

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA CON MENCIÓN EN**  
**TELECOMUNICACIONES**



**INFLUENCIA DE LOS HIDROMETEOROS SOBRE LOS ENLACES**  
**ÓPTICOS NO GUIADOS, EN LAS ZONAS RURALES DE LA REGIÓN**  
**TACNA EN EL AÑO 2020**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Br. María Elena Vildoza Zambrano**

**ORCID: 0000-0002-8763-2902**

**Asesor:**

**Mag. Anibal Juan Espinoza Aranciaga**

**ORCID: 0000-0001-6489-5112**

**Para Obtener el Grado Académico de:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA CON MENCIÓN EN**  
**TELECOMUNICACIONES**

**TACNA – PERÚ**

**2021**

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA****ESCUELA DE POSTGRADO****MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA CON MENCIÓN EN  
TELECOMUNICACIONES**

**Tesis: “INFLUENCIA DE LOS HIDROMETEOROS SOBRE LOS  
ENLACES ÓPTICOS NO GUIADOS, EN LAS ZONAS RURALES DE LA  
REGIÓN TACNA EN EL AÑO 2020”**

Presentada por:

Bach. María Elena VILDOZO ZAMBRANO

Tesis sustentada y aprobada el 29 de octubre del 2021, ante el  
siguiente Jurado Examinador:

**PRESIDENTE:** Mag. Tito Leoncio CÓRDOVA MIRANDA

**SECRETARIO:** Mag. María Hilda BERMEJO RÍOS

**VOCAL:** Mag. Javier MORE SÁNCHEZ

**ASESOR:** Mag. Anibal Juan ESPINOZA ARANCIAGA

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, **María Elena VILDOZO ZAMBRANO**, en calidad de ..... **egresada**..... de la Maestría en Ingeniería Electrónica con mención en Telecomunicaciones, de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificada con DNI.....00403753.....

Soy autora de la tesis titulada:

..... **“INFLUENCIA DE LOS HIDROMETEOROS SOBRE LOS ENLACES ÓPTICOS NO GUIADOS, EN LAS ZONAS RURALES DE LA REGIÓN TACNA EN EL AÑO 2020”**

### DECLARO BAJO JURAMENTO

Ser la única autora del texto entregado para obtener el grado académico de **Maestro en Ingeniería Electrónica con mención en Telecomunicaciones**, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual. Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara **12 %** de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo. Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y fecha: **29 de octubre del 2021**



-----  
**María Elena VILDOZO ZAMBRANO**

**00403753**

## **Agradecimientos**

A Dios por darme la fortaleza espiritual y bendecir mi vida personal y familiar en estos tiempos difíciles de pandemia.

A mi Asesor de Tesis, por los consejos profesionales que ayudaron a enriquecer el presente trabajo de investigación.

Finalmente, a mi familia, por su paciencia y el apoyo cuando más lo necesitaba.

### **Dedicatoria**

A mi amado esposo Anibal y mis hijas Yasmin y Mariana, por su inconmensurable amor y apoyo en cada etapa de mi vida.

También dedico esta tesis y todo lo que significa, a mi mamá “María Elena” que, aunque no esté con nosotros estaría muy orgullosa de verme lograr mis metas y sueños. Mamá, a ti con mucho amor, porque aprendí de ti a no rendirme jamás ante la adversidad y a perseverar para alcanzar mis más caros anhelos. Gracias mamá.

## Índice de contenido

Agradecimientos.....	iv
Dedicatoria .....	v
Índice de tablas .....	xiv
Índice de figuras .....	xvii
Resumen .....	xxii
Abstract.....	xxiii
Introducción.....	1
Capítulo I: El problema .....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema .....	5
1.2.1 Interrogante principal. ....	5
1.2.2 Interrogantes secundarias. ....	5
1.3 Justificación de la investigación .....	6
1.4 Objetivos de la investigación .....	7
1.4.1 Objetivo general. ....	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 Alcances de la investigación.....	8
1.6 Limitaciones de la investigación.....	9

Capítulo II: Marco teórico .....	11
2.1 Antecedentes de la investigación .....	11
2.1.1 Internacionales.....	11
2.1.2 Nacionales .....	19
2.2 Bases teóricas.....	20
2.2.1 Los fenómenos meteorológicos.....	20
2.2.1.1 Hidrometeoros .....	20
2.2.2 Enlaces ópticos no guiados .....	22
2.2.2.1 Efectos a considerar en un enlace óptico no guiados .....	24
2.2.2.2 Dispersión atmosférica selectiva en frecuencia .....	25
2.2.2.3 Dispersión no selectiva .....	25
2.2.3 Estudio del Margen del Enlace .....	25
2.2.4 Clasificación por banda óptica de operación .....	26
2.2.4.1 Banda de operación-O.....	27
2.2.4.2 Banda de operación-E .....	27
2.2.4.3 Banda de operación-S.....	27
2.2.4.4 Banda de operación-C .....	27
2.2.4.5 Banda de operación-L .....	27
2.2.4.6 Banda de operación-U.....	27
2.3 Definición de conceptos.....	30
2.3.1 Atenuación Atmosférica .....	30
2.3.2 Coeficiente de absorción. ....	30
2.3.3 Coeficiente de dispersión de Rayleigh.....	30

2.3.4 Coeficiente de dispersión de Mie.....	30
2.3.5 Divergencia del láser como radiación infrarroja.....	30
2.3.6 Espectro Radioeléctrico.....	30
2.3.7 F.S.O. (del acrónimo inglés Free Space Optical.....	31
2.3.8 LASER (del acrónimo inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).....	31
2.3.9 LED (del acrónimo inglés Light Emitter Diode).....	31
2.3.10 Luz coherente.....	31
2.3.11 Margen del enlace óptico.....	31
2.3.12 Pérdida Óptica.....	32
2.3.13 Pérdida Geométrica.....	32
2.3.14 Sensibilidad Del Receptor.....	32
Capítulo III: Marco Metodológico.....	33
3.1 Hipótesis.....	33
3.1.1 Hipótesis general.....	33
3.1.2 Hipótesis específicas.....	33
3.2 Variables.....	33
3.2.1 Identificación de la variable independiente.....	33
3.2.1.1 Indicadores.....	34
3.2.1.2 Escala para la medición de la variable.....	34
3.2.2 Identificación de la variable dependiente.....	34
3.2.2.1 Indicadores.....	35
3.2.2.2 Escala para la medición de la variable.....	35

3.3 Tipo y diseño de investigación.....	35
3.4 Nivel de investigación.....	36
3.5 Ámbito y tiempo social de la investigación .....	36
3.6 Población y muestra.....	37
3.6.1 Unidad de estudio.....	37
3.6.2 Población.....	37
3.6.3 Muestra.....	37
3.7 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	38
3.7.1 Técnicas de recolección de los datos.....	38
3.7.2 Instrumentos para la recolección de los datos .....	38
3.8 Procesamiento, presentación, análisis e interpretación de los datos .....	39
Capítulo IV: Determinación de las pérdidas por hidrometeoros .....	41
4.1 Consideraciones previas.....	41
4.2 Descripción de la base de datos de lluvia que se ha utilizado y del tipo de instrumento de medición.....	42
4.2.1 Descripción de la base de datos de lluvia que se ha utilizado .....	42
4.2.2 Descripción del tipo de instrumento de medición, tasa de adquisición, resolución.....	42
4.2.2.1 Estación meteorológica automática.....	42
4.3 Estaciones automáticas empleadas en la zona de estudio .....	44
4.3.1 Estación Automática Bocatoma El Ayro.....	44
4.3.2 Estación Automática Tarata. ....	46
4.3.3 Estación Automática Candarave, Candarave. ....	47
4.3.4 Estación Puente Viejo, Locumba. ....	49

4.4 Cálculo de las pérdidas por lluvia ( $Att_{lluvia}$ ).....	50
4.4.1 Estación Automática El Ayro, Palca.....	54
4.4.1.1 Intensidad de lluvia por mes.....	54
4.4.1.2 Coeficiente de atenuación específica por lluvia (dB/km) .....	56
4.4.1.3 Atenuación por lluvia ( $Att_{lluvia}$ ) .....	57
4.4.2 Estación Automática Tarata, Tarata.....	60
4.4.2.1 Intensidad de lluvia por mes.....	60
4.4.2.2 Coeficiente de atenuación específica por lluvia ( $\alpha_{lluvia}$ (dB/km)).....	63
4.4.2.3 Atenuación por lluvia ( $Att_{lluvia}$ ) .....	63
4.4.3 Estación Automática Candarave, Candarave.....	68
4.4.3.1 Intensidad de lluvia por mes.....	68
4.4.3.2 Coeficiente de atenuación por lluvia ( $\alpha_{lluvia}$ (dB/km)).....	71
4.4.3.3 Atenuación por lluvia ( $Att_{lluvia}$ ) .....	71
4.4.4 Estación Puente Viejo, Locumba.....	76
4.4.4.1 Intensidad de lluvia por mes.....	76
4.5 Cálculo de las pérdidas por niebla ( $Att_{niebla}$ ).....	77
4.5.1 Atenuación por niebla de advección ( $Att_{niebla\ adv}$ ).....	80
4.5.1.1 Atenuación por niebla de advección para $d = 0.1$ kms.....	80
4.5.1.2 Atenuación por niebla de advección para $d = 0.2$ kms.....	82
4.5.1.3 Atenuación por niebla de advección para $d = 0.4$ kms.....	84
4.5.1.4 Atenuación por niebla de advección para $d = 0.8$ kms.....	86
4.5.1.5 Atenuación por niebla de advección para $d = 1.0$ kms.....	88
4.5.2 Atenuación por niebla de radiación ( $Att_{niebla\ rad}$ ).....	90

4.5.2.1 Atenuación por niebla de radiación para $d = 0.1\text{kms}$ .....	90
4.5.2.2 Atenuación por niebla de radiación para $d = 0.2\text{kms}$ .....	92
4.5.2.3 Atenuación por niebla de radiación para $d = 0.4\text{kms}$ .....	94
4.5.2.4 Atenuación por niebla de radiación para $d = 0.8\text{kms}$ .....	96
4.5.2.5 Atenuación por niebla de radiación para $d = 1.0\text{kms}$ .....	98
4.6 Cálculo de las pérdidas por nieve ( $Att_{\text{nieve}}$ ).....	100
4.6.1 Estación Automática Bocatoma El Ayro, Palca.....	102
4.6.2 Estaciones Automáticas de Puente Viejo, Tarata y Candarave.....	104
Capítulo V: Evaluación de los enlaces ópticos no guiados en la Región Tacna	105
5.1 Descripción de los procedimientos y de los métodos usados para evaluar la operatividad de un enlace óptico no guiado.....	106
5.1.1 Descripción de los enlaces ópticos no guiados seleccionados .....	106
5.1.1.1 Enlace óptico en la localidad de Palca, provincia de Tacna.....	106
5.1.1.2 Enlace óptico en la localidad de Tarata, provincia de Tarata.....	108
5.1.1.3 Enlace óptico en la localidad de Candarave, provincia de Candarave.	109
5.1.1.4 Enlace óptico en la localidad de Locumba, provincia de Jorge Basadre.	
111	
5.1.2 Potencia de Emisión y Sensibilidad del receptor óptico .....	113
5.1.2.1 Para $\lambda = 850\text{ nm}$ .....	113
5.1.2.2 Para $\lambda = 1550\text{ nm}$ .....	113
5.1.3 Pérdidas geométricas ( $A_{\text{geo}}$ ) .....	114
5.1.3.1 Cálculo de la atenuación geométrica para $\lambda = 850\text{ nm}$ .....	115
5.1.3.2 Cálculo de la atenuación geométrica para $\lambda = 1550\text{ nm}$ .....	115
5.1.4 Pérdidas del sistema .....	115

5.1.5	Atenuación por lluvia ( $Att_{lluvia}$ ) .....	116
5.1.6	Atenuación por niebla ( $Att_{niebla}$ ) .....	116
5.1.6.1	Atenuación por niebla para $\lambda = 850$ nm .....	116
5.1.6.2	Atenuación por niebla para $\lambda = 1550$ nm .....	117
5.1.7	Atenuación por nieve ( $Att_{nieve}$ ) .....	117
5.1.7.1	Atenuación por nieve para $\lambda = 850$ nm .....	117
5.1.7.2	Atenuación por nieve para $\lambda = 1550$ nm .....	118
5.2	Margen de desvanecimiento del enlace ( $M_{link}$ ) .....	118
5.2.1	Enlace óptico Palca, Tacna .....	119
5.2.1.1	Margen de desvanecimiento del enlace para $\lambda = 850$ nm .....	119
5.2.1.2	Margen del enlace para $\lambda = 1550$ nm .....	120
5.2.2	Enlace óptico Tarata, Tarata .....	120
5.2.2.1	Margen del enlace para $\lambda = 850$ nm .....	120
5.2.2.2	Margen del enlace para $\lambda = 1550$ nm .....	121
5.2.3	Enlace óptico Candarave, Candarave .....	121
5.2.3.1	Margen del enlace para $\lambda = 850$ nm .....	121
5.2.3.2	Margen del enlace para $\lambda = 1550$ nm .....	122
5.2.4	Enlace óptico Locumba, Jorge Basadre .....	122
5.2.4.1	Margen del enlace para $\lambda = 850$ nm .....	122
5.2.4.2	Margen del enlace para $\lambda = 1550$ nm .....	123
5.3	Análisis de los resultados .....	123
5.3.1	Enlace óptico Palca, Tacna .....	123
5.3.1.1	Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas	

atmosféricas, para $\lambda = 850$ nm. Enlace Palca.....	123
5.3.1.2 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 1550$ nm. Enlace Palca.....	125
5.3.2 Enlace óptico Tarata, Tarata.....	126
5.3.2.1 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 850$ nm. Enlace Tarata. ....	126
5.3.2.2 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 1550$ nm. Enlace Tarata. ....	128
5.3.3 Enlace óptico Candarave, Candarave.....	129
5.3.3.1 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 850$ nm. Enlace Candarave .....	129
5.3.3.2 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 1550$ nm .....	131
5.3.4 Enlace óptico Locumba, Jorge Basadre. ....	132
5.3.4.1 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 850$ nm. Enlace Locumba. ....	132
5.3.4.2 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 1550$ nm. Enlace Locumba .....	134
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones.....	136
6.1 Conclusiones.....	136
6.2 Recomendaciones o propuesta .....	138
Referências bibliográficas .....	140
ANEXOS .....	145

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Banda de operación para transmisores FSO</i> .....	28
<b>Tabla 2</b> <i>Fuentes ópticas más utilizados en FSO</i> .....	29
<b>Tabla 3</b> <i>Estaciones meteorológicas seleccionadas de la Región Tacna</i> .....	38
<b>Tabla 4</b> <i>Parámetros usados para la estimación de la atenuación específica debido a la lluvia</i> 51	
<b>Tabla 5</b> <i>Valores máximos de intensidad por lluvia: Bocatoma El Ayro</i> .....	56
<b>Tabla 6</b> <i>Valores de los coeficientes de atenuación por lluvia: Estación Bocatoma El Ayro</i> .....	56
<b>Tabla 7</b> <i>Atenuación por lluvia: Enero 2020</i> .....	57
<b>Tabla 8</b> <i>Atenuación por lluvia del mes de enero 2020</i> .....	58
<b>Tabla 9</b> <i>Atenuación por lluvia: marzo 2020</i> .....	59
<b>Tabla 10</b> <i>Valores máximos de intensidad por lluvia: Tarata</i> .....	63
<b>Tabla 11</b> <i>Valores de los coeficientes de atenuación por lluvia: Estación Tarata</i> .....	63
<b>Tabla 12</b> <i>Atenuación por lluvia: enero 2020</i> .....	64
<b>Tabla 13</b> <i>Atenuación por lluvia: febrero 2020</i> .....	65
<b>Tabla 14</b> <i>Atenuación por lluvia: marzo 2020</i> .....	66
<b>Tabla 15</b> <i>Atenuación por lluvia: diciembre 2020</i> .....	67
<b>Tabla 16</b> <i>Valores máximos de intensidad por lluvia: Candarave</i> .....	70
<b>Tabla 17</b> <i>Valores de los coeficientes de atenuación específica por lluvia: Estación Candarave</i> .....	71
<b>Tabla 18</b> <i>Atenuación por lluvia: enero 2020</i> .....	72
<b>Tabla 19</b> <i>Atenuación por lluvia: febrero 2020</i> .....	72
<b>Tabla 20</b> <i>Atenuación por lluvia: marzo 2020</i> .....	74
<b>Tabla 21</b> <i>Atenuación por lluvia: diciembre 2020</i> .....	75
<b>Tabla 22</b> <i>Atenuación por niebla de advección: <math>d=0.1</math> kms.</i> .....	81

<b>Tabla 23</b> <i>Atenuación por niebla de advección: <math>d=0.2</math> kms</i> .....	83
<b>Tabla 24</b> <i>Atenuación por niebla de advección: <math>d=0.4</math> kms</i> .....	85
<b>Tabla 25</b> <i>Atenuación por niebla de advección: <math>d=0.8</math> kms</i> .....	87
<b>Tabla 26</b> <i>Atenuación por niebla de advección: <math>d=1.0</math> kms</i> .....	89
<b>Tabla 27</b> <i>Atenuación por niebla de radiación: <math>d=0.1</math> kms</i> .....	91
<b>Tabla 28</b> <i>Atenuación por niebla de radiación: <math>d=0.2</math> kms</i> .....	93
<b>Tabla 29</b> <i>Atenuación por niebla de radiación: <math>d=0.4</math> kms</i> .....	95
<b>Tabla 30</b> <i>Atenuación por niebla de radiación: <math>d=0.8</math> kms</i> .....	97
<b>Tabla 31</b> <i>Atenuación por niebla de radiación: <math>d=1.0</math> kms</i> .....	99
<b>Tabla 32</b> <i>Atenuación por nieve seca: <math>S_{m\acute{a}x}= 10</math> mm/hr</i> .....	102
<b>Tabla 33</b> <i>Atenuación geométrica para <math>\lambda = 850</math> nm</i> .....	115
<b>Tabla 34</b> <i>Atenuación geométrica para <math>\lambda =1550</math> nm</i> .....	115
<b>Tabla 35</b> <i>Atenuación por lluvia máxima</i> .....	116
<b>Tabla 36</b> <i>Atenuación por niebla para <math>\lambda = 850</math> nm</i> .....	117
<b>Tabla 37</b> <i>Atenuación por niebla para <math>\lambda = 1550</math> nm</i> .....	117
<b>Tabla 38</b> <i>Atenuación por nieve para <math>\lambda = 850</math> nm</i> .....	118
<b>Tabla 39</b> <i>Atenuación por nieve para <math>\lambda = 1550</math> nm</i> .....	118
<b>Tabla 40</b> <i>Margen de desvanecimiento del enlace para <math>\lambda = 850</math> nm, Enlace Palca</i> ..	119
<b>Tabla 41</b> <i>Margen de desvanecimiento del enlace para <math>\lambda =1550</math> nm. Enlace Palca</i> ..	120
<b>Tabla 42</b> <i>Margen de desvanecimiento del enlace para <math>\lambda = 850</math> nm. Enlace Tarata</i> .	120
<b>Tabla 43</b> <i>Margen de desvanecimiento del enlace para <math>\lambda =1550</math> nm. Enlace Tarata</i>	121
<b>Tabla 44</b> <i>Margen de desvanecimiento del enlace para <math>\lambda = 850</math> nm. Enlace Candarave</i> .....	121
<b>Tabla 45</b> <i>Margen de desvanecimiento del enlace para <math>\lambda = 1550</math> nm. Enlace Candarave</i> .....	122
<b>Tabla 46</b> <i>Margen de desvanecimiento del enlace para <math>\lambda = 850</math> nm. Enlace Jorge</i> <i>Basadre</i> .....	122
<b>Tabla 47</b> <i>Margen de desvanecimiento del enlace para <math>\lambda = 1550</math> nm. Enlace Jorge</i> <i>Basadre</i> .....	123
<b>Tabla 48</b> <i>Comparación del margen del enlace óptico para <math>\lambda = 850</math> nm. Enlace Palca</i> .....	123

<b>Tabla 49</b> <i>Comparación del margen del enlace óptico para <math>\lambda = 1550</math> nm. Enlace Palca</i>	125
<b>Tabla 50</b> <i>Comparación del margen del enlace óptico para <math>\lambda = 850</math> nm. Enlace Tarata.</i>	126
<b>Tabla 51</b> <i>Comparación del margen del enlace óptico para <math>\lambda = 1550</math> nm. Enlace Tarata.</i>	128
<b>Tabla 52</b> <i>Comparación del margen del enlace óptico para <math>\lambda = 850</math> nm. Enlace Candarave</i>	129
<b>Tabla 53</b> <i>Comparación del margen del enlace óptico para <math>\lambda = 1550</math> nm. Enlace Candarave</i>	131
<b>Tabla 54</b> <i>Comparación del margen del enlace óptico para <math>\lambda = 850</math> nm</i>	132
<b>Tabla 55</b> <i>Comparación del margen del enlace óptico para <math>\lambda = 15850</math> nm. Enlace Locumba</i>	134

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Red de enlaces ópticos no guiado.....	23
<b>Figura 2</b> Un enlace óptico FSO dentro de una MAN .....	24
<b>Figura 3</b> Margen de enlace versus atenuación para 1 km de alcance .....	26
<b>Figura 4</b> Estación automática hidrológica.....	43
<b>Figura 5</b> Estaciones automáticas ubicadas en la Región Tacna. Estación meteorológica, (H) Estación Hidrológica. ....	44
<b>Figura 6</b> Ubicación de la estación automática meteorológica Bocatoma El Ayro .....	45
<b>Figura 7</b> Estación automática meteorológica Bocatoma El Ayro.....	45
<b>Figura 8</b> Ubicación de la estación automática meteorológica Tarata .....	46
<b>Figura 9</b> Estación automática meteorológica Tarata.....	47
<b>Figura 10</b> Ubicación de la estación automática meteorológica Candarave .....	48
<b>Figura 11</b> Estación automática meteorológica Candarave.....	48
<b>Figura 12</b> Ubicación de la estación automática hidrológica Puente Viejo .....	49
<b>Figura 13</b> Estación automática hidrológica Puente Viejo.....	50
<b>Figura 14</b> Intensidad de lluvia vs Pérdidas atmosféricas, para $\lambda=780$ nm.....	52
<b>Figura 15</b> Intensidad de lluvia vs Pérdidas atmosféricas, para $\lambda=800$ nm.....	52
<b>Figura 16</b> Intensidad de lluvia del mes de Enero 2020 de la Estación Bocatoma El Ayro, Provincia de Tacna.....	54
<b>Figura 17</b> Intensidad de lluvia del mes de Febrero 2020 de la Estación Bocatoma El Ayro, Provincia de Tacna.....	55
<b>Figura 18</b> Intensidad de lluvia del mes de Marzo 2020 de la Estación Bocatoma El Ayro, Provincia de Tacna.....	55
<b>Figura 19</b> Atenuación por lluvia del mes de Enero 2020, de la Estación Bocatoma El Ayro .....	58
<b>Figura 20</b> Atenuación por lluvia del mes de febrero 2020, de la Estación Bocatoma El	

Ayro .....	59
<b>Figura 21</b> Atenuación por lluvia del mes de marzo 2020, de la Estación Bocatoma El Ayro .....	60
<b>Figura 22</b> Intensidad de lluvia del mes de enero 2020 de la Estación Tarata, Tarata....	61
<b>Figura 23</b> Intensidad de lluvia del mes de febrero 2020 de la Estación Tarata, Tarata .	61
<b>Figura 24</b> Intensidad de lluvia del mes de marzo 2020 de la Estación Tarata, Tarata...	62
<b>Figura 25</b> Intensidad de lluvia del mes de diciembre 2020 de la Estación Tarata, Provincia de Tarata .....	62
<b>Figura 26</b> Atenuación por lluvia del mes de enero 2020, de la Estación Tarata.....	64
<b>Figura 27</b> Atenuación por lluvia del mes de febrero 2020, de la Estación Tarata.....	65
<b>Figura 28</b> Atenuación por lluvia del mes de marzo 2020, de la Estación Tarata .....	66
<b>Figura 29</b> Atenuación por lluvia del mes de diciembre 2020, de la Estación Tarata ....	67
<b>Figura 30</b> Intensidad de lluvia del mes de enero 2020 de la Estación Candarave, Provincia de Candarave. ....	68
<b>Figura 31</b> Intensidad de lluvia del mes de febrero 2020 de la Estación Candarave, Provincia de Candarave .....	69
<b>Figura 32</b> Intensidad de lluvia del mes de marzo 2020 de la Estación Candarave, Provincia de Candarave .....	69
<b>Figura 33</b> Intensidad de lluvia del mes de diciembre 2020 de la Estación Candarave, Provincia de Candarave .....	70
<b>Figura 34</b> Atenuación por lluvia del mes de enero 2020, de la Estación Candarave.....	73
<b>Figura 35</b> Atenuación por lluvia del mes de Febrero 2020, de la Estación Candarave .	73
<b>Figura 36</b> Atenuación por lluvia del mes de marzo 2020, de la Estación Candarave....	74
<b>Figura 37</b> Atenuación por lluvia del mes de diciembre 2020, de la Estación Candarave75	
<b>Figura 38</b> Atenuación por lluvia durante todo el año 2020, de la Estación Puente Viejo, Provincia de Jorge.....	76
<b>Figura 39</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace $d=0.1 \text{ Kms}$ .....	81
<b>Figura 40</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ y longitud del enlace $d=0.1 \text{ Kms}$ .....	82
<b>Figura 41</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace	

d=0.2 Kms.....	83
<b>Figura 42</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.2 Kms.....	84
<b>Figura 43</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.4 Kms.....	85
<b>Figura 44</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.4 Kms.....	86
<b>Figura 45</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.8 Kms.....	87
<b>Figura 46</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.8 Kms.....	88
<b>Figura 47</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=1.0 Kms.....	89
<b>Figura 48</b> Atenuación por niebla de advección, para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=1.0 Kms.....	90
<b>Figura 49</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.1 Kms.....	91
<b>Figura 50</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.1 Kms.....	92
<b>Figura 51</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.2 Kms.....	93
<b>Figura 52</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.2 Kms.....	94
<b>Figura 53</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.4 Kms.....	95
<b>Figura 54</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.4 Kms.....	96
<b>Figura 55</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.8 Kms.....	97
<b>Figura 56</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ y longitud del enlace d=0.8 Kms.....	98

<b>Figura 57</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace $d=1.0 \text{ Kms}$ .....	99
<b>Figura 58</b> Atenuación por niebla de radiación, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y longitud del enlace $d=1.0 \text{ Kms}$ .....	100
<b>Figura 59</b> Atenuación por nieve seca, para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$ y $S_{\text{máx}}= 10 \text{ mm/hr}$ .....	103
<b>Figura 60</b> Atenuación por nieve seca, para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$ y $S_{\text{máx}}= 10 \text{ mm/hr}$ .....	103
<b>Figura 61</b> Enlace óptico Centro de Salud - Institución Educativa en Palca. Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO .....	107
<b>Figura 62</b> Perfil topográfico: Enlace óptico Centro de Salud - Institución Educativa en Palca. Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO.....	107
<b>Figura 63</b> Enlace óptico Municipalidad de Tarata - Estación automática Tarata. Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO .....	108
<b>Figura 64</b> Perfil topográfico: Enlace óptico Municipalidad de Tarata - Estación automática Tarata. Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO .....	109
<b>Figura 65</b> Enlace óptico Municipalidad de Candarave - Estación automática Candarave. Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO .....	110
<b>Figura 66</b> Perfil topográfico: Enlace óptico Municipalidad de Candarave - Estación automática Candarave. Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO....	111
<b>Figura 67</b> Enlace óptico Centro Experimental-Institución Educativa de Locumba. Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO .....	112
<b>Figura 68</b> Perfil topográfico enlace óptico Centro Experimental-Institución Educativa de Locumba. Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO .....	113
<b>Figura 69</b> Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Palca, para $\lambda= 850 \text{ nm}$ y $d= 0.304 \text{ Kms}$ .....	124
<b>Figura 70</b> Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Palca, para $\lambda=1550 \text{ nm}$ y $d= 0.304 \text{ Kms}$ .....	125
<b>Figura 71</b> Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Tarata, para $\lambda= 850 \text{ nm}$ y $d= 0.442 \text{ Kms}$ .....	127
<b>Figura 72</b> Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Tarata, para $\lambda= 1550 \text{ nm}$ y $d= 0.422 \text{ Kms}$ .....	128
<b>Figura 73</b> Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Candarave, para $\lambda=$	

850 nm y d= 0.382 Kms.....	130
<b>Figura 74</b> Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Candarave, para $\lambda=$ 1550 nm y d= 0.382 Kms.....	131
<b>Figura 75</b> Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Locumba, para $\lambda=$ 850 nm y d= 0.731 Kms.....	133
<b>Figura 76</b> Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Locumba, para $\lambda=$ 1550 nm y d= 0.731 Kms.....	134

## Resumen

La investigación tiene como objetivo principal determinar la influencia de los hidrometeoros sobre los enlaces ópticos no guiados, en las zonas rurales de la Región Tacna en el año 2020.

Este trabajo de investigación es de tipo explicativo, porque busca determinar la incidencia de los hidrometeoros en la operatividad de un enlace óptico no guiado para ser empleado en las zonas rurales de la Región Tacna, mediante la determinación de relaciones causa-efecto.

El instrumento empleado fue la información técnica sobre precipitaciones pluviales, suministrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), de las estaciones automáticas meteorológicas sobre la zona de estudio. Así mismo se empleó los Estándares Internacionales de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, que regulan los sistemas de transmisión óptica no guiada.

Como resultado del trabajo de investigación, se encontró que la presencia de hidrometeoros en la zona de estudio, afectan directamente en la operatividad de los sistemas de transmisión óptica no guiada que en algunos casos produce una interrupción del sistema denominada desvanecimiento.

***Palabras clave: Operatividad, hidrometeoros y sistemas de transmisión óptica no guiada.***

## **Abstract**

The main objective of the research is to determine the influence of hydrometeors on unguided optical links in rural areas of the Tacna Region in the year 2020.

This research work is explanatory, because it seeks to determine the incidence of hydrometeors in the operation of an unguided optical link to be used in rural areas of the Tacna Region, by determining cause-effect relationships.

The instrument used was the technical information on rainfall, supplied by the National Meteorology and Hydrology Service (SENAMHI), from the automatic meteorological stations on the study area. Likewise, the International Standards of the International Telecommunications Union were used, which regulate unguided optical transmission systems.

As a result of the research work, it was found that the presence of hydrometeors in the study area directly affect the operation of unguided optical transmission systems, which in some cases produces a system interruption called fading.

***Keywords: Operability, hydrometeors and unguided optical transmission systems.***

## **Introducción**

Una de los grandes desafíos que enfrenta el Estado peruano es brindar los servicios de telecomunicaciones a los habitantes de las zonas alto-andinas y rurales de nuestro país, a través de los sistemas de cobertura conocidos de la “Última Milla”.

Una de las soluciones existentes en la actualidad, es el uso de sistemas de comunicación óptica que utilizan la propagación de señales ópticas (luz visible o infrarroja) en el espacio libre (condición ideal de propagación de señales en la atmósfera). Estos sistemas se emplean para la transmisión de voz, datos y video a través de enlaces de gran capacidad de transmisión (Gbit/s), con las limitaciones de cobertura que ofrecen.

La presencia de actividad atmosférica debido a los hidrometeoros, hacen que esta técnica de comunicación tenga sus limitaciones al momento de su implementación.

La siguiente investigación permite determinar la relación entre la actividad atmosférica por hidrometeoros y la operatividad de un enlace óptico no guiado en las zonas rurales de la Región Tacna, de tal manera que los resultados obtenidos podrán ser tomados en cuenta cuando se requieran implementar un sistema de transmisión óptica inalámbrica en zonas rurales con las mismas características geográficas.

Esta investigación se ha desarrollado en seis capítulos. En el primer capítulo se abarca el planteamiento del problema y la justificación; del mismo modo se determinan los objetivos específicos y el objetivo general al cuál apunta el presente trabajo, así como de sus alcances y limitaciones.

En el capítulo II, se realiza una recopilación de tesis y trabajos de investigación para conocer a profundidad los fundamentos de las dos variables con las que se trabaja: los hidrometeoros y los enlaces ópticos no guiados. En este capítulo se determina el fundamento teórico para el diseño de los instrumentos.

En el capítulo III se indica la metodología de la investigación, así como se determina la hipótesis general: Existe una relación directa entre la presencia de hidrometeoros en las zonas rurales de la Región Tacna y el incremento de las pérdidas del enlace que afecta la operatividad de los enlaces ópticos no guiados.

En el capítulo IV se determina las pérdidas por hidrometeoros utilizando la información suministrada por el SENAMHI y las Recomendaciones Internacionales UIT-R P.1817-1 y UIT-R P.1814 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, referido al diseño de enlaces ópticos terrenales en el espacio libre.

En el capítulo V se evalúa la operatividad de los enlaces ópticos no guiados en las zonas rurales de la Región Tacna y se muestran los resultados obtenidos luego de la aplicación de los instrumentos a los enlaces ópticos no guiados. Cada uno de los resultados es interpretado para brindar más información sobre el trabajo realizado.

Finalmente, en el capítulo VI se describen las conclusiones y las recomendaciones resultantes de la investigación que permitan establecer sistemas de comunicación utilizando enlaces ópticos no guiados que garanticen su operatividad, en zonas rurales donde existe la presencia de actividad atmosférica.

## Capítulo I: El problema

### 1.1 Planteamiento del problema

Desde 2013, el Estado Peruano empezó la implementación del Proyecto "Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO)", que comprende en dos componentes: el componente de Transporte a través de la infraestructura de la Red Pública Eléctrica (líneas de transmisión de Alta y Media Tensión) para el tendido de la Red Troncal de Fibra Óptica y el componente de Acceso con el tendido de fibra óptica o enlaces de radio frecuencia hasta los distritos más alejados de las Regiones del Perú. Según ProInversión, a nivel nacional se proyectó la instalación, operación y mantenimiento de aproximadamente 13,400 km de fibra óptica, que permita conectar a 22 capitales de región y 180 capitales de provincia del país, dentro de las que se encuentran las cuatro provincias de la Región Tacna.

Una de los grandes desafíos que enfrenta el Estado peruano es brindar los servicios de telecomunicaciones de voz, datos y video a los habitantes de las zonas alto-andinas y rurales de nuestro país, que le permita su articulación al ámbito nacional a través de la interconexión de la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO), con los sistemas de transmisión a desplegar en dichas zonas, conocidas como sistemas de cobertura de la "Última Milla".

Los sistemas de cobertura de "Última Milla" consiste en la aplicación de nuevas tecnologías y nuevos modelos de arquitecturas de red con bajo costo y eficiente calidad de servicio, para la implementación de servicios básicos de telecomunicaciones, internet, voz y vídeo, para localidades pobres y aisladas de Perú. Sin embargo, debido a los altos costos y a las limitaciones tecnológicas que

significa implementar proyectos de “Última Milla”, para los usuarios que se encuentran en los diferentes poblados rurales del Perú, su articulación se fue postergando.

La Región Tacna no es la excepción a esta problemática. Si bien sus cuatro provincias: Tacna, Tarata, Candarave y Jorge Basadre han sido consideradas para conectarse a la RDNFO, dichas provincias tienen poblados rurales que en algunos casos cuentan con el servicio básico de telefonía fija, telefonía móvil y un acceso básico de acceso de internet de baja capacidad, lo que restringe el uso de servicios de banda ancha como telemedicina, teleeducación, teletrabajo, video-conferencia, necesarios para su articulación.

Para optimizar una conexión de banda ancha que ofrece la RDNFO con los sistemas de Última Milla, es necesario desplegar sistemas de transmisión de voz, video y datos con las consideraciones técnicas antes mencionadas.

Una de estas alternativas es el uso de la transmisión óptica. El empleo de las redes de fibras ópticas comenzó a ser utilizadas intensamente en la década de 1970, debido al abaratamiento de los costos de su instalación, alta velocidad y la gran confiabilidad que presentaban. Sin embargo, su despliegue en zonas donde su geografía es agreste y de difícil acceso limitan su implementación, Estas características geográficas son las que presentan las zonas rurales de nuestro país, donde se quiere implementar los sistemas de Última Milla.

Con la aparición de la tecnología de transmisión de señales ópticas no guiadas (inalámbricas), tecnología avanzada y revolucionaria que utiliza el láser como medio aéreo de transmisión de la información, hace posible la conexión de banda ancha, a través de enlaces ópticos inalámbricos que ofrecen altas tasas de transmisión (Gbit/s) a cortas distancias, menores a 3 km.

El uso de enlaces ópticos no guiados presenta algunas ventajas que hace que su despliegue en zonas rurales de nuestro país se considere una alternativa a considerar. Una de las ventajas está relacionada con el aspecto regulatorio, que a diferencia de los enlaces de radio no requiere de licencia alguna para el uso de

frecuencias, lo que permite a los proveedores de servicios de telecomunicaciones aprovechar al máximo sus conexiones de red. Desde el punto de vista económico, presenta la ventaja que la operatividad del sistema se realiza de manera sencilla, rápida y con menos costos que los enlaces cableados.

Sin embargo, es necesario destacar que una de las desventajas del uso de enlaces ópticos no guiados son los factores que limitan el desempeño de los sistemas FSO, como son: la presencia de actividad atmosférica debido a los hidrometeoros, en especial la lluvia, la niebla y la nieve, factores que son necesarios tener en cuenta ya que pueden reducir la disponibilidad del enlace óptico no guiados y restringir su operatividad en las zonas rurales de nuestro país.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Interrogante principal.**

¿En qué medida la presencia de los hidrometeoros influye sobre los enlaces ópticos no guiados, en las zonas rurales de la Región Tacna en el año 2020?

### **1.2.2 Interrogantes secundarias.**

- ¿Cuáles son los efectos de los hidrometeoros sobre los enlaces ópticos no guiados, en las zonas rurales de la región Tacna?
  
- ¿Cómo incide las pérdidas ocasionadas por los hidrometeoros en el diseño de enlaces ópticos no guiados en las zonas rurales de la Región Tacna?
  
- ¿Cuáles son los factores que inciden en los enlaces ópticos no guiados, al considerar la actividad atmosférica por hidrometeoros?

### 1.3 Justificación de la investigación

Desde el punto de vista tecnológico, los enlaces ópticos no guiados están siendo tomados en cuenta actualmente, debido a una gran capacidad para conseguir elevadas velocidades de transmisión o tasas binarias, como consecuencia directa del enorme ancho de banda disponible.

Además, los enlaces ópticos no guiados son prácticamente invulnerables a las interferencias, aspecto que no se produce en los radioeléctricos.

