversidad espacial para altura de antena transmisora 68m.

Posteriormente con los valores Main=74 y Diversity =70 se realizó el cálculo para la gráfica de refractividad, así como se muestra en la figura 26, se aprecia en la respectiva Tabla de niveles de recepción, así como la tabla de Respuesta de Refractividad. Para este caso se observa en la gráfica una mejor complementación simétrica de las señales.

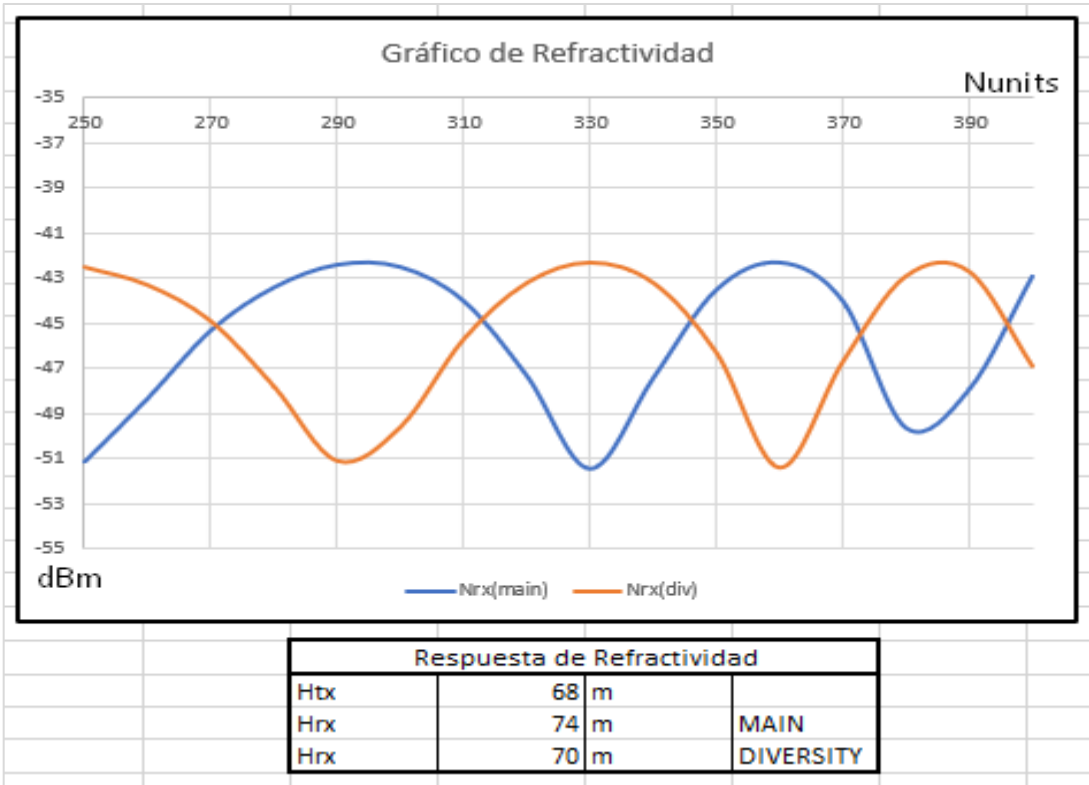


Figura 26: Respuesta a la variación de refractividad para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 68m).

Finalmente se obtuvo la gráfica de dispersión como se aprecia en la figura 27 en la cual se aprecia la tabla de Nivel de Recepción y un valor próximo a 1.

