



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

**“EVALUACIÓN DE LA ATENUACIÓN POR VEGETACIÓN DE
UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA UTILIZANDO LA
RECOMENDACIÓN ITU-R P.833-10 EN LA BANDA DE 1.8 GHZ
PARA BOSQUES DE PINO, CIPRÉS Y EUCALIPTO EN LA
CIUDAD DE RIOBAMBA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

AUTORES:

JEFFERSON DANIEL LLERENA FREIRE

JORDY JOAO TANDAZO VÉLEZ

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

**“EVALUACIÓN DE LA ATENUACIÓN POR VEGETACIÓN DE
UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA UTILIZANDO LA
RECOMENDACIÓN ITU-R P.833-10 EN LA BANDA DE 1.8 GHZ
PARA BOSQUES DE PINO, CIPRÉS Y EUCALIPTO EN LA
CIUDAD DE RIOBAMBA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

AUTORES: JEFFERSON DANIEL LLERENA FREIRE

JORDY JOAO TANDAZO VÉLEZ

DIRECTOR: Ing. HUGO OSWALDO MORENO AVILÉS. PhD

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Jefferson Daniel Llerena Freire & Jordy Joao Tandazo Vélez.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Jefferson Daniel Llerena Freire & Jordy Joao Tandazo Vélez, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 16 de noviembre 2023



Jefferson Daniel Llerena Freire
180472746-7



Jordy Joao Tandazo Vélez
230061887-9

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal de Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular : Tipo: Proyecto de Investigación, **“EVALUACIÓN DE LA ATENUACIÓN POR VEGETACIÓN DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA UTILIZANDO LA RECOMENDACIÓN ITU-R P.833-10 EN LA BANDA DE 1.8 GHZ PARA BOSQUES DE PINO, CIPRÉS Y EUCALIPTO EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”**, realizado por los señores: **JEFFERSON DANIEL LLERENA FREIRE** y **JORDY JOAO TANDAZO VÉLEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Paul David Moreno Avilés. PhD PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 2023	2023-11-16
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés. PhD. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-11-16
Ing. Wilson Oswaldo Baldeón López ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-11-16

DEDICATORIA

Este trabajo de integración curricular quiero dedicar primeramente a dios por brindarme sabiduría y conocimientos para poder culminar mis estudios. A mis padres, Franklin Llerena y Martha Freire por todo el apoyo y la paciencia que supieron darme durante todo mi tiempo de estudio, por los buenos valores que me han inculcado a ser un gran ser humano, por enseñarme a no rendirme y a levantarme para poder seguir adelante en mi carrera universitaria. A mi abuelita Mélida por todo ese apoyo brindado constantemente con todo su amor que me ha hecho más fuerte para seguir adelante. A mis hermanas Paola y Micaela por su cariño y atención que me daban durante mi trabajo de integración curricular que fue de gran ayuda para mantenerme firme y alcanzar mi objetivo.

Daniel Ll.

El presente trabajo de integración curricular es dedicado primeramente a Dios por guiarme y ofrecerme sabiduría e inteligencia para finalizar este trabajo y etapa académica.

A mi madre, Maritza Vélez por todo el apoyo recibido, no ha dejado de creer en mí por muy complicado que haya sido para mí la carrera, a mi padre, Walter Tandazo por estar presente y darme consejos y a mi tía, Isabel Tandazo que de igual manera me ha apoyado desde el inicio y ha estado atenta conmigo, a mi hermano y hermanas muchas gracias.

A mi querida novia Elizabeth Garrido quien me apoyó y alentó para continuar a pesar de lo difícil que sea el camino.

A mis amigos Yannick, Daniel y Alejandro quienes me ofrecieron una excelente amistad en esta etapa académica

A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

Jordy T.

AGRADECIMIENTO

La constancia y dedicación dan los frutos del triunfo!!

Gracias a dios por darme sabiduría, inteligencia, la vida y por haberme acompañado a lo largo de mi carrera y alcanzar mis objetivos. Gracias a mis padres Franklin Llerena y Martha Freire y por el apoyo, sus palabras y toda la ayuda que supieron darme, por los consejos lo cual yo le considero un buen ejemplo a seguir. A mis hermanas Paola y Micaela por todo su amor y sus oraciones para culminar esta nueva etapa. Finalmente, agradecer a mis abuelitas por todo el apoyo que me han dado y por las motivaciones y un agradecimiento tan grande a todas mis tías que me han impulsado con buenos deseos y palabras positivas para lograr mi objetivo gracias por todo.

Gracias a mis amigos, amigas y compañeros de curso que supieron brindar su ayuda de forma sincera y a Jordy por su sincera amistad durante toda la carrera, además por el apoyo para realizar esta investigación y por aportar con sus conocimientos para poder finalizarla.

Daniel Ll.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios por brindarme la fortaleza y la sabiduría necesarias para completar este importante capítulo en mi vida académica.

A mis queridos padres y hermanos, les debo todo el amor y gratitud por su apoyo incondicional. A mis amigos y amistades, quienes han sido un apoyo durante mi trayecto universitario, les agradezco por estar presentes. Agradecer de forma especial a nuestro tutor Ing. Hugo Moreno y asesor Ing. Oswaldo Baldeón por aportar con sus conocimientos durante todos estos años que fueron guías y formadores de profesionales con su experiencia, dedicación, para culminar este trabajo de integración curricular de la mejor manera.

A cada uno de ustedes.

¡Gracias!

Jordy T.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
INDICE DE ECUACIONES	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS	xx
RESUMEN.....	xxi
SUMMARY	xxii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Problema general de investigación	2
1.3. Problemas específicos de investigación	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	3
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
1.5. Justificación	3
1.5.1. <i>Justificación teórica</i>	3
1.5.2. <i>Justificación metodológica</i>	4
1.5.3. <i>Justificación práctica</i>	4
CAPÍTULO II	
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes	6
2.2. Canal de comunicaciones.....	7
2.2.1. <i>Medio físico</i>	7
2.2.1.1. <i>Par trenzado</i>	7

2.2.1.2.	<i>Cable Coaxial</i>	8
2.2.1.3.	<i>Fibra óptica</i>	9
2.2.2.	Medios de transmisión no guiados: comunicaciones sin hilos	10
2.2.2.1.	<i>Ondas de radio</i>	10
2.2.2.2.	<i>Microondas Terrestre</i>	11
2.2.2.3.	<i>Microondas por Satélite</i>	12
2.3.	Radiocomunicación	13
2.3.1.	<i>Características de propagación</i>	14
2.3.2.	<i>Parámetros y características de recepción</i>	15
2.4.	Influencia del medio de transmisión en la propagación.	16
2.4.1.	<i>Reflexión</i>	17
2.4.2.	<i>Refracción</i>	18
2.4.3.	<i>Difracción</i>	18
2.4.4.	<i>Dispersión</i>	19
2.4.5.	<i>Absorción</i>	20
2.5.	Radioenlace terrestre	21
2.5.1.	<i>Balance de un enlace radioeléctrico</i>	21
2.5.2.	<i>Pérdida del cable</i>	22
2.5.3.	<i>Pérdida en conectores</i>	23
2.5.4.	<i>Línea de vista y multitrayectoria</i>	23
2.6.	Modelos de Propagación en el espacio libre	24
2.7.	Región de Fresnel	25
2.8.	Atenuaciones	26
2.8.1.	<i>Atenuación de transmisión</i>	27
2.8.2.	<i>Atenuación básica de propagación en el espacio libre.</i>	27
2.8.3.	<i>Atenuación a través de un medio cualquiera</i>	28
2.8.3.1.	<i>Atenuación por gases y vapores atmosféricos</i>	29
2.8.3.2.	<i>Atenuación por lluvia</i>	30

2.8.3.3.	<i>Atenuación por vegetación</i>	30
2.8.4.	<i>Desvanecimiento</i>	32
2.9.	Recommendation ITU-R P.833-10	33
2.9.1.	<i>Obstrucción en zonas boscosas</i>	33
2.9.1.1.	<i>Trayecto terrenal con un terminal en zona boscosa</i>	33
2.9.2.	<i>Trayectos oblicuos de satélite, aeronave u otra plataforma por encima de la superficie de la Tierra.</i>	37
2.9.2.1.	<i>Modelo de emplazamiento específico</i>	37
2.9.2.2.	<i>Modelo de emplazamiento general</i>	40
2.9.3.	<i>Obstrucción por un solo obstáculo vegetal</i>	41
2.9.3.1.	<i>A 1 GHz o por debajo de 1 GHz.</i>	41
2.9.3.2.	<i>Por encima de 1 GHz.</i>	42
CAPÍTULO III		
3.	MARCO METODOLÓGICO	46
3.1.	Enfoque de investigación	46
3.2.	Nivel de investigación	46
3.3.	Diseño de investigación	46
3.3.1.	<i>Según la manipulación o no de la variable independiente</i>	46
3.3.1.1.	<i>Experimental</i>	46
3.3.2.	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i>	47
3.3.2.1.	<i>Transversal</i>	47
3.3.2.2.	<i>Longitudinal</i>	47
3.4.	Tipo de investigación	47
3.4.1.	<i>Estudio Documental</i>	47
3.4.2.	<i>Estudio de campo</i>	48
3.5.	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	48
3.5.1.	<i>Área de estudio</i>	50
3.5.2.	<i>Descripción del tipo de árbol, bosque y suelo</i>	56

3.5.3.	<i>Variación de alturas de las antenas</i>	59
3.5.4.	<i>Equipos de medición</i>	60
3.5.4.1.	<i>Anritsu MS2724C</i>	60
3.5.4.2.	<i>Generador de señales Anritsu MG3692C</i>	60
3.5.4.3.	<i>Antena logarítmica WA5VJB</i>	65
3.5.4.4.	<i>Antena logarítmica AAronia HyperLOG 30180</i>	62
3.5.5.	<i>Mediciones</i>	66
3.5.5.1.	<i>Medición de la potencia atenuada en el espacio libre</i>	66
3.5.5.2.	<i>Medición de la potencia atenuada en un árbol de pino</i>	69
3.5.5.3.	<i>Medición de la potencia atenuada en un árbol de eucalipto</i>	72
3.5.5.4.	<i>Medición de la potencia atenuada en un árbol de ciprés</i>	77
3.5.5.5.	<i>Medición de la potencia atenuada en un bosque de pino</i>	80
3.5.5.6.	<i>Medición de la potencia atenuada en un bosque de eucalipto</i>	90
3.5.5.7.	<i>Medición de la potencia atenuada en un bosque de ciprés</i>	100
3.5.6.	<i>Cálculo para las condiciones de la zona de Fresnel</i>	110
3.5.6.1.	<i>Distancia mínima para que cumpla la condición de la primera zona de Fresnel</i> ...	111
3.5.7.	<i>Obstáculo único en arista en filo de cuchillo</i>	111
3.5.8.	<i>Obstáculo único de forma redondeada</i>	112
3.5.9.	<i>Componente Reflejada en el suelo</i>	115
 CAPÍTULO IV		
4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	117
4.1.	Resultados de atenuación presentes en un árbol de pino	117
4.2.	Resultados de atenuación presentes en un árbol de eucalipto	123
4.3.	Resultados de atenuación presentes en un árbol de ciprés	130
4.4.	Resultados de atenuación en los bosques de pino ciprés y eucalipto	137
4.4.1.	<i>Resultados de atenuación presentes en el bosque de pino</i>	137
4.4.2.	<i>Resultados de atenuación presentes en el bosque de eucalipto</i>	140
4.4.3.	<i>Resultados de atenuación presentes en el bosque de ciprés</i>	142

CONCLUSIONES: 145

RECOMENDACIONES: 146

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Valores típicos de pérdida en los cables.....	23
Tabla 2-2: Constantes para la atenuación específica y máxima.....	36
Tabla 2-3: Mediciones realizadas en bosques de pinos en Austria.....	39
Tabla 2-4: Parámetros determinados de forma empírica.....	39
Tabla 3-1: Bandas de frecuencias.....	48
Tabla 3-2: Lugares seleccionados.....	52
Tabla 3-3: Lugares seleccionados.....	54
Tabla 3-4: Características analizador de espectro Anritsu MS2724C.....	64
Tabla 3-5: Parámetros de medición del analizador de espectro.....	65
Tabla 3-6: Características analizador de espectro Anritsu MG3692C.....	61
Tabla 3-7: Parámetros y especificaciones de la Antena Log Periodic WA5VJB.....	66
Tabla 3-8: Parámetros y especificaciones de la Antena AAronia HyperLOG 30180.....	63
Tabla 3-9: Potencias en dBm, obtenidas en el espacio libre a la frecuencia de 1.8 GHz.....	66
Tabla 3-10: Potencias en dBm, obtenidas en un solo árbol de pino a la frecuencia de 1.8 GHz.	69
Tabla 3-11: Potencias en dBm, obtenidas en un solo árbol de eucalipto a la frecuencia de 1.8 GHz.....	72
Tabla 3-12: Potencias en dBm, obtenidas en un solo árbol de ciprés a la frecuencia de 1.8 GHz.	77
Tabla 3-13: Potencias en dBm, obtenidas en el bosque de pino a la frecuencia de 1.8 GHz.....	81
Tabla 3-14: Potencias en dBm, obtenidas en el bosque de eucalipto a la frecuencia de 1.8 GHz.	91
Tabla 3-15: Potencias en dBm obtenidas en el bosque de ciprés a la frecuencia de 1.8 GHz.	101
Tabla 4-1: Diferencia de potencias entre espacio libre y pino.....	117
Tabla 4-2: Diferencia de potencias entre espacio libre y eucalipto.....	124
Tabla 4-3: Diferencia de potencias entre espacio libre y ciprés.....	131
Tabla 4-4: Valores de atenuación en la vegetación a 1.8 GHz.....	136
Tabla 4-5: Mediciones realizadas en bosques de pinos en Riobamba.....	138
Tabla 4-6: Mediciones realizadas en bosques de eucalipto en Riobamba.....	141
Tabla 4-7: Mediciones realizadas en bosques de ciprés en Riobamba.....	143

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Comparativa entre el paso del trenzado en cables de categoría 3 (16 MHz) y de categoría 5 (100 MHz).	8
Ilustración 2-2: Composición de un cable coaxial	9
Ilustración 2-3: Cables con varias fibras ópticas.	9
Ilustración 2-4: Espectro electromagnético y distribución en bandas	11
Ilustración 2-5: Transmisión microonda terrestre	12
Ilustración 2-6: Transmisión por satélite	13
Ilustración 2-7: Sistema de Radiocomunicación.	14
Ilustración 2-8: Reflexión.....	17
Ilustración 2-9: Fenómeno de la refracción.....	18
Ilustración 2-10: Ondas de difracción causadas por un frente de onda	19
Ilustración 2-11: Dispersión.	20
Ilustración 2-12: Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas.	21
Ilustración 2-13: Trayectoria de una onda de radio entre transmisor y receptor.	22
Ilustración 2-14: Zona de Fresnel.....	25
Ilustración 2-15: Montaje experimental utilizado para mediciones de atenuación por vegetación.	31
Ilustración 2-16: Diagrama del ajuste experimental para las mediciones correspondientes.	32
Ilustración 2-17: Variaciones aleatorias de la señal en torno al valor nominal.....	33
Ilustración 2-18: Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa.	34
Ilustración 2-19: Atenuación específica en zona boscosa.	35
Ilustración 2-20: Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa con una longitud de trayecto sobre la vegetación, d , una altura media de los árboles h_v , una altura de la antena Rx sobre el suelo, h_a , una elevación del trayecto radioeléctrico θ , y una distancia de la antena al borde de la zona boscosa.....	38
Ilustración 2-21: Pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales para 2 GHz.	40
Ilustración 2-22: Pérdida debida a la vegetación calculada mediante el modelo estadístico para 2 GHz.	41
Ilustración 2-23: Componente difractada por la parte superior de la vegetación	43
Ilustración 2-24: Componentes difractados alrededor de la vegetación.....	44

Ilustración 2-25: Componente reflejada en el suelo.	45
Ilustración 3-1: Regiones de campo.	49
Ilustración 3-2: Mapa de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo	50
Ilustración 3-3: Escenario de medición (a) espacio libre (b) árbol de pino (c) árbol de eucalipto (d) árbol de ciprés.	51
Ilustración 3-4: Escenario de medición para los bosques de (a) pino (b) eucalipto (c) ciprés. .	53
Ilustración 3-5: Diagrama del proceso para la toma de mediciones de potencia a) un solo árbol b) un bosque.	55
Ilustración 3-6: Árboles (a) pino (b) eucalipto (c) ciprés.	57
Ilustración 3-7: Bosques (a) pino (b) eucalipto (c) ciprés.	58
Ilustración 3-8: Variación de las alturas a) 1 metro b) 2 metros c) 3 metros d) 4 metros.	59
Ilustración 3-9: Analizador de espectro Anritsu y antena logarítmica.	64
Ilustración 3-10: Generador de señales Anritsu y antena logarítmica.	60
Ilustración 3-11: Transmisión del generador de señales y antena logarítmica en el espacio libre.	62
Ilustración 3-12: Antena Log Periodic WA5VJB 850 a 6500 MHz.	65
Ilustración 3-13: Antena AAronia HyperLOG 30180.	62
Ilustración 3-14: Medición de la potencia atenuada en el espacio libre a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.	67
Ilustración 3-15: Medición de la potencia atenuada en el espacio libre a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.	68
Ilustración 3-16: Árbol de pino	69
Ilustración 3-17: Medición de la potencia atenuada en un solo árbol de pino a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.	70
Ilustración 3-18: Medición de la potencia atenuada en un solo árbol de pino a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.	71
Ilustración 3-19: Árbol de eucalipto.	72
Ilustración 3-20: Árbol de eucalipto a 1 metro.	73
Ilustración 3-21: Árbol de eucalipto a 2 metros.	74
Ilustración 3-22: Árbol de eucalipto a 3 metros	75
Ilustración 3-23: Árbol de eucalipto a 4 metros.	76
Ilustración 3-24 Árbol de ciprés	77
Ilustración 3-25: Medición de la potencia atenuada en un solo árbol de ciprés a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.	78

Ilustración 3-26: Medición de la potencia atenuada en un solo árbol de ciprés a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.....	79
Ilustración 3-27: Bosque de pino.....	80
Ilustración 3-28: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.	82
Ilustración 3-29: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.....	83
Ilustración 3-30: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.....	84
Ilustración 3-31: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.....	85
Ilustración 3-32: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.....	86
Ilustración 3-33: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.....	87
Ilustración 3-34: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.....	88
Ilustración 3-35: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.....	89
Ilustración 3-36: Bosque de Eucalipto	90
Ilustración 3-37: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.	92
Ilustración 3-38: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el primer árbol a 1.8 GHz con.....	93
Ilustración 3-39: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.	94
Ilustración 3-40: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.....	95
Ilustración 3-41: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.	96
Ilustración 3-42: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.....	97
Ilustración 3-43: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.	98
Ilustración 3-44: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.....	99

Ilustración 3-45: Bosque de ciprés.	100
Ilustración 3-46: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.	102
Ilustración 3-47: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 4 metros (b) 4 metros.	103
Ilustración 3-48: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 4 metros (b) 4 metros.	104
Ilustración 3-49: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.	105
Ilustración 3-50: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metro.	106
Ilustración 3-51: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros	107
Ilustración 3-52: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.	108
Ilustración 3-53: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.	109
Ilustración 3-54: Diagrama de proceso para el cálculo de las componentes difractadas y reflejadas.	110
Ilustración 3-55: Geometría de un obstáculo de forma redondeada de radio R.	112
Ilustración 3-56: Geometría de un obstáculo de forma redondeada de radio R.	113
Ilustración 3-57: Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo	114
Ilustración 3-58: Ángulos de incidencia y de refracción según la ley de Snell.	116
Ilustración 4-1: Geometría de reflexión del árbol de pino a 1 metro.	118
Ilustración 4-2: Resultados obtenidos en el árbol de pino a la altura de 1 metro.	119
Ilustración 4-3: Geometría de reflexión del árbol de pino a 2 metros.	120
Ilustración 4-4: Geometría de reflexión del árbol de pino a 3 metros.	121
Ilustración 4-5: Geometría de reflexión del árbol de pino a 4 metros.	122
Ilustración 4-6: Resultados obtenidos en el árbol de pino a la altura de 2, 3 y 4 metros.	122
Ilustración 4-7: Medidas de tendencia central para el árbol de pino.	123
Ilustración 4-8: Geometría de reflexión del árbol de eucalipto a 1 metro.	124
Ilustración 4-9: Geometría de reflexión del árbol de eucalipto a 2 metros.	125
Ilustración 4-10: Resultados obtenidos en el árbol de eucalipto a 1 y 2 metros de altura.	126
Ilustración 4-11: Geometría de reflexión del árbol de eucalipto a 3 metros.	127
Ilustración 4-12: Geometría de reflexión del árbol de eucalipto a 4 metros.	128

Ilustración 4-13: Resultados obtenidos en el árbol de eucalipto a 3 y 4 metros de altura.....	129
Ilustración 4-14: Medidas de tendencia central para el árbol de eucalipto.	130
Ilustración 4-15: Geometría de reflexión del árbol de ciprés a 1 metro.	131
Ilustración 4-16: Resultados obtenidos en el árbol de ciprés a una altura 1 metro.	132
Ilustración 4-17: Geometría de reflexión del árbol de ciprés a 2 metros.	133
Ilustración 4-18: Geometría de reflexión del árbol de ciprés a 3 metros.	134
Ilustración 4-19: Geometría de reflexión del árbol de ciprés a 4 metros.	134
Ilustración 4-20: Resultados obtenidos para el árbol de ciprés a 2,3 y 4 metros de altura.	135
Ilustración 4-21: Medidas de tendencia central para el árbol de ciprés.....	136
Ilustración 4-22: Pérdidas entre espacio libre y bosque de pino a 1,8 GHz.	138
Ilustración 4-23: Promedio de atenuación en el bosque de pino a 1.8GHz.	139
Ilustración 4-24: Resultados de pérdidas de atenuación en el bosque de pino de 1.7 GHz a 1.9 GHz.	139
Ilustración 4-25: Perdidas entre espacio libre y bosque de eucalipto a 1,8 GHz.....	140
Ilustración 4-26: Promedio de atenuación en el bosque de eucalipto a 1.8GHz.	141
Ilustración 4-27: Resultados de pérdidas de atenuación en el bosque de eucalipto de 1.7 GHz a 1.9 GHz.	142
Ilustración 4-28: Pérdidas entre espacio libre y bosque de ciprés.	143
Ilustración 4-29: Promedio de atenuación en el bosque de ciprés a 1.8GHz.	144
Ilustración 4-30: Resultados de pérdidas de atenuación en el bosque de ciprés de 1.7 GHz a 1.9 GHz.	144

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Intensidad de Campo eléctrico.....	16
Ecuación 2-2: Ecuación general de balance del enlace.....	22
Ecuación 2-3: Potencia recibida en el espacio libre.....	24
Ecuación 2-4: Límite de la región de Fresnel.	25
Ecuación 2-5: Cálculo de la zona de Fresnel.	26
Ecuación 2-6: Obstáculo en la mitad del emisor y el receptor.....	26
Ecuación 2-7: Primera zona de Fresnel.....	26
Ecuación 2-8: Atenuación de transmisión.	27
Ecuación 2-9: Perdida de atenuación en decibelios.	27
Ecuación 2-10: Perdida en el espacio libre.	27
Ecuación 2-11: Perdida en decibelios.	27
Ecuación 2-12: Perdida de atenuación en decibelios.	28
Ecuación 2-13: Atenuación de campo.	28
Ecuación 2-14: Atenuación de campo en decibelios.....	28
Ecuación 2-15: Potencia en función del campo.	29
Ecuación 2-16: Reducción de potencia.	29
Ecuación 2-17: Perdida básica con una antena isótropa.	29
Ecuación 2-18: Atenuación en la atmosfera.	29
Ecuación 2-19: Atenuación por lluvia.	30
Ecuación 2-20: Duración del desvanecimiento $F1$	33
Ecuación 2-21: Atenuación excesiva.	34
Ecuación 2-22: Dependencia de frecuencia.	36
Ecuación 2-23: Perdidas de atenuación.	38
Ecuación 2-24: Perdidas de atenuación en pinos de Austria.....	39
Ecuación 2-25: Perdidas debido a la vegetación.....	39
Ecuación 2-26: Perdidas debido a la vegetación.....	40
Ecuación 2-27: Exceso de atenuación.....	41
Ecuación 2-28: Calculo de la componente difractada por la parte superior.....	43
Ecuación 2-29: Calculo de la componente difractada lateral a	44
Ecuación 2-30: Calculo de la componente difractada lateral b.....	44
Ecuación 2-31: Calculo de la componente reflejada en el suelo.....	45
Ecuación 3-1: Radiating Far Field	49
Ecuación 3-2: Distancia para la primera zona de Fresnel.	111
Ecuación 3-3: Perdida por difracción.....	112

Ecuación 3-4: Pérdida por difracción.....	113
Ecuación 3-5: Parámetro v adimensional.	113
Ecuación 3-6: Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo.....	113
Ecuación 3-7: Atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo.....	114
Ecuación 3-8: Atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo.....	114
Ecuación 3-9: Componente m	115
Ecuación 3-10: Componente n	115
Ecuación 3-11: Pérdidas por reflexión en el suelo.....	115
Ecuación 3-12: Coeficiente de reflexión.....	115
Ecuación 3-13: Ley de Snell	116
Ecuación 4-1: Perdidas de atenuación.	137
Ecuación 4-2: Perdidas de atenuación para el pino de Ecuador.....	139
Ecuación 4-3: Perdidas de atenuación para el eucalipto en Ecuador.	141
Ecuación 4-4: Pérdidas de atenuación para el ciprés en Ecuador.	144

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Medición en el árbol de pino.

ANEXO B: Medición en el árbol de eucalipto.

ANEXO C: Medición en el árbol de ciprés.

ANEXO D: Medición en el bosque de pino.

ANEXO E: Medición en el bosque de eucalipto.

ANEXO F: Medición en el bosque de ciprés.

ANEXO G: Recomendación ITU-R P.833-10.

ANEXO H: Recomendación ITU-R P.526.

ANEXO I: Análisis de suelo.

RESUMEN

La UIT-R P.833-10 (Radiocomunicación - Unión Internacional de Telecomunicaciones) ha proporcionado datos existentes de la atenuación en la vegetación de otras regiones, estos valores que ha facilitado la recomendación han sido usados para cálculos y planificación de radio enlaces, razón por la cual se ha realizado este estudio para obtener datos propios y reales para que sean utilizados en el país, por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue la evaluación de la atenuación por vegetación de una onda electromagnética utilizando la recomendación ITU-R P.833-10 en la banda de 1.8GHz para bosques de pino, ciprés y eucalipto en la ciudad de Riobamba. La metodología utilizada tuvo un enfoque cuantitativo ya que se obtuvieron datos reales de mediciones con un nivel descriptivo; que ha implicado la obtención de los valores de medición de potencia a través de la vegetación en un rango de frecuencias de 1.7 GHz a 1.9 GHz para cada tipo de árbol y bosque, se ha utilizado un diseño experimental tipo transversal ya que no se han manipulado los valores obtenidos con los equipos de medición, métodos y técnicas utilizadas. Todos estos valores se han obtenido en condiciones de suelo húmedo y sin viento, con intervención de trabajo de campo transversal y longitudinal ya que se ha obtenido las ubicaciones de estudio, altura de árboles y antenas. Con toda la metodología utilizada se ha determinado la atenuación que existe a través de un solo árbol y en un bosque de pino obteniendo valores similares a la recomendación; valores reales para el eucalipto y ciprés. Concluyendo que estos valores de potencia y cálculos que se han realizado varían de acuerdo con el medio, tipo de suelo, la zona climática y el tipo de árbol con su densidad de follaje propio.

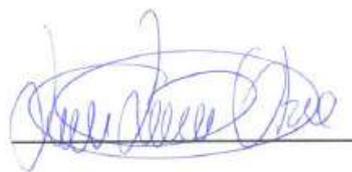
Palabras clave: <PROPAGACIÓN DE ONDAS RADIOELÉCTRICAS>, <DIFRACCIÓN>, <REFLEXIÓN>, <ATENUACIÓN>, <BOSQUES>, <VEGETACIÓN>, <RIOBAMBA (CANTÓN)>.



SUMMARY

The ITU-R P.833-10 (Radiocommunication - International Telecommunication Union) provides existing data on vegetation attenuation in various regions. These values, outlined in the recommendation, have been widely utilized for radio link calculations and planning. However, this study was conducted to gather specific, real data applicable to the country. Therefore, the research objective was to evaluate electromagnetic wave attenuation due to vegetation using ITUR P recommendation .833-10 in the 1.8 GHz band for pine, cypress, and eucalyptus forests in Riobamba city. The methodology employed was quantitative, involving real measurements with a descriptive approach. Power measurement values were obtained through vegetation within the frequency range of 1.7 GHz to 1.9 GHz for each tree type and forest. A cross-sectional experimental design was used to ensure the authenticity of the obtained values. The measurements, methods, and techniques were conducted without manipulation, and the study locations, tree heights, and antenna specifications were accounted for. The research determined the attenuation through a single tree and in a pine forest, yielding values consistent with the recommendation. Real values for eucalyptus and cypress were also obtained. In conclusion, the study found that power values and calculations vary based on the environment, soil type, climatic zone, and tree species with their own foliage density.

Keywords: <RADIOELECTRIC WAVES PROPAGATION>, <DIFFRACTION>, <REFLECTION>, <ATTENUATION>, <FOREST VEGETATION>, <RIOBAMBA (TOWN)>



Lenin Iván Lara Olivo

0602546103

INTRODUCCIÓN

En la era actual de la comunicación y la tecnología, el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas a través de la vegetación ha adquirido una gran relevancia. La atenuación causada por la vegetación puede afectar la calidad y confiabilidad de las comunicaciones inalámbricas, así como la planificación efectiva de redes de telecomunicaciones. Servicios como las redes móviles, la transmisión de datos y la comunicación satelital han recalcado la necesidad de comprender en profundidad cómo las ondas electromagnéticas interactúan con diferentes tipos de vegetación.

En este contexto, la banda de frecuencia de 1.8 GHz se ha convertido en una de las más utilizadas para diversos servicios de comunicación, lo que hace fundamental conocer cómo se comporta la propagación de señales en esta frecuencia en entornos con diferentes densidades de vegetación, como en este caso bosques de pino, ciprés y eucalipto. La Recomendación ITU-R P.833-10 facilita una metodología para evaluar la atenuación provocada por la vegetación en estas condiciones, su aplicación y adaptación en escenarios locales pueden otorgar sobre la viabilidad, confiabilidad y eficiencia de las comunicaciones en áreas geográficas específicas.

El presente estudio tiene como objetivo principal investigar y analizar la atenuación por vegetación en la banda de 1.8 GHz en los árboles y bosques de pino, ciprés y eucalipto en la ciudad de Riobamba. Se aplica la metodología propuesta en la Recomendación ITU-R P.833-10 para comprender cómo las características de estas especies de vegetación influyen en la propagación de ondas electromagnéticas y cómo esto puede impactar en la planificación y optimización de redes de comunicación en la región.

A través de la recolección de mediciones de datos empíricos, cálculos y su análisis en conjunto, se espera obtener resultados que contribuyan a un mejor evaluación y entendimiento de la interacción entre las ondas electromagnéticas y la vegetación. Estos resultados pueden ayudar a tener implicaciones importantes tanto en términos de diseño y estudio de redes de telecomunicaciones eficientes, así como en la toma de decisiones en la implementación de tecnologías de comunicación en áreas forestales.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La recomendación ITU-R P.833-10 facilita datos referentes a la atenuación en la vegetación que son esenciales para los cálculos de un radio enlace, por esto se sabe que las ondas radioeléctricas sufren gran atenuación al atravesar la vegetación, especialmente en el caso de frecuencias elevadas.

Los sistemas móviles se ven mucho más afectados por este fenómeno pues es más fácil que puedan darse en situaciones de donde el receptor no tiene visión directa con el transmisor al encontrarse obstruido por árboles o grandes arbustos. En el caso de enlaces punto a punto es menos habitual, pues la planificación previa del enlace permite identificar posibles obstáculos y evitarlos convenientemente. Aun así, todavía puede producirse pérdidas significativas si el haz radioeléctrico transcurre dentro de zonas boscosas.

Actualmente la ITU-R P.833-10 proporciona datos existentes en otros lugares como Rusia, Brasil, Francia, etc. Es por ello, se realiza una exhaustiva medición, definiendo lugares de medición con el fin de obtener datos propios de los árboles de pino, ciprés y eucalipto; También se requiere el uso de equipos de medición especializados como lo es el generador de señales y el analizador de espectros con los cuales se obtienen los datos de potencia recibida a través de la vegetación.

Este análisis se hace para obtener datos propios de dichos árboles, ya que son más propensos a obstaculizar la transmisión de un radio enlace en el Ecuador y estos alcanzan unas alturas medias de 15 metros los mismos que serán proporcionados y comparados con los valores de la ITU.

1.2. Problema general de investigación

¿Existen datos referentes a la atenuación por vegetación de una onda electromagnética con la recomendación ITU-R P.833-10 para bosques de pino, ciprés y eucalipto en la ciudad de Riobamba en la banda de 1.8 GHz?

1.3. Problemas específicos de investigación

- ¿Cuál es el principio de estudiar la recomendación ITU-R P.833-10 y cuáles son los factores de atenuación dentro de los bosques de pino, ciprés y eucalipto en la ciudad de Riobamba?

- ¿Cómo se realizarán las mediciones para determinar la atenuación por vegetación de ondas electromagnéticas en un solo árbol de pino, ciprés y eucalipto en la ciudad de Riobamba?
- ¿Cómo se realizarán las mediciones para determinar la atenuación por vegetación de ondas electromagnéticas en un bosque de pino, ciprés y eucalipto en la ciudad de Riobamba?
- ¿Los valores obtenidos tendrán similitud en comparación a los de la recomendación ITU-R P.833-10?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la atenuación por vegetación de una onda electromagnética utilizando la recomendación ITU-R P.833-10 en la banda de 1.8GHz para bosques de pino, ciprés y eucalipto en la ciudad de Riobamba.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Analizar la recomendación ITU-R P.833-10 referente a la evaluación de la atenuación por vegetación.
- Determinar las pérdidas de propagación de una onda electromagnética en la banda de 1.8 GHz considerando las mediciones en un solo árbol de pino, ciprés o eucalipto tomando la onda directa, onda reflejada, dispersión lateral y dispersión vertical de acuerdo con la recomendación ITU-R P.833-10.
- Determinar las pérdidas de propagación de una onda electromagnética en la banda de 1.8 GHz considerando las mediciones en un bosque de pino, ciprés o eucalipto tomando la absorción de la onda en el bosque de acuerdo con la recomendación ITU-R P.833-10.
- Evaluar las mediciones obtenidas y comparar con los datos generales de la recomendación ITU-R P.833-10.

1.5. Justificación

1.5.1. Justificación teórica

Se han realizado mediciones en lugares como Rio de Janeiro (Brasil), Mullhouse (Francia), San Petersburgo (Rusia) y en el sur de Inglaterra, para determinar el grado de atenuación cuando se propaga a través de la vegetación, también se han llevado a cabo sobre vegetación seleccionada

con varios grados de foliación para determinar la dependencia de las pérdidas de la vegetación, además, determinaron la geometría de la ruta y la geometría del árbol o de los bosques en dichos lugares de estudio. Los resultados de estos experimentos se comparan con los modelos empíricos estándar ITU y reflejan la dependencia de la atenuación de la vegetación de dichos parámetros de entrada. Los valores típicos de la atenuación que son especificados por la ITU son derivadas de varias mediciones realizadas entre 30 MHz a 30 GHz.(ITU, 2021)

Por debajo de 1GHz las señales polarizadas verticalmente tienden a experimentar mayor atenuación con respecto a las horizontales aproximadamente, lo cual se cree que se debe a la dispersión de troncos del árbol. A frecuencias del orden de 1 GHz, la atenuación específica a través de árboles con hojas parece ser aproximadamente 20% mayor (dB/m) que para árboles sin hojas. También puede haber variaciones de atenuación debido al movimiento del follaje, como el viento. (ITU, 2021)

1.5.2. Justificación metodológica

En esta investigación para la obtención de los datos medidos y obtenidos por los equipos disponibles se usa el analizador de espectro y el generador de señales con dos antenas logarítmicas, tanto para el transmisor como el receptor ubicados a una distancia de 10 metros, además la ventaja para determinar la atenuación en las áreas definidas con estos valores de potencia, se utiliza la recomendación ITU-R P.833-10 considerando diferentes tipos de ondas para la obtención de los resultados considerando alturas de las antenas desde 1 metro a 4 metros y posteriormente realizar una comparativa entre dichos valores obtenidos con los de la ITU.

1.5.3. Justificación práctica

En el presente trabajo de integración curricular se propone evaluar la atenuación por vegetación en los bosques de pino, ciprés y eucalipto en la ciudad de Riobamba para la banda de 1.8GHz con la finalidad de proporcionar datos propios para la ITU-R P.833-10, lo cual radica en la falta de valores específicos de determinados bosques. Para la ejecución de este proyecto, es necesario partir del estudio de los parámetros para el cálculo de la atenuación por vegetación dentro de la zona de estudio, para esto la Carrera Telecomunicaciones cuenta con equipos como son: el generador de funciones de hasta 20 GHz, el analizador de espectro de hasta 20 GHz.

Se va a realizar las mediciones correspondientes con dichos equipos y dos antenas directivas una de transmisión y otra de recepción para obtener valores reales y determinar las pérdidas de

propagación para evaluar los resultados. Como lugar de evaluación se eligió varios bosques a analizar en la ciudad de Riobamba entre ellos los de pino, ciprés y eucalipto. Los bosques de pino, ciprés y eucalipto estarán ubicados en la parte posterior de la ESPOCH con un área de $50 m^2$ con una altura promedio de 20 m. Estos lugares fueron escogidos ya que en la ciudad de Riobamba en las zonas donde existen enlaces punto a punto y punto zona estos árboles predominan y son propensos a obstaculizar la línea de visión directa de un radio enlace además se eligió la frecuencia de 1.8GHz que es usada para la banda 3G y para las radios bases.

Para las mediciones se ubicará la antena transmisora que emitirá la señal electromagnética por medio del generador de funciones con la frecuencia correspondiente el cual atravesara el árbol o el bosque y ser receptada por medio del analizador de espectro y así poder obtener datos reales, estos datos se harán considerando un árbol de pino, ciprés y eucalipto en la que se realizara las mediciones tomando la onda directa, onda reflejada, dispersión lateral y dispersión vertical. Para los bosques mencionados se harán las mediciones tomando en cuenta solo la absorción de la onda de acuerdo con la recomendación ITU-R P.833-10. Posteriormente se analizarán estas mediciones y se realizara un análisis comparativo con los datos dados por la recomendación ITU-R P.833-1

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

La presencia natural de árboles a lo largo de la trayectoria de radio en la propagación al aire libre es inevitable especialmente en zonas rurales y semiurbanas. Su presencia ya sea como un solo árbol o grupo de los árboles tienen efectos significativos sobre las ondas de radio, especialmente en la frecuencia de microondas. Además, los árboles también pueden crecer con el tiempo en un área inicialmente libre de obstrucciones, lo que lleva a efecto de sombra. Entonces, comprender las características de los entornos físicos en los que la propagación de ondas de radio es fundamental para el modelado adecuado de un canal de comunicación confiable. (Olusope Michael 2013, p. 705)

Los árboles pueden bloquear la trayectoria de la línea de visión (LOS) y también dispersar la onda radiada, forzándola para seguir diferentes caminos (multitrayecto) hasta el receptor. Básicamente, las ondas pueden difractarse, reflejarse y dispersarse a lo largo de la ruta de propagación, una situación que puede degradar la señal calidad y reducir la distancia del enlace. Además, debido a la absorción y despolarización, la radiación irradiada la onda puede atenuarse a medida que se propaga a través de los árboles hasta la antena receptora. Se han realizado estudios por parte de la Universidad de Leicester, en la que determinaron que la cantidad de la atenuación está dada por la densidad de los elementos del árbol, por ejemplo, hojas, ramas y troncos. Además, la atenuación depende de la frecuencia, la profundidad de penetración en el árbol, geometría del camino y estado de la hoja (ya sea húmedo, seco, con hojas completas o sin hojas). (Martinez I. et al., 2020)

La propagación de señales en los árboles puede sufrir una atenuación en el rango de 10s de decibelios (dB) especialmente en frecuencias microondas donde la dimensión de los elementos del árbol es del orden de la longitud de onda de la señal. También en presencia de viento, los elementos de los árboles, como hojas, ramitas y ramas, son propensos a movimiento forzado que puede afectar la calidad de la señal recibida. (Sikiru, Siddle y S.O, 2014, p. 1)

En ciertos casos, la atenuación debida a la vegetación puede ser importante, tanto para los sistemas terrenales como para los sistemas Tierra-espacio, pero la gran diversidad de condiciones y tipos de follaje dificultan la elaboración de un procedimiento de predicción general. Además, existe

una falta de datos experimentales convenientemente verificados. Un marco básico para la caracterización radioeléctrica en la vegetación y la predicción de modelos está incluido en la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).(ITU, 2021)

2.2. Canal de comunicaciones

El canal de comunicaciones determina la calidad con la que se puede transmitir y/o recibir las señales. Se estudiarán los diferentes medios que pueden utilizarse para la transmisión de las señales y las causas que pueden originar una pérdida de calidad en la señal transmitida. Para establecer la comunicación entre un emisor y un receptor, es necesaria la existencia de un canal a través del cual se realiza el intercambio de información. El canal es, pues, el medio físico que permite el envío de señales entre los usuarios del sistema. Estas señales representan la información que se desea transmitir y pueden verse deterioradas por las características del medio físico que se utiliza para la transmisión y por la presencia de otros sistemas de comunicación.

En efecto, intuitivamente resulta evidente que algunos medios de transmisión estarán más protegidos frente a la aparición de efectos de degradación de la señal que otros. Así, un sistema de transmisión de señales por cable coaxial o fibra óptica parece en principio más protegido, frente al ruido y las interferencias, que un sistema de transmisión vía radio. Por este motivo, el medio de transmisión condiciona todo el diseño del sistema de comunicaciones, ya que tanto el transmisor como el receptor deberán adecuar las características de las señales a las del sistema. La modulación que utilizará un sistema de transmisión vía radio deberá ser más robusta que la de un sistema por cable o por fibra óptica, ya que a priori las señales enviadas vía radio experimentarán una mayor degradación como las múltiples reflexiones y/o bloqueos que podrá sufrir la señal electromagnética.(Cabrera, 2013)

2.2.1. Medio físico

Los medios guiados como su nombre lo indica guían o conducen las ondas a través de un camino físico, ejemplos de estos medios son el cable coaxial, la fibra óptica y el par trenzado.

2.2.1.1. Par trenzado

El par trenzado está formado por dos cables de cobre, del orden de 1 mm de diámetro, que están trenzados en una forma de hélice, parecida a una molécula de ADN. El principal objetivo por la cual se realiza el trenzado del cable es que los cables paralelos se comportan como una antena,

por lo que son susceptibles de captar señales interferentes y, además, radian la señal que circula por ellos.

Al realizar el trenzado de los cables, se disminuyen estos dos efectos siendo posible disponer de un mayor número de cables que salen juntos de una central. El ancho de banda del par trenzado depende del grosor del cable y de la distancia que deba cubrirse sin amplificar. Es típico que puedan transmitirse varios Mbps (1-5 Mbps) para distancias del orden de 1-3 km. Los cables trenzados más utilizados se conocen como categoría 5 tienen un ancho de banda de 100 MHz. También están siendo cada vez más populares los de la categoría 6 (250 MHz) y la categoría 7 (600 MHz). La principal diferencia entre las cada una de las diferentes categorías es el grosor del cable y sobre todo el paso del trenzado, tal y como se muestra en la Ilustración 2-1.(Cabrera, 2013)

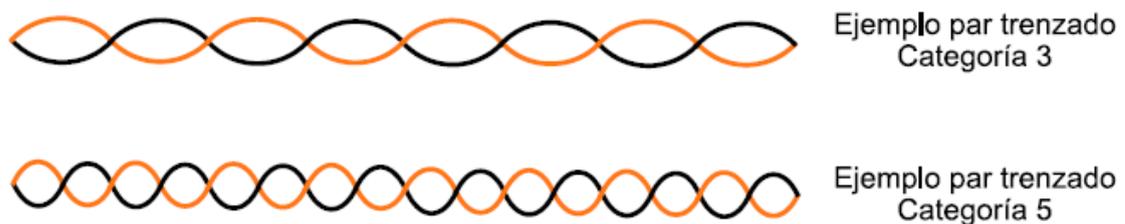


Ilustración 2-1: Comparativa entre el paso del trenzado en cables de categoría 3 (16 MHz) y de categoría 5 (100 MHz).

Fuente:(Cabrera, 2013)

2.2.1.2. Cable Coaxial

El cable coaxial está formado por un núcleo central de cobre recubierto de material aislante como se observa en la Ilustración 2-2, que a su vez está recubierto por una malla metálica. Todo ello está protegido por una cubierta aislante de plástico. Esta cubierta aislante está apantallada por una malla de cobre, que recubre a otra cubierta plástica, que se encarga de aislar la malla del núcleo central del cable de cobre. El cable coaxial se utiliza principalmente en aplicaciones de televisión por cable y sistemas de telefonía para largas distancias, aunque la tendencia es la de sustituirlos por cables de fibra óptica en la mayoría de las aplicaciones. Los coaxiales actuales tienen un ancho de banda aproximado de 1 GHz. (Cabrera, 2013)

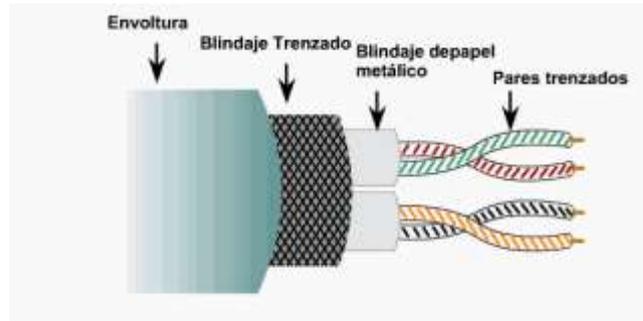


Ilustración 2-2: Composición de un cable coaxial

Fuente: (Sanguaña, 2010)

2.2.1.3. Fibra óptica

Medio físico que actualmente soporta una mayor capacidad para la transferencia de datos. En la Ilustración 2-3 se muestra un cable de fibra óptica, este cable está formado por varios hilos de fibra, donde cada uno de ellos puede contener varias comunicaciones de forma simultánea. La fibra óptica se fabrica a partir de vidrio, siendo este vidrio el medio a través del cual se propaga la luz que transporta la información. Para transmitir una secuencia de bits a través de una fibra óptica, se debe introducir pulsos de luz en uno de sus extremos y detectarlos en el otro. La presencia de luz representará el símbolo lógico 1 y la ausencia, el símbolo 0. (Cabrera, 2013)



Ilustración 2-3: Cables con varias fibras ópticas.

Fuente: (Cabrera, 2013)

2.2.2. Medios de transmisión no guiados: comunicaciones sin hilos

Son aquellos que no envían las señales mediante ningún tipo de cable; Estas señales se propagan libremente a través del medio, entre los más importantes se tiene el aire y el vacío.

2.2.2.1. Ondas de radio

Son omnidireccionales, en tanto que las microondas son direccionales como consecuencia no se necesitan antenas parabólicas, no se requiere alineación de las antenas, las ondas de radio son un tipo de radiación electromagnética. Una onda de radio tiene una longitud de onda mayor que la luz visible.(Cabrera, 2013)

Las ondas de radio comprenden las bandas de frecuencias desde 3 KHz a 300 MHz, abarcando:

- La banda VHF y parte de la UHF: de 30 MHz a 1 GHz.
- La radio comercial FM.
- La televisión UHF y VHF.
- Aplicaciones de redes de datos.

La transmisión y la recepción se efectúan mediante antenas:

- En la transmisión se radia energía electromagnética en el medio (generalmente aire), las configuraciones de transmisión son: direccional y omnidireccional.
- En la recepción se captan las ondas electromagnéticas del medio que rodea a la antena.

Las comunicaciones sin hilos también pueden ser competitivas en aplicaciones donde los terminales están fijos, especialmente en aquellos casos donde el coste de dar servicios de cobertura al usuario mediante infraestructuras de cable es especialmente elevado como son los servicios de televisión por satélite o por redes de radioenlaces terrestres. Los sistemas de transmisión sin hilos se basan en el principio de que al producir un movimiento sobre los electrones se crean ondas electromagnéticas que pueden propagarse a través del espacio.

Este fenómeno fue previsto por el físico inglés J. C. Maxwell en 1865 y confirmado experimentalmente por H. Hertz en 1887. Todas las comunicaciones sin hilos se basan en este principio. Las distancias que pueden cubrirse, el tamaño de las antenas y la potencia de los

circuitos eléctricos que deben conectarse al transmisor y al receptor dependen de la frecuencia y longitud de onda del sistema de comunicaciones.(Cabrera, 2013)

En la Ilustración 2-4 se representa una división del espectro radioeléctrico que incluye una distribución de sus bandas de frecuencia y sus usos en los sistemas de comunicación.

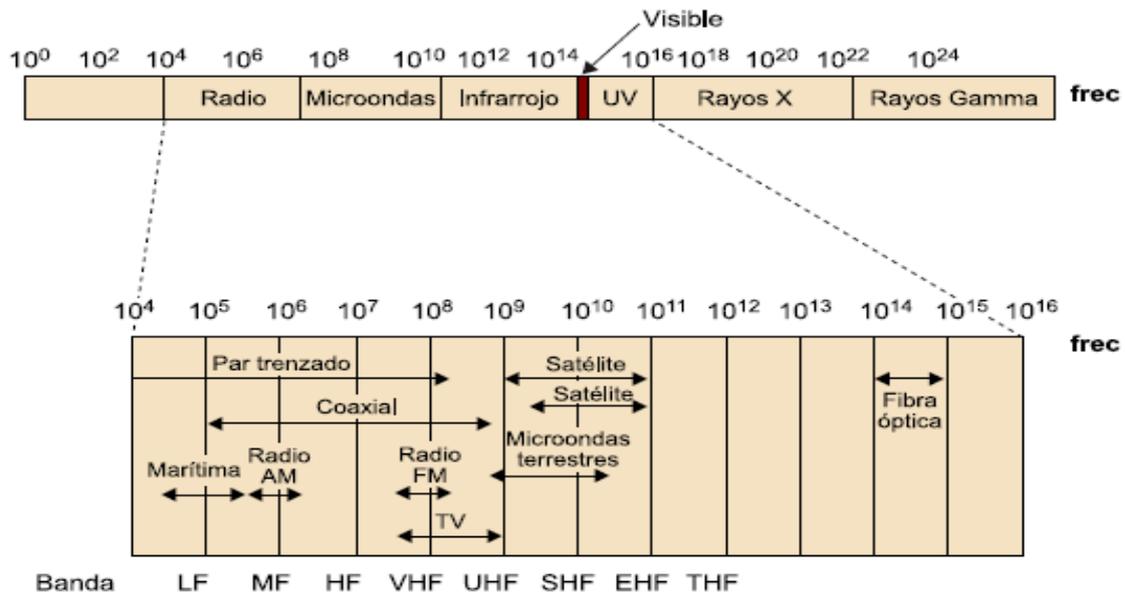


Ilustración 2-4: Espectro electromagnético y distribución en bandas

Fuente: (Cabrera, 2013)

En general, para frecuencias bajas, las ondas de radio se propagan sin dificultades a través de los obstáculos como edificios o accidentes geográficos y su potencia se atenúa al aumentar la distancia con la fuente, de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Al aumentar la frecuencia, las ondas electromagnéticas tienden a propagarse en línea recta (como la luz), siendo bloqueadas por los obstáculos y absorbidas por fenómenos atmosféricos como la lluvia o la niebla. (Cabrera, 2013)

2.2.2.2. Microondas Terrestre

La antena más común es la parabólica, que mide aproximadamente 3 m de diámetro esta debe estar fija y perfectamente alineada con la receptora. Para largas distancias se concatenan enlaces punto a punto entre antenas situadas en torres adyacentes, son susceptibles a la interferencia externa y la atenuación. Ilustración 2-5.