Su carácter no guiado o inalámbrico les confiere un interés relevante como importante alternativa a los sistemas de radio en el acceso de alta capacidad en el segmento de la última milla. Su aplicación puede tener un gran interés tanto en zonas urbanas densamente pobladas como en zonas rurales donde la diseminación no justifique el despliegue de enlaces cableados.

La presente investigación se enfocará en determinar la influencia de los hidrometeoros sobre los enlaces ópticos no guiados, en las zonas rurales de la Región Tacna en el año 2020. Así, el presente trabajo permitirá identificar los factores que inciden en los enlaces ópticos no guiados al considerar la actividad atmosférica por hidrometeoros, especialmente la neblina, la niebla y la lluvia, fenómenos atmosféricos que inciden en la operatividad de un enlace óptico no guiado.

Los motivos que me llevó a investigar sobre el empleo de los enlaces ópticos no guiados en las zonas rurales de la Región Tacna fueron:

- Que no se tiene conocimiento de la implantación o del uso de enlaces ópticos no guiados o inalámbricos en las zonas rurales de nuestro país.
  
- En segundo lugar, las referencias bibliográficas hacen mención de implantación de dichos enlaces ópticos en zonas urbanas de otros países, donde la

condición de línea de vista (line on sight) se obtienen colocando en las edificaciones más altas o a través de torres de comunicaciones. Lograr línea de vista en las zonas rurales dependerá de los relieves topográficos por donde se encuentre la trayectoria del enlace óptico no guiado.

- En tercer lugar, analizar cuan confiable es utilizar enlaces ópticos no guiados en lugares donde existe alta incidencia de actividad atmosférica, como las que se producen en las zonas rurales de la Región Tacna (por ejemplo: Alto Perú, Candarave, Tarata, etc.).

- En cuarto lugar, desde el punto de vista social, es proponer una alternativa tecnológica que sea confiable y de gran capacidad, que faciliten la interconexión de las poblaciones que se encuentran en las zonas rurales llamados la “Última Milla”, al ámbito nacional. Debemos entender que dichos usuarios han sido postergados por mucho tiempo y que pueden tener la oportunidad de interconectarse a los servicios de banda ancha a través de los enlaces ópticos no guiados.

## **1.4 Objetivos de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo general.**

Determinar la influencia de los hidrometeoros sobre los enlaces ópticos no guiados, en las zonas rurales de la Región Tacna en el año 2020.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Describir los efectos de los hidrometeoros sobre los enlaces ópticos no guiados.

- Diseñar enlaces ópticos no guiados en las zonas rurales de la región Tacna, considerando las pérdidas ocasionadas por los hidrometeoros.
- Identificar los factores que más inciden en los enlaces ópticos no guiados al considerar la actividad atmosférica por hidrometeoros.

### **1.5 Alcances de la investigación**

En el desarrollo del presente trabajo, debo precisar los alcances de la investigación:

- Los enlaces ópticos inalámbricos a ser estudiados en esta investigación, solo se refieren a los que utilizan propagación troposférica. En la actualidad se encuentran operando sistemas de transmisión óptica inalámbrica satelitales los cuales operan con enlaces ópticos espaciales por encima de la troposfera.
- Que la información suministrada solo provino de las estaciones meteorológicas e hidrológicas automáticas pertenecientes al Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología del Perú (SENAMHI), sin tomar en cuenta las estaciones meteorológicas convencionales existentes en la zona de estudio.
- El Estudio de Campo a la zona de estudio fue efectuado en el período de actividad atmosférica (enero, febrero, marzo y diciembre), con el asesoramiento de un profesional especializado en el tema de investigación.
- De las 18 estaciones automáticas (meteorológicas y/o hidrológicas), se eligieron 4 estaciones que se encuentran dentro de las localidades que cuentan con población y que tienen la posibilidad de interconectarse con otras localidades vecinas. Las estaciones automáticas elegidas se encuentran ubicadas en: localidad de Locumba en la provincia de Jorge Basadre; localidad de Tarata en la provincia de Tarata; localidad de Candarave en la localidad de Candarave y localidad de Alto Perú en la provincia de Tacna.

- Para la obtención de los valores de los parámetros de los enlaces ópticos inalámbricos de nuestro estudio, se utilizó la Recomendación UIT-R P.1817-1 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, referido a: Datos de propagación necesarios para el diseño de enlaces ópticos terrenales en el espacio libre.

- La investigación tomó en cuenta las pérdidas ocasionadas por la nieve en localidades con altitud entre 3500 a 4100 m.s.n.m. donde la nevada es moderada, es decir, cae de 0.5 a 4 centímetros por hora y una visibilidad que fluctúa entre 500 y 1000 metros.

- Para la determinación de las pérdidas por niebla, se utilizó además de la visita de campo a la zona de estudio, entrevistas a profesionales que trabajan en SENAMHI zonal 7 (Tacna y Moquegua) que operan dichas estaciones automáticas.

## **1.6 Limitaciones de la investigación**

- Se tuvo limitaciones de acceso a la información del SENAMHI. Si bien se nos suministró la data de las intensidades de las precipitaciones en las 4 estaciones automáticas seleccionadas, no pudimos acceder a la información referente a la visibilidad por niebla, la cual no está disponible al público y solo es manejado por el personal técnico de la institución.

- SENAMHI no cuenta con datos meteorológicas de las precipitaciones de nieve. Sin embargo, la estimación de las pérdidas por nieve, se hicieron en base a la clasificación internacional de nivel de precipitación de nieve caída.

- Se utilizaron Modelos de Predicción Empíricos para la determinación de las pérdidas por lluvia (modelos francés y japonés) y las pérdidas por niebla (modelo de Al Naboulsi). Dichos modelos fueron desarrollados en investigaciones

previas por instituciones científicas y académicas, las cuales son utilizadas por muchos investigadores en la actualidad en el diseño de sistemas óptico no guiados.

- En el año 2020, la Estación Hidrológica Puente Viejo ubicado en la localidad de Locumba, no detectó precipitaciones de lluvia en la zona de cobertura, por lo que solo nos limitamos a la determinación de las pérdidas por niebla.

- El trabajo de investigación solo analizó la incidencia de los hidrometeoros en las bandas ópticas de 850 nm y 1550 nm, donde existentes estudios previos que han desarrollado Modelos de Predicción Empíricos para tales bandas.

## Capítulo II: Marco teórico

### 2.1 Antecedentes de la investigación

#### 2.1.1 Internacionales

Borwankar y Shah (2020) en su trabajo de investigación “Effect of weather conditions on FSO link”, realizaron la simulación de los efectos de la niebla y la lluvia en un enlace de comunicación FSO utilizando el software OptiSystem, llegaron a la siguiente conclusión:

Free Space Optics (FSO) es un sistema de comunicación de línea de visión que puede proporcionar numerosas ventajas de gran ancho de banda, alta velocidad de datos, comunicación segura y muchas más. Pero los efectos adversos de los factores climáticos y ambientales hacen que esta técnica de comunicación sea menos confiable. Por lo tanto, hemos analizado los efectos adversos de la niebla y la lluvia en un sistema FSO y hemos adquirido varios parámetros como el margen de enlace y la atenuación geométrica. También hemos adquirido con éxito diagramas de ojos para estos efectos de la niebla y la lluvia en un sistema FSO en el software OptiSystem (Borwankar & Shah, Effect of weather conditions on FSO, 2020, pág. 4).

En la investigación realizada por Duthon, Colomb y Bernardini (2019) y presentada en el artículo científico: Transmisión de luz en la niebla: La influencia

de la longitud de onda en el coeficiente de extinción, se concluye que:

Las longitudes de onda de 350 nm a 1000 nm tuvieron el mismo comportamiento en la niebla, independientemente de la densidad o el tipo de niebla. Por otro lado, por encima de 1000 nm, pueden producirse diferencias. Para nieblas muy densas ( $V < 30$  m) y en particular, las nieblas de advección, la niebla tuvo un impacto aproximadamente un 10% mayor para las longitudes de onda en el rango del infrarrojo cercano (1000 nm – 2400 nm) que para las longitudes de onda visibles (400 nm – 800 nm). Este tipo de niebla tiene gotas más grandes, teniendo un mayor impacto en longitudes de onda más altas. Por otro lado, para la niebla radiante ligera ( $V > 100$  m), el impacto de la niebla fue igual, o incluso menor, para longitudes de onda superiores a 1000 nm. Esto es muy positivo y confirma la validez del trabajo presentado (Duthon, Colomb, & Brnardini, 2019, pág. 16).

De acuerdo a Gil (2017), en el desarrollo de su investigación denominada “Diseño E Implementación De Un Sistema De Transmisión FSO”, para optar al título de profesional en Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universitaria Agustiniiana; nos muestra el diseño e implementación de un prototipo para transmisión de datos usando tecnología FSO la cual va a permitir la comunicación en tiempo real entre dos equipos de cómputo del laboratorio de Telecomunicaciones, concretamente se busca cambiar la conexión cableada (Ethernet) que existente entre un host (PC) y otro dispositivo de red (switch, router, u otra PC) mediante el uso de un enlace óptico inalámbrico. Es por ello que se realizó un estudio de los elementos principales de las comunicaciones ópticas inalámbricas, yasea desde el medio de transmisión hasta los componentes necesarios para la transmisión y recepción de la señal. Asimismo, se analizó la señal empleada en Ethernet y por qué no se puede transmitir directamente por un medio óptico.

Según Gómez (2017), en su tesis titulada “Modelo de clasificación de hidrometeoros para zonas ecuatoriales a partir de observables de radar meteorológico” realiza el diseño de un clasificador de hidrometeoros para zonas ecuatoriales a partir de datos que se observa en radares meteorológicos.

Por otro lado, Suarez (2017), en su tesis: “Estudio y simulación de un sistema de comunicaciones usando la tecnología FSO”, llegó a las siguientes conclusiones:

En este trabajo se estudiaron los fundamentos teóricos y prácticos de los sistemas que utilizan la tecnología Free Space Optics y se analizaron varias de sus características. Esta tecnología permite proporcionar un enlace de calidad y estable de manera sencilla y rápida. A pesar de que en la actualidad este tipo de sistemas de comunicación se utiliza en enlaces de hasta 5 Km mediante la simulación presentada en este trabajo se demostró que se pudieran alcanzar distancias de hasta 35 Km si se incorporan amplificadores ópticos en varias partes del sistema (Suarez, 2017, pág. 42).

Según Gallardo y Medina (2015) en el desarrollo de su investigación denominada “Propuesta De Un Prototipo De Sistema De Comunicación En El Espacio Abierto En Base De Tecnología Láser Con  $\lambda=1550$ ” , para obtener el grado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica de la Escuela Superior De Ingeniería; mencionando como objetivo principal elproponer un prototipo para un sistema de comunicación punto a punto enespacio libre para ello se utilizará la tecnología láser, con estos resultados se realizarán las simulaciones pertinentes. Su propuesta de prototipo y lasimulación que presenta el autor va a permitir que en México se reúna la información del uso de este tipo de nuevas tecnologías, con el propósito de llevarlos a cabo, situándose de esta manera entre los países para que mejoren su forma de transmisión información, obteniendo la mayor seguridad.

De acuerdo a Paliz (2014), en su tesis titulada “Estudio de variables hidrometeorológicas para la implementación de cultivos en terrazas de edificios urbanos, como estrategia de adaptación a los efectos del cambio climático en la ciudad de Quito” Nos habla sobre el uso del estudio de la hidrometeorológica en el campo de la agricultura, con el objetivo de elaborar un estudio hidro climatológico y un mapeo dirigido a jardines en terrazas como estrategia para adaptación a los efectos del cambio climático en Quito, Ecuador.

Según Suarez (2014), en su tesis de Maestría: “Técnicas de transmisión óptica en el espacio libre (FSO): Fundamentos teóricos, tecnologías y aplicación.” Llegó a las siguientes conclusiones:

La capacidad de transmisión de un sistema FSO actualmente es de hasta 2,5 Gbit/s, lo que lo convierte en un sistema de altas tasas de velocidades, de manera que puede desempeñarse como soporte secundario de una red o como conexión principal de una red (backbone) ..... Bajo condiciones atmosféricas críticas en un clima tropical, se lograron buenos resultados en la calidad de la señal recibida, que, aunque no cumple con los valores característicos para la tasa de bits erróneos (BER), no afecta el correcto funcionamiento de los enlaces (Suarez, 2017, pág. 112).

Al respecto García (2013), en su tesis titulada “Clasificación Bayesiana de Hidrometeoros Orientados a la Estimación de la Cantidad Precipitada a partir de las Medidas de Radar Polarimétrico” propuso Generar estimaciones de cantidad de precipitación a partir de la combinación ponderada de las clases de hidrometeoros

Khan (2012) en su trabajo de tesis “FSO Channel Characterization for

Continental Fog Environments”, para obtener el Grado de Doctor PHD de la Universidad Tecnológica de Graz Austria, presenta un análisis detallado de la atenuación de la niebla medida en Graz (Austria), Milán (Italia) y Praga (República Checa). Además, Khan mediante este trabajo de investigación:

Se explora el análisis de linealidad u homogeneidad de las atenuaciones ópticas. Se observa mediante el análisis de linealidad de la atenuación óptica que el supuesto general de linealidad no puede ser válido para trayectos de mayor longitud. Esta tesis proporciona además en detalle el análisis de modelos de atenuación óptica basados en la visibilidad y proporciona nuevos conocimientos sobre estos modelos empíricos.

Los datos de atenuación de la niebla de cinco meses se recopilaron para investigar la linealidad u homogeneidad de las atenuaciones ópticas en las dos longitudes de trayectoria de 100 m y 853 m utilizando la longitud de onda de 1550 nm. Los datos registrados de atenuaciones ópticas medidas utilizando la longitud de onda de 1550 nm se seleccionaron para el análisis, teniendo en cuenta la creciente importancia de la ventana de 1550 nm para el futuro sistema FSO (Khan, 2012, pág. 6).

Al respecto Sandalidis y Varoutas (2012), en su artículo “Weather effects on FSO network” del diario “Journal of Optical Communications and Networking; nos menciona sobre los diversos factores climáticos que afectan la transmisión por FSO, como por ejemplo la nieve, niebla y la lluvia. Asimismo, determinan la cantidad de transeptores se necesitan para un determinado enlace o la distancia del enlace que esta puede cubrir con cierto número de transeptores. A la vez encuentran que los cálculos de pérdidas están sujetas a los modelos de pérdida que se usen y dependiendo de la modulación que se emplee.

Awam et al. (2009), en su trabajo de investigación sobre la caracterización

de la atenuación de la niebla continental o de radiación y la atenuación por nieve, utilizando la metodología de variación de tiempo de la potencia de recepción óptica durante la niebla continental y la nevada seca en una distancia de enlace de 80 m, llegaron a la siguiente conclusión:

Caracterizamos las atenuaciones ópticas en condiciones de niebla y nieve seca basadas en estadísticas de probabilidad acumulativa. Esta caracterización proporciona información interesante para el diseño del margen de desvanecimiento de los enlaces ópticos terrenales. Se ha informado de una considerable dependencia estacional y diurna, especialmente para los casos de niebla continental que pueden tener un impacto significativo en la disponibilidad del enlace FSO. Es imperativo ajustar el margen de desvanecimiento a las variaciones estacionales y diurnas para mejorar la disponibilidad en condiciones críticas como niebla densa y nieve. Observamos especialmente en el caso de niebla continental que existen fuertes diferencias entre los meses de verano y los meses de invierno, así como entre los diferentes días (Awan, y otros, 2009, pág. 13).

Caizaluisa (2008), desarrollo la investigación denominada “Diseño De Una Red Con Tecnología Láser Free Space Optics (FSO), Para El Campus De La Escuela Politécnica Nacional Y Su Comparación Con La Red De fibra Óptica”, de su proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional ; en la presente realiza el diseño de una red con tecnología FSO, en donde se realizó diferentes estudios tales como: el análisis comparativo entre la fibra óptica y FSO, datos de los factores que limitan el desempeño de la tecnología como las pérdidas relacionadas con la atmósfera; sus costos e implementación, etc. Con el propósito de recalcar las ventajas que presenta esta tecnología, es decir: bajas interferencias, alto ancho de banda y no se requiere solicitar una banda de frecuencias. Asimismo, menciona que hay redes de área local (LAN) que requieren de enlaces de bajo presupuesto y

facilidad en su despliegue. Es por ello que surge la necesidad de realizar un estudio de dicha tecnología con la finalidad de presentarla como una nueva opción u alternativa de comunicación inalámbrica en el país de Ecuador.

Según León y Vaca (2008), en su tesis: “Estudio de factibilidad y simulación de una red inalámbrica óptica basada en la tecnología FSO (Free Space Optics), para mejorar el rendimiento del backbone actual de la ESPE Campus SANGOLQUI.”, concluyeron que:

En cuanto a la simulación establecida, se demostró las ventajas que se dan, si se produjera la implementación física de una Red Inalámbrica óptica, para la ESPE campus Sangolquí. Tomando en cuenta que, esta red permitirá una mejora en el rendimiento del backbone actual de la ESPE; considerando, que los nodos que se han establecido para el diseño de los enlaces ópticos, permiten tener cerca del 99.99% de disponibilidad del servicio; cuyo valor es excelente. Es por eso que la ESPE ganaría mucha ventaja implementando este tipo de red (León & Vaca, 2008, págs. 171-172).

En el artículo científico “Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere”, desarrollado por Al Naboulsi, Sizun y de Fornel (2005), se presenta un Modelo de Predicción que permite la evaluación de la atenuación atmosférica debido a la presencia de dos tipos de niebla: niebla por advección y por radiación o convección, en el rango de longitud de onda de operación 690 a 1550 nm y para visibilidades de 50 a 1000 metros. Dentro de las conclusiones a los que llegan se tienen:

Presentan algunos resultados experimentales (atenuación en función de la visibilidad). La comparación de las mediciones con nuestro modelo muestra una buena concordancia para la baja visibilidad donde los modelos Kruse y

Kim se desvían notablemente de las mediciones.

La comparación de los datos experimentales permite validar los modelos sugeridos en la literatura. Estos últimos permiten controlar los niveles de potencia de emisión de los futuros enlaces ópticos de espacio libre en su garantía de una dinámica suficiente teniendo en cuenta la variabilidad de las condiciones de propagación óptica ( Al Naboulsi, Sizun, & Fornel, 2005, pág. 2).

De acuerdo a Colvero, Cordeiro y Von der Weidn (2005), en el desarrollo de su investigación denominada “New Proposal for Real Time Measurements of Visibility and Signal Levels in Free Space Optical Systems”, con respecto a los valores obtenidos de las mediciones efectuadas de visibilidad concluyen que:

Nuestro experimento cubrió los rangos visuales desde la densa niebla costera de ladera ascendente hasta la atmósfera clara y, en todos los casos, el enlace a 9.100 nm funcionó mejor que los de 780 nm y 1.550 nm, con una disponibilidad cercana al 99%, mientras que el IR cercano podría alcanzar la marca de 70%.

Por supuesto, la tecnología comercial actual todavía se beneficia de longitudes de onda más cortas, principalmente debido a la disponibilidad de fuentes y detectores de bajo costo. Sin embargo, las nuevas tecnologías pueden producir dispositivos competidores para la ventana de infrarrojos lejanos, por lo que nuestros resultados muestran que vale la pena trabajar en el desarrollo de dispositivos y sistemas adecuados porque el canal óptico funciona mejor en longitudes de onda largas en la mayoría de los casos (Colvero, Cordeiro, & Von der Weidn, 2005, pág. 12).

### 2.1.2 Nacionales

Según Quesquén (2019), en el desarrollo de su investigación denominada “Diseño Y Configuración De Un Sistema De Comunicaciones Basado En Transmisión Óptica En El Espacio Libre - FSO y Redundancia Con Enlace Wireless Punto A Punto De 5.8 GHz Para Sedes Empresariales En La Ciudad De Lima”, para obtener el grado de Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional Tecnológica De Lima Sur; donde explica el diseño de una red óptica inalámbrica la cual servirá para el envío de voz y datos en la ciudad de Lima, es decir se diseñará esta red para comunicar dos sedes que se ubican dentro del distrito de San Isidro, cabe mencionar que este tipo de red actualmente está en constante crecimiento por su nivel de funcionamiento y versatilidad , debido a que operan el medio ambiente sin la necesidad de cables o equipos complejos tanto en su manejo como la configuración .

De acuerdo a Gallegos (2009), en el desarrollo de su investigación denominada “Diseño De Una Red Óptica Inalámbrica Para El Envío De Voz Y Datos En Áreas No Urbanas”, para obtener el grado de Ingeniero Electrónico de la Universidad Católica del Perú ; donde nos explica el diseño de una red óptica inalámbrica para el envío de voz y datos en áreas no urbanizadas, es decir ; se diseñará esta red para comunicar una base militar, con un cañón de disparo la cual está ubicado en un promedio de 3 kilómetros de radio y se ubicara en zona de frontera; con la finalidad de contar con un sistema que envíe información a alta velocidad (voz e imágenes), confiable e inmune a la interferencia electromagnética; debido a que actualmente la comunicación (vía radio frecuencia), es deficiente en exactitud y tiempo , asimismo presenta una alta sensibilidad a la presencia de interferencia electromagnética.

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 Los meteoros

Se llaman meteoros a una serie de sucesos observables de particular significación física en la atmósfera. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), existen cuatro categorías de meteoros, a saber:

1. **Hidrometeoros:** Aquellos en los que el principal activo es el agua o el hielo (OMM, 1993, p.3).
2. **Litometeoros:** Si el componente dominante son partículas sólidas (OMM, 1993, p.5).
3. **Fotometeoros:** En los que las leyes ópticas son fundamentales para su comprensión (OMM, 1993, p.5).
4. **Electrometeoros** o fenómenos eléctricos (OMM, 1993, p.5).

Los meteoros no tienen por qué corresponder exclusivamente a uno de los cinco grupos.

#### 2.2.1.1 Hidrometeoros

Según un informe de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1993), un meteoro “es un fenómeno observado en la atmósfera o sobre la superficie de la tierra, que consiste en una suspensión, una precipitación, o un depósito de partículas líquidas, acuosas o no, o de partículas sólidas, o un fenómeno de la naturaleza de manifestación óptica o eléctrica.”

Por lo tanto, un hidrometeoro o meteoro acuoso será un “meteoro producido por el agua en estado líquido, sólido y de vapor” (Martínez et al., 2014), es decir:

- una suspensión de partículas acuosas en la atmósfera: nubes, niebla.
- una precipitación de partículas acuosas desde la atmósfera: lluvia, nieve o granizo.
- una deposición de partículas acuosas: rocío, escarcha o helada.

Los principales hidrometeoros relativos a la precipitación se muestran a continuación:

**Llovizna:** precipitación uniforme formada por numerosas gotitas de agua de diámetro inferior a 0.5 mm (OMM, 1993, p.112).

**Lluvia:** precipitación formada por gotas de agua de diámetro mayor a 0.5 mm (OMM, 1993, p.112).

**Nieve:** Precipitación de cristales de hielo, aislados o aglomerados, que caen desde una nube (OMM, 1993, p.113).

**Cinarra:** Precipitación de partículas de hielo muy pequeñas opacas y blancas que caen desde una nube. Estas partículas son bastante chatas o elongadas; su diámetro es generalmente inferior a 1 mm (OMM, 1993, p.113).

**Granizo:** Precipitación de partículas de hielo transparentes, o parcial o enteramente opacas (piedras de granizo), habitualmente de forma esferoidal, cónica o irregular y de diámetro que muy generalmente se encuentra entre 5 y 50 mm, que caen desde una nube ya sea separadamente o aglomerados en bloques irregulares (OMM, 1993, p.114).

Por otra parte, los hidrometeoros relativos a la suspensión de partículas acuosas en la atmósfera, se muestran a continuación:

**Niebla:** Conjunto de minúsculas partículas de agua en suspensión junto al suelo que provoca una disminución de la visibilidad horizontal a valores inferiores a 1 km (OMM, 1993, p.111).

**Neblina** (bruma): Conjunto de minúsculas partículas de agua en suspensión con visibilidad superior a 1 km. pero inferior a 10. (OMM, 1993, p.111).

Por otra parte, los hidrometeoros relativos a la deposición de partículas acuosas en la atmósfera, se muestran a continuación:

**Rocío:** Depósito de gotas de agua sobre objetos, cuyas superficies están suficientemente frías, en general por radiación nocturna, como para producir la condensación directa del vapor de agua contenida en el aire circundante (OMM, 1993, p.117).

**Escarcha:** Un depósito de hielo, generalmente asume la forma de escamas, agujas y que se forma sobre objetos cuyas superficies están suficientemente enfriadas, generalmente por radiación nocturna (OMM, 1993, p.117).

### 2.2.2 Enlaces ópticos no guiados

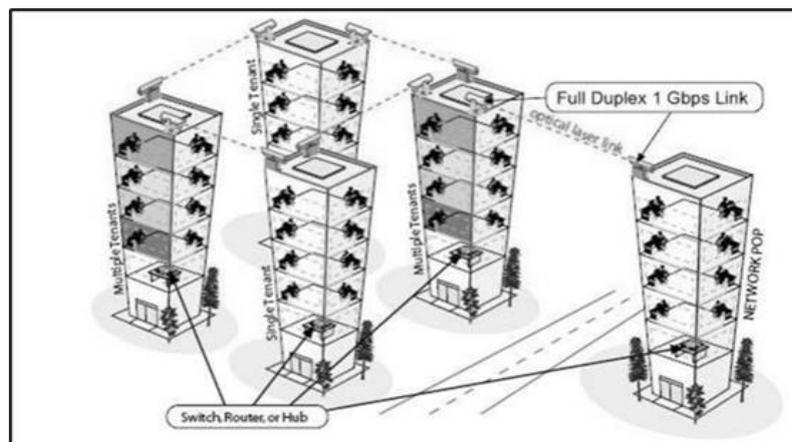
Un enlace óptico en espacio libre es una transmisión inalámbrica láser por infrarrojos Punto a Punto diseñada para la interconexión de dos puntos situados en línea de visión directa. Los sistemas operan tomando una señal estándar de datos o telecomunicaciones, convirtiéndola a formato digital y enviándola a través del espacio libre. El transporte utilizado para la transmisión de esta señal es la luz infrarroja, generada por LED de alta potencia o diodo(s) láser de baja potencia.

Los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas están recibiendo actualmente una gran consideración por su capacidad para conseguir elevadas tasas binarias como consecuencia directa del enorme ancho de banda disponible. Su

aplicación puede tener un gran interés tanto en zonas urbanas densamente pobladas como en zonas rurales donde la diseminación no justifique el despliegue de enlaces cableados, tal como se aprecia en la figura 1.

**Figura 1**

Red de enlaces ópticos no guiado



Nota. Adaptado de *Enlaces ópticos vía espacio libre (FSO)*, por I. Klenner y G. Urrutia, 2014, Universidad Técnica Federico Santa María (<https://cutt.ly/HESAWj8>).

El sistema óptico no guiado que utilizan la tecnología FSO, es uno de los más utilizados hoy en día para cubrir las necesidades de conexión hacia la última milla, interconexión de puntos, respaldo de enlaces y redes ópticas, etc. Estos enlaces tan robustos ofrecen a los usuarios varias ventajas:

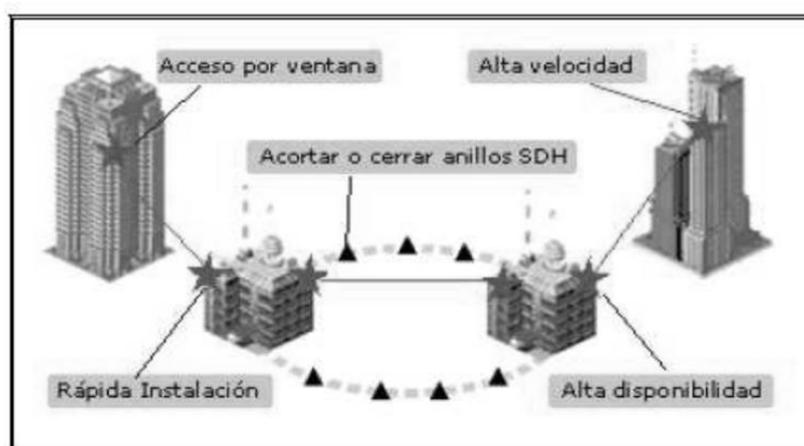
- Libre de interferencia RF / EM
- Solución óptica de alta velocidad
- No requiere licencia de operación
- Rápida instalación

- Alta disponibilidad

Tal como se aprecia en la figura 2, un enlace óptico puede facilitar la interconexión con redes físicas de alta velocidad.

### Figura 2

*Un enlace óptico FSO dentro de una MAN*



*Nota.* Tomado de *Diseño de una red con tecnología láser inalámbrica para el Campus de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil*, por V. Barros et al, 2014, Universidad Técnica Federico Santa María (<https://cutt.ly/TESPgwU>).

#### 2.2.2.1 Efectos a considerar en un enlace óptico no guiados

Las señales ópticas no sólo se atenúan al propagarse a través de la atmósfera, sino que también el haz óptico a menudo se ensancha, se desenfoca o puede cambiar de dirección.

Estos efectos dependen principalmente de la longitud de onda, de la potencia de salida y de las condiciones de la atmósfera. Cuando la potencia es baja, el enlace se comporta de forma lineal y los efectos predominantes son absorción, dispersión y los ocasionados por el centelleo atmosférico. En cambio, cuando la potencia es

elevada, aparecen nuevos efectos no lineales. Además, la luz solar puede repercutir negativamente en las prestaciones de estos enlaces, fundamentalmente cuando se encuentra alineada con los mismos.

#### ***2.2.2.2 Dispersión atmosférica selectiva en frecuencia***

Cuando la luz interactúa con partículas de tamaño mayor que la longitud de onda óptica, se origina lo que se conoce como difusión de Mie. Así, la partícula absorbe parte de la luz transmitida y la otra parte la refleja, produciéndose una mayor dispersión hacia delante. Las partículas implicadas en este fenómeno son los llamados aerosoles (humos, polvo en suspensión, etc.). En este caso, la atenuación producida en el haz de luz transmitido obedece a expresiones heurísticas dependientes de la longitud de onda óptica, aunque con un peso cada vez menor cuanto peores sean las condiciones de visibilidad del enlace.

#### ***2.2.2.3 Dispersión no selectiva***

Este tipo de dispersión se origina cuando todas las longitudes de onda son dispersadas más o menos con la misma intensidad, esto es, el factor de atenuación que sufre el haz de luz transmitido es el mismo independientemente de la frecuencia óptica que lo caracterice.

Nuevamente, la magnitud de tal atenuación viene directamente relacionada con la visibilidad, para los casos de niebla por advección y niebla por convección; y por la intensidad de lluvia o nieve en el caso en el que se produzcan tales fenómenos meteorológicos.

### **2.2.3 Estudio del Margen del Enlace**

Es importante efectuar el análisis del margen de enlace en un sistema de comunicación óptica no guiada, porque están relacionados con factores de atenuación en el espacio libre, que pueden cambiar en el tiempo debido a la

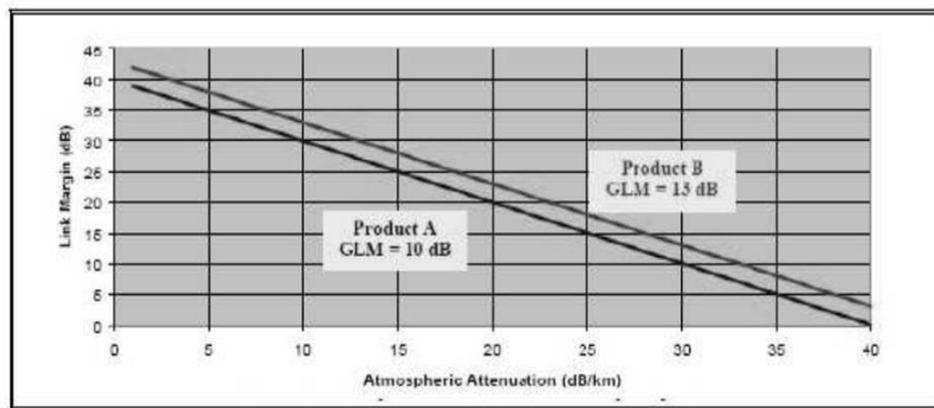
presencia de fenómenos atmosféricos relacionados con la actividad solar y la presencia de hidrometeoros.

Para el óptimo intercambio de datos es necesario tomar en cuenta la potencia disponible en el detector óptico en el momento que la señal ya partió del transmisor.

Se torna imprescindible comprender como influye la longitud del enlace, considerando que el factor distancia es importante debido a que la potencia del haz de luz recibido puede variar en periodos de tiempo. Para hacer un enlace más confiable, se debe dejar un margen de enlace más grande comparado con el nivel nominal mínimo de potencia recibida. La figura 3 ilustra lo manifestado.

**Figura 3**

*Margen de enlace versus atenuación para 1 km de alcance*



*Nota.* Tomado de *Diseño de una red con tecnología láser inalámbrica para el Campus de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil*, por V. Barros et al, 2014, Universidad Técnica Federico Santa María (<https://cutt.ly/TESPgwU>).

#### 2.2.4 Clasificación por banda óptica de operación

Actualmente los transmisores FSO tienen un rango de operaciones según la

banda a la que pertenece. En mayo de 2002, la organización del UIT-T dividió el sistema de comunicación por fibra óptica en seis bandas:

#### ***2.2.4.1 Banda de operación-O***

Denominada como Banda original, trabaja en el rango de longitudes de onda es de 1260 – 1360 nm trabaja en la segunda ventana.

#### ***2.2.4.2 Banda de operación-E***

Denominada como Banda Extendida, trabaja en el rango de longitudes de onda es de 1360 – 1460 nm. Solo es accesible a fibras allwave.

#### ***2.2.4.3 Banda de operación-S***

Denominada como Banda corta, el rango de longitudes de onda es de 1460 – 1530 nm. Trabaja en la parte alta de la tercera ventana de operación.

#### ***2.2.4.4 Banda de operación-C***

Denominada como Banda Convencional, trabaja en el rango de longitudes de onda es de 1530 – 1565 nm. Trabaja en la tercera ventana de operación en el rango de EDFA.

#### ***2.2.4.5 Banda de operación-L***

Denominada como Banda larga, trabaja en el rango de longitudes de onda es de 1565 – 1625 nm. Trabaja en el límite de rango EDFA.

#### ***2.2.4.6 Banda de operación-U***

Denominada como Ultra Larga, trabaja en el rango de longitudes de onda es de 1625 – 1675 nm. Aun no se conoce su rango de operación.

La tabla 1 muestra las diferentes bandas de operación donde se emplean los

transmisores ópticos.

**Tabla 1**

*Banda de operación para transmisores FSO*

Banda de frecuencia	Ventana	Rango de longitud de onda (nm)	Rango de frecuencia (THz)
/	1	850(770-910)	/
Banda original	2	1260-1360	237.9-220.4
Banda extendida	5	1360-1460	220.4-205.3
Banda de longitud de onda corta	/	1460-1530	205.3-195.9
Banda convencional	3	1530-1565	195.9-191.6
Banda de longitud de onda más larga	4	1565-1625	191.6-184.5
Banda de longitud de onda de gran longitud	/	1625-1675	184.5-179.0

*Nota.* Esta tabla fue tomada de Oton (2005)

Cabe resaltar que según el uso del enlace se realiza la elección de la fuente óptica, basándose en requisitos como costo, potencia, tiempo de vida, modulación, seguridad para el ojo humano, tamaño y compatibilidad con otros sistemas de comunicación. Además, el transmisor preferiblemente debe tener estas características: ser de bajo consumo, ser capaz de entregar alta potencia, ser altamente confiable frente a cambios de temperatura y no ser muy extenso (Suarez Serrano, 2014). La tabla 2 muestra las fuentes ópticas más utilizadas, según su longitud de onda de operación.

**Tabla 2***Fuentes ópticas más utilizados en FSO*

Wavelength (nm)	Fuentes Ópticas	Comentario
		Barato y disponible fácilmente
~850	VCSEL	No enfriamiento activo Baja densidad de potencia Confiable hasta ~10Gbps
~1300/~1550	Fabry-Perot Laser con retroalimentación distribuida.	Poca seguridad visual 50 veces mayor densidad de potencia (100 mW/m <sup>2</sup> ) Compatible con EDFA Alta velocidad, 40 Gbit/s
~10,00	Láser Cascada	Caro y relativamente nuevo Muy rápido y alta sensibilidad
Infrarrojo Cercano	LED	Menos afectado por la niebla No trabaja detrás de cristales Barato Circuito Simple Baja potencia y tasa de bit

*Nota.* Esta tabla fue tomada de Ledesma (2012)

La elección de una fuente láser adecuada para sistemas FSO obedece a varios parámetros. Por ejemplo, la longitud de onda debe estar relacionada con la ventana atmosférica, la cual está entre los 850nm y 1550nm. Adicionalmente, las fuentes generalmente requieren bajas temperaturas de operación. Otros factores importantes en las fuentes para FSO están relacionados con la tecnología de fabricación empleado, como son la potencia de transmisión, tiempo de vida, su capacidad de modulación, tamaño de la fuente y la seguridad que ofrece para evitar daños al ojo humano.

## **2.3 Definición de conceptos**

### **2.3.1 Atenuación Atmosférica**

La atenuación atmosférica es definida por la “Ley de Beer- Lambert”, la cual explica la atenuación de la luz viajando a través de la atmósfera debido a la absorción y dispersión. (Caizaluisa, 2008).

### **2.3.2 Coeficiente de absorción.**

Es el resultado de la absorción de energía que hace el medio (atmósfera) y ciertas partículas.

### **2.3.3 Coeficiente de dispersión de Rayleigh.**

Es el resultado de la interacción de la luz con partículas de tamaño pequeño en relación a la longitud de onda.

### **2.3.4 Coeficiente de dispersión de Mie.**

Aparece cuando las partículas incidentes son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la onda transmitida.

### **2.3.5 Divergencia del láser como radiación infrarroja.**

Consiste en un aumento del diámetro del haz con la distancia.

### **2.3.6 Espectro Radioeléctrico**

Conjunto de ondas electromagnéticas donde su frecuencia se basa

convencionalmente entre 3 KHz y 3000 GHz y se propagan por el espacio sin interfaz artificial. (Gil, 2017)

### **2.3.7 F.S.O. (del acrónimo inglés Free Space Optical)**

Se refiere a la propagación de la señal óptica no guiada en el espacio libre.

### **2.3.8 LASER (del acrónimo inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).**

Es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente tanto espacial como temporalmente.

### **2.3.9 LED (del acrónimo inglés Light Emitter Diode).**

Es un dispositivo electrónico semiconductor denominado diodo emisor de luz no coherente.

### **2.3.10 Luz coherente.**

Conjunto de ondas luminosas que están en fase unas con otras. Es decir, cuando es conocido el valor instantáneo del campo eléctrico en uno de los puntos, es posible predecir el del otro.