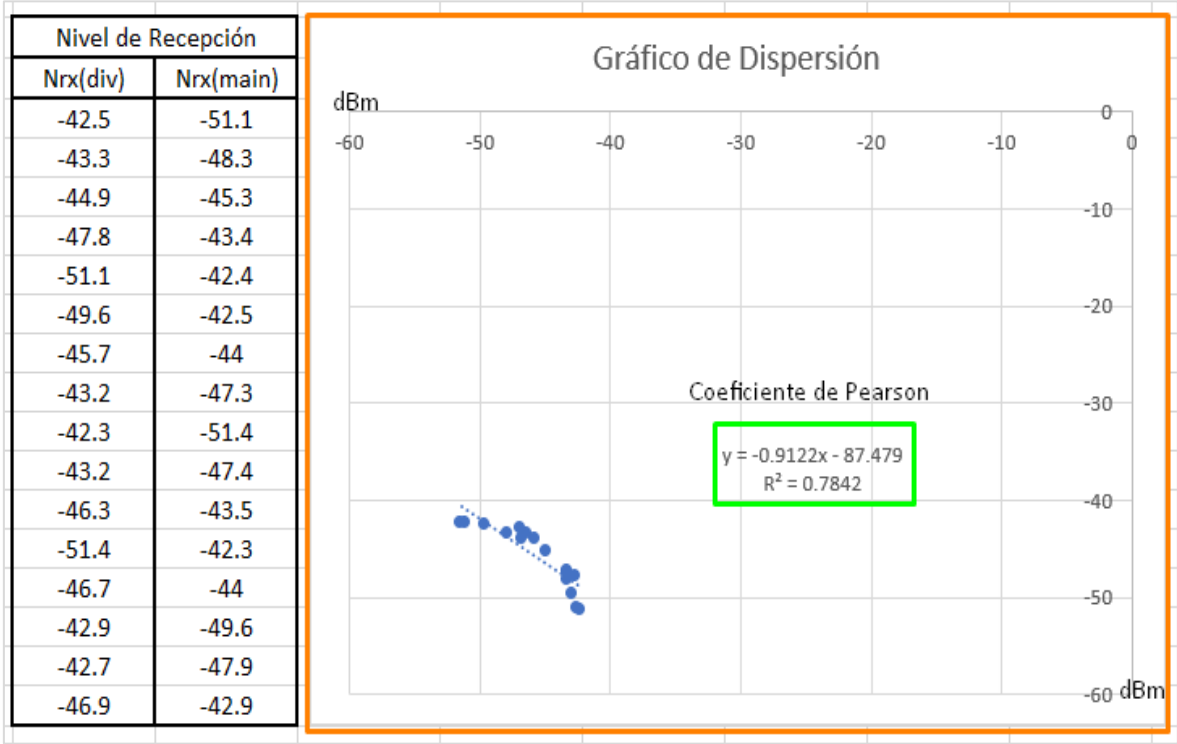


Figura 27:Evaluación de coeficiente de correlación para un par de posibles valores de alturas de antenas con diversidad espacial (altura de Tx 68m).

A continuación, se muestra la Tabla N°7 con los mejores resultados obtenidos en la Banda de 11GHz. Se aprecia los valores seleccionados de 45m ,60m, 68m y 70m para la antena transmisora con sus respectivas alturas Main y Diversity considerando que con aquellos valores se obtuvieron los mejores coeficientes de Correlación de Pearson además porque la altura de la antena transmisora se ubica entre los rangos límites de la estructura real de una antena.

Tabla N° 7: Selección de alturas con mejores coeficientes de correlación Banda 11GHz.

TABLA DE RESULTADOS BANDA 11GHz								
Tx (m)	45	50	55	55	60	62	64	68
M (m)	48	58	74	42	70	86	58	74
D (m)	42	52	60	36	66	82	54	70
Δh (m)	6	6	14	6	4	4	4	4
% P	74%	66%	58%	58%	77%	72%	62%	78%

Donde:

Tx(m) = Altura de antena transmisora

M (m) = Altura de antena principal (Main)

D (m) = Altura de antena diversidad (Diversity)

Δh (m) = Diferencia de altura entre Main y Diversity

% P= Porcentaje del coeficiente de Pearson

CAPÍTULO IV

IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis e interpretación de resultados

A continuación, en la Tabla N°8 se muestra los 03 mejores resultados para la banda de 7GHz y en la Tabla N°9 los 03 mejores resultados para la banda de 11GHz, seleccionados por mejor coeficiente de Pearson y mejor complementación de altura de antenas al variar las condiciones climáticas (variación de refractividad). Esto es un indicador del complemento de respuesta de la señal recibida en la antena principal y diversidad, las cuales se respaldarán entre ellas para mantener un nivel estable de señal.

Los valores de alturas de antenas presentados como las mejores soluciones presentan un valor de correlación superior al 72%. Se rescata asimismo que las soluciones tanto para la banda de 7 GHz y 11 GHz poseen alturas diferenciadas en dos rangos. El primero es un rango cercano a 70 metros, lo cual implica la implementación de diversidad espacial en la parte más alta de infraestructura de torre, siendo el segundo rango cercano a los 50 metros, lo cual implica el poder emplear una parte más baja de infraestructura de torre para la implementación de diversidad espacial. Incluso de esta forma se podría elegir la separación del uso de la parte superior o inferior de infraestructura de torre para una banda específica de frecuencia (11GHz ó 7GHz).

Tabla N° 8:Tabla de mejores resultados seleccionados 7 GHz.