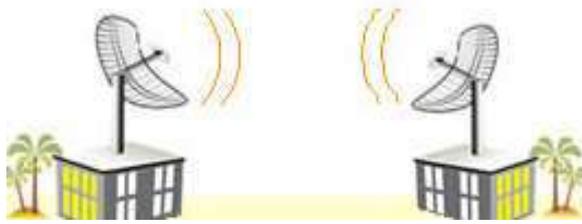


Ilustración 2-5: Transmisión microonda terrestre

Fuente: (Sanguaña, 2010)

Se suelen utilizar en sustitución del cable coaxial o las fibras ópticas, ya que estas necesitan menos repetidores y amplificadores, aunque se necesitan estar bien alineadas o con línea de vista.

Las principales aplicaciones de un sistema de microondas terrestre son las siguientes:

- Telefonía básica
- Datos
- Telégrafo
- Canales de Televisión
- Video
- Telefonía celular.

Características de transmisión

- La banda de frecuencias cubre de los 2 a los 40 GHz, a mayor frecuencia corresponde mayor Ancho de Banda potencial y virtualmente mayor velocidad de Transmisión.
- La principal causa de pérdida es la atenuación y esta aumenta con las lluvias, especialmente por encima de los 10 GHz, para TV por cable se usa la banda de 12 GHz.
- Las licencias o permisos para operar enlaces de microondas pueden resultar un poco difíciles ya que las autoridades deben asegurarse que ambos enlaces no causen interferencia a los enlaces ya existentes.
- El clima y el terreno son los mayores factores para considerar antes de instalar un sistema de microondas. (Sanguaña, 2010)

2.2.2.3. Microondas por Satélite

Un satélite de comunicaciones es básicamente una estación que retransmite microondas, Ilustración 2-6, se utiliza como enlace entre dos o más receptores / transmisores terrestres

llamados estaciones base. Los pasos operativos son los siguientes. El satélite recibe la señal en una banda de frecuencia llamada canal ascendente la cual se amplifica y se retransmite en otra banda de frecuencia llamada canal descendente.(Sanguaña, 2010)



Ilustración 2-6: Transmisión por satélite

Fuente: (Sanguaña, 2010)

2.3. Radiocomunicación

La radiocomunicación puede definirse como Telecomunicación realizada por medio de las ondas radioeléctricas. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), define las ondas radioeléctricas como las ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin guía artificial y cuyo límite superior de frecuencia se fija, convencionalmente, en 3.000 GHz. El conjunto de equipos para el tratamiento de la información: moduladores, filtros, antenas, en un sistema de radiocomunicación, constituye la estación transmisora, o, abreviadamente, el transmisor.(Rábanos, 2013)

Dentro de este marco de ideas es fundamental plantear ciertos conceptos básicos que son frecuentemente utilizados al momento de analizar las radiocomunicaciones y particularmente, la radiodifusión en frecuencia modulada:

- El proceso de comunicación empieza con la estación transmisora o transmisor, término que hace referencia al conjunto de equipos utilizados para el tratamiento de la señal de información, dicha estación está compuesta por: filtros, moduladores, osciladores y antenas.
- El medio de transmisión es el canal por el cual viajan las ondas moduladas en frecuencia, introduce pérdidas, ruido, interferencias y perturbaciones en la señal.

- Finalmente, la señal es receptada por el equipo receptor, que se encarga de demodularla y reconstruirla, es decir, transforma las ondas demoduladas en señales audibles para el usuario. (Rábanos, 2013)

En la Ilustración 2-7 se representa un modelo básico que puede utilizarse para el estudio y análisis de un sistema de radiocomunicación.

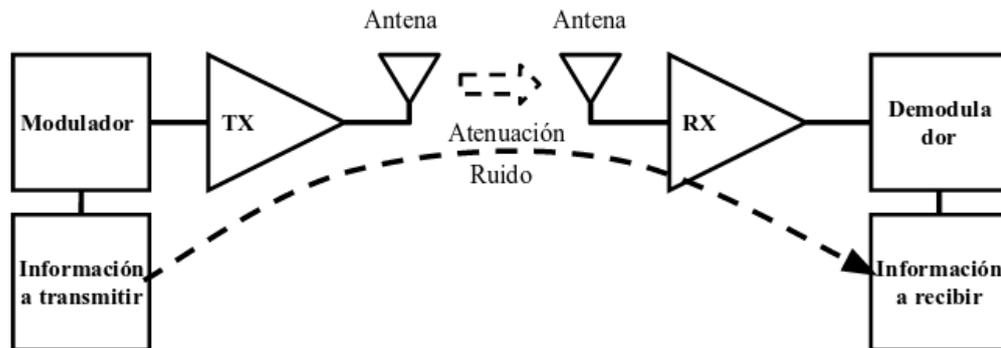


Ilustración 2-7: Sistema de Radiocomunicación.

Fuente: (Rábanos, 2013)

2.3.1. Características de propagación

Las modalidades de propagación de una onda radioeléctrica dependen de su frecuencia y del tipo y características eléctricas del terreno subyacente.

Según la frecuencia, puede clasificarse los modos de propagación como:

- Onda de superficie (OS), para frecuencias inferiores a 30 MHz con largos alcances y gran estabilidad de las señales. El tipo de terreno influye de forma notable en la propagación.
- Onda ionosférica (OI), para frecuencias comprendidas entre 3 y 30 MHz. La propagación tiene lugar por reflexión de las ondas en las capas ionizadas que circundan la Tierra a gran altura (ionosfera).
- Onda espacial (OE), para frecuencia superiores a 30 MHz. La propagación se realiza a través de las capas bajas de la atmósfera terrestre (troposfera).

Eventualmente, puede tomar parte del suelo, se distingue entre tres sub-modos:

- Onda Directa (OD), que enlaza transmisor con receptor.
- Onda Reflejada (OR), que conecta el transmisor y el receptor a través de una reflexión en el terreno subyacente.
- Ondas de Multitrayecto (ORM). que son ondas que alcanzan el receptor tras sufrir reflexiones en capas frontera de estratos troposféricos.

El medio de transmisión influye en la propagación de las ondas radioeléctricas a través de fenómenos físicos de:

- Reflexión
- Refracción
- Difracción
- Dispersión
- Absorción

Dependiendo su efecto de la naturaleza del medio (tipo de terreno, atmósfera), así como de la frecuencia y polarización de la onda. (Naranjo, 2014)

2.3.2. *Parámetros y características de recepción*

El parámetro primordial de recepción es la intensidad de campo o potencia recibida, según la clase de servicio. En cuanto a la intensidad de campo, se definen dos términos:

- *Intensidad de campo mínima utilizable*: también llamado campo mínimo necesario o campo a proteger, que es el valor mínimo del campo que permite obtener una determinada calidad de recepción: depende de la sensibilidad del receptor, del rendimiento de la antena y del ruido natural o artificial.
- *Intensidad de campo utilizable*, que tiene en cuenta, además del campo mínimo, los efectos de las interferencias de otros transmisores. Tanto las existentes en un caso real como las previstas en una planificación.

Para frecuencias inferiores a 1 GHz, se especifica la señal en la recepción en términos de la intensidad de campo eléctrico E en $\mu V/m$ o dBu , Ecuación 2-1 donde:

$$E(dBu) = 20 \log\left(e\left(\frac{\mu V}{m}\right)\right)$$

Ecuación 2-1: Intensidad de Campo eléctrico.

Ya que en esas frecuencias se suelen emplear en la recepción antenas Lineales, en las cuales la fuerza electromotriz inducida por la onda es igual al producto de la intensidad de campo incidente por la longitud efectiva de la antena.

1. *Condiciones de recepción:* En la planificación y proyecto de sistemas radioeléctricos han de considerarse unas determinadas condiciones que dependen de:
 - La instalación de recepción.
 - El tipo de transmisión.
 - La banda de frecuencias.
 - Las condiciones de explotación (zona, hora, época del año).

2. *Interferencia.* Se define la interferencia en radiocomunicación como el efecto de una energía no deseada debida a una o varias emisiones, radiaciones, inducciones o sus combinaciones, sobre la recepción de un sistema de radiocomunicación que se manifiesta como degradación de la calidad, falseamiento o pérdida de la información que se podría obtener en ausencia de esta energía no deseada.

3. *Relación de protección en RF,* que se define como el valor mínimo, generalmente expresado en decibelios. de la relación entre la señal deseada y la señal no deseada (interferencia) a la entrada del receptor. (Rábanos, 2013)

2.4. Influencia del medio de transmisión en la propagación.

Existen varios factores que hacen que el modelo ideal de propagación en el espacio libre descrito en la ecuación de Friss no se ajuste a valores reales, entre estos están el suelo, la ionósfera y la tropósfera y sus respectivos factores físicos como la orografía, sus propiedades eléctricas, entre otras. Con respecto al suelo, a bajas frecuencias (por debajo de la banda MF) la Tierra es un buen conductor, por ejemplo, ideal para el servicio de Radiodifusión AM siendo capaz de transportar campos electromagnéticos más allá que la línea de vista directa, mientras que, cuando la frecuencia es alta, la atenuación de este medio es elevada, por lo que se hace necesario levantar una cierta distancia las antenas del suelo. En cuanto a la tropósfera, la concentración no uniforme

de gases ocasiona una curvatura en los rayos a causa del cambio del índice de refracción del medio por la diferencia de altura, ya que, a menor altura, mayor concentración de gases. En el caso de las microondas, se produce una atenuación adicional en las moléculas, además existen atenuaciones adicionales en la propagación a causa del agua en forma de vapor, o hidrometeoros como la lluvia, la niebla, la nieve, etc.

Finalmente, la ionosfera es una capa de la atmósfera que refleja las ondas de baja frecuencia, refracta las ondas a medio y alta frecuencia y despolariza las ondas de muy alta y extra alta frecuencia. A continuación, se describen varios fenómenos que afectan a la propagación de una onda electromagnética.(Uquillas, 2016, p. 21)

2.4.1. Reflexión

El fenómeno físico conocido como reflexión en las ondas electromagnéticas ocurre cuando una onda incidente choca con una barrera existente, un objeto, y parte de la potencia incidente no penetra el mismo, por lo que las ondas que no penetran el objeto se reflejan. Debido a que todas las ondas reflejadas permanecen en el mismo medio que las ondas incidentes, sus velocidades son iguales y por lo tanto el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. Este fenómeno depende de las propiedades de la señal y de las propiedades físicas del objeto. Se conocen dos tipos de reflexión, la especular y la difusa, la primera se da cuando el objeto contra el que choca la onda es plano, mientras que la segunda se produce cuando la barrera contra la que choca la onda es irregular y las hendiduras son más pequeñas que la longitud de onda, la reflexión difusa se conoce también como dispersión.(Uquillas, 2016)

En la Ilustración 2-8 se visualiza el diagrama que consiste el fenómeno de la reflexión.

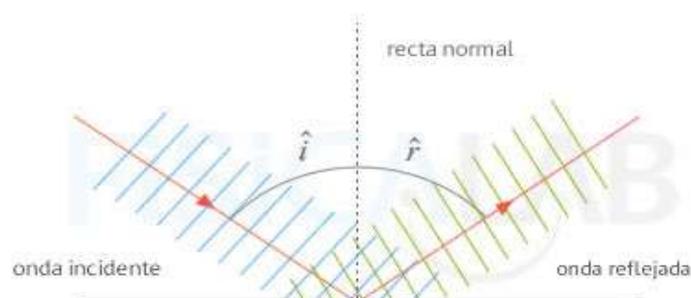


Ilustración 2-8: Reflexión.

Fuente: <https://www.fiscalab.com/apartado/reflexion-refraccion-ondas>

2.4.2. Refracción

La refracción se refiere al cambio de dirección de un rayo al pasar en dirección oblicua de un medio a otro con distinta velocidad de propagación. La velocidad a la que se propaga una onda electromagnética es inversamente proporcional a la densidad del medio en el que lo hace. Por lo tanto, hay refracción siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro con distinta densidad.

En la Ilustración 2-9 se representa el esquema de los elementos presentes en el fenómeno de la refracción, el ángulo de incidencia es llamado al ángulo que forma la onda incidente y la normal y el ángulo de refracción es el que se forma por la onda propagada en el medio y la normal, así, el índice de refracción es la relación existente entre la velocidad de propagación de la luz en el espacio vacío y la velocidad de propagación de la luz en determinado material. (Uquillas, 2016)

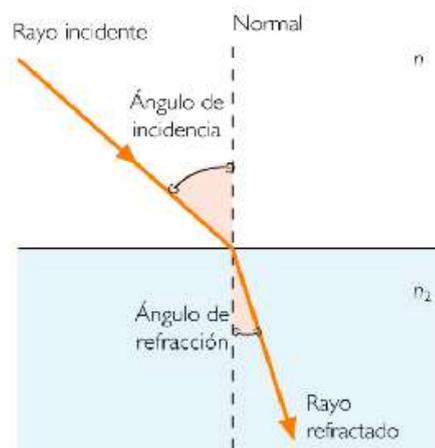


Ilustración 2-9: Fenómeno de la refracción.

Fuente: <https://deconceptos.com/wp-content/uploads/2010/02/concepto-de-refraccion.png>

2.4.3. Difracción

Es un fenómeno característico de las ondas que se basa en la desviación de éstas al encontrar un obstáculo o al atravesar una rendija. La difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz visible y las ondas de radio. También sucede cuando un grupo de ondas de tamaño finito se propaga; por ejemplo, por causa de la difracción, el haz colimado de ondas de luz de un láser debe finalmente divergir en un rayo más amplio a una cierta distancia del emisor. La difracción puede ser entendida a nivel fenomenológico usando el principio de Huygens, según el cual un frente de onda se puede visualizar como una sucesión de emisores puntuales, que reemiten la onda al oscilar, en respuesta a ella y contribuyen así a su propagación. Aunque cada oscilador individual genera una

onda esférica, la interferencia de todas ellas da lugar a una onda plana que viaja en la misma dirección que la onda inicial.

En la Ilustración 2-10 se puede observar las ondas difractadas que se generan por un frente de onda, cuando el frente de onda encuentra un obstáculo los emisores correspondientes al extremo del frente de onda obstruido no tienen otros emisores que interfieran con las ondas que ellos generan, y estas se aproximan a ondas esféricas o cilíndricas. Como consecuencia, al adoptar el frente de onda una forma redondeada en donde fue recortado, la dirección de propagación de la onda cambia, girando hacia el obstáculo. (Uquillas, 2016)

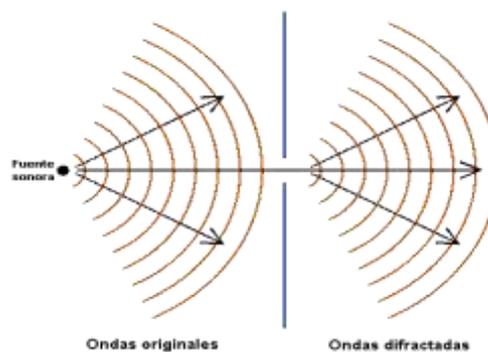


Ilustración 2-10: Ondas de difracción causadas por un frente de onda

Fuente: <https://sites.google.com/a/tecsup.edu.pe/fisica-basica/0-5-fenomeno-de-las-ondas/d-difraccion>

2.4.4. *Dispersión*

La dispersión de la luz es el fenómeno por el cual distintas longitudes de onda se refractan con ángulos distintos al atravesar medios materiales. Se entiende por dispersión de la luz a la descomposición de un haz de luz blanca al incidir sobre un medio diferente al vacío. Esto sucede, ya que cada color tiene una diferente longitud de onda, y por ende se refractan con diferentes ángulos.

En la Ilustración 2-11 se muestra la descomposición de la luz blanca en los diferentes colores cuando esta atraviesa un medio. La luz blanca es la suma de los haces de luz de diferente longitud de onda y por ende diferente color. Cada color tiene una longitud de onda (Nm) diferente y al cambiar de medio se refractan con diferentes ángulos. La velocidad de la luz en el vacío es constante e independiente de su longitud de onda, sin embargo, su velocidad en cualquier otro medio depende de su longitud de onda. (Fernández, 2023)

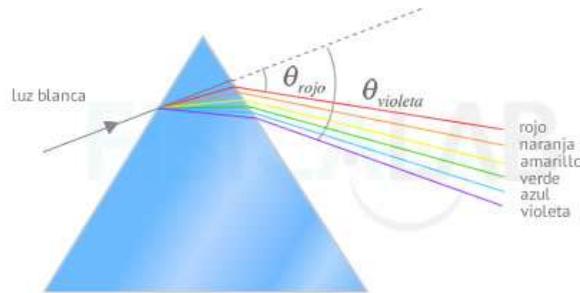


Ilustración 2-11: Dispersión.

Fuente: <https://www.fiscalab.com/apartado/dispersion-luz>

2.4.5. *Absorción*

La causa de la absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire es que el aire no es un vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Estos materiales pueden absorber a las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricas. La absorción de onda por la atmósfera es análoga a una pérdida de potencia. Una vez absorbida, la energía se pierde para siempre, lo que provoca una atenuación de las intensidades de voltaje y campo magnético al igual que una reducción correspondiente en la densidad de potencia.

La causa de la absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire es que el aire no es un vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Estos materiales pueden absorber a las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricas. La absorción de onda por la atmósfera es análoga a una pérdida de potencia. Una vez absorbida, la energía se pierde para siempre, lo que provoca una atenuación de las intensidades de voltaje y campo magnético al igual que una reducción correspondiente en la densidad de potencia.

La medida en que una onda es absorbida en la atmósfera por sus distintas partículas depende de su frecuencia, y es relativamente insignificante a menos de unos 10 GHz. Así también la absorción de una onda depende del medio en el que se propague. Las pérdidas por absorción no dependen de la distancia a la fuente de radiación, sino más bien a la distancia total que la onda se propaga a través de la atmósfera, es decir, cuando la onda se propaga a través de un medio homogéneo y

cuyas propiedades son uniformes, las pérdidas por absorción en el primer kilómetro de propagación son las mismas que en el último kilómetro. En caso de contar con lluvias intensas y neblina densa, las ondas electromagnéticas tienden a ser absorbidas en mayor proporción que cuando se encuentran en una atmósfera normal. En la Ilustración 2-12 se tiene la absorción en decibeles por kilómetro de una onda electromagnética en frecuencias de los 10 a 200 GHz cuando se propaga en oxígeno y vapor de agua. (Tomasi, 2004)

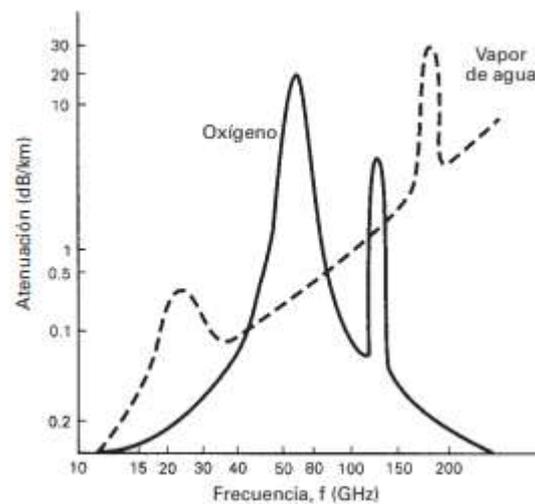


Ilustración 2-12: Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas.

Fuente: (Tomasi, 2004)

2.5. Radioenlace terrestre

Un radioenlace terrestre tiene como objetivo hacer una interconexión mediante ondas de radio entre dos terminales ya sean fijos o móviles situados en la Tierra. El término radioenlaces de microondas se acuñó debido a las frecuencias de operación, que se encuentran entre 2 y 50 GHz. Para el análisis y estudio de los radioenlaces terrestres se asume que la trayectoria seguida por una onda está llena de obstáculos como, edificaciones, accidentes geográficos, árboles, además se debe considerar la curvatura de la Tierra.

2.5.1. Balance de un enlace radioeléctrico.

El balance del enlace mostrada en la Ilustración 2-13 es la relación que expresa la potencia disponible en el receptor en función de la potencia entregada por el transmisor y las diferentes pérdidas y ganancias que aparecen en el trayecto del transmisor hacia el receptor. Utilizando las ganancias de potencia de las antenas, perdidas del cable, la Ecuación 2-2 se usa para el cálculo del balance del enlace:

$$P_{dr} = P_{et} - L_{tt} + G_t - L_b + G_r - L_{tr}$$

Ecuación 2-2: Ecuación general de balance del enlace.

donde las pérdidas/ganancias están en dB y las potencias en unidades logarítmicas similares, por ejemplo en dBm. (Rábanos, 2013)



Ilustración 2-13: Trayectoria de una onda de radio entre transmisor y receptor.

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

2.5.2. Pérdida del cable

Uno de los elementos principales en los enlaces de radio son los cables de conexión entre emisor, receptor y sus respectivas antenas, éstos también introducen pérdidas en el sistema, que van a depender del tipo de cable y la frecuencia de operación de este, la atenuación se mide en dB/m.

Independientemente de la calidad del cable mostrada en la Tabla 2-1, éste siempre sufrirá atenuaciones, por lo que se recomienda que su longitud para interconectar dispositivos sea la mínima posible. La atenuación típica en los cables está en el rango de 0,1 dB/m a 1 dB/m, en general, mientras el cable sea más rígido y grueso, presentará menor atenuación.

La pérdida en los cables es dependiente de la frecuencia de operación del radioenlace, por lo tanto, para realizar el cálculo exacto de dicha atenuación se debe usar la hoja de datos específicos de cada cable, considerando el rango de frecuencia utilizado. (Uquillas, 2016)

Tabla 2-1: Valores típicos de pérdida en los cables

Tipo de cable	Pérdida	
	Frecuencia (MHz)	Atenuación(dB/100m)
RG-6	50	4,8
	200	9,7
T-100	200	8
LMR-500	50	2,7
	150	4,8
Belden 8212	50	6.8901
	100	9,843
Heliac 7/8"	88	1,12
	100	1,19
	108	1,24
LDF 6-50	88	0,741
	100	0,793
	108	0,826

Fuente:(Uquillas, 2016)

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

2.5.3. *Pérdida en conectores*

Los conectores son muy indispensables para un radioenlace estos permiten interconectar los dispositivos y antenas en un radio enlace. La pérdida de los conectores va a depender del tipo de cable y la soldadura de este, se estima al menos 0.25 dB de pérdida por cada conector, sin embargo, estas pueden generar pérdidas mucho mayores dependiendo del tipo de conector por eso es recomendable revisar las hojas de datos disponibles para saber el rango y la frecuencia adecuada para el conector.

Al ser un cable más grande se utilizará más conectores, la suma de las pérdidas en los conectores va a estar incluidas en una parte de la ecuación de pérdidas de los cables, por lo que se debe considerar pérdidas por conectores individuales en el rango de 0.3 a 0.5 dB.

2.5.4. *Línea de vista y multitrayectoria.*

Se dice que hay línea de vista cuando no existen obstáculos entre el transmisor y receptor, es decir, existe una ruta directa. Al no existir esta llamada línea de vista, lo que se tiene es una

trayectoria múltiple. En una transmisión la señal sufre efectos como difracción, refracción, reflexión y dispersión, mismos que provocan que la comunicación entre los extremos se llegue a completar cuando la onda complete diferentes trayectorias.

La línea de vista se puede lograr siempre y cuando se tenga libertad en cuanto a la colocación de las antenas, se las puede colocar de tal manera que, si no existen obstáculos cercanos, se tenga una vista directa entre transmisor y receptor, por ejemplo, los sistemas satelitales y enlaces de microonda punto – punto.

Dependiendo de la diferencia en las longitudes de los caminos seguidos por las ondas directa y reflejadas, la señal compuesta resultante en el receptor puede ser más pequeña o más grande que la señal directa, dentro de este caso, se pueden encontrar sistemas de microonda fija por la refracción en la atmósfera y reflexión en la tierra, así como los sistemas de comunicaciones móviles.(Uquillas, 2016)

2.6. Modelos de Propagación en el espacio libre

Es utilizado para predecir la señal transmitida entre emisor y receptor cuando éstos tienen línea de vista directa. El modelo de propagación en el espacio tiene como objetivo predecir la potencia recibida, que decrece a medida que la distancia entre las antenas transmisora y receptora aumenta, es decir, se da una relación inversamente proporcional.

La energía receptada en el espacio libre es función de la distancia, matemáticamente se describe en la Ecuación 2-3.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

Ecuación 2-3: Potencia recibida en el espacio libre.

Donde:

$P_r(d)$ es la potencia recibida en función de la distancia,

P_t representa la potencia transmitida,

G_t y G_r es la ganancia transmitida y recibida, respectivamente

λ^2 es la longitud de onda en metros y

L es el factor de pérdida del sistema, tiende a ser mayor que la unidad.

La ecuación que describe la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio libre muestra que la potencia recibida sufre un decremento en función del cuadrado de la distancia de separación entre las dos antenas, lo que implica que ésta decae con la distancia a medida de 20 dB por década. (Uquillas, 2016)

2.7. Región de Fresnel

Es una región intermedia entre el campo de inducción y el de radiación. A diferencia del campo lejano, la región de Fresnel se genera en las proximidades de la antena transmisora, en esta región predominan los campos de radiación, es decir, el campo eléctrico y magnético tienen un desfase de 90 grados, Ilustración 2-14.

El límite de esta región comúnmente se define en la Ecuación 2-4.

$$R < 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

Ecuación 2-4: Límite de la región de Fresnel.

Tomando como base el principio de Huygens, se puede investigar y calcular cuál debería ser la máxima penetración de un obstáculo, por ejemplo, una edificación, en la zona de Fresnel para lograr un enlace efectivo entre emisor y receptor. Idealmente se requiere que la primera zona de Fresnel no esté obstruida, o en su defecto que el equivalente al 60% de esta primera región esté despejado para garantizar un enlace de calidad.

En aplicaciones críticas se requiere hacer un análisis extensivo para detectar anomalías en la propagación de las ondas electromagnéticas que se pueden curvar hacia arriba, por lo que se deberá planificar una mayor altura en las torres. (Uquillas, 2016)

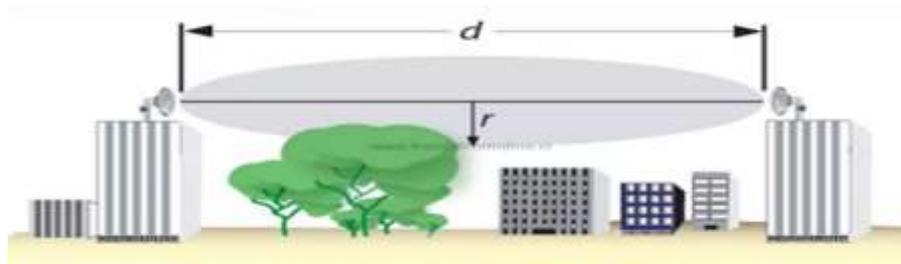


Ilustración 2-14: Zona de Fresnel.

Fuente: http://3.bp.blogspot.com/qo214HbhSHg/UfqihHaEHxiI/AAAAAAAAABXg/2qXiv_RMdPY/s1600/fresnel.gif

Para calcular la Zona de Fresnel se tiene la Ecuación 2-5, donde d_1 y d_2 representan distancias medidas en kilómetros desde el obstáculo hasta el transmisor y desde el obstáculo al receptor, respectivamente, d es la distancia directa entre emisor y receptor en kilómetros, f representa la frecuencia expresada en GHz y finalmente r es el radio, expresado en metros. (Martinez I. et al., 2020, p. 45)

$$r = 17,32 \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{d \cdot f}}$$

Ecuación 2-5: Cálculo de la zona de Fresnel.

En caso de que el obstáculo esté situado en la mitad de la distancia entre emisor y receptor la fórmula descrita anteriormente se simplifica, dando como resultado la Ecuación 2-6:

$$r = 17,32 \sqrt{\frac{d}{4f}}$$

Ecuación 2-6: Obstáculo en la mitad del emisor y el receptor.

Pero en base a la descripción anterior se conoce que con el 60% de la primera zona de Fresnel el radioenlace tendrá éxito, por lo que la fórmula se reduce a su mínima expresión y se presenta en la Ecuación 2-7.(Uquillas, 2016)

$$0,6 r = 5,2 \sqrt{\frac{d}{f}}$$

Ecuación 2-7: Primera zona de Fresnel.

2.8. Atenuaciones

Para la propagación de ondas electromagnéticas, el espacio libre es considerado como el vacío, por lo tanto, no se consideran pérdidas. Cuando dichas ondas se encuentran en el vacío, se dispersan y se reduce la densidad de potencia, fenómeno que se conoce como atenuación. La atenuación está presente en el espacio libre tanto como en la atmósfera terrestre y matemáticamente está descrita por la ley del cuadrado inverso que explica cómo se reduce la densidad de potencia en base a la distancia a la fuente. Se dispersa el campo electromagnético continuo a medida que el frente de onda se aleja de la fuente, lo que produce que las ondas se

alejen cada vez más entre sí, produciendo una pérdida de potencia, dando como resultado menor cantidad de ondas electromagnéticas por unidad de área. (Uquillas, 2016)

2.8.1. *Atenuación de transmisión*

La pérdida de transmisión (l_t), entre dos antenas cualesquiera, a través de un medio arbitrario matemáticamente se define en la Ecuación 2-8.

$$l_t = a_e \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{g_t \cdot g_r}$$

Ecuación 2-8: Atenuación de transmisión.

En dB se obtiene la Ecuación 2-9:

$$L_t = L_{bf} + A_E - G_t - G_r = L_b - G_t - G_r$$

Ecuación 2-9: Perdida de atenuación en decibelios.

2.8.2. *Atenuación básica de propagación en el espacio libre.*

Para realizar el análisis de este tipo de atenuaciones se plantea un radioenlace con antenas isotropas, ubicadas en el espacio libre, considerando una línea de vista entre los equipos pasivos del emisor y el receptor. Existe una pérdida básica en condiciones de espacio libre, basada en la potencia transmitida por una antena isotropa y recibida por una antena similar, de donde se obtiene la Ecuación 2-10.

$$l_{bf} = \frac{P_t}{G_r} = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right)^2$$

Ecuación 2-10: Perdida en el espacio libre.

Para facilitar el cálculo de radioenlaces, a la Ecuación 12-10 se la expresa en decibelios:

$$l_{bf}(dB) = 32,45 + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (km)$$

Ecuación 2-11: Perdida en decibelios.

Es común expresar la frecuencia en MHz y la distancia en km cuando se realiza el cálculo para la banda de radiodifusión como se muestra en la Ecuación 2-11, mientras que, en la Ecuación 2-12 para los enlaces de microondas, la frecuencia se expresa en GHz, por lo que, el valor de la constante se incrementa a 92,45.

$$l_{bf}(dB) = 92,45 + 20 \log f(GHz) + 20 \log d (km)$$

Ecuación 2-12: Perdida de atenuación en decibelios.

2.8.3. *Atenuación a través de un medio cualquiera*

Las pérdidas y sus conceptos son similares al caso de la propagación en el espacio libre ya que existe una pérdida básica l_b , que resulta del cociente entre la potencia transmitida por una antena isotrópica y recibida por un dispositivo de características semejantes.

A diferencia del caso anterior, el análisis de este tipo de pérdidas, conocidas como atenuaciones de campo, debe realizarse tomando en cuenta el medio en cuestión y los valores de campo producidos por una antena isotrópica que radia una potencia P_t a una distancia d , siendo expresada en la Ecuación 2-13.

$$a_e = \left(\frac{e_0}{e}\right)^2$$

Ecuación 2-13: Atenuación de campo.

Donde:

e y e_0 corresponden a los campos producidos por una antena isotrópica que radia potencia a una distancia determinada.

La ecuación 2-13 expresada en decibelios, muestra en la ecuación 2-14:

$$A_E = 20 \log \left(\frac{e_0}{e}\right) = E_0(dBu) - E(dBu)$$

Ecuación 2-14: Atenuación de campo en decibelios.

La potencia recibida en función del campo es la Ecuación 2-15:

$$P_r = \frac{e^2}{120\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} = \left(\frac{e}{e_0}\right)^2 \cdot \frac{e_0^2}{120\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Ecuación 2-15: Potencia en función del campo.

En base a la propagación en el espacio libre, la expresión anterior se reduce a la ecuación 2-16:

$$P_r = \frac{1}{a_e} \cdot P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

Ecuación 2-16: Reducción de potencia.

Por consiguiente, se obtiene la Ecuación 2-17:

$$L_B = L_{bf} + A_E$$

Ecuación 2-17: Pérdida básica con una antena isótropa.

En la Ecuación 2-17 donde L_B es la pérdida básica con una antena isótropa en un medio cualquiera, L_{bf} representa la pérdida básica en el espacio libre y A_E es la atenuación de campo, una pérdida en exceso del enlace. (Uquillas, 2016)

2.8.3.1. Atenuación por gases y vapores atmosféricos

La atenuación por gases y vapores atmosféricos se produce en trayectos troposféricos, debido a que las moléculas de H_2 y H_2O absorben la energía electromagnética, es de vital importancia en frecuencias muy altas, es decir, en el orden de los GHz, donde se aplica un análisis matemático en base a la fórmula siguiente:

$$A_a = \gamma_a \cdot d$$

Ecuación 2-18: Atenuación en la atmosfera.

En la ecuación 2-18, A_a representa a la atenuación en la atmósfera, γ_a es la atenuación específica, expresada en dB/m y es la distancia. Este tipo de atenuación no es considerada para el rango de frecuencias de entre 88 y 108 MHz, sino solamente para frecuencias iguales o mayores a 10 GHz. (Uquillas, 2016)

2.8.3.2. Atenuación por lluvia

La transmisión de señales de microondas a más de 10 GHz es vulnerable a la precipitación o lluvia. La lluvia, nieve, aguanieve, partículas de hielo y el granizo pueden atenuar y dispersar señales de microondas y de este modo reducir calidad del sistema. La energía se atenúa debido a la radiación (dispersión) y absorción (calentamiento). Para longitudes de onda que sean pequeñas en comparación con el tamaño de una gota, la atenuación debida a la absorción es más grande que la atenuación debida a la dispersión. Para longitudes de ondas grandes en comparación con el tamaño de una gota de agua, la atenuación debida a la dispersión es más grande que la atenuación debida a la absorción. (Naranjo, 2014)

Es producida a causa de la absorción y dispersión de hidrometeoros, lluvia, granizo y nieve, de los enlaces troposféricos y por satélite. Este tipo de atenuación se evalúa para enlaces en los que la frecuencia supera los 6 GHz, para los cuales se calcula la atenuación por lluvia excedida durante porcentajes de tiempos pequeños. (Naranjo, 2014)

Matemáticamente, dicho fenómeno se describe mediante la siguiente Ecuación 2-19:

$$A(R, p) = \lambda(R, p) \cdot L_{efe}$$

Ecuación 2-19: Atenuación por lluvia.

Donde, $A(R, p)$ es la atenuación de la intensidad de lluvia durante un porcentaje de tiempo, $\lambda(R, p)$ es la atenuación específica expresada en dB/km, que depende de la frecuencia y la polarización, y L_{efe} que se expresa en km, representa la longitud efectiva del trayecto. (Uquillas, 2016)

2.8.3.3. Atenuación por vegetación

Es bien conocido que las ondas radioeléctricas sufren gran atenuación al atravesar la vegetación, especialmente en el caso de frecuencias elevadas. Los sistemas móviles se ven mucho más afectados por este fenómeno, pues es más fácil que puedan darse situaciones donde el receptor no

tiene visión directa (NLOS) al encontrarse obstruido por árboles o grandes arbustos. En el caso de enlaces punto a punto es menos habitual, pues la planificación previa del radioenlace permite identificar posibles obstáculos y evitarlos convenientemente. Aun así, todavía pueden producirse pérdidas significativas si el haz radioeléctrico transcurre cerca de zonas boscosas.

La gran dificultad que entraña la definición de un modelo matemático para el cálculo de la atenuación por vegetación es que depende de gran cantidad de factores y parámetros físicos. Por una parte, se tiene el tipo de vegetación mostrada en la Ilustración 2-15: especies, árboles, arbustos, hoja perenne o caduca, densidad del follaje, etc. Por otra parte, su disposición geométrica (número, posición, altura) y su variabilidad temporal (efectos del viento sobre hojas y ramas o crecimiento a largo plazo). Luego es evidente que tener en cuenta todas estas características resulta prácticamente imposible. (Cristian Choque Quispe, 2018)



Ilustración 2-15: Montaje experimental utilizado para mediciones de atenuación por vegetación.

Fuente: University of Portsmouth.

En la Recomendación UIT-R P.833-10 se incluyeron fórmulas muy simples para estimar la atenuación por vegetación tomando en cuenta la Ilustración 2-16 donde se tiene la sección del transmisor con el generador de señales y de igual manera el receptor con el analizador de espectro interviniendo en el medio la vegetación.

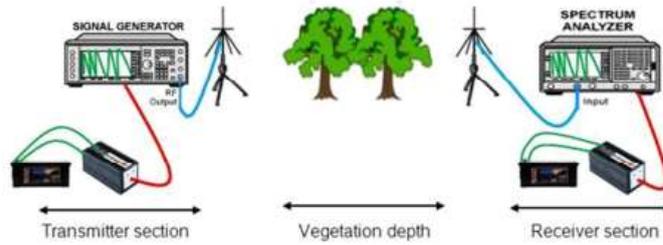


Ilustración 2-16: Diagrama del ajuste experimental para las mediciones correspondientes.

Fuente:(Elshayeb, 2018)

2.8.4. *Desvanecimiento*

La propagación de las señales radioeléctricas a través de diversos medios está sujeta a la variabilidad de las características físicas de estos medios. Por ello, la pérdida básica de propagación es una variable aleatoria. Supuesto invariable con el tiempo el valor medio de la potencia transmitida, la variabilidad de la pérdida básica implica que la potencia recibida sea también variable. Se denominan en general, potencia recibida nominal al valor mediano de la potencia recibida y suele ser uno de los objetivos de diseño de los sistemas de radiocomunicaciones. Se conoce con el nombre de desvanecimiento a toda disminución de la potencia recibida de señal con relación a su valor nominal. La diferencia entre este nivel nominal y el nivel recibido en condiciones de desvanecimiento se llama profundidad de desvanecimiento y se expresa en dB. Al intervalo de tiempo que media entre la disminución y la recuperación del nivel nominal, se le llama duración del desvanecimiento. En la Ilustración 2-17 se aclara la terminología utilizada. Se observan pequeñas variaciones aleatorias de la señal en torno al valor nominal de potencia P_0 (dBm).

Ocasionalmente, hay un desvanecimiento intenso y en ese caso, en su entorno el valor mediano de la potencia es P_f (dBm), que es inferior a P_0 . Se llama depresión de la mediana o depresión de Pearson a esta disminución del valor mediano que acompaña a los desvanecimientos intensos. En el instante t_1 el valor de la potencia es P_1 (dBm). La profundidad de desvanecimiento F_1 es igual a $P_1 - P_0$ (dB). Para $t > t_1$, el nivel de señal sigue disminuyendo. El nivel mínimo es P_2 y corresponde a la profundidad $F_2 = P_2 - P_0$. (Rábanos, 2013)

Seguidamente, el nivel de la señal se recupera y en el instante t_2 alcanza nuevamente el valor P_1 . En consecuencia, La duración del desvanecimiento F_1 viene dada por la Ecuación 2-20:

$$\tau_1 = t_2 - t_1$$

Ecuación 2-20: Duración del desvanecimiento F_1

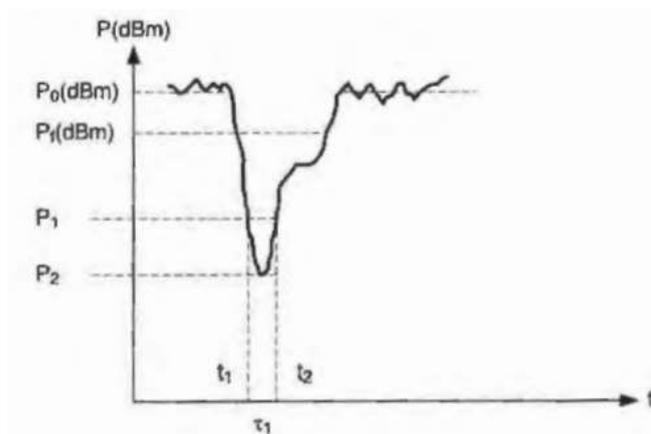


Ilustración 2-17: Variaciones aleatorias de la señal en torno al valor nominal

Fuente: (Rábanos, 2013)

2.9. Recommendation ITU-R P.833-10

2.9.1. Obstrucción en zonas boscosas

2.9.1.1. Trayecto terrenal con un terminal en zona boscosa

Para un trayecto radioeléctrico terrenal, uno de cuyos terminales está situado en un bosque o en una zona similar de vegetación extensa, la pérdida adicional debida a la vegetación puede describirse en base a dos parámetros:

- El índice de atenuación específica (dB/m) debida fundamentalmente a la dispersión de energía fuera del trayecto radioeléctrico, que se mediría en un trayecto muy corto
- La atenuación adicional total máxima debida a la vegetación en un trayecto radioeléctrico (dB) limitada por el efecto de otros mecanismos, entre ellos, la propagación de ondas de superficie por encima del medio vegetal y la dispersión dentro del mismo.

En la Ilustración 2-18, el transmisor está fuera de la zona boscosa y el receptor está a una cierta distancia, d , dentro de la misma. La Ecuación 2-21 representa la atenuación excesiva, A_{ev} , debida a la presencia de la vegetación viene dada por:

$$A_{ev} = A_m [1 - e^{-\frac{d\gamma}{A_m}}]$$

Ecuación 2-21: Atenuación excesiva.

siendo:

d : longitud del trayecto dentro de la zona boscosa (m)

γ : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)

A_m : atenuación máxima cuando un terminal está dentro de una zona de vegetación de un tipo y profundidad específicos (dB).

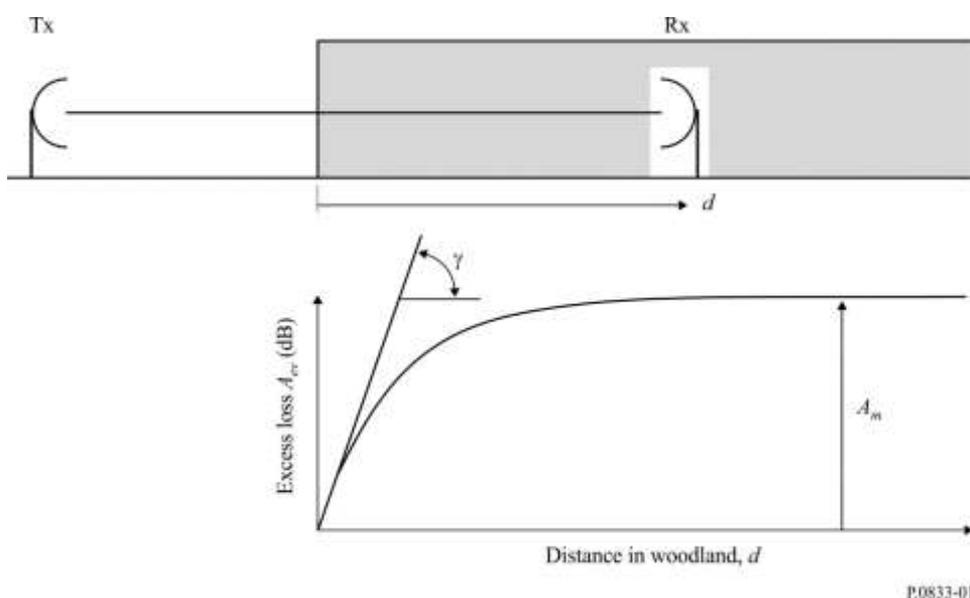


Ilustración 2-18: Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa.

Fuente: (International Telecommunication Union, 2013)

Es importante observar que, en la definición de exceso de atenuación, A_{ev} , se incluye el exceso debido a todos los demás mecanismos, y no sólo la pérdida en espacio abierto. Por consiguiente, si la geometría del trayecto radioeléctrico de la Ilustración 2-18 fuese de tal forma que el despejamiento total de Fresnel del terreno no existiera, A_{ev} , sería el exceso de atenuación producido tanto en espacio abierto como por la pérdida por difracción. De igual forma, si la frecuencia fuera suficientemente alta como para que la absorción gaseosa resultara significativa, A_{ev} , sería también el exceso producido por la absorción gaseosa.

Debe observarse asimismo que, A_m , es equivalente a la pérdida por ocupación del suelo observada frecuentemente en el caso de terminales obstruidos por alguna forma de cobertura del terreno u ocupación del suelo.

El valor de la atenuación específica debida a la vegetación, γ dB/m, depende de la especie y la densidad de dicha vegetación. En la Ilustración 2-19 se proporcionan valores aproximados en función de la frecuencia.

En la Ilustración 2-19 se muestran valores típicos de atenuación específica obtenidos a partir de diferentes mediciones en la gama de frecuencias que va de 30 MHz a 30 GHz aproximadamente en zona boscosa. Por debajo de 1 GHz las señales polarizadas verticalmente tienen tendencia a experimentar una atenuación superior a la que experimentan las polarizadas horizontalmente, aunque esto se debe a la dispersión causada por los troncos de los árboles.

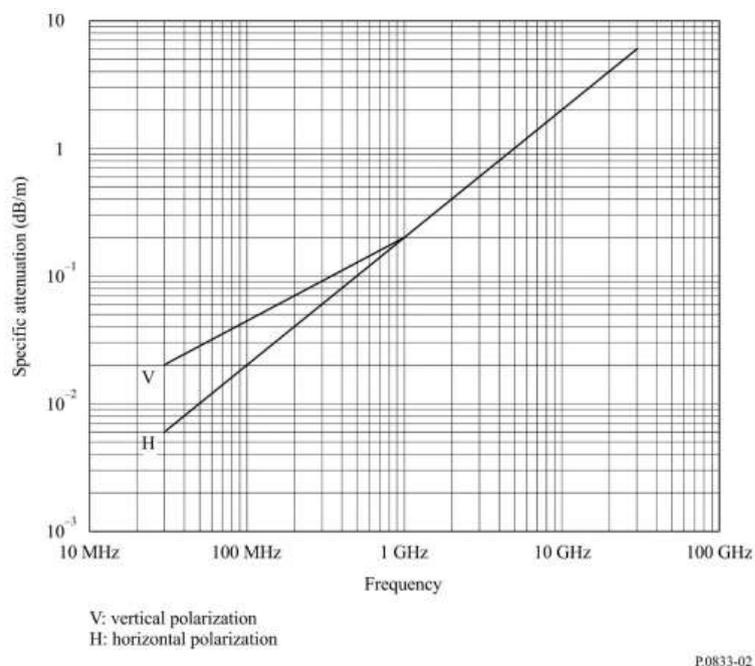


Ilustración 2-19: Atenuación específica en zona boscosa.

Fuente: (ITU, 2021)

Se hace hincapié en que la atenuación debida a la vegetación varía ampliamente debido a la naturaleza irregular del medio y a la gran variedad de especies, densidades y condiciones de humedad que se da en la práctica. Los valores que se muestran en la Ilustración 2-19 deben considerarse únicamente como ejemplos.

A frecuencias del orden de 1 GHz, la atenuación específica en zonas de árboles con hojas es normalmente un 20% superior (dB/m) que en las zonas de árboles sin hojas. También puede haber variaciones de la atenuación debido al movimiento del follaje, por ejemplo, a causa del viento.

El valor de la atenuación máxima, A_m , limitada por la dispersión de la onda de superficie, depende

del tipo y la densidad de la vegetación, así como del diagrama de radiación de la antena del terminal que se encuentra dentro de la vegetación y de la distancia en vertical entre la antena y el punto más alto de la vegetación.

Se llevaron a cabo mediciones en la gama frecuencias 105-2200 MHz en vegetación mixta de coníferas y árboles de hoja caduca (bosques mixtos) cerca de San Petersburgo (Rusia) en trayectos de diversas longitudes que oscilaban entre unos cuantos centenares de metros y 7 km con varias especies de árboles de una altura media de 16 m.

El valor medio de los resultados coincidió con la Ecuación 2-20 con las constantes para la atenuación específica y máxima indicadas en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Constantes para la atenuación específica y máxima.

Parámetro	Frecuencia (MHz) y polarización				
	105,9 horizontal	466,477 oblicua	949,0 oblicua	1852,2 oblicua	2117,5 oblicua
γ (dB/m)	0,04	0,12	0,17	0,30	0,34
A_m (dB)	9,4	18	26,5	29	34,1

Fuente:(ITU, 2021)

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

La dependencia de la frecuencia de A_m (dB) es la Ecuación 2-22:

$$A_m = A_1 f^\alpha$$

Ecuación 2-22: Dependencia de frecuencia.

donde f es la frecuencia (MHz) se ha derivado de varios experimentos.

- Mediciones en la gama de frecuencias 900-1800 MHz realizadas en un parque con árboles tropicales en Río de Janeiro (Brasil) con una altura media de los árboles de 15 m. Se obtuvieron valores de $A_1 = 0,18$ dB y $\alpha = 0,752$. La altura de la antena receptora era de 2,4 m.
- Mediciones en la gama de frecuencias 900-2200 MHz realizadas en un bosque cerca de Mulhouse (Francia) en trayectos de longitudes diferentes, desde unos pocos cientos de metros hasta 6 km con diversos tipos de árboles de altura media de 15 m. Se obtuvieron

valores de $A_1 = 1,15$ dB y $\alpha = 0,43$. La antena receptora en el bosque era un monopolo de $\frac{\lambda}{4}$ montada sobre un vehículo a una altura de 1,6 m y la antena transmisora era un dipolo de $\frac{\lambda}{2}$ con una altura de 25 m. La desviación típica de las mediciones fue de 8,7 dB. Se observaron unas variaciones según la estación del año de 2 dB a 900 MHz y de 8,5 dB a 2200 MHz.

- Mediciones en la gama de frecuencias 105,9-2117,5 MHz realizadas en dos zonas de parque boscoso con vegetación de coníferas y árboles de hoja caduca (bosque mixto) en San Petersburgo (Rusia) con una altura de los árboles de 12 a 16 m y una distancia media entre ellos de 2 a 3 m, lo que corresponde a una densidad de 20-10 árboles/100 m². Se obtuvieron valores de $A_1 = 1,37$ dB y $\alpha = 0,42$. Para recibir la señal se utilizó una antena dipolo de un cuarto de longitud de onda situada a 1,5 m sobre el nivel del suelo. La distancia entre el receptor y la antena del transmisor era de 0,4 a 7 km, y los trayectos para las mediciones se eligieron de forma que hubiese visibilidad directa entre esas antenas sin ningún obstáculo intermedio sino únicamente la zona boscosa. Se llevaron a cabo diferentes fases del experimento en condiciones meteorológicas similares: tiempo seco, velocidad del viento de 0 a 7 m/s.
- Mediciones realizadas en el sur de Inglaterra a una profundidad de 200 m a través de zonas boscosas con vegetación de coníferas y árboles de hoja caduca resultaron en un valor de A_m de 46 dB a la frecuencia de 3605 MHz. Las mediciones se realizaron con antenas direccionales a 2 m y 10 m sobre el nivel del suelo. Los efectos multitrayecto se promediaron para centenas de mediciones realizadas a lo largo de cinco trayectos. Las mediciones se tomaron en verano y en invierno, pero no se observó una variación estacional considerable.