### **2.3.11 Margen del enlace óptico.**

Es la diferencia entre el valor mínimo de entrada requerido para discernir una onda, es decir la sensibilidad del receptor y el máximo que sobrecarga el receptor FSO. Un concepto básico sobre el margen de enlace es el “rango dinámico” en un sistema FSO. Su principal definición es la diferencia entre el máximo y el

mínimo nivel de potencia que un sistema FSO puede permitir (Caizaluisa, 2008)

### **2.3.12 Pérdida Óptica**

La causa primordial de pérdida en un sistema FSO se debe a la imperfección entre los lentes y otros elementos ópticos. Por ejemplo, el lente transmite el 96% de luz y el porcentaje restante se absorbe. Entonces esta cantidad llamada “pérdida óptica” sucede en la planificación del enlace. El monto de pérdida se basa de las características del equipo y la calidad de los lentes. Este valor es medido desde la fabricación de los componentes ópticos. Por ejemplo, asumimos una potencia de la señal de salida de 4mW que corresponde a 6 decibeles por milivatio, si la pérdida óptica de la señal es de 4dB, existe atenuación en la potencia, teniendo como consecuencia una substracción de 4dB de la señal original (6dB). (Caizaluisa, 2008)

### **2.3.13 Pérdida Geométrica**

La pérdida geométrica hace referencia a las pérdidas que existen debido a la divergencia del haz óptico. Los rayos láser presentan un margen de error en su direccionamiento, estos van "abriéndose" conforme van avanzando por la interfaz. La divergencia explica cuanto es el ángulo de apertura del láser. Este ángulo es directamente proporcional al área de cobertura en el extremo remoto, y es inversamente proporcional a la potencia recibida en el receptor del equipo remoto. (Caizaluisa, 2008)

### **2.3.14 Sensibilidad Del Receptor**

Es una función de la frecuencia de modulación de la señal recibida; frecuencias altas contienen pocos fotones que pueden ser detectados y recibidos, causando errores en diferenciar si es 1 y 0 lógico. (Caizaluisa, 2008).

## Capítulo III: Marco Metodológico

### 3.1 Hipótesis

#### 3.1.1 Hipótesis general

**“La presencia de hidrometeoros en las zonas rurales de la Región Tacna produce un incremento en las pérdidas del enlace y afecta la operatividad de un enlace óptico no guiado.”**

#### 3.1.2 Hipótesis específicas

- La disminución de la visibilidad de un enlace óptico no guiado por la presencia de los **hidrometeoros**, reduce el margen del enlace óptico.
- En el diseño de un enlace óptico no guiado, se deben considerar las pérdidas ocasionadas por los hidrometeoros, los cuales inciden directamente en la reducción del margen del enlace en la zona de estudio.
- Las pérdidas por hidrometeoros en un enlace óptico no guiado se producen mayoritariamente por la atenuación por niebla y por la nieve.

### 3.2 Variables

#### 3.2.1 Identificación de la variable independiente

- Variable independiente: Hidrometeoro.

### *3.2.1.1 Indicadores*

#### **Dimensión 1: Pérdidas por lluvia**

##### **Indicadores**

Intensidad de precipitación (mm/hr)

Coefficiente de atenuación por lluvia (dB/km)

Longitud del enlace (km)

#### **Dimensión 2: Pérdidas por dispersión de Mie**

##### **Indicadores**

Visibilidad (metros)

Longitud de onda de operación (nm)

Longitud del enlace (metros)

Coefficiente de atenuación atmosférica

Transmitancia óptica (metros<sup>-1</sup>)

### *3.2.1.2 Escala para la medición de la variable*

La escala de medición para la variable independiente, está relacionado con las dimensiones para obtener las pérdidas por lluvia y por dispersión de Mie, se miden en unidades logarítmicas dB o decibelios.

### **3.2.2 Identificación de la variable dependiente**

- Variable dependiente: Enlace óptico no guiado.

### ***3.2.2.1 Indicadores***

#### **Dimensión 1:** Margen del Enlace

##### **Indicadores**

Pérdidas ópticas del sistema

Pérdidas geométricas

Pérdidas por dispersión de Mie (niebla)

Pérdidas por lluvia

Pérdidas por nieve

#### **Dimensión 2:** Dimensionamiento del enlace

##### **Indicadores**

Potencia de emisión óptica

Sensibilidad del detector óptico

Longitud del enlace

Longitud de onda de operación del enlace

### ***3.2.2.2 Escala para la medición de la variable***

La escala de medición para la variable dependiente, está relacionado con las dimensiones planteadas para obtener el Margen del Enlace (Margin Link) y se mide en unidades logarítmicas dB o decibelios.

## **3.3 Tipo y diseño de investigación**

Este trabajo de investigación es de tipo aplicada, llamada también “investigación práctica o empírica”, porque busca la aplicación o la utilización de los conocimientos que se adquieren producto de la investigación. Este tipo de

investigación depende de los resultados y avances de la investigación tipo básica, lo que permite que se encuentren muy vinculadas. En una investigación empírica, lo que le interesa al investigador, primordialmente, son las consecuencias prácticas.

El diseño de investigación es no experimental transversal, debido a que se observa directamente su contexto natural, y finalmente se realiza su análisis respectivo.

La recolección de datos, se realizan en un solo momento o intervalo de tiempo, para nuestro caso en el año 2020.

En cuanto a la metodología de investigación, este trabajo de tesis presenta un enfoque cualitativo, puesto que se analizará tecnología de los enlaces ópticos no guiados desde el punto de vista de la calidad del servicio que presta y cuantitativo porque se presenta una serie de expresiones matemáticas con las que se realizará el cálculo de las pérdidas ocasionadas por los hidrometeoros.

### **3.4 Nivel de investigación**

La investigación presentada será de nivel correlacional ya que se trabajará con dos variables, la independiente los hidrometeoros y la dependiente el enlace óptico no guiado.

### **3.5 Ámbito y tiempo social de la investigación**

La investigación considera las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) ubicadas en las zonas rurales de las cuatro provincias de la Región Tacna, y se estudiará la relación entre las variables en el periodo enero-diciembre del 2020.

Los resultados de la investigación buscan conocer la incidencia de las pérdidas atmosféricas debido a la lluvia, la nieve y la niebla en la operatividad de

un enlace óptico no guiado a través del parámetro conocido como margen del enlace o link margin.

### **3.6 Población y muestra**

#### **3.6.1 Unidad de estudio.**

La unidad de estudio está conformada por las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), ubicadas en las provincias de Jorge Basadre, Tacna, Tarata y Candarave pertenecientes a la Región Tacna.

#### **3.6.2 Población.**

Según el reporte del SENAMHI a setiembre del 2020 existían 18 estaciones meteorológicas en la Región Tacna, de las cuales 13 eran estaciones meteorológicas convencionales y 5 estaciones meteorológicas automáticas.

#### **3.6.3 Muestra.**

De acuerdo a las recomendaciones efectuadas por el SENAMHI-Tacna, se seleccionó una estación automática hidrológica o meteorológica, ubicada en cada una de las cuatro provincias de nuestra Región para nuestro estudio.

En la Región Tacna existen 18 estaciones automáticas, de las cuales 5 son estaciones meteorológicas automáticas y 13 son estaciones hidrológicas automáticas.

La selección de las estaciones automáticas, se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3***Estaciones meteorológicas seleccionadas de la Región Tacna*

<b>Provincia</b>	<b>Localidad</b>	<b>Denominación</b>	<b>Tipo de estación automática</b>
Tacna	Alto Perú	Bocatoma El Ayro	Meteorológica
Tarata	Tarata	Tarata	Meteorológica
Candarave	Candarave	Candarave	Meteorológica
Jorge Basadre	Locumba	Puente Viejo	Hidrológica

*Nota.* Elaboración propia

### 3.7 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

#### 3.7.1 Técnicas de recolección de los datos.

Se emplearon las siguientes técnicas para la recolección de datos:

- **Técnica de análisis documental**, el cual hace uso de los documentos confiables ya **existentes** y de fuentes similares de información como las fuentes de datos.

- **Técnica de observación no experimental**, el cual se efectuará a través de estudio de campo. El estudio de campo permitirá obtener información de la infraestructura eléctrica y del equipamiento existente en la zona de estudio, información necesaria para hacer la propuesta de interconexión.

#### 3.7.2 Instrumentos para la recolección de los datos

Se utilizaron como fuentes secundarias:

- **Libros especializados** sobre el espectro electromagnético, las bandas de frecuencias ópticas, los servicios de telecomunicaciones, principios de la transmisión óptica, enlaces ópticos no guiados;
- **Catálogos** sobre especificaciones técnicas de equipos FSO;
- **Información suministrada** por el SENAMHI sobre precipitaciones pluviales en zonas rurales de la Región Tacna durante el período enero-diciembre 2020;
- **bibliotecas virtuales** de artículos especializados referidos a la investigación;
- **Direcciones web** de Estándares Internacionales que regula el sistema a proponer, conceptos sobre propagación de línea de vista, parámetros de un enlace óptico no guiado, incidencia de la actividad atmosférica en la transmisión óptica;
- **Software** de Hoja de datos Excel y de ubicación geo-referenciada GOOGLE EARTH para la ubicación cartográfica de las localidades rurales seleccionados en la zona de estudio.

Se utilizaron como fuentes primarias:

- **Fichas de observación** para registrar la información obtenida en el estudio de campo;
- **Equipos audio-visuales** como cámara fotográfica o cámara de video, para el registro de imágenes de la zona de estudio como parte del estudio de campo.

### **3.8 Procesamiento, presentación, análisis e interpretación de los datos**

El procesamiento de datos de mi investigación, consistió en la secuencia de actividades planificadas mediante el cual los datos individuales se agrupan y estructuran con el propósito de responder al problema de Investigación, a los objetivos planteados y a las hipótesis por comprobar.

Se efectuó un análisis cualitativo de la información obtenida del SENAMHI Tacna y del estudio de campo en la zona de estudio. Se elaboró una base de datos

utilizando EXCEL, que mediante filtros presentó la información de la intensidad de lluvia por día en los meses de precipitación.

Mediante gráficas de los meses de enero, febrero, marzo y diciembre del 2020 se presentó la variación de la intensidad de lluvia en mm/hr para cada una de la estación automáticas. Los valores máximos en cada mes sirvieron para determinar las pérdidas máximas por lluvia en el enlace óptico no guiado.

Mediante el estudio de campo se pudo determinar por observación la visibilidad en la zona de estudio. Dichos valores fueron utilizados para determinar las pérdidas atmosféricas debido a la presencia de niebla, conocida como dispersión de Mie.

Utilizando el método matemático y los parámetros de un enlace óptico no guiado, se determinó el margen del enlace (margin link), cuyos valores obtenidos indicaron el nivel de incidencia de los hidrometeoros en la operatividad del enlace.

Una vez analizado los resultados del margen del enlace, se explicó los efectos que producen dichos resultados como consecuencia del planteamiento efectuado. Se realizó la interpretación de los resultados obtenidos, relacionados con la incidencia de los hidrometeoros en un enlace óptico no guiada en la zona de estudio.

Las hipótesis planteadas fueron comprobadas con los resultados obtenidos por cada estación automática evaluada en la zona de estudio. Por ser una investigación aplicada, no se requirió la contrastación de las hipótesis por el método estadístico.

Finalmente se presentarán las conclusiones y recomendaciones producto de los resultados obtenidos en mi investigación aplicada.

## Capítulo IV: Determinación de las pérdidas por hidrometeoros

### 4.1 Consideraciones previas

En este capítulo se utilizó las mediciones suministradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) a través de sus 4 estaciones automáticas para obtener las estadísticas de la actividad meteorológica en la zona de estudio, delimitada por las cuatro provincias de la Región Tacna en el año 2020.

Para el cálculo de las pérdidas por hidrometeoros, se utilizaron las Recomendaciones UIT-R P.1817-1 y UIT-R P.1814 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, referido al diseño de enlaces ópticos terrenales en el espacio libre.

Se utilizaron Modelos de Predicción Empíricos para determinar las pérdidas por lluvia, las pérdidas por niebla y las pérdidas por nieve.

Solo se analizó la incidencia de los hidrometeoros en las bandas ópticas de 850 nm y 1550 nm, donde existentes estudios previos que han desarrollado Modelos de Predicción Empíricos para tales bandas.

Para la determinación de las pérdidas por hidrometeoros se siguió el siguiente procedimiento:

- Cálculo de las pérdidas por lluvia ( $Att_{rain}$ ).
- Cálculo de las pérdidas por niebla ( $Att_{fog}$ )
- Cálculo de las pérdidas por nieve ( $Att_{snow}$ )

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

### **4.2.1 Descripción de la base de datos de lluvia que se ha utilizado**

Para obtener las estadísticas de precipitación para las localidades en la zona de estudio con tiempo de resolución de 1 hora, se utilizó la base de datos de tasas de precipitación suministrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la misma que se utilizó para la obtención de la distribución acumulativa de dicha tasa con tiempos de integración de 10 minutos.

El SENAMHI reporta los datos de tasa de precipitación diaria con resolución de una hora y también acumulada de 10 minutos. El SENAMHI posee estaciones meteorológicas e hidrológicas automáticas a lo largo del país, que incluyen las localidades ubicadas dentro de la Región Tacna que forman parte de la zona de estudio.

Los datos suministrados para este trabajo corresponden al periodo transcurrido entre enero a diciembre del 2020.

### **4.2.2 Descripción del tipo de instrumento de medición, tasa de adquisición y resolución.**

Las estaciones meteorológicas permiten obtener las mediciones de los niveles de precipitación (mm/hr). Son de dos tipos: convencional y automática. En mi trabajo de investigación se utilizaron estaciones automáticas meteorológicas e hidrológicas.

#### ***4.2.2.1 Estación meteorológica automática.***

También conocida como AWS (Automatic Weather Station), una estación meteorológica es un dispositivo que recoge los datos de distintas variables atmosféricas que son de interés para la meteorología. Es una versión automatizada

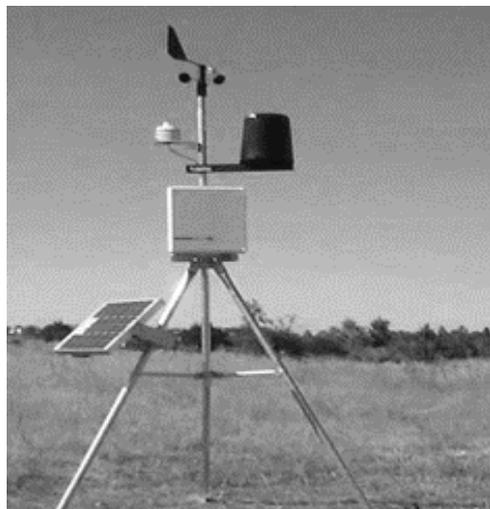
de la estación meteorológica convencional, que permite realizar mediciones en áreas remotas e inhóspitas, además de redundar en un ahorro de trabajo humano y hacer posible la realización de mediciones con mayor frecuencia.

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

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

#### **Figura 4**

##### *Estación automática hidrológica*



*Nota.* La imagen es extraída del Centro del Agua para la Agricultura, 2014. Desarrollo de una estación meteorológica automática.

### 4.3 Estaciones automáticas empleadas en la zona de estudio

A continuación, la Figura 5 muestra las estaciones automáticas del SENAMHI ubicadas en la Región Tacna.

#### Figura 5

*Estaciones automáticas ubicadas en la Región Tacna.*

*Estación meteorológica, (H) Estación Hidrológica.*



*Nota.* Imagen extraída del SENAMHI. Recuperado de <https://cutt.ly/EECTjpF>.

#### 4.3.1 Estación Automática Bocatoma El Ayro

Se encuentra ubicado en la localidad de Alto Perú en el distrito de Palca, provincia de Tacna, departamento de Tacna. Su ubicación geográfica es:

Latitud : 17° 34' 48.68" Sur

Longitud: 69° 37' 36.24" Oeste

Altitud : 4260 m.s.n.m.

## Figura 6

*Ubicación de la estación automática meteorológica Bocatoma El Ayro*

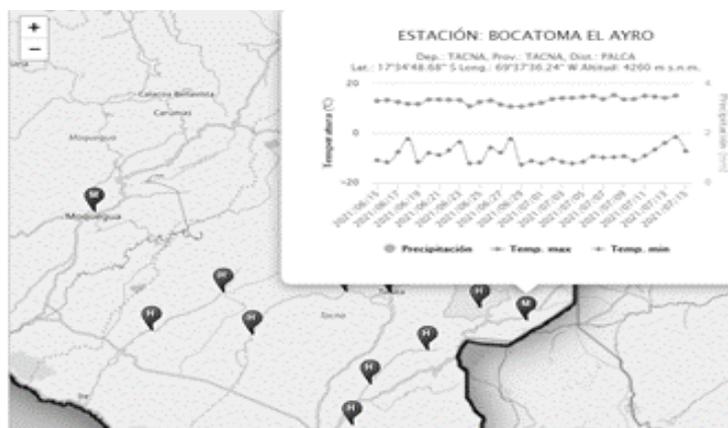


*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO.

La estación Bocatoma El Ayro, es una estación meteorológica automática, que procesa la data meteorológica de la localidad de Palca. Suministró la intensidad de lluvia con tiempo de resolución de 1 hora (mm/hr) y la intensidad de lluvia (mm/hr) para una tasa acumulada de 10 minutos.

## Figura 7

*Estación automática meteorológica Bocatoma El Ayro*



*Nota.* Imagen extraída del SENAMHI. Recuperado de <https://cutt.ly/zECU7d5>

### 4.3.2 Estación Automática Tarata

Se encuentra ubicado en el distrito de Tarata, provincia de Tarata, departamento de Tacna. Su ubicación geográfica es:

Latitud : 17° 28' 45.74" Sur

Longitud: 70° 2' 11.94" Oeste

Altitud : 3100 m.s.n.m.

#### Figura 8

*Ubicación de la estación automática meteorológica Tarata*

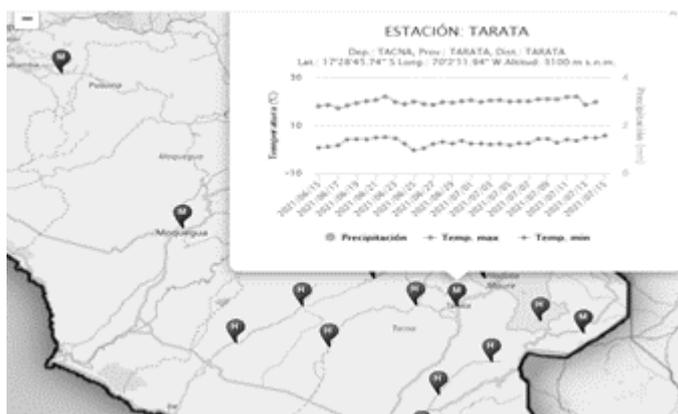


*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO.

La estación Tarata, es una estación meteorológica automática, que procesa la data meteorológica de la localidad de Tarata. Suministró la intensidad de lluvia con tiempo de resolución de 1 hora (mm/hr) y la intensidad de lluvia (mm/hr) para una tasa acumulada de 10 minutos.

## Figura 9

### Estación automática meteorológica Tarata



*Nota.* Imagen extraída del SENAMHI. Recuperado de:  
<https://cutt.ly/nECIBqm>

### 4.3.3 Estación Automática Candarave, Candarave

Se encuentra ubicado en el distrito de Candarave, provincia de Candarave, departamento de Tacna. Su ubicación geográfica es:

Latitud : 17° 16' 4.86" Sur  
 Longitud: 70° 15' 14.72" Oeste  
 Altitud : 3410 m.s.n.m.

### Figura 10

*Ubicación de la estación automática meteorológica Candarave*



*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO.

La estación Candarave, es una estación meteorológica automática, que procesa la data meteorológica de la localidad de Candarave. Suministró la intensidad de lluvia con tiempo de resolución de 1 hora (mm/hr) y la intensidad de lluvia (mm/hr) para una tasa acumulada de 10 minutos.

### Figura 11

*Estación automática meteorológica Candarave*



*Nota.* Imagen extraída del SENAMHI. Recuperado de <https://cutt.ly/EECO8Cy>

#### 4.3.4 Estación Puente Viejo, Locumba.

Se encuentra ubicado en el distrito de Locumba, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna. Su ubicación geográfica es:

Latitud : 17° 37' 3.23" Sur  
Longitud: 70° 45' 39.48" Oeste  
Altitud : 569 m.s.n.m.

#### Figura 12

*Ubicación de la estación automática hidrológica Puente Viejo*



*Nota.* Imagen extraída utilizando el software GOOGLE EARTH PRO.

La estación Puente Viejo, es una estación hidrológica automática, que procesa la data meteorológica de la localidad de Locumba. Suministró la intensidad de lluvia con tiempo de resolución de 1 hora (mm/hr) y la intensidad de lluvia (mm/hr) para una tasa acumulada de 10 minutos.

### Figura 13

#### Estación automática hidrológica Puente Viejo



Nota. Locumba. Recuperado de: <https://cutt.ly/vECPMOB>

#### 4.4 Cálculo de las pérdidas por lluvia ( $Att_{lluvia}$ ).

Para el cálculo de las pérdidas por lluvia, se utilizó la Recomendación UIT-R P.1817-1 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, referido a: Datos de propagación necesarios para el diseño de enlaces ópticos terrenales en el espacio libre.

Así mismo, se utilizó la Recomendación UIT-R P.1814 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, referido a: Métodos de predicción necesarios para diseñar enlaces ópticos terrenales en espacio libre.

Se utilizó el Informe UIT-R F.2106 sobre Aplicaciones del servicio fijo que utilizan enlaces ópticos en el espacio libre. Este Informe, presenta las características de los equipos, las posibles aplicaciones del SF y los aspectos técnicos y de funcionamiento de los sistemas de transmisión óptica en el espacio libre.

La atenuación específica (dB/km) debida a la lluvia se suele calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\gamma_{lluvia} = k \cdot R^\alpha$$

Donde  $\gamma_{\text{lluvia}}$  es la atenuación debida a la lluvia (dB / km), R es la intensidad de la lluvia (mm/hr), k y  $\alpha$  es el coeficiente de lluvia.

Los parámetros "k" y " $\alpha$ " dependen de las características de la lluvia o pueden determinarse a partir de mediciones. La Tabla 4 muestra los valores de los parámetros k y  $\alpha$  utilizados para la estimación de la atenuación específica debida a la lluvia, desarrollados por modelos de predicción empíricos: Modelo de Predicción Japonés y Modelo de Predicción francés.

**Tabla 4**

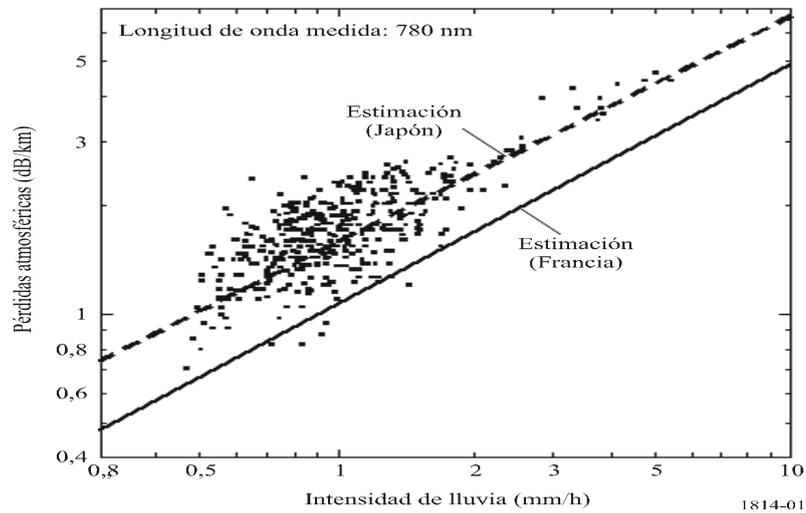
*Parámetros usados para la estimación de la atenuación específica debido a la lluvia*

	<b>k</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\gamma_{\text{lluvia}}</math></b>
Modelo Japonés	1.58	0.63	$1.58 * R^{0.63}$
Modelo francés	1.076	0.67	$1.076 * R^{0.67}$

*Nota:* Tomada de Informe UIT-R F.2106 (2007)

**Figura 14**

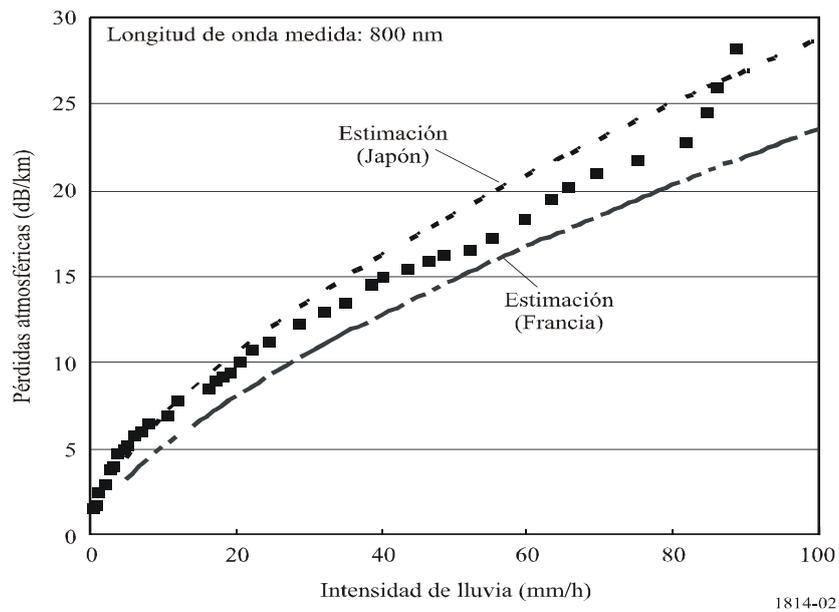
*Intensidad de lluvia vs Pérdidas atmosféricas, para  $\lambda=780$  nm*



*Nota.* Recuperado de <https://cutt.ly/jECD6SH>

**Figura 15**

*Intensidad de lluvia vs Pérdidas atmosféricas, para  $\lambda=800$  nm*



*Nota.* Recuperado de: <https://cutt.ly/vECFL42>.

En el INFORME UIT-R F.2106 de la UIT (2007), se indica que: “en la región de fuerte intensidad de lluvia, la estimación basada en la Recomendación UIT-R P.1814 también presenta una buena aproximación con los datos medidos obtenidos en Francia.”

Las 4 estaciones automáticas ubicadas en la zona de estudio, suministraron la data meteorológica de enero a diciembre del 2020. Se pudo observar que los períodos de lluvias, fueron los meses de enero, febrero, marzo y diciembre.

La metodología seguida para el cálculo de las pérdidas atmosféricas por lluvia, se muestra a continuación:

- Se procesó la data meteorológica por mes, para cada estación automática.
- Se procedió a filtrar la data, eliminando de la base de datos los días de ausencia de lluvia y los valores muy pequeños de intensidad de lluvia.
- Se seleccionó el valor mayor de intensidad de lluvia en el día.
- Mediante hoja de cálculo, se elaboró una tabla con los datos obtenidos y se procedió a graficar por mes para cada estación automática.
- Se seleccionó **el valor máximo de intensidad de lluvia** (mm/hr) de cada mes, el cual sirvió para calcular la atenuación específica de lluvia  $\alpha_{lluvia}$  (dB/km).
- Para la determinación de la atenuación por lluvia  $Att_{lluvia}$  (dB), se estableció como longitud del enlace los valores de **d= 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0, 1.5 y 2 km.**
- Se calculó la atenuación por lluvia utilizando tanto el Modelo de Predicción francés (Carboneau) y el Modelo de Predicción japonés.

A continuación, se presentan los valores y las gráficas obtenidas de

atenuación por lluvia para cada estación automática, según los Modelos de Predicción japonés y francés.

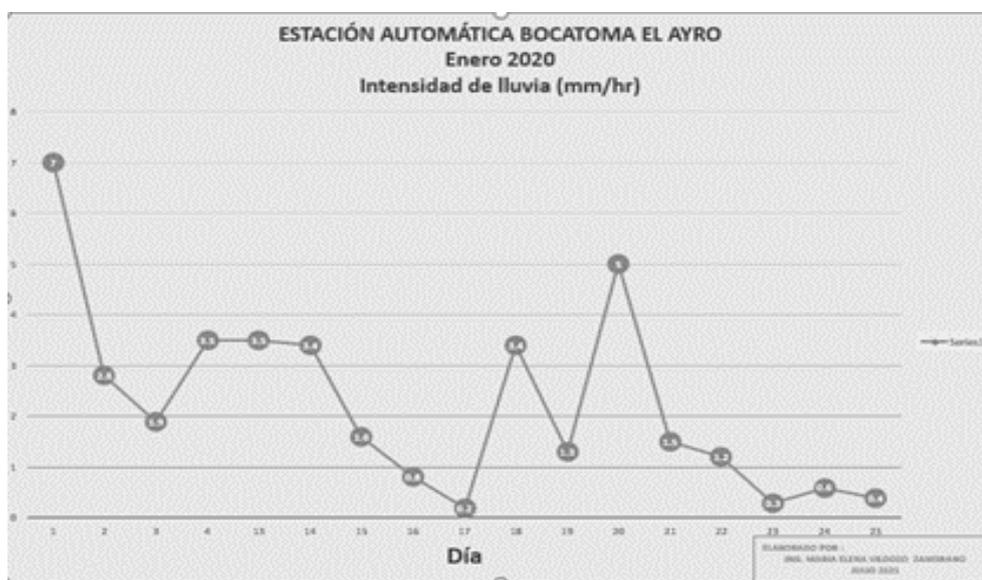
#### 4.4.1 Estación Automática El Ayro, Alto Perú

##### 4.4.1.1 Intensidad de lluvia por mes

Las siguientes gráficas muestran los niveles de intensidad de lluvia que ocurrieron durante los meses de enero, febrero y marzo del 2020, en la Estación Automática Bocatoma el Ayro, distrito de Palca, provincia de Tacna, Región Tacna.

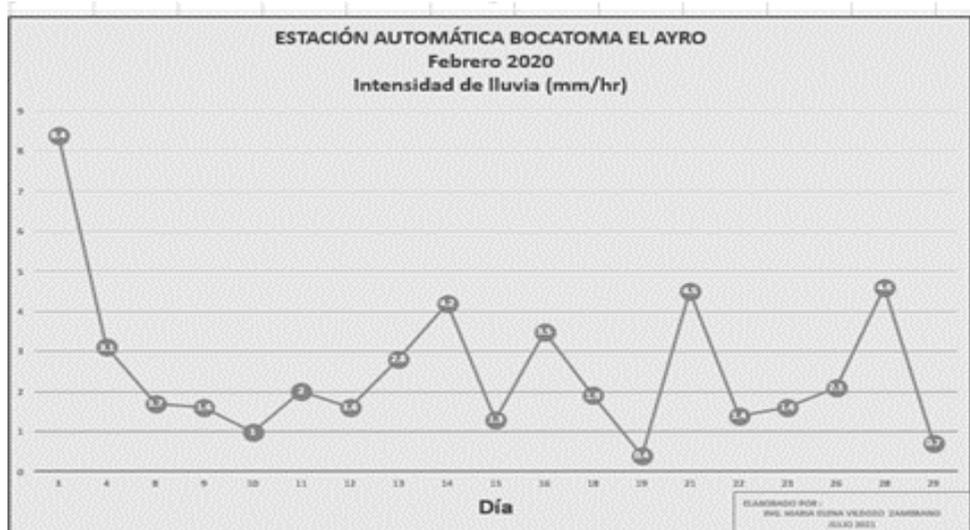
#### Figura 16

*Intensidad de lluvia del mes de enero 2020 de la Estación Bocatoma El Ayro, Provincia de Tacna*

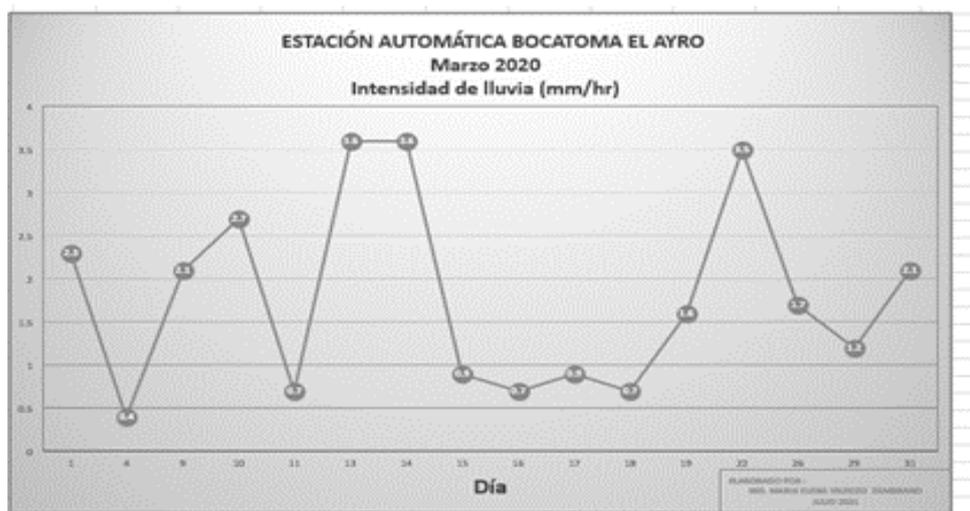


**Figura 17**

*Intensidad de lluvia del mes de febrero 2020 de la Estación Bocatoma El Ayro, Provincia de Tacna*

**Figura 18**

*Intensidad de lluvia del mes de marzo 2020 de la Estación Bocatoma El Ayro, Provincia de Tacna*



La Tabla 5 muestra los valores máximos de intensidad de lluvia ocurridos en los meses de enero, febrero y marzo del 2020.

**Tabla 5**

*Valores máximos de intensidad por lluvia: Bocatoma El Ayro*

Año	Mes	Intensidad de lluvia (mm/hr)
2020	Enero	7.0
2020	Febrero	8.4
2020	Marzo	3.6

*Nota:* Elaboración propia. Los datos son proporcionados por el SENAMHI.

#### **4.4.1.2 Coeficiente de atenuación específica por lluvia (dB/km)**

Se determinó los coeficientes de atenuación específica por lluvia (dB/km), utilizando los Modelos de Predicción francés y japonés.

**Tabla 6**

*Valores de los coeficientes de atenuación por lluvia: Estación Bocatoma El Ayro*

Mes	R <sub>máx</sub>	$\alpha$ lluvia (dB/km)	
	(mm/hr)	Modelo francés	Modelo japonés
Enero	7	3.963	5.384
Febrero	8.4	4.478	6.039
Marzo	3.6	2.538	3.541

*Nota.* Elaboración propia.

#### 4.4.1.3 Atenuación por lluvia ( $Att_{lluvia}$ )

Las pérdidas ocasionadas por las lluvias, fueron calculadas por mes y utilizando el Modelo de Predicción francés y el Modelo de Predicción japonés. Para determinar la atenuación por lluvia  $Att_{lluvia}$  (dB), se utilizaron el valor máximo de lluvia  $R_{m\acute{a}x}$  del mes, con tramos de enlaces de 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0, 1.5 y 2.0 km.

**Tabla 7**

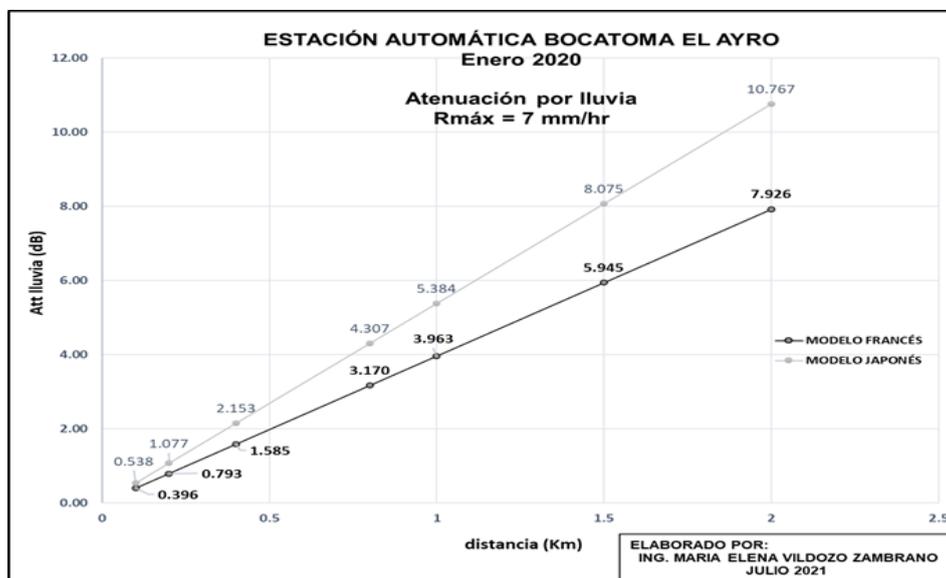
*Atenuación por lluvia: enero 2020*

( $R_{m\acute{a}x}= 7.0$ mm/hr)	Att lluvia (dB)	Att lluvia (dB)
d (km)	Modelo francés	Modelo japonés
0.1	0.396	0.538
0.2	0.793	1.077
0.4	1.585	2.153
0.8	3.170	4.307
1	3.963	5.384
1.5	5.945	8.075
2	7.926	10.767

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 19**

*Atenuación por lluvia del mes de enero 2020, de la Estación Bocatoma El Ayro*



*Nota.* Provincia de Tacna, utilizando los modelos de predicción francés y japonés.