RESULTADOS BANDA 7 GHz

SOLUCIÓN	ALTURAS DE ANTENAS PACASMAYO (m)		ALTURAS DE ANTENAS PAIJÁN (m)		COEF. PEARSON (%)
Solución 1	main (M)	72	main (M)	68	72%
	diversity (D)	64	diversity (D)	62	
Solución 2	main (M)	70	main (M)	44	81%
	diversity (D)	58	diversity (D)	38	
Solución 3	main (M)	60	main (M)	76	72%
	diversity (D)	52	diversity (D)	70	

Tabla N° 9:Tabla de mejores resultados seleccionados 11 GHz.

RESULTADOS BANDA 11 GHz

SOLUCIÓN	ALTURAS DE ANTENAS PACASMAYO (m)		ALTURAS DE ANTENAS PAIJÁN (m)		COEF. PEARSON (%)
Solución 1	main (M)	68	main (M)	74	78%
	diversity (D)	60	diversity (D)	70	
Solución 2	main (M)	60	main (M)	70	77%
	diversity (D)	54	diversity (D)	66	
Solución 3	main (M)	45	main (M)	48	74%
	diversity (D)	36	diversity (D)	42	

Docimasia de Hipótesis

La metodología seguida en base al análisis de desvanecimientos con variación de alturas de antenas, variación de refractividad y evaluación de coeficiente de Pearson permitió identificar 03 soluciones para las alturas de diversidad espacial en un enlace entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján, tanto para la banda microondas de 7 GHz, como la banda de 11 GHz.

CAPÍTULO V

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En los emplazamientos ubicados en las afueras de las ciudades de Pacasmayo y Paiján se pudo identificar una instalación de radiofrecuencia microondas preexistente. En la Tabla N°10 se indica dichos valores para las bandas de 7 GHz y 11GHz y se comparan con las soluciones más cercanas que han sido rescatadas de los resultados presentados en las Tablas N° 8 y N° 9. Se observa que para la banda de 7 GHz se consideró la solución 1 la cual es más cercana a la implementación pre existente, y para el caso de la banda de 11GHz se consideró la solución 3 debido también a su proximidad con los valores pre existentes. Al compararse los resultados obtenidos en la investigación con los valores implementados se observa una gran cercanía con la realidad.

Se presenta la Tabla N°10, en la cual se muestra una comparación de los resultados finales obtenidos con los de una instalación preexistente.

Tabla N° 10: Comparación resultados finales.

COMPARACION RESULTADOS OBTENIDOS						
BANDA	SITES	PREEXISTENTE		ANÁLISIS INVESTIGACION		
		antenas	h(m)	antenas	h(m)	% dif
7 GHz	PACASMAYO	main (M)	70	main (M)	72	2.86%
		diversity (D)	60	diversity (D)	64	6.67%
	PAIJAN	main (M)	68	main (M)	68	0.00%
		diversity (D)	58	diversity (D)	62	6.90%
11 GHz	PACASMAYO	main (M)	54	main (M)	45	16.67%
		diversity (D)	45	diversity (D)	36	20.00%
	PAIJAN	main (M)	52	main (M)	48	7.69%
		diversity (D)	45	diversity (D)	42	6.67%

% dif prom 7 GHz 4.11%

% dif prom 11 GHz 12.76%

% dif prom tot. 8.43%

En promedio, el cálculo de altura de antenas en las dos bandas de frecuencia, en comparación a la implementación preexistente, presenta un porcentaje de diferencia de 8.4% lo cual no es tan distante con los criterios elegidos en la instalación. Asimismo, se puede agregar que los resultados obtenidos logran mayor cercanía a los valores preexistentes en la banda de 7 GHz, con un margen de diferencia de 4.11%, en comparación con la banda de 11 GHz, en la cual se observa una diferencia de 12.76% al compararse con los valores preexistentes. En este sentido se recomendaría evaluar el tema de la cartografía empleada, puesto que por ser un software libre con una resolución de cartografía SRTM de 100 metros podría ser una razón para las diferencias encontradas, lo cual puede generar mayor margen de diferencia cuanto mayor sea la frecuencia empleada.

Por otro lado, cabe destacar que no se pudieron evaluar los coeficientes de correlación complementarios en la instalación preexistente puesto que los valores de altura de antena elegidos no reflejaban una respuesta complementaria en el simulador empleado.