2.9.2. Trayectos oblicuos de satélite, aeronave u otra plataforma por encima de la superficie de la Tierra.

2.9.2.1. Modelo de emplazamiento específico

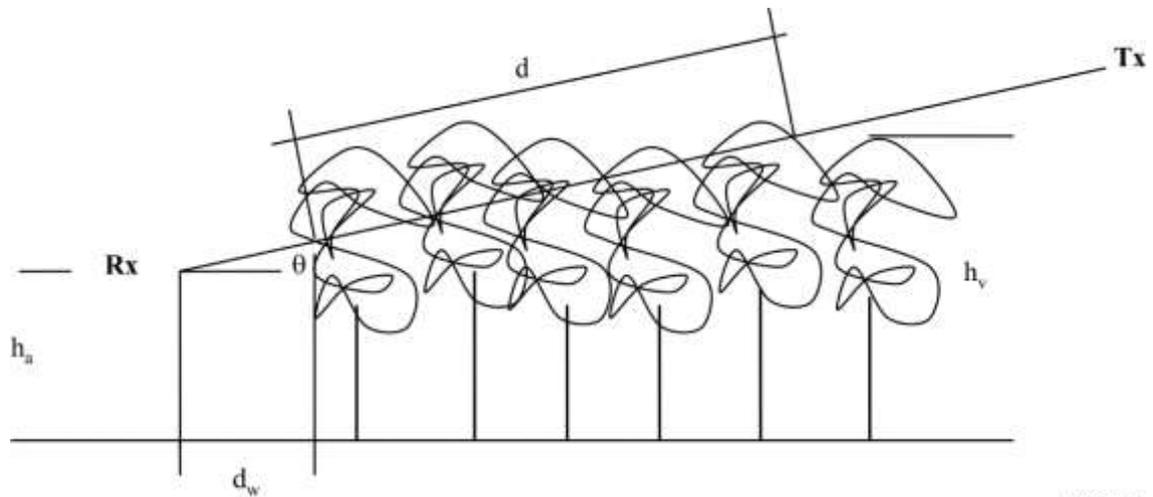
Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa:

En la Ilustración 2-20, el transmisor (Tx) y receptor (Rx) se encuentran fuera de la zona boscosa.

Los parámetros pertinentes son los siguientes:

- longitud del trayecto sobre la vegetación, d ;

- altura media de los árboles, h_v ;
- altura de la antena Rx sobre el suelo, h_a ;
- elevación del trayecto radioeléctrico, θ ;
- distancia de la antena al borde de la zona boscosa, d_w .



P.0833-03

Ilustración 2-20: Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa con una longitud de trayecto sobre la vegetación, d , una altura media de los árboles h_v , una altura de la antena Rx sobre el suelo, h_a , una elevación del trayecto radioeléctrico θ , y una distancia de la antena al borde de la zona boscosa.

Fuente: (ITU, 2021)

Para describir las pérdidas de atenuación, L a lo largo del trayecto de propagación sobre la vegetación horizontal y oblicuo, se propone el siguiente modelo de la ecuación 2-23:

$$L(dB) = Af^B d^C (\theta + E)^G$$

Ecuación 2-23: Pérdidas de atenuación.

donde:

f : frecuencia (MHz)

d : profundidad de la vegetación (m)

θ : elevación (grados)

A, B, C, E y G parámetros determinados de manera empírica, Tabla 2-3.

Un ajuste a las mediciones realizadas en bosques de pinos en Austria dio como resultado la

Ecuación 2-24:

$$L(dB) = 0,25f^{0,39}d^{0,25}\theta^{0,05}$$

Ecuación 2-24: Perdidas de atenuación en pinos de Austria.

Tabla 2-3: Mediciones realizadas en bosques de pinos en Austria.

Tipo de árbol	A	B	C	E	G
Pino de Austria	0,25	0,39	0,25	0	0,05

Fuente: (ITU, 2021)

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

La vegetación varía en función de las estaciones. En el siguiente modelo la Ecuación 2-25 indica la pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales.

$$L_{veg}(dB) = A \cdot f^B \log_{10}(d) \cdot (\theta + E)^G - 4$$

Ecuación 2-25: Perdidas debido a la vegetación.

donde:

f : frecuencia (MHz)

θ : ángulo de elevación (grados)

kh : $|mes - 6,5|$ (En el hemisferio sur, se utiliza kh : $6 - |mes - 6,5|$ en lugar de la fórmula de la izquierda)

$$B = (0,30281 - 0,003624 kh)(f / 1000)^{(0,0013118 - 0,026236 kh)}$$

A, E y G : parámetros empíricos mostrados en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4: Parámetros determinados de forma empírica.

Tipo de árbol	A	B	G
Cedro de Japón	1,87	0,01	-0,12
Enebro de Kenya	1,5	0,01	-0,12

Fuente: (ITU, 2021)

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 2-21 se muestra un ejemplo de la pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales en diferentes meses para 2 GHz.

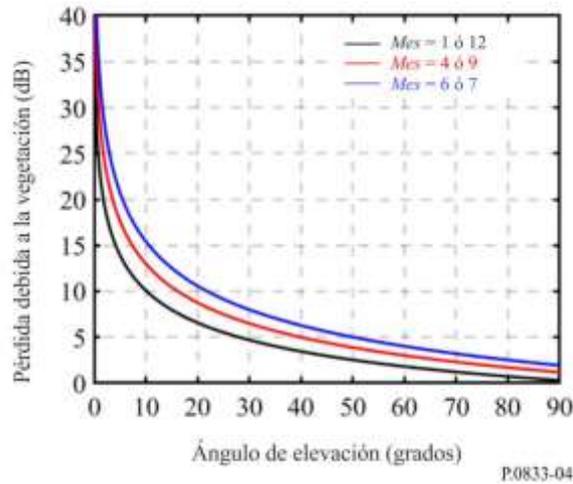


Ilustración 2-21: Pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales para 2 GHz.

Fuente: Fuente: (ITU, 2021)

2.9.2.2. Modelo de emplazamiento general

El siguiente modelo estadístico se puede utilizar como modelo de emplazamiento general:

$$L(dB) = A \cdot f^B \log_{10}(d) \cdot (\theta + E)^G - 4 \left(\frac{p}{100} \right) + 0,4$$

Ecuación 2-26: Perdidas debido a la vegetación.

donde:

f : frecuencia (MHz)

θ : ángulo de elevación (grados)

$$d = 243 \left(\frac{p}{100} \right) (\theta + 1)^{-0,93047} + 1$$

$kh = 5.5 - \frac{5p}{100}$; La función está determinada por el tipo de vegetación como el bosque latifoliado y caducifolio.

$$B = (0,30281 - 0,003624 kh)(f / 1\ 000)^{(0,0013118 - 0,026236 kh)}$$

A, E y G : parámetros empíricos.

A, E y G se determinan para cada zona. Por ejemplo, se pueden utilizar los valores del cedro de Japón en la Tabla 2-4 para un bosque latifoliado y caducifolio como el de Japón.

En la Ilustración 2-22 se muestra un ejemplo de la pérdida de vegetación calculada por el modelo estadístico en diferentes ángulos de elevación para 2 GHz.

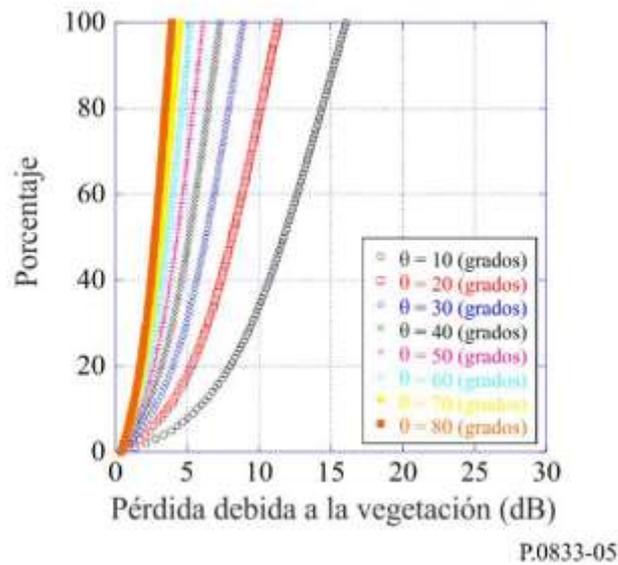


Ilustración 2-22: Pérdida debida a la vegetación calculada mediante el modelo estadístico para 2 GHz.

Fuente: (ITU, 2021)

2.9.3. Obstrucción por un solo obstáculo vegetal

2.9.3.1. A 1 GHz o por debajo de 1 GHz.

La Ecuación 2-21 no se aplica a trayectos radioeléctricos obstruidos por un solo obstáculo vegetal cuando ambos terminales están fuera del medio vegetal, como por ejemplo un trayecto que pase por la copa de un árbol aislado. En ondas métricas y decimétricas, cuando la atenuación específica tiene valores relativamente bajos, y en especial cuando la parte vegetal del trayecto radioeléctrico es relativamente corta, esta situación puede simularse de forma aproximada en términos de atenuación específica y de límite máximo de pérdida total en exceso:

$$A_{et} = d\gamma$$

Ecuación 2-27: Exceso de atenuación.

donde:

d : longitud del trayecto a través de la copa del árbol (m)

γ : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)

$A_{et} \leq$ el exceso de atenuación más bajo para otros trayectos (dB).

La restricción del valor máximo para A_{et} es necesaria porque si la atenuación específica es suficientemente alta, existirá un trayecto con menor pérdida que rodee la zona de vegetación. Puede calcularse un valor aproximado de atenuación mínima para otros trayectos, como si la copa del árbol fuera una delgada pantalla de difracción de anchura finita utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526.

Se hace hincapié en que la ecuación 2-27, con el límite máximo de A_{et} , es únicamente una aproximación. En general, tenderá a sobrestimar el exceso de pérdida debido a la vegetación. Por consiguiente, es la más útil para una evaluación aproximada de la pérdida adicional a la hora de planificar un determinado servicio. Si se utiliza para una señal no deseada, la fórmula puede dar lugar a una subestimación significativa de la interferencia resultante.

2.9.3.2. *Por encima de 1 GHz.*

Para trayectos terrenales se debe aplicar el método basado en la teoría TER que se describe en el punto 2.9.3.2.1 para calcular el efecto de un solo árbol.

2.9.3.2.1 Trayecto terrenal

Para realizar una estimación del campo total, se calculan en primer lugar las componentes de difracción, las reflejadas en el suelo y las de dispersión por la vegetación y a continuación se combinan. Las componentes difractadas se componen de aquellas que lo son por la parte superior de la vegetación y las que se difractan por los lados de dicha vegetación. Estas componentes y la componente reflejada en el suelo se determinan aplicando las Recomendaciones UIT-R. La componente que atraviesa la vegetación o dispersada por la misma se calcula utilizando un modelo basado en la teoría de transferencia de energía radiada (TER).

- **Cálculo de la componente difractada por la parte superior de la vegetación**

En la Ilustración 2-23 se representa como las pérdidas de difracción, L_{top} , experimentadas por el trayecto de la señal difractado por la vegetación, pueden considerarse como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble.

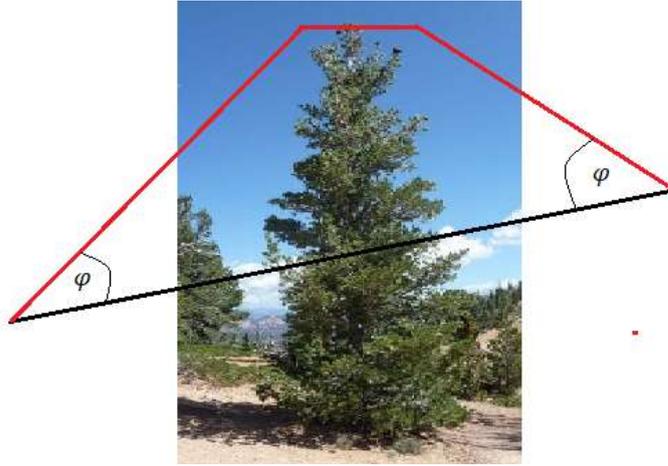


Ilustración 2-23: Componente difractada por la parte superior de la vegetación

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Se calcula de la forma siguiente con la Ecuación 2-28:

$$L_{top} = L_{top_diff} + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi)$$

Ecuación 2-28: Calculo de la componente difractada por la parte superior

Donde:

$G_{Tx}(\varphi)$ y $G_{Rx}(\varphi)$ son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda difractada que sale de la antena transmisora y entrando en la antena receptora, respectivamente.

L_{top_diff} es la pérdida total por difracción calculada utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526 para dos aristas aisladas.

- **Cálculo de la componente difractada lateral**

La pérdida por difracción, L_{sidea} y L_{sideb} , experimentada por la señal difractada alrededor de la vegetación, puede ser tratada de nuevo como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble, con la geometría definida en la Ilustración 2-24.

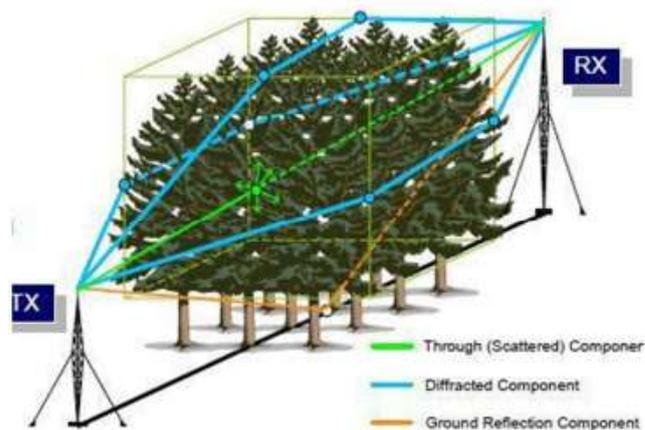


Ilustración 2-24: Componentes difractados alrededor de la vegetación.

Fuente:(Elshayeb, 2018)

Las pérdidas se calculan mediante las Ecuaciones 2-29 y 2-30.

$$L_{sidea} = L_{diff_sidea} + G_{Tx}(\varphi_a) + G_{Rx}(\varphi_a)$$

Ecuación 2-29: Calculo de la componente difractada lateral a

Y

$$L_{sideb} = L_{diff_sideb} + G_{Tx}(\varphi_b) + G_{Rx}(\varphi_b)$$

Ecuación 2-30: Calculo de la componente difractada lateral b

Donde:

$G_{Tx}(\varphi_{a,b})$ y $G_{Rx}(\varphi_{a,b})$ son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda difractada que sale de la transmisión antena y entrando en la antena receptora, para los lados a y b, respectivamente.

L_{diff_sidea} y L_{diff_sideb} son las pérdidas de difracción total alrededor de cada lado calculada utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526 para dos aristas aisladas.

- **Cálculo de la componente reflejada en el suelo**

Se supone que el trayecto es lo suficientemente corto como para que la onda reflejada en el suelo

pueda modelarse mediante la geometría de la Ilustración 2-25.

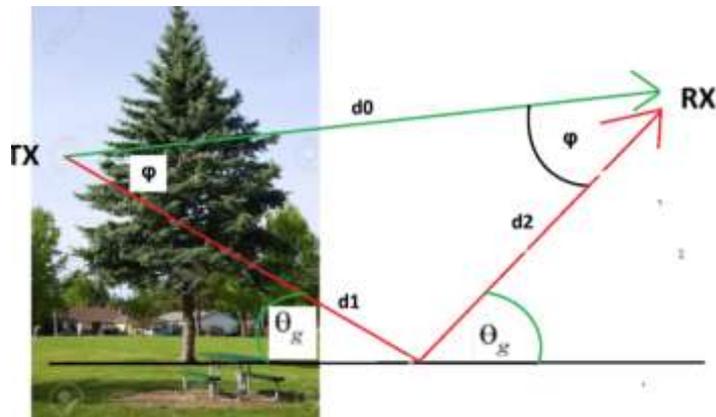


Ilustración 2-25: Componente reflejada en el suelo.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Para calcular la pérdida experimentada por la onda reflejada en el suelo en el receptor, se puede calcular el coeficiente de reflexión, R_0 , de la señal reflejada en el suelo con un ángulo de pastoreo dado, θ_g . Este es un método estándar y se describe en la Recomendación UIT-R P.1238. Los valores de la Permitividad y la conductancia se obtienen de la Recomendación UIT-R P.527.

La pérdida experimentada por la onda reflejada en el suelo, L_{ground} , viene dada entonces por la Ecuación 2-31:

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{TX}(\varphi) + G_{RX}(\varphi) \quad (8)$$

Ecuación 2-31: Calculo de la componente reflejada en el suelo.

donde $G_{RX}(\varphi)$ y $G_{TX}(\varphi)$ son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda reflejada que sale de la antena de transmisión y entra en la de recepción, respectivamente.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de investigación

Esta investigación es de enfoque cuantitativo debido a que se han recolectado datos reales de las potencias recibidas de una onda electromagnética transmitidas desde un generador de funciones a través de la vegetación, los valores obtenidos del equipo de medición como el analizador de espectros y los valores teóricos encontrados a través de las componentes difractadas, laterales y reflejadas, fueron analizados y comparados con la Recomendación ITU-R P.833-10 para diferentes frecuencias de entre la banda de 1.7 GHz a 1.9 GHz es tomado en cuenta el caso para un árbol y para bosques de pino, ciprés y eucalipto en la ciudad de Riobamba.

3.2. Nivel de investigación

El presente trabajo de integración curricular fue de nivel descriptivo; ya que ha implicado la obtención de los valores de medición de potencia a través de la vegetación, con dichos valores se pretende demostrar, evidenciar y comparar la atenuación de una onda electromagnética que existe en un árbol y en los bosques como son el pino, ciprés y eucalipto. Debido a que existen varios fenómenos que pueden afectar o intervenir en la vegetación para sacar dichos valores de potencia como puede ser las condiciones climáticas, frondosidad del árbol, etc.

3.3. Diseño de investigación

3.3.1. *Según la manipulación o no de la variable independiente*

3.3.1.1. *Experimental*

Se ha realizado con el objetivo de evaluar la atenuación en la vegetación de una onda electromagnética en un árbol y en los bosques de pino, ciprés y eucalipto. La variable experimental para la recolección de datos se ha enfocado en la obtención de la potencia recibida a través de esta vegetación que se obtienen con el analizador de espectros. Estos valores han servido de base para los cálculos de las pérdidas en cada componente producida en un árbol y bosque, dentro de diversas áreas y lugares escogidos dentro de la ESPOCH.

3.3.2. Según las intervenciones en el trabajo de campo

3.3.2.1. Transversal

Se ha definido a los datos obtenidos por el equipo de medidor de potencia como trabajo de campo transversal, donde se obtuvo valores de potencia recibida a través de la vegetación en los cuales estos datos han servido de interés para el desarrollo de este trabajo de investigación; por ello, los datos obtenidos en los diferentes lugares y áreas han brindado información importante y han sido tomados en cuenta las condiciones climáticas del medio.

3.3.2.2. Longitudinal

Los valores obtenidos mediante el equipo analizador de espectros se orientaron a un trabajo longitudinal; dicha recolección de datos se ha enfocado en la potencia recibida a través de un árbol y bosques, la posición geográfica con coordenadas, la condición climática del medio, alturas de los árboles y las antenas; estos valores únicamente determinaron la atenuación de potencia que existe a través de la vegetación.

3.4. Tipo de investigación

3.4.1. Estudio Documental

Fué necesario la adquisición de conocimientos, la cual ha servido para entender el procedimiento del comportamiento de una onda electromagnética a través de la vegetación; otros medios de obtención de información también se enfocaron en la interpretación de las mediciones de potencia, el uso del equipo de medición como el analizador de espectros y la existencia de diferentes tipos de componentes difractadas.

Para esto fué indispensable el uso de diversas fuentes bibliográficas que ayudaron a explicar el correcto uso del equipo de medición, respetando la normativa empleada en la obtención de datos, además de la explicación paso a paso para los cálculos de pérdidas y atenuaciones que existieron en el medio como es el espacio libre y la vegetación, la cual es utilizado como referencia la Recomendación ITU-R P.833-10 (Atenuación debida a la vegetación).

3.4.2. Estudio de campo

El estudio de campo se ha realizado en áreas y zonas específicas dentro de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, mediante la medición de potencias de recepción de una onda electromagnética para un rango de frecuencias de 1.7 GHz a 1.9 GHz.

3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

Para este trabajo de investigación se ha seleccionado la población que consta de las áreas y lugares que se han tomado en cuenta para las mediciones en la parte posterior de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, se ha realizado la delimitación del área de estudio con la ayuda de Google Earth que esta es una herramienta de búsqueda de ubicaciones que permitió geolocalizar un punto concreto de los lugares de interés más cercanos para poder obtener sus coordenadas.

Para definir los datos se ha tomado como referencia el área y lugar de medición delimitado, en donde estuvo ubicado un solo árbol y las áreas del bosque; para el análisis y comparación se escogió la frecuencia de 1.8 GHz que es utilizada para la banda 3G y radio bases como se observa en la Tabla 3-1, con esto se definió un rango de frecuencias de 1.7 GHz a 1.9 GHz con saltos de frecuencia de 10 MHz y así obtener 20 mediciones de la potencia recibida en cada tipo de árbol y bosques; para los cuales se ha definido cálculos de las componentes laterales, difractadas y reflejadas que han servido para hacer la comparativa con la recomendación ITU en cada frecuencia, los mismos que han utilizado parámetros de medición tanto para un solo árbol como para un bosque en las mismas condiciones.

Tabla 3-1: Bandas de frecuencias

Tecnología	Bandas
4G	B2 (1900 MHz), B4 (1700/2100 MHz AWS 1), B28a (700 MHz)
3G	B2 (1900 MHz), B5 (850 MHz)
2G	B2 (1900 MHz), B5 (850 MHz)

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Seguidamente, se ha realizado el cálculo de regiones de campo en condiciones de Far Field o región de campo lejano (Fraunhofer) que es la región del extremo de la antena en la cual irradia una onda electromagnética, es decir, después de la zona de Fresnel como se observa en la Ilustración 3-1, si la distancia tiene una máxima dimensión global D , esta región se toma comúnmente para que exista distancias mayores de dicha región.

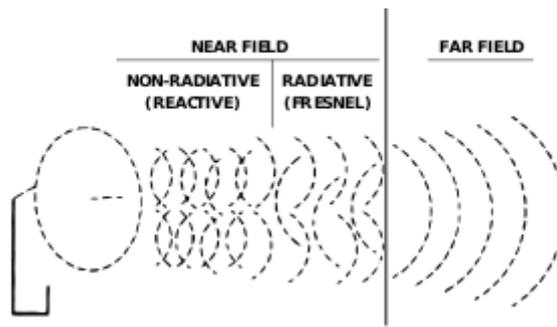


Ilustración 3-1: Regiones de campo.

Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:FarNearFields-USP-4998112-1.svg>

$$R_{Far\ Field} > \frac{2D^2}{\lambda}$$

Ecuación 3-1: Radiating Far Field

Donde:

D es la dimensión de la antena (m)

λ la longitud de onda (m)

Con la Ecuación 3-1 de región de campo lejano o Far Field se ha calculado la distancia mínima entre el transmisor y el receptor tomando en cuenta una dimensión de la antena de 50 cm y la longitud de onda con una frecuencia de 1.8 GHz donde:

$$R_{Far\ Field} > \frac{2(0,5)^2}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3e^8}{1.8e^9} = \frac{1}{6}$$

$$R_{Far\ Field} > \frac{2(0,5)^2}{\frac{1}{6}}$$

$$R_{Far\ Field} > 3m$$

Como resultado final se obtuvo que la distancia de separación de las antenas debe ser mayor a 3 metros entre cada una para que cumpla las condiciones de estar dentro de Far Field y así poder

radiar la onda electromagnética.

3.5.1. Área de estudio

La zona de estudio se encuentra en la ciudad de Riobamba correspondiente a la Provincia de Chimborazo, ubicada en la sierra central del Ecuador en un valle que está rodeado por volcanes como el Altar, el Chimborazo y el Tungurahua. Está situada a una altitud de aproximadamente 2.750 m.s.n.m, lo que la convierte en una de las ciudades más altas de Ecuador. Las mediciones referentes a la investigación se han realizado en la parte posterior de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo mostrado en la Ilustración 3-2.

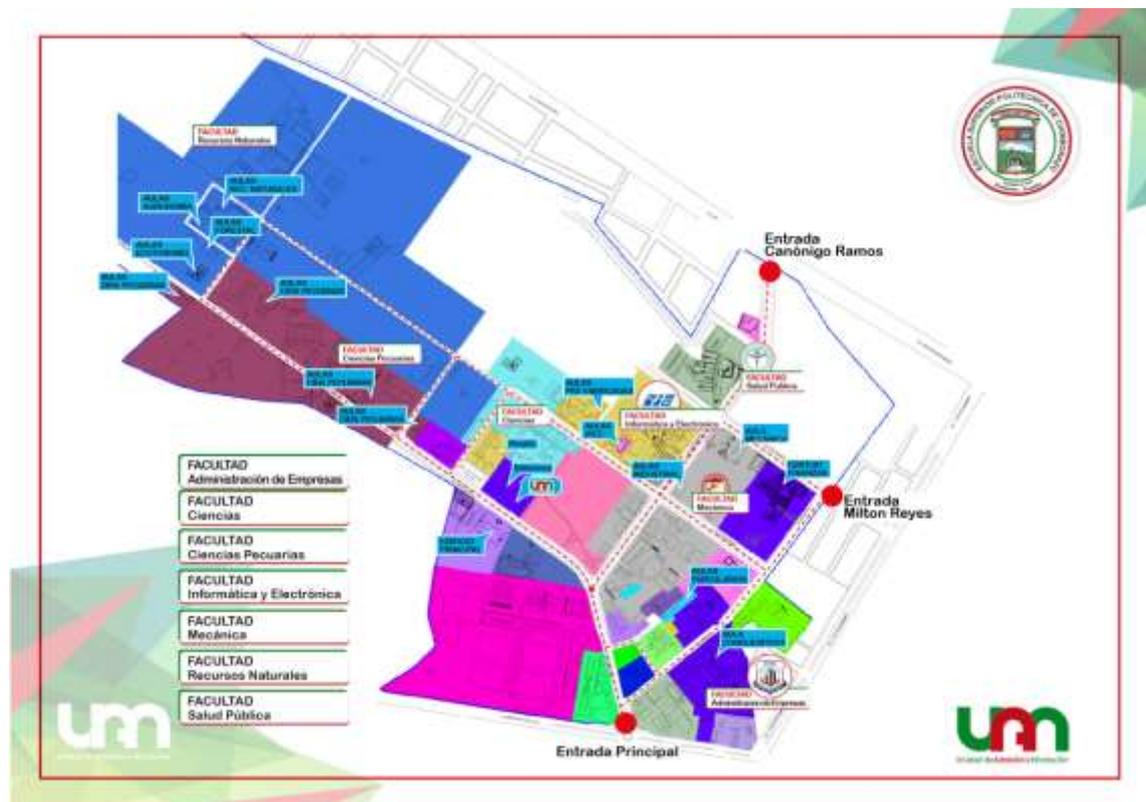


Ilustración 3-2: Mapa de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Fuente: <http://admission.espoch.edu.ec/wp-content/uploads/2017/09/mapa.jpg>

Las áreas terrenales utilizadas se ubican cerca a la Escuela de Física y Matemática, Escuela de Zootecnia, las Facultades de Recursos Naturales e Informática y Electrónica y como área final se tomó el parque del estudiante.

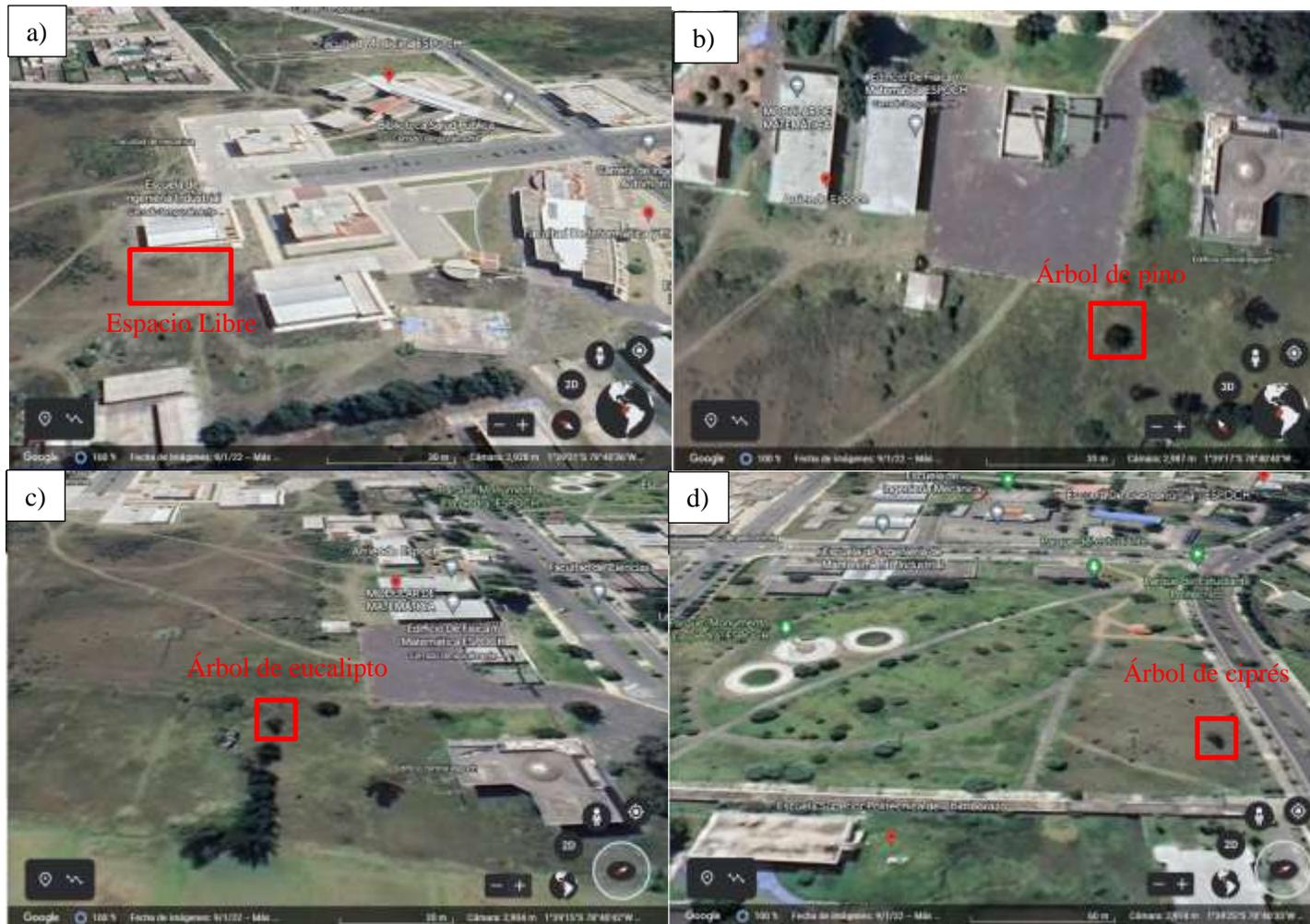


Ilustración 3-3: Escenario de medición (a) espacio libre (b) árbol de pino (c) árbol de eucalipto (d) árbol de ciprés.

Fuente: Google Earth.

En la Ilustración 3-3 se observa los lugares escogidos para las respectivas mediciones en el espacio libre, árbol de pino, eucalipto y ciprés ubicadas dentro de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, una vez definidas las áreas y el tipo de árbol en la Tabla 3-2 se describe la ubicación de las antenas transmisoras y receptoras para cada tipo de árbol, estas antenas están colocadas a una distancia fija de 10 metros.

Tabla 3-2: Lugares seleccionados

Escena rio	Coordenadas de ubicación del transmisor		Coordenadas de ubicación del obstáculo		Coordenadas de ubicación del receptor	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
Espacio libre	1°39'19.49 9''S	78°40'35.98 0''O	----	-----	1°39'19.31 6''S	78°40'36.04 0''O
Árbol de pino	1°39'16.46 3''S	78°40'40.97 7''O	1°39'16.49 6''S	78°40'40.91 0''O	1°39'16.61 9''S	78°40'41.12 9''O
Árbol de eucalipto	1°39'16.24 3''S	78°40'40.72 8''O	1°39'16.22 9''S	78°40'40.96 8''O	1°39'16.17 8''S	78°40'41.18 0''O
Árbol de ciprés	1°39'27.05 3''S	78°40'42.13 9''O	1°39'26.99 2''S	78°40'42.33 9''O	1°39'26.77 8''S	78°40'42.53 9''O

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

A continuación, las áreas que fueron escogidas para los bosques de pino, eucalipto y ciprés se muestran en la Ilustración 3-4, ubicadas en la parte posterior de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, esta selección se realizó en base a la cantidad de árboles que se tuvo para la ubicación del equipo transmisor y la antena receptora que está ubicada dentro del bosque, con el propósito de evidenciar la variación de potencia recibida que existe dentro de la vegetación.

La Tabla 3-3 describe las ubicaciones de la antena transmisora, receptora y de cada uno de los árboles del bosque escogido, como se mencionó anteriormente el transmisor se ubicó fijamente fuera del bosque donde se ha realizado pruebas tomando en cuenta 4 árboles de pino, ciprés y eucalipto. Se ha determinado una pérdida de potencia en dicha cantidad, estas mediciones se han realizado ubicando al receptor después de cada árbol y este va a ir cambiando de posición respecto al número de árboles que van a intervenir dentro de la transmisión del enlace.

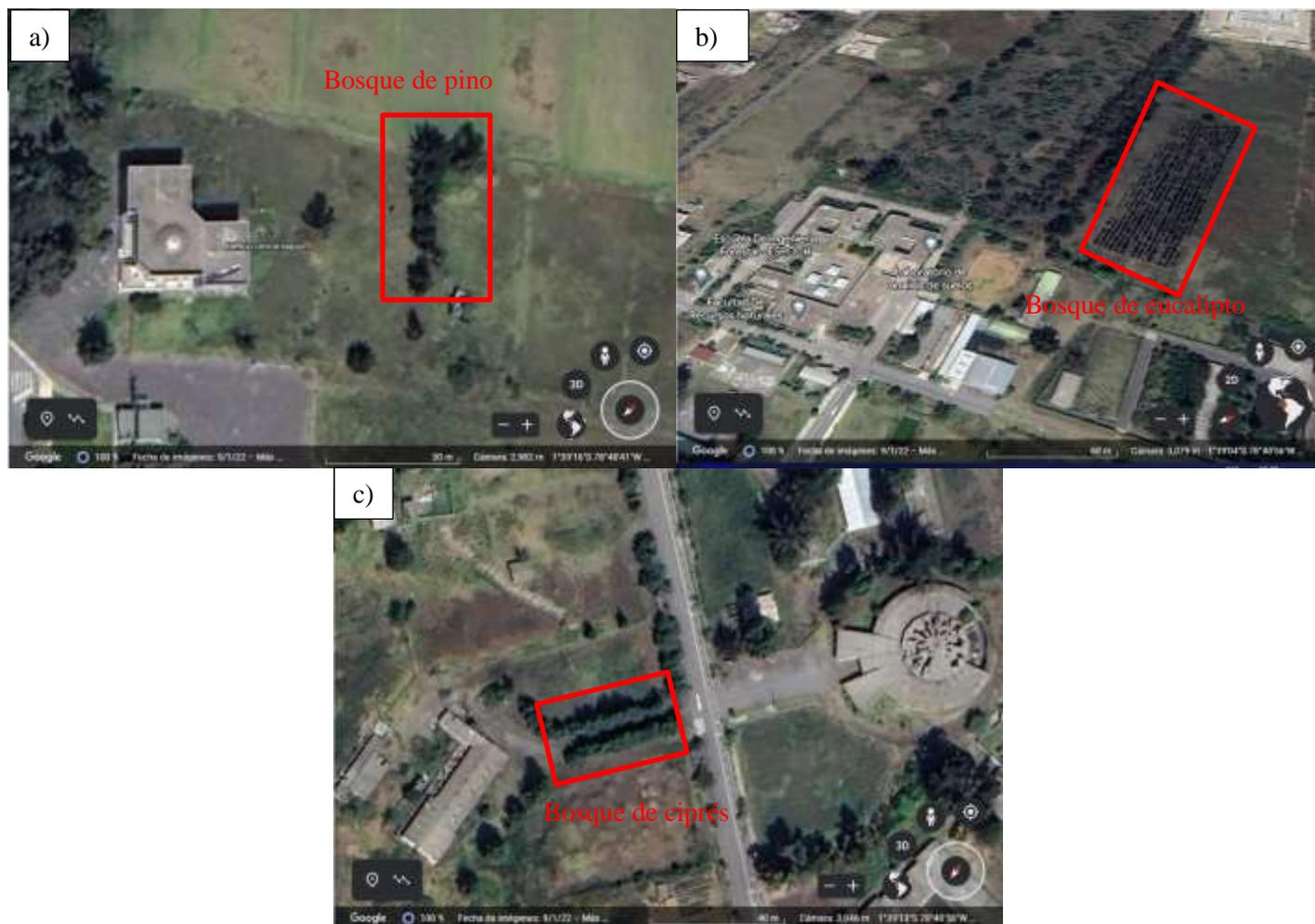


Ilustración 3-4: Escenario de medición para los bosques de (a) pino (b) eucalipto (c) ciprés.

Fuente: Google Earth.

Tabla 3-3: Coordenadas de los lugares seleccionados.

Escenario	Coordenadas de ubicación del transmisor		Coordenadas de ubicación del obstáculo		Coordenadas de ubicación del receptor		
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	
Bosque de pino	1°39'15.620''S	78°40'41.240''O	1° árbol	1°39'15.660''S	78°40'41.328''O	1°39'15.582''S	78°40'41.460''O
			2° árbol	1°39'15.519''S	78°40'41.431''O	1°39'15.498''S	78°40'41.564''O
			3° árbol	1°39'15.490''S	78°40'41.518''O	1°39'15.477''S	78°40'41.588''O
			4° árbol	1°39'15.470''S	78°40'41.528''O	1°39'15.392''S	78°40'41.660''O
Bosque de eucalipto	1°39'01.791''S	78°40'57.945''O	1° árbol	1°39'01.75''S	78°40'58.017''O	1°39'01.744''S	78°40'58.089''O
			2° árbol	1°39'01.746''S	78°40'58.230''O	1°39'01.74''S	78°40'58.401''O
			3° árbol	1°39'01.519''S	78°40'58.483''O	1°39'01.519''S	78°40'58.520''O
			4° árbol	1°39'01.519''S	78°40'58.483''O	1°39'01.508''S	78°40'58.530''O
Bosque de ciprés	1°39'14.351''S	78°40'59.419''O	1° árbol	1°39'14.348''S	78°41'0.230''O	1°39'14.348''S	78°41'0.345''O
			2° árbol	1°39'14.346''S	78°41'0.000''O	1°39'14.346''S	78°41'0.210''O
			3° árbol	1°39'14.336''S	78°41'0.59''O	1°39'14.335''S	78°41'0.222''O
			4° árbol	1°39'14.336''S	78°41'0.102''O	1°39'14.333''S	78°41'0.287''O

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 3-5, se tiene el diagrama del proceso para la obtención de los valores de las mediciones de potencia, respetando las frecuencias y áreas delimitadas dentro del estudio de interés como es en un solo árbol mostrada en la Ilustración 3-5 a) y para un bosque mostrada en la Ilustración 3-5 b), obteniendo los valores que se requirieron para posteriormente ir comparando respecto a las mediciones de potencia en el espacio libre.

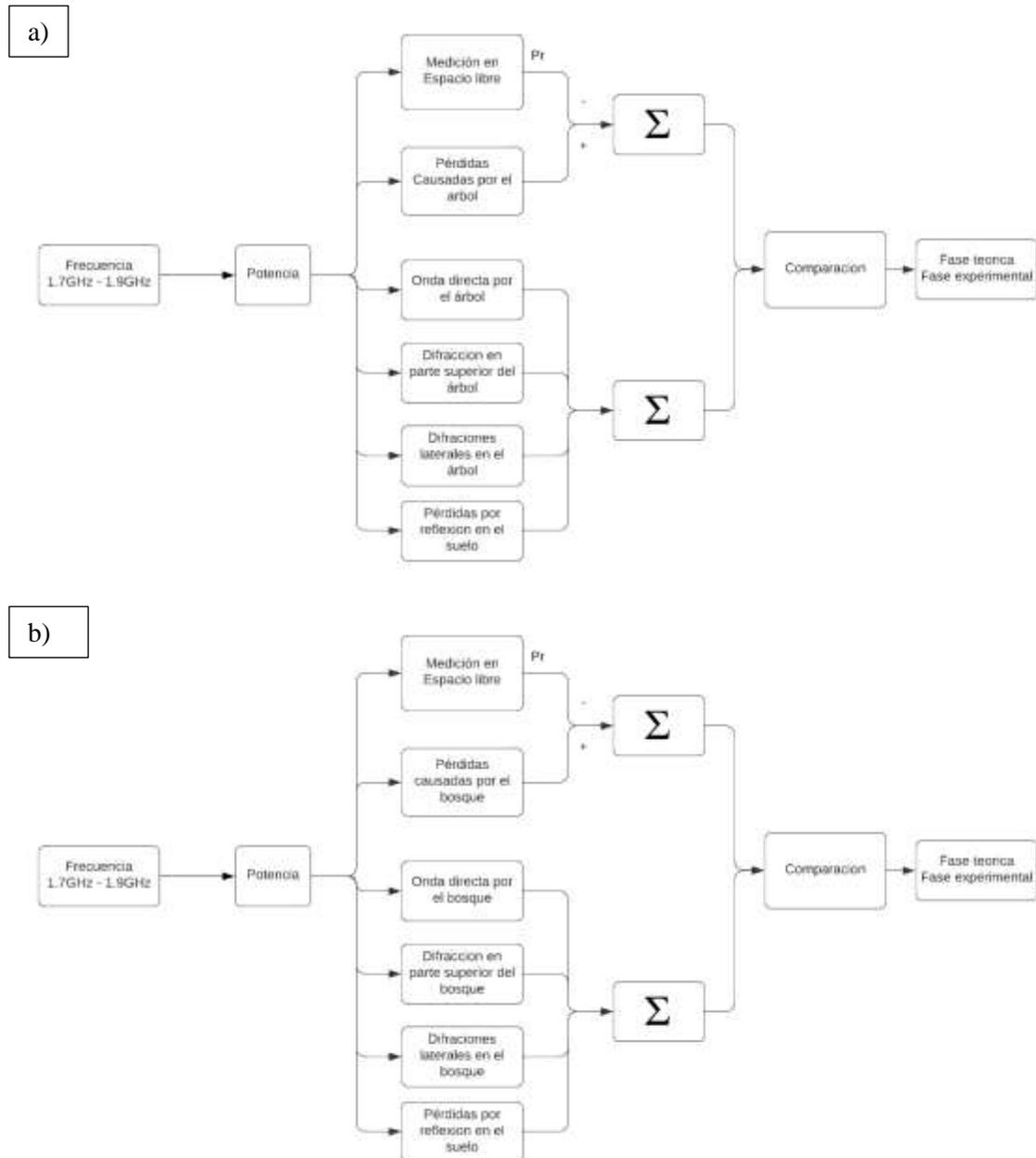


Ilustración 3-5: Diagrama del proceso para la toma de mediciones de potencia a) un solo árbol b) un bosque.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.2. Descripción del tipo de árbol, bosque y suelo

Para realizar las mediciones correspondientes en la gama de frecuencias de 1.7 GHz a 1.9 GHz se ha tomado en cuenta los siguientes tipos de árboles como se observa en la Ilustración 3-6, (a) pino (b) eucalipto (c) ciprés, esta vegetación ha sido tomada en la ciudad de Riobamba dentro de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo como se mencionó en el apartado 3.5.1., para los 3 tipos de árboles escogidos árbol se ha considerado las siguientes características:

- Pino una altura de 10 m con un ancho medio de 5,4 m.
- Eucalipto una altura de 12 m con un ancho medio de 4,8 m.
- Ciprés una altura de 11 m con un ancho medio de 4 m.

La Ilustración 3-7, detalla cada uno de los bosques que se ha escogido teniendo una altura media entre arboles de pino de 12 m y como inicialmente se normalizó a 4 árboles se obtuvo una distancia total de 26 m de largo del bosque con anchos de 4,9 m, 5,3 m, 6,1 m, 5,6 m, 5,5 m, del primer, segundo, tercero, cuarto y quinto árbol respectivamente. Para el bosque eucalipto se obtuvo una altura media de 7 m. y separación entre arboles de 1.5 m con anchos medios de cada árbol de 1.6 m. Finalmente para el bosque de ciprés se obtuvo una altura media de 14 metros y con anchos de 5 m, 5,1m, 5,4m, y 5,2 m respectivamente.

La antena transmisora ubicada a 3 m del primer árbol y la antena receptora se ha ubicado después de cada árbol con variaciones en las alturas para cada caso. Para todas estas mediciones en cada uno de los escenarios planteado se lo ha realizado en condiciones de suelo húmedo, con una temperatura entre 12 ° C a 14° C y en condiciones ambientales normales sin lluvia con una velocidad de viento promedio de 7 Km/h.

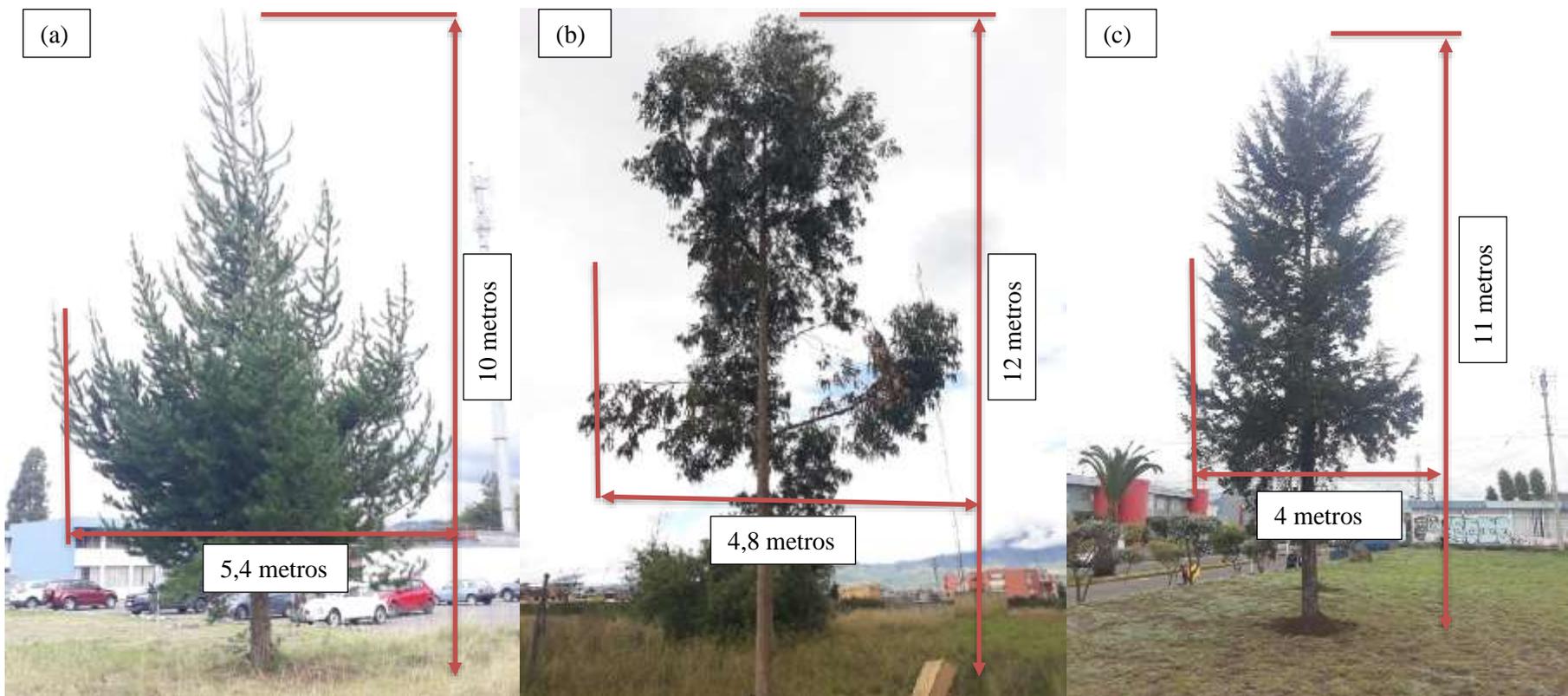


Ilustración 3-6: Arboles (a) pino (b) eucalipto (c) ciprés.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

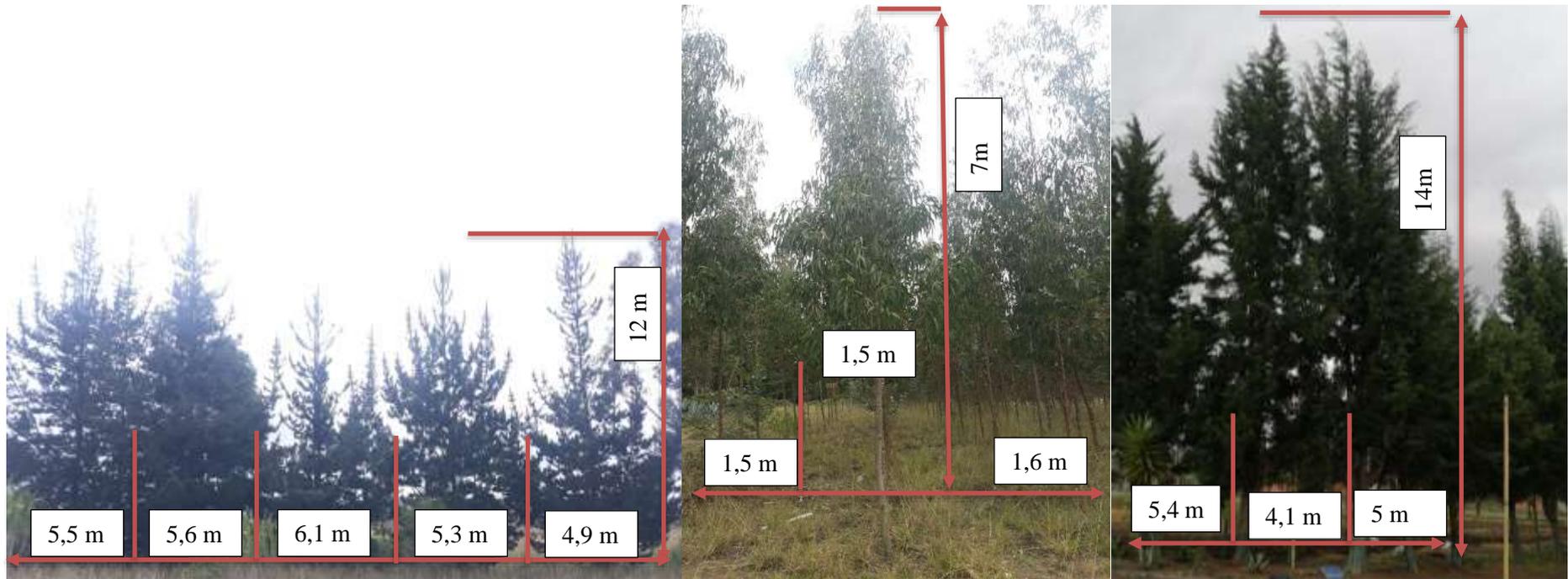


Ilustración 3-7: Bosques (a) pino (b) eucalipto (c) ciprés.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.3. Variación de alturas de las antenas.

El proceso descrito en la Ilustración 3-5 se repite para cada una de las variaciones de altura de las antenas, estas son a 1,2,3 y 4 metros como se observa en la Ilustración 3-8. Se escogieron estos valores ya que en cada una de estas alturas pueden o no existir contribuciones de las ondas reflejadas, ondas difractadas laterales y superior.



Ilustración 3-8: Variación de las alturas a) 1 metro b) 2 metros c) 3 metros d) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Además de la variación de alturas también se consideró lo siguiente:

- Se utilizó como base dos cañas guaduas de 4.80 metros para levantar las antenas.
- Se cavó 70 cm y se soterró las bases para fijarlas correctamente.
- También se midió la base de las antenas de 1 a 4 metros para las mediciones de potencia en esas alturas.
- Se utilizó cable coaxial de 6 metros para la conexión de las antenas con sus equipos a cada una de sus respectivas alturas.
- Se tomó las mediciones de potencia en un rango de frecuencias de 1.7 GHz a 1.9 GHz con saltos de 10 MHz, estas variaciones de frecuencia se realizaron en el analizador de espectro y en el generador de señales por consiguiente se tuvo en total 20 datos de la potencia recibida para cada altura.
- Para la toma de los datos se utilizó el equipo Anritsu MS2724C que marca el pico máximo de valor de potencia recibida.

3.5.4. Equipos de medición

3.5.4.1. Generador de señales Anritsu MG3692C

El equipo usado para la transmisión de la onda electromagnética es el Generador de señales Anritsu MG3692C que tiene como potencia máxima de transmisión de 20 dBm y un rango de frecuencias que vas desde 0,1 Hz a 20 GHz con una sola salida coaxial para la antena como se muestra en la Ilustración 3-10.