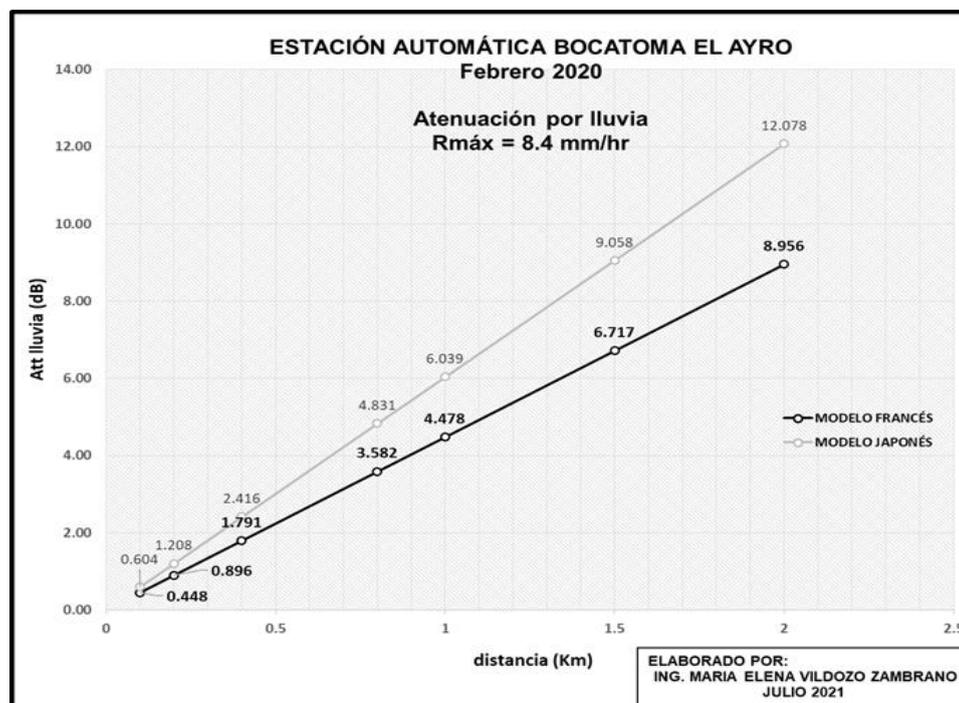
**Tabla 8**

*Atenuación por lluvia del mes de enero 2020*

( $R_{máx} = 8.4 \text{ mm/hr}$ )	Att lluvia (dB)	Att lluvia (dB)
d (km)	Modelo francés	Modelo japonés
0.1	0.448	0.604
0.2	0.896	1.208
0.4	1.791	2.416
0.8	3.582	4.831
1	4.478	6.039
1.5	6.717	9.058
2	8.956	12.078

**Figura 20**

*Atenuación por lluvia del mes de febrero 2020, de la Estación Bocatoma El Ayro*



*Nota.* Provincia de Tacna, utilizando los modelos de predicción francés y japonés.

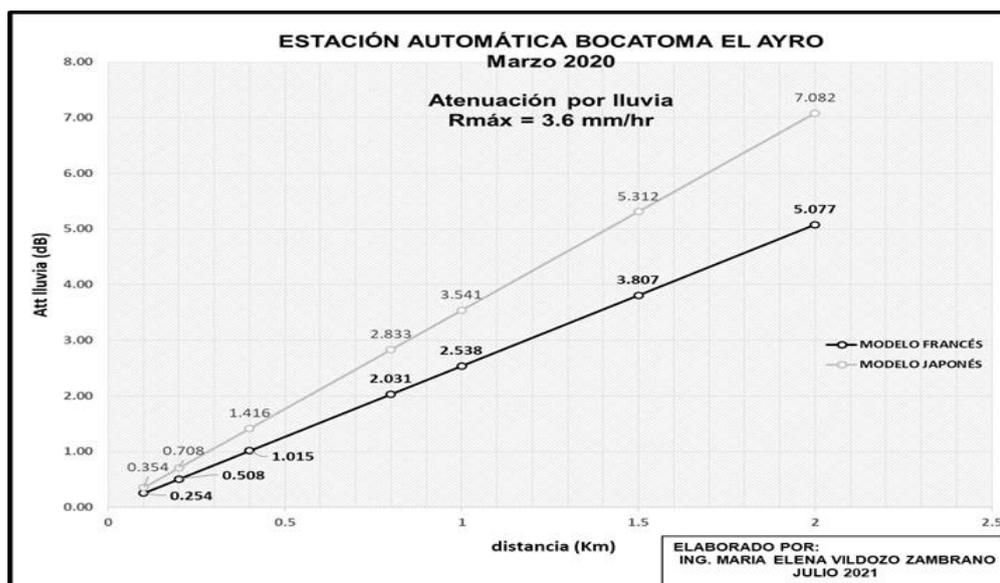
**Tabla 9**

*Atenuación por lluvia: marzo 2020*

(Rmáx= 3.6 mm/hr)	Att lluvia (dB)	Att lluvia (dB)
d (km)	Modelo francés	Modelo japonés
0.1	0.254	0.354
0.2	0.508	0.708
0.4	1.015	1.416
0.8	2.031	2.833
1	2.538	3.541
1.5	3.807	5.312
2	5.077	7.082

**Figura 21**

*Atenuación por lluvia del mes de marzo 2020, de la Estación Bocatoma El Ayro*



*Nota.* Provincia de Tacna, utilizando los modelos de predicción francés y japonés.

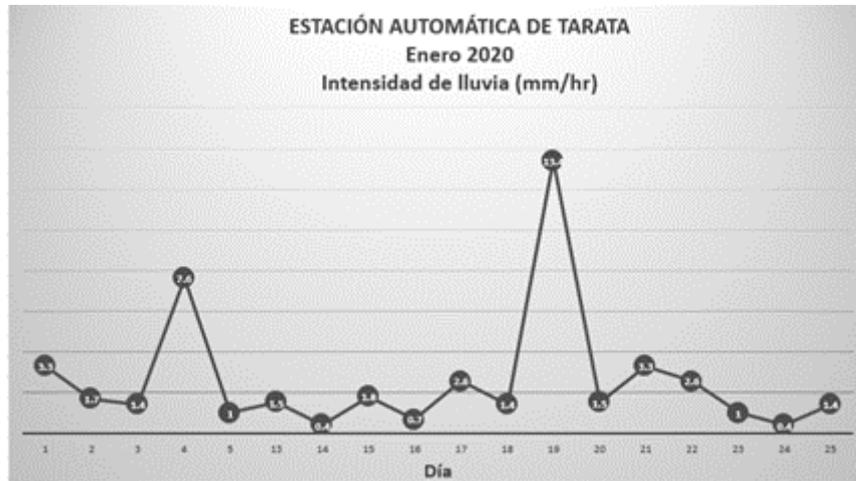
#### **4.4.2 Estación Automática Tarata, Tarata.**

##### **4.4.2.1 Intensidad de lluvia por mes**

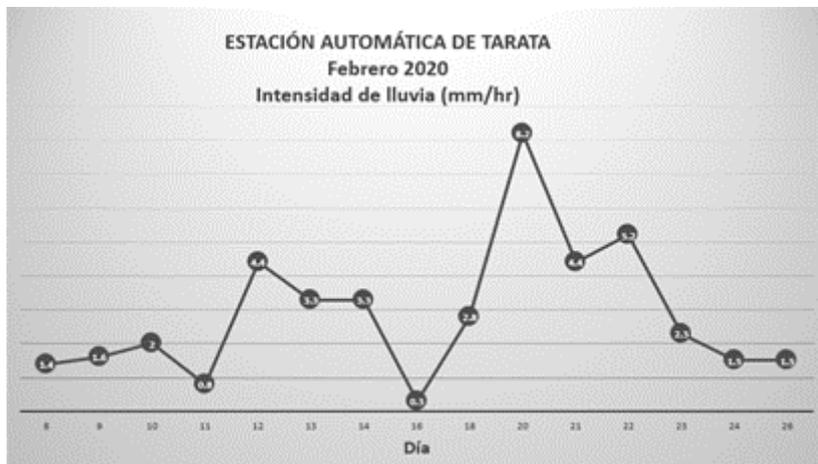
Las siguientes gráficas muestran los niveles de intensidad de lluvia que ocurrieron durante los meses de enero, febrero, marzo y diciembre del 2020, en la Estación Automática Tarata, distrito de Tarata, provincia de Tarata, Región Tacna.

**Figura 22**

*Intensidad de lluvia del mes de enero 2020 de la Estación Tarata, Tarata*

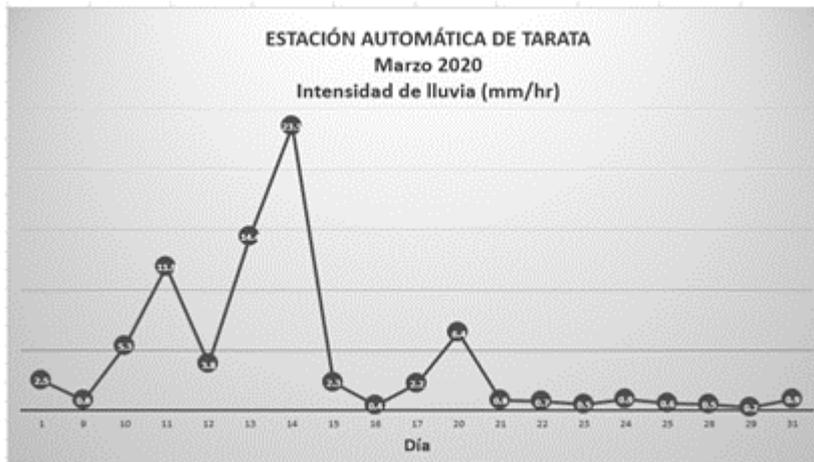
**Figura 23**

*Intensidad de lluvia del mes de febrero 2020 de la Estación Tarata, Tarata*

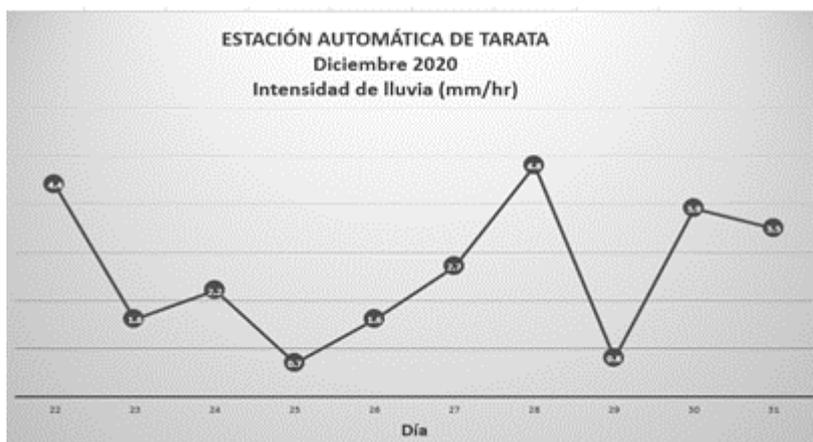


**Figura 24**

*Intensidad de lluvia del mes de marzo 2020 de la Estación Tarata, Tarata*

**Figura 25**

*Intensidad de lluvia del mes de diciembre 2020 de la Estación Tarata, Provincia de Tarata*



La Tabla 10 muestra los valores máximos de intensidad de lluvia ocurridos en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre del 2020.

**Tabla 10**

*Valores máximos de intensidad por lluvia: Tarata*

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Intensidad de lluvia (mm/hr)</b>
2020	Enero	13.4
2020	Febrero	8.2
2020	Marzo	23.4
2020	Diciembre	4.8

*Nota.* Elaboración propia. Los datos son proporcionados por el SENAMHI.

#### **4.4.2.2 Coeficiente de atenuación específica por lluvia ( $\alpha_{lluvia}$ (dB/km))**

Se determinó los coeficientes de atenuación específica por lluvia (dB/km), utilizando los Modelos de Predicción francés y japonés.

**Tabla 11**

*Valores de los coeficientes de atenuación por lluvia: Estación Tarata*

<b>Mes</b>	<b>R<sub>máx</sub> (mm/hr)</b>	<b><math>\alpha_{lluvia}</math> (dB/km) Modelo francés</b>	<b><math>\alpha_{lluvia}</math> (dB/km) Modelo japonés</b>
Enero	13.4	6.123	8.105
Febrero	8.2	6.123	5.948
Marzo	23.4	8.896	11.515
Diciembre	4.8	3.078	4.245

#### **4.4.2.3 Atenuación por lluvia ( $Att_{lluvia}$ )**

Las pérdidas ocasionadas por las lluvias, fueron calculadas por mes y utilizando el Modelo de Predicción francés y el Modelo de Predicción japonés. Para

determinar la atenuación por lluvia  $Att_{lluvia}$  (dB), se utilizaron el valor máximo de lluvia  $R_{m\acute{a}x}$  del mes, con tramos de enlaces de 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0, 1.5 y 2.0 km.

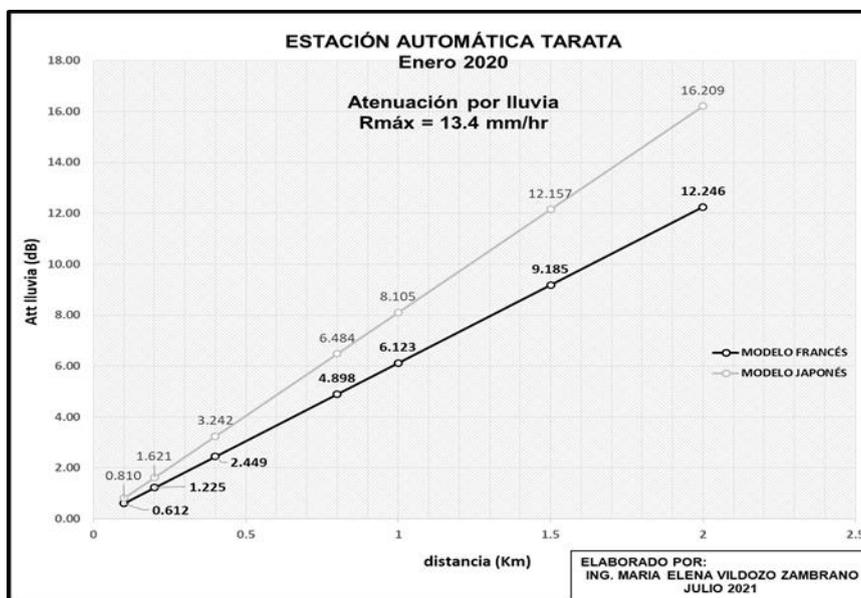
**Tabla 12**

*Atenuación por lluvia: enero 2020*

( $R_{m\acute{a}x}$ = 13.4 mm/hr)	Att lluvia (dB)	Att lluvia (dB)
d (km)	Modelo francés	Modelo japonés
0.1	0.612	0.810
0.2	1.225	1.621
0.4	2.449	3.242
0.8	4.898	6.484
1	6.123	8.105
1.5	9.185	12.157
2	12.246	16.209

**Figura 26**

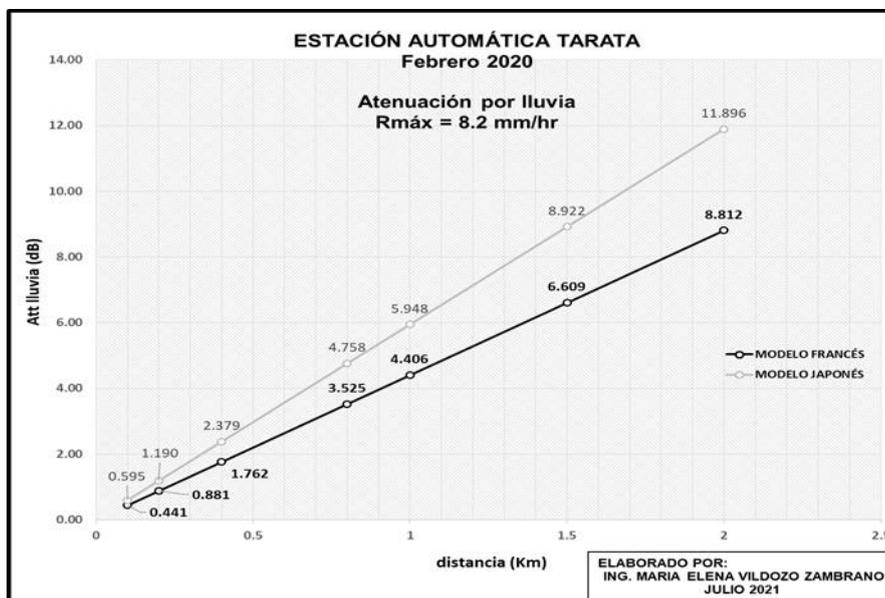
*Atenuación por lluvia del mes de enero 2020, de la Estación Tarata*



*Nota.* Provincia de Tarata, utilizando los modelos de predicción francés y japonés

**Tabla 13***Atenuación por lluvia: febrero 2020*

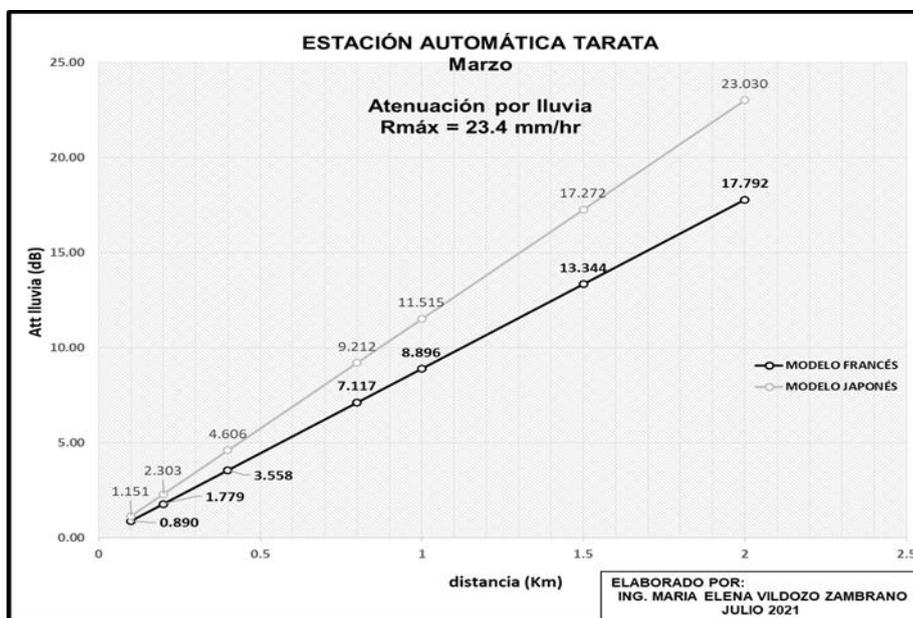
(R <sub>máx</sub> = 8.2 mm/hr)	Att lluvia (dB) Modelo francés	Att lluvia (dB) Modelo japonés
d (km)		
0.1	0.441	0.595
0.2	0.881	1.190
0.4	1.762	2.379
0.8	3.525	4.758
1	4.406	5.948
1.5	6.609	8.922
2	8.812	11.896

**Figura 27***Atenuación por lluvia del mes de febrero 2020, de la Estación Tarata*

*Nota.* Provincia de Tarata, utilizando los modelos de predicción francés y japonés

**Tabla 14***Atenuación por lluvia: marzo 2020*

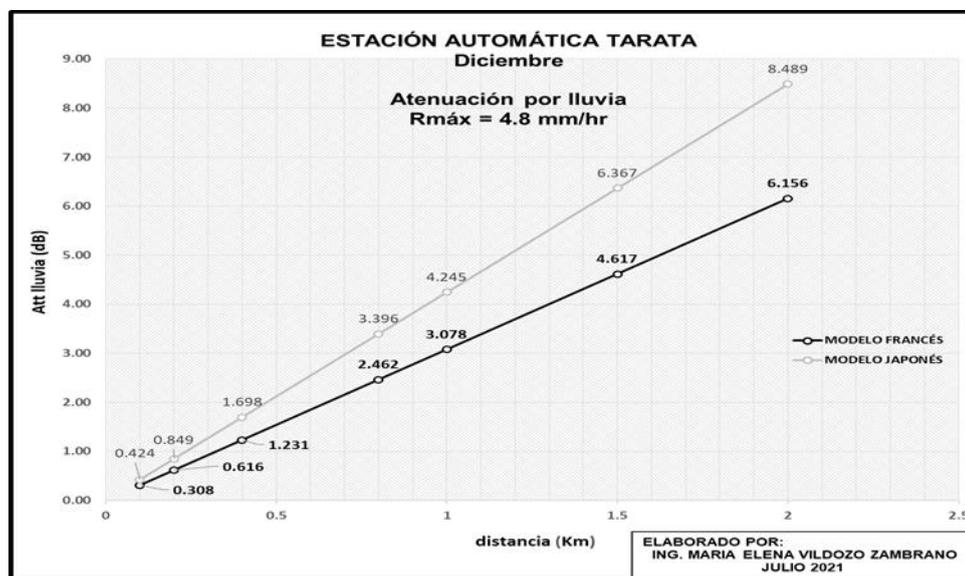
(R <sub>máx</sub> = 23.4 mm/hr)	Att lluvia (dB). Modelo francés	Att lluvia (dB). Modelo japonés
d (km)		
0.1	0.890	1.151
0.2	1.779	2.303
0.4	3.558	4.606
0.8	7.117	9.212
1	8.896	11.515
1.5	13.344	17.272
2	17.792	23.030

**Figura 28***Atenuación por lluvia del mes de marzo 2020, de la Estación Tarata*

*Nota.* Provincia de Tarata, utilizando los modelos de predicción francés y japonés

**Tabla 15***Atenuación por lluvia: diciembre 2020*

(R <sub>máx</sub> = 4.8 mm/hr)	Att lluvia (dB) Modelo francés	Att lluvia (dB) Modelo japonés
d (km)		
0.1	0.308	0.424
0.2	0.616	0.849
0.4	1.231	1.698
0.8	2.462	3.396
1	3.078	4.245
1.5	4.617	6.367
2	6.156	8.489

**Figura 29***Atenuación por lluvia del mes de diciembre 2020, de la Estación Tarata*

*Nota.* Provincia de Tarata, utilizando los modelos de predicción francés y japonés.

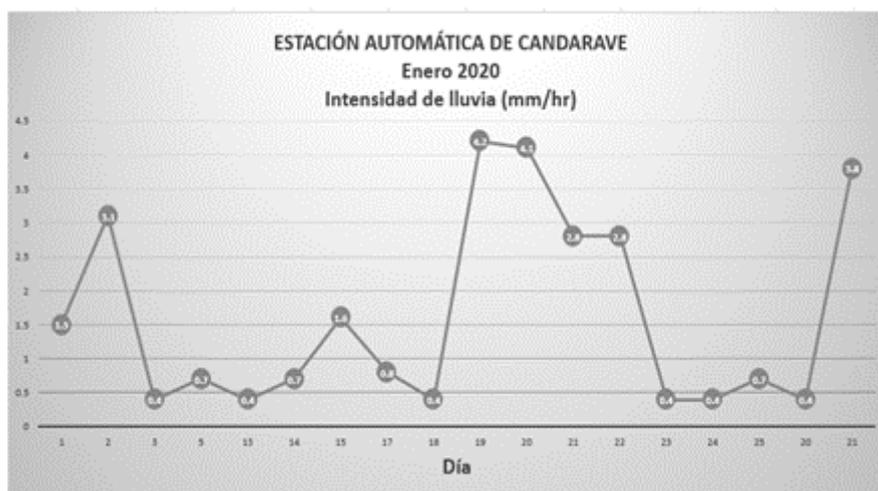
#### 4.4.3 Estación Automática Candarave, Candarave.

##### 4.4.3.1 Intensidad de lluvia por mes

Las siguientes gráficas muestran los niveles de intensidad de lluvia que ocurrieron durante los meses de enero, febrero, marzo y diciembre del 2020, en la Estación Automática Candarave, distrito de Candarave, provincia de Candarave, Región Tacna.

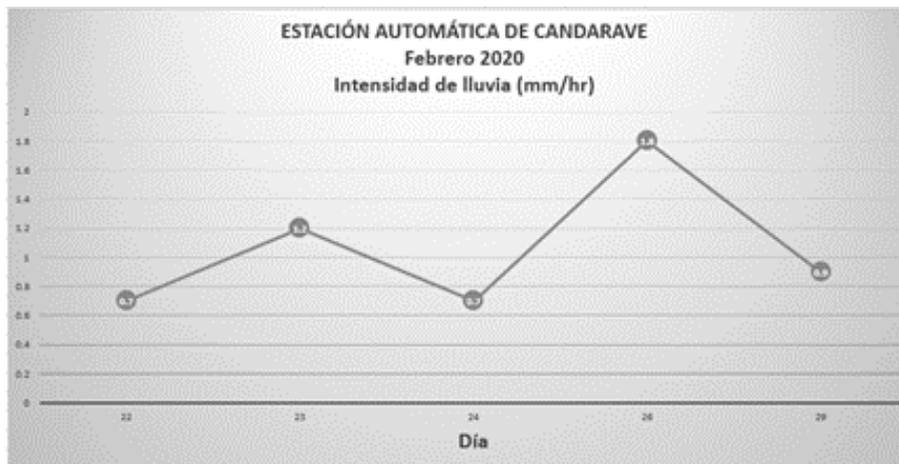
#### Figura 30

*Intensidad de lluvia del mes de enero 2020 de la Estación Candarave, Provincia de Candarave.*

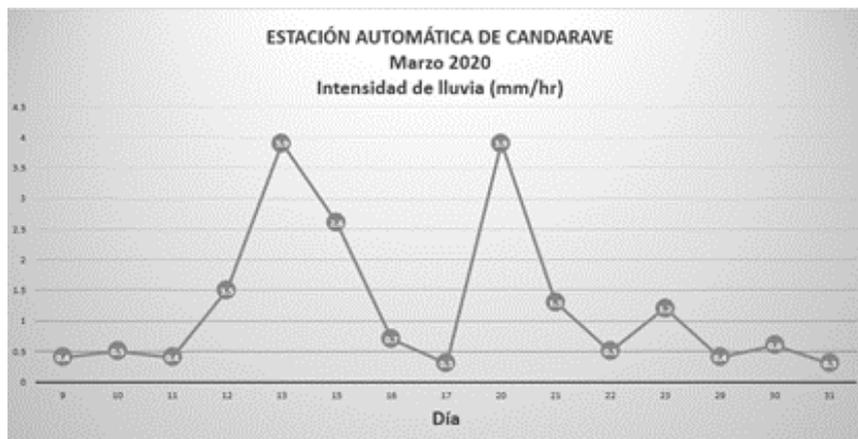


**Figura 31**

*Intensidad de lluvia del mes de febrero 2020 de la Estación Candarave, Provincia de Candarave*

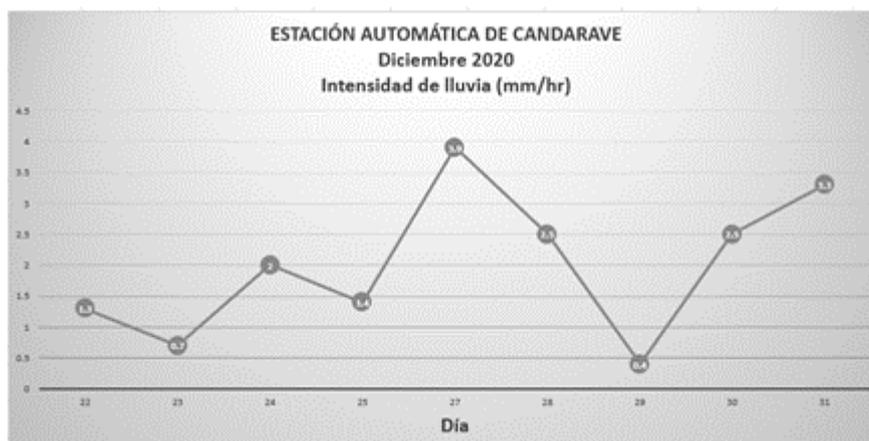
**Figura 32**

*Intensidad de lluvia del mes de marzo 2020 de la Estación Candarave, Provincia de Candarave*



**Figura 33**

*Intensidad de lluvia del mes de diciembre 2020 de la Estación Candarave, Provincia de Candarave*



La Tabla 16 muestra los valores máximos de intensidad de lluvia ocurridos en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre del 2020.

**Tabla 16**

*Valores máximos de intensidad por lluvia: Candarave*

Año	Mes	Intensidad de lluvia (mm/hr)
2020	Enero	4.2
2020	Febrero	1.8
2020	Marzo	3.9
2020	Diciembre	3.8

*Nota:* Los datos son proporcionados por el SENAMHI.

#### 4.4.3.2 Coeficiente de atenuación por lluvia ( $\alpha_{lluvia}$ (dB/km))

Se determinó los coeficientes de atenuación específica por lluvia (dB/km), utilizando los Modelos de Predicción francés y japonés.

**Tabla 17**

*Valores de los coeficientes de atenuación específica por lluvia:  
Estación Candarave*

Mes	R <sub>máx</sub> (mm/hr)	$\alpha_{lluvia}$ (dB/km) Modelo francés	$\alpha_{lluvia}$ (dB/km) Modelo japonés
Enero	4.2	2.814	3.902
Febrero	1.8	1.595	2.288
Marzo	3.9	2.678	3.724
Diciembre	3.8	2.632	3.664

#### 4.4.3.3 Atenuación por lluvia ( $Att_{lluvia}$ )

Las pérdidas ocasionadas por las lluvias, fueron calculadas por mes y utilizando el Modelo de Predicción francés y el Modelo de Predicción japonés. Para determinar la atenuación por lluvia  $Att_{lluvia}$  (dB), se utilizaron el valor máximo de lluvia  $R_{máx}$  del mes, con tramos de enlaces de 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0, 1.5 y 2.0 km.

**Tabla 18***Atenuación por lluvia: enero 2020*

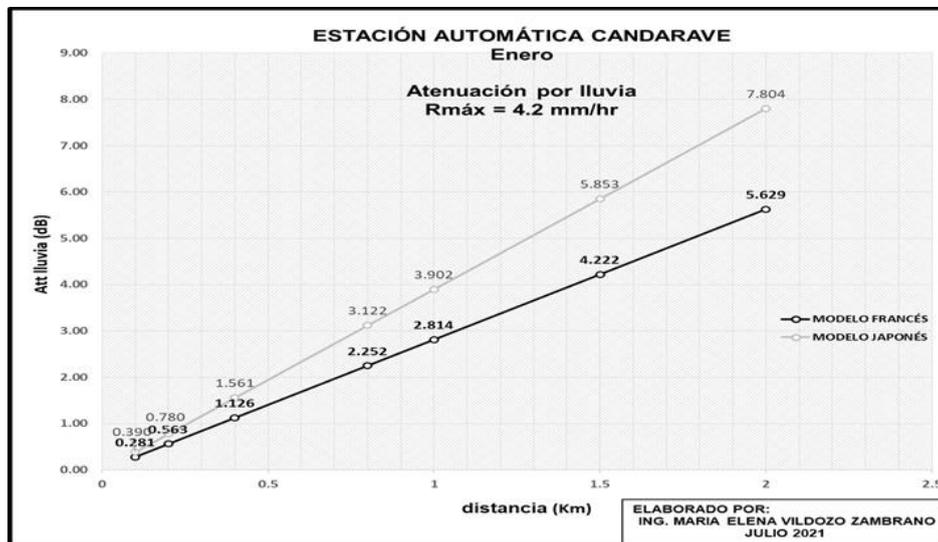
<u>(R<sub>máx</sub>= 4.2 mm/hr)</u> d (km)	Att lluvia (dB) Modelo francés	Att lluvia (dB) Modelo japonés
0.1	0.281	0.390
0.2	0.563	0.780
0.4	1.126	1.561
0.8	2.252	3.122
1	2.814	3.902
1.5	4.222	5.853
2	5.629	7.804

**Tabla 19***Atenuación por lluvia: febrero 2020*

<u>(R<sub>máx</sub>= 1.8 mm/hr)</u> d (km)	Att lluvia (dB) Modelo francés	Att lluvia (dB) Modelo japonés
0.1	0.160	0.229
0.2	0.319	0.458
0.4	0.638	0.915
0.8	1.276	1.830
1	1.595	2.288
1.5	2.393	3.432
2	3.191	4.576

**Figura 34**

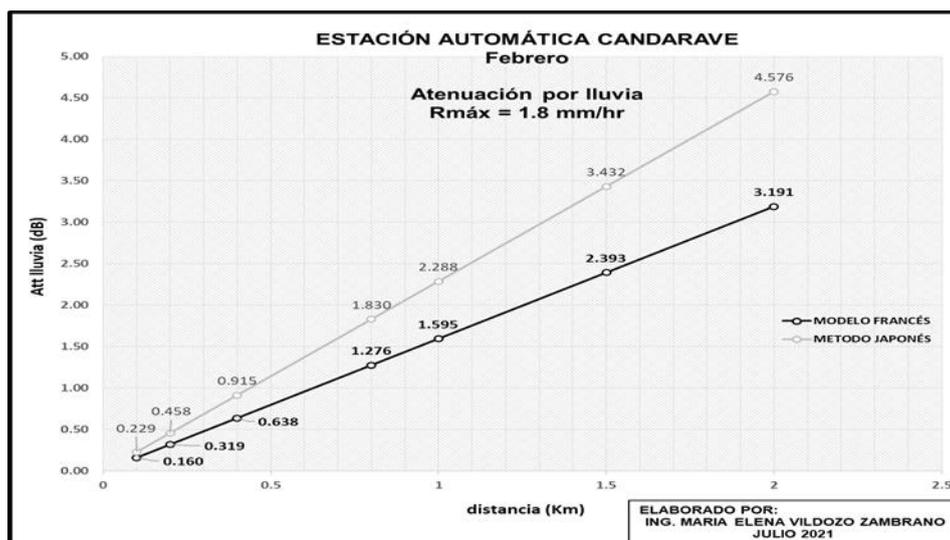
*Atenuación por lluvia del mes de enero 2020, de la Estación Candarave*



*Nota.* Provincia de Candarave, utilizando los modelos de predicción francés y japonés.

**Figura 35**

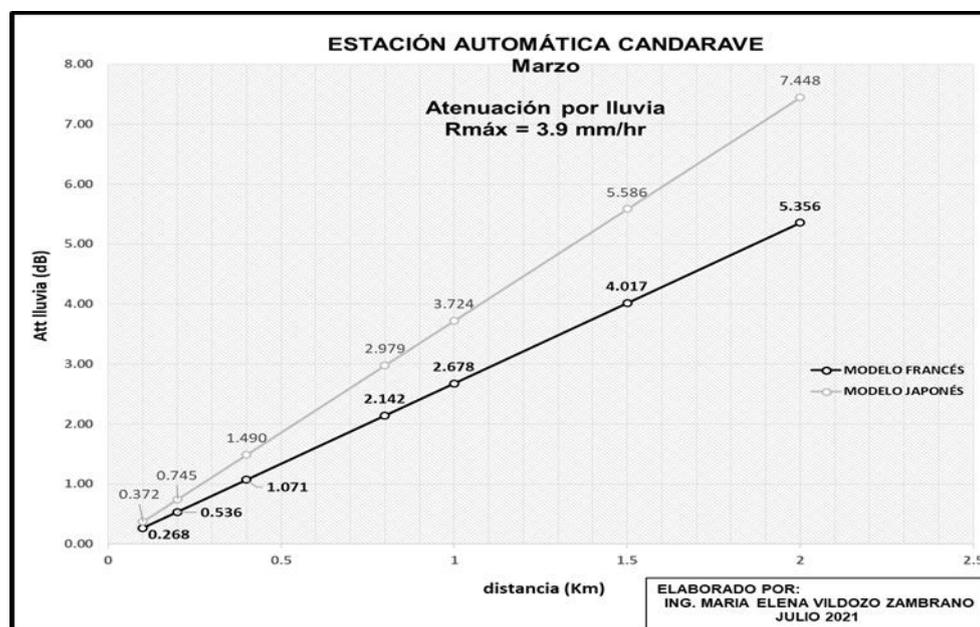
*Atenuación por lluvia del mes de febrero 2020, de la Estación Candarave*



*Nota.* Provincia de Candarave, utilizando los modelos de predicción francés y japonés.

**Tabla 20***Atenuación por lluvia: marzo 2020*

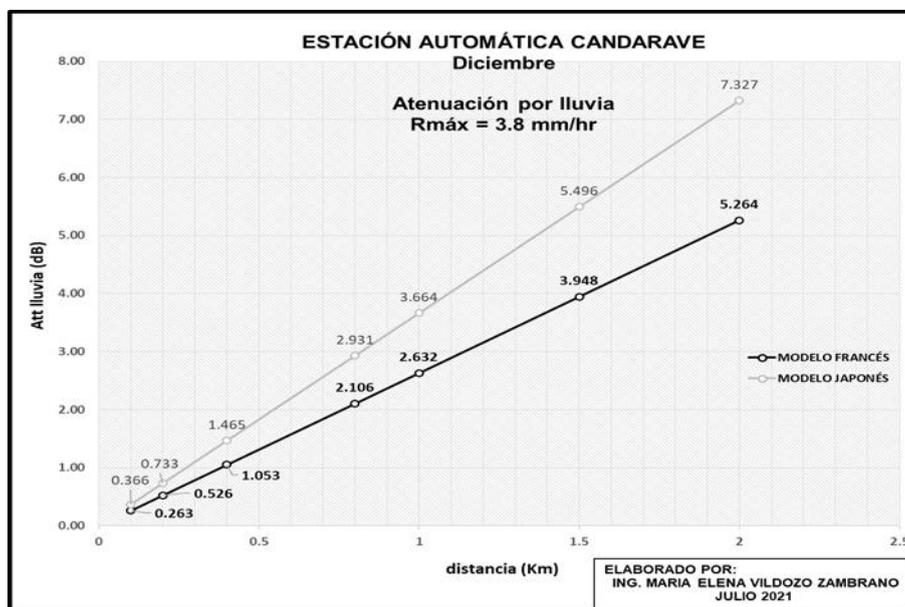
(R <sub>máx</sub> = 3.9 mm/hr)	Att lluvia (dB)	Att lluvia (dB)
d (km)	Modelo francés	Modelo japonés
0.1	0.268	0.372
0.2	0.536	0.745
0.4	1.071	1.490
0.8	2.142	2.979
1	2.678	3.724
1.5	4.017	5.586
2	5.356	7.448

**Figura 36***Atenuación por lluvia del mes de marzo 2020, de la Estación Candarave*

*Nota.* Provincia de Candarave, utilizando los modelos de predicción francés y japonés.

**Tabla 21***Atenuación por lluvia: diciembre 2020*

(R <sub>máx</sub> = 3.8 mm/hr)	Att lluvia (dB) Modelo francés	Att lluvia (dB) Modelo japonés
d (km)		
0.1	0.263	0.366
0.2	0.526	0.733
0.4	1.053	1.465
0.8	2.106	2.931
1	2.632	3.664
1.5	3.948	5.496
2	5.264	7.327

**Figura 37***Atenuación por lluvia del mes de diciembre 2020, de la Estación Candarave*

*Nota.* Provincia de Candarave, utilizando los modelos de predicción francés y japonés.