VI. CONCLUSIONES

- ❖ Se identificó los parámetros de configuración de frecuencia, región climática, configuración de potencia, umbrales, ganancia y patrón de radiación son los parámetros fijos en el software de simulación y como parámetros variables de refractividad terrestre y altura de antena dentro de los límites permitidos por el simulador, y la infraestructura de torre respectivamente.
- ❖ En base a los resultados de simulación se construyeron 150 curvas identificándose valores complementarios de antenas para diversidad espacial con sus correspondientes coeficientes de correlación de Pearson, los mejores coeficientes de correlación obtenidos se ubican en un rango mayor de 60% y 70% para bandas de 7GHz y 11GHz.
- ❖ Los coeficientes de correlación permitieron seleccionar los valores más altos de correlación, identificándose 03 soluciones de diversidad espacial en la banda de 7GHz y 03 soluciones de diversidad espacial para la banda de 11GHz, ambas soluciones contemplan alturas a partir de 60m como también soluciones de altura de antena menor a 50m.
- ❖ Al realizarse la comparación con una solución existente entre las ciudades de Pacasmayo y Paiján en las bandas de 7GHz y 11GHz se obtuvo una diferencia de altura máxima de 20% y en otras alturas se obtuvo una diferencia mínima de 0% siendo el promedio total de las diferencias entre los valores estimados e implementados un resultado de 8.4% lo cual refleja un valor cercano al implementado en una instalación preexistente.

VII. RECOMENDACIONES

- Conforme a los resultados obtenidos se recomienda como trabajo futuro repetir la técnica de diseño en otros enlaces y bandas de frecuencia empleando cartografía de mayor resolución. Esto permitirá reevaluar los resultados obtenidos en bandas de frecuencias más altas como 11GHz.
- Asimismo, como parte de la ampliación del presente estudio se recomienda evaluar más instalaciones preexistentes en diferentes bandas de frecuencias, sin embargo, se necesitaría tener acceso a alturas y detalles técnicos de operadores y enlaces para poder seguir validando la presente estrategia de estimación de diversidad espacial en diferentes condiciones de diseño.
- Si bien es cierto el estudio obtiene como resultados las alturas de antenas de diversidad espacial, como ampliación y futuro trabajo se recomienda evaluar a partir del diseño obtenido, la respuesta que pueda obtenerse al ampliar la separación de antenas lo cual suele ser una técnica de optimización usualmente empleada en las dorsales microondas.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.Tipler, P. (2010). *Física para la ciencia y tecnología*. España: Editorial Reverté.

Albornoz, J. M. (2014). *Radio Enlaces Digitales*. España: Eae Editorial.

Blake, R. (2004). *Sistemas Electrónicos*. México: Thomson Learning.

Manning, T. (2009). *Microwave Radio Transmission Design Guide*. EEUU: Artech House.

Rábanos, J. M. (1993). *Transmisión por Radio*. Editorial Universitaria Ramón Areces.

Tomasi, W. (2003). *Sistema de Comunicaciones Electrónicas*. Mexico: Pearson Education.

Vega, C. P. (s.f.). *Sistemas de Telecomunicación*. Universidad de Cantabria.

TESIS Y PAPER

Burbano J. (2018). ***“Simulación y análisis del comportamiento del canal inalámbrico en base a la respuesta impulsiva considerando la recomendación UIT-R P.1816-3”*** (Tesis Pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador).

Severino O. y Carbajal J. (2015) en la investigación denominada ***“Estudio comparativo del desvanecimiento estimado en base al modelo de dos rayos con mediciones realizadas en la ciudad de Trujillo en la frecuencia de 900 MHz al variar la altura de la antena receptora”*** (Tesis Pregrado, UPAO, Trujillo Perú)

Ayhan A. y Salimis T. (2015) en el Paper denominado ***“Evaluating spatial diversity technique for mitigating multipath fading of fixed terrestrial point-to-point systems”***

Ekwe. O y Okoro K. (2014) en el artículo denominado ***“Effective Fading Reduction Techniques in Wireless Communication System”*** (Paper, IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, Nigeria)

Shruti S. (2014) en el paper titulado ***“Diversity: A Fading Mitigation Technique”*** (Paper,

International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering)

Coulton P. y Khirallah C. (2003) en el paper denominado “*Applying Spatial Diversity to a Fixed Point-to-Point Microwave Radio System*”

REFERENCIAS SITIOS WEB

Assembly, T. I. (2002). *www.itu.int*. Obtenido de <http://www.itu.int/publ/R-REC/>

Buettrich, S. (Octubre 2007). Cálculo de Radioenlace. En S. Buettrich, *Cálculo de Radioenlace*. Obtenido de

http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/06_es_calculo-de-radioenlace_guia_v02.pdf

UNION, I. T. (2013). *www.itu.int*. Obtenido de <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/>

ANEXOS