Ilustración 3-9: Generador de señales Anritsu y antena logarítmica.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023.

Tabla 3-4: Características analizador de espectro Anritsu MG3692C

Generador de señales Anritsu MG3692C	Características
<p>La serie MG3692C de generadores de señales de banda ancha cubre frecuencias de audio, HF, VHF, UHF, RF y microondas desde 0,1 Hz hasta 20 GHz en salida coaxial única y hasta 500 GHz o más, con multiplicadores externos. Además, es fácil de manejar, ya sea mediante controles intuitivos en el panel frontal o de forma remota a través de GPIB o conectividad Ethernet. Así pues, la serie MG3690C es una fuente de señal ideal tanto para requisitos de RF como de microondas, totalmente configurable para aplicaciones sencillas o de alto rendimiento.</p> <p>El MG3692C ofrece tres niveles de rendimiento de ruido de fase SSB: estándar, ruido de fase ultra bajo (opción 3) y ruido de fase Premium (opción 3X).</p> 	<p>Marca: Anritsu</p> <p>Frecuencia: De 0,1 Hz a 20 GHz en una sola salida coaxial</p> <p>Velocidad de conmutación: 5 ms (típico)</p> <p>Modulación analógica: Modulación interna y externa AM, FM, fase y pulso</p> <p>Resolución: 0.01 Hz</p> <p>Impedancia: 50 ohmios</p> <p>Peso: 18Kg</p> <p>Operating Temperature Range: 0 °C a +50 °C</p>

Fuente: (Company, 2022, p. 2)

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023.

En la tabla 3-6 se puede evidenciar todos los parámetros técnicos y especificaciones del equipo Anritsu MG3692C, que fueron tomados en cuenta para el uso correcto del equipo y así no poder tener incidentes al momento de realizado la transmisión.

A continuación, en la Ilustración 3-11, se observa el equipo conectado y configurado con los parámetros correspondientes con una potencia máxima de transmisión de +20 dBm para realizar las pruebas en el espacio libre.



Ilustración 3-10: Transmisión del generador de señales y antena logarítmica en el espacio libre.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023.

3.5.4.2. Antena logarítmica AAronia HyperLOG 30180

Es un tipo de antena direccional pasiva con un rango de frecuencia de 380 MHz a 18 GHz, conector tipo SMA(f) y ganancia de 5 dBi; se utiliza para la transmisión de la onda electromagnética ya que cubre ancho de banda extenso, en la Ilustración 3-13, se muestra el Modelo AAronia 30180-HyperL.



Ilustración 3-11: Antena AAronia HyperLOG 30180.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Tabla 3-8 se observa las características de la antena logarítmica para tener en cuenta las especificaciones de cuanto es la frecuencia y la ganancia, estos datos son los principales para el cálculo de pérdidas de un radio enlace de transmisión - recepción.

Tabla 3-5: Parámetros y especificaciones de la Antena AAronia HyperLOG 30180

Especificaciones de AAronia HyperLOG 30180	
Diseño	Logarítmico-periódico
Rango de frecuencia	380MHz-18GHz
máx. Poder de transmisión	100 W CW (400 MHz)
Impedancia nominal	50 ohmios
Ganancia (típ.)	5dBi
Factor de antena	20-46dB/m2
pérdida de retorno	Mejor que -10dB
conexión de radiofrecuencia	Toma SMA (18 GHz) o toma N usando un adaptador
Polarización	lineal vertical/horizontal
Conexión trípode	5/8"
Dimensiones (L/A/P)	(590x360x30) milímetros
Peso	1000gr
Garantía	10 años

Fuente: (Aaronia, [sin fecha])

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.4.3. Anritsu MS2724C

Como se ha mencionado anteriormente uno de los equipos utilizados es el analizador de espectro portátil Anritsu MS2724C con capacidad de medición de 9 KHz hasta 20 GHz, usado para efectuar las mediciones de potencia recibida de la onda electromagnética. En la Tabla 3-4 se evidencia las características establecidas para la obtención de cada uno de los datos.

Tabla 3-6: Características analizador de espectro Anritsu MS2724C

Analizador de Espectro Anritsu MS2724C	Características
<p>El Spectrum Master MS2724C es un analizador de espectro portátil basado en sintetizador que proporciona resultados de medición rápidos y precisos. Las mediciones se pueden realizar utilizando las funciones principales del instrumento: frecuencia, alcance, amplitud y ancho de banda.</p> <p>Diseñado para realizar análisis altamente precisos en señales inalámbricas, incluyendo LTE, GSM/EDGE, W-CDMA/HSDPA, TD-SCDMA/HSDPA, CDMA, EV-DO, WiMAX - Fijo, móvil, AM/FM/SSB Demodulador.</p> 	<p>Marca: Anritsu</p> <p>Analizador de interferencias: Espectrograma, intensidad de señal, RSSI</p> <p>Rango dinámico: > 104 dB in 1 Hz RBW</p> <p>DANL: -160 dBm in 1 Hz RBW</p> <p>Rango de frecuencia: 9 KHz A 20 GHz</p> <p>Resolución de ancho de banda RBW: 1 Hz a 10 MHz.</p> <p>Ancho de banda de video VBW: 1 Hz a 10 MHz</p> <p>Traces: Normal, Max Hold, Min Hold, Avg, # Avg</p> <p>Detectores: Peak, Negative, Sample, Quasi-peak, and true RMS</p> <p>Marcadores: 6, cada uno con un Marcador Delta, o 1 Referencia con 6 Deltas</p> <p>Display: 8.4 pulgadas</p> <p>Peso: 7.8 Kg</p>

Fuente: (Anritsu, 2013, p. 2)

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Una vez verificado este equipo, este debe estar correctamente calibrado y configurado, se adaptó una antena logarítmica para verificar y receptor las señales de la onda electromagnética como se observa en la Ilustración 3-9.



Ilustración 3-12: Analizador de espectro Anritsu y antena logarítmica.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023.

Los parámetros han sido configurados de la misma forma para cada escenario planteado con el objetivo de estandarizar el proceso de medición de potencia de la onda electromagnética recibida. En la Tabla 3-5 se detallan los parámetros configurados para la medición en cada intervalo de frecuencias, en la que, en vez de configurar la frecuencia inicial y final, se configura la frecuencia central, de 1.7 GHz a 1.9GHz con saltos de 10MHz.

Tabla 3-7: Parámetros de medición del analizador de espectro

Parámetro de medición	Valor
Nivel de referencia	-20 dBm
Ancho de banda de la resolución (RBW)	300 kHz
Ancho de banda del video (VBW)	100 kHz
Atenuación	0 dB
Auto atenuación	Off
Span	40 MHz

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Después de configurar los parámetros y la frecuencia central, se debe insertar un marcador que permita centrar la frecuencia ingresada para conocer el valor exacto del pico de la potencia recibida una vez que ésta se estabilice.

3.5.4.4. Antena logarítmica WA5VJB

Esta antena logarítmica impresa en una placa de circuito que se observa en la Ilustración 3-10, opera en un rango de frecuencias que va desde 850 a 6500 MHz es utilizada en la recepción de la onda electromagnética.



Ilustración 3-13: Antena Log Periodic WA5VJB 850 a 6500 MHz.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

A continuación, en la Tabla 3-7 se detalla los parámetros y las características de la antena para conocer sus ganancias, frecuencias, etc. en las que opera para que sean usadas correctamente en el desarrollo y la obtención de los datos necesarios.

Tabla 3-8: Parámetros y especificaciones de la Antena Log Periodic WA5VJB

Parámetros	Características
Frecuencia	850-6500 MHz
Ganancia	6 dBi
Tipo	Registro periódico
Conector	SMA (soldadura) o mediante cable coaxial soldado directamente a la placa de circuito impreso
Impedancia	50 ohmios
Diseño de radioaficionado	WA5VJB
Dimensiones	132x142 mm
Peso	33 gramos

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.5. Mediciones

3.5.5.1. Medición de la potencia atenuada en el espacio libre.

Con la ayuda del analizador de espectro Anritsu MS2724C, se ha obtenido las potencias recibidas en el espacio libre dentro de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo a una frecuencia de 1.8GHz y diferentes alturas como se ha mencionado anteriormente desde 1 metro a 4 metros como se muestran en la Ilustración 3-14 y la Ilustración 3-15. En la Tabla 3-9 se muestra las potencias obtenidas a cada altura en el espacio libre a una distancia de 10 metros entre transmisor y receptor.

Tabla 3-9: Potencias en dBm, obtenidas en el espacio libre a la frecuencia de 1.8 GHz.

Alturas			
1m	2m	3m	4m
-55,34	-60,88	-62,77	-62,51

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023.

- **Espacio libre 1 metro y 2 metros.**

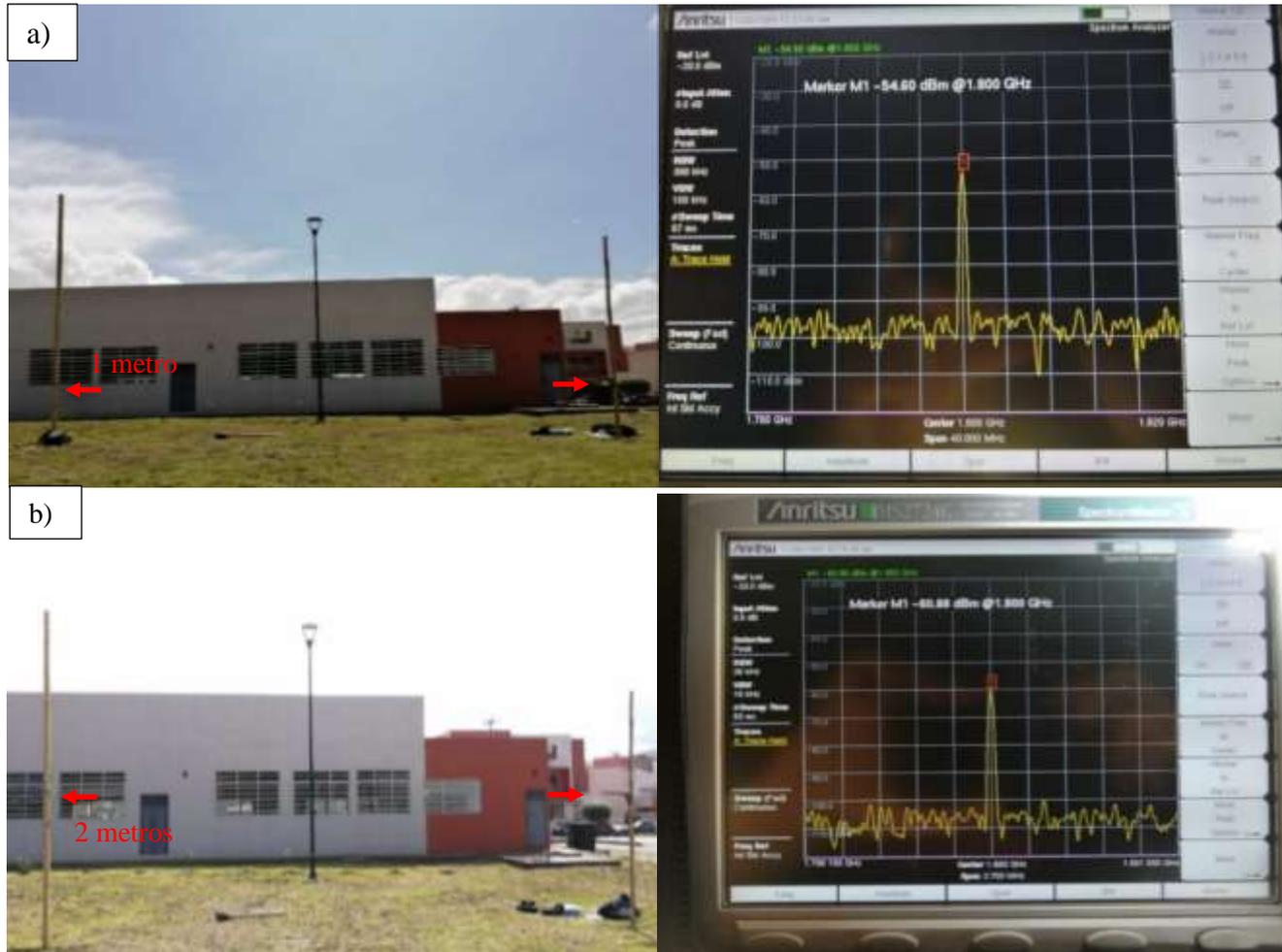


Ilustración 3-14: Medición de la potencia atenuada en el espacio libre a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Espacio libre 3 metros y 4 metros.

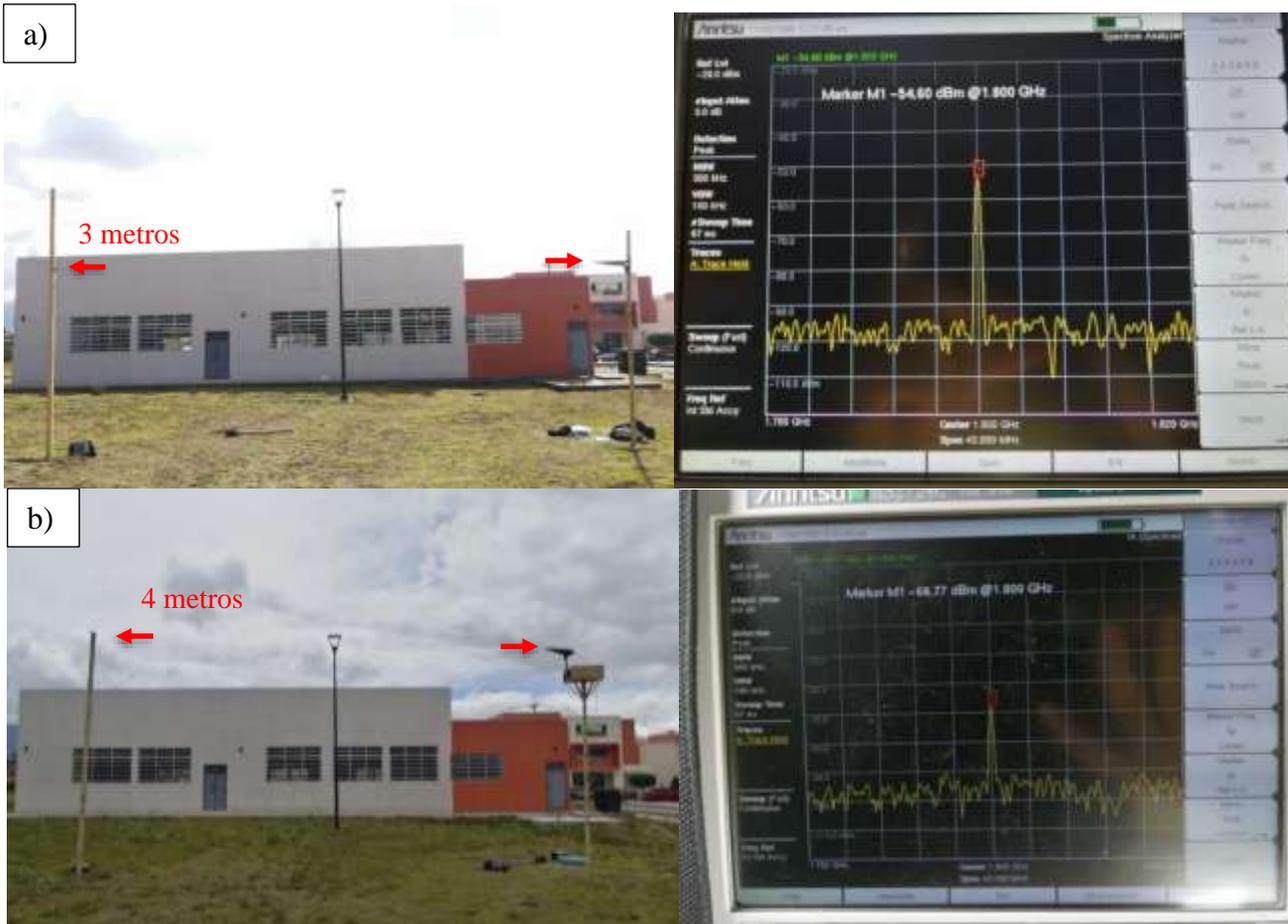


Ilustración 3-15: Medición de la potencia atenuada en el espacio libre a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.5.2. Medición de la potencia atenuada en un árbol de pino.



Ilustración 3-16: Árbol de pino

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 3-16, se muestra el árbol de pino en donde se ha realizado las mediciones correspondientes para el caso de un solo árbol a varias alturas de 1 a 4m.

Tabla 3-10: Potencias en dBm, obtenidas en un solo árbol de pino a la frecuencia de 1.8 GHz.

Alturas			
1m	2m	3m	4m
-74,27	-79	-91,34	-80,09

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Tabla 3-10 se observa las potencias obtenidas a cada altura en el árbol de pino a una distancia de 10 metros entre transmisor y receptor. Las mediciones se han tomado en el árbol de pino como se muestran en la Ilustración 3-17 y en la Ilustración 3-18.

- **Árbol de pino 1 metro y 2 metros.**

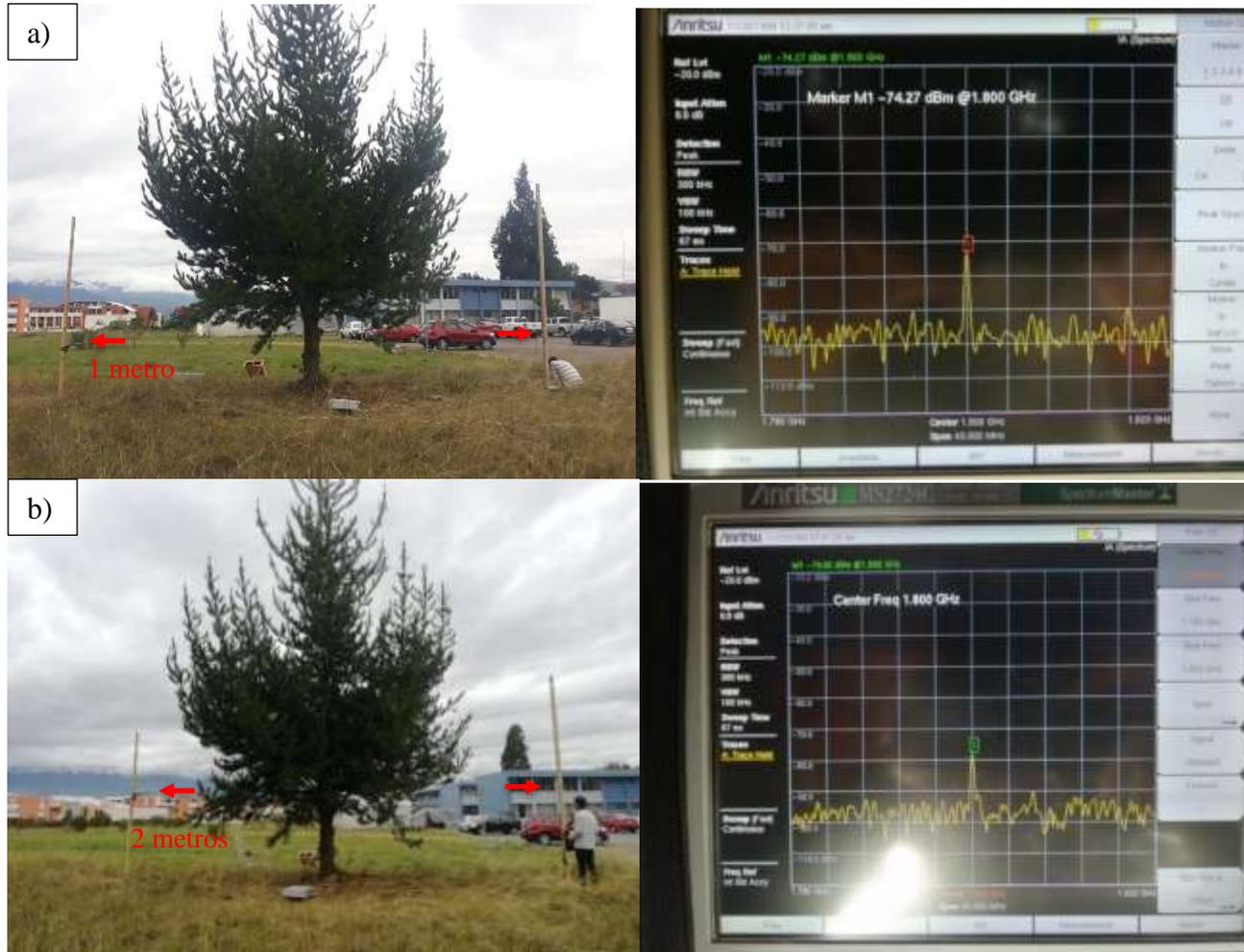


Ilustración 3-17: Medición de la potencia atenuada en un solo árbol de pino a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- **Árbol de pino 3 metros y 4 metros**

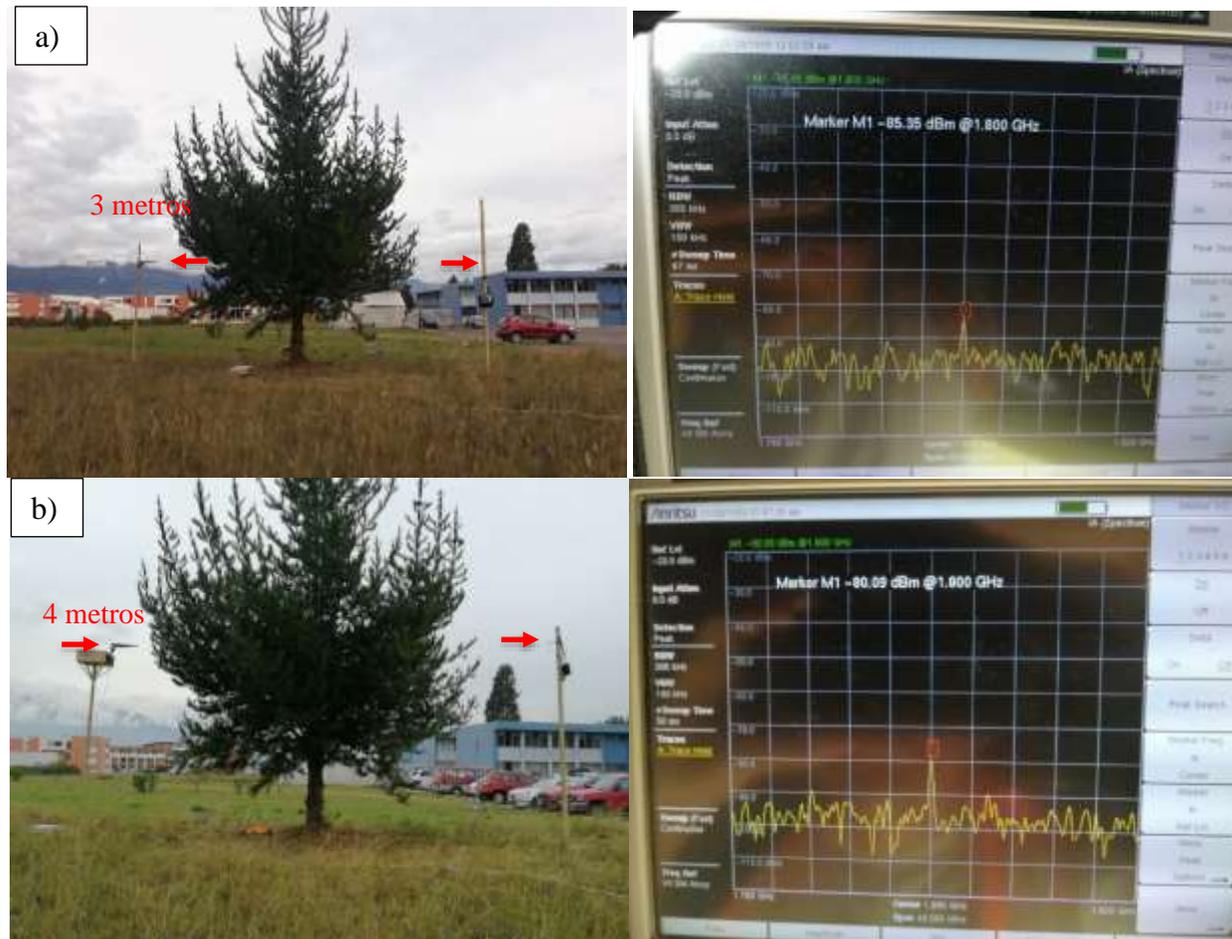


Ilustración 3-18: Medición de la potencia atenuada en un solo árbol de pino a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.5.3. Medición de la potencia atenuada en un árbol de eucalipto.



Ilustración 3-19: Árbol de eucalipto

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 3-19 se muestra el árbol de eucalipto escogido en la que se ha realizado las respectivas mediciones para el caso de un solo árbol a alturas de 1m, 2m, 3m y 4m, en las alturas de 1 y 2 metros no existe vegetación y se asemejan a las mediciones de potencia en condiciones de espacio libre tomando en cuenta la atenuación provocada solo por el tronco del árbol.

Tabla 3-11: Potencias en dBm, obtenidas en un solo árbol de eucalipto a la frecuencia de 1.8 GHz.

Alturas			
1m	2m	3m	4m
-57,73	-66,91	-69,08	-74,85

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Tabla 3-11 se observa las potencias obtenidas a cada altura del árbol de eucalipto y a una distancia de 10 metros entre transmisor y receptor. En la Ilustración 3-20 a la Ilustración 3-23 se muestra la potencia recibida para cada caso.

- **Árbol de eucalipto a 1 metro.**

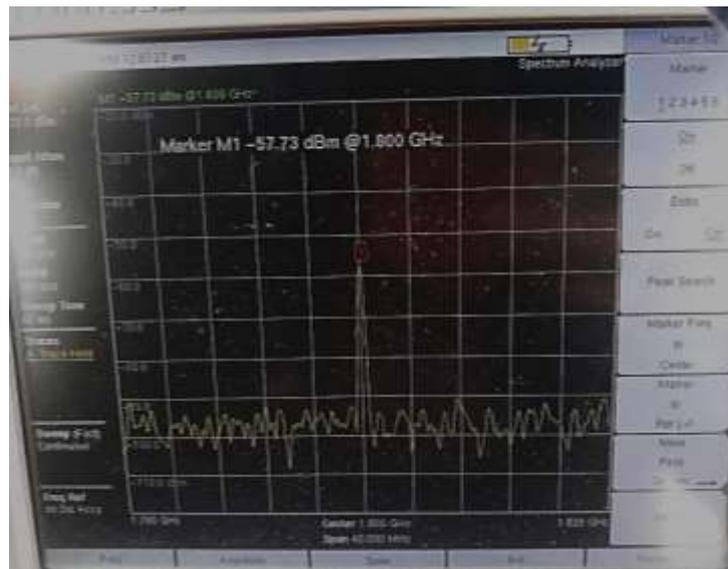


Ilustración 3-20: Árbol de eucalipto a 1 metro.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- **Árbol de eucalipto a 2 metros.**

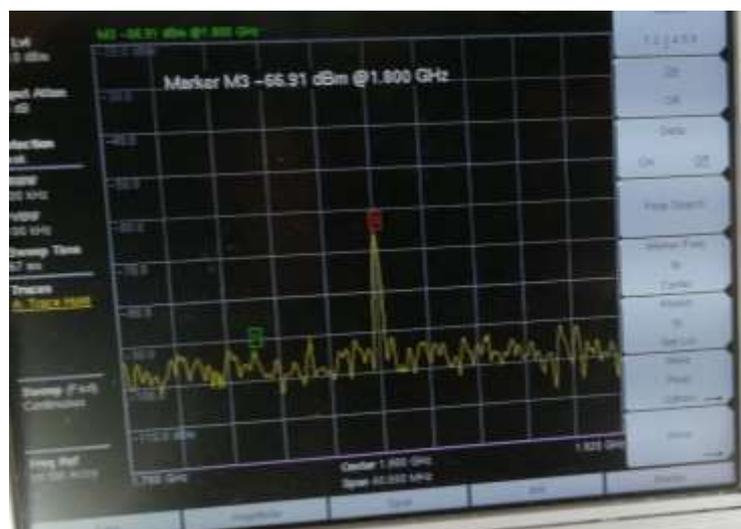


Ilustración 3-21: Árbol de eucalipto a 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- **Árbol de eucalipto a 3 metros.**

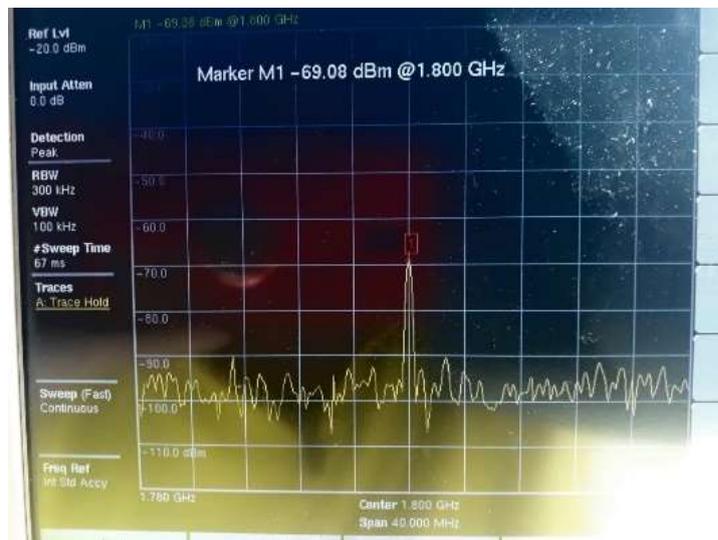


Ilustración 3-22: Árbol de eucalipto a 3 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023.

- **Árbol de eucalipto a 4 metros.**

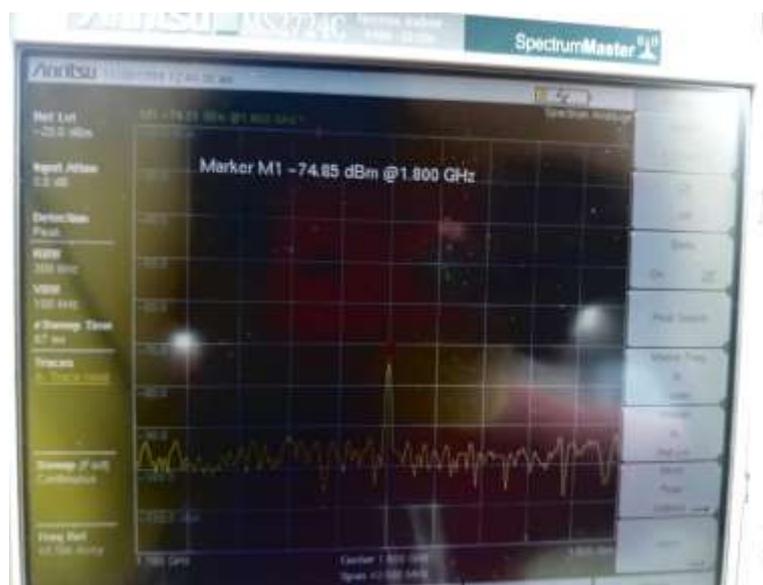


Ilustración 3-23: Árbol de eucalipto a 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.5.4. Medición de la potencia atenuada en un árbol de ciprés.



Ilustración 3-24 Árbol de ciprés

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 3-24, se muestra el árbol de ciprés escogido donde se ha realizado las mediciones para el caso de un solo árbol a unas alturas de 1 ,2 ,3 y 4 metros de altura, ya que en este árbol es frondoso desde 1 metro.

Tabla 3-12: Potencias en dBm, obtenidas en un solo árbol de ciprés a la frecuencia de 1.8 GHz.

Alturas			
1m	2m	3m	4m
-72,46	-73,21	-82,25	-82,73

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Tabla 3-12 se observa las potencias obtenidas a las alturas de 1 a 4 metros en el árbol de ciprés a una distancia de 10 metros entre transmisor y receptor. Las mediciones se han tomado en el árbol de ciprés como se muestran en la Ilustración 3-25 y en la Ilustración 3-26.

- **Árbol de ciprés a 1 metro y 2 metros**

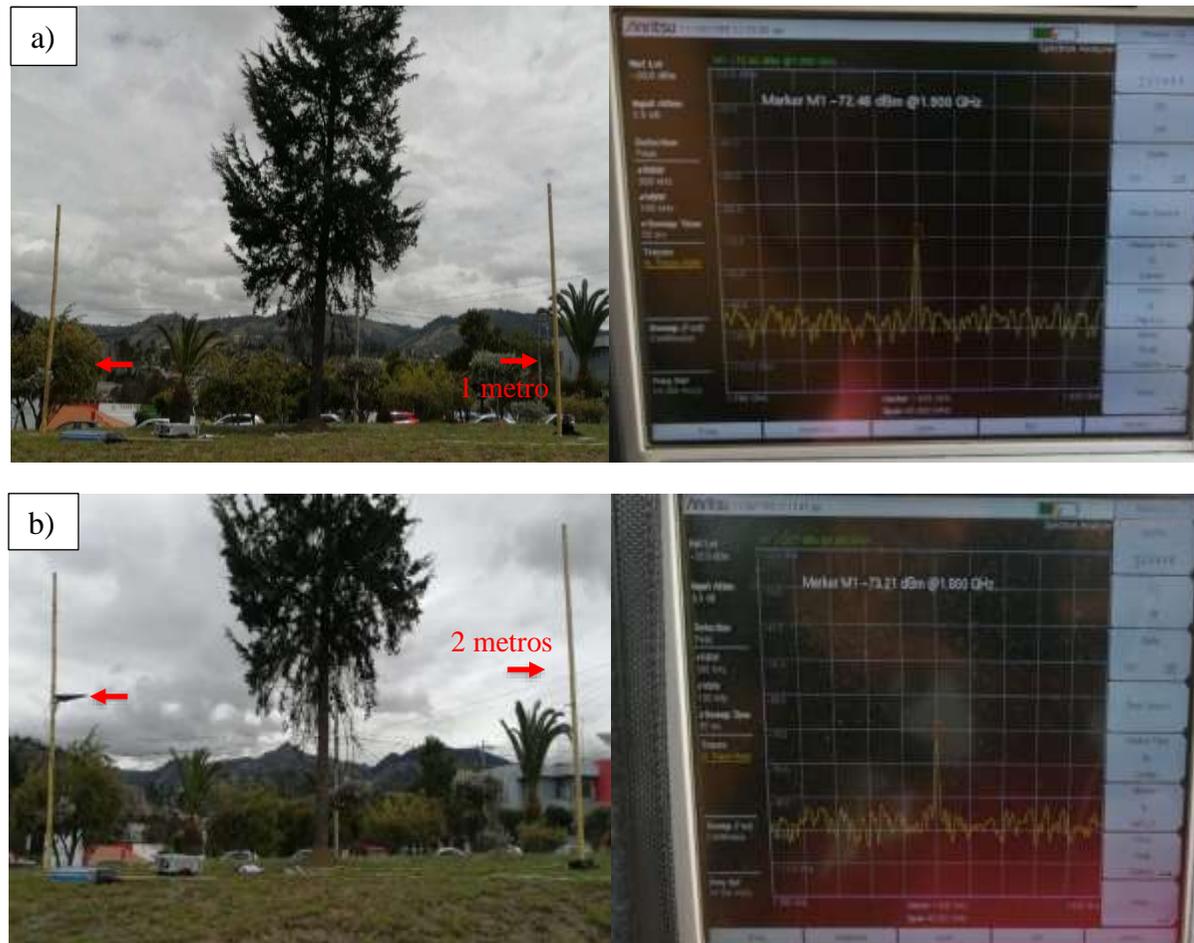


Ilustración 3-25: Medición de la potencia atenuada en un solo árbol de ciprés a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena, Daniel & Tandazo, Jordy, 2023

- **Árbol de ciprés 3 metros y 4 metros**

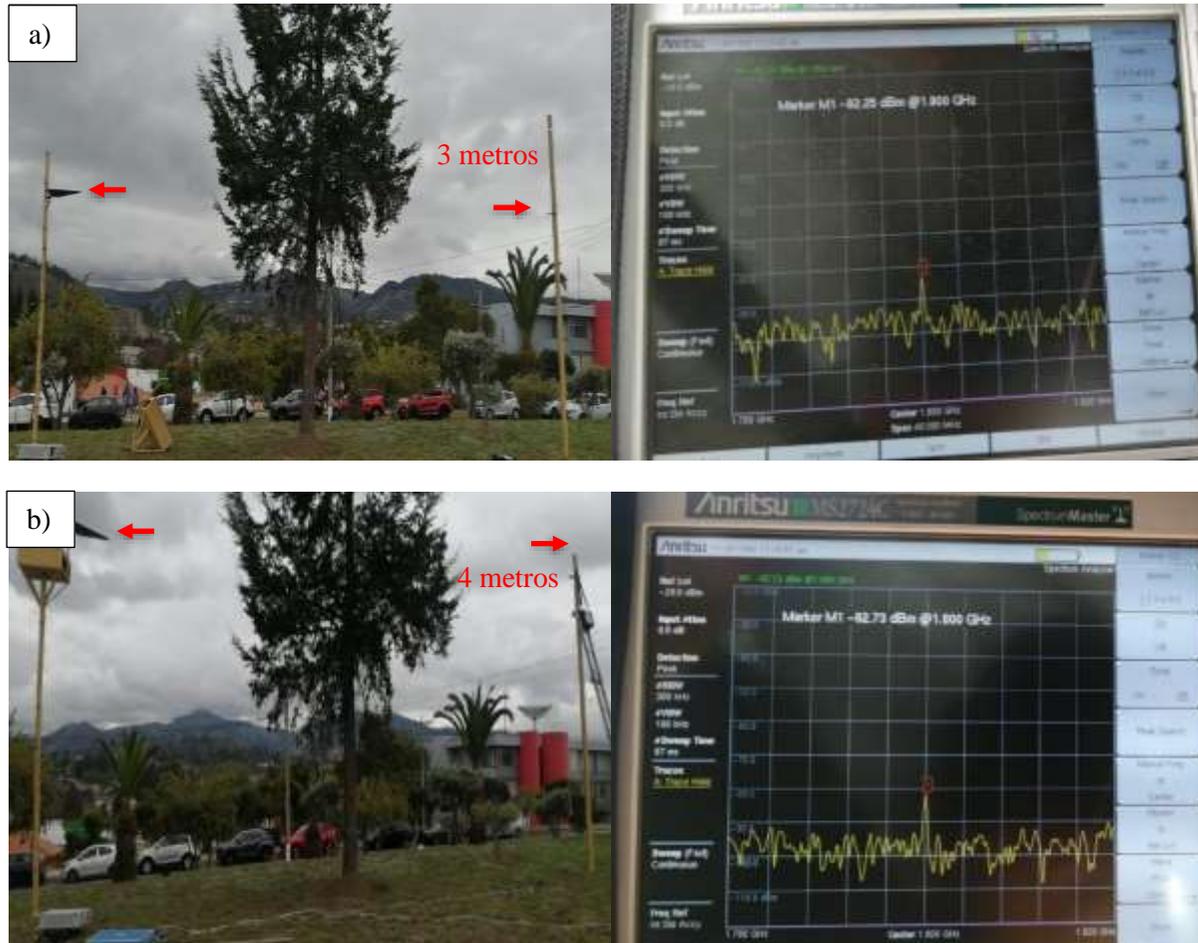


Ilustración 3-26: Medición de la potencia atenuada en un solo árbol de ciprés a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena, Daniel & Tandazo, Jordy, 2023

3.5.5.5. Medición de la potencia atenuada en un bosque de pino.



Ilustración 3-27: Bosque de pino.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 3-27, se observa el bosque de pino escogido donde se ha realizado las pertinentes mediciones, la cual se ha considerado 4 árboles del bosque para sus respectivas pruebas y se ha variado las alturas de 1 a 4 metros; para el caso de los dos primeros arboles se ha obtenido una potencia que se encuentra por encima del piso de ruido como se muestra en la Ilustración 3-28 a la Ilustración 3-31 , mientras que a partir del tercer árbol el valor de potencia se confunde con el nivel de piso de ruido debido a la vegetación del pino, por tal motivo se considera una mala señal de potencia recibida como se muestra en la Ilustración 3-32 a la Ilustración 3-35.

En la Tabla 3-13 se observa las potencias obtenidas a la altura de 1 a 4 metros en cada árbol de pino, se ha ubicado el transmisor fijamente a una distancia de 3 metros hacia el primer árbol y el receptor se ha ubicado después de cada árbol para sus respectivas mediciones.

Tabla 3-13: Potencias en dBm, obtenidas en el bosque de pino a la frecuencia de 1.8 GHz.

1 árbol				2 árboles				3 árboles				4 árboles			
Alturas															
1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m
-79,69	-84,43	-74,32	-68,54	-81,44	-89,02	-87,44	-87,27	-92,67	-95,92	-93,5	-91,34	-96,16	-99,36	-99,28	-98,22

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Primer árbol del bosque de pino a 1 metro y 2 metros.

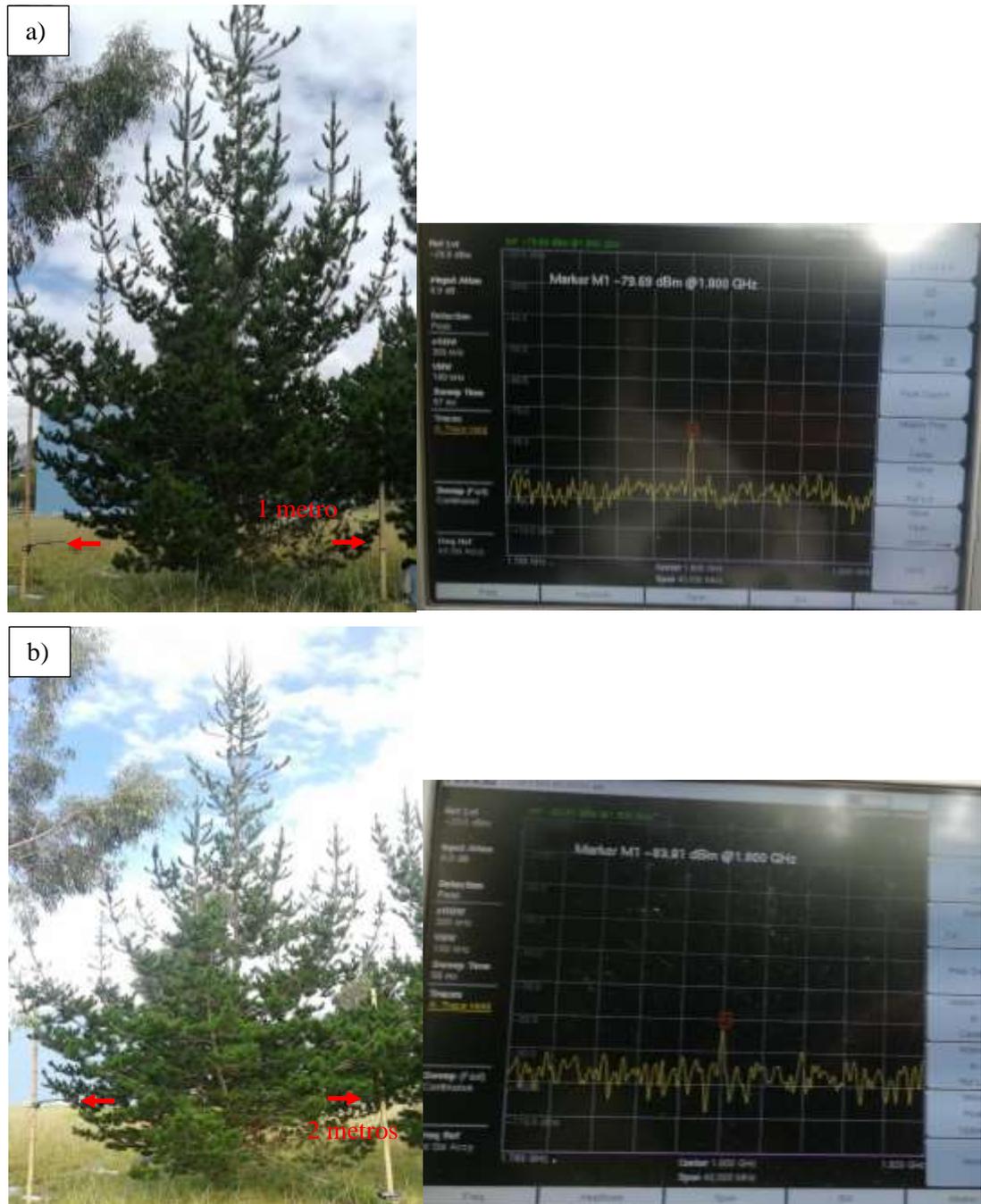


Ilustración 3-28: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Primer árbol del bosque de pino a 3 metros y 4 metros.



Ilustración 3-29: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Segundo árbol del bosque de pino a 1 metro y 2 metros

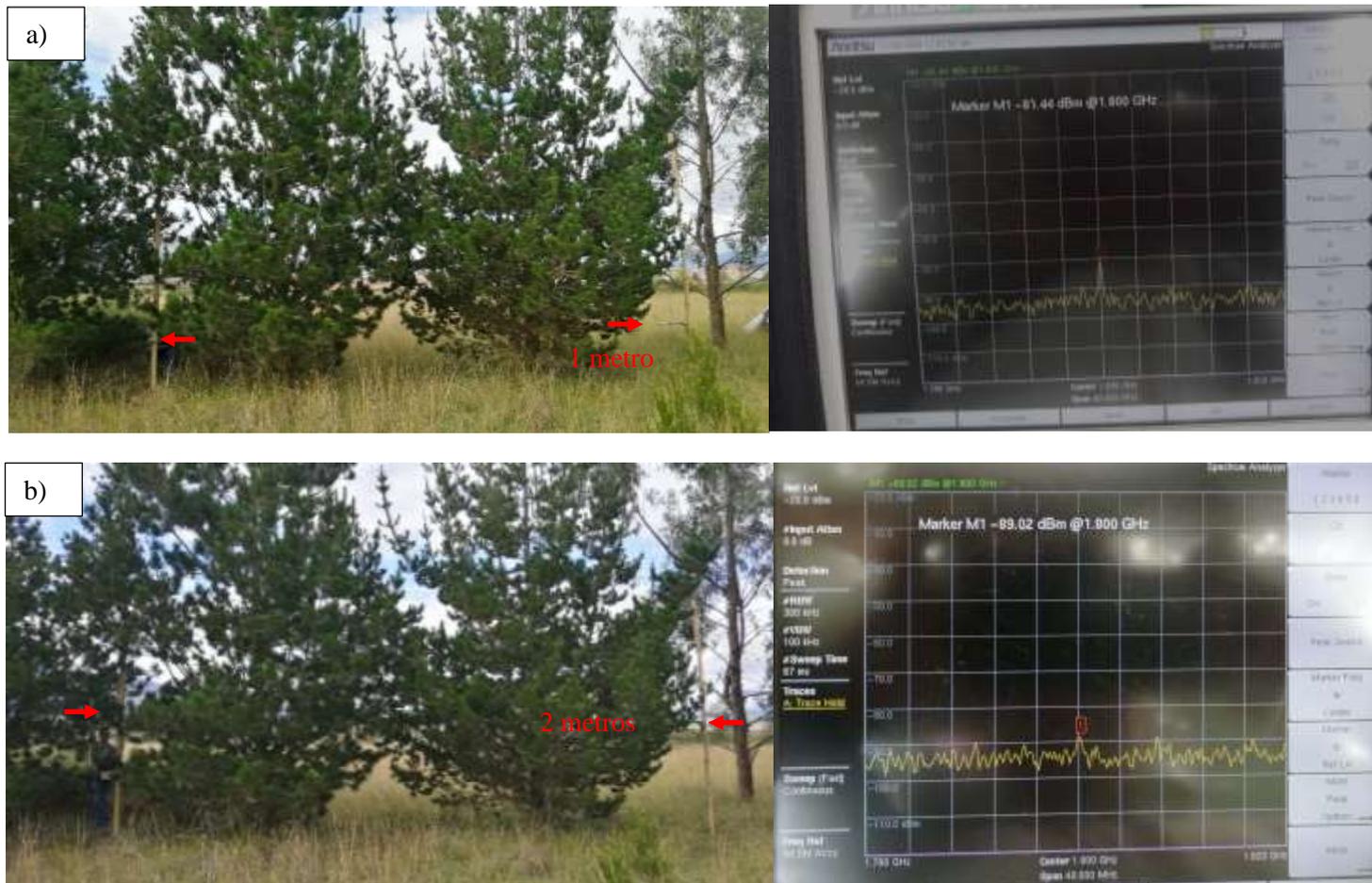


Ilustración 3-30: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Segundo árbol del bosque de pino a 3 metros y 4 metros

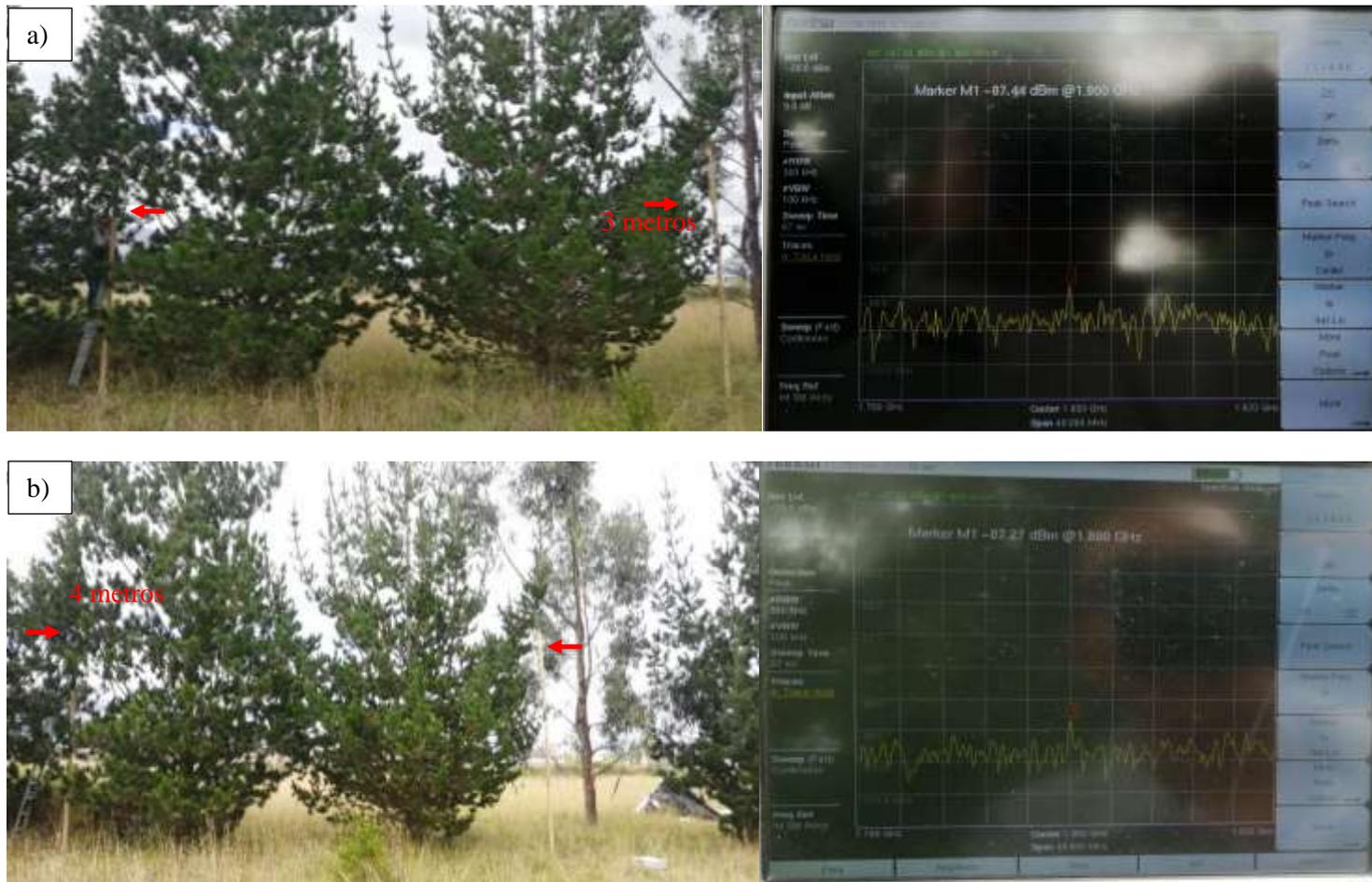


Ilustración 3-31: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Tercer árbol del bosque de pino a 1 metro y 2 metros.