#### 4.4.4 Estación Puente Viejo, Locumba.

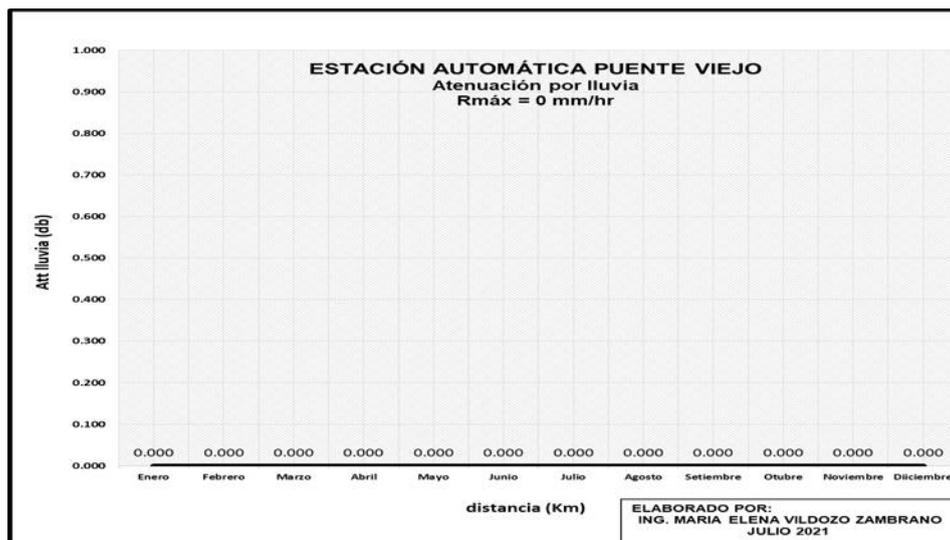
##### 4.4.4.1 Intensidad de lluvia por mes

La siguiente gráfica muestra los niveles de intensidad de lluvia que ocurrieron durante los meses de enero a diciembre del 2020, en la Estación Automática Puente Viejo, distrito de Locumba, provincia de Jorge Basadre, Región Tacna.

De acuerdo a la información estadística suministrada por el SENAMHI de la Estación Puente Viejo, durante el año 2020 no hubo precipitaciones de lluvias en la zona de incidencia, por lo que no se consideraron las pérdidas por atenuación por lluvia en la provincia de Jorge Basadre.

#### Figura 38

*Atenuación por lluvia durante todo el año 2020, de la Estación Puente Viejo, Provincia de Jorge Basadre*



#### 4.5 Cálculo de las pérdidas por niebla ( $Att_{niebla}$ ).

La atenuación debida a la niebla está causada por la dispersión Mie, que depende del número de partículas (densidad de la niebla). El efecto de la atenuación debida a la niebla  $Att_{niebla}$  (dB) puede relacionarse con la visibilidad atmosférica,  $V$  (km), definida como la máxima distancia a la que puede reconocerse un objeto negro en el cielo.

Para el cálculo de la atenuación por niebla, se tuvo en cuenta el tipo de niebla existente en la zona de estudio.

Según el Informe UIT-R F.2106 de: Aplicaciones del servicio fijo que utilizan enlaces ópticos en el espacio libre, la niebla por advección y de radiación afectan a un enlace óptico no guiado.

Por otro lado, Al Naboulsi (2004) desarrolló un Modelo de Predicción que establece relaciones simples que permiten la evaluación de la atenuación en el rango de longitud de onda de 690 a 1550 nm y para visibilidades que van de 50 a 1000 m para dos tipos de niebla: niebla de advección y niebla de convección,

En el artículo: Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere (2004), Al Naboulsi manifiesta que:

La niebla por advección, se genera cuando el aire cálido y húmedo fluye sobre una superficie más fría. El aire en contacto con la superficie se enfría por debajo de su punto de rocío, provocando la condensación del vapor de agua. Aparece más particularmente en primavera cuando los desplazamientos hacia el sur de masas de aire cálido y húmedo se mueven sobre regiones cubiertas de nieve. (Al Naboulsi M. , 2004, pág. 2)

Con respecto a la formación de niebla por radiación, en el mismo artículo, Al Naboulsi manifiesta que:

La radiación o niebla de convección se genera por enfriamiento radiativo de una masa de aire durante la radiación nocturna cuando las condiciones meteorológicas son favorables (vientos de muy baja velocidad, mucha humedad, cielo despejado). Se forma cuando la superficie libera el calor que se acumula durante el día y se enfría: el aire que está en contacto con esta superficie se enfría por debajo del punto de rocío, provocando la condensación del vapor de agua, lo que da como resultado la formación de un nivel del suelo. nube. Este tipo de niebla ocurre más particularmente en los valles. (Al Naboulsi M. , 2004, pág. 2)

La expresión matemática para el cálculo del coeficiente de atenuación específica por niebla de advección es:

$$\sigma(\lambda)_{niebla,adv} = \frac{0,11478\lambda + 3,8367}{V}$$

Siendo:  $\lambda$ : longitud de onda FSO ( $\mu\text{m}$ )

V: visibilidad (km).

La expresión matemática para el cálculo del coeficiente de atenuación específica por niebla de radiación es:

$$\sigma(\lambda)_{niebla,rad} = \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,8367}{V}$$

Siendo:  $\lambda$ : longitud de onda FSO ( $\mu\text{m}$ )

V: visibilidad (km).

Según la relación de Beer Lambert, la transmitancia está en función de la

distancia y la atenuación específica por niebla.

$$\tau(\lambda, d) = \exp[-\sigma(\lambda)d]$$

$\tau(\lambda, d)$ : transmitancia a la distancia  $d$  del transmisor

$\sigma(\lambda)$ : atenuación específica o coeficiente de extinción por unidad de longitud

$d$ : longitud del enlace (km.)

La atenuación debida a la niebla (**Att<sub>niebla</sub>**) en un enlace óptico no guiado de  $d$  (km), está relacionada con la transmitancia a través de la siguiente expresión matemática:

$$Att_{niebla,d} = 10 \log_{10}(1/\tau(\lambda, d))$$

La atenuación debida a la niebla (**Att<sub>niebla</sub>**) se expresa en decibelios (dB) para un enlace óptico no guiado de “ $d$ ” kilómetros.

La metodología seguida para el cálculo de las pérdidas atmosféricas por niebla, se muestra a continuación:

- Se procedió a determinar el tipo de niebla que existen en la zona de estudio. En la localidad de Locumba, provincia de Jorge Basadre se determinó la presencia de niebla por advección. En la localidad de Palca de la provincia de Tacna, la localidad de Tarata de la provincia de Tarata y la localidad de Candarave en la provincia de Candarave, se determinó la presencia de niebla por radiación.

- La atenuación debida a la niebla se determinó para las longitudes de onda  $\lambda=850$  nm y  $\lambda= 1550$  nm.

- Los valores de Visibilidad (V) tomados fueron de: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km.
- Las longitudes del enlace óptico evaluados fueron de: 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 y 1.0 km

#### **4.5.1 Atenuación por niebla de advección ( $Att_{niebla\ adv}$ )**

La localidad de Locumba se encuentra a una altitud comprendida entre los 500 – 560 m.s.n.m. De la visita de inspección de campo, se comprobó que, durante los meses de julio y agosto, se produce la presencia de niebla por advección.

La visibilidad debido a la niebla de advección en la zona de cobertura de la estación Automática Puente Viejo del distrito de Locumba, oscila entre los 100 metros y los 1000 metros.

Considerando que el modelo de predicción de Al Naboulsi evalúa la atenuación por niebla de advección, dentro del rango de longitud de onda comprendido entre los 690 a 1550 nm, se calculó la atenuación por niebla para las longitudes de operación de 850 y 1550 nm.

##### ***4.5.1.1 Atenuación por niebla de advección para $d = 0.1\text{kms}$***

La Tabla 22 presenta la atenuación de niebla por advección para  $\lambda=850\text{ nm}$  y  $\lambda=1550\text{ nm}$ , con valores de Visibilidad (V) de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km.

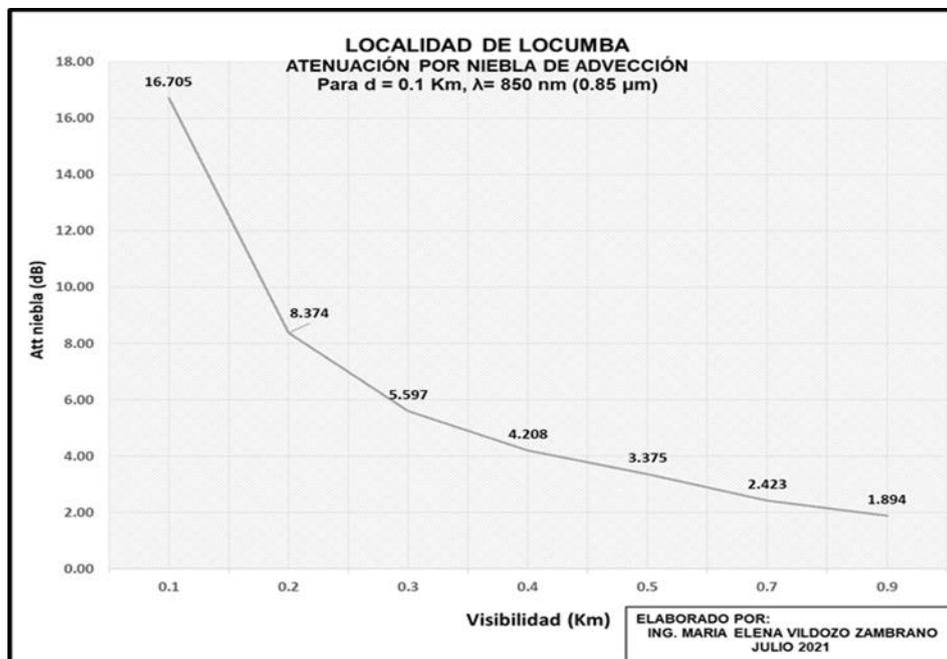
**Tabla 22**

*Atenuación por niebla de advección:  $d=0.1$  km*

$d=0.1$ km V (km)	Att niebla (dB) para $\lambda=0.85$ $\mu\text{m}$	Att niebla (dB) para $\lambda=1.55$ $\mu\text{m}$
0.1	16.705	16.740
0.2	8.374	8.409
0.3	5.597	5.631
0.4	4.208	4.243
0.5	3.375	3.410
0.7	2.423	2.458
0.9	1.894	1.929

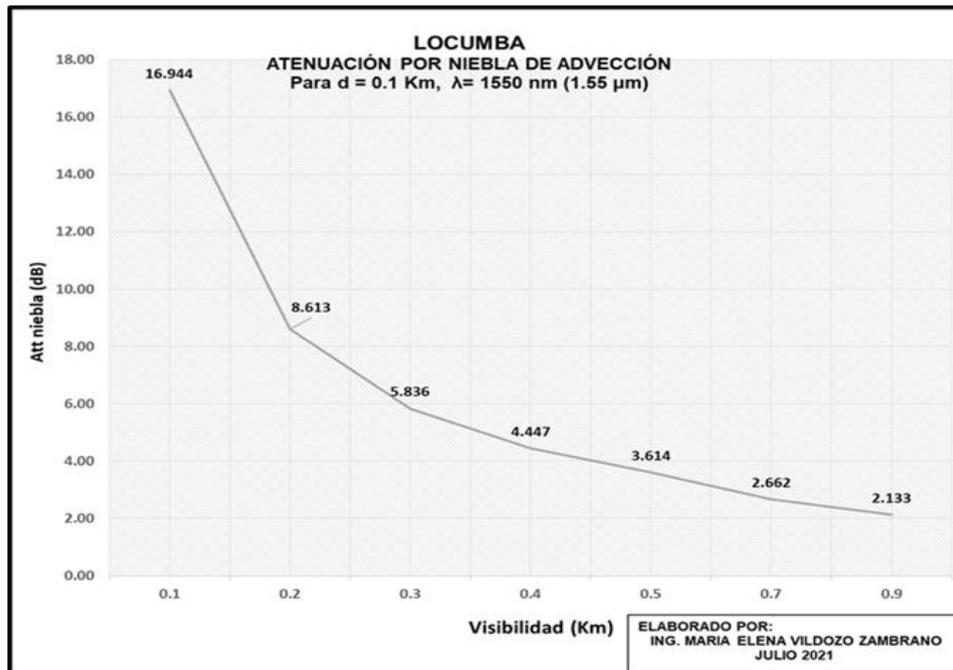
**Figura 39**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda=0.85$   $\mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.1$  km*



**Figura 40**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d = 0.1 \text{ km}$*



#### ***4.5.1.2 Atenuación por niebla de advección para $d = 0.2 \text{ km}$***

La Tabla 23 presenta la atenuación de niebla por advección para  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , con valores de Visibilidad de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km

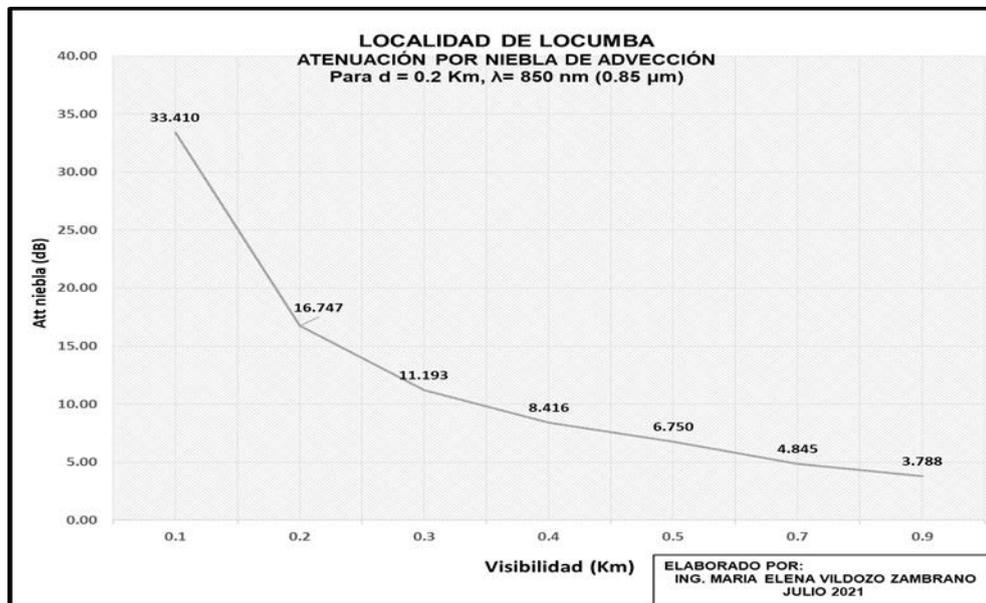
**Tabla 23**

*Atenuación por niebla de advección:  $d=0.2$  km*

$d=0.2$ km V (km)	Att niebla (dB) para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$	Att niebla (dB) para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$
0.1	33.410	33.480
0.2	16.747	16.817
0.3	11.193	11.263
0.4	8.416	8.486
0.5	6.750	6.820
0.7	4.845	4.915
0.9	3.788	3.857

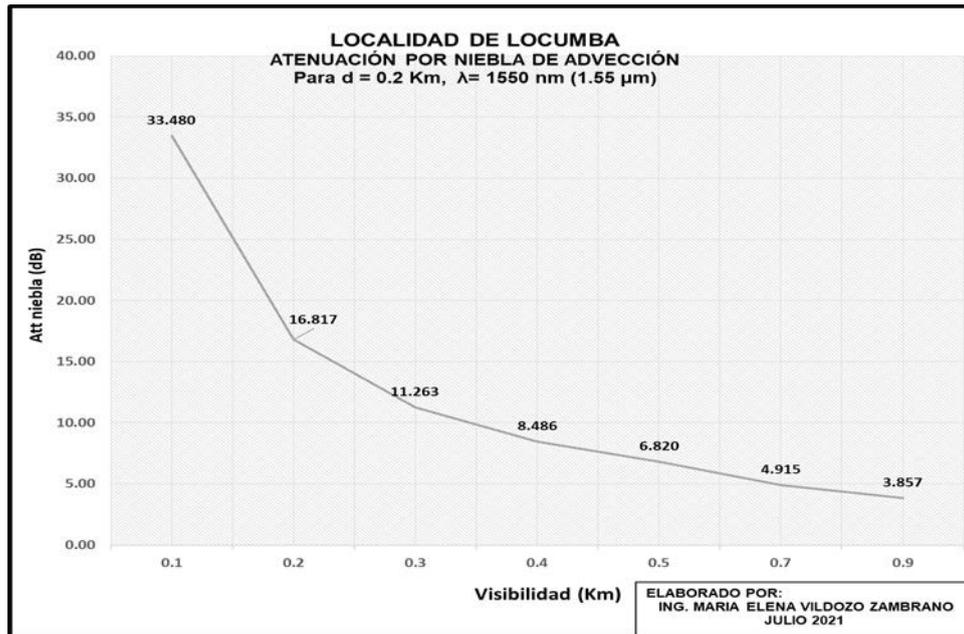
**Figura 41**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.2$  km*



**Figura 42**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d = 0.2 \text{ km}$*



#### ***4.5.1.3 Atenuación por niebla de advección para $d = 0.4 \text{ km}$***

La Tabla 24 presenta la atenuación de niebla por advección para  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , con valores de Visibilidad de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km

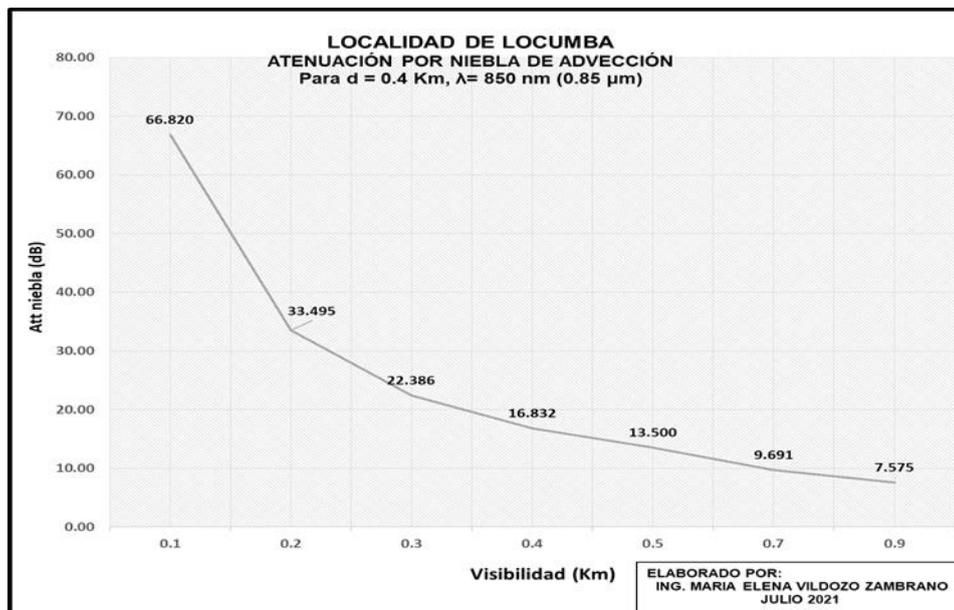
**Tabla 24**

*Atenuación por niebla de advección:  $d=0.4$  km*

$d=0.4$ km V (km)	Att niebla (dB) para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$	Att niebla (dB) para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$
0.1	66.820	66.959
0.2	33.495	33.634
0.3	22.386	22.526
0.4	16.832	16.972
0.5	13.500	13.639
0.7	9.691	9.831
0.9	7.575	7.715

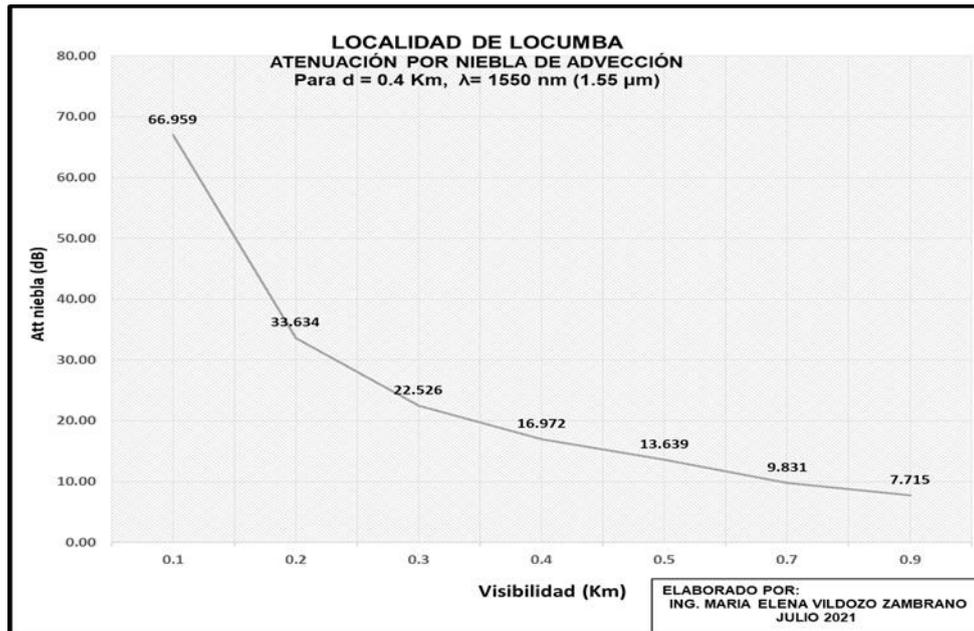
**Figura 43**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.4$  km*



**Figura 44**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d = 0.4 \text{ km}$*



#### ***4.5.1.4 Atenuación por niebla de advección para $d = 0.8 \text{ km}$***

La Tabla 25 presenta la atenuación de niebla por advección para  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , con valores de Visibilidad de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km

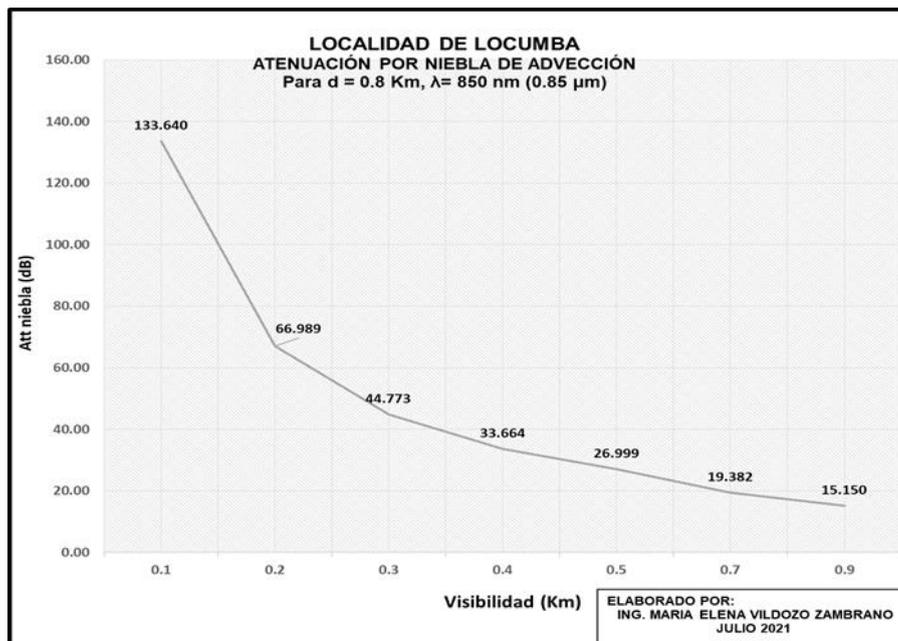
**Tabla 25**

*Atenuación por niebla de advección:  $d=0.8$  km*

$d=0.8$ km V (km)	Att niebla (dB) para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$	Att niebla (dB) para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$
0.1	133.640	133.919
0.2	66.989	67.268
0.3	44.773	45.052
0.4	33.664	33.943
0.5	26.999	27.278
0.7	19.382	19.661
0.9	15.150	15.429

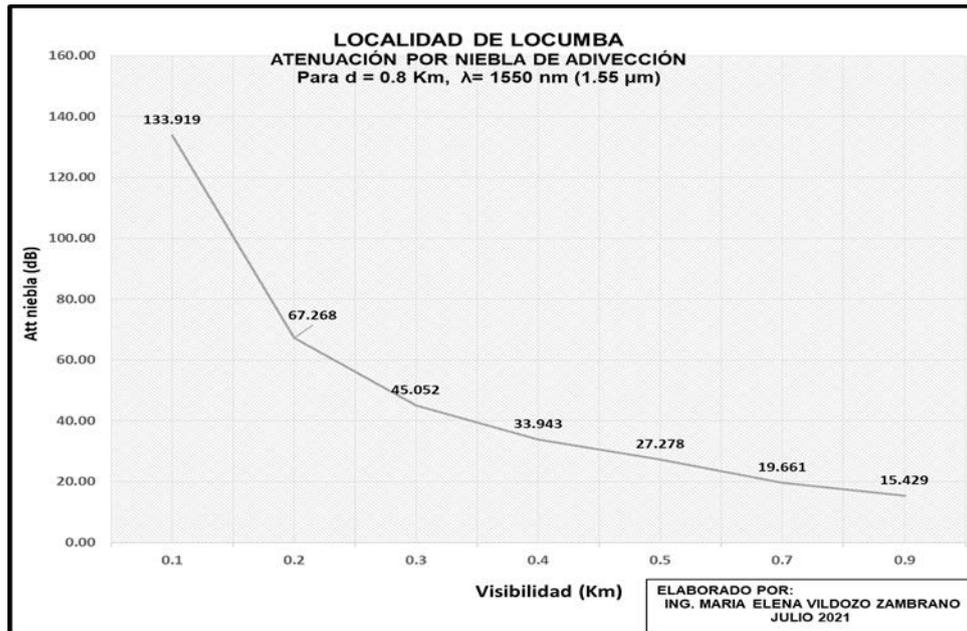
**Figura 45**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.8$  km*



**Figura 46**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.8 \text{ km}$*



#### ***4.5.1.5 Atenuación por niebla de advección para $d = 1.0 \text{ km}$***

La Tabla 27 presenta la atenuación de niebla por advección para  $\lambda=850 \text{ nm}$  y  $\lambda= 1550 \text{ nm}$ , con valores de Visibilidad de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km

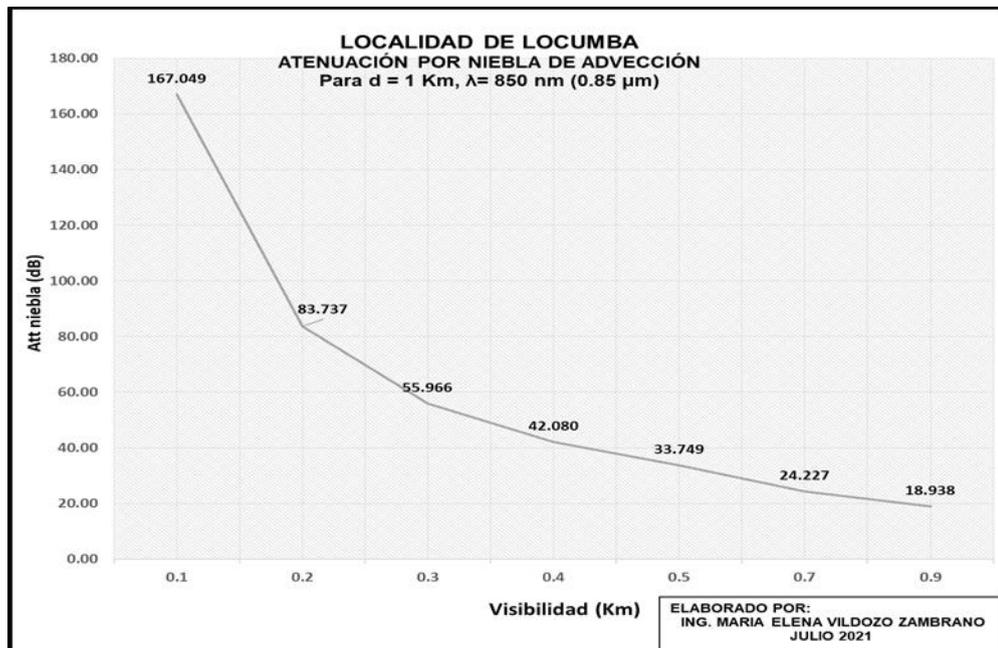
**Tabla 26**

*Atenuación por niebla de advección:  $d=1.0$  km*

$d=1$ km V (km)	Att niebla (dB) para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$	Att niebla (dB) para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$
0.1	167.049	167.398
0.2	83.737	84.086
0.3	55.966	56.315
0.4	42.080	42.429
0.5	33.749	34.098
0.7	24.227	24.576
0.9	18.938	19.287

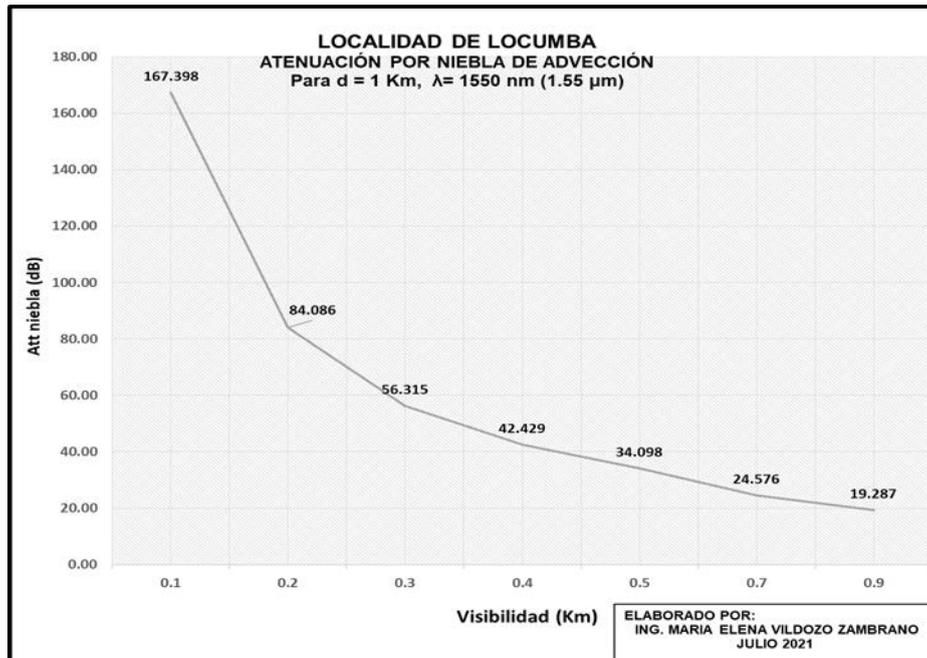
**Figura 47**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=1.0$  km*



**Figura 48**

*Atenuación por niebla de advección, para  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d = 1.0 \text{ km}$*



#### **4.5.2 Atenuación por niebla de radiación (Attniebla rad).**

##### **4.5.2.1 Atenuación por niebla de radiación para $d = 0.1 \text{ km}$**

La Tabla 27 presenta la atenuación de niebla por radiación para  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , con valores de Visibilidad de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km

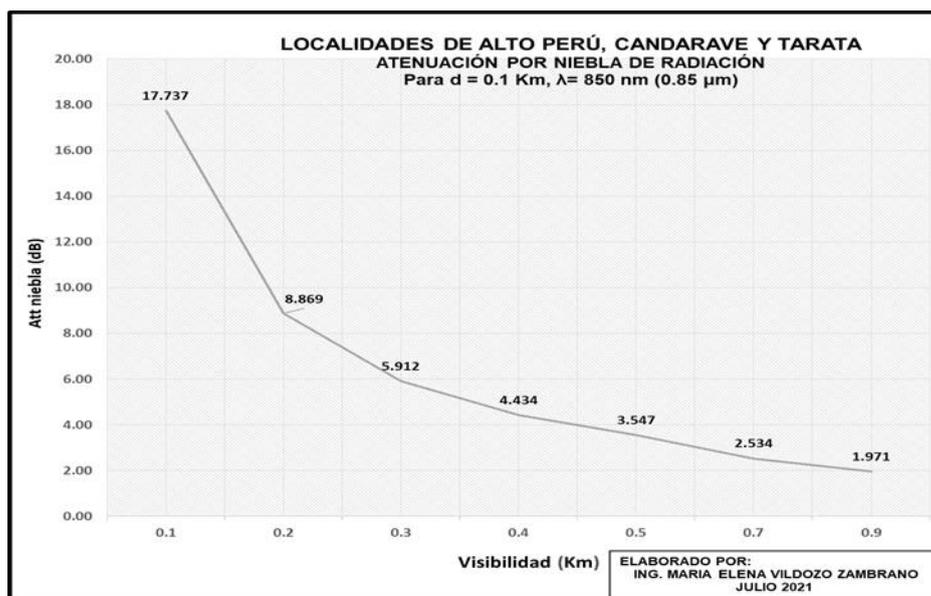
**Tabla 27**

*Atenuación por niebla de radiación:  $d=0.1$  km*

$d=0.1$ km	Att niebla (dB) para $\lambda=$	Att niebla (dB) para $\lambda=$
V (km)	0.85 $\mu\text{m}$	1.55 $\mu\text{m}$
0.1	17.737	16.944
0.2	8.869	8.613
0.3	5.912	5.836
0.4	4.434	4.447
0.5	3.547	3.614
0.7	2.534	2.662
0.9	1.971	2.133

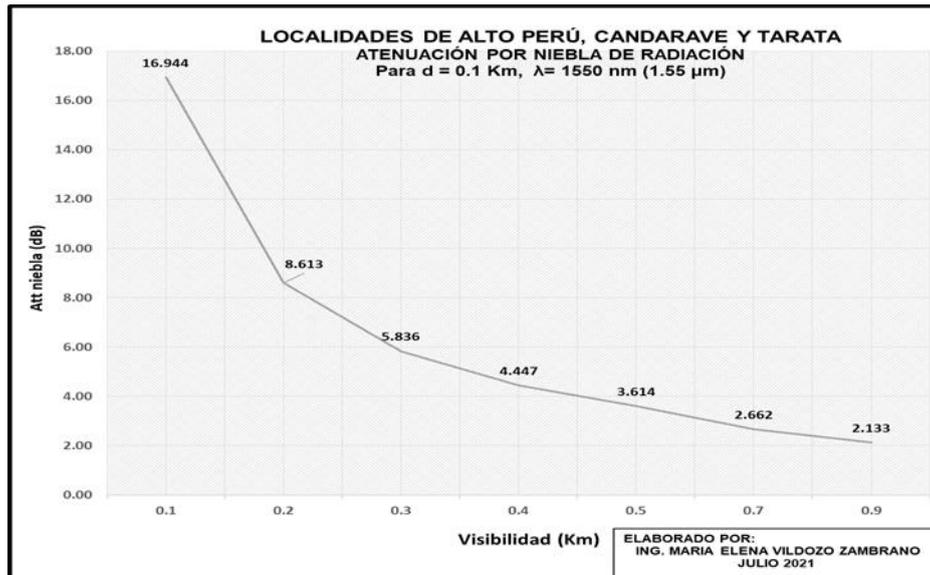
**Figura 49**

*Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.1$  km*



**Figura 50**

*Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.1 \text{ km}$*

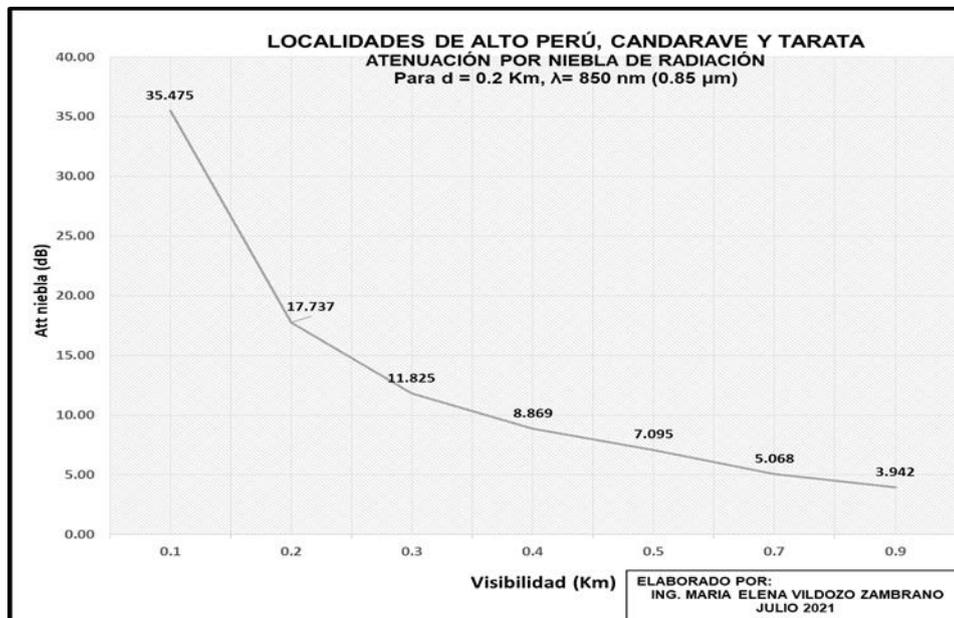


#### ***4.5.2.2 Atenuación por niebla de radiación para $d = 0.2 \text{ km}$***

La Tabla 28 presenta la atenuación de niebla por radiación para  $\lambda=850 \text{ nm}$  y  $\lambda= 1550 \text{ nm}$ , con valores de Visibilidad de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km

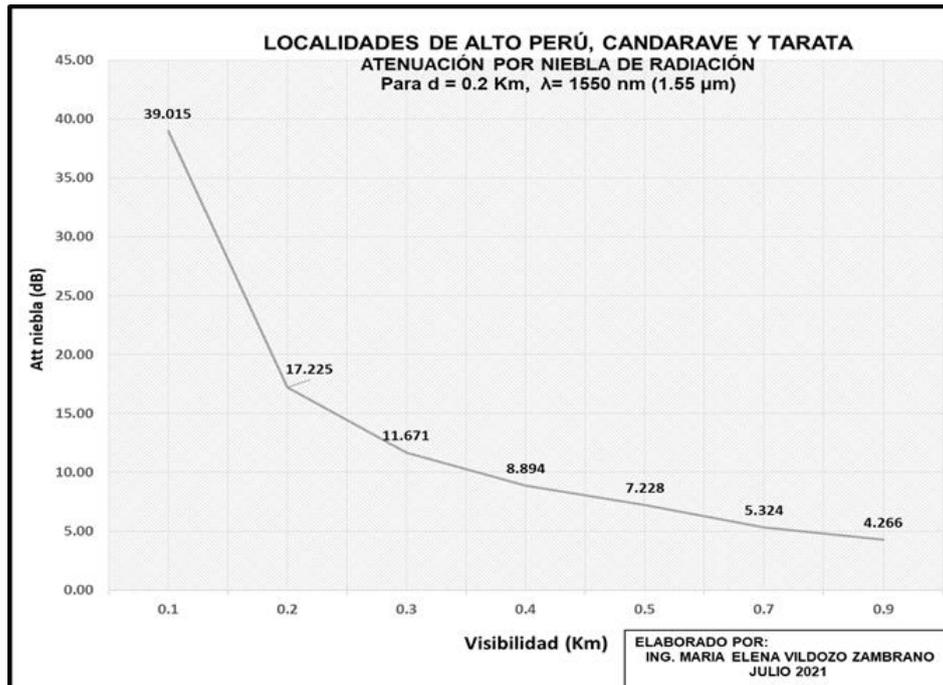
**Tabla 28***Atenuación por niebla de radiación:  $d=0.2$  km*

$d=0.2$ km V (km)	Att niebla (dB) para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$	Att niebla (dB) para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$
0.1	35.475	39.015
0.2	17.737	17.225
0.3	11.825	11.671
0.4	8.869	8.894
0.5	7.095	7.228
0.7	5.068	5.324
0.9	3.942	4.266

**Figura 51***Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.2$  km*

**Figura 52**

*Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d = 0.2 \text{ km}$*

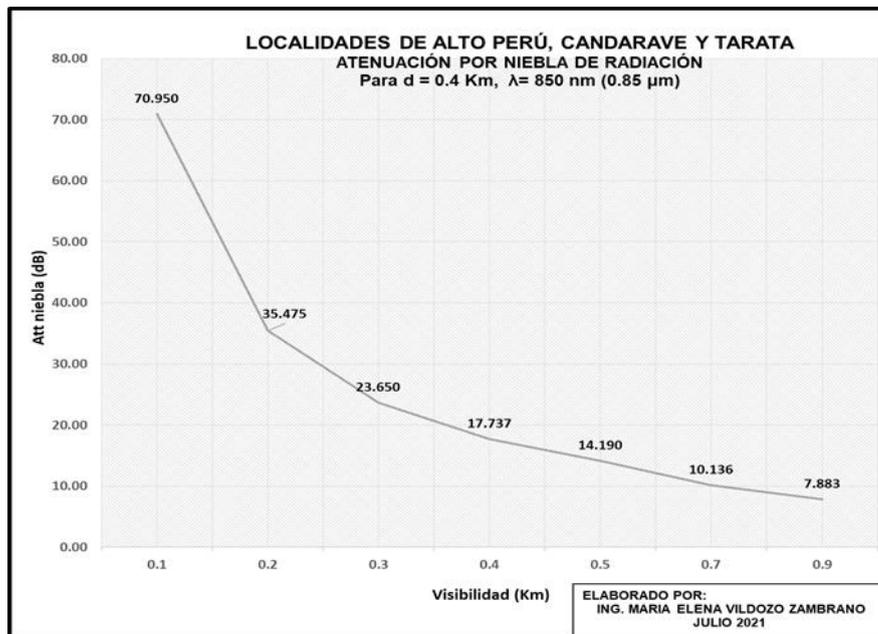


#### **4.5.2.3 Atenuación por niebla de radiación para $d = 0.4 \text{ km}$**

La Tabla 29 presenta la atenuación de niebla por radiación para  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , con valores de Visibilidad de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km

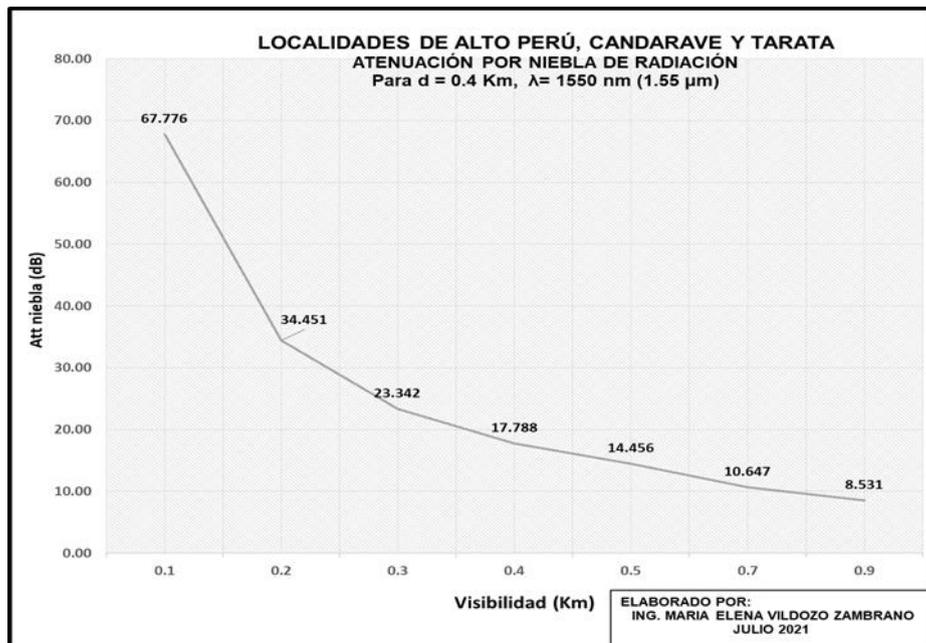
**Tabla 29***Atenuación por niebla de radiación:  $d=0.4$  km*

$d=0.4$ km V (km)	Att niebla (dB) para $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$	Att niebla (dB) para $\lambda= 1.55 \mu\text{m}$
0.1	70.950	67.776
0.2	35.475	34.451
0.3	23.650	23.342
0.4	17.737	17.788
0.5	14.190	14.456
0.7	10.136	10.647
0.9	7.883	8.531

**Figura 53***Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.4$  km*

**Figura 54**

*Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d = 0.4 \text{ km}$*



#### ***4.5.2.4 Atenuación por niebla de radiación para $d = 0.8 \text{ km}$***

La Tabla 30 presenta la atenuación de niebla por radiación para  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , con valores de Visibilidad de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km

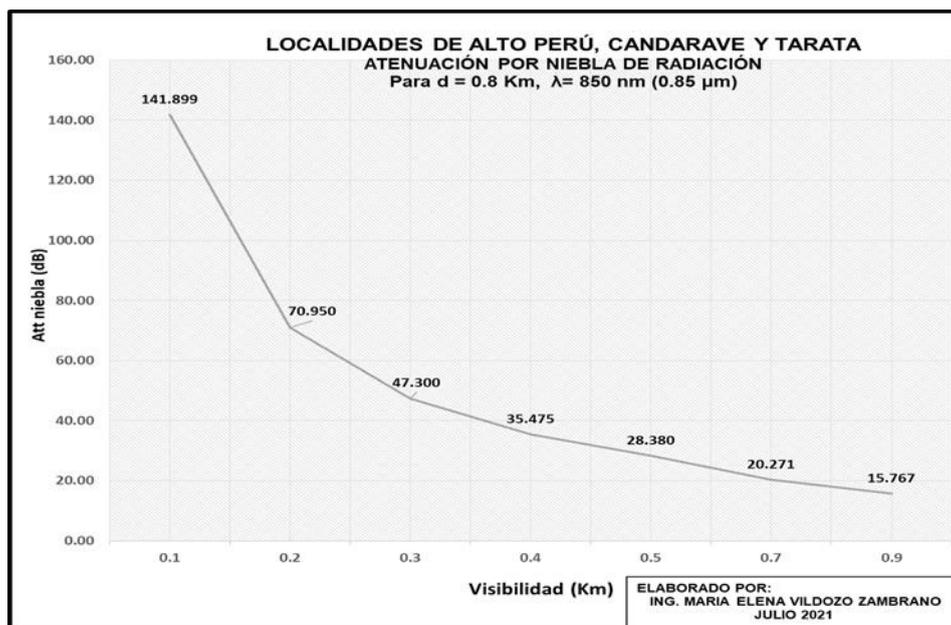
**Tabla 30**

*Atenuación por niebla de radiación:  $d=0.8$  km*

$d=0.8$ km	Att niebla (dB) para $\lambda=$	Att niebla (dB) para $\lambda=$
V (km)	0.85 $\mu\text{m}$	1.55 $\mu\text{m}$
0.1	141.899	135.552
0.2	70.950	68.902
0.3	47.300	46.685
0.4	35.475	35.576
0.5	28.380	28.911
0.7	20.271	21.294
0.9	15.767	17.062

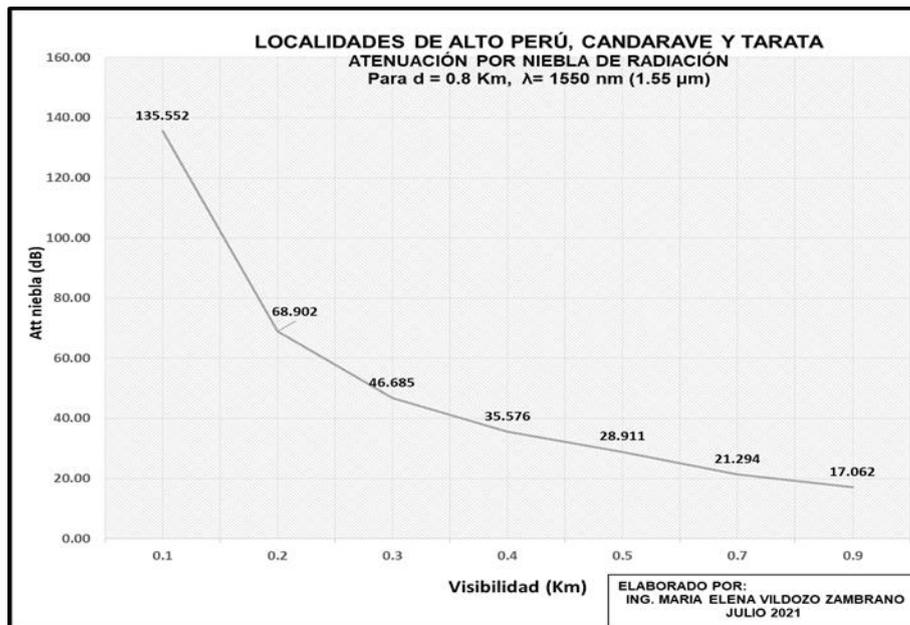
**Figura 55**

*Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda= 0.85 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=0.8$  km*



**Figura 56**

*Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d = 0.8 \text{ km}$*



#### ***4.5.2.5 Atenuación por niebla de radiación para $d = 1.0 \text{ km}$***

La Tabla 31 presenta la atenuación de niebla por radiación para  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , con valores de Visibilidad de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 y 0.9 km

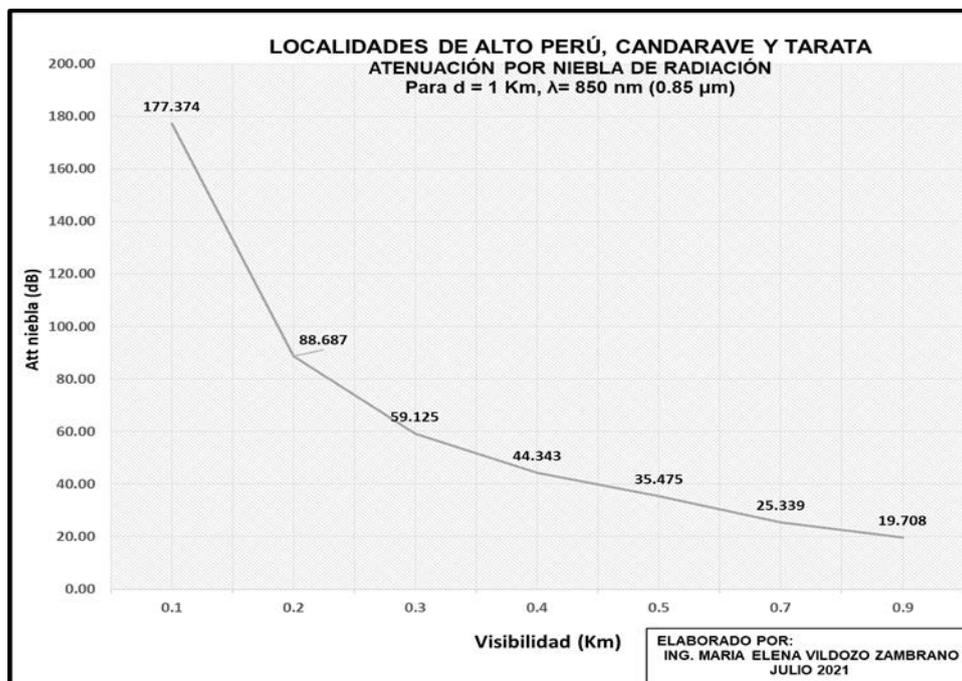
**Tabla 31**

*Atenuación por niebla de radiación:  $d=1.0$  km*

$d=1$ km V (km)	Att niebla (dB) para $\lambda=0.85$ $\mu\text{m}$	Att niebla (dB) para $\lambda=1.55$ $\mu\text{m}$
0.1	177.374	169.440
0.2	88.687	86.127
0.3	59.125	58.356
0.4	44.343	44.471
0.5	35.475	36.139
0.7	25.339	26.618
0.9	19.708	21.328

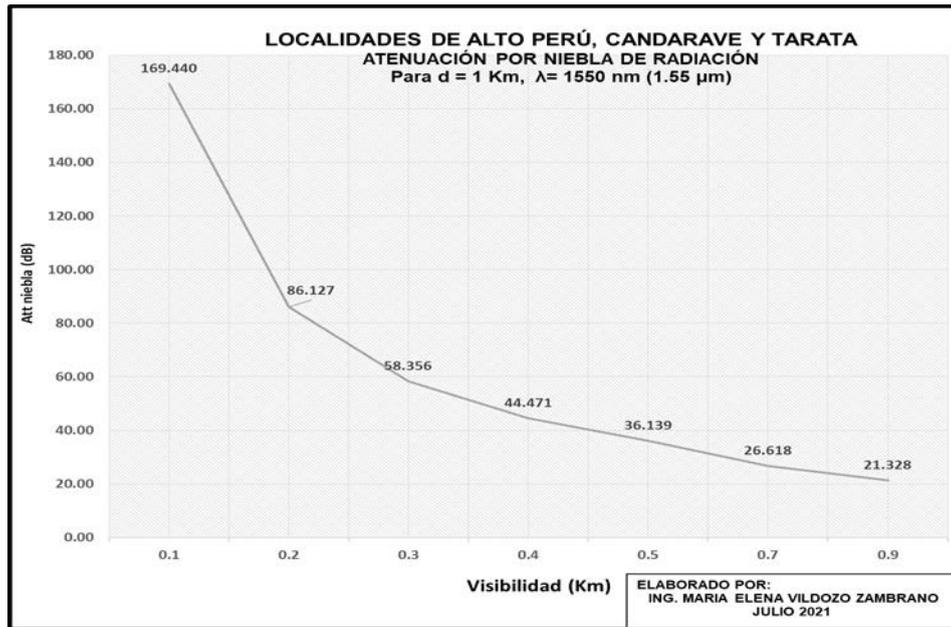
**Figura 57**

*Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda=0.85$   $\mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d=1.0$  km*



**Figura 58**

Atenuación por niebla de radiación, para  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  y longitud del enlace  $d = 1.0 \text{ km}$



#### 4.6 Cálculo de las pérdidas por nieve ( $Att_{nieve}$ ).

La atenuación debida a la nieve es función de la longitud de onda de operación del enlace óptico no guiado ( $\lambda_{nm}$ ) y del nivel de intensidad de precipitación lluvia en la zona de precipitación  $S$  (mm/h).

Según la Recomendación UIT-R P. 1814, la atenuación por nieve está en función de la intensidad de la nevada, de acuerdo a la ecuación:

$$\gamma_{nieve} = \alpha \cdot S^b$$

Siendo:

$\gamma_{nieve}$ : atenuación específica debida a la nieve (dB/km)

S: intensidad de la nevada (mm/h)

$\alpha$  y b: funciones de la longitud de onda,  $\lambda$  (nm).

En el Informe UIT-R F.2106 se indica cuando se considera nieve seca y nieve húmeda:

- Para localidades que se encuentra **a una altitud menor a los 500 metros**, se considera **nieve húmeda** y se calcula el coeficiente de atenuación específica por nieve húmeda  $\alpha_{nieve\ húmeda}$  (dB/km) según la siguiente expresión:

$$\alpha_{nieve\ húmeda} = (0.0001023 * \lambda_{nm} + 3.7855466) * S^{0.72} \text{ (dB/km)}$$

- Para localidades que se encuentra **a una altitud superior a los 500 metros**, se considera **nieve seca** y se calcula el coeficiente de atenuación específica por nieve seca  $\alpha_{nieve\ seca}$  (dB/km) según la siguiente expresión:

$$\alpha_{nieve\ seca} = (0.0000542 * \lambda_{nm} + 5.4958776) * S^{1.38} \text{ (dB/km)}$$

De acuerdo al Estudio de campo, la localidad de Locumba en la provincia Jorge Basadre no presentan nieve todo el año.

En las localidades de Tarata y Candarave, que se encuentran a una altitud entre los 2900-3400 msnm, según el SENAEMI se presenta el hidrometeoro llamado aguanieve, por lo que estimaremos como precipitación máxima  $S_{\text{máx}} = 0$  mm/hr, es decir, la no presencia de nieve en ambas localidades.

La localidad de Palca se encuentra a una altitud entre los 4000-4200 msnm, y presenta una nevada seca moderada, con un nivel de precipitación comprendido entre los 5 a 20 mm/hr, por lo que estimaremos como precipitación máxima  $S_{\text{máx}} = 10$  mm/hr.

Se determinó la atenuación por nieve seca ( $Att_{nieve\ seca}$ ) para longitudes del enlace óptico de 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 y 1.0 km., según la siguiente expresión:

$$\text{Att}_{\text{nieve seca}} = \alpha_{\text{nieve seca}} \text{ (dB/km)} * d \text{ (km)}$$

$$\text{Att}_{\text{nieve seca}} = (0.0000542 * \lambda_{nm} + 5.4958776) * S^{1.38} \text{ (dB/km)} * d \text{ (km)}$$

#### 4.6.1 Estación Automática Bocatoma El Ayro, Alto Perú

Las Tablas 32 muestra los valores obtenidos para las pérdidas ocasionadas por precipitación de nieve seca para  $S_{\text{máx}} = 10 \text{ mm/hr}$ .

Las Figuras 59 y 60 muestran la variación de la atenuación por nieve seca en función de la longitud del enlace óptico, tanto para  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ .

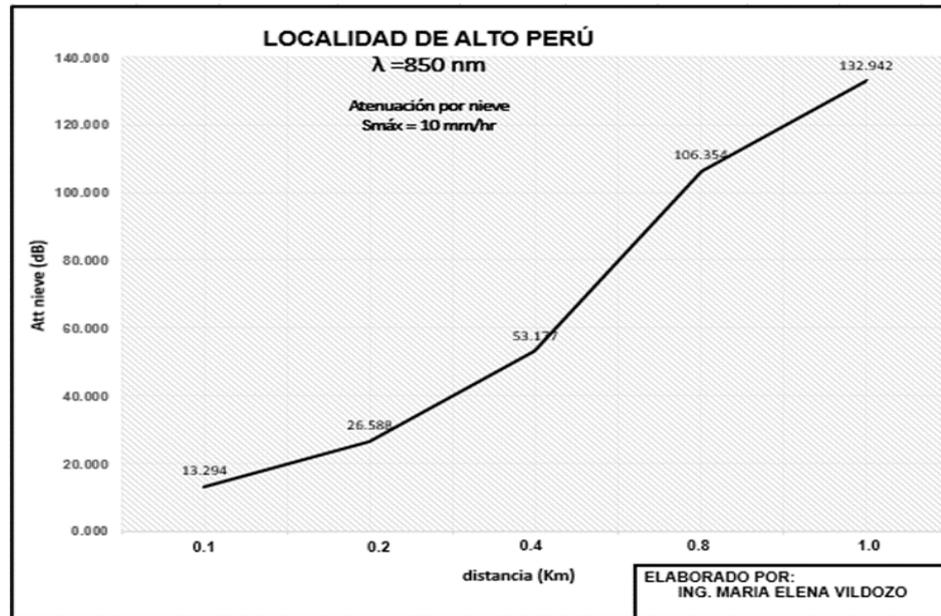
**Tabla 32**

*Atenuación por nieve seca:  $S_{\text{máx}} = 10 \text{ mm/hr}$*

$S_{\text{máx}} = 10 \text{ mm/hr}$ d (km)	Att nieve (dB). $\lambda = 850 \text{ nm}$	Att nieve (dB). $\lambda = 1550 \text{ nm}$
0.1	13.294	13.385
0.2	26.588	26.770
0.4	53.177	53.541
0.8	106.354	107.082
1	132.942	133.852

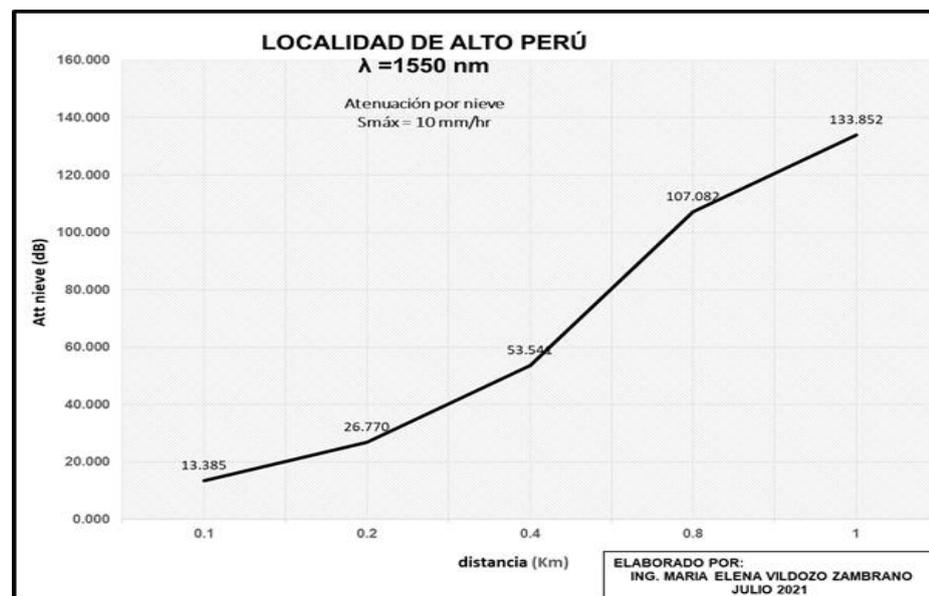
**Figura 59**

*Atenuación por nieve seca, para  $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$  y  $S_{\text{máx}} = 10 \text{ mm/hr}$*



**Figura 60**

*Atenuación por nieve seca, para  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  y  $S_{\text{máx}} = 10 \text{ mm/hr}$*



#### **4.6.2 Estaciones Automáticas de Puente Viejo, Tarata y Candarave**

Las localidades de la provincia de Tarata y Candarave se ubican en una altitud entre los 2900 a 3400 m.s.n.m. y los 2400 a 3450 m.s.n.m. respectivamente.

El Informe del SENAMHI (2018) sobre Estudio de las frecuencias de las nevadas en el Perú, indica que:

En el Perú, sin embargo, también causan grandes pérdidas económicas en la sierra, estas pueden generar efectos adversos en el sector agrícola, turismo, transporte y vivienda, e incluso, daños en la salud, especialmente en los sectores central y sur del país. Estas precipitaciones suelen presentarse en localidades por encima de los 3800 msnm. A pesar de presentar un riesgo para el país, las nevadas tienen escasas mediciones y carecen de un registro histórico extenso. (SENAMHI, 2018, pág. 8)

Por lo que se considera como una buena estimación, no se considera las pérdidas por nieve en las localidades de Tarata y Candarave.

Con respecto a la localidad de Locumba, por estar en zona costa próxima a la línea ecuatorial, no existe precipitaciones de nieve en la zona.

## **Capítulo V: Evaluación de los enlaces ópticos no guiados en la Región Tacna**

En este capítulo se evalúa la operatividad de los enlaces ópticos no guiados en las zonas rurales de la Región Tacna, utilizando los resultados de las pérdidas por lluvia, pérdidas por niebla y pérdidas por nieve, cuyos valores han sido obtenidas en el capítulo anterior.

La metodología a seguir consistió en:

1. Establecer un enlace óptico en una localidad de cada provincia de la Región Tacna.
2. Se seleccionó el equipamiento óptico para las longitudes de onda de operación de  $\lambda = 850$  nm y  $\lambda = 1550$  nm. Los parámetros de Potencia de Emisión (Pe) y Sensibilidad del receptor (Sr), son suministrados por los diferentes fabricantes de los equipos ópticos que existen en el mercado.
3. Utilizando la Recomendación UIT-R P.1814 que trata sobre “Métodos de predicción necesarios para diseñar enlaces ópticos”, se calculó las pérdidas geométricas y las pérdidas del sistema.
4. Las pérdidas atmosféricas por lluvia, niebla y nieve fueron obtenidas con las expresiones matemáticas empleadas en el capítulo anterior, tomando en cuenta

las características de propagación de cada enlace y las condiciones atmosféricas propias de cada localidad.

5. Para la evaluación se determinación del margen de desvanecimiento del enlace ( $M_{\text{link}}$ ).

## **5.1 Descripción de los procedimientos y de los métodos usados para evaluar la operatividad de un enlace óptico no guiado.**

### **5.1.1 Descripción de los enlaces ópticos no guiados seleccionados**

Por las características de las localidades de rurales de la Región Tacna, los enlaces ópticos que se utilizaron fueron de hasta 500 metros de longitud por las condiciones de línea de vista.

A continuación, se presentan los enlaces ópticos para las localidades ubicadas en las cuatro provincias de Tacna.

#### ***5.1.1.1 Enlace óptico en la localidad de Alto Perú, provincia de Tacna.***

La ubicación del enlace óptico se muestra a continuación.

El enlace permite interconectar el Centro de Salud y la Institución Educativa de Alto Perú.

### Figura 61

*Enlace óptico Centro de Salud - Institución Educativa en Alto Perú.*



*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO

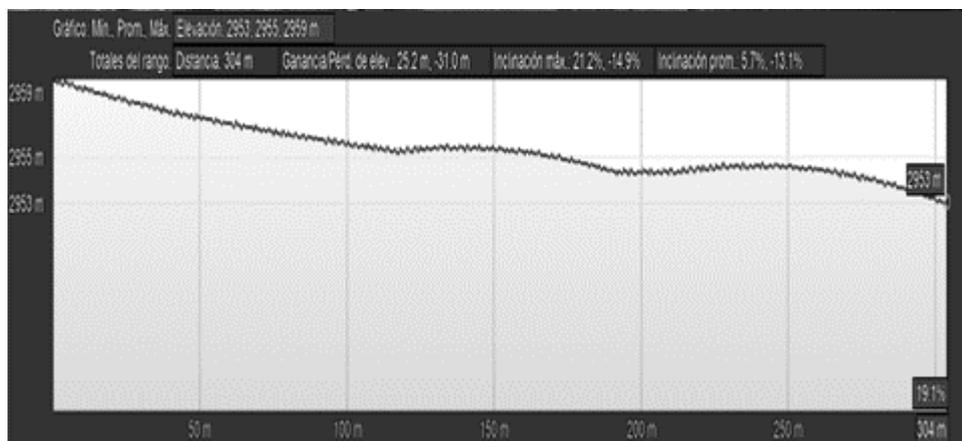
Longitud del enlace = 304 metros

Altitud: 3000-4000 m.s.n.m.

Perfil topográfico: Línea de vista sin obstáculos

### Figura 62

*Perfil topográfico: Enlace óptico Centro de Salud - Institución Educativa en Alto Perú.*



*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO

### ***5.1.1.2 Enlace óptico en la localidad de Tarata, provincia de Tarata.***

La ubicación del enlace óptico se muestra a continuación. El enlace permite interconectar la Municipalidad de Tarata con la Estación automática Tarata.

#### **Figura 63**

*Enlace óptico Municipalidad de Tarata - Estación automática Tarata.*

*Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO*



Las características del perfil topográfico del enlace óptico, se muestran a continuación:

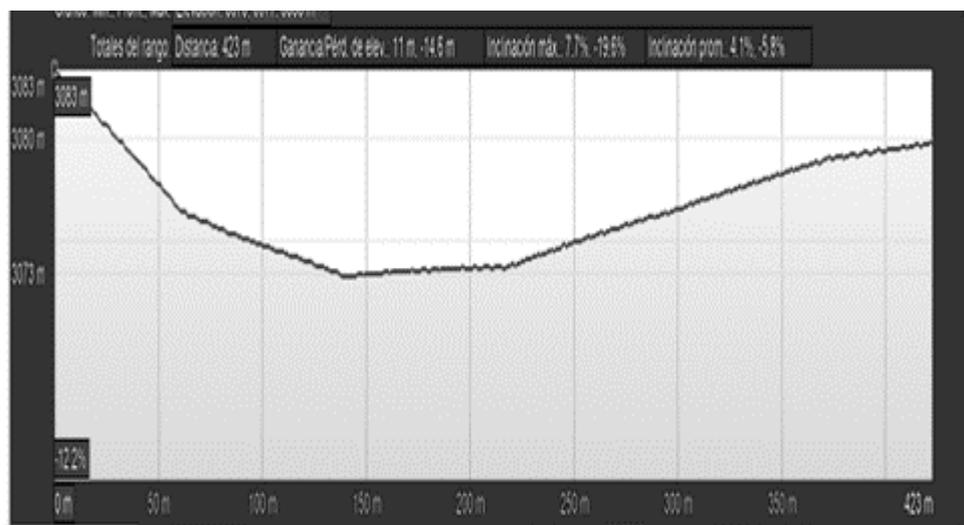
Longitud del enlace = 422 metros

Altitud: 3070-3100 m.s.n.m.

Perfil topográfico: Línea de vista sin obstáculos.

### Figura 64

*Perfil topográfico: Enlace óptico Municipalidad de Tarata - Estación automática Tarata.*



*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO

#### ***5.1.1.3 Enlace óptico en la localidad de Candarave, provincia de Candarave.***

La ubicación del enlace óptico se muestra a continuación. El enlace permite interconectar la Municipalidad de Candarave con la Estación automática Candarave.

**Figura 65**

*Enlace óptico Municipalidad de Candarave - Estación automática Candarave.*



*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO

Las características del perfil topográfico del enlace óptico, se muestran a continuación:

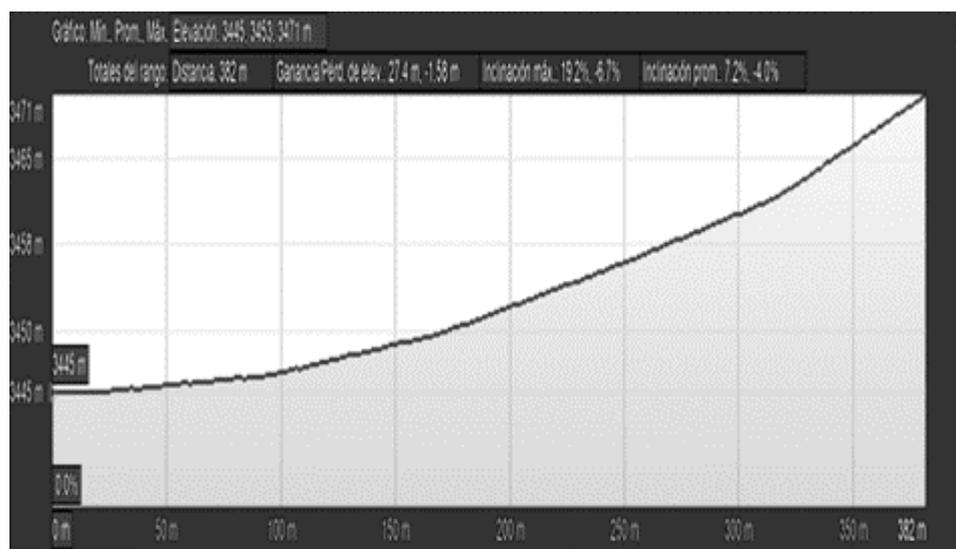
Enlace = 382 metros

Altitud: 3400-3500 m.s.n.m.

Perfil topográfico: Línea de vista sin obstáculos.

**Figura 66**

*Perfil topográfico: Enlace óptico Municipalidad de Candarave - Estación automática Candarave.*



*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO

#### ***5.1.1.4 Enlace óptico en la localidad de Locumba, provincia de Jorge Basadre.***

La ubicación del enlace óptico se muestra a continuación. El enlace permite interconectar el Centro Experimental con la Institución Educativa del distrito de Locumba.

**Figura 67**

*Enlace óptico Centro Experimental-Institución Educativa de Locumba.*



*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO

Las características del perfil topográfico del enlace óptico, se muestran a continuación:

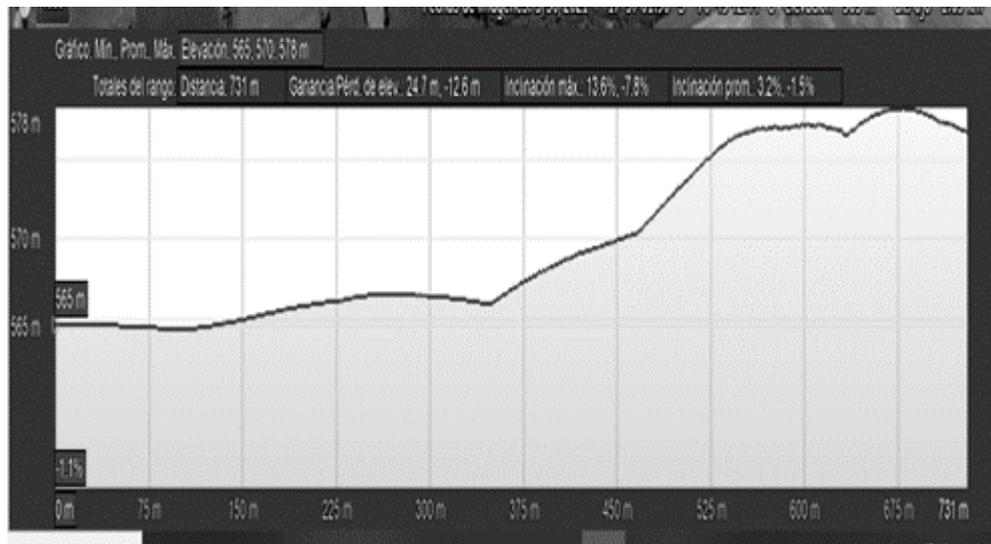
Longitud del enlace = 731 metros

Altitud: 560-580 m.s.n.m.

Perfil topográfico: Línea de vista sin obstáculos.

### Figura 68

*Perfil topográfico enlace óptico Centro Experimental-Institución Educativa de Locumba.*



*Nota.* Imagen generada con el software GOOGLE EARTH PRO

#### 5.1.2 Potencia de Emisión y Sensibilidad del receptor óptico

Se eligió el equipamiento óptico, de acuerdo a la longitud de onda de operación del enlace.

##### 5.1.2.1 Para $\lambda = 850 \text{ nm}$

Se eligió al fabricante TERESCOPE modelo 5000 con las siguientes características técnicas:

Potencia de emisión: 20 dBm

Sensibilidad de recepción: -33 dBm

Divergencia del haz: 2 mrad.

##### 5.1.2.2 Para $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Se eligió al fabricante SONAbeam modelo 1250-E con las siguientes

características técnicas:

Potencia de emisión: 23 dBm

Sensibilidad de recepción: -20 dBm

Divergencia del haz: 3 mrad.

### 5.1.3 Pérdidas geométricas ( $A_{geo}$ )

Aun en las condiciones meteorológicas de tiempo despejado, se produce divergencia en el haz de la fuente óptica y, por lo tanto, el detector óptico recibe un menor nivel de potencia óptica. La pérdida o atenuación ocasionada por la dispersión del haz óptico de transmisión cuando se incrementa la cobertura la distancia, se denomina atenuación geométrica y se expresa mediante la expresión:

$$A_{geo}(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left( \frac{S_d}{S_{captura}} \right)$$

Siendo:

$S_{captura}$ : superficie de captura del receptor (el estándar indica 0.025 m<sup>2</sup>)

$S_d$ : superficie del haz de transmisión a la distancia  $d$ , que se calcula mediante la expresión:

$$S_d = \frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2$$

Siendo:

$\theta$ : divergencia del haz (mrad). Según el fabricante para  $\lambda = 850$  nm

$d$ : distancia entre transmisor y receptor (metros).

Para el fabricante TERESCOPE, para  $\lambda = 850$  nm, la divergencia del haz es  $\theta = 2$  mrad.

Para el fabricante SONAbeam, para  $\lambda = 1550$  nm, la divergencia del haz es  $\theta = 3$  mrad.

### 5.1.3.1 Cálculo de la atenuación geométrica para $\lambda = 850$ nm

**Tabla 33**

*Atenuación geométrica para  $\lambda = 850$  nm*

ENLACE	d(m)	$\lambda$ (nm)	Scaptura	$\Theta$	Sd	Aff	Ageo
PALCA	304	850	0.025	0.002	0.290	11.613	10.650
TARATA	422	850	0.025	0.002	0.559	22.379	13.498
CANDARAVE	382	850	0.025	0.002	0.458	18.337	12.633
LOCUMBA	731	850	0.025	0.002	1.679	67.150	18.270

### 5.1.3.2 Cálculo de la atenuación geométrica para $\lambda = 1550$ nm

**Tabla 34**

*Atenuación geométrica para  $\lambda = 1550$  nm*

ENLACE	d(m)	$\lambda$ (nm)	Scaptura	$\Theta$	Sd	Aff	Ageo
PALCA	304	1550	0.025	0.003	0.653	26.130	14.171
TARATA	732	1550	0.025	0.003	1.259	50.352	17.020
CANDARAVE	382	1550	0.025	0.003	1.031	41.259	16.155
LOCUMBA	731	1550	0.025	0.003	3.777	151.087	21.792

### 5.1.4 Pérdidas del sistema

Está compuesto por las pérdidas en los conectores, pérdidas en los equipos, pérdidas en la fibra óptica de interconexión y pérdidas en el desalineamiento de antenas. Según los datos de los fabricantes se tienen.

Pérdidas en equipos: 1 dB

Pérdidas en la fibra óptica: 0 dB

Pérdidas en los conectores: 1 dB

Pérdidas en el desalineamiento de antenas: 1 dB

-----  
 Pérdidas totales del sistema:  $A_{\text{sistema}} = 3 \text{ dB}$ .

### 5.1.5 Atenuación por lluvia ( $Att_{\text{lluvia}}$ )

Según el Informe UIT-R F.2106 con referencia a la atenuación por lluvia, indica que: “los parámetros obtenidos en el Modelo de Predicción francés, son coherentes con los que figuran en la Recomendación UIT-R P.1814” (UIT, 2007). Por lo que usaremos el Modelo Francés, para determinar la atenuación por lluvia.