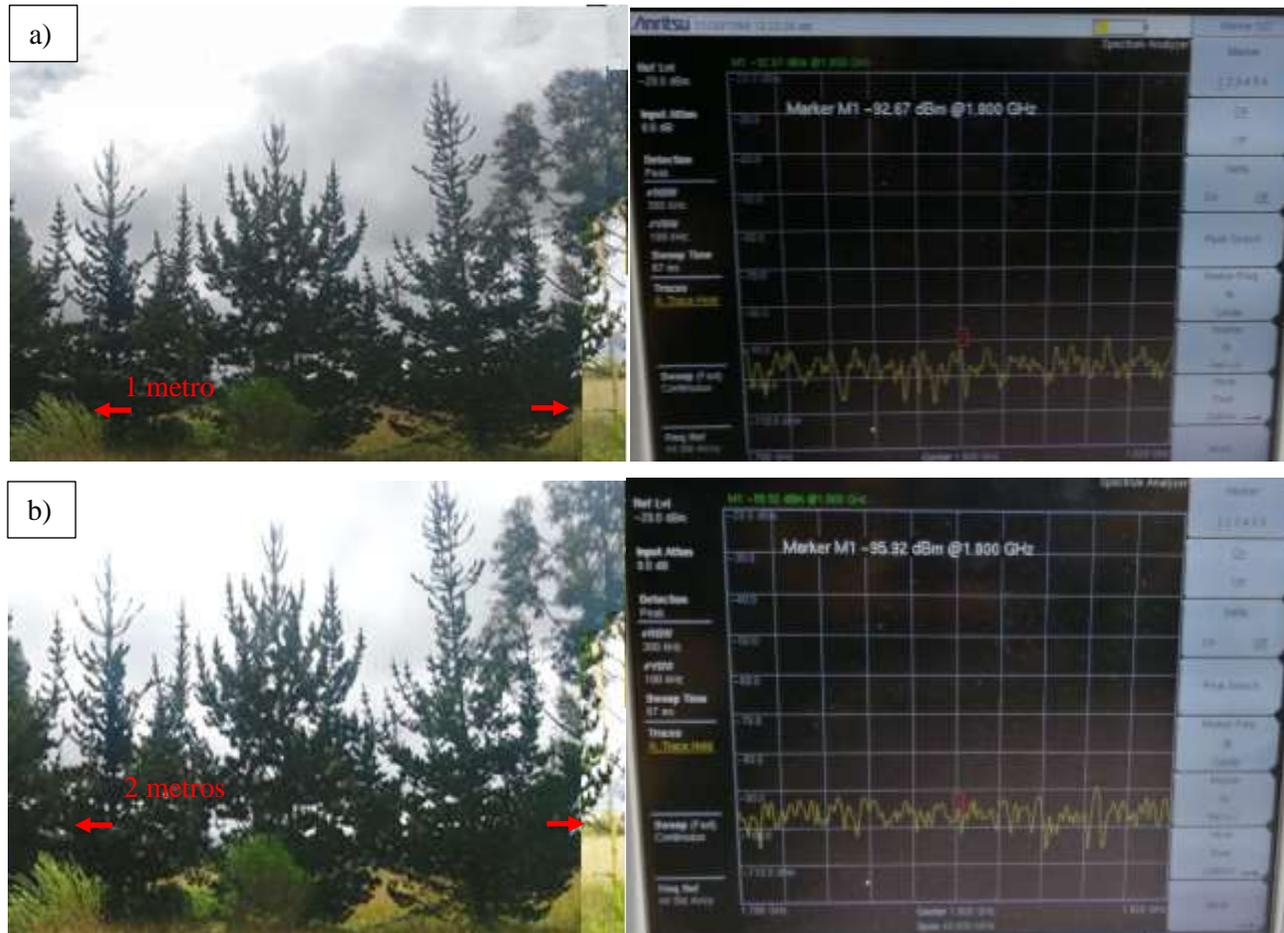


Ilustración 3-32: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Tercer árbol del bosque de pino a 3 metros y 4 metros.

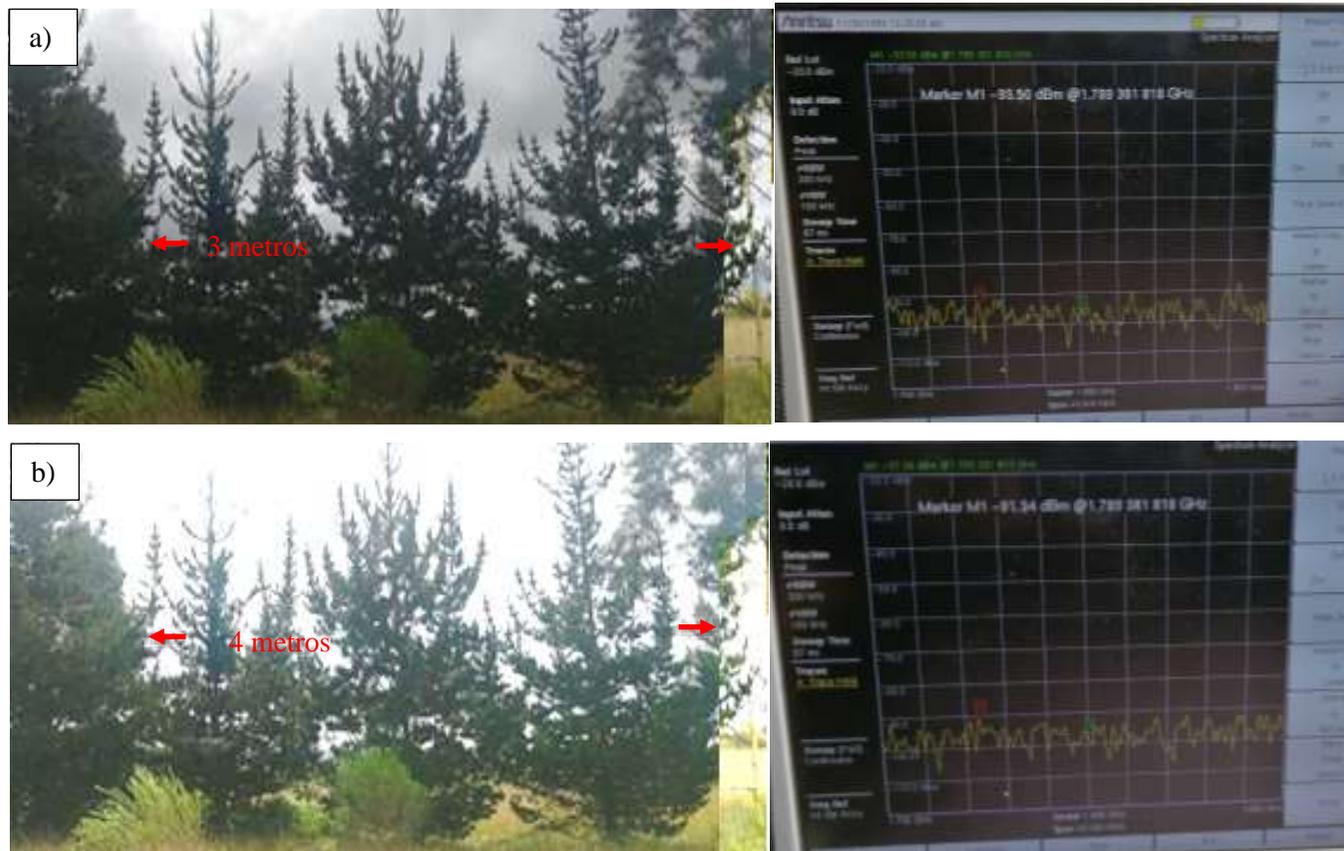


Ilustración 3-33: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Cuarto árbol del bosque de pino a 1 metro y 2 metros

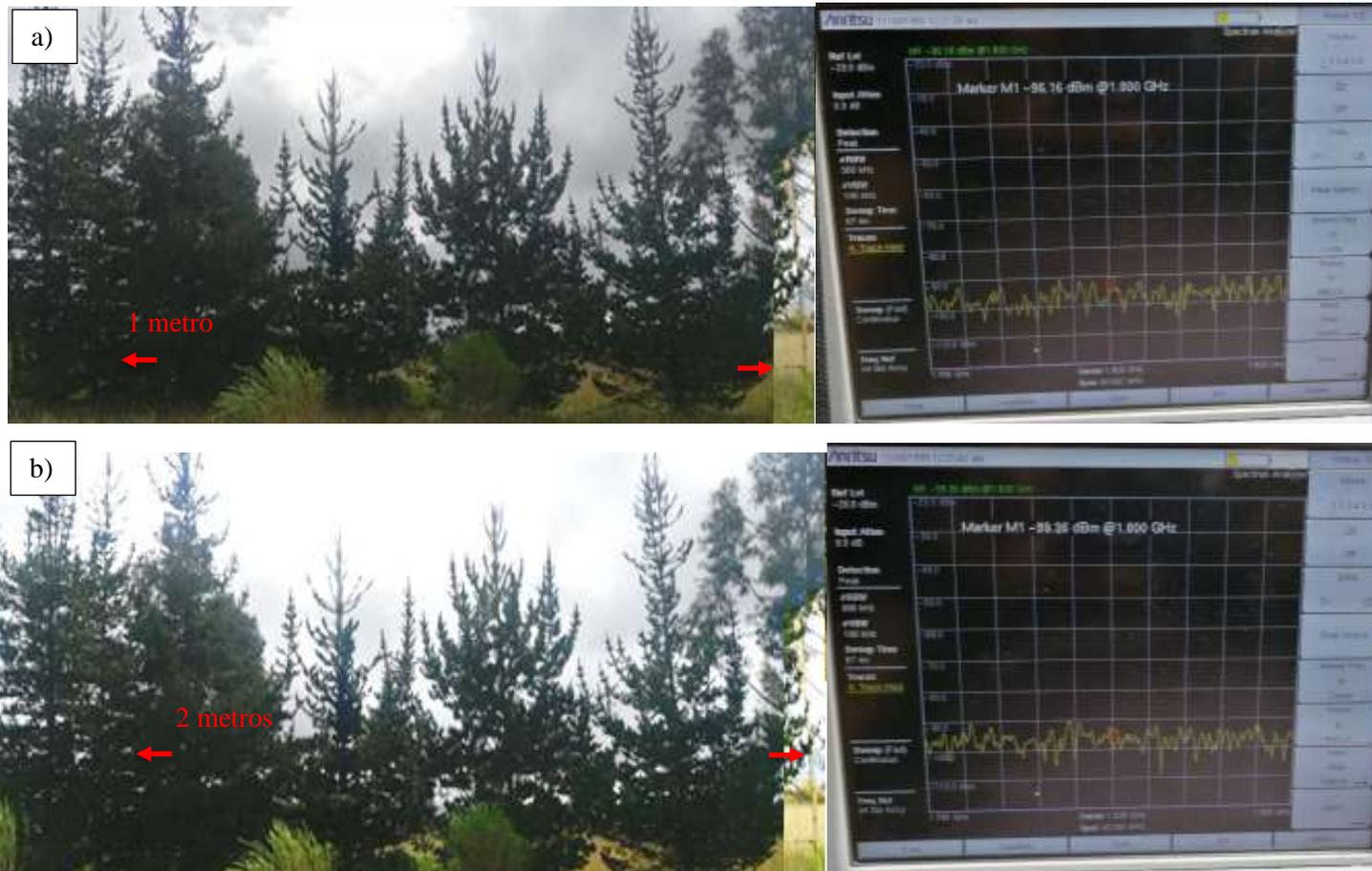


Ilustración 3-34: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Cuarto árbol del bosque de pino a 3 metros y 4 metros

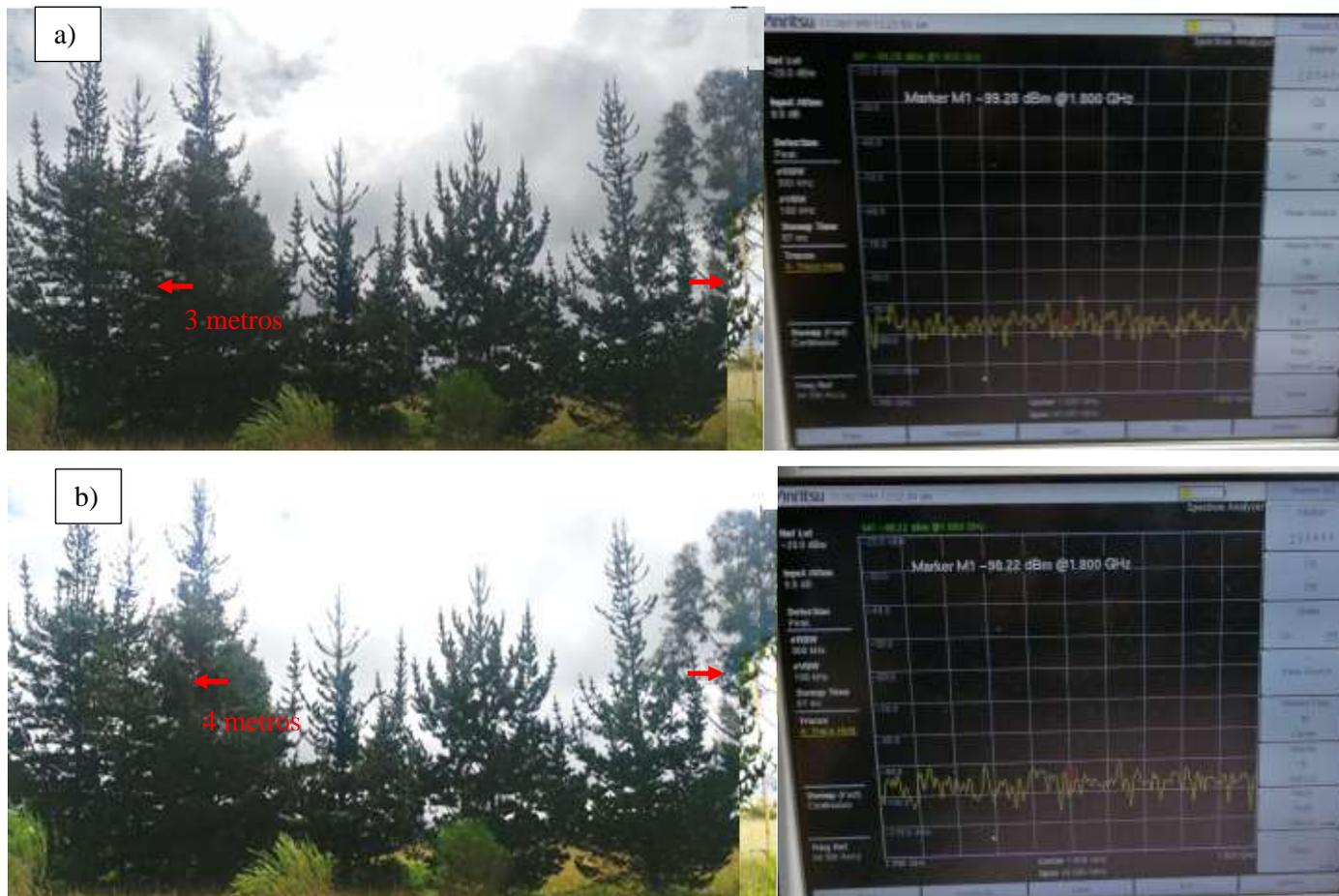


Ilustración 3-35: Medición de la potencia atenuada en el bosque de pino para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.5.6. *Medición de la potencia atenuada en un bosque de eucalipto.*



Ilustración 3-36: Bosque de Eucalipto

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 3-36, se observa el bosque escogido de eucalipto en el que se ha realizado las respectivas mediciones, se ha tomado en cuenta 4 árboles como máximo y se ha variado las alturas de 1m a 4m.

En la Tabla 3-14 se detalla las potencias obtenidas a las alturas de entre 1 a 4 metros en cada árbol de eucalipto, se ha ubicado el transmisor fijamente a una distancia de 3 metros desde el primer árbol y el receptor se ha ubicado después de cada árbol como se observa en la ilustración 3-37 a la Ilustración 3-44.

Tabla 3-14: Potencias en dBm, obtenidas en el bosque de eucalipto a la frecuencia de 1.8 GHz.

1 árbol				2 árboles				3 árboles				4 árboles			
Alturas															
1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m
-53,52	-59,30	-69,66	-75,12	-55,67	-59,87	-73,74	-76,46	-64,63	-63,19	-73,9	-80,33	-67,47	-65,45	-85,64	-87,04

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Primer árbol del bosque de eucalipto a 1 y 2 metros.

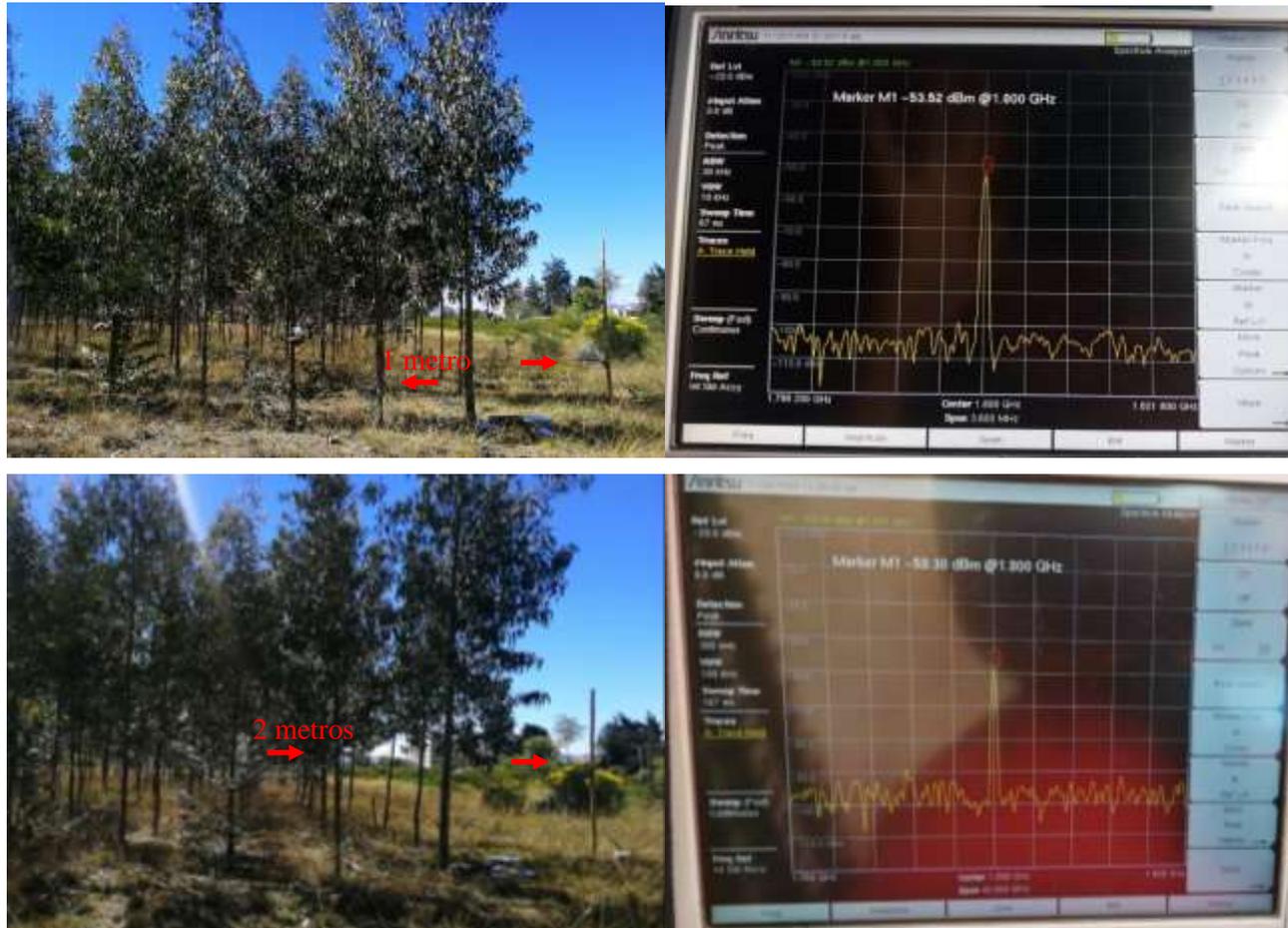


Ilustración 3-37: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Primer árbol del bosque de eucalipto a 3 y 4 metros.

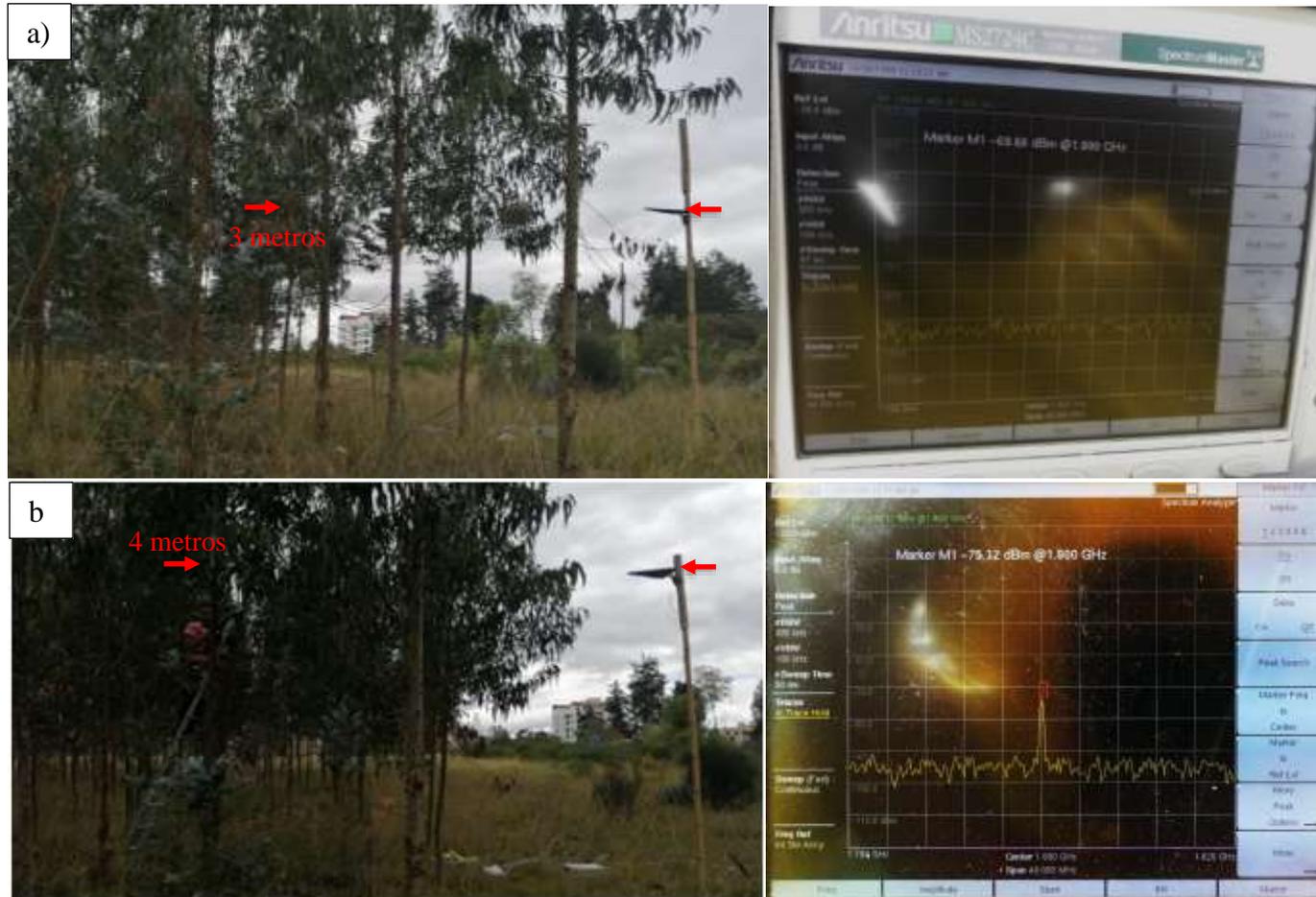


Ilustración 3-38: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Segundo árbol del bosque de eucalipto a 1 y 2 metros.

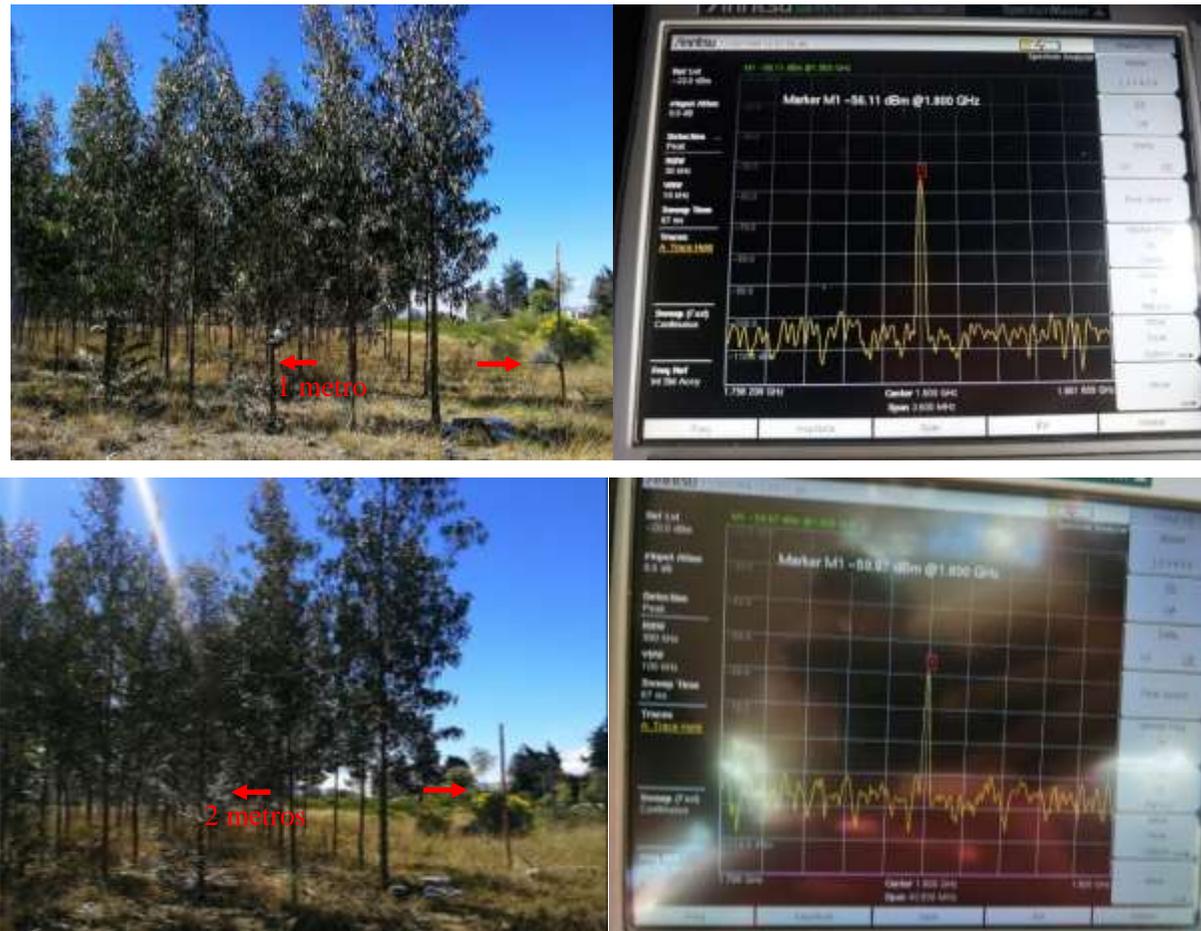


Ilustración 3-39: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Segundo árbol del bosque de eucalipto a 3 y 4 metros.

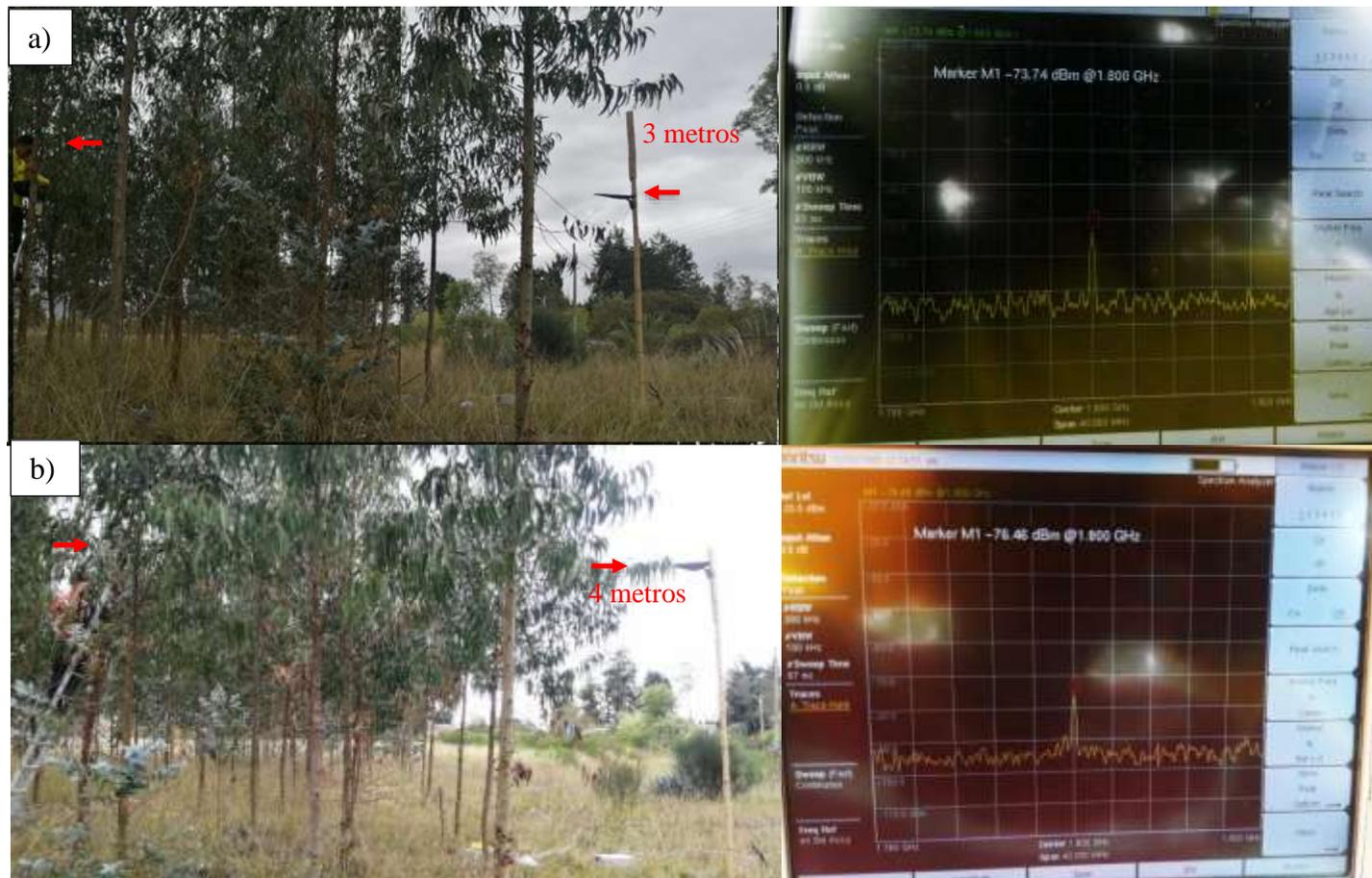


Ilustración 3-40: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Tercer árbol del bosque de eucalipto a 1 y 2 metros.

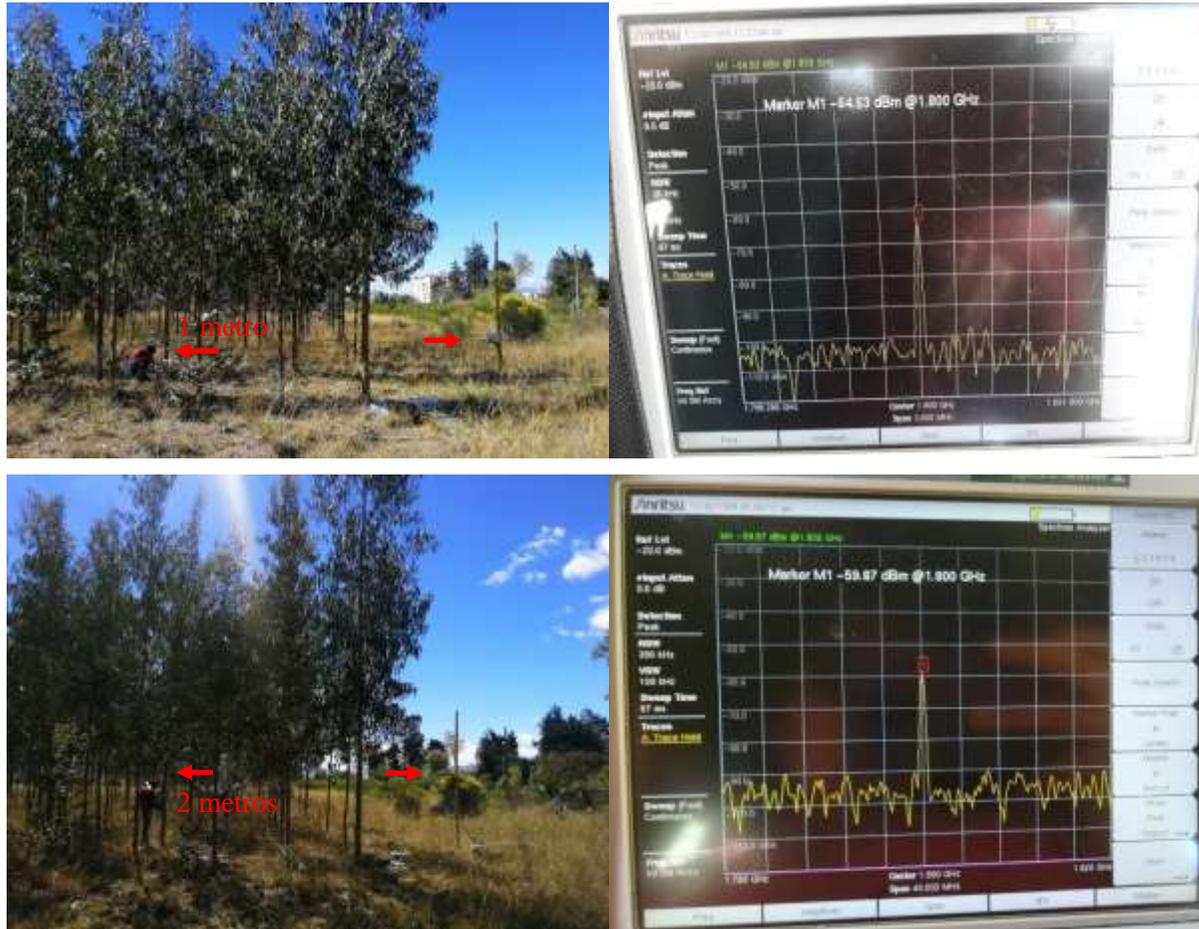


Ilustración 3-41: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Tercer árbol del bosque de eucalipto a 3 y 4 metros.

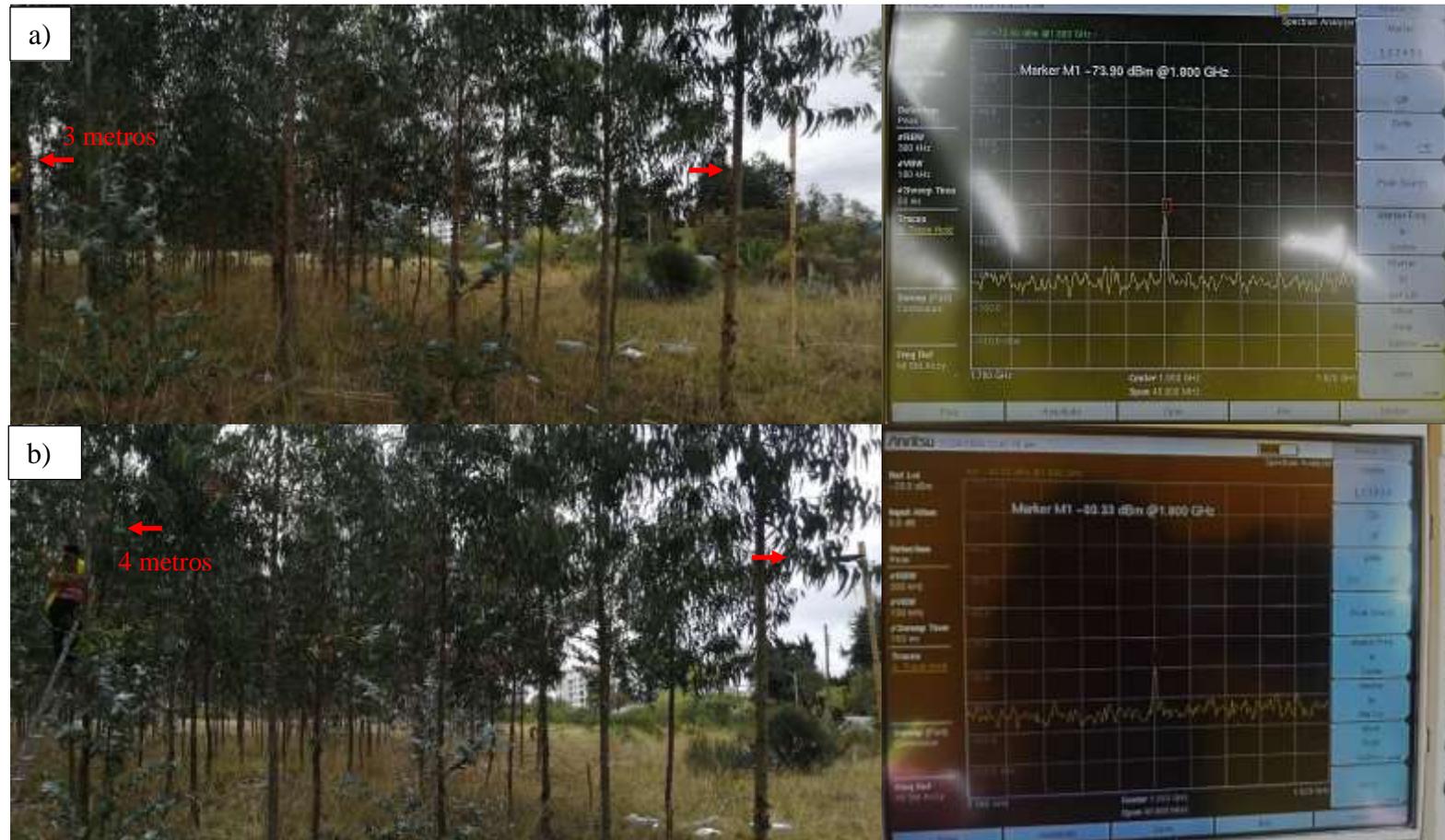


Ilustración 3-42: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Cuarto árbol del bosque de eucalipto a 1 y 2 metros.

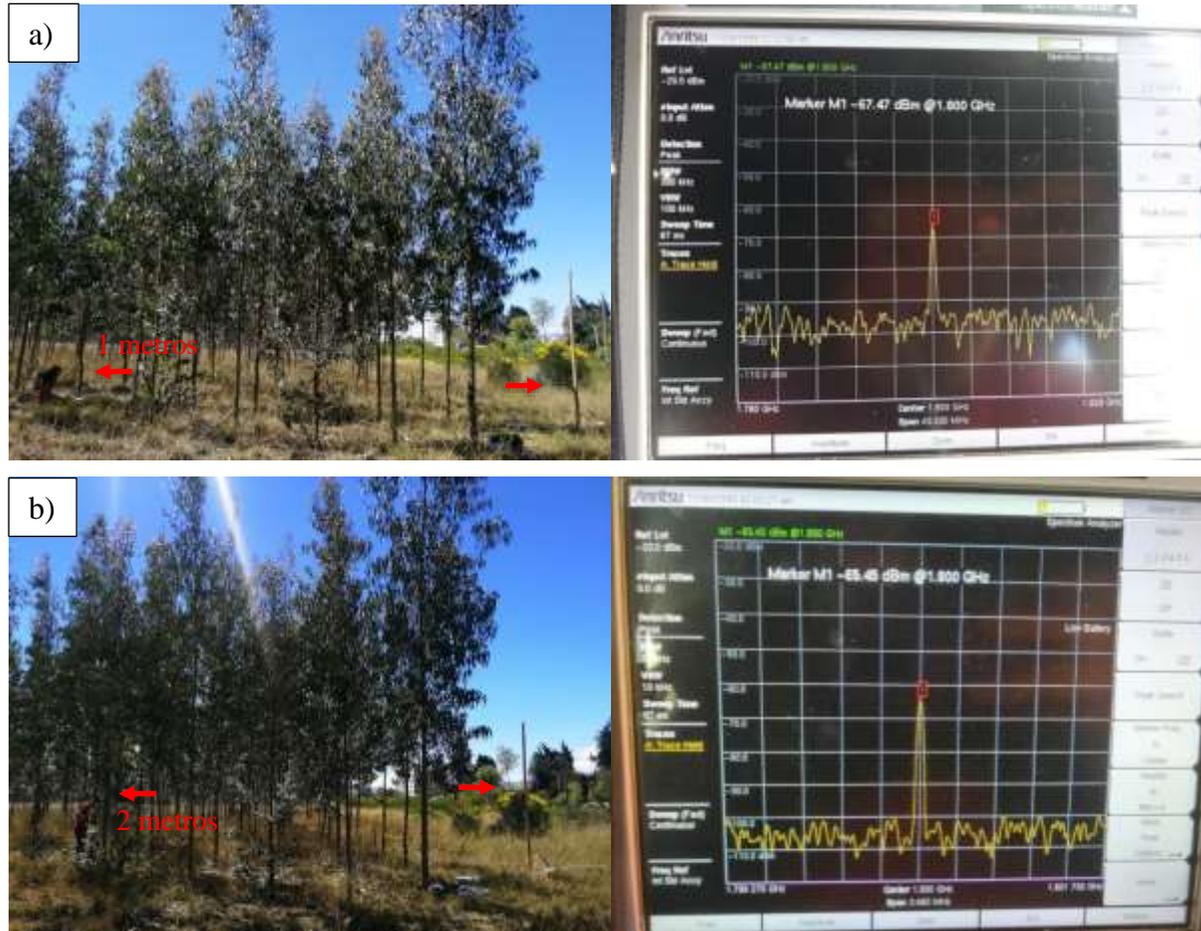


Ilustración 3-43: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Cuarto árbol del bosque de eucalipto a 3 y 4 metros.

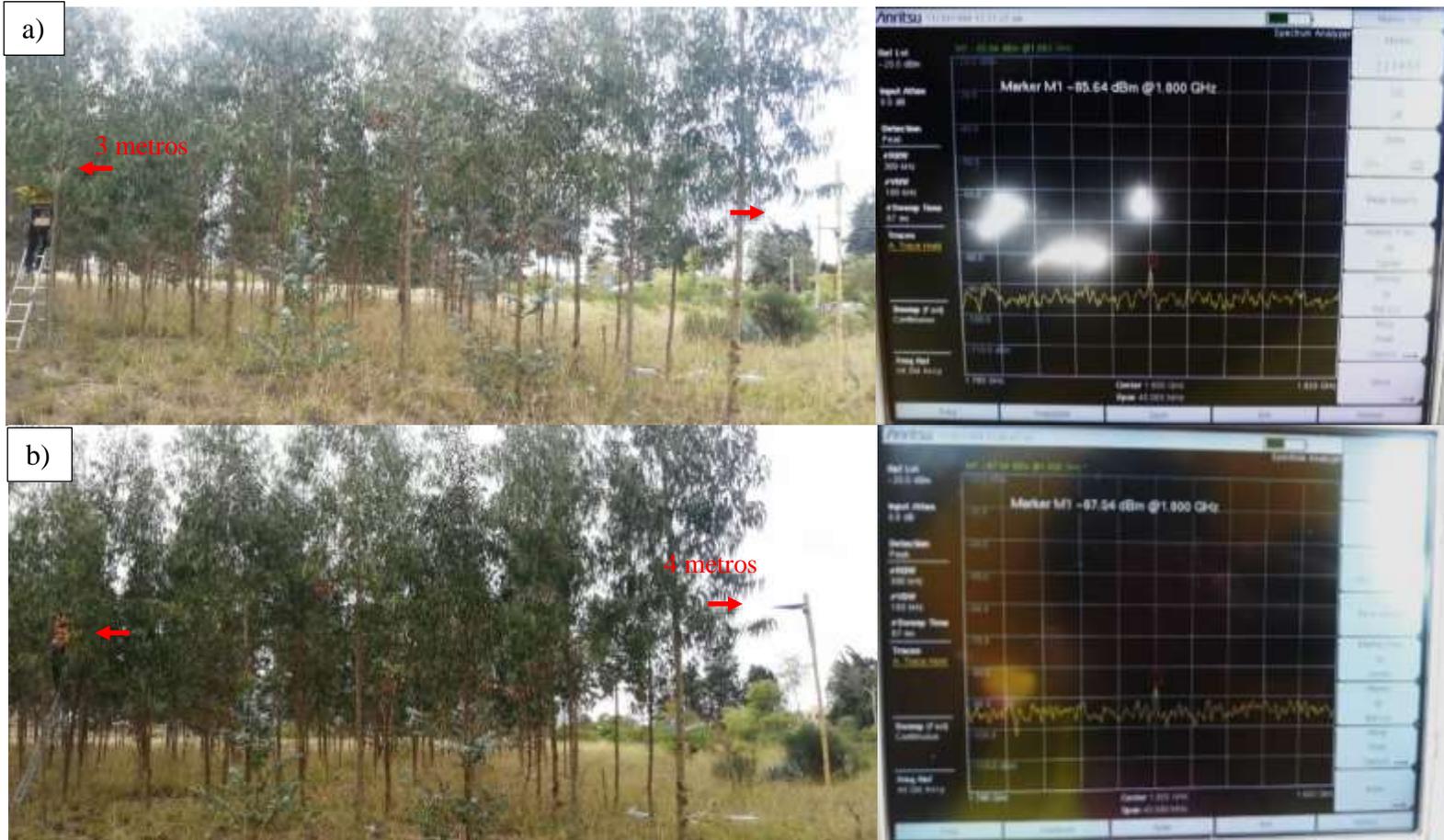


Ilustración 3-44: Medición de la potencia atenuada en el bosque de eucalipto para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.5.7. Medición de la potencia atenuada en un bosque de ciprés.



Ilustración 3-45: Bosque de ciprés.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 3-45, se observa el bosque de ciprés escogido donde se ha realizado las pertinentes mediciones, la cual se ha considerado 4 árboles del bosque para sus respectivas pruebas y se ha variado las alturas de 1 a 4 metros; para el caso de los dos primeros arboles se ha obtenido una potencia que se encuentra por encima del piso de ruido como se muestra en la Ilustración 3-46 a la Ilustración 3-49, mientras que a partir del tercer árbol el valor de potencia se confunde con el nivel de piso de ruido debido a la vegetación del ciprés, por tal motivo se considera una mala señal de potencia recibida como se muestra en la Ilustración 3-50 a la Ilustración 3-53.

En la Tabla 3-15, se observa las potencias obtenidas a diferentes alturas de 1, 2, 3 y 4 metros para cada árbol de ciprés, de igual manera como se ha realizado anteriormente se ha ubicado el transmisor fijamente a una distancia de 3 metros hacia el primer árbol y el receptor se ha ubicado después de cada árbol.

Tabla 3-15: Potencias en dBm obtenidas en el bosque de ciprés a la frecuencia de 1.8 GHz.

1 árbol				2 árbol				3 árbol				4 árbol			
Alturas															
1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m
-65,24	-67,32	-66,41	-79,6	-74,15	-80,44	-82,14	-82,92	-92,12	-94,38	-96,75	-96,51	-94,5	-97,91	-99,34	-98,94

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Primer árbol del bosque de ciprés a 1 y 2 metros.

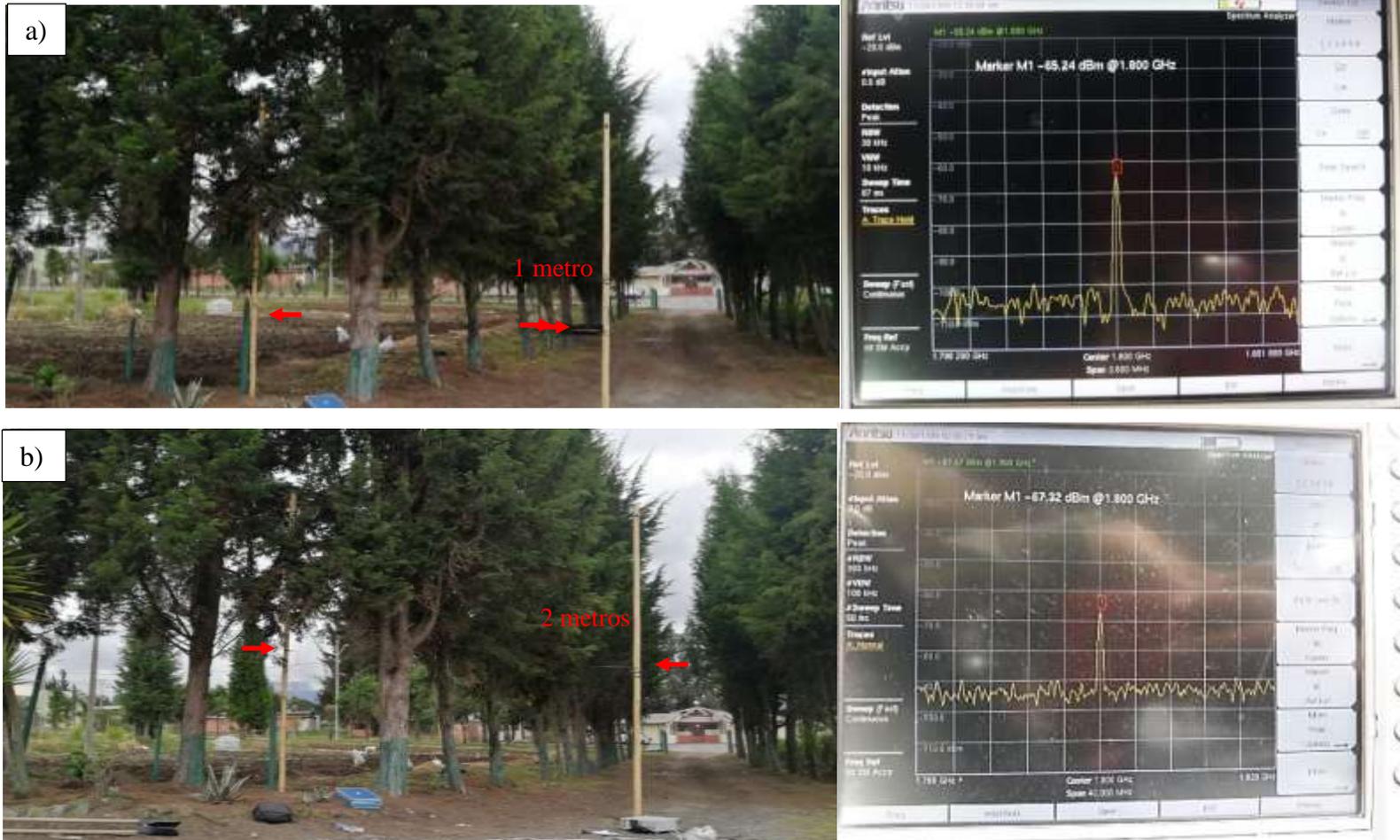


Ilustración 3-46: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Primer árbol del bosque de ciprés a 3 y 4 metros.



Ilustración 3-47: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 4 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Segundo árbol del bosque de ciprés a 1 y 2 metros.

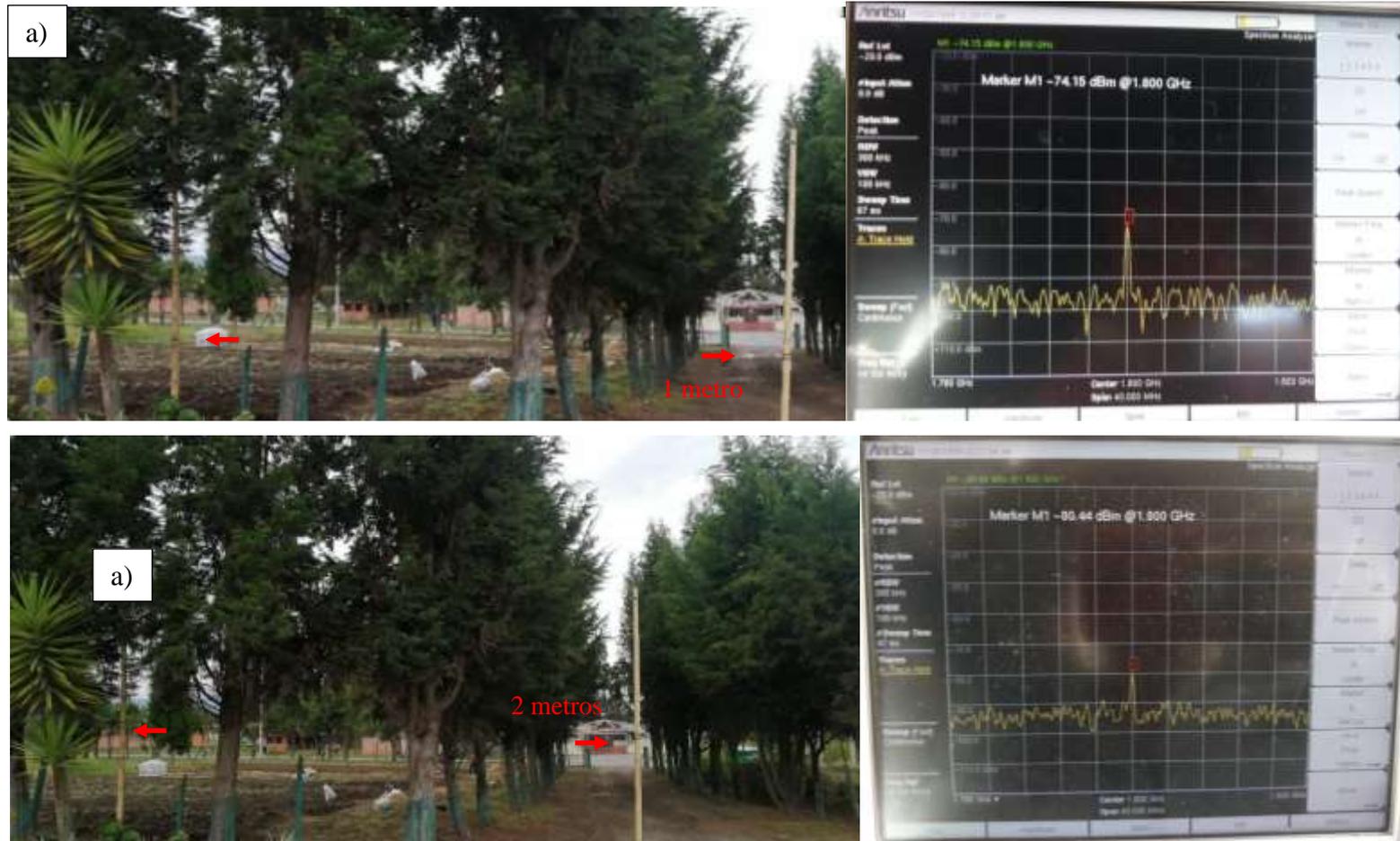


Ilustración 3-48: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el primer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 4 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Segundo árbol del bosque de ciprés a 3 y 4 metros.

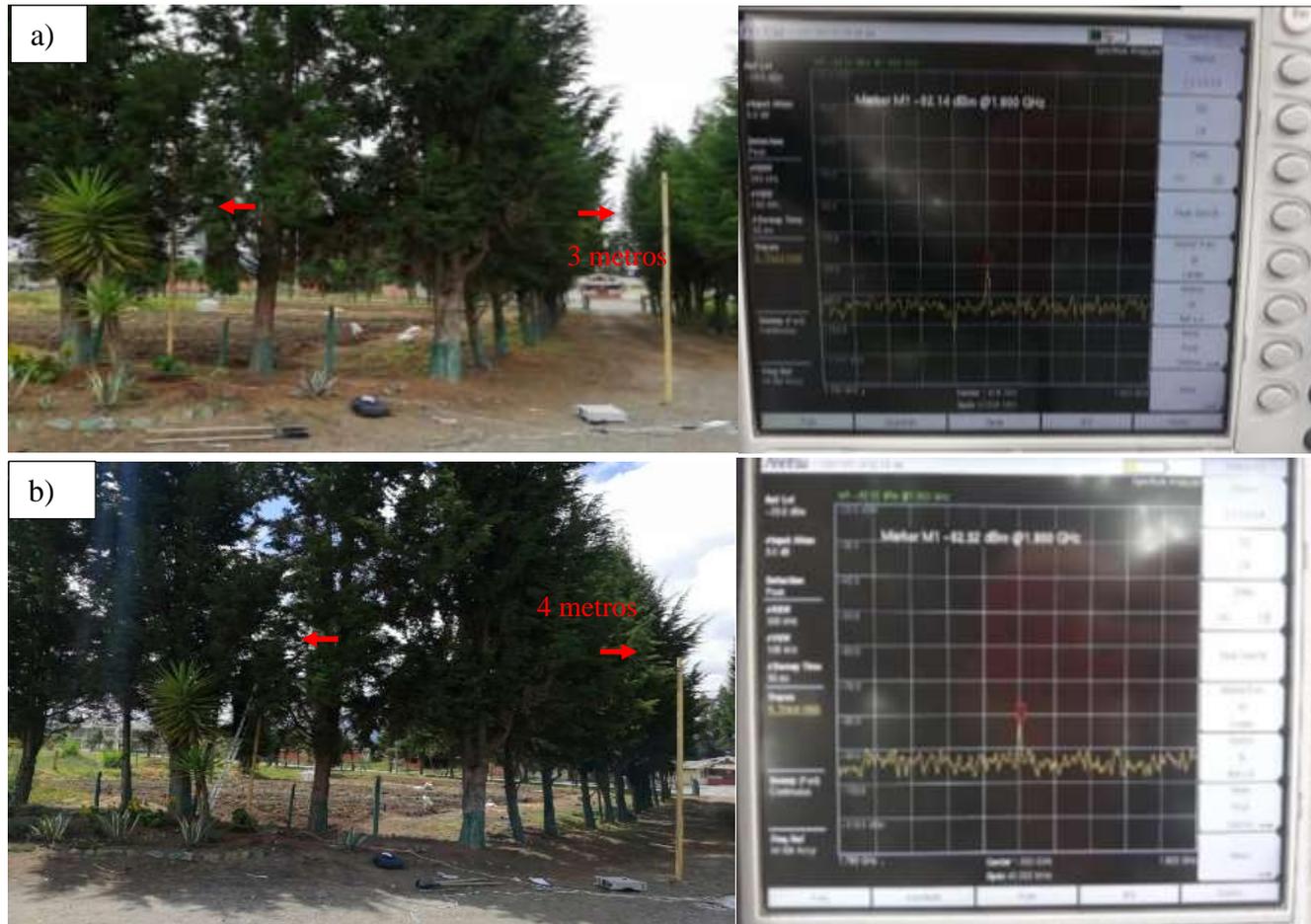


Ilustración 3-49: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el segundo árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Tercer árbol del bosque de ciprés a 1 y 2 metros.

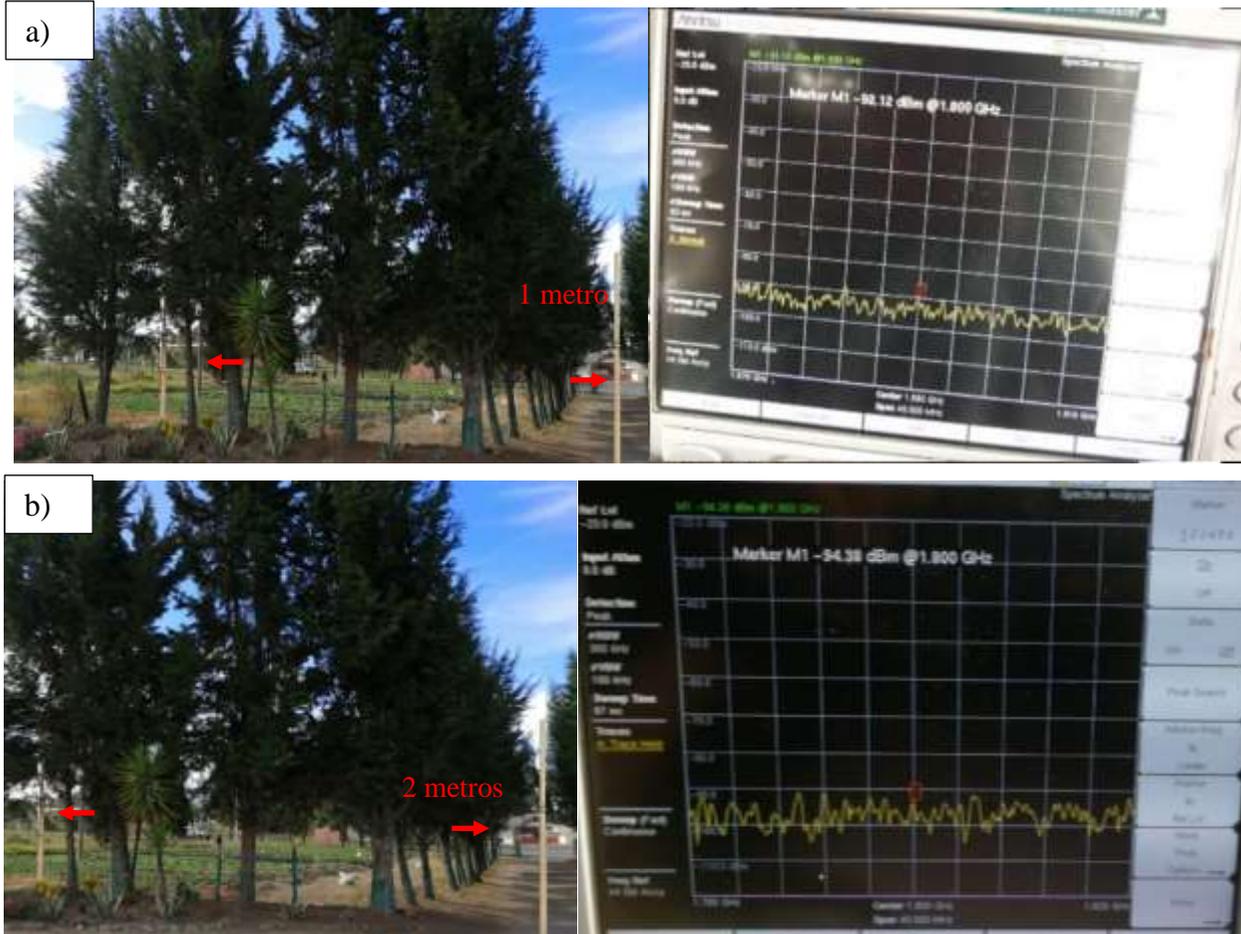


Ilustración 3-50: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metro (b) 2 metro
Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Tercer árbol del bosque de ciprés a 3 y 4 metros.

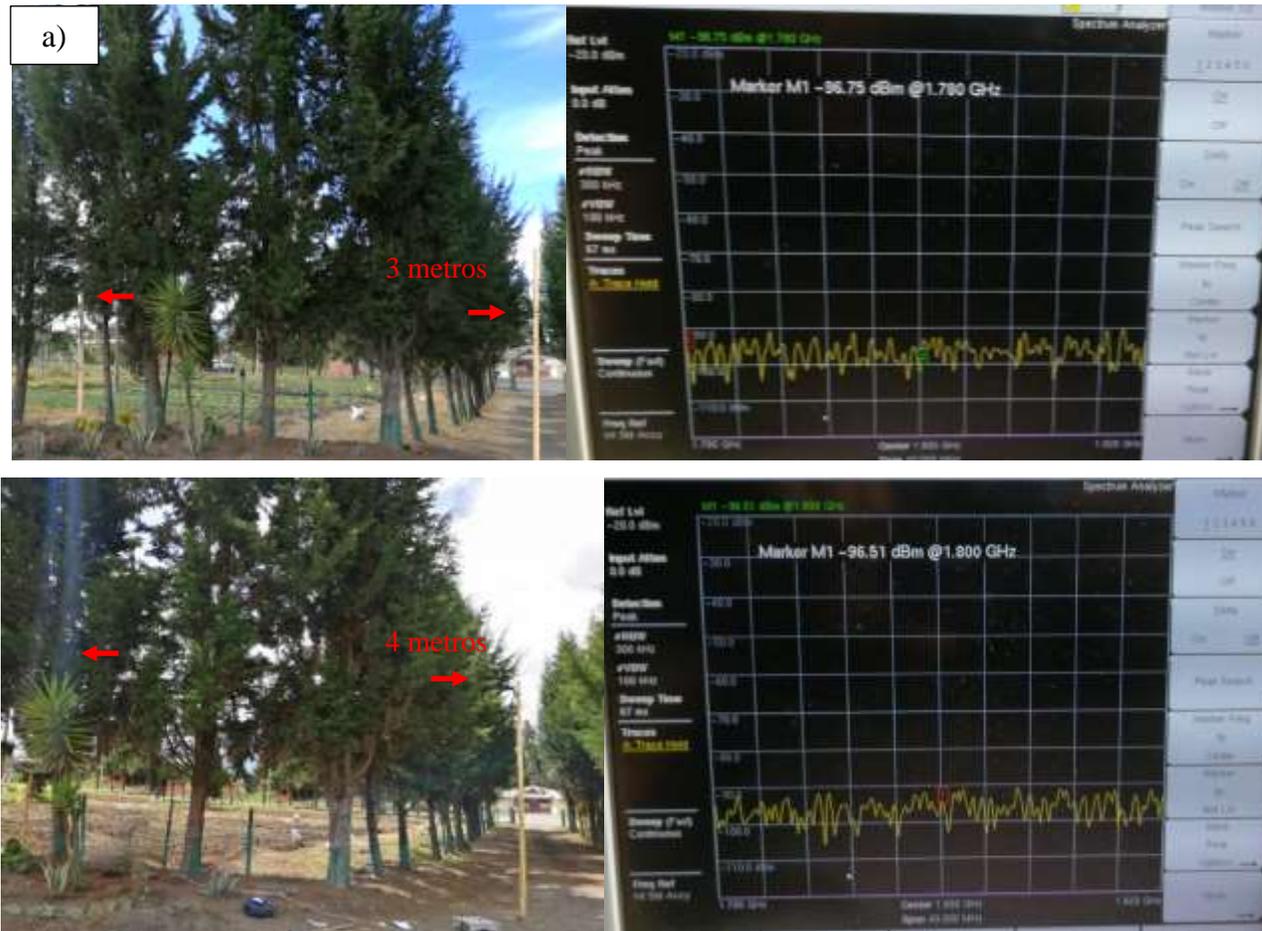


Ilustración 3-51: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el tercer árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Cuarto árbol del bosque de ciprés a 1 y 2 metros.

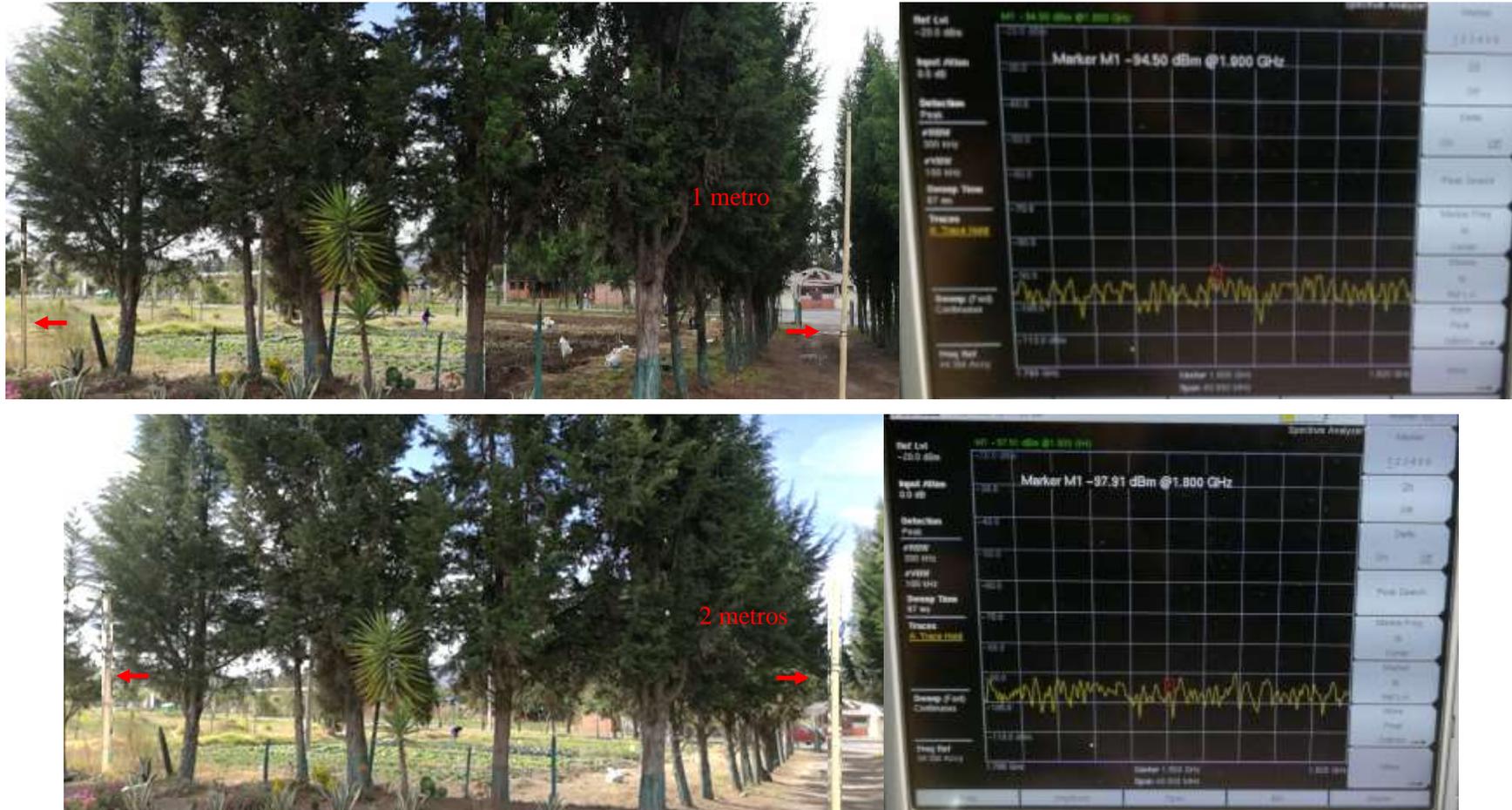


Ilustración 3-52: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 1 metros (b) 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

- Cuarto árbol del bosque de ciprés a 3 y 4 metros.

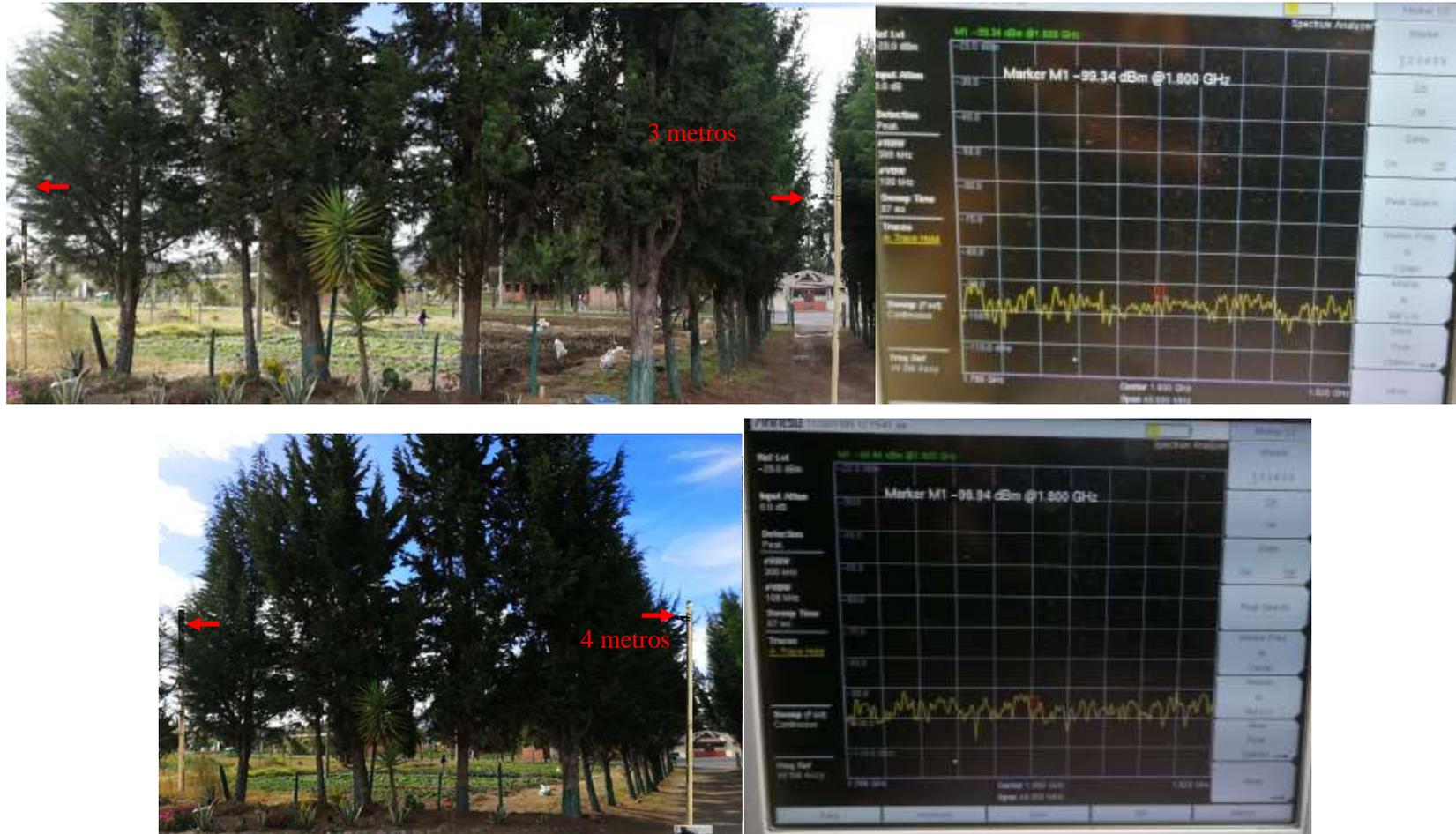


Ilustración 3-53: Medición de la potencia atenuada en el bosque de ciprés para el cuarto árbol a 1.8 GHz con altura de la antena (a) 3 metros (b) 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

3.5.6. Cálculo para las condiciones de la zona de Fresnel

En la Ilustración 3-54, se muestra el diagrama de proceso para el cálculo de las componentes difractadas en la parte superior, difractadas laterales y la componente reflejada en el suelo.

Para el cálculo de la primera zona de Fresnel se ha utilizado la Ecuación 2-5 del capítulo II, para conocer si la obstrucción que causa el árbol se encuentra o no dentro de la primera zona de Fresnel entre el transmisor y receptor. Este cálculo se ha realizado para conocer si existen o no las componentes difractadas superior y laterales del árbol. Un obstáculo que sea mayor al radio de la primera zona de Fresnel indica que no existe ninguna de las componentes difractadas.

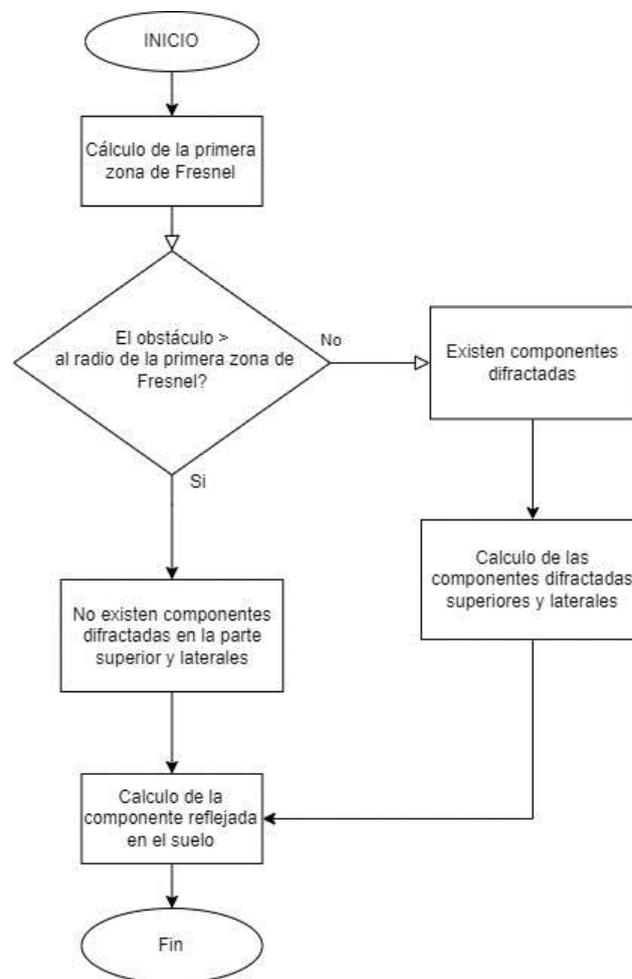


Ilustración 3-54: Diagrama de proceso para el cálculo de las componentes difractadas y reflejadas

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Caso contrario si el obstáculo es menor al radio de la primera zona de Fresnel significa que existen

componentes difractadas en la parte superior del árbol. La Ecuación 3-2 permite hallar las pérdidas por difracción para un obstáculo en forma de cuchilla. Para el caso de las componentes laterales se aplica el obstáculo redondeado considerando el radio del árbol como una obstrucción.

Con la obtención del radio de cada uno de los árboles y bosques considerados para cada una de las áreas delimitadas se ha calculado el radio para la primera zona de Fresnel con la Ecuación 2-5, donde las distancias están en Km y la frecuencia en GHz, teniendo así un radio para la primera zona de Fresnel igual a 0,645m. Con este resultado se ha observado que no existirá las componentes laterales y las difractadas en la parte superior del árbol.

3.5.6.1. Distancia mínima para que cumpla la condición de la primera zona de Fresnel.

Para que se pueda considerar tanto las componentes laterales y superiores difractadas se ha realizado el cálculo de la distancia entre la antena transmisora y receptora.

Despejando d de la Ecuación 2-5 se ha obtenido la Ecuación 3-2:

$$d = \left(\frac{r}{17,32}\right)^2 * 4f$$

Ecuación 3-2: Distancia para la primera zona de Fresnel.

Donde:

d = Km,

f = GHz

r = metros;

A continuación, reemplazando los valores correspondientes se obtuvo una $d = 0,116$ Km, es decir, la separación mínima entre las antenas debió ser 116,16 metros aproximadamente para que exista estas componentes.

3.5.7. Obstáculo único en arista en filo de cuchillo

En este caso extremadamente idealizado como se muestra en la Ilustración 3-55 todos los parámetros geométricos se agrupan en un solo parámetro adimensional, que normalmente se designa por v y que puede tomar distintas formas equivalentes según los parámetros geométricos

elegidos:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}$$

Ecuación 3-3: Perdida por difracción.

donde:

h : altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto. Si la cima queda por debajo de esa línea, h es negativa.

d_1 y d_2 : distancias desde los dos extremos del trayecto a la cima del obstáculo.

λ es la longitud de onda en metros.

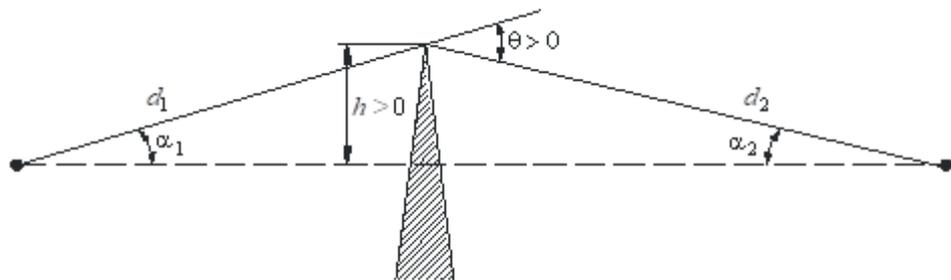


Ilustración 3-55: Geometría de un obstáculo de forma redondeada de radio R .

Fuente: (UIT, 2019).

3.5.8. *Obstáculo único de forma redondeada*

Para el cálculo de la componente difractada lateral en la recomendación ITU-R P.833-10 a través de la vegetación se necesita las pérdidas totales difractas por la parte lateral, lo cual dicha recomendación ha utilizado el método de la de recomendación ITU-R P.526 para obstáculo de forma redondeada.

En la Ilustración 3-56 se indica la geometría de un obstáculo de forma redondeada de radio R . Las distancias d_1 y d_2 y la altura h se encuentran por encima de la línea de base, se miden con respecto al vértice formado por la intersección de la proyección de los rayos sobre el obstáculo.

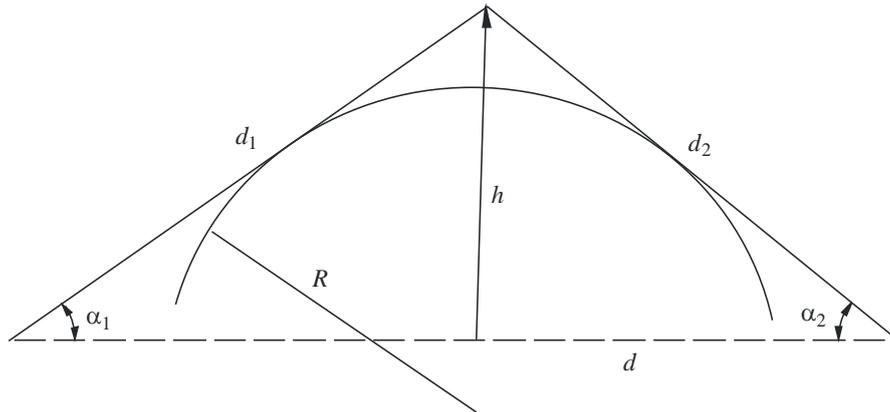


Ilustración 3-56: Geometría de un obstáculo de forma redondeada de radio R.

Fuente: (UIT, 2019)

Para el cálculo de las pérdidas por difracción de esta geometría si ha utilizado la Ecuación 3-4:

$$A = J(v) + T(m, n) \quad dB$$

Ecuación 3-4: Pérdida por difracción.

Donde:

$J(v)$ es la pérdida de Fresnel-Kirchoff debida a una arista en filo de cuchillo equivalente cuya cresta esté en el vértice, la Ecuación 3-3 en unidades prácticas puede ser escrita como en la Ecuación 3-4:

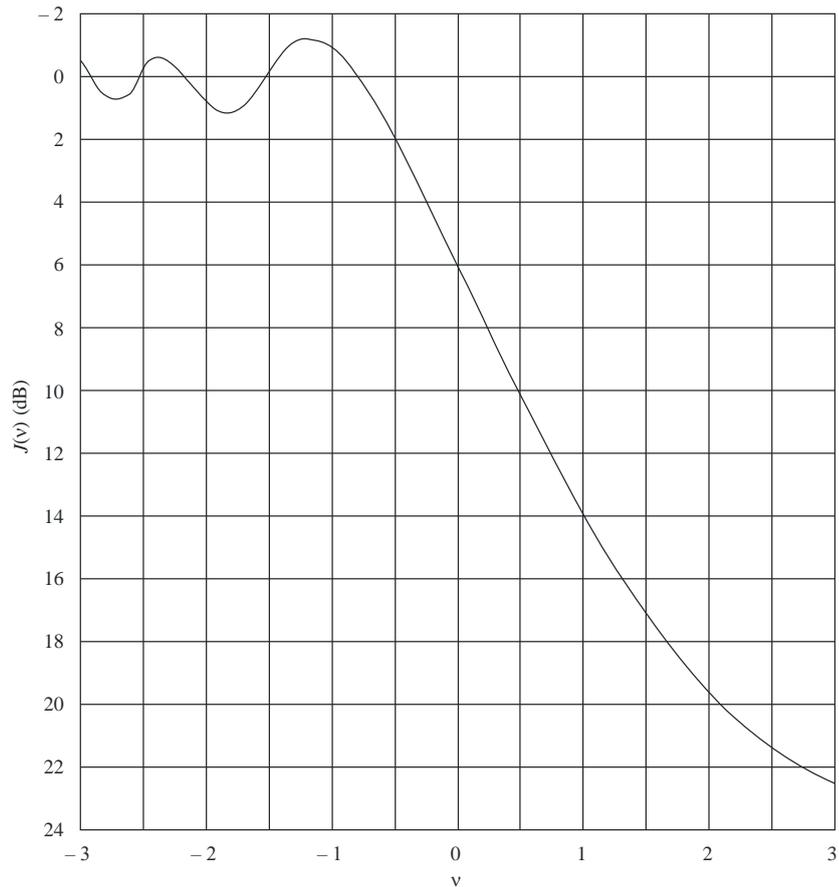
$$v = 0,0316 h \left[\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \right]^{1/2}$$

Ecuación 3-5: Parámetro v adimensional.

donde h y λ se expresan en metros, y d_1 y d_2 , en kilómetros. $J(v)$ puede obtenerse de la Ilustración 3-57 o de la Ecuación 3-6.

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad dB$$

Ecuación 3-6: Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo



P.0526-09

Ilustración 3-57: Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo

Fuente: (UIT, 2019)

$T(m, n)$ es la atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo como se da en la Ecuación 3-7 y Ecuación 3-8:

$$T(m, n) = 7,2m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{para } mn \leq 4$$

Ecuación 3-7: Atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo.

$$T(m, n) = -6 - 20 \log (mn) + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \text{ dB} \quad \text{para } mn > 4$$

Ecuación 3-8: Atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo

Para el cálculo de las componentes m y n se tiene la Ecuación 3-9 y la Ecuación 3-10:

$$m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] / \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3}$$

Ecuación 3-9: Componente m .

$$n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} / R$$

Ecuación 3-10: Componente n .

y R , d_1 , d_2 , h y λ se expresan en metros.

3.5.9. Componente Reflejada en el suelo

Para calcular las pérdidas experimentadas en el receptor por la onda reflejada en el suelo, puede determinarse mediante la Ecuación 3-11.

$$L_{ground} = 20 \log(|1 + \Gamma * e^{-ik\Delta r}|)$$

Ecuación 3-11: Pérdidas por reflexión en el suelo.

Donde:

Γ : coeficiente de reflexión.

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ constante de propagación

$\lambda = \frac{c}{f}$ longitud de onda

$\Delta r = \frac{2h_1 h_2}{d}$ variación entre dos puntos donde h_1 , h_2 y d en metros.

De igual manera el coeficiente de reflexión puede ser determinado mediante la Ecuación 3-12, de la señal reflejada en el suelo con un determinado ángulo incidente.

$$\Gamma = \frac{\eta_2 \cos(\theta_i) - \eta_1 \cos(\theta_t)}{\eta_2 \cos(\theta_i) + \eta_1 \cos(\theta_t)}$$

Ecuación 3-12: Coeficiente de reflexión.

Donde:

θ_i y θ_t son los ángulos incidentes y reflejados.

η_1 y η_2 son las impedancias intrínsecas están representadas de la siguiente manera:

$$\eta_1 = \sqrt{\epsilon_r}$$

$$\eta_2 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Para el cálculo del ángulo reflejado $\theta_t = \theta_2$ se ha utilizado la Ecuación 3-13, en la Ilustración 3-58 se muestra los ángulos para la ley de Snell.

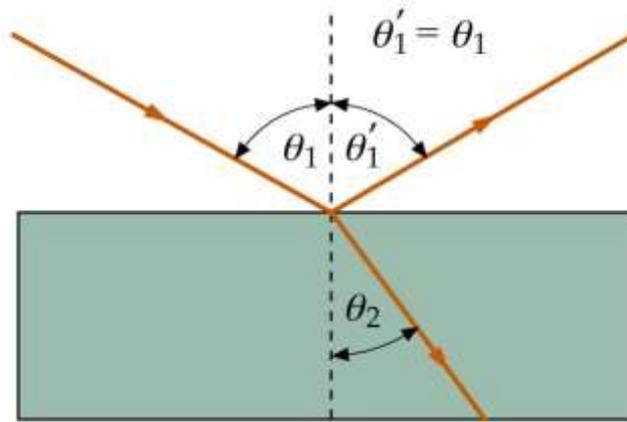


Ilustración 3-58: Ángulos de incidencia y de refracción según la ley de Snell.

Fuente: <https://theory.labster.com/snell-law-es/>

Utilizada para calcular el ángulo de refracción al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación.

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

Ecuación 3-13: Ley de Snell

Entonces:

n_1 y n_2 son los índices de refracción del medio.

$n_1 = 1$ (aire)

$n_2 = \sqrt{\epsilon_r}$ (permitividad del suelo)

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se muestra los resultados obtenidos luego de realizar el procedimiento de obtención de mediciones en donde se ha utilizado el equipo Generador de señales Anritsu MG3692C juntos con la Antena AAronia HyperLOG 30180 como transmisor y el equipo Anritsu MS2724C junto con la Antena Log Periodic WA5VJB en el receptor para luego aplicar las ecuaciones mencionadas de la Recomendación ITU.R P-833.10 tanto para un árbol como para un bosque.

Se ha definido los parámetros tanto en el generador de señales como en el equipo analizador de espectros para observar claramente las potencias recibidas; también se comprobó que los datos obtenidos en las zonas delimitadas para el estudio de investigación dependen mucho de las condiciones climáticas y del suelo en las que se ha realizado las mediciones.

4.1. Resultados de atenuación presentes en un árbol de pino.

En los siguientes resultados se evidencia las mediciones tomadas en la zona de estudio, los resultados de las potencias recibidas para el árbol de pino a una distancia total de 10 metros entre el transmisor y receptor, para cada una de las alturas definidas en relación con las mediciones tomadas en condición de espacio libre y la diferencia entre éstas como se observa en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Diferencia de potencias entre espacio libre y pino.

Alturas	Potencias (dBm)			
	1m	2m	3m	4m
Espacio Libre	-55,34	-60,88	-62,77	-62,51
Pino	-74,27	-79	-91,34	-80,09
Diferencia	18,93	18,68	28,57	17,58

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Se hace mención para que los valores obtenidos de potencia sean los correctos, se ha realizado mediciones respecto al espacio libre y así poder evidenciar la atenuación que existe a través de la vegetación.

Para el cálculo de las pérdidas por reflexión en el suelo ha sido necesario calcular los siguientes parámetros como el ángulo de incidencia θ_i mediante el uso de las funciones trigonométricas realizando una geometría en el árbol como se muestra en la Ilustración 4-1:

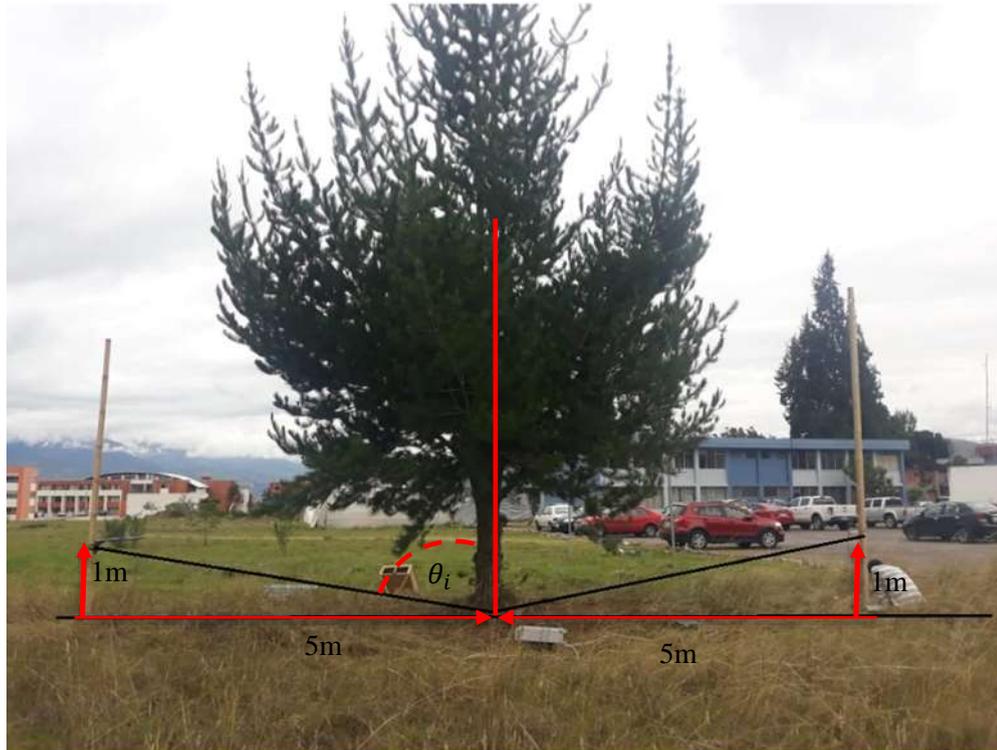


Ilustración 4-1: Geometría de reflexión del árbol de pino a 1 metro.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Una vez realizado la geometría se obtuvo un valor de $\theta = 11,31^\circ$ este valor se ha restado de 90° , ya que se requiere encontrar el ángulo que de acuerdo con la ley de Snell es en relación con el eje de las ordenadas y se obtuvo así un ángulo de incidencia $\theta_i = 78,69^\circ$

Para encontrar el ángulo θ_2 que es el ángulo reflejado, se ha definido los demás valores para la Ecuación 3-13, como son los índices de refracción de los medios de propagación $n_1 = 1$ (aire) y $n_2 = \sqrt{\epsilon_r}$ (permitividad del suelo) respectivamente, para conocer la permitividad del suelo en este caso de suelo húmedo se ha usado la Recomendación ITU-R P.527-3, teniendo un valor de permitividad de 30, aplicando esto a la ecuación mencionada se obtuvo un $\theta_r = 10,31^\circ$.

Para hallar el coeficiente de reflexión se ha utilizado los valores de impedancia intrínsecas que son $\eta_1 = \sqrt{30}$ y $\eta_2 = \frac{120\pi}{\sqrt{30}}$, al aplicarlos a la Ecuación 3-12, se obtuvo un valor de coeficiente

de reflexión $\Gamma = -0,93$.

Finalmente, para calcular las pérdidas causadas por la reflexión en el suelo se ha encontrado los demás coeficientes de la Ecuación 3-11 como son los siguientes:

- $\Delta r = 0,2 \text{ m}$ y $k = 37,7$ para el caso de 1 metro y una frecuencia de 1,8 GHz.

Reemplazando estos valores encontrados en la Ecuación 3-11, se ha obtenido las pérdidas por reflexión $L_{ground} = 1,11 \text{ dB}$, este valor se ha restado de la diferencia encontrada en la Tabla 4-1 a dicha altura dando un valor de pérdidas por absorción de 17,82 dB. Para encontrar el valor final de atenuación por metro se ha dividido por el ancho de la obstrucción del árbol que fué de 0,58 metros por lo que se obtuvo 30,72 dB/m.

Como se puede observar la obstrucción provocada solamente fué del tronco del árbol mas no por la vegetación, por lo que se ha realizado el cálculo de las componentes difractadas en las laterales del tronco y se ha utilizado Ecuación 3-5 dando como resultado un valor de $\nu = 0,68$ y posteriormente se ha calculado la componente m y n con las Ecuaciones 3-9 y 3-10. Finalmente, para el cálculo de un obstáculo de forma redondeada con la Ecuación 3-4 se obtuvo un valor de 16,173 dB.

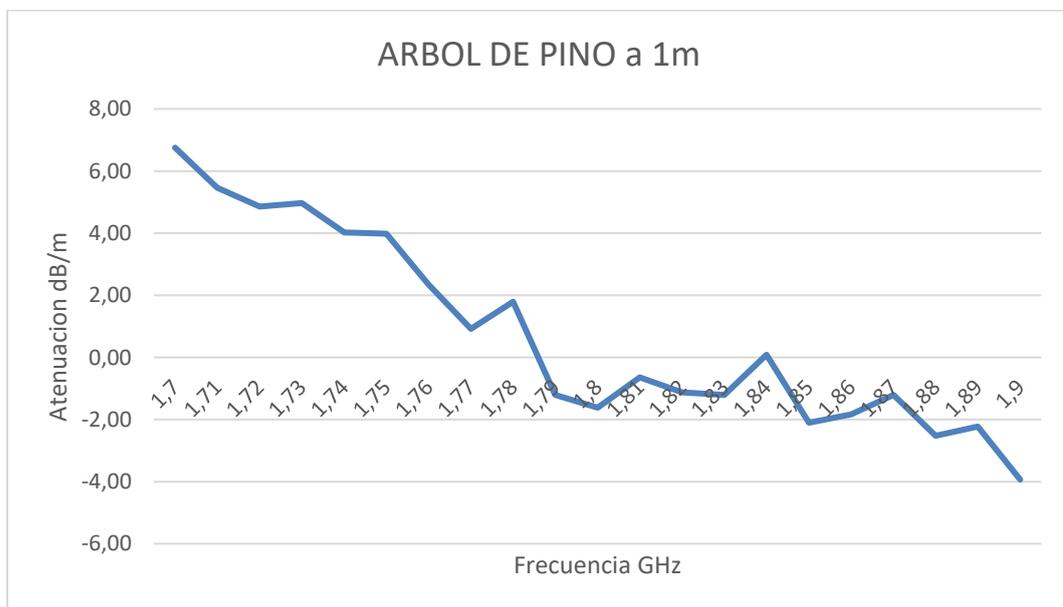


Ilustración 4-2: Resultados obtenidos en el árbol de pino a la altura de 1 metro.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-2, referente al árbol de pino a 1 metro, se ha analizado de forma individual para el tronco del árbol y se obtuvo los resultados de la atenuación con respecto a la frecuencia, la cual representa los valores de atenuación calculados a través del tronco restando las pérdidas por absorción y las pérdidas laterales de éste, dando un valor de atenuación de -1,62 dB/m para la frecuencia de 1,8 GHz, como se ha mencionado anteriormente el caso de estudio se lo realizó para frecuencias de 1,7 GHz hasta 1,9 GHz con el objetivo de visualizar el comportamiento de la atenuación existente. Se puede observar que en la frecuencia inicial tiene un valor de 6,75 dB/m hasta la frecuencia final de 1,9 GHz que es de -3,93 dB/m, donde se obtuvo una desviación estándar de 3,13 para cada frecuencia; todos estos valores se encuentran cercanos a cero por lo que se ha considerado que estas atenuaciones fueron provocadas por el tronco y mas no por la contribución del suelo o la vegetación.

El mismo procedimiento se lo ha realizado para la altura de 2 metros para calcular el ángulo incidente θ_i , realizando una geometría en el árbol como se muestra en la Ilustración 4-3:

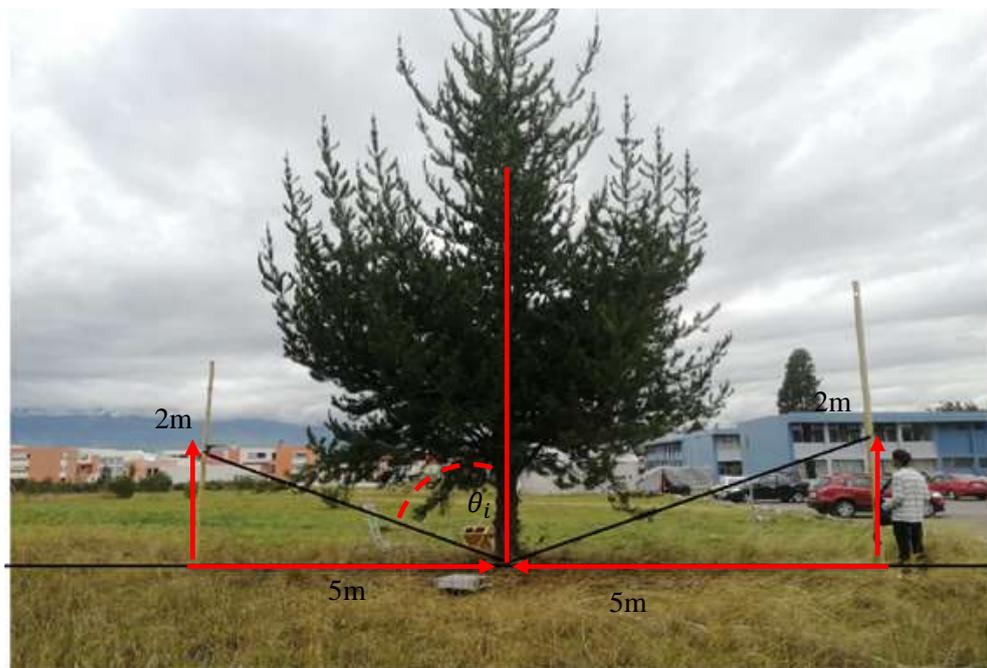


Ilustración 4-3: Geometría de reflexión del árbol de pino a 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Una vez realizado la geometría se obtuvo un valor de $\theta = 21,8^\circ$ este valor se ha restado de 90° , ya que se requiere encontrar el ángulo que de acuerdo con la ley de Snell es en relación con el eje de las ordenadas y se obtuvo así el ángulo de incidencia $\theta_i = 68,2^\circ$.

Para encontrar el ángulo θ_2 que es el ángulo reflejado se han definido los demás valores antes mencionados y que son presentados en la Ecuación 3-13, aplicando los valores encontrados a dicha ecuación se tiene $\theta_r = 9,76^\circ$. Para hallar el coeficiente de reflexión se ha usado la Ecuación 3-12, se obtuvo un valor de coeficiente de reflexión de $\Gamma = -0,87$.

Finalmente, para calcular las pérdidas causadas por la reflexión en el suelo se ha encontrado los demás coeficientes de la ecuación 3-11 como son los siguientes:

- $\Delta r = 0,8 \text{ m}$ y $k = 37,7$ para el caso de 2 metros y una frecuencia de 1,8 GHz.

Reemplazando estos valores encontrados en la Ecuación 3-11, se obtuvo las pérdidas por reflexión $L_{ground} = 0,87 \text{ dB}$, este valor se ha restado de la diferencia encontrada en la Tabla 4-1 a dicha altura dando un valor de pérdidas por absorción de 17,25 dB. Para encontrar el valor final de atenuación por metro se ha dividido por el ancho de la obstrucción del árbol que fué de 4,5 m por lo que se obtuvo 3,83 dB/m.

Para los casos de las alturas a 3m y 4m como se puede observar en la Ilustración 4-4 y en la Ilustración 4-5, no se tuvo onda reflejada ya que existe una obstrucción por la vegetación desde el transmisor a la distancia media e igual ocurre desde el receptor al punto medio entre estos dos.



Ilustración 4-4: Geometría de reflexión del árbol de pino a 3 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Para encontrar el valor de atenuación por metro de igual manera se obtuvo de la resta de potencia en el espacio libre respecto al árbol de pino a la altura de 3 metros, posteriormente se lo ha dividido por la distancia de obstrucción que fue de 5,2 metros y se obtuvo un valor de 4,39 dB/m.