**Tabla 35**

*Atenuación por lluvia máxima*

ENLACE ÓPTICO	Modelo Predicción	R <sub>máx</sub> (mm/hr)	$\alpha_{\text{lluvia}}$ (dB/km)	d (km)	$Att_{\text{lluvia}}$ (dB)
Palca	Francés	8.4	4.478	0.304	1.361
Tarata	Francés	23.4	8.896	0.422	3.754
Candarave	Francés	4.2	2.814	0.382	1.075
Locumba	Francés	0	0.000	0.731	0

### 5.1.6 Atenuación por niebla ( $Att_{\text{niebla}}$ )

#### 5.1.6.1 Atenuación por niebla para $\lambda = 850 \text{ nm}$

**Tabla 36***Atenuación por niebla para  $\lambda = 850 \text{ nm}$* 

ENLACE	d (km)	V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Palca	0.304	Att niebla (dB)	107.843	53.922	26.961	17.974	13.480	10.784	7.703	5.991
Tarata	0.422	Att niebla (dB)	149.704	74.852	37.426	24.951	18.713	14.970	10.693	8.317
Candarave	0.382	Att niebla (dB)	135.514	67.757	33.878	22.586	16.939	13.551	9.680	7.529
Locumba	0.731	Att niebla (dB)	243.917	122.113	61.211	40.911	30.761	24.670	17.710	13.843

**5.1.6.2 Atenuación por niebla para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$** **Tabla 37***Atenuación por niebla para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$* 

ENLACE	d (km)	V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Palca	0.304	Att niebla (dB)	118.418	59.209	29.605	19.736	14.802	11.842	8.458	6.579
Tarata	0.422	Att niebla (dB)	164.383	82.192	41.096	27.397	20.548	16.438	11.742	9.132
Candarave	0.382	Att niebla (dB)	148.802	74.401	37.200	24.800	18.600	14.880	10.629	8.267
Locumba	0.731	Att niebla (dB)	244.172	122.368	61.467	41.166	31.016	24.925	17.965	14.099

**5.1.7 Atenuación por nieve (Attnieve)****5.1.7.1 Atenuación por nieve para  $\lambda = 850 \text{ nm}$**

**Tabla 38***Atenuación por nieve para  $\lambda = 850 \text{ nm}$* 

	Smáx (mm/hr)	$\lambda$ (nm)	Tipo de nieve	$\alpha_{\text{nieve}}$ (dB/km)	d ( km)	Attnieve (dB)
Tarata	0	850	no	0.000	0.422	0.000
Candarave	0	850	no	0.00	0.382	0.00
Palca	10	850	seca	132.942	0.304	40.414
Locumba	0	850	no	0.00	0.731	0.000

**5.1.7.2 Atenuación por nieve para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$** **Tabla 39***Atenuación por nieve para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$* 

	Smáx (mm/hr)	$\lambda$ (nm)	Tipo de nieve	$\alpha_{\text{nieve}}$ (dB/km)	d ( km)	Attnieve (dB)
Tarata	0	1550	no	0.000	0.422	0.000
Candarave	0	1550	seca	0.00	0.382	0.000
Palca	10	1550	seca	133.852	0.304	40.691
Locumba	0	1550	no	0.000	0.731	0.000

**5.2 Margen de desvanecimiento del enlace ( $M_{\text{link}}$ )**

Se determinó el margen de desvanecimiento del enlace óptico, para las longitudes de onda de  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  para cada localidad seleccionada.

Con la finalidad de observar la variabilidad del margen de desvanecimiento del enlace con respecto a la atenuación por niebla, se utilizó valores de visibilidad  $V = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7$  y  $0.9 \text{ km}$

## 5.2.1 Enlace óptico Palca, Tacna.

### 5.2.1.1 Margen de desvanecimiento del enlace para $\lambda = 850 \text{ nm}$

**Tabla 40**

*Margen de desvanecimiento del enlace para  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , Enlace Palca.*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Pe (dBm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Sr (dBm)	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
Ageo (dB)	10.65	10.65	10.65	10.65	10.65	10.65	10.65	10.65
Att lluvia (dB)	1.361	1.361	1.361	1.361	1.361	1.361	1.361	1.361
Att niebla (dB)	107.843	53.922	26.961	17.974	13.480	10.784	7.703	5.991
Att nieve (dB)	40.414	40.414	40.414	40.414	40.414	40.414	40.414	40.414
A sistema (dB)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
M <sub>link</sub> (dB) con pérdidas atm	-110.269	-56.347	-29.386	-20.399	-15.906	-13.210	-10.128	-8.417

### 5.2.1.2 Margen del enlace para $\lambda = 1550 \text{ nm}$

**Tabla 41**

*Margen de desvanecimiento del enlace para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ . Enlace Palca.*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Pe (dBm)	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
Sr (dBm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Ageo (dB)	10.65	10.65	10.65	10.65	10.65	10.65	10.65	10.65
Att lluvia (dB)	1.361	1.361	1.361	1.361	1.361	1.361	1.361	1.361
Att niebla (dB)	118.418	59.209	29.605	19.736	14.802	11.842	8.458	6.579
Att nieve (dB)	40.691	40.691	40.691	40.691	40.691	40.691	40.691	40.691
A sistema (dB)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
M <sub>link</sub> (dB) con pérdidas atm	-131.120	-71.911	-42.307	-32.438	-27.504	-24.544	-21.160	-19.281

## 5.2.2 Enlace óptico Tarata, Tarata.

### 5.2.2.1 Margen del enlace para $\lambda = 850 \text{ nm}$

**Tabla 42**

*Margen de desvanecimiento del enlace para  $\lambda = 850 \text{ nm}$ . Enlace Tarata.*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Pe (dBm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Sr (dBm)	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
Ageo (dB)	13.498	13.498	13.498	13.498	13.498	13.498	13.498	13.498
Att lluvia (dB)	3.754	3.754	3.754	3.754	3.754	3.754	3.754	3.754
Att niebla (dB)	149.704	74.852	37.426	24.951	18.713	14.970	10.693	8.317
Att nieve (dB)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A sistema (dB)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
M <sub>link</sub> (dB) con pérdida atm	-117.0	-42.1	-4.7	7.8	14.0	17.8	22.1	24.4

### 5.2.2.2 Margen del enlace para $\lambda = 1550 \text{ nm}$

**Tabla 43**

*Margen de desvanecimiento del enlace para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ . Enlace Tarata.*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Pe (dBm)	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
Sr (dBm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Ageo (dB)	17.02	17.02	17.02	17.02	17.02	17.02	17.02	17.02
Att lluvia (dB)	3.754	3.754	3.754	3.754	3.754	3.754	3.754	3.754
Att niebla (dB)	164.383	82.192	41.096	27.397	20.548	16.438	11.742	9.132
Att nieve (dB)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A sistema (dB)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Mlink (dB) con pérdida atm	-145.157	-62.966	-21.870	-8.171	-1.322	2.788	7.484	10.094

### 5.2.3 Enlace óptico Candarave, Candarave.

#### 5.2.3.1 Margen del enlace para $\lambda = 850 \text{ nm}$

**Tabla 44**

*Margen de desvanecimiento del enlace para  $\lambda = 850 \text{ nm}$ . Enlace Candarave*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Pe (dBm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Sr (dBm)	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
Ageo (dB)	15.633	15.633	15.633	15.633	15.633	15.633	15.633	15.633
Att lluvia (dB)	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075
Att niebla (dB)	135.514	67.757	33.878	22.586	16.939	13.551	9.680	7.529
Att nieve (dB)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A sistema (dB)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Mlink (dB) con pérdidas atm	-102.222	-34.465	-0.586	10.706	16.353	19.741	23.612	25.763

### 5.2.3.2 Margen del enlace para $\lambda = 1550 \text{ nm}$

**Tabla 45**

*Margen de desvanecimiento del enlace para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ . Enlace Candarave*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Pe (dBm)	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
Sr (dBm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Ageo (dB)	16.155	16.155	16.155	16.155	16.155	16.155	16.155	16.155
Att lluvia (dB)	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075	1.075
Att niebla (dB)	148.802	74.401	37.200	24.800	18.600	14.880	10.629	8.267
Att nieve (dB)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A sistema (dB)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Mlink (dB) con pérdidas atm	-126.032	-51.631	-14.430	-2.030	4.170	7.890	12.141	14.503

## 5.2.4 Enlace óptico Locumba, Jorge Basadre.

### 5.2.4.1 Margen del enlace para $\lambda = 850 \text{ nm}$

**Tabla 46**

*Margen de desvanecimiento del enlace para  $\lambda = 850 \text{ nm}$ . Enlace Jorge Basadre*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Pe (dBm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Sr (dBm)	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
Ageo (dB)	12.633	12.633	12.633	12.633	12.633	12.633	12.633	12.633
Att lluvia (dB)	0	0	0	0	0	0	0	0
Att niebla (dB)	243.917	122.113	61.211	40.911	30.761	24.670	17.710	13.843
Att nieve (dB)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A sistema (dB)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Mlink (dB) con pérdidas atm	-206.550	-84.746	-23.844	-3.544	6.606	12.697	19.657	23.524

### 5.2.4.2 Margen del enlace para $\lambda = 1550 \text{ nm}$

**Tabla 47**

*Margen de desvanecimiento del enlace para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ . Enlace Jorge Basadre*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
Pe (dBm)	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
Sr (dBm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Ageo (dB)	16.155	16.155	16.155	16.155	16.155	16.155	16.155	16.155
Att lluvia (dB)	0	0	0	0	0	0	0	0
Att niebla (dB)	244.172	122.368	61.467	41.166	31.016	24.925	17.965	14.099
Att nieve (dB)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A sistema (dB)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
M <sub>link</sub> (dB) con pérdidas atm	-220.327	-98.523	-37.622	-17.321	-7.171	-1.080	5.880	9.746

## 5.3 Análisis de los resultados

### 5.3.1 Enlace óptico Alto Perú, Palca, Tacna.

*5.3.1.1 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para  $\lambda = 850 \text{ nm}$ . Enlace Alto Perú.*

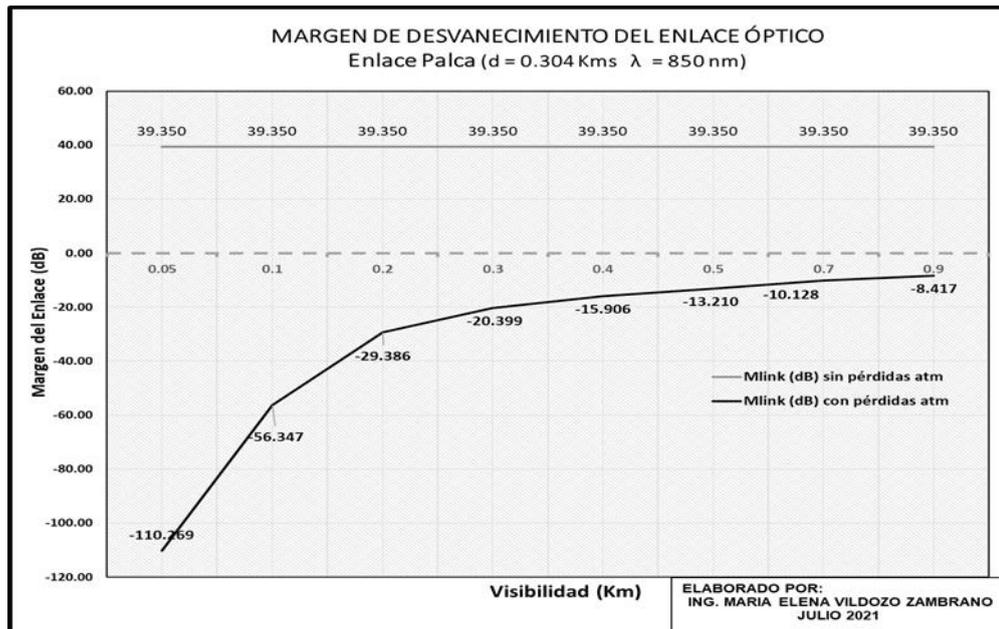
**Tabla 48**

*Comparación del margen del enlace óptico para  $\lambda = 850 \text{ nm}$ . Enlace Alto Perú, Palca.*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
M <sub>link</sub> (dB) sin pérdidas atm	39.350	39.350	39.350	39.350	39.350	39.350	39.350	39.350
M <sub>link</sub> (dB) con pérdidas atm	-110.269	-56.347	-29.386	-20.399	-15.906	-13.210	-10.128	-8.417

**Figura 69**

*Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Palca, para  $\lambda=850$  nm y  $d=0.304$  km*



### Análisis de resultados obtenidos

En la figura 69 se observa que el Margen del enlace sin pérdidas atmosféricas para  $d=0.304$  km. y  $\lambda=850$  nm es de 39.35 dB. Debido a la presencia de lluvia, niebla y nieve el margen del enlace con pérdidas atmosféricas se reduce en función de la visibilidad.

Para una visibilidad de  $V=50$  m el  $M_{link}$  disminuye a -110.269 dB y para una visibilidad de  $V=900$  m el  $M_{link}$  disminuye a -8.417 dB. Esto se debe a las pérdidas por niebla y nieve en el enlace. Las pérdidas por niebla varían desde 118.418 dB para una  $V=50$  m hasta 6.579 dB para una  $V=900$  m. Las pérdidas por nieve para un  $R=10$  mm/hr es de 40.410 dB. Las pérdidas por lluvia es 1.361 dB, insignificante comparable con las otras pérdidas ocasionadas por la niebla y nieve.

De los resultados obtenidos podemos concluir que para condiciones de

precipitación de nieve de  $R= 10$  mm/hr y una longitud de enlace  $d=304$  m, el enlace deja de operar.

### 5.3.1.2 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 1550$ nm. Enlace Alto Perú, Palca.

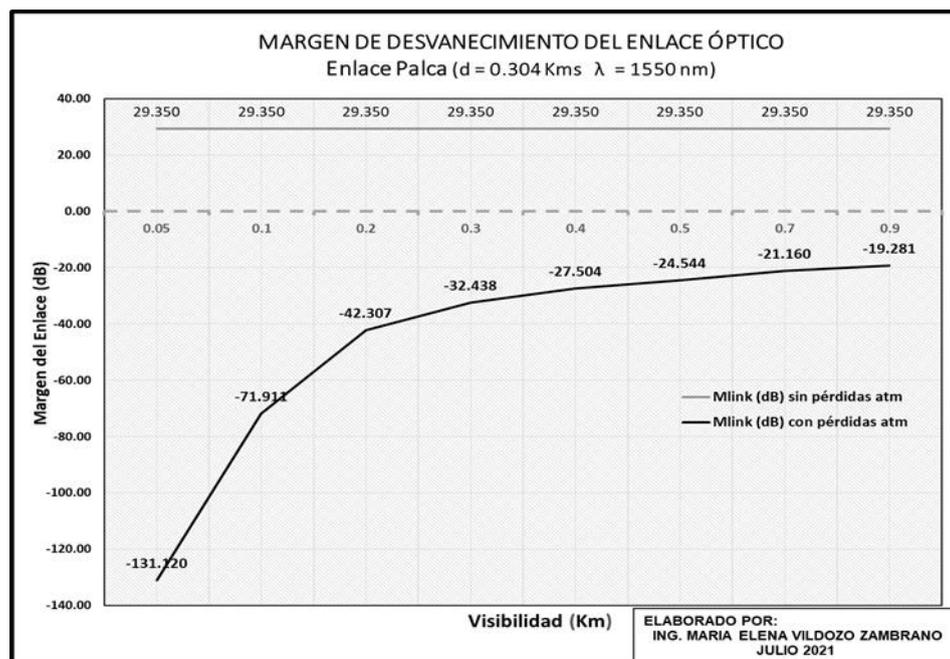
**Tabla 49**

Comparación del margen del enlace óptico para  $\lambda = 1550$  nm Enlace Alto Perú, Palca

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
M <sub>link</sub> (dB) sin pérdidas atm	29.350	29.350	29.350	29.350	29.350	29.350	29.350	29.350
M <sub>link</sub> (dB) con pérdidas atm	-131.120	-71.911	-42.307	-32.438	-27.504	-24.544	-21.160	-19.281

**Figura 70**

Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Palca, para  $\lambda=1550$  nm y  $d= 0.304$  km



### Análisis de resultados obtenidos

En la figura 70 se observa que el Margen del enlace sin pérdidas atmosféricas para  $d= 0.304$  km. y  $\lambda= 1550$  nm es de 29.350 dB.

Para una visibilidad de  $V=50$  m el  $M_{link}$  disminuye a -130.843 dB y para una visibilidad de  $V=900$  m el  $M_{link}$  disminuye a -19.004 dB. Esto se debe a las pérdidas por niebla y nieve en el enlace. Las pérdidas por niebla varían desde 118.418 dB para una  $V=50$ m, hasta 6.579 dB para una  $V=900$  m. Las pérdidas por nieve para un  $R=10$  mm/hr es de 40.691 dB. Las pérdidas por lluvia es 1.361 dB, insignificante comparable con las otras pérdidas ocasionadas por la niebla y nieve.

De los resultados obtenidos podemos concluir que para condiciones de precipitación de nieve de  $R= 10$  mm/hr y una longitud de enlace  $d=304$  m, el enlace deja de operar.

### 5.3.2 Enlace óptico Tarata, Tarata.

#### *5.3.2.1 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 850$ nm. Enlace Tarata.*

**Tabla 50**

*Comparación del margen del enlace óptico para  $\lambda = 850$  nm. Enlace Tarata.*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
$M_{link}$ (dB) sin pérdidas atm	36.052	36.052	36.052	36.052	36.052	36.052	36.052	36.052
$M_{link}$ (dB) con pérdidas atm	-116.956	-42.104	-4.678	7.797	14.035	17.778	22.055	24.431

### Análisis de resultados obtenidos

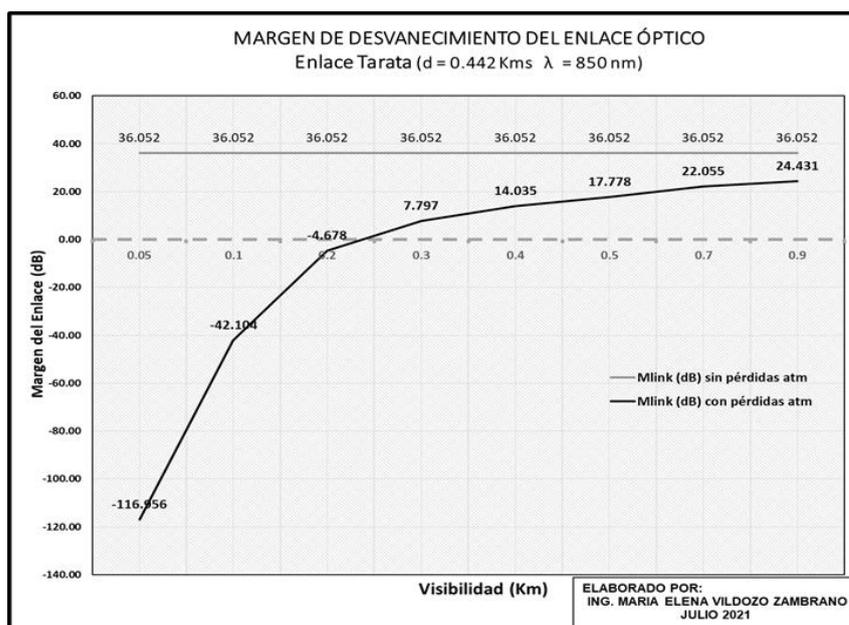
En la figura 71 se observa que el Margen del enlace sin pérdidas atmosféricas para  $d=0.422$  km. y  $\lambda=850$  nm es de 36.502 dB. Debido a la presencia de lluvia y niebla el margen del enlace con pérdidas atmosféricas se reduce en función de la visibilidad.

Para una visibilidad de  $V=50$  m el  $M_{\text{link}}$  disminuye a -117.0 dB y para una visibilidad de  $V=900$  m el  $M_{\text{link}}$  disminuye a 24.4 dB. Esto se debe a las pérdidas por niebla y lluvia en el enlace. Las pérdidas por niebla varían desde 149.704 dB para una  $V=50$ m, hasta 8.317 dB para una  $V=900$  m. Por ser una localidad comprendida entre los 2900 a 3200 no sufre pérdidas por nieve. Las pérdidas por lluvia es 3.754 dB.

De los resultados obtenidos podemos concluir que, para condiciones de niebla y lluvia presentes y una longitud de enlace  $d=422$  m, el enlace opera para una visibilidad  $V > 300$  m, donde el  $M_{\text{link}}$  es de 7.797 dB.

### Figura 71

*Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Tarata, para  $\lambda=850$  nm y  $d=0.442$  km*



### 5.3.2.2 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 1550$ nm. Enlace Tarata.

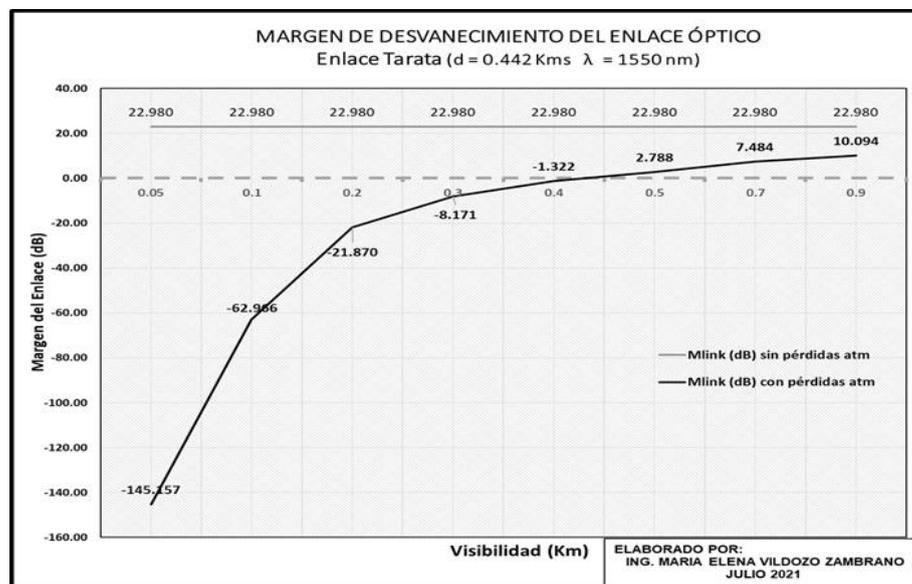
**Tabla 51**

Comparación del margen del enlace óptico para  $\lambda = 1550$  nm. Enlace Tarata.

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
M <sub>link</sub> (dB) sin pérdidas atm	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980	22.980
M <sub>link</sub> (dB) con pérdidas atm	-145.157	-62.966	-21.870	-8.171	-1.322	2.788	7.484	10.094

**Figura 72**

Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Tarata, para  $\lambda = 1550$  nm y  $d = 0.422$  km



### Análisis de resultados obtenidos

En la figura 72 se observa que el Margen del enlace sin pérdidas atmosféricas para  $d = 0.422$  km. y  $\lambda = 1550$  nm es de 22.980 dB. Debido a la

presencia de lluvia y niebla el margen del enlace con pérdidas atmosféricas se reduce en función de la visibilidad.

Para una visibilidad de  $V=50$  m el  $M_{\text{link}}$  disminuye a  $-145.157$  dB y para una visibilidad de  $V=900$  m el  $M_{\text{link}}$  disminuye a  $10.094$  dB. Esto se debe a las pérdidas por niebla y lluvia en el enlace. Las pérdidas por niebla varían desde  $149.704$  dB para una  $V=50$  m, hasta  $8.317$  dB para una  $V=900$  m. Por ser una localidad comprendida entre los  $2900$  a  $3200$  no sufre pérdidas por nieve. Las pérdidas por lluvia es  $3.754$  dB.

De los resultados obtenidos podemos concluir que, para condiciones de niebla y lluvia presentes y una longitud de enlace  $d=422$  m, el enlace opera para una visibilidad  $V > 500$  m, donde el  $M_{\text{link}}$  es de  $2.788$  dB.

### 5.3.3 Enlace óptico Candarave, Candarave.

#### 5.3.3.1 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 850$ nm. Enlace Candarave

**Tabla 52**

*Comparación del margen del enlace óptico para  $\lambda = 850$  nm. Enlace Candarave*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
$M_{\text{link}}$ (dB) sin pérdidas atm	34.367	34.367	34.367	34.367	34.367	34.367	34.367	34.367
$M_{\text{link}}$ (dB) con pérdidas atm	-102.222	-34.465	-0.586	10.706	16.353	19.741	23.612	25.763

#### Análisis de resultados obtenidos

En la figura 73 se observa que el Margen del enlace sin pérdidas

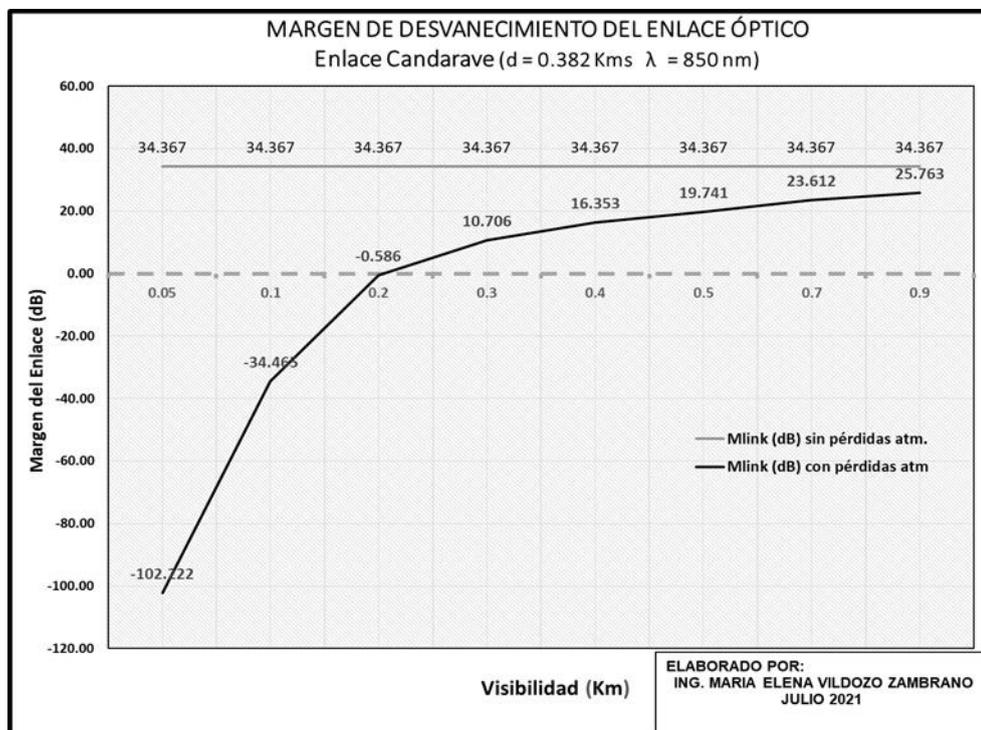
atmosféricas para  $d= 0.382$  km. y  $\lambda= 850$  nm es de 34.367 dB. Debido a la presencia de lluvia y niebla el margen del enlace con pérdidas atmosféricas se reduce en función de la visibilidad.

Para una visibilidad de  $V=50$  m el  $M_{\text{link}}$  disminuye a -102.222 dB y para una visibilidad de  $V=900$  m el  $M_{\text{link}}$  disminuye a 25.763 dB. Esto se debe a las pérdidas por niebla y lluvia en el enlace. Las pérdidas por niebla varían desde 135.514 dB para una  $V=50$ m, hasta 7.529 dB para una  $V=900$  m. Por ser una localidad comprendida entre los 2900 a 3200 no sufre pérdidas por nieve. Las pérdidas por lluvia es 1.075 dB.

De los resultados obtenidos podemos concluir que, para condiciones de niebla y lluvia presentes y una longitud de enlace  $d=382$  m, el enlace opera para una visibilidad  $V > 300$  m, donde el  $M_{\text{link}}$  es de 10.706 dB.

### Figura 73

*Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Candarave, para  $\lambda= 850$  nm y  $d= 0.382$  km*



**5.3.3.2 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$**

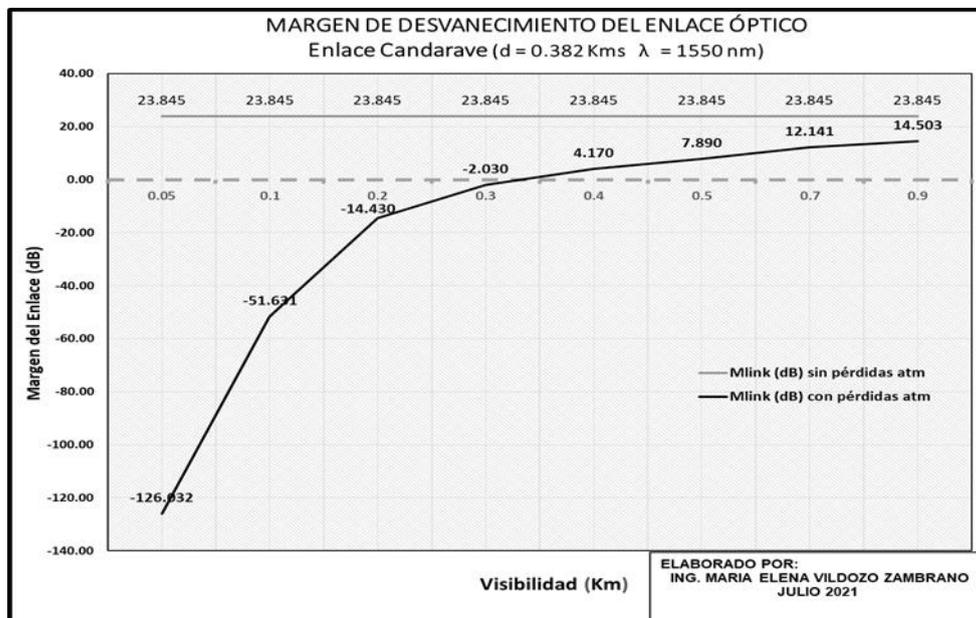
**Tabla 53**

*Comparación del margen del enlace óptico para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ . Enlace Candarave*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
M <sub>link</sub> (dB) sin pérdidas atm	23.845	23.845	23.845	23.845	23.845	23.845	23.845	23.845
M <sub>link</sub> (dB) con pérdidas atm	-126.032	-51.631	-14.430	-2.030	4.170	7.890	12.141	14.503

**Figura 74**

*Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Candarave, para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  y  $d = 0.382 \text{ km}$*



### **Análisis de resultados obtenidos**

En la figura 74 se observa que el Margen del enlace sin pérdidas atmosféricas para  $d= 0.382$  km. y  $\lambda= 1550$  nm es de 23.845 dB. Debido a la presencia de lluvia y niebla el margen del enlace con pérdidas atmosféricas se reduce en función de la visibilidad.

Para una visibilidad de  $V=50$  m el  $M_{link}$  disminuye a -126.032 dB y para una visibilidad de  $V=900$  m el  $M_{link}$  disminuye a 14.503 dB. Esto se debe a las pérdidas por niebla y lluvia en el enlace. Las pérdidas por niebla varían desde 148.802 dB para una  $V=50$  m, hasta 8.267 dB para una  $V=900$  m. Por ser una localidad comprendida entre los 2900 a 3200 no sufre pérdidas por nieve. Las pérdidas por lluvia es 1.075 dB.

De los resultados obtenidos podemos concluir que, para condiciones de niebla y lluvia presentes y una longitud de enlace  $d=382$  m, el enlace opera para una visibilidad  $V > 400$  m, donde el  $M_{link}$  es de 4.170 dB.

#### **5.3.4 Enlace óptico Locumba, Jorge Basadre.**

##### ***5.3.4.1 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para $\lambda = 850$ nm. Enlace Locumba.***

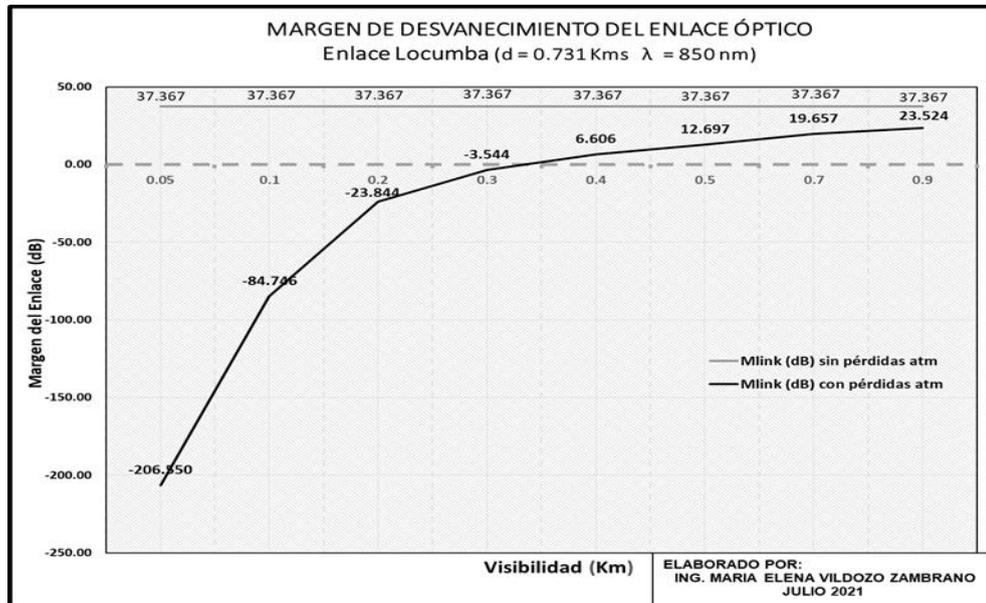
**Tabla 54**

*Comparación del margen del enlace óptico para  $\lambda = 850$  nm*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
$M_{link}$ (dB) sin pérdidas atm	37.367	37.367	37.367	37.367	37.367	37.367	37.367	37.367
$M_{link}$ (dB) con pérdidas atm	-206.550	-84.746	-23.844	-3.544	6.606	12.697	19.657	23.524

### Figura 75

Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Locumba, para  $\lambda = 850 \text{ nm}$  y  $d = 0.731 \text{ km}$



### Análisis de resultados obtenidos

En la figura 75 se observa que el Margen del enlace sin pérdidas atmosféricas para  $d = 0.731 \text{ km}$ . y  $\lambda = 850 \text{ nm}$  es de  $37.367 \text{ dB}$ . Debido a la presencia de niebla por advección, el margen del enlace con pérdidas atmosféricas se reduce en función de la visibilidad.

Para una visibilidad de  $V = 50 \text{ m}$  el  $M_{\text{link}}$  disminuye a  $-206.550 \text{ dB}$  y para una visibilidad de  $V = 900 \text{ m}$  el  $M_{\text{link}}$  disminuye a  $23.524 \text{ dB}$ . Esto se debe solo a las pérdidas por niebla de advección en el enlace. Las pérdidas por niebla varían desde  $243.917 \text{ dB}$  para una  $V = 50 \text{ m}$ , hasta  $13.843 \text{ dB}$  para una  $V = 900 \text{ m}$ . Durante el 2020 no hubo precipitaciones de lluvia en la zona estudiada.

De los resultados obtenidos podemos concluir que, para condiciones de niebla presente y una longitud de enlace  $d = 731 \text{ m}$ , el enlace opera para una visibilidad  $V > 400 \text{ m}$ , donde el  $M_{\text{link}}$  es de  $6.606 \text{ dB}$ .

**5.3.4.2 Comparación del margen del enlace óptico con pérdidas y sin pérdidas atmosféricas, para  $\lambda = 1550$  nm. Enlace Locumba**

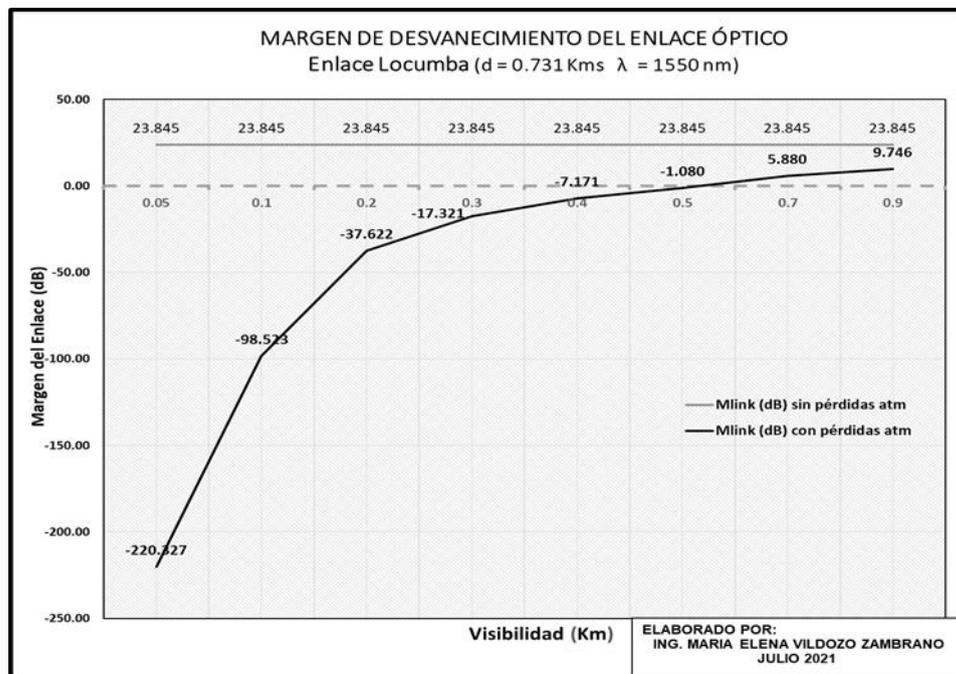
**Tabla 55**

*Comparación del margen del enlace óptico para  $\lambda = 15850$  nm. Enlace Locumba*

V (km)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
M <sub>link</sub> (dB) sin pérdidas atm	23.845	23.845	23.845	23.845	23.845	23.845	23.845	23.845
M <sub>link</sub> (dB) con pérdidas atm	-220.327	-98.523	-37.622	-17.321	-7.171	-1.080	5.880	9.746

**Figura 76**

*Margen de desvanecimiento del enlace óptico, localidad Locumba, para  $\lambda = 1550$  nm y  $d = 0.731$  km*



### **Análisis de resultados obtenidos**

En la figura 76 se observa que el Margen del enlace sin pérdidas atmosféricas para  $d= 0.731$  km. y  $\lambda= 1550$  nm es de 23.845 dB. Debido a la presencia de niebla por advección, el margen del enlace con pérdidas atmosféricas se reduce en función de la visibilidad. Durante el 2020 no hubo precipitaciones de lluvia en la zona estudiada.

Para una visibilidad de  $V=50$  m el  $M_{\text{link}}$  disminuye a -220.327 dB y para una visibilidad de  $V=900$  m el  $M_{\text{link}}$  disminuye a 9.746 dB. Esto se debe solo a las pérdidas por niebla de advección en el enlace. Las pérdidas por niebla varían desde 244.172 dB para una  $V=50$  m, hasta 14.099 dB para una  $V=900$  m. Por ser una localidad costera de clima cálido, no sufre pérdidas por nieve.

De los resultados obtenidos podemos concluir que, para condiciones de niebla presente y una longitud de enlace  $d=731$  m, el enlace opera para una visibilidad  $V > 700$  m, donde el  $M_{\text{link}}$  es de 5.880 dB.

## Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

#### Primera

La investigación ha permitido determinar la fuerte incidencia de la actividad atmosférica por hidrometeoros en la operatividad de los enlaces ópticos no guiados en las zonas rurales de la Región Tacna. En la localidad Alto Perú, que se a 4260 m.s.n.m la atenuación por nieve es la que más afecta la operatividad del enlace óptico, al reducir el margen del enlace (con referencia al margen del enlace sin pérdidas atmosféricas) en razón de 132.9 dB/km para  $\lambda= 850$  nm y en 133.8 dB/km para  $\lambda= 1550$  nm, para una intensidad de precipitación de R=10 mm/hr (nevada moderada): En el análisis para una longitud del enlace óptico  $> 0.304$  km, el enlace óptico queda fuera de operatividad. Lo que implica que emplear enlaces ópticos no guiados en localidades de altitudes  $> 4000$  m.s.n.m no es recomendable.

#### Segunda

Se comprobó que las pérdidas atmosféricas por niebla de advección, afecta la visibilidad de la localidad de Locumba, en los meses de julio y agosto. En situaciones donde la visibilidad es  $< 0.1$  km, las pérdidas específicas por niebla son del orden de los 167.4 dB/km, dejando inoperativo el enlace óptico. Las pérdidas atmosféricas por niebla de radiación, afecta la visibilidad en las localidades de Tarata, Candarave y Alto Perú, en los meses de diciembre, enero y febrero, con pérdidas específicas por niebla de radiación del orden de los 194.76 dB/km., para

enlaces ópticos no guiados con visibilidades  $< 0.1$  Km., imposibilitando la operatividad del enlace óptico.

### **Tercera**

Utilizando el Modelo de Predicción de Al Naboulsi, se determinó con mayor precisión las pérdidas atmosféricas por niebla para visibilidades entre 0.05 a 1,0 Km. El Modelo de Predicción de Kim para visibilidades  $< 0.5$  km, no considera la variabilidad de la longitud de onda en las pérdidas por niebla. Utilizando el Modelo de Predicción francés para el cálculo de las pérdidas por lluvia, recomendado por la UIT en el Informe UIT-R F.2106, las pérdidas por lluvia obtenidas fueron menores que el obtenido por el Modelo de Predicción japonés.

### **Cuarta**

Finalmente, se pudo identificar que las pérdidas atmosféricas por hidrometeoros se ven afectadas por la longitud de onda de operación ( $\lambda$ ), la visibilidad en la zona de cobertura ( $V$ ) y la longitud del enlace. A mayor longitud de operación, mayor son las pérdidas atmosféricas debido a la niebla y la nieve, Para un enlace óptico, las pérdidas atmosféricas por niebla se incrementan cuando la visibilidad disminuye. El aumento de la cobertura en un enlace óptico, produce un incremento en las pérdidas atmosféricas, reduciendo el margen de desvanecimiento del enlace. Por otro lado, las pérdidas por lluvia en la zona de estudio son mucho menores que las ocasionadas por la nieve y la niebla donde la atenuación específica máxima alcanzada en la zona de estudio es de 8.896 dB/Km.

## 6.2 Recomendaciones o propuesta

### **Primera**

Se recomienda no emplear los enlaces ópticos no guiados en las zonas altoandinas de la Región Tacna, que superen la altitud de los 4000 m.s.n.m, dado las altas pérdidas atmosféricas por nieve que se presentan. Existen localidades como Huaytire a 4500 m.s.n.m, donde el nivel de precipitación de nieve es del orden de los 30 mm/hr, y cuya pérdida específica es del orden de 605.46 dB/km

### **Segunda**

En las localidades comprendidas entre las altitudes de 2500 a 3200 m.s.n.m, se recomiendan emplear los enlaces ópticos no guiados para coberturas menores a 1 km, debido a las altas pérdidas que se producen por la presencia de niebla de radiación.

### **Tercera**

Si bien es cierto, que las precipitaciones de nieve producen una fuerte atenuación y por ende una reducción del margen de desvanecimiento del enlace óptico no guiado, los niveles de precipitación por nieve dados por los meteorólogos consultados son estimaciones. Por lo que, para una mejor precisión del cálculo de las pérdidas por nieve, es imprescindible que SENAMHI cuente con nivómetros.

### **Cuarta**

Para comprender mejor la disponibilidad de un enlace óptico no guiado, se recomienda recurrir a herramientas de ingeniería para simular la calidad del

servicio. Estas herramientas permiten, para un determinado emplazamiento geográfico, determinar la disponibilidad y la fiabilidad de un enlace según los parámetros del sistema (potencia, longitud de onda, característica del sistema) y parámetros climáticos y atmosféricos.

### Referências bibliográficas

- Al Naboulsi, Sizun, & Fornel. (2005). Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere. 2.
- agricultura, C. d. (2014). *Estación Meteorológica Automática EMA*. Fonte: Estación Meteorológica Automática EMA.:  
<http://files.dlhingenieria.webnode.cl/20000008712c7113c15/ESTACI%C3%93N%20METEOROLOGICA%20AUTOMATICA.pdf>
- Al Naboulsi, M. (2004). Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere.
- Awan, M., Csurgai, L., Sajid, M., Leitgeb, E., Farukh, N., & Khan, M. (2009). *Characterization of Fog and Snow Attenuations for Free-Space Optical Propagation*. Fonte: Characterization of Fog and Snow Attenuations for Free-Space Optical Propagation.:  
[https://www.researchgate.net/publication/42803206\\_Characterization\\_of\\_Fog\\_and\\_Snow\\_Attenuations\\_for\\_Free-Space\\_Optical\\_Propagation](https://www.researchgate.net/publication/42803206_Characterization_of_Fog_and_Snow_Attenuations_for_Free-Space_Optical_Propagation)
- Barros A., & G. (2010). *Repositorio Institucional - Universidad Católica Santiago de Guayaquil*. Fonte: Repositorio Institucional - Universidad Católica Santiago de Guayaquil.:  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/8562/1/T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-229.pdf>
- Bomshoms, M. Q. (2018). *Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMH*. Fonte: Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMH: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-46.pdf>
- Borwankar, S., & Shah, D. (2020). *Effect of weather conditions on FSO*. Fonte: Effect of weather conditions on FSO: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2009/2009.08317.pdf>
- Borwankar, S., & Shah, D. (2020). *Effect of weather conditions on FSO*. Fonte: Effect of weather conditions on FSO: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2009/2009.08317.pdf>
- Caballero, A. (2009). *Metodología de la investigación científica*. Lima -Perú: UDEGRAF S.A.
- Caizaluisa, E. (2008). *DISEÑO DE UNA RED CON TECNOLOGÍA LÁSER FREE SPACE OPTICS (FSO), PARA EL CAMPUS DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Y SU COMPARACIÓN CON LA RED DE FIBRA ÓPTICA*. Quito: ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.
- Castro, A., Ávalos, G., Menis, L., Urbiola, J., & Villegas, E. (2020). *Climas del Perú – Mapa de*

- Clasificación Climática Nacional, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.* Fonte: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>
- Castro, A., Correa, K., Avalos, G., Porras, D., Castro, V., Rodríguez, L., . . . Quispe, K. (2020). *Informe Técnico: Análisis del Periodo Lluvioso 2019/2020 a nivel nacional, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.* Fonte: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01403SENA-36.pdf>
- Colvero, C., Cordeiro, M., & Von der Weidn, J. (2005). *New Proposal for Real Time Measurements of Visibility and Signal Levels in Free Space Optical Systems.* Fonte: [https://www.researchgate.net/publication/4209570\\_New\\_proposal\\_for\\_real\\_time\\_measurements\\_of\\_visibility\\_and\\_signal\\_levels\\_in\\_free\\_space\\_optical\\_systems/link/5857fe0308aeabd9a589e11a/download](https://www.researchgate.net/publication/4209570_New_proposal_for_real_time_measurements_of_visibility_and_signal_levels_in_free_space_optical_systems/link/5857fe0308aeabd9a589e11a/download)
- Cruz, L., & Choque, J. (s.d.). *Desarrollo de una estación meteorológica automática. Mendoza, Argentina.* Fonte: Desarrollo de una estación meteorológica automática. Mendoza, Argentina.: [https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/12862/22-sensoramiento-remoto-y-meteorologia-aplicada-cruz-leydi-umsa.pdf](https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/12862/22-sensoramiento-remoto-y-meteorologia-aplicada-cruz-leydi-umsa.pdf)
- Cuenca, C., & Palacio, C. (2009). *Diseño y Factibilidad de una Red Inalámbrica Óptica utilizando Tecnología FSO para la comunicación entre los edificios de la Escuela Politécnica Nacional y el Observatorio Astronómico. [Tesis de Título, Escuela Politécnica Nacional].* Fonte: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9943/1/Dise%3fo%20y%20Factibilidad%20de%20una%20Red%20Inal%3fmbtrica%20%3fptica%20utilizando%20Tecnolog%3fa%20FSO%20para%20la%20comunicaci%3f.pdf>
- Duthon, Colomb, & Brnardini. (2019). Transmisión de luz en la niebla: La influencia de la longitud de onda en el coeficiente de extinción. 16.
- Gallardo, S., & Medina, A. (2015). *Propuesta De Un Prototipo De Sistema De Comunicación En El Espacio Abierto En Base De Tecnología Láser Con L=1550".* Mexico: UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS.
- Gallegos, C. (2009). *Diseño De Una Red Óptica Inalámbrica Para El Envío De Voz Y Datos En Áreas No Urbanas.* Lima: PONTIFICA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU.
- Gandica, H. (2006). Influencia pluviométrica en los enlaces FSO láser con modulación en potencia. *Télématique*, 5(1). 1-30. Fonte: <http://www.redalyc.org/pdf/784/78450108.pdf>

- Gil, N. (2017). *DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE TRANSMISION FSO*. BOGOTÁ D.C: UNIVERSITARIA AGUSTINIANA.
- González, O. (2005). *studio de la aplicación de técnicas de modulación OFDM para comunicaciones ópticas guiadas en el canal infrarrojo (Tesis Doctoral)*. Universidad de La Laguna, Tenerife, España. Fonte:  
<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/10709/cp192.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hamimi, F., Sahmah, A., Supaat, M., & Charde, N. (s.d.). *Effect of Rain Attenuations on Free Space Optic Transmission in Kuala Lumpur*. *International Conference on Advanced Science, Engineering and Information Technology 2011, Malasya*. Fonte:  
[https://www.researchgate.net/publication/277111917\\_Effect\\_of\\_Rain\\_Attenuations\\_on\\_Free\\_Space\\_Optic\\_Transmission\\_in\\_Kuala\\_Lumpur/link/568d4b4e08aef987e565e6de/download](https://www.researchgate.net/publication/277111917_Effect_of_Rain_Attenuations_on_Free_Space_Optic_Transmission_in_Kuala_Lumpur/link/568d4b4e08aef987e565e6de/download)
- Jauler, G. (2012). *Aplicación de Nuevas Tecnologías y Nuevos Modelos de Arquitecturas de Red con Bajo COSTE y eficiente Calidad de Servicio, para la Implementación de Servicios Básicos de Telecomunicaciones, Internet, Voz y Vídeo, para localidades pobres y aisladas de Perú*. Fonte: *Aplicación de Nuevas Tecnologías y Nuevos Modelos de Arquitecturas de Red con Bajo COSTE y eficiente Calidad de Servicio, para la Implementación de Servicios Básicos de Telecomunicaciones, Internet, Voz y Vídeo, para localidades pobres y aisladas de Perú.*: <http://www.comtel.pe/comtel2012/callforpaper2012/P17T.pdf>
- Jurado, M., & Proaño, L. (2009). *Sistema de comunicación por fibra óptica y enlace inalámbrico para la Corporación Nacional de Electricidad Cnel Regional Santo Domingo (Tesis de Titulo)*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. Fonte:  
<http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/106/1/t539ec.pdf>
- Khan, M. (2012). *FSO Channel Characterization for Continental Fog Environments*. [Tesis de doctorado, Graz University of Technology, Austria]. Fonte: FSO Channel Characterization for Continental Fog Environments. [Tesis de doctorado, Graz University of Technology, Austria]:  
<https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a7e422a3a9&location=browse>
- León, J., & Vaca, R. (2008). *Estudio de factibilidad y simulación de una red inalámbrica óptica basada en la tecnología FSO (FREE SPACE OPTICAL), para mejorar el rendimiento del*

- backbone actual de la ESPE Campus Sangolquí (Tesis de Título). Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí. Fonte: Estudio de factibilidad y simulación de una red inalámbrica óptica basada en la tecnología FSO (FREE SPACE OPTICAL), para mejorar el rendimiento del backbone actual de la ESPE Campus Sangolquí (Tesis de Título). Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí: [http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/1085/T-ESPE-021878.pdf?sequence=1 &isAllowed=y](http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/1085/T-ESPE-021878.pdf?sequence=1&isAllowed=y)*
- Mellado, A. (Julio de 2014). *Infraestructura de Telecomunicaciones para Smart & Sustainable Cities. MTC. Fonte: Infraestructura de Telecomunicaciones para Smart & Sustainable Cities. MTC.: [https://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion\\_internacional/info\\_nacional\\_internacional/documentos/Sentando%20las%20bases%20hacia%20el%20futuro%20desarrollo%20de%20Ciudades%20Inteligentes%20Red%20Dorsal%20Nacional%20de%20Fibra%20C3%93ptica.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion_internacional/info_nacional_internacional/documentos/Sentando%20las%20bases%20hacia%20el%20futuro%20desarrollo%20de%20Ciudades%20Inteligentes%20Red%20Dorsal%20Nacional%20de%20Fibra%20C3%93ptica.pdf)*
- Nérou, J. (1991). *Introducción a las telecomunicaciones por fibra óptica. México DF. México: Trillas.*
- Olivera, A. (2006). *Diseño y construcción de un modelo experimental para la comprobación de un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico Punto a Multipunto usando el plano de Fresnell (Tesis de Título). Universidad Tecnológica de La Mixteca. Oaxaca, México. Fonte: [http://jupiter.utm./~tesis\\_dig/9821.pdf](http://jupiter.utm./~tesis_dig/9821.pdf)*
- Pierre Duthon, P., Colomb, M., & Bernardin, F. (2019). Light Transmission in Fog: The Influence of Wavelength on the Extinction Coefficient. Fonte: [https://www.researchgate.net/publication/334515720\\_Light\\_Transmission\\_in\\_Fog\\_The\\_Influence\\_of\\_Wavelength\\_on\\_the\\_Extinction\\_Coefficient](https://www.researchgate.net/publication/334515720_Light_Transmission_in_Fog_The_Influence_of_Wavelength_on_the_Extinction_Coefficient)
- Quesquen, L. (2019). *Diseño Y Configuración De Un Sistema De Comunicaciones Basado En Transmisión Óptica En El Espacio Libre - Fso Y Redundancia Con Enlace Wireless Punto A Punto De 5.8 Ghz Para Sedes Empresariales En La Ciudad De Lima. Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR.*
- Sandalidis, H., & Varoutas, &. (2012). *Weather effects on FSO network. Journal of Optical Communications and Networking.*
- SENAMHI. (2018). *Estudio de las frecuencias de las nevadas en el Perú.*

Suarez. (2017). *Estudio y simulación de un sistema de comunicaciones usando la tecnología FSO*.

Telecomunicaciones, U. I. (2007). *Informe UIT-R F.2106: Aplicaciones del servicio fijo que utilizan enlaces ópticos en el espacio libre*. Fonte:

[https://www.itu.int/dms\\_pub/itu/opb/rep/R-REP-F.2106-2007-PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu/opb/rep/R-REP-F.2106-2007-PDF-S.pdf)

Telecomunicaciones, U. I. (2012). *Recomendación UIT-R P.1814: Métodos de predicción necesarios para diseñar enlaces ópticos terrenales en espacio libre*. Fonte:

<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1814-0-200708-I/es>

Telecomunicaciones, U. I. (2012). *Recomendación UIT-R P.1817: Datos de propagación necesarios para el diseño de enlaces ópticos terrenales en el espacio libre*. Fonte:

<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1817-1-201202-I/es>

wireless, S. o. (2019). *SONAbeam 2500-E equipment*. Fonte: SONAbeam 2500-E equipment:

<http://www.fsona.com/product.php?sec=2500e>

# **ANEXOS**

**MATRIZ DE CONTINGENCIA – PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TÍTULO DE PROYECTO: “INFLUENCIA DE LOS HIDROMETEOROS SOBRE LOS ENLACES ÓPTICOS NO GUIADOS, EN LAS ZONAS RURALES DE LA REGIÓN TACNA EN EL AÑO 2020”**

**AUTOR : Ing. María Elena VILDOZO ZAMBRANO**

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>1. INTERROGANTE PRINCIPAL</b> ¿En qué medida la presencia de los hidrometeoros influye sobre los enlaces ópticos no guiados, en las zonas rurales de la Región Tacna en el año 2020?</p> <p><b>2. INTERROGANTES ESPECÍFICAS</b> ¿Cuáles son los efectos de los hidrometeoros sobre los enlaces ópticos no guiados, en las zonas rurales de la región Tacna?</p> <p>¿Cómo incide las pérdidas ocasionadas por los hidrometeoros en el diseño de enlaces ópticos no guiados en las zonas rurales de la Región Tacna?</p> <p>¿Cuáles son los factores que inciden en los enlaces ópticos no guiados, al considerar la actividad atmosférica por hidrometeoros?</p>	<p><b>1. OBJETIVO GENERAL</b> Determinar la influencia de los hidrometeoros sobre los enlaces ópticos no guiados, en las zonas rurales de la Región Tacna en el año 2020.</p> <p><b>2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> Describir los efectos de los hidrometeoros sobre los enlaces ópticos no guiados.</p> <p>Diseñar enlaces ópticos no guiados en las zonas rurales de la región Tacna, considerando las pérdidas ocasionadas por los hidrometeoros.</p> <p>Identificar los factores que inciden en los enlaces ópticos no guiados al considerar la actividad atmosférica por hidrometeoros.</p>	<p><b>1. HIPÓTESIS GENERAL</b> “La presencia de hidrometeoros en las zonas rurales de la Región Tacna produce un incremento en las pérdidas del enlace y afecta la operatividad de un enlace óptico no guiado”</p> <p><b>2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b> ☐La disminución de la visibilidad de un enlace óptico no guiado por la presencia de los hidrometeoros, reduce el margen del enlace óptico.</p> <p>☐En el diseño de un enlace óptico no guiado se deben considerar las pérdidas ocasionadas por los hidrometeoros, los cuales inciden directamente en la reducción del margen del enlace en la zona de estudio.</p> <p>☐ Las pérdidas por hidrometeoros en un enlace óptico no guiado se producen mayoritariamente por la atenuación por niebla y por la nieve.</p>	<p align="center"><b><u>VARIABLE INDEPENDIENTE</u></b> <b>El hidrometeoro</b></p> <p><b><u>DIMENSIÓN 1: PÉRDIDAS POR LLUVIA</u></b> <b>Indicadores:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Intensidad de precipitación</li> <li>Longitud del enlace</li> <li>Atenuación específica</li> </ol> <p><b><u>DIMENSIÓN 2. PÉRDIDAS POR DISPERSIÓN DE MIE</u></b> <b>Indicadores</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Visibilidad.</li> <li>Longitud de onda de operación.</li> <li>Coefficiente de atenuación por niebla.</li> <li>Transmitancia óptica.</li> <li>Longitud del enlace.</li> </ol> <p align="center"><b><u>VARIABLE DEPENDIENTE</u></b> <b>El enlace óptico no guiado en las zonas rurales de la Región Tacna.</b></p> <p><b><u>DIMENSIÓN 1: MARGEN DEL ENLACE</u></b> <b>Indicadores</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Pérdida Óptica del sistema</li> <li>Pérdida Geométrica</li> <li>Pérdidas por lluvia</li> <li>Pérdidas por niebla</li> <li>Pérdidas por nieve.</li> </ol> <p><b><u>DIMENSIÓN 2: DIMENSIONAMIENTO DEL ENLACE</u></b> <b>Indicadores</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Potencia de transmisión</li> <li>Sensibilidad del receptor</li> <li>Longitud del enlace</li> <li>Longitud de onda de operación.</li> </ol>	<p><b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b> Aplicada, nivel correlacional.</p> <p><b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b> No experimental transversal</p> <p><b>ÁMBITO DE ESTUDIO</b> Zonas rurales de la Región Tacna</p> <p><b>POBLACIÓN</b> Las 18 estaciones meteorológicas ubicadas en la Región Tacna.</p> <p><b>MUESTRA</b> 04 estaciones automáticas meteorológicas: 01 estación ubicada en la provincia de Tacna, 01 estación ubicada en la provincia de Trata, 01 estación ubicada en la provincia de Jorge Basadre y 01 estación ubicada en la provincia de Candarave,</p> <p><b>TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b> Técnica de análisis documental Técnica de observación no experimental: Visitas de campo.</p> <p><b>INSTRUMENTOS</b> <b>Fuentes secundarias:</b> Libros especializados de transmisión óptica Catálogos técnicos sobre equipos FSO. Información estadística sobre precipitaciones en la Región Tacna, suministrada por las estaciones meteorológicas del SENAMHI. Software: Google Earth, Excel.</p> <p><b>Fuentes primarias</b> Fichas de observación Equipos audio-visuales</p>

## ANEXO 2: EQUIPOS ÓPTICOS DE TECNOLOGÍA FSO UTILIZADOS



TereScope® - The Most Comprehensive Free Space Optics Wireless solution

TereScope® 5000 - Technical Specifications						
Part number		T55000/4E1/N *or T55000/4T1/V *	T55000/ETH/V *	T55000/XYZ/V **or T55000/XYZ/F **	T55000G/XYZ/V** or T55000G/XYZ/F **	
Model		T55000/4E1 or T55000/4T1 *	T55000/ETH	T55000/155 **or T55000/155-F **	T55000/G or T55000/G-F	
Standard P.N.		T55000/4E1/V5	T55000/ETH/V5	T55000/M3C/V15	T55000G/M3C/V15	
Applications/ Data Protocol		4E1:4G2.048 Mbps or 4T1:4x1.55 Mbp G.703/G.704	Ethernet (10 Mbps)	Fast Ethernet, ATM, OC3, STM1, SMPTE, E3, T3, OC1/ STM0 & Open Protocol	Gigabit Ethernet Escon, 622 Mbps, Fibre channel and others between 100 and 500 Mbps	
Performance	Rate		10Mbps	1-155 Mbps	100-1500 Mbps	
					Not attenuated, Attenuated (3TXs) (2TXs)	
	Range <sup>min</sup> @ 3 dB/km	6700 m	6700 m	5400 m	3500 m	3100 m
	@ 5 dB/km	5000 m	5000 m	4080 m	2750 m	2500 m
	@10 dB/km	3200 m	3200 m	2650 m	1850 m	1650 m
	@17 dB/km	2170 m	2170 m	1820 m	1300 m	1200 m
	@30 dB/km	1400m	1400m	1185 m	870 m	820 m
	Minimum Range	400m	400m	450 m	700 m	500 m
	BER error rate	Less than 1E - 9 (unfaded)	Less than 1E - 9 (unfaded)	Less than 1E - 12 (unfaded)	Less than 1E - 12 (unfaded)	
	MTEF			10 years		
Transmitter	Light source			3x Lasers		
	Wavelength			830 - 850 nm		
	Total Output power		85 mW		10 - 140 mW	
	Beam divergence			2 mrad		
Receiver	Detector			APD		
	Field of view			2 mrad		
Interface	Sensitivity	-55 dBm	-55 dBm	-46 dBm	-33 dBm	
	Type	Electrical: E1:75 Ohm or 120 Ohm, T1:100 Ohm	Copper 10 BaseT	Fiber Optic: Transceiver - Multimode (Singlemode available upon request)		
	Connectors	Universal Connector	RJ45	SC (other connectors available)		
	Impedance	E1:75 Ohm or 120 Ohm				
	Cable	Coax or STP	STP			
	Cable loss	Supports Short and Long haul trunks				
	Wavelength			1310 nm (other wavelength available)	850 nm (other wavelength available)	
	Output power			-17 ± 3 dBm	-4 to -9.5 dBm	
				-14 to -30 dBm	0 to -17 dBm	
	Power Supply	FX operating range	Factory set: 100-240 VAC, @ 50/60 Hz or 35-60 VDC, (V3 and F3 versions)			
Power consumption		30 W				
Environmental Information	Operating temperature	-30° C to +60° C			-30° C to +60° C	
	Storage temperature	-50° C to +70° C				
	Humidity	95% non-condensing				
	Housing	Weatherproofing: IP66				
Mechanical Design	Explosion Class	1M				
	Dimensions (mm)	790 x 390 x 556 (AD-5000: 750x353x432)				
	Weight	Unit	14 kg			
	Accessories	21.5 kg				
	Modularity	Modular Power supply		Modular Power supply, Modular Interface		
Diagnostics	Indicators	Airlink: Flag, Sync, E1 Ports: LED per port Receive Signal Strength (Digital Display) Laser status (3 LEDs)	Airlink: Flag, Data, 10 BaseT: Flag, Data Receive Signal Strength (Digital Display), Laser status (3 LEDs)	Airlink: Flag, Sync, Fiber Optic: Flag, Sync, Alignment, Loopback, Fusion: Enabled/Active, Healing status (if exists), Control mode: Hardware mode or software mode. Power supply status, Healing active, Receive Signal Strength (Digital Display), Lasers status (3 LEDs), SNMP TX and RX		
	Selectors	Termination, Electrical receive sensitivity, Line Encoding L1E, BLS, B-address setting	IP address setting	Data Rate, Alignment, Loopback (local), Remote loopback, Fusion activation, Signal Laser status, Fusion activation	Alignment, Loopback (local), Remote loopback, Fusion activation, Signal attenuation, Rx, Short, distance	

**SONABEAM E**


The SONABeam E series is extremely versatile. It's compact, yet rugged aluminum housing is equally at home outdoors in challenging weather as it is indoors operating through a window. The SONABeam E can be easily transported to installation sites making it ideal for situations that require rapid deployment. The E can be ordered as a Flyaway kit complete with carbon-fiber tripods and water-tight carrying cases, ideal for disaster recovery operations. Like all SONABeams, the E series offers full-rate, full-duplex bandwidth. The E Series supports native Ethernet and offers the added flexibility of protocol transparent operation to support custom datarates.

### THE SONABEAM ADVANTAGE

By transmitting through the atmosphere, the SONABeam eliminates the substantial costs of digging up streets and sidewalks required to install fiber, and unlike other wireless solutions, the SONABeam is immune to electro-magnetic (EM) and radio-frequency (RF) interference which means no licensing is required. Plus, the SONABeam's narrow, highly directional transmission all but eliminates eavesdropping or interception. Key to SONABeam's breakthrough laser technology is its operational wavelength of 1550 nm, which provides a broad spectrum of safety and performance advantages. The SONABeam's high-powered laser transmitters are able to penetrate heavy rain, snow and fog far more effectively and consistently than any other available FSO technology. SONABeam's protocol transparent technology gives service provider, enterprise and government customers the ability to integrate free space optics (FSO) quickly and easily into any existing network.

### TYPICAL APPLICATIONS

#### Mobile Wireless

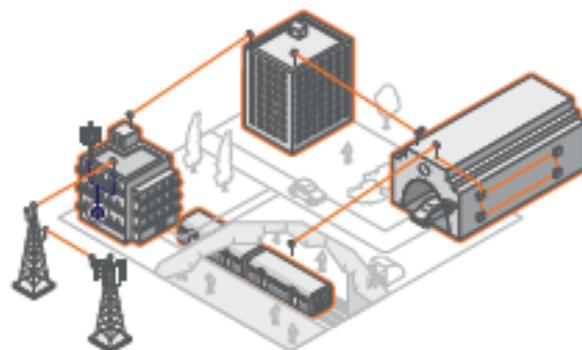
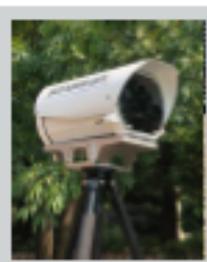
3G/4G/LTE Backhaul  
Backhaul Redundancy  
Remote Antenna Extension

#### Enterprise, Government, Military

High-bandwidth campus  
Fiber-line replacement  
Secure links

#### Service Provider

High-speed backbone  
RF/Wi-Fi/WiMax aggregation  
Private lines



RAPID DEPLOYMENT • HIGH CAPACITY • NON INTERFERING • UNLICENSED • 1550 NM TRANSMISSION  
FULL-RATE, FULL-DUPLEX • SECURE & UNDETECTABLE • LOW LATENCY/PACKET LOSS



Free-Space Optical		155-M <sup>1</sup>	1250-M <sup>2</sup>
<i>Datarate/protocol:</i>	Fast Ethernet: 125 Mbps, full duplex OC-3/STM-1: 155 Mbps, full duplex	Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex OC-12/STM-4: 622 Mbps, full duplex CPRI 1/CPRI 2	
<i>Range: 3 dB/km (clear air):</i>	300 m to 5400 m (980 ft to 3.4 mi)	400 m to 4800 m (1310 ft to 3.0 mi)	
<i>10 dB/km (extreme rain):</i>	300 m to 2400 m (980 ft to 1.5 mi)	400 m to 2200 m (1310 ft to 1.4 mi)	
<i>Laser output power:</i>	640 mW peak (4 x 160 mW)	640 mW peak (4 x 160 mW)	
<i>Receive aperture:</i>	20 cm (8 in) diameter, effective clear	20 cm (8 in) diameter, effective clear	
<i>Free-space wavelength:</i>	1550 nm	1550 nm	
Interface Options		1000-Base-SX (850 nm)	1000-Base-LX (1310 nm)
<i>Data physical interface:</i>	Multimode fiber, LC	Singlemode fiber, LC	
<i>Fiber xmtr/rcvr wavelength:</i>	850 nm nominal	1310 nm nominal	
<i>Fiber xmtr output power:</i>	-9 dBm (min), -3 dBm (max)	-11 dBm (min), -3 dBm (max)	
<i>Fiber rcvr input power:</i>	0 dBm (min), -17 dBm (max)	-20 dBm (min), -3 dBm (max)	
Mechanical / Electrical / Environmental			
<i>Operating temperature:</i>	-40°C to 60°C (-40°F to 140°F)	<i>Weight:</i>	Head: 20 kg (44 lbs); Yoke: 8 kg (17 lbs)
<i>Solar filters:</i>	2 spatial, 2 spectral	<i>Input voltage:</i>	-48 VDC (-40 V to -57 V) or 100-240 VAC
<i>Pointing stability:</i>	120 kmh/75 mph operating, > 160 kmh/100 mph survival	<i>Power consumption:</i>	Transceiver: 60 watts
<i>Environmental seal:</i>	Water-tight, IP66/NEMA-4 Cert.		
<i>Dimensions (W*H*D):</i>	41 x 41 x 46 cm; 16 x 16 x 18 in		
Carrier-Class Reliability and Durability			
<i>Window heating:</i>	Prevents optics fogging, snow/sleet accumulation		
<i>Laser cooling:</i>	Active solid state cooling to 35°C (95°F)		
<i>Redundant transmitters:</i>	4 independent lasers, drivers, coolers & cooler controllers		
<i>Power supply:</i>	Telco grade, >550,000 hour		
<i>Structure:</i>	Cast aluminum housing, yoke & mount		
Element Management and Control			
<i>Management interface:</i>	USB, Serial & 10/100-baseT	<i>GUI control program:</i>	SONAbeam Terminal Controller
<i>SNMP:</i>	Embedded v.1 agent	<i>Command line interface:</i>	Via USB, RS232 or IP address
<i>Key parameters monitored:</i>	Receive signal strength; Power supply currents & voltages; Laser currents, power levels & temperatures; Internal temperature; Clock recovery / sync status; Network interface signal status		
<i>Historical logging:</i>	Internal data and event logging		

## SONABEAM Z



The SONABeam Z series was designed to provide a lightweight, economical solution for short distance links. It is ideal for high capacity links up to 500 meters. The SONABeam Z is housed in a low-profile, all aluminum enclosure suitable for outdoor operation in all weather environments as well as for indoor installation operating through a window. Featuring near-zero latency and packet loss, the SONABeam Z transmits full-rate, full-duplex native Gigabit Ethernet and can also operate in protocol transparent mode in order to support custom datarates or carry both TDM and IP traffic on the same link.

### THE SONABEAM ADVANTAGE

By transmitting through the atmosphere, the SONABeam eliminates the substantial costs of digging up streets and sidewalks required to install fiber, and unlike other wireless solutions, the SONABeam is immune to electro-magnetic (EM) and radio-frequency (RF) interference which means no licensing is required. Plus, the SONABeam's narrow, highly directional transmission all but eliminates eavesdropping or interception. Key to SONABeam's breakthrough laser technology is its operational wavelength of 1550 nm, which provides a broad spectrum of safety and performance advantages. The SONABeam's high-powered laser transmitters are able to penetrate heavy rain, snow and fog far more effectively and consistently than any other available FSO technology. SONABeam's protocol transparent technology gives service provider, enterprise and government customers the ability to integrate free space optics (FSO) quickly and easily into any existing network.

### TYPICAL APPLICATIONS

#### Mobile Wireless

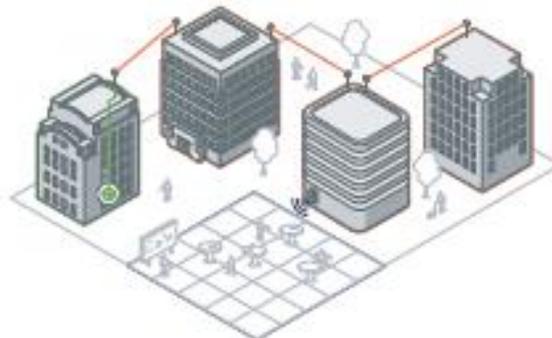
3G/4G/LTE Backhaul  
Backhaul Redundancy  
Remote Antenna Extension

#### Enterprise, Government, Military

High-bandwidth campus  
Fiber-line replacement  
Secure links

#### Service Provider

High-speed backbone  
RF/Wi-Fi/WiMax aggregation  
Private lines



RAPID DEPLOYMENT • HIGH CAPACITY • NON INTERFERING • UNLICENSED • 1550 NM TRANSMISSION  
FULL-RATE, FULL-DUPLEX • SECURE & UNDETECTABLE • LOW LATENCY/PACKET LOSS



Free-Space Optical			
	1250-Z <sup>1</sup>	2500-Z <sup>2</sup>	
Data rate/protocol:	Fast Ethernet: 125 Mbps, full duplex; OC-3/STM-1: 155 Mbps, full duplex; Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex; OC-12/STM-4: 622 Mbps, full duplex; CPRI 1/CPRI 2	Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex; OC48/STM16, 2.5 Gbps, full duplex; CPRI 2/CPRI 3	
Range: 3 dB/km (clear sky):	50 m to 500 m (160 ft to 0.3 mi)	50 m to 500 m (160 ft to 0.3 mi)	
10 dB/km (extreme rain):	50 m to 350 m (160 ft to 0.2 mi)	50 m to 350 m (160 ft to 0.2 mi)	
Laser output power:	160 mW peak	160 mW peak	
Receive aperture:	50 mm (2 in) diameter	50 mm (2 in) diameter	
Free-space wavelength:	1550 nm	1550 nm	
Interface Options			
	1000-Base-SX (850 nm)	1000-Base-LX (1310 nm)	
Data physical interface:	Multimode fiber, LC	Singlemode fiber, LC	
Fiber xmt/rcvr wavelength:	850 nm nominal	1310 nm nominal	
Fiber xmt/r output power:	-9 dBm (min), -3 dBm (max)	-11 dBm (min), -3 dBm (max)	
Fiber rcvr input power:	0 dBm (min), -17 dBm (max)	-20 dBm (min), -3 dBm (max)	
Mechanical / Electrical / Environmental			
Operating temperature:	-40°C to 60°C (-40°F to 140°F)	Dimensions (W*H*D):	25 x 33 x 46 cm; 10 x 13 x 18 in
Pointing stability:	120 kmh/75 mph operating, >160 kmh/100 mph survival	Weight:	10 kg (22 lbs)
Environmental seal:	Water-tight, IP66/NEMA-4 Cert.	Input voltage:	-48 VDC (-40 V to -57 V) or 100-240 VAC
		Power consumption:	25 watts (no heater)
Carrier-Class Reliability and Durability			
Laser cooling:	Active solid state cooling to 35°C (95°F)	Power supply:	Telco grade, >550,000 hour
Structure:	Aluminum housing		
Element Management and Control			
Management interface:	USB, Serial & 10/100-baseT	GUI control program:	SONAbsam Terminal Controller
SNMP:	Embedded v.1 agent	Command line interface:	Via USB, RS232 or IP address
Key parameters monitored:	Receive signal strength; Power supply currents & voltages; Laser currents, power levels & temperatures; Internal temperature; Clock recovery / sync status; Network Interface signal status		
Historical logging:	Internal data and event logging		
Certifications & Classifications			
	International	US/Canada	
Laser safety:	IEC 60825-1, Class 1M EN 55022 - emissions	CDRH 21 CFR including Laser Notice 50, Class 1M; ANSI Z136.1 & Z136.6, Class 1	
EMC:	EN 55024 - Immunity	FCC - Part 15 / ICES - 003	
Electrical:	EN 60950 (CB scheme)	UL 60950 / CSA 60950	

Printed specifications subject to change. Please refer to [www.fsona.com](http://www.fsona.com) for current information.

<sup>1</sup>100 - 1500 Mbps  
<sup>2</sup>500 - 2500 Mbps  
04-02061

FSONA NETWORKS CORP. 100 - 13300 Delf Place Richmond BC V6V 2A2 Canada  
Tel: 604 278 6333, Fax: 604 278 6340, Web: [www.fsona.com](http://www.fsona.com), Email: [sales@fsona.com](mailto:sales@fsona.com)

**artLink<sup>®</sup>**  
TECHNOLOGY

## Secure Wireless Optical Systems Artolink

- Data rate up to 30 Gbps
- Minimum transmission delays
- The fastest autotracking
- Transparent Interface for Sync E, IEEE 1588v2, CPRI
- SNMP monitoring

Equipment is developed and manufactured in Russia

Secure Wireless Optical Systems "Artolink" are used to organise channels of communication for commercial institutions and government agencies for distances of several kilometers.

- ✓ Artolink is used for communications organization or duplication of important communication channels.
- ✓ Equipment provides stable operation in the complicated electromagnetic environment and under the impact of electromagnetic warfare.



On delivery, the equipment can be configured to transfer only one stream that at the stage of acquisition will be enough for customer needs, and further, in the process of operation it is possible to increase the throughput.

## Parameters of the model M1-30GE

Throughput	30 Gbps, Full Duplex
The maximum recommended distance	1500 m
BER level	$10^{-9}$
Transmission delay	5 $\mu$ s
User interfaces	3 ports 10G SFP+
Channel type	transparent, protocol independent
MTU, bytes	>16 000
Power supply	AC 100-242; 50-60Hz DC 48 $\pm$ 12
Power consumption	46 W
Dimensions of the outdoor unit	480x285x300 mm
Weight of the outdoor unit