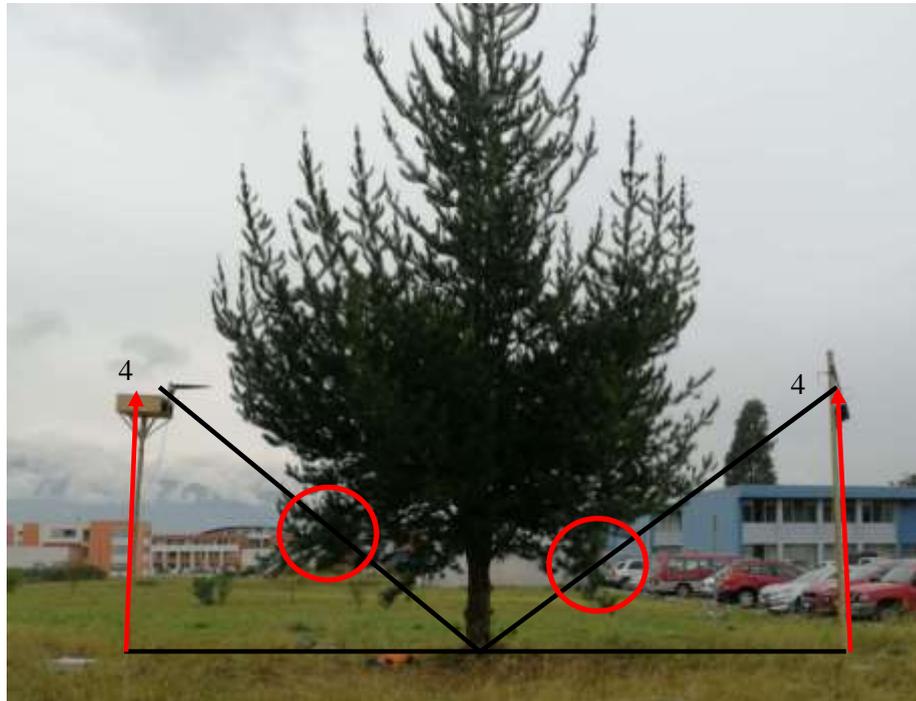


Ilustración 4-5: Geometría de reflexión del árbol de pino a 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Finalmente, para la altura de 4 metros se ha dividido para el ancho del obstáculo de 4,9 metros dando como resultado la atenuación por metro de 3,53 dB/m respectivamente.

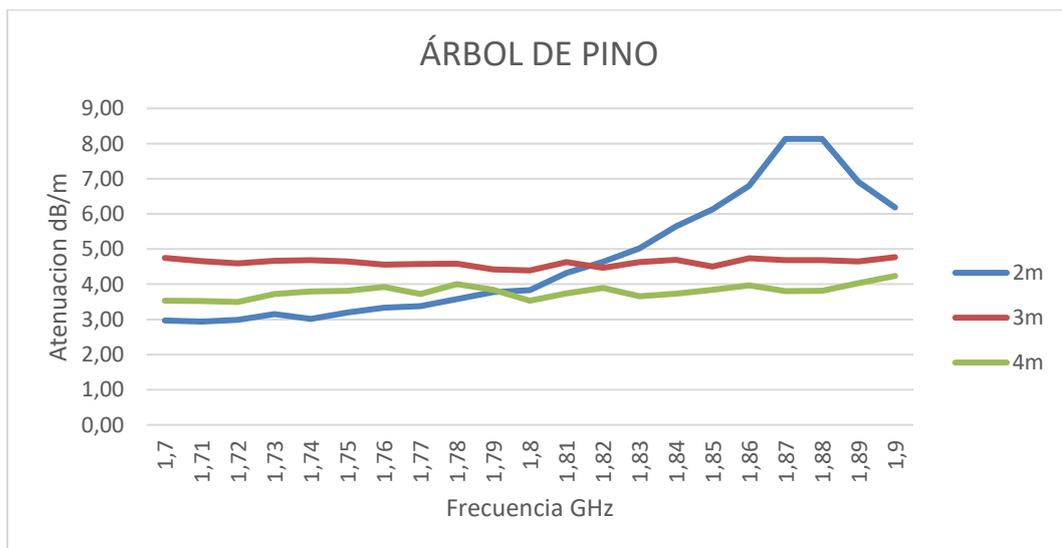


Ilustración 4-6: Resultados obtenidos en el árbol de pino a la altura de 2, 3 y 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-6, se muestran los resultados obtenidos de la atenuación con respecto a la frecuencia para un árbol de pino; el color azul representa los valores calculados de atenuación a través de la vegetación a 2 metros, color rojo a 3 metros y de color verde a 4 metros de altura respectivamente. Para el caso de estudio se ha realizado varias mediciones en un rango de frecuencias de 1,7 GHz hasta 1,9 GHz con el objetivo de visualizar el comportamiento de la atenuación que existe en esa banda de frecuencias. Se puede observar que, para las alturas de 2, 3 y 4 metros se obtiene un rango de atenuación de 3 a 4,75 dB/m.

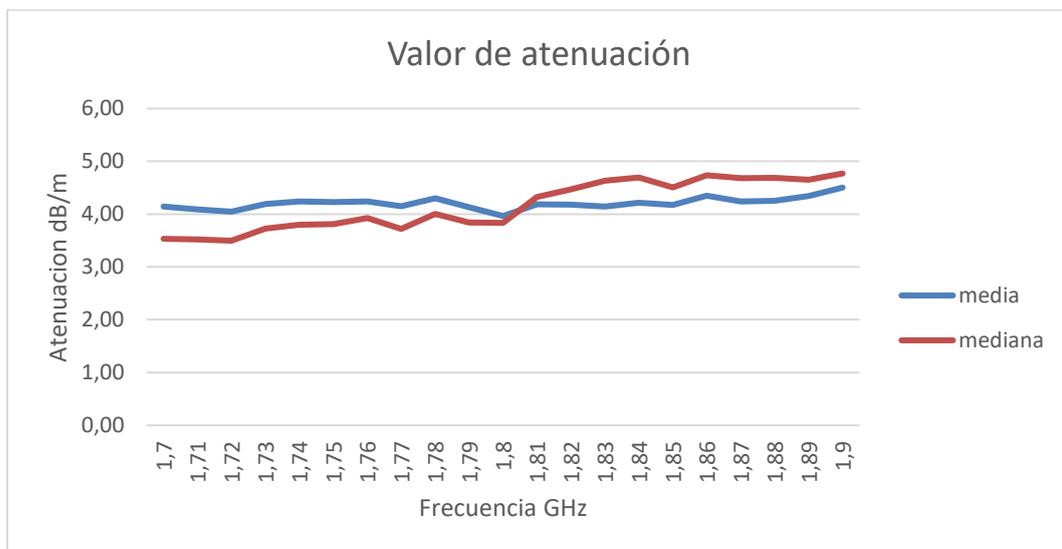


Ilustración 4-7: Medidas de tendencia central para el árbol de pino.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-7, se observan los valores de la media con color azul y la mediana color rojo, obtenidos de la Ilustración 4-6, teniendo así una desviación estándar de 0,11 y 0,47 respectivamente. Una vez que se ha realizado el análisis se puede observar que el valor de la media tiene una desviación estándar menor, por lo que se obtuvo un valor promedio de atenuación para el rango de frecuencias de 1.7 GHz a 1.9 GHz que ha sido de 4,21 dB/m, y para la frecuencia de 1,8 GHz se obtuvo un valor de atenuación de 3,96 dB/m.

4.2. Resultados de atenuación presentes en un árbol de eucalipto.

En la Tabla 4-2, para cada una de las alturas definidas se observa las potencias obtenidas en condición de espacio libre y la vegetación del eucalipto. Finalmente se ha obtenido la diferencia entre estas dos, se ha analizado la atenuación que existe y posterior a ello los cálculos.

Tabla 4-2: Diferencia de potencias entre espacio libre y eucalipto.

Alturas	Potencias (dBm)			
	1m	2m	3m	4m
Espacio Libre	-55,34	-60,88	-62,77	-62,51
Eucalipto	-57,73	-63,57	-69,08	-74,85
Diferencia	2,39	2,69	6,57	12,08

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Para el cálculo de las pérdidas por reflexión en el suelo en el apartado 4.1 se ha mencionado la explicación para los cálculos de cada uno de los parámetros que se ha utilizado.



Ilustración 4-8: Geometría de reflexión del árbol de eucalipto a 1 metro.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Mediante el uso de las funciones trigonométricas realizamos una geometría en el árbol de eucalipto para 1 metro y 2 metros como se muestra en la Ilustración 4-8 y la Ilustración 4-9:



Ilustración 4-9: Geometría de reflexión del árbol de eucalipto a 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Obteniendo de igual manera un ángulo de incidencia y reflejado $\theta_i = 78,69^\circ$ y $\theta_r = 10,31^\circ$ para 1 metro y $\theta_i = 68,20^\circ$ y $\theta_r = 9,76^\circ$ para 2 metros; posteriormente con la Ecuación 3-12, se obtuvo el valor de coeficiente de reflexión $\Gamma = -0,93$ para 1 metro y $\Gamma = -0,87$ para 2 metros. Para calcular las pérdidas causadas por la reflexión es necesario calcular sus coeficientes como son $\Delta r = 0,2m$ para 1 metros y $\Delta r = 0,8m$ para 2 metros con un valor de $k = 37,7$ para ambos casos.

Finalmente, se ha reemplazado estos valores en la Ecuación 3-11, se ha obtenido las pérdidas por reflexión para 1 y 2 metros de 1,11 dB y 0,87 respectivamente, este valor se ha restado de la diferencia encontrada en la Tabla 4-2 a dicha altura dando un valor de pérdidas por absorción de 1,28 dB y 1,82 dB. Para encontrar el valor final de atenuación por metro se divide por la distancia de obstrucción del árbol a 1 metro y 2 metros de altura en este caso para el tronco que se obtuvo un diámetro de 0,40 para ambas alturas; obteniendo así unas pérdidas de absorción 3,2 dB/m y de 4,55 dB/m respectivamente.

Como se puede observar la obstrucción provocada fue solamente del tronco del árbol mas no por

la vegetación, por lo que se ha realizado el cálculo de las componentes difractadas en las laterales del tronco y se ha utilizado la Ecuación 3-5, dando como resultado un valor de $\nu = 0,48$ y posteriormente se calcula la componente m y n con las Ecuaciones 3-9 y 3-10. Finalmente, para el cálculo de un obstáculo de forma redondeada con la Ecuación 3-4 se obtuvo un valor de 13,416 dB.

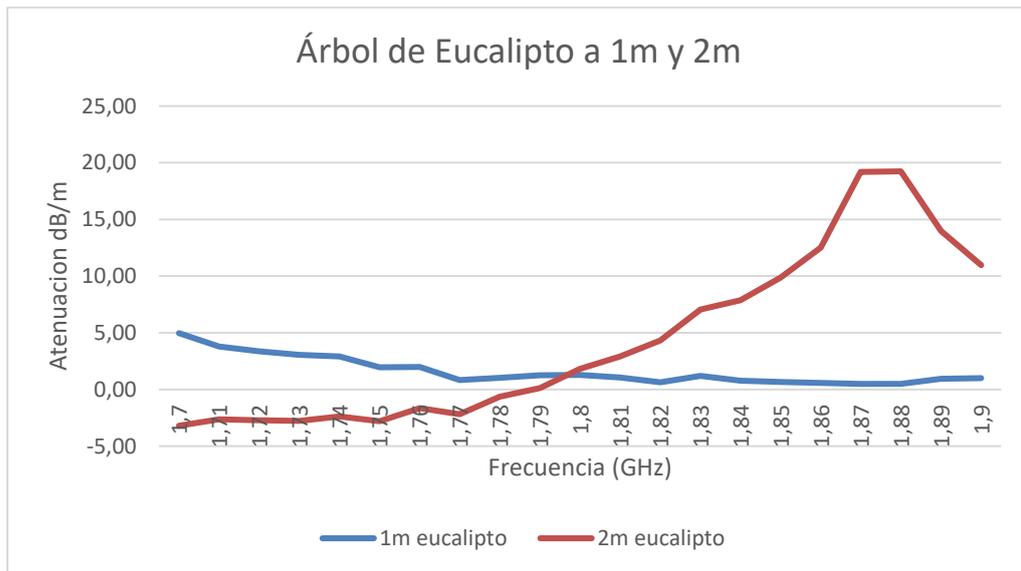


Ilustración 4-10: Resultados obtenidos en el árbol de eucalipto a 1 y 2 metros de altura.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-10, referente al árbol de eucalipto, se obtuvo los resultados de la atenuación con respecto a la frecuencia, el color azul representa los valores de atenuación a 1 metro; mientras que el color rojo representa los valores de atenuación a 2 metros que han sido calculados a través del tronco, la cual se ha restado las pérdidas por absorción y las pérdidas laterales de este, dando un valor de atenuación de 1,28 y 1,82 dB/m para la frecuencia de 1,8 GHz, como se mencionó anteriormente el caso de estudio se ha realizado para frecuencias de 1,7 GHz hasta 1,9 GHz con el objetivo de visualizar el comportamiento de la atenuación que existe en este caso la atenuación simplemente ha sido provocada por la obstrucción del tronco y mas no por otras componentes.

El mismo procedimiento del apartado 4.1 se lo ha realizó para la altura de 3 metros para calcular el ángulo incidente θ_i , realizando una geometría en el árbol como se muestra en la Ilustración 4-11:

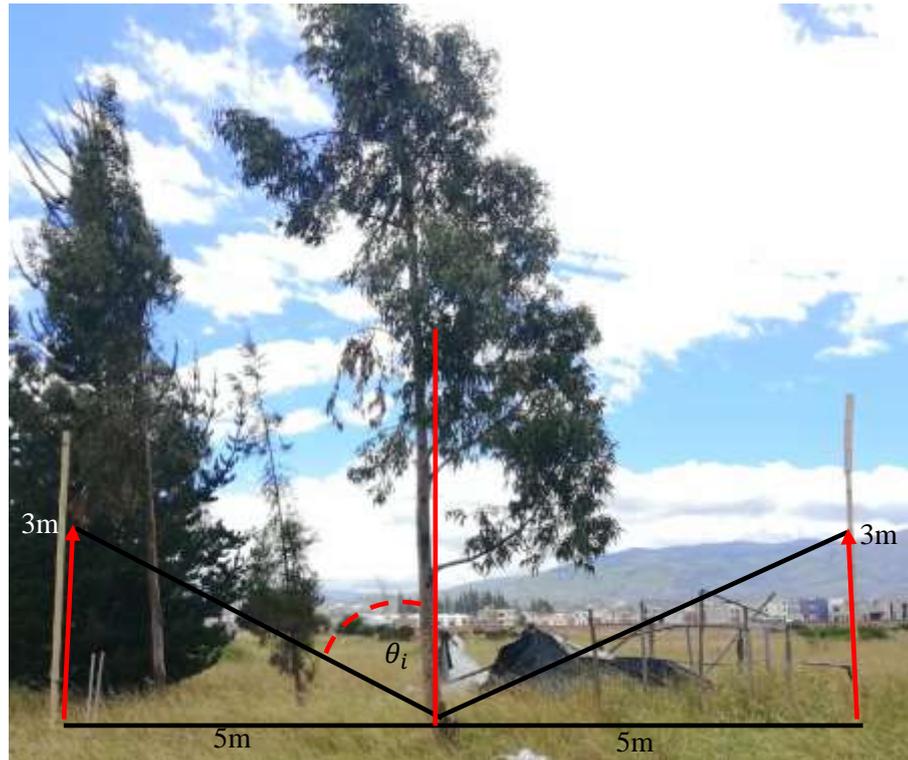


Ilustración 4-11: Geometría de reflexión del árbol de eucalipto a 3 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Una vez realizado la geometría se obtuvo un valor de $\theta = 30,96^\circ$ este valor se ha restado de 90° , ya que se requiere encontrar el ángulo que de acuerdo con la ley de Snell es en relación con el eje de las ordenadas y se obtuvo así un ángulo de incidencia $\theta_i = 59,04^\circ$.

Para encontrar el ángulo θ_2 que es el ángulo reflejado se han definido los demás valores antes mencionados y que son presentados en la Ecuación 3-13, aplicando los valores encontrados a dicha ecuación se tiene $\theta_r = 9,01^\circ$. Para hallar el coeficiente de reflexión se ha usado la Ecuación 3-12, se obtuvo un valor de coeficiente de reflexión de $\Gamma = -0,83$.

Finalmente, para calcular las pérdidas causadas por la reflexión en el suelo se ha encontrado los demás coeficientes de la ecuación 3-11 como son los siguientes:

- $\Delta r = 1,8 \text{ m}$ y $k = 37,7$ para el caso de 3 metros y para una frecuencia de 1,8 GHz.

Reemplazando estos valores encontrados en la Ecuación 3-11, se ha obtenido las pérdidas por reflexión $L_{ground} = 0,69 \text{ dB}$, este valor se restó de la diferencia encontrada en la Tabla 4-2 a dicha altura dando un valor de pérdidas por absorción de 5,88 dB. Para encontrar el valor final de

atenuación por metro se ha dividido por el ancho de la obstrucción del árbol que fué de 2,5 m por lo que se obtuvo 2,35 dB/m.



Ilustración 4-12: Geometría de reflexión del árbol de eucalipto a 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Para la altura de 4 metros también existió reflexión en el suelo, luego de haber realizado la geometría mostrada en la Ilustración 4-12 se obtuvo un valor de $\theta = 38,66^\circ$ este valor se ha restado de 90° y se obtuvo así un ángulo de incidencia $\theta_i = 51,34^\circ$.

Para encontrar el ángulo θ_2 que es el ángulo reflejado mostrado en la Ecuación 3-13, se tiene $\theta_r = 8,2^\circ$. Para hallar el coeficiente de reflexión se ha usado la Ecuación 3-12, se obtuvo un valor de coeficiente de reflexión de $\Gamma = -0,79$.

Finalmente, para calcular las pérdidas causadas por la reflexión en el suelo se ha encontrado los demás coeficientes de la ecuación 3-11 como son los siguientes:

- $\Delta r = 3,2 \text{ m}$ y $k = 37,7$ para el caso de 4 metros y una frecuencia de 1,8 GHz.

Reemplazando estos valores encontrados en la Ecuación 3-11, se ha obtenido las pérdidas por

reflexión $L_{ground} = 0,57 \text{ dB}$, este valor se restó de la diferencia encontrada en la Tabla 4-2 a dicha altura dando un valor de pérdidas por absorción de 11,51 dB. Para encontrar el valor final de atenuación por metro se ha dividido por el ancho de la obstrucción del árbol que fué de 3,4 m por lo que se obtuvo 3,39 dB/m.

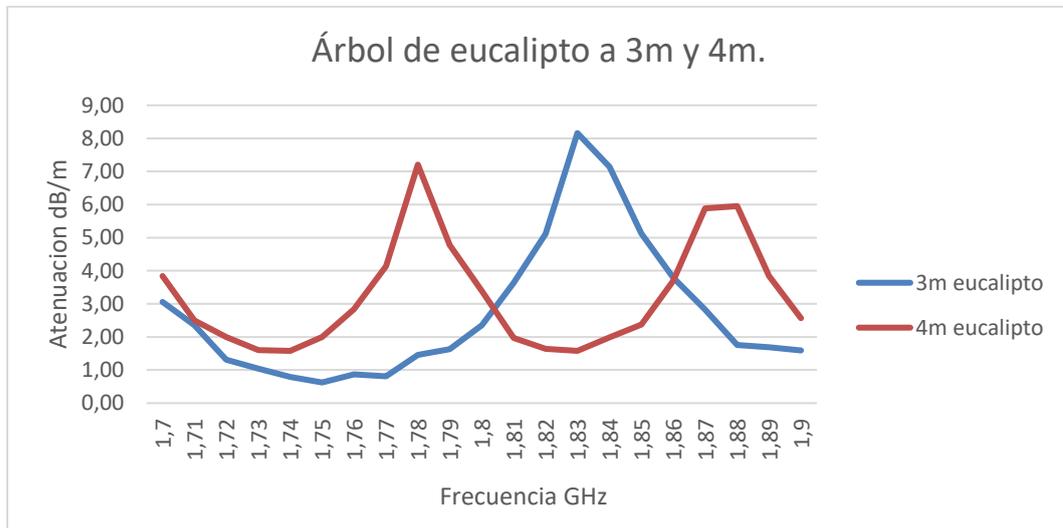


Ilustración 4-13: Resultados obtenidos en el árbol de eucalipto a 3 y 4 metros de altura

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-13, se muestran los resultados obtenidos de la atenuación con respecto a la frecuencia para un árbol de eucalipto; el color azul representa los valores calculados de atenuación a través de la vegetación a 3 metros y de color rojo a 4 metros de altura. Para el rango de frecuencias de 1,7 GHz hasta 1,9 GHz se puede observar que a las alturas de 3 y 4 metros se obtuvo un rango de atenuación entre 3,06 a 3,84 dB/m para la frecuencia inicial.

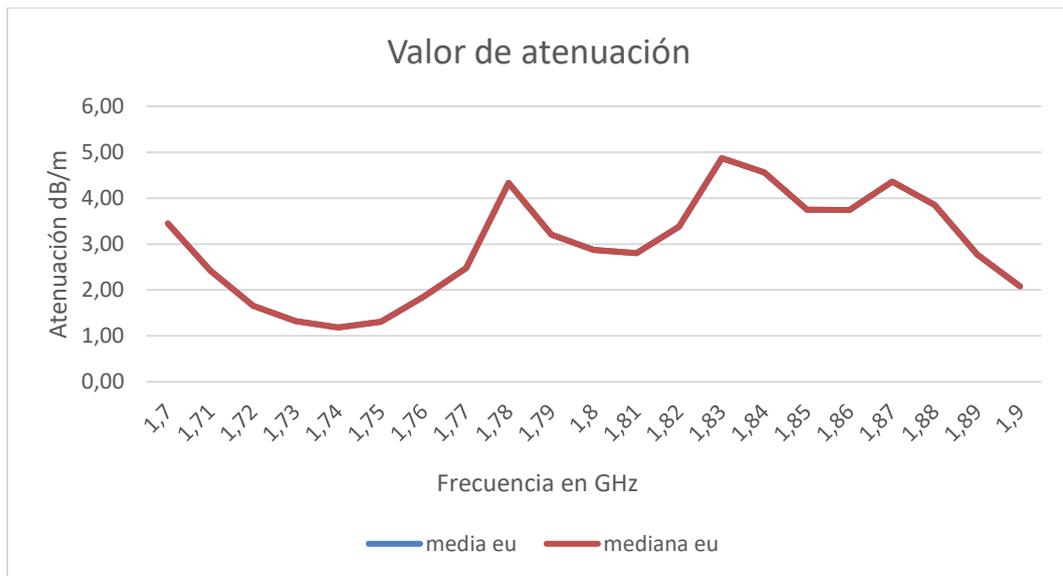


Ilustración 4-14: Medidas de tendencia central para el árbol de eucalipto.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-14, se observan los valores de la media con color azul y la mediana color rojo han sido exactamente igual, estos valores se han calculado para saber el valor exacto de atenuación provocada por la vegetación del eucalipto obtenidos de la Ilustración 4-13, teniendo así una desviación estándar de 0,13 respectivamente. Una vez realizado el análisis entre la media y la mediana se pudo observar que estos valores han sido exactamente iguales al haber analizado para 3 y 4 metros de altura, por lo que se obtuvo un valor promedio de atenuación para el rango de frecuencias de 1.7 GHz a 1.9 GHz que ha sido de 2,96 dB/m y para la frecuencia de 1,8 GHz se obtuvo un valor de atenuación de 2,87 dB/m.

4.3. Resultados de atenuación presentes en un árbol de ciprés.

En los siguientes resultados se ha evidenciado las mediciones tomadas en la zona de estudio, los resultados de las potencias recibidas para el árbol de ciprés a una distancia total de 10 metros entre el transmisor y receptor, para cada una de las alturas definidas en relación con las mediciones tomadas en condición de espacio libre y la diferencia entre éstas como se observa en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Diferencia de potencias entre espacio libre y ciprés.

Alturas	Potencias (dBm)			
	1m	2m	3m	4m
Espacio Libre	-55,34	-60,88	-62,77	-62,51
Ciprés	-72,46	-73,21	-82,25	-82,73
Diferencia	17,12	12,33	19,74	19,96

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Se hace mención para que los valores obtenidos de potencia sean los correctos, se ha realizado mediciones respecto al espacio libre y así poder evidenciar la atenuación que existe a través de la vegetación.

Para el cálculo de las pérdidas por reflexión en el suelo en el apartado 4.1 se ha mencionado la explicación para los cálculos de cada uno de los parámetros que se ha utilizado, mediante el uso de las funciones trigonométricas realizando una geometría en el árbol de ciprés para 1 metro como se muestra en la Ilustración 4-15:



Ilustración 4-15: Geometría de reflexión del árbol de ciprés a 1 metro.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Obteniendo de igual manera un ángulo de incidencia y reflejado $\theta_i = 78,69^\circ$ y $\theta_r = 10,31^\circ$ para 1 metro; posteriormente con la Ecuación 3-12, se obtuvo el valor de coeficiente de reflexión $\Gamma = -0,93$. Para calcular las pérdidas causadas por la reflexión es necesario calcular sus coeficientes

como son $\Delta r = 0,2m$ con un valor de $k = 37,7$.

Finalmente, se ha reemplazado estos valores en la Ecuación 3-11, se ha obtenido las pérdidas por reflexión de 1,11 dB, este valor se ha restado de la diferencia encontrada en la Tabla 4-3 a dicha altura dando un valor de pérdidas por absorción de 16,01 dB. Para encontrar el valor final de atenuación por metro se divide por la distancia de obstrucción del árbol a 1 metro altura en este caso para el tronco que se obtuvo un diámetro de 0,50; obteniendo así unas pérdidas de absorción de 32,02 dB/m.

Como se pudo observar la obstrucción provocada fue solamente del tronco del árbol mas no de la vegetación, por lo que se ha realizado el cálculo de las componentes difractadas en las laterales del tronco y se ha hecho uso de la Ecuación 3-5, dando como resultado un valor de $\nu = 0,68$ y posterior a ello se calculó la componente m y n con las Ecuaciones 3-9 y 3-10. Finalmente, para el cálculo de un obstáculo de forma redondeada se aplicó la Ecuación 3-4 y se obtuvo un valor de 16,173 dB.

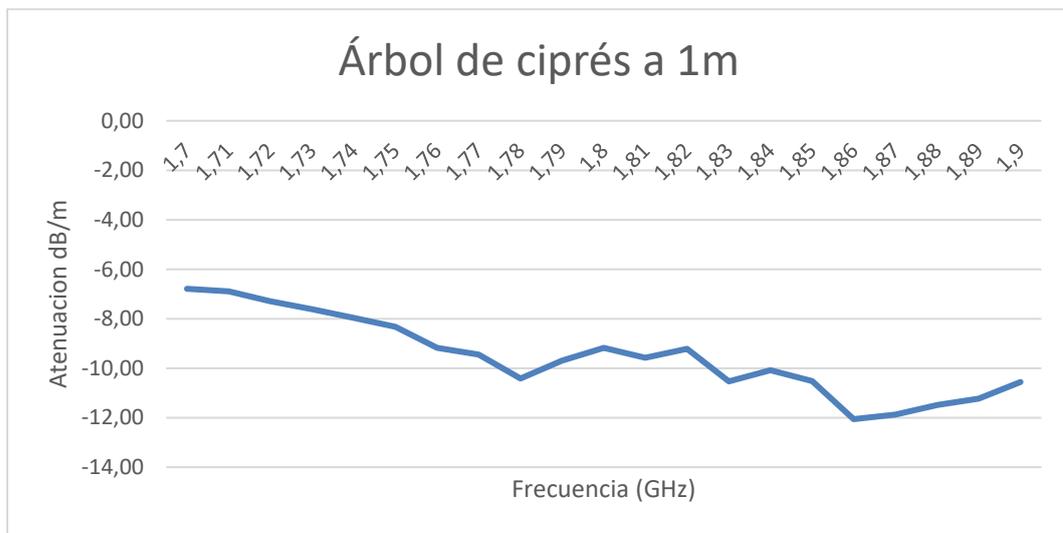


Ilustración 4-16: Resultados obtenidos en el árbol de ciprés a una altura 1 metro.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023.

En la Ilustración 4-16, referente al árbol de ciprés a 1 metro, se obtuvo los resultados de la atenuación con respecto a la frecuencia, se representa los valores de atenuación calculados a través del tronco la cual se ha restado las perdidas por absorción y las perdidas laterales de este, dando un valor de atenuación de -9,18 dB/m para la frecuencia de 1,8 GHz, despreciando así dichas perdidas que han sido provocadas únicamente por el tronco del árbol.

El mismo procedimiento se lo ha realizado para la altura de 2 metros para calcular el ángulo incidente θ_i , realizando una geometría en el árbol como se muestra en la Ilustración 4-17:

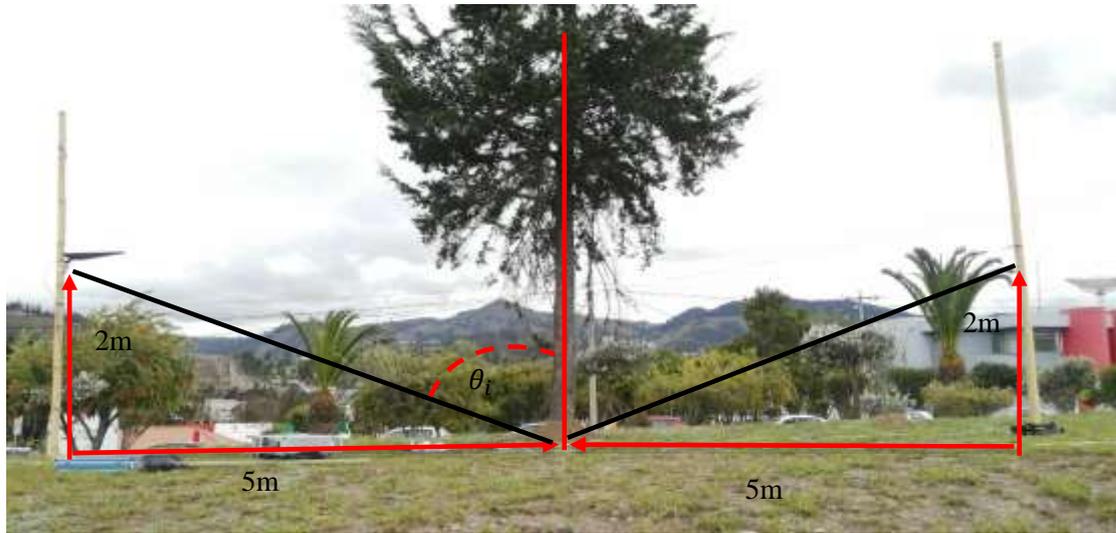


Ilustración 4-17: Geometría de reflexión del árbol de ciprés a 2 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Una vez que se ha realizado la geometría y calculando los ángulos se obtuvo así un ángulo de incidencia $\theta_i = 68,2^\circ$ y un ángulo reflejado $\theta_r = 9,76^\circ$. Para hallar el coeficiente de reflexión se ha usado la Ecuación 3-12, se obtuvo un valor de coeficiente de reflexión de $\Gamma = -0,87$.

Finalmente, para calcular las pérdidas causadas por la reflexión en el suelo con los demás coeficientes que se han encontrado en el apartado 4.1 para la altura de 2 metros, de la Ecuación 3-11, se ha obtenido las pérdidas por reflexión $L_{ground} = 0,87 \text{ dB}$, este valor se ha restado de la diferencia encontrada en la Tabla 4-3 a dicha altura dando un valor de pérdidas por absorción de 11,46 dB. Para encontrar el valor final de atenuación por metro se ha dividido por el ancho de la obstrucción del árbol que fué de 3 m por lo que se obtuvo 3,82 dB/m.

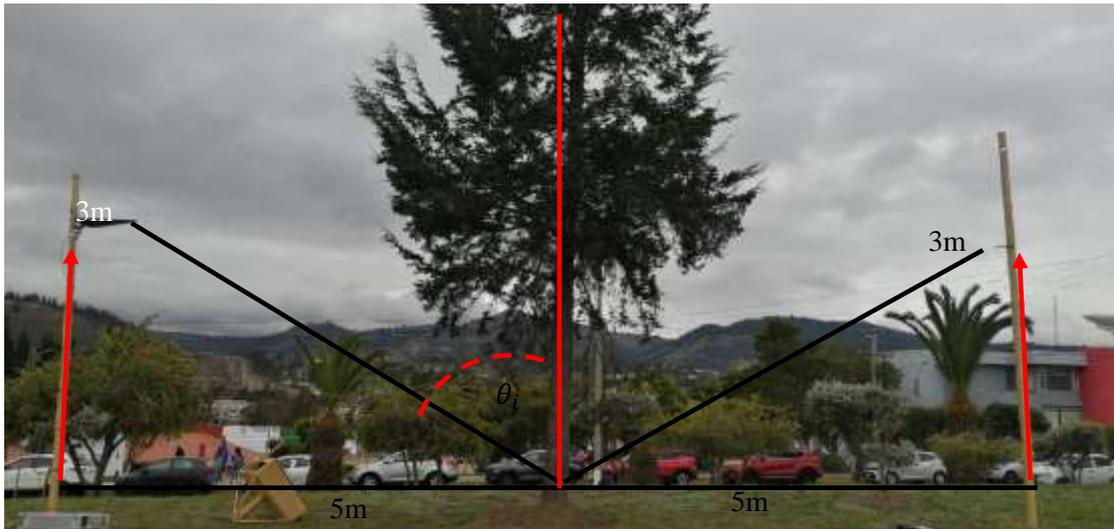


Ilustración 4-18: Geometría de reflexión del árbol de ciprés a 3 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

De igual manera los mismos datos calculados para 3 metros como se muestra en la Ilustración 4-18, explicados en el apartado 4.2 se obtuvo un ángulo de incidencia $\theta_i = 68,2^\circ$ y un ángulo reflejado $\theta_r = 9,76^\circ$. Para hallar el coeficiente de reflexión se ha usado la Ecuación 3-12, se obtuvo un valor de coeficiente de reflexión de $\Gamma = -0,83$. Para calcular las pérdidas causadas por la reflexión en el suelo con los demás coeficientes calculados en el apartado 4.2 de la Ecuación 3-11, se ha obtenido las pérdidas por reflexión $L_{ground} = 0,69 \text{ dB}$, este valor se ha restado de la diferencia encontrada en la Tabla 4-3 a dicha altura dando un valor de pérdidas por absorción de $19,05 \text{ dB}$. Para encontrar el valor final de atenuación por metro se ha dividido por el ancho de la obstrucción del árbol que fué de 4 m por lo que se obtuvo $4,76 \text{ dB/m}$.



Ilustración 4-19: Geometría de reflexión del árbol de ciprés a 4 metros.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Finalmente, los mismos datos cálculos para 4 metros como se muestra en la Ilustración 4-19, explicados en el apartado 4.2 se obtuvo un ángulo de incidencia $\theta_i = 51,34^\circ$ y un ángulo reflejado $\theta_r = 8,2^\circ$. Para hallar el coeficiente de reflexión se ha usado la Ecuación 3-12, se obtuvo un valor de coeficiente de reflexión de $\Gamma = -0,79$. Para calcular las pérdidas causadas por la reflexión en el suelo con los demás coeficientes calculados en el apartado 4.2 para 4 metros de la Ecuación 3-11, se ha obtenido las pérdidas por reflexión $L_{ground} = 0,57 \text{ dB}$, este valor se ha restado de la diferencia encontrada en la Tabla 4-3 a dicha altura dando un valor de pérdidas por absorción de 19,39 dB. Para encontrar el valor final de atenuación por metro se ha dividido por el ancho de la obstrucción del árbol que fué de 4 m por lo que se obtuvo 4,85 dB/m.

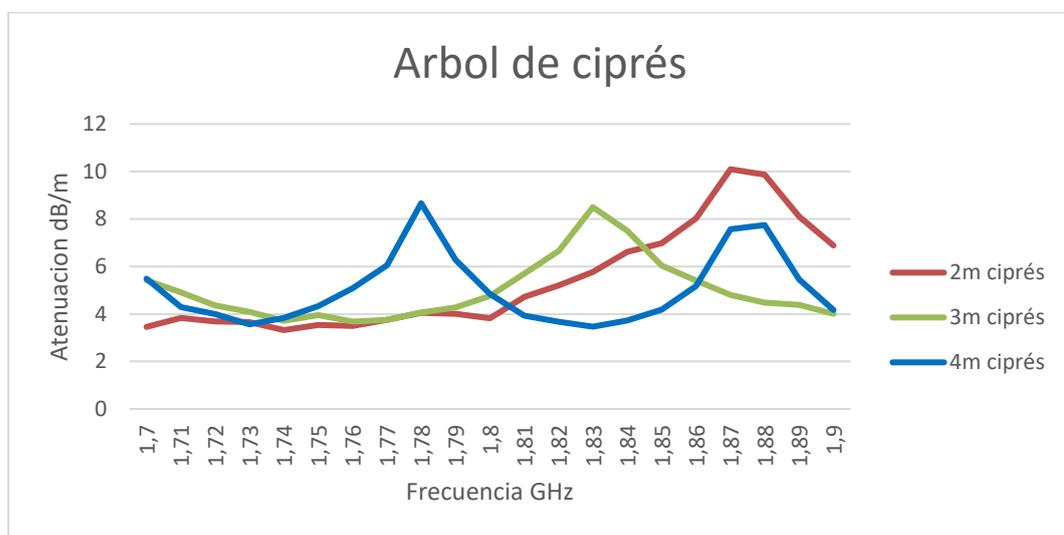


Ilustración 4-20: Resultados obtenidos para el árbol de ciprés a 2,3 y 4 metros de altura.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-20, se muestran los resultados obtenidos de la atenuación con respecto a la frecuencia para un árbol de ciprés; el color rojo representa los valores calculados de atenuación a través de la vegetación a 2 metros, el color verde a 3 metros, azul a 4 metros de altura respectivamente. Para el caso de estudio se ha realizado varias mediciones en un rango de frecuencias de 1,7 GHz hasta 1,9 GHz con el objetivo de visualizar el comportamiento de la atenuación que existe en esa banda de frecuencias. Se puede observar que, a las alturas entre 2, 3 y 4 metros se obtiene un rango de atenuación de 3,46 a 5,48 dB/m a partir de la frecuencia inicial.

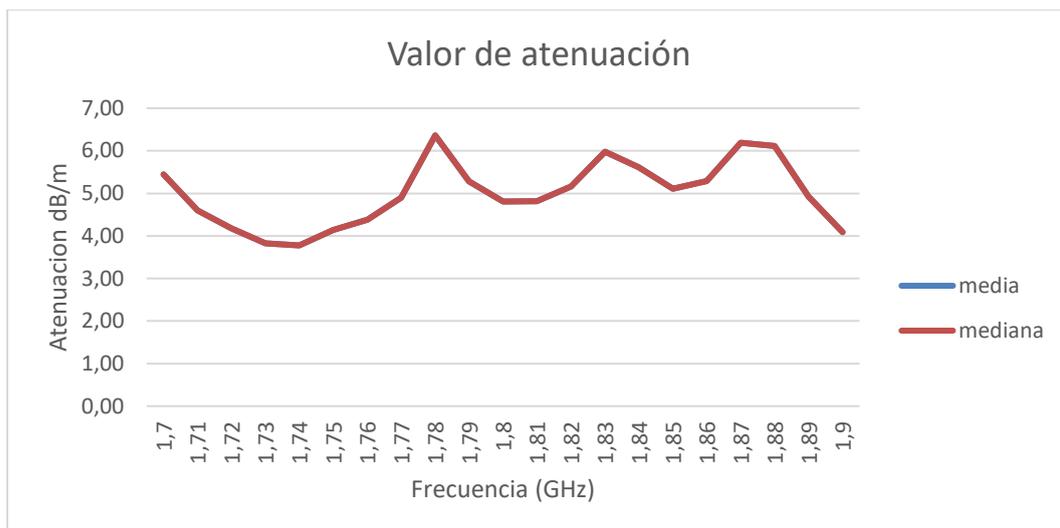


Ilustración 4-21: Medidas de tendencia central para el árbol de ciprés.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-21, se observan los valores de la media con color azul y la mediana color rojo obtenidos de la Ilustración 4-20, obteniendo una desviación estándar de 0,77 respectivamente. Estos valores se han calculado para saber el valor exacto de atenuación provocada por la vegetación del ciprés, por lo que se obtuvo un valor promedio de atenuación para el rango de frecuencias de 1.7 GHz a 1.9 GHz que ha sido de 5 dB/m y para la frecuencia de 1,8 GHz se obtuvo un valor de atenuación de 4,81 dB/m.

Finalmente, con el análisis realizado para cada uno de los árboles en función de los datos obtenidos de la media por tener una desviación estándar menor en cada caso, se ha obtenido el valor de atenuación para todo el rango de frecuencias, así como para la frecuencia de estudio de 1,8 GHz se ha determinado el valor de atenuación en dB/m para cada árbol mostrados en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Valores de atenuación en la vegetación a 1.8 GHz.

	Árbol de pino	Árbol de eucalipto	Árbol de ciprés
Atenuación dB/m	3,96	2,87	4,81

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

4.4. Resultados de atenuación en los bosques de pino ciprés y eucalipto.

Dentro del área de estudio se ha seleccionado los tipos de bosque y la cantidad de árboles para las respectivas mediciones, los resultados obtenidos se han basado en la Recommendation ITU-R P.833-10 para en las que se ha descrito las pérdidas de atenuación, L a lo largo del trayecto de propagación sobre la vegetación, la cual dicha recomendación propuso el siguiente modelo de la Ecuación 2-23 mencionada en el apartado 2.9.2.

Donde se ha considerado valores empíricos para E y G igual a 1, mientras que para el valor de θ es cero, ya que la propagación de la onda se ha realizado de manera directa sin ninguna variación de ángulos tanto en la antena transmisora como en la receptora, con este ajuste en las mediciones realizadas para dichos bosques dio como resultado la Ecuación 4-1:

$$L(dB) = Af^B d^C$$

Ecuación 4-1: Perdidas de atenuación.

Donde:

f : Frecuencia (MHz).

d : Profundidad de la vegetación (m).

A, B, C : Parámetros determinados de manera empírica.

4.4.1. Resultados de atenuación presentes en el bosque de pino.

En la Ilustración 4-22, referente al bosque de pino; se muestra la gráfica de las pérdidas respecto a la distancia y a la frecuencia de 1,8 GHz para cada árbol por cada metro de altura; todos estos valores fueron las pérdidas por atenuación de 1 a 4 metros para 3 árboles de pino, se ha considerado el tercer árbol para obtener una mejor curva de pérdidas, ya que el cuarto árbol de pino no se consideró ya que no existió valores de potencia y se ha confundido con el nivel de piso de ruido debido a la vegetación del pino. Una vez encontrado los valores para cada altura se ha calculado un valor promedio como se muestra la curva en color rojo.

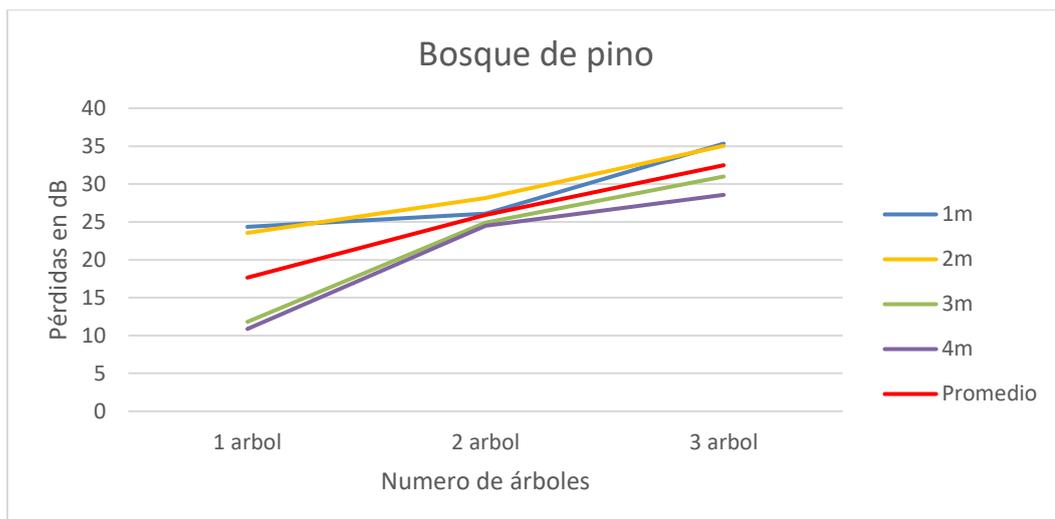


Ilustración 4-22: Pérdidas entre espacio libre y bosque de pino a 1,8 GHz.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-23, referente al bosque de pino, el color azul representa el valor promedio de perdidas por cada metro, el color rojo representa las pérdidas de atenuación con los parámetros A, B, C , se ha realizado el cálculo para perdidas de atenuación con un ajuste a las mediciones realizadas en bosques de pinos en Riobamba para que esta curva se aproxime al valor promedio mencionado.

En la Tabla 4-5, se muestran los valores de los parámetros A, B, C que se han obtenido para los bosques de pino mediante un proceso matemático de interpolar valores a cada parámetro para que estos se ajusten a la curva promedio de pérdidas a través de la vegetación, una vez encontrado estos parámetros se los ha comparado directamente con el método realizado en la Recommendation ITU-R P.833-10 para los árboles de pino de Austria; estos valores se asemejan a los valores de los parámetros obtenidos por la recomendación.

Tabla 4-5: Mediciones realizadas en bosques de pinos en Riobamba.

Tipo de árbol	A	B	C
Pino de Austria	0,25	0,39	0,25
Pino de Ecuador	0,3512	0,4321	0,4523

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Para describir las pérdidas de atenuación a través de la vegetación se ha propuesto el siguiente modelo descrito en la Ecuación 4-2, que se consigue reemplazando los parámetros A, B y C en la Ecuación 4-1.

$$L(\text{dB}) = 0,3512 * f^{0,4321} * d^{0,4523}$$

Ecuación 4-2: Pérdidas de atenuación para el pino de Ecuador.

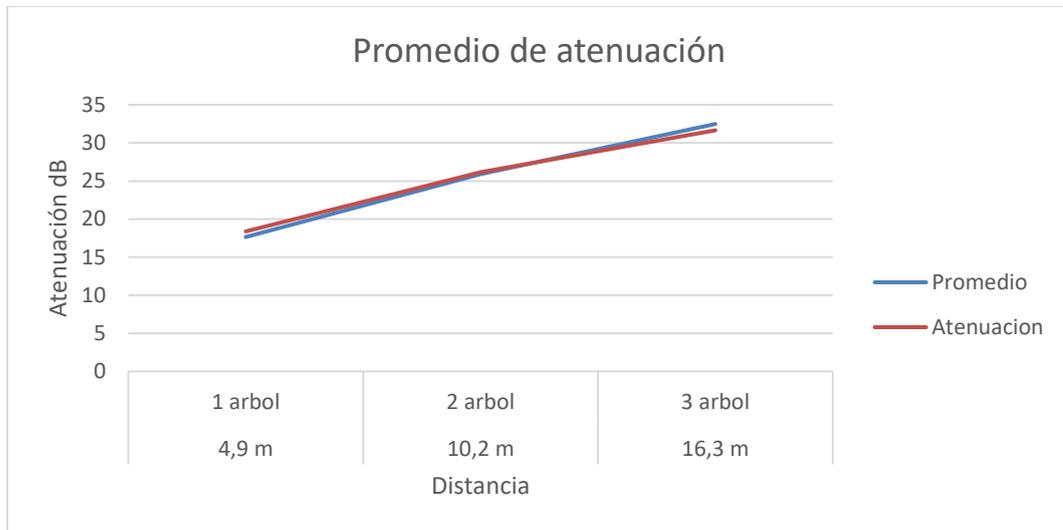


Ilustración 4-23: Promedio de atenuación en el bosque de pino a 1.8GHz.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-24, se observa el valor de pérdidas por atenuación para el rango de frecuencias de 1,7 GHz a 1,9 GHz con saltos de 50 MHz respecto a la distancia de cada árbol para mejor visualización de las curvas a cada frecuencia respecto al valor promedio de las pérdidas.

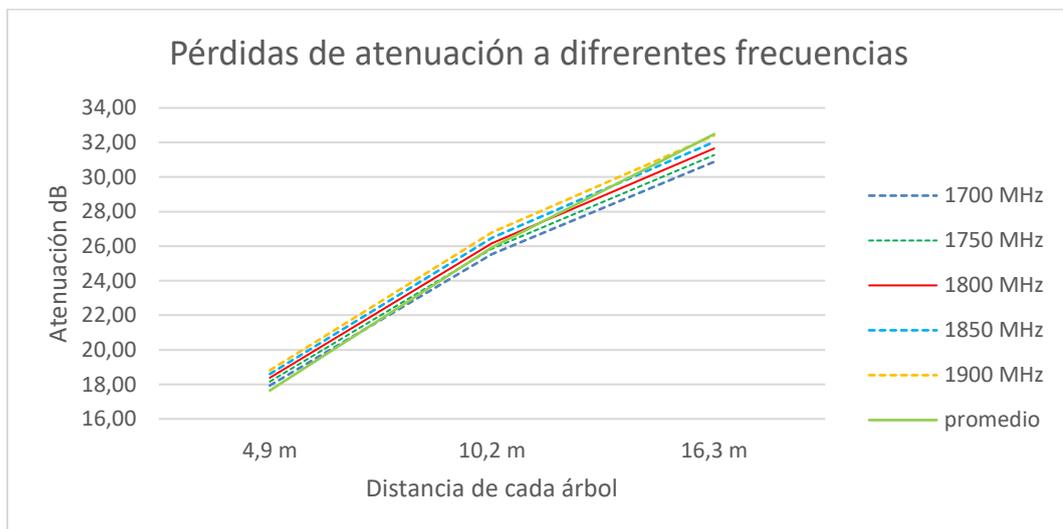


Ilustración 4-24: Resultados de pérdidas de atenuación en el bosque de pino de 1.7 GHz a 1.9 GHz.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023.

4.4.2. Resultados de atenuación presentes en el bosque de eucalipto.

En la Ilustración 4-25, se muestra la diferencia del bosque de eucalipto respecto al espacio libre; todos estos valores fueron las pérdidas por atenuación para las alturas de 3 y 4 metros para 4 árboles de eucalipto, se ha considerado 4 árboles para obtener una mejor curva de pérdidas. Una vez encontrado las curvas para cada altura se ha calculado un valor promedio como se muestra la curva en color rojo.

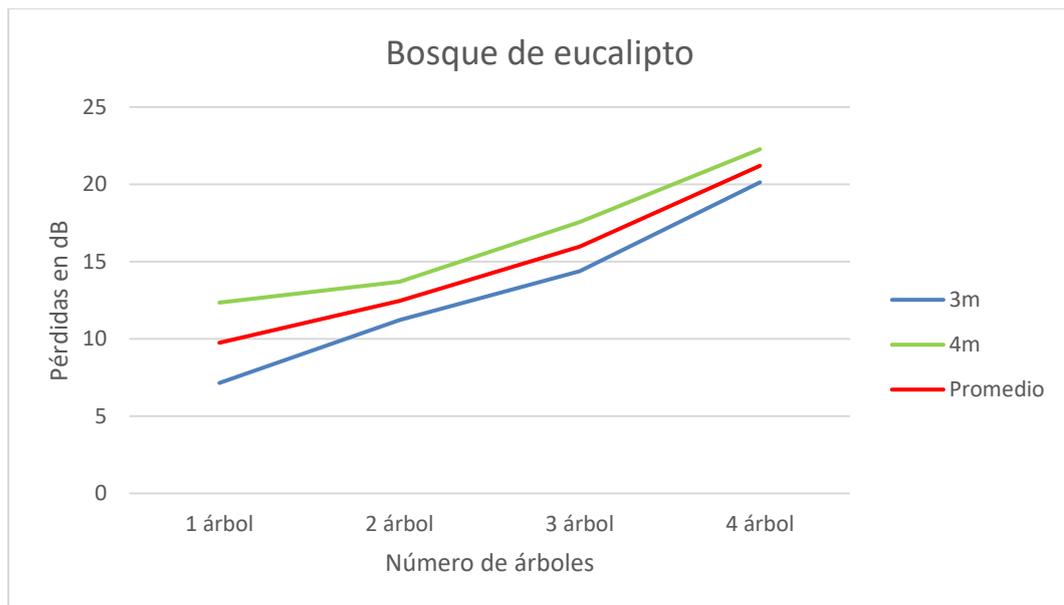


Ilustración 4-25: Pérdidas entre espacio libre y bosque de eucalipto a 1,8 GHz.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-26, referente al bosque de eucalipto, el color azul representa el valor promedio de pérdidas por cada metro, el color rojo representa las pérdidas de atenuación con los parámetros A, B, C , se ha realizado el cálculo para pérdidas de atenuación con un ajuste a las mediciones realizadas en bosques de eucaliptos en Riobamba para que esta curva se aproxime al valor promedio mencionado.

En la Tabla 4-6, se muestran los valores de los parámetros A, B, C que se han obtenido para los bosques de eucalipto mediante un proceso matemático de interpolar valores a cada parámetro como se mencionó anteriormente para que estos se ajusten a la curva promedio de pérdidas a través de la vegetación; obteniendo así valores propios para un bosque de eucalipto.

Tabla 4-6: Mediciones realizadas en bosques de eucalipto en Riobamba.

Tipo de árbol	A	B	C
Eucalipto	0,2567	0,3556	0,7453

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Para describir las pérdidas de atenuación a través de la vegetación del eucalipto se ha propuesto el siguiente modelo descrito en la Ecuación 4-3, reemplazando los parámetros A , B y C en la Ecuación 4-1.

$$L(dB) = 0,2567 * f^{0,3556} * d^{0,7453}$$

Ecuación 4-3: Perdidas de atenuación para el eucalipto en Ecuador.

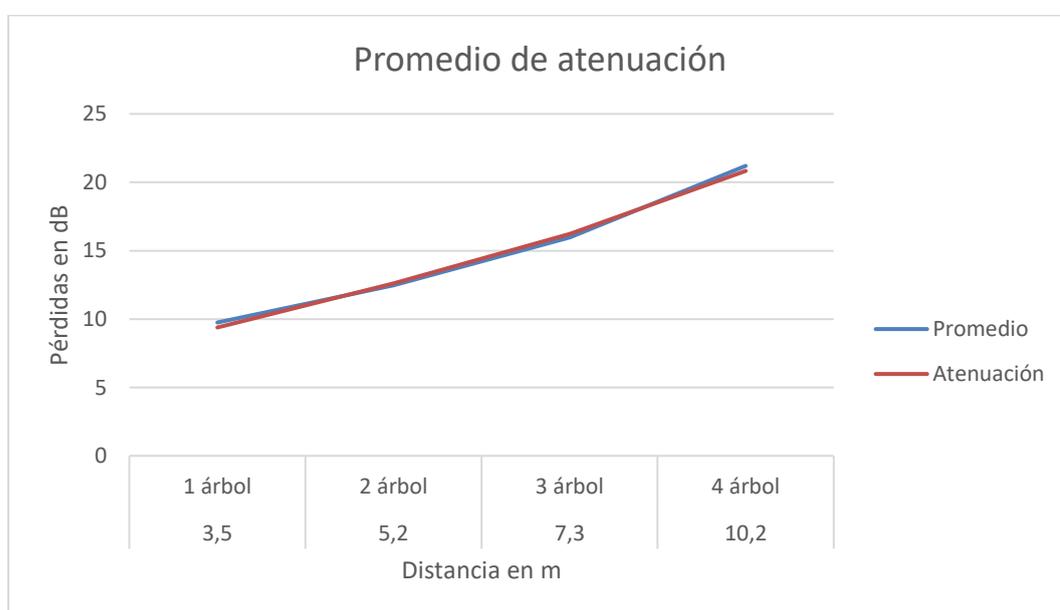


Ilustración 4-26: Promedio de atenuación en el bosque de eucalipto a 1.8GHz.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-27, se observa el valor de pérdidas por atenuación para el rango de frecuencias de 1,7 GHz a 1,9 GHz con saltos de 50 MHz respecto a la distancia de cada árbol, para mejor visualización de las curvas cada frecuencia respecto al valor promedio en un rango 9 a 22 dB.

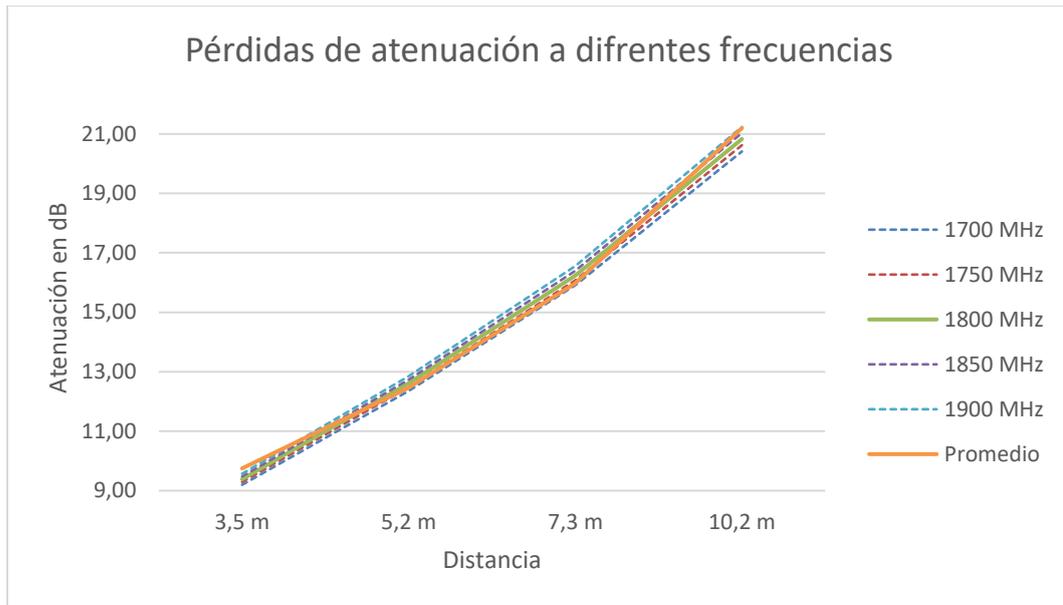


Ilustración 4-27: Resultados de pérdidas de atenuación en el bosque de eucalipto de 1.7 GHz a 1.9 GHz.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

4.4.3. *Resultados de atenuación presentes en el bosque de ciprés.*

En la Ilustración 4-28, se muestra la diferencia del bosque de ciprés respecto al espacio libre; todos estos valores fueron las pérdidas por atenuación a una altura de 2,3 y 4 metros para 3 árboles de ciprés, se ha considerado el tercer árbol para obtener una mejor curva de perdidas, ya que el cuarto árbol de ciprés no se consideró ya que los valores de potencia eran muy bajos y se ha confundido con el nivel de piso de ruido debido a la vegetación del ciprés. Una vez encontrado los valores para cada altura, se ha calculado un valor promedio como se muestra la curva en color naranja.

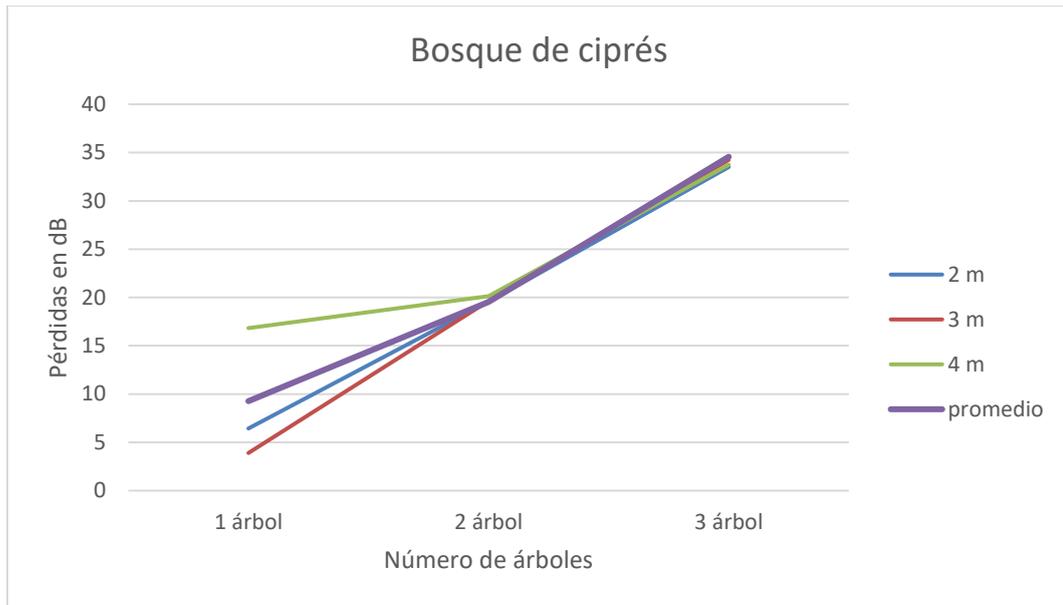


Ilustración 4-28: Pérdidas entre espacio libre y bosque de ciprés.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-29, referente al bosque de ciprés, el color azul representa el valor promedio de pérdidas por cada metro, el color rojo representa las pérdidas de atenuación con los parámetros A, B, C , se ha realizado el cálculo para pérdidas de atenuación con un ajuste a las mediciones realizadas en bosques de ciprés en Riobamba para que esta curva se aproxime al valor promedio mencionado.

En la Tabla 4-7, se muestran los valores de los parámetros A, B, C que se han obtenido para los bosques de ciprés mediante un proceso matemático de interpolar valores a cada parámetro como se mencionó anteriormente para que estos se ajusten a la curva promedio de pérdidas a través de la vegetación; obteniendo así valores propios para un bosque de ciprés.

Tabla 4-7: Mediciones realizadas en bosques de ciprés en Riobamba.

Tipo de árbol	A	B	C
Ciprés	0,1089	0,3529	0,1559

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

Para describir las pérdidas de atenuación a través de la vegetación del ciprés, se ha propuesto el siguiente modelo descrito en la Ecuación 4-3, reemplazando los parámetros A, B y C en la Ecuación 4-1.

$$L(dB) = 0,1089 * f^{0,3529} * d^{0,1559}$$

Ecuación 4-4: Pérdidas de atenuación para el ciprés en Ecuador.

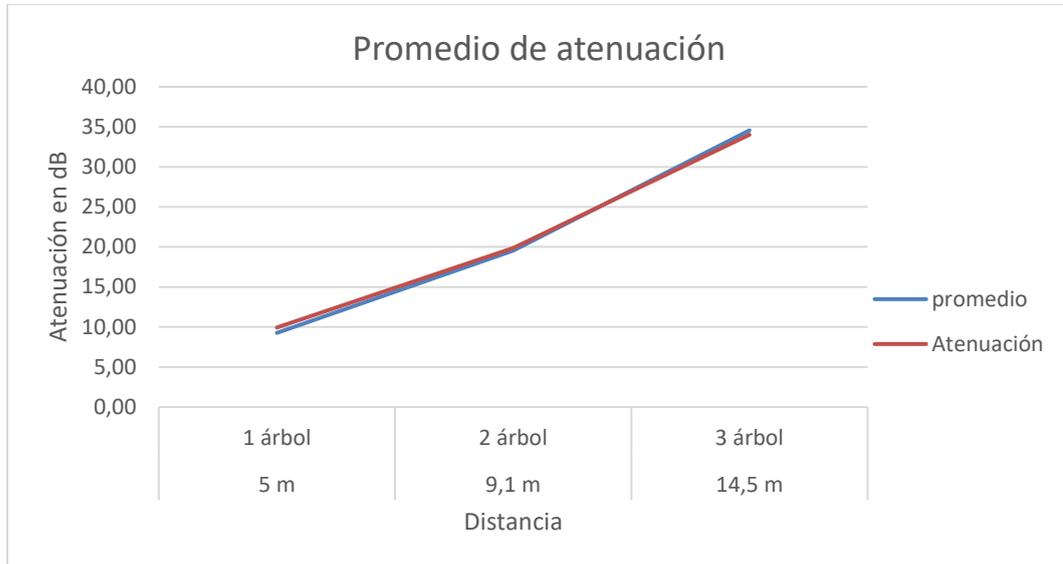


Ilustración 4-29: Promedio de atenuación en el bosque de ciprés a 1.8GHz.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

En la Ilustración 4-30, se observa el valor de pérdidas por atenuación para el rango de frecuencias de 1,7 GHz a 1,9 GHz, con saltos de 50 MHz respecto a la distancia de cada árbol para mejor visualización de las curvas a cada frecuencia respecto al valor promedio de las pérdidas.

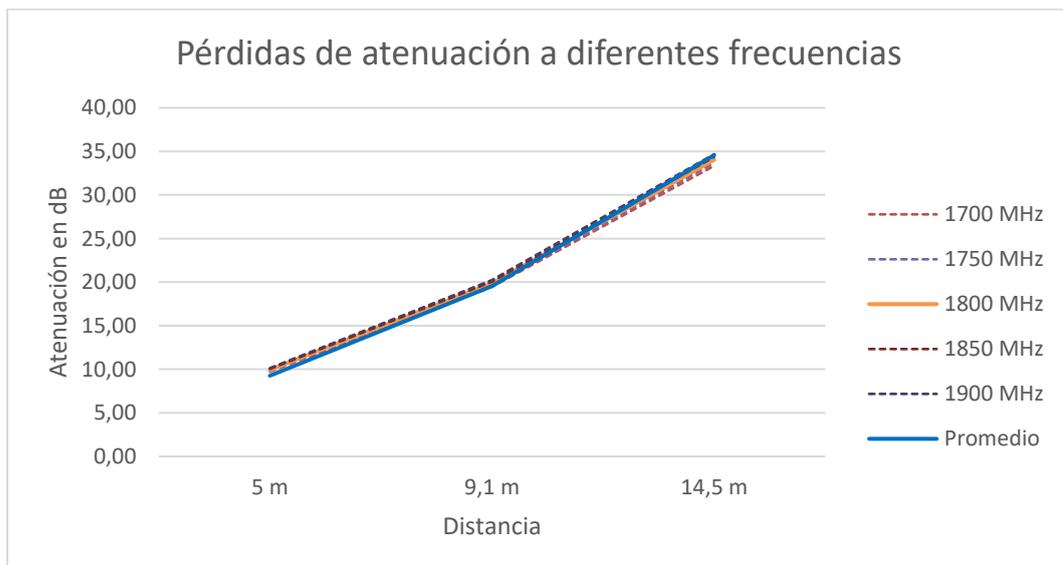


Ilustración 4-30: Resultados de pérdidas de atenuación en el bosque de ciprés de 1.7 GHz a 1.9 GHz.

Realizado por: Llerena D. & Tandazo J., 2023

CONCLUSIONES

- Se analizó la recomendación ITU-R P.833-10 la cual ha desempeñado un papel fundamental en la evaluación precisa de la atenuación causada por la vegetación en enlaces de comunicación inalámbrica, ha brindado pautas y modelos aplicables a diversos entornos con vegetación densa. Esta recomendación ha brindado una guía detallada y actualizada para comprender y calcular los efectos que causa la vegetación en la propagación de las señales de radiofrecuencia. También ha proporcionado una variedad de variables, como la frecuencia de operación, el tipo de vegetación y las condiciones climáticas. Además, modelos predictivos que han ayudado a estimar con mayor precisión la pérdida de señal debida a la presencia de vegetación en el entorno.
- Se ha determinado las pérdidas debido a la atenuación de una onda electromagnética en la banda de 1.8 GHz, realizadas en árboles individuales, obteniendo valores empíricos relevantes que respaldan y validan los modelos y cálculos presentados en la recomendación. Obteniendo así valores de atenuación para el pino de 3,96 dB/m, eucalipto de 2,87 dB/m y ciprés de 4,81 dB/m; en donde se ha utilizado los equipos de medición como el analizador de espectro y el generador de señales; incluidos los efectos de la reflexión con el modelo de tierra plana, la difracción lateral basado en la recomendación ITU-R P.526 donde se consideró un obstáculo redondeado y la difracción vertical considerando la recomendación ITU-R P.526 con obstáculo tipo cuchillo. Estos factores, junto con la onda directa, contribuyen de manera significativa a las pérdidas de propagación en el rango de frecuencia analizado.
- Se determinó que la absorción ha sido un factor crucial para considerarlo en entornos densamente arbolados, ya que puede contribuir significativamente a las pérdidas de señal en estas condiciones, todo esto depende de la densidad y el tipo de árboles, así como la composición y la estructura del bosque, estas características desempeñan un papel crucial en la magnitud de la absorción. Las pérdidas para un bosque compuesto por árboles de pino se han descrito en el modelo de la Ecuación 4-2, para el eucalipto la Ecuación 4-3 y para el bosque de ciprés con la Ecuación 4-4; teniendo en cuenta la absorción de la onda en el bosque según la recomendación ITU-R P.833-10, que ha proporcionado un punto de vista esencial de cómo la vegetación influye en la propagación de señales de radiofrecuencia en entornos boscosos.

- Los valores de los parámetros A , B y C obtenidos mediante un proceso empírico para el bosque de pino de Ecuador han sido comparados con los valores proporcionados por la Recomendación ITU-R P.833-10 para el bosque de pino de Austria, para el caso del bosque de pino de Ecuador se obtuvieron los valores $A = 0,3512$; $B = 0,4321$ y $C = 0,4523$, mientras que para el bosque de pino de Austria se han proporcionado los siguientes valores $A = 0,25$; $B = 0,39$ y $C = 0,25$. Se concluyó que estos valores comparados fueron semejantes, para el caso de los bosques de ciprés y eucalipto los valores de sus parámetros son diferentes debido a su morfología, densidad de vegetación propias de cada tipo en las cuales se ha propuesto su propio modelo de ecuación.
- Si bien este trabajo de investigación estuvo orientado para la frecuencia de 1,8 GHz se ha tomado en cuenta un ancho de banda de 1,7 GHz a 1,9 GHz para tener un espectro más amplio de resultados, concluyendo que este estudio ha permitido determinar cuáles son las pérdidas de atenuación de estos tres tipos de árboles y bosques mencionados.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para tener unas mediciones lo más exactas posibles se debe realizar en ambientes sin cambios bruscos de: velocidad del viento, humedad del suelo o diferentes condiciones climáticas; esto con el fin de mantener la uniformidad ya que provocan una gran variabilidad en las mediciones de la potencia.
- Se recomienda que para investigaciones futuras se extienda el área de las mediciones, así como también el rango de frecuencias, tomando siempre en cuenta los nuevos equipos que se utilizaran y el lugar de medición.

BIBLIOGRAFIA

AARONIA, A., [sin fecha]. Logper Antennas. , vol. 49, no. 0.

ANRITSU, 2013. High Performance Handheld Spectrum Analyzer. *Anritsu*, pp. 1-24.

CABRERA, M., 2013. Introducción a los sistemas de comunicaciones. [en línea]. Barcelona: [Consulta: 4 mayo 2023]. Disponible en: [https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/69406/6/Sistemas de comunicaci3n I_M3dulo 1_Introducci3n a los sistemas de comunicaciones.pdf](https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/69406/6/Sistemas%20de%20comunicaci3n%20I_M3dulo%201_Introducci3n%20a%20los%20sistemas%20de%20comunicaciones.pdf).

COMPANY, A., 2022. Broadband RF / Microwave Signal Generator MG3690C Broadband RF / Microwave Signal Generator MG3690C. ,

ELSHAYEB, M., 2018. Study of Attenuation in Vegetation Media and Prediction Model at Microwave Frequencies. *Science Journal of Circuits, Systems and Signal Processing* [en línea], vol. 7, no. 1, pp. 1. [Consulta: 28 abril 2023]. ISSN 2326-9065. DOI 10.11648/j.cssp.20180701.11. Disponible en: <https://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=136&doi=10.11648/j.cssp.20180701.11>.

FERNÁNDEZ, J., 2023. Dispersi3n de la luz. [en línea]. [Consulta: 19 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.fisicalab.com/apartado/dispersion-luz>.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2013. Recommendation ITU-R P.833-8: Attenuation in Vegetation. . Geneva:

ITU, 2021. Recomendaci3n UIT-R P.833-10 Atenuaci3n debida a la vegetaci3n. , vol. 1.

MARTINEZ I., M.T., MOLINA G. P., J.M., JUAN LL., L., PASCUAL, J. y RODRIGUEZ, J. V., 2020. Experimental Study of Dispersion/Attenuation by Trees from 1 to 40 GHz. *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* [en línea]. Copenhagen: IEEE, pp. 1-4. ISBN 978-88-31299-00-8. DOI 10.23919/EuCAP48036.2020.9135086. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9135086/authors#authors>.

NARANJO G., 2014. Dise1o de una red de respaldo de microondas para la CNT EP en la banda de frecuencia SHF. [en línea]. Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí. pp. 62-65. [Consulta: 2023-05-15]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9850>.

RÁBANOS, J., 2013. *Transmisión por radio*. S.l.: s.n. ISBN 978-84-9961-106-8.

SANGUAÑA, F., 2010. Estudio técnico de la red de comunicaciones para brindar los servicios de voz, internet y video por demanda de una urbanización. [en línea], pp. 186. [Consulta: 20 mayo 2023]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1764/1/CD-2763.pdf>.

SIKIRU, A., SIDDLE, D. y S.O, S., 2014. Measurement of propagation loss in the trees at SHF frequencies. [en línea]. S.l.: [Consulta: 28 abril 2023]. Disponible en: <https://www.co.newkent.va.us/DocumentCenter/View/5217/Measurement-of-Propagation-Loss-in-Trees-at-SHF-Frequencies-PDF?bidId=>.

TOMASI, W., 2004. *Electronic Communications Systems: Fundamentals Through Advanced*. S.l.: s.n. ISBN 0130494925.

UIT, 2019. *Propagación por Difracción ITU-R.P526*. S.l.: s.n. ISBN 1997199920.

UQUILLAS, G., 2016. Mediciones y simulación de atenuaciones producidas por edificaciones que afectan a la banda de radiodifusión en frecuencia modulada en la ciudad de Riobamba. [en línea]. Riobamba: [Consulta: 4 mayo 2023]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/6415>.

ANEXOS

ANEXO A: Medición en el árbol de pino.



ANEXO B: Medición en el árbol de eucalipto.



ANEXO C: Medición en el árbol de ciprés.



ANEXO D: Medición en el bosque de pino.



ANEXO E: Medición en el bosque de eucalipto111.



ANEXO F: Medición en el bosque de ciprés.



2 Obstrucción en zonas boscosas

2.1 Trayecto terrenal con un terminal en zona boscosa

Para un trayecto radioeléctrico terrenal, uno de cuyos terminales está situado en un bosque o en una zona similar de vegetación extensa, la pérdida adicional debida a la vegetación puede describirse en base a dos parámetros:

- el índice de atenuación específica (dB/m) debida fundamentalmente a la dispersión de energía fuera del trayecto radioeléctrico, que se mediría en un trayecto muy corto;
- la atenuación adicional total máxima debida a la vegetación en un trayecto radioeléctrico (dB) limitada por el efecto de otros mecanismos, entre ellos, la propagación de ondas de superficie por encima del medio vegetal y la dispersión dentro del mismo.

En la Fig. 1, el transmisor está fuera de la zona boscosa y el receptor está a una cierta distancia, d , dentro de la misma. La atenuación excesiva, A_{ev} , debida a la presencia de la vegetación viene dada por:

$$A_{ev} = A_m [1 - \exp (-d \gamma / A_m)] \quad (1)$$

siendo:

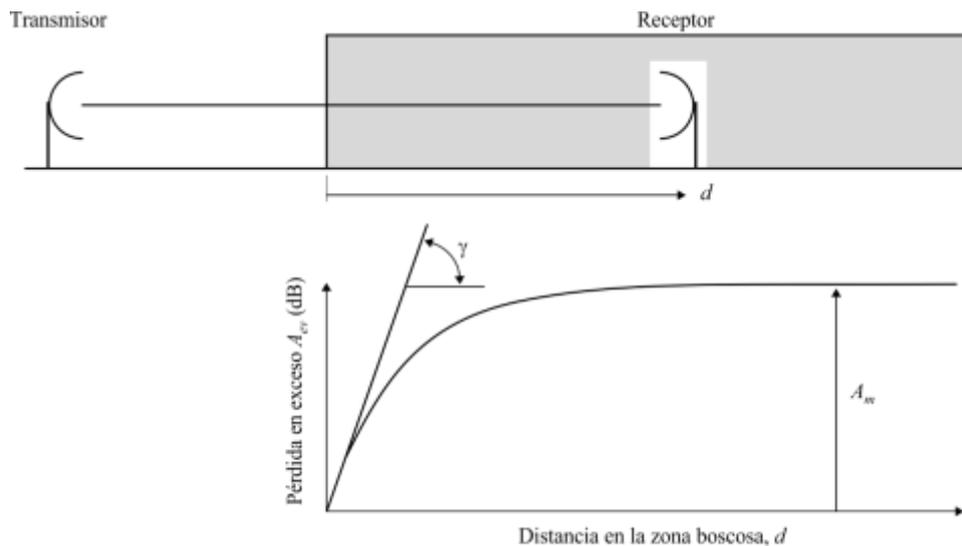
d : longitud del trayecto dentro de la zona boscosa (m)

γ : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)

A_m : atenuación máxima cuando un terminal está dentro de una zona de vegetación de un tipo y profundidad específicos (dB).

FIGURA 1

Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa



2.2 Trayectos oblicuos de satélite, aeronave u otra plataforma por encima de la superficie de la Tierra

2.2.1 Modelo de emplazamiento específico

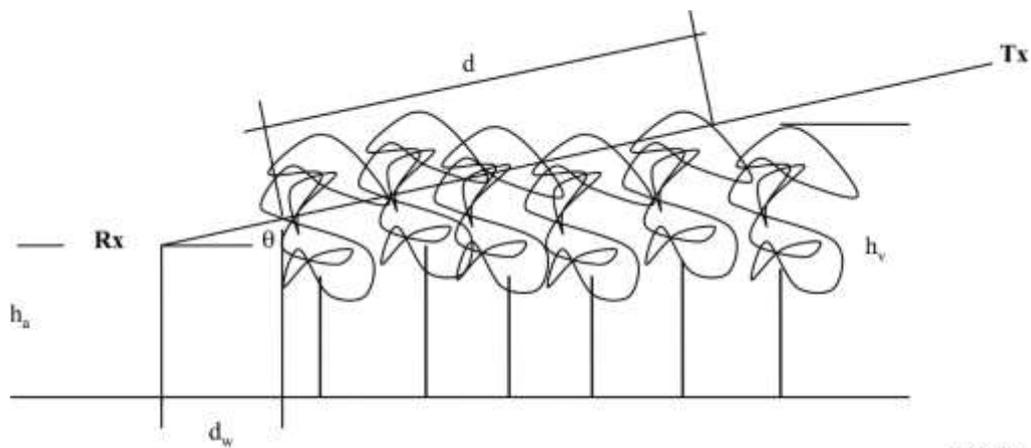
Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa:

En la Fig. 3, el transmisor (Tx) y receptor (Rx) se encuentran fuera de la zona boscosa. Los parámetros pertinentes son los siguientes:

- longitud del trayecto sobre la vegetación, d ;
- altura media de los árboles, h_v ;
- altura de la antena Rx sobre el suelo, h_a ;
- elevación del trayecto radioeléctrico, θ ;
- distancia de la antena al borde de la zona boscosa, d_w .

FIGURA 3

Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa con una longitud de trayecto sobre la vegetación, d , una altura media de los árboles h_v , una altura de la antena Rx sobre el suelo, h_a , una elevación del trayecto radioeléctrico θ , y una distancia de la antena al borde de la zona boscosa, d_w



P.0833-03

Para describir las pérdidas de atenuación, L a lo largo del trayecto de propagación sobre la vegetación horizontal y oblicuo, se propone el siguiente modelo:

$$L(\text{dB}) = A f^B d^C (\theta + E)^G \quad (3)$$

donde:

- f : frecuencia (MHz)
- d : profundidad de la vegetación (m)
- θ : elevación (grados)

A, B, C, E y G : parámetros determinados de manera empírica.

Un ajuste a las mediciones realizadas en bosques de pinos en Austria dio como resultado:

$$L(\text{dB}) = 0,25 f^{0,39} d^{0,25} \theta^{0,05} \quad (4)$$

CUADRO 2

Tipo de árbol	A	B	C	E	G
Pino de Austria	0,25	0,39	0,25	0	0,05

La vegetación varía en función de las estaciones. En el siguiente modelo se indica la pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales.

$$L_{veg}(\text{dB}) = A f^B \log_{10}(d) (\theta + E)^G - 4 \quad (5)$$

donde:

- f : frecuencia (MHz)
- d : profundidad de la vegetación (m)
- θ : elevación (grados)
- kh : $|mes - 6,5|$ (En el hemisferio sur, se utiliza $kh = 6 - |mes - 6,5|$ en lugar de la fórmula de la izquierda)
- Mes : mes (1, 2, 3, ..., 12)
- B : $(0,302\ 81 - 0,003624\ kh)(f / 1\ 000)^{(0,001\ 311\ 8 - 0,026\ 236\ kh)}$
- A, E y G : parámetros determinados de manera empírica.

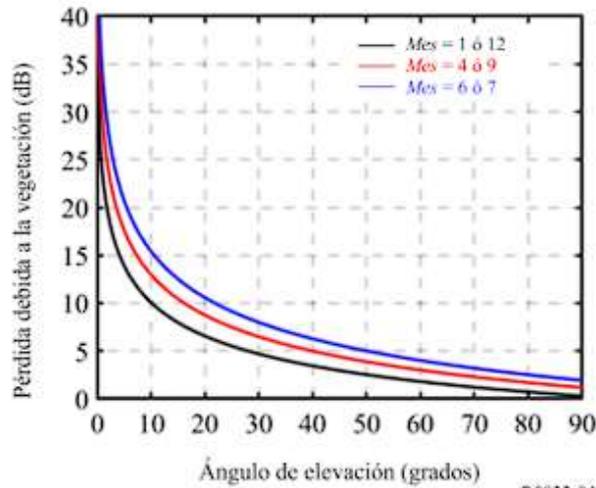
CUADRO 3

Tipo de árbol	A	E	G
Cedro de Japón	1,87	0,01	-0,12
Enebro de Kenya	1,5	0,01	-0,12

En la Fig. 4 se muestra un ejemplo de la pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales en diferentes meses para 2 GHz.

FIGURA 4

Pérdida debida a la vegetación teniendo en cuenta las características estacionales para 2 GHz



P.0833-04

2.2.2 Modelo de emplazamiento general

El siguiente modelo estadístico se puede utilizar como modelo de emplazamiento general:

$$L(\text{dB}) = A \cdot f^B \cdot \log_{10}(d) \cdot (\theta + E)^G - 4 \cdot (p / 100) + 0,4 \quad (6)$$

donde:

f : frecuencia (MHz)

θ : ángulo de elevación (grados)

d : $243(p/100)(\theta + 1)^{-0,93047} + 1$

kh : $5,5 - 5p/100$ [Nota - La función está determinada por el tipo de vegetación como el bosque latifoliado y caducifolio.]

B : $(0,30281 - 0,003624kh)(f/1000)^{(0,0013118 - 0,026236kh)}$

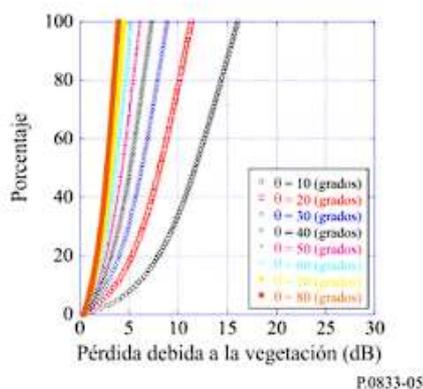
A , E y G : parámetros empíricos.

A , E y G se determinan para cada zona. Por ejemplo, se pueden utilizar los valores del cedro de Japón en el Cuadro 3 para un bosque latifoliado y caducifolio como el de Japón.

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de la pérdida debida a la vegetación calculada mediante el modelo estadístico en diferentes ángulos de elevación para 2 GHz.

FIGURA 5

Pérdida debida a la vegetación calculada mediante el modelo estadístico para 2 GHz



3.2 Por encima de 1 GHz

Para trayectos terrenales debe aplicarse el método basado en la teoría TER descrita en el § 3.2.1 para calcular el efecto de un solo árbol.

Para trayectos oblicuos, debe aplicarse el método basado en la teoría de múltiple dispersión descrita en el § 3.2.2 para calcular el efecto de un solo árbol.

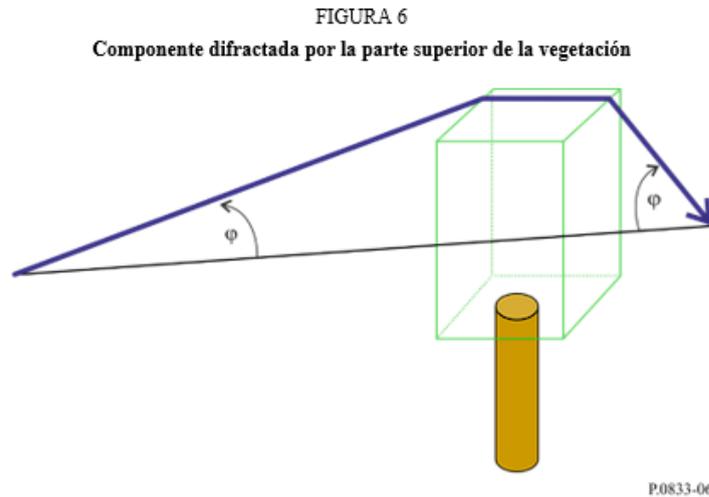
3.2.1 Trayecto terrenal

Para realizar una estimación del campo total, se calculan en primer lugar las componentes de difracción, las reflejadas en el suelo y las de dispersión por la vegetación y a continuación se combinan.

Las componentes difractadas se componen de aquellas que lo son por la parte superior de la vegetación y las que se difractan por los lados de dicha vegetación. Estas componentes y la componente reflejada en el suelo se determinan aplicando las Recomendaciones UIT-R. La componente que atraviesa la vegetación o dispersada por la misma se calcula utilizando un modelo basado en la teoría de transferencia de energía radiada (TER).

3.2.1.1 Cálculo de la componente difractada por la parte superior de la vegetación

Las pérdidas de difracción, L_{top} , experimentadas por el trayecto de la señal difractado por la vegetación, pueden considerarse como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble con la geometría representada en la Fig. 6.



Se calcula de la forma siguiente:

$$L_{top} = L_{top_diff} + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (8)$$

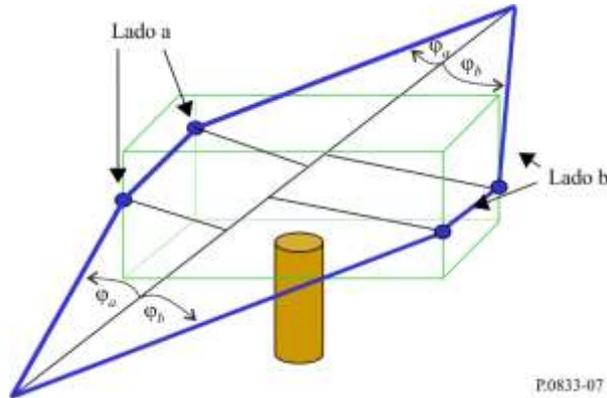
donde $G_{Tx}(\varphi)$ y $G_{Rx}(\varphi)$ son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda difractada emitida por la antena transmisora y que llega a la antena receptora, respectivamente. L_{top_diff} son las pérdidas de difracción total calculadas utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526 para bordes doblemente aislados.

3.2.1.2 Cálculo de la componente difractada lateral

Las pérdidas de difracción, L_{sidea} y L_{sideb} , experimentadas por la señal difractada en torno a la vegetación pueden tratarse nuevamente como una difracción en arista en filo de cuchillo aislada doble, con la geometría definida en la Fig. 7.

FIGURA 7

Componentes difractados en torno de la vegetación



Las pérdidas se calculan utilizando las ecuaciones (9) y (10):

$$L_{sidea} = L_{diff_sidea} + G_{Tx}(\varphi_a) + G_{Rx}(\varphi_a) \quad (9)$$

y

$$L_{sideb} = L_{diff_sideb} + G_{Tx}(\varphi_b) + G_{Rx}(\varphi_b) \quad (10)$$

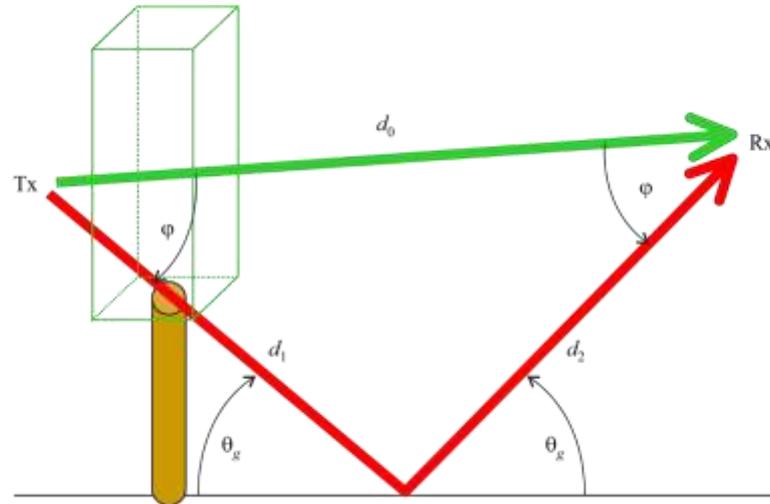
donde $G_{Tx}(\varphi_{a,b})$ y $G_{Rx}(\varphi_{a,b})$ son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda difractada emitida por la antena transmisora y recibida por la antena receptora, para los lados a y b, respectivamente. L_{diff_sidea} y L_{diff_sideb} son las pérdidas de difracción totales en torno a cada lado y se han determinado utilizando el método de la Recomendación UIT-R P.526 para dos aristas aisladas.

3.2.1.3 Cálculo de la componente reflejada en el suelo

Se supone que el trayecto es lo suficientemente corto como para que la onda reflejada en el suelo pueda modelarse mediante la geometría ilustrada en la Fig. 8.

FIGURA 8

Componente reflejada en el suelo



P.0833-08

Para calcular las pérdidas experimentadas en el receptor por la onda reflejada en el suelo, puede determinarse el coeficiente de reflexión, R_0 , de la señal reflejada en el suelo con un determinado ángulo rasante, θ_g . Se trata de un método normalizado que se describe en la Recomendación UIT-R P.1238. Los valores de permitividad y conductancia se obtienen de la Recomendación UIT-R P.527.

Las pérdidas experimentadas por la onda reflejada en el suelo, L_{ground} , vienen dadas por la expresión:

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (11)$$

donde $G_{Rx}(\varphi)$ y $G_{Tx}(\varphi)$ son las pérdidas debidas a los ángulos de la onda reflejada emitida por la antena transmisora y recibida por la antena receptora, respectivamente.

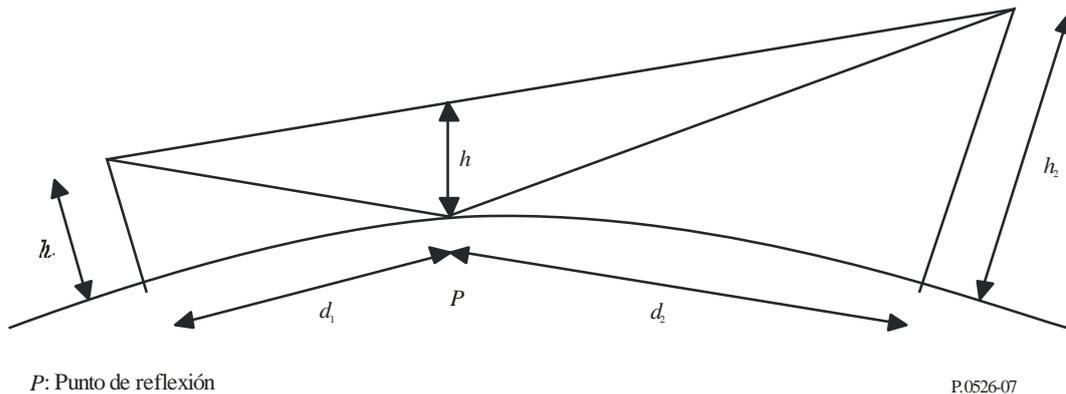
4 Difracción sobre obstáculos aislados o sobre un trayecto terrenal general

Numerosos trayectos de propagación comprenden un obstáculo o varios obstáculos separados, e interesa calcular la pérdida que éstos introducen. Para realizar el cálculo hay que idealizar la forma de tales obstáculos, considerándola bien como de arista de grosor despreciable o como de arista en filo de cuchillo gruesa y lisa, cuyo radio de curvatura en la cima está bien definido. Claro está que los obstáculos reales tienen formas más complejas, y, por consiguiente, las indicaciones dadas en la presente Recomendación se han de considerar nada más que como una aproximación. En estos modelos no se tiene en cuenta el perfil transversal a la dirección del enlace radioeléctrico, que puede tener un efecto importante sobre la pérdida por difracción.

En aquellos casos en que el trayecto directo entre los terminales es mucho más corto que el trayecto de difracción, es preciso calcular la pérdida de transmisión adicional debida al trayecto más largo.

Los datos que se facilitan a continuación son aplicables cuando la longitud de onda es suficientemente pequeña con relación a las dimensiones del obstáculo, o sea, principalmente en el caso de ondas métricas y más cortas ($f > 30$ MHz).

FIGURA 7
Trayecto libre de obstáculos



4.1 Obstáculo único en arista en filo de cuchillo

En este caso extremadamente idealizado (Figs. 8a) y 8b)), todos los parámetros geométricos se agrupan en un solo parámetro adimensional, que normalmente se designa por v y que puede tomar distintas formas equivalentes según los parámetros geométricos elegidos:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (26)$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (27)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 h \theta}{\lambda}} \quad (v \text{ tiene el mismo signo que } h \text{ y } \theta) \quad (28)$$

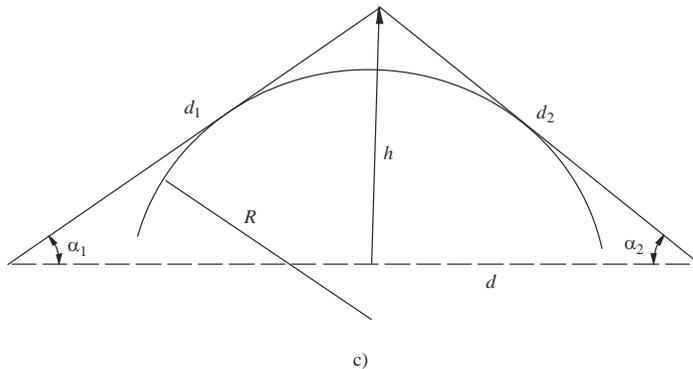
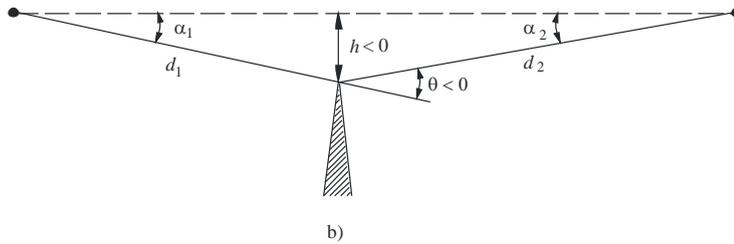
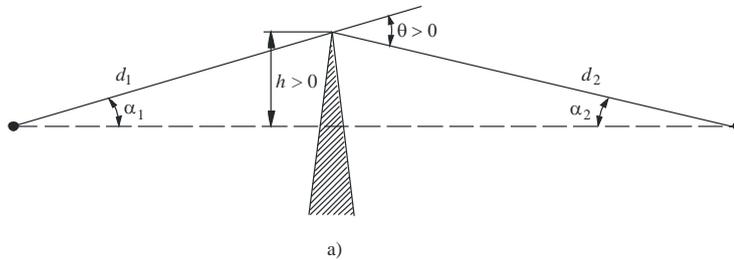
donde:

- h : altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto. Si la cima queda por debajo de esa línea, h es negativa
- d_1 y d_2 : distancias desde los dos extremos del trayecto a la cima del obstáculo
- d : longitud del trayecto
- θ : ángulo de difracción (rad); tiene el mismo signo que h . Se supone que el ángulo θ es inferior a unos 0,2 rad, o sea, aproximadamente 12°
- α_1 y α_2 : ángulos en radianes bajo los que, a partir de un extremo, se ven la cima del obstáculo y el extremo opuesto; tienen el mismo signo que h en las ecuaciones anteriores.

NOTA 1 – En las ecuaciones (26) a (29) inclusive, h , d , d_1 , d_2 y λ deben expresarse en unidades coherentes.

FIGURA 8
Elementos geográficos

(Para las definiciones de θ , α_1 , α_2 , d , d_1 , d_2 y R , véanse los § 4.1 y 4.2)



En la Fig. 9 se ilustran las pérdidas $J(v)$ (dB) en función de v .

$J(v)$ viene dado por la ecuación:

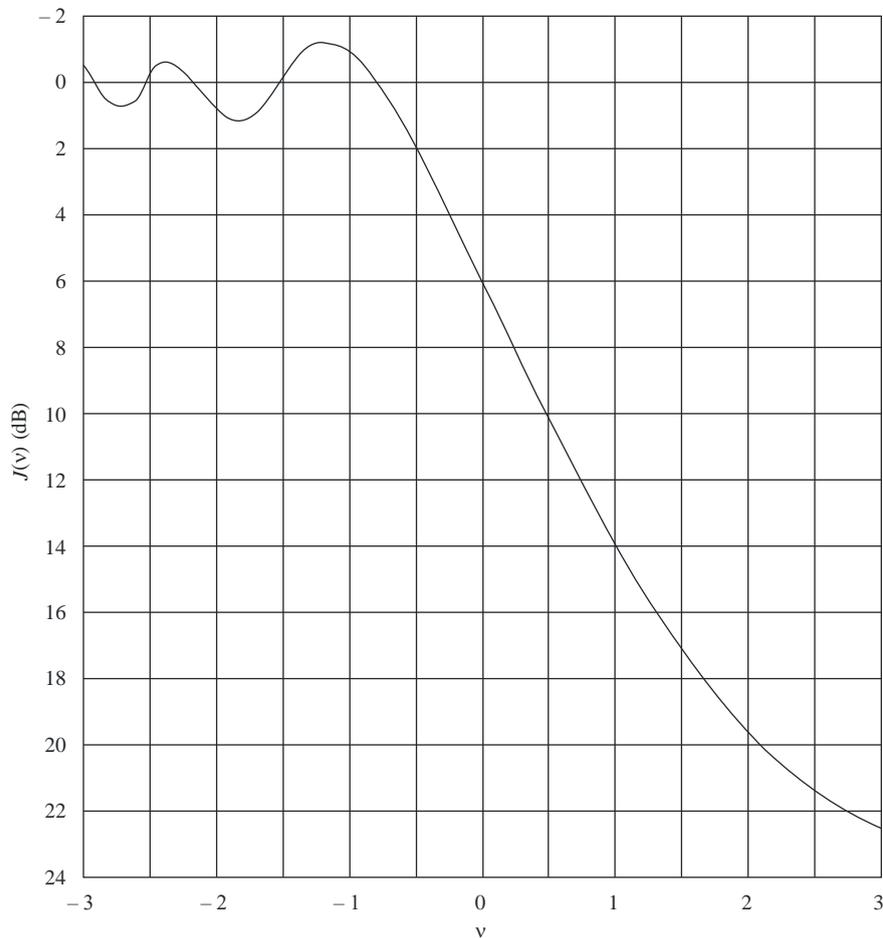
$$J(v) = -20 \log \left(\frac{\sqrt{[1 - C(v) - S(v)]^2 + [C(v) - S(v)]^2}}{2} \right) \quad (30)$$

donde $C(v)$ y $S(v)$ son las partes real e imaginaria respectivamente de la integral compleja de Fresnel $F(v)$ definida en el § 2.7.

Cuando el valor de v es superior a $-0,78$ puede obtenerse un valor aproximado mediante la expresión:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad \text{dB} \quad (31)$$

FIGURA 9
Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo



4.2 Obstáculo único de forma redondeada

En la Fig. 8c) se indica la geometría de un obstáculo de forma redondeada de radio R . Obsérvese que las distancias d_1 y d_2 y la altura h por encima de la línea de base, se miden con respecto al vértice formado por la intersección de la proyección de los rayos sobre el obstáculo. La pérdida por difracción de esta geometría puede calcularse así:

$$A = J(v) + T(m, n) \quad \text{dB} \quad (32)$$

donde:

- a) $J(v)$ es la pérdida de Fresnel-Kirchoff debida a una arista en filo de cuchillo equivalente cuya cresta esté en el vértice. Se puede evaluar el parámetro v adimensional mediante cualquiera de las ecuaciones (26) a (29) inclusive. Por ejemplo, la ecuación (26) puede escribirse en unidades prácticas así:

$$v = 0,0316 h \left[\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \right]^{1/2} \quad (33)$$

donde h y λ se expresan en metros, y d_1 y d_2 , en kilómetros.

$J(v)$ puede obtenerse de la Fig. 9 o de la ecuación (31). Obsérvese que en el caso de una obstrucción en el trayecto de propagación con LoS, v es positivo y la ecuación (31) es válida.

- b) $T(m, n)$ es la atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo:

$$T(m, n) = 7,2m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{para } mn \leq 4 \quad (34a)$$

$$T(m, n) = -6 - 20 \log (mn) + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{para } mn > 4 \quad (34b)$$

y

$$m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] \left/ \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3} \right. \quad (35)$$

$$n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} \left/ R \right. \quad (36)$$

y R , d_1 , d_2 , h y λ se expresan en unidades coherentes.

Téngase en cuenta que, cuando R tiende a cero, $T(m, n)$ tiende también a cero. Por ello, la ecuación (32) se reduce a la difracción en una arista en filo de cuchillo para un cilindro de radio nulo.

El radio de curvatura del obstáculo corresponde al radio de curvatura del vértice de una parábola ajustada con respecto al perfil del obstáculo cerca de la parte superior. Cuando se ajusta la parábola, la máxima distancia vertical desde el vértice que ha de utilizarse en ese procedimiento debe ser del orden del radio de la primera zona de Fresnel donde se encuentra el obstáculo. En la Fig. 10 se da un ejemplo de ese procedimiento, donde:

$$y_i = \frac{x_i^2}{2r_i} \quad (37)$$

ANEXO I: Análisis de suelo.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
 FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
 LABORATORIO DE SUELOS



Nombre del Propietario: Sr. Jorcy Joao Tandazo Vélez
 Jefferson Daniel Ureña Freire

Fecha de Ingreso: 07/07/2023
 Fecha de salida: 12/07/2023

TEMA TIC: "EVALUACIÓN DE LA ATENUACIÓN POR VEGETACIÓN DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA UTILIZANDO LA RECOMENDACIÓN ITU-R P.933-10 EN LA BANCA DE CHZ PARA BOSQUES DE PINO, CIPRES Y EUCALIPTO EN LA CIUDAD DE ROSAMBA."

FACULTAD: INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA: TELECOMUNICACIONES

Ubicación:

FRN-FCP-ESPOCH LICÁN Ríobamba Chimborazo
 Nombre del sitio Parroquia Cantón Provincia
 RESULTADOS E INTERPRETACION DEL ANÁLISIS FÍSICO DE SUELOS

MUESTRAS	CE $\mu S/cm$	%	Textura
Identificación	Conductividad eléctrica	Humedad	
BOSQUE CIPRES	870 NS	6.82	Arena franca
BOSQUE EUCALIPTO	105.6 NS	14.52	Arena franca
CIPRES	272 NS	13.31	Franco arenoso
PINO	118.3 NS	12.37	Franco arenoso

CODIGO
 NS: No Sólido

Victor Lindao
 Ing. Victor Lindao Ph.D.
 JEFE DE LAB. SUELOS

Director: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
 Laboratorio de Suelos
 "Aprobando a la presentación del informe de resultados de los análisis de suelos realizados en el laboratorio de suelos de la institución"



Elisabeth Pizarro
 Ing. Elisabeth Pizarro Ch.
 TÉCNICO DOCENTE



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**



**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE**

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 06/ 11 / 2023

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES	
Nombres – Apellidos: Jefferson Daniel Llerena Freire Jordy Joao Tandazo Vélez	
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL	
Facultad: Informática y Electrónica	
Carrera: Telecomunicaciones	
Título a optar: Ingeniero en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes	
f. Analista de Biblioteca responsable:	 ing. fernanda arevalo m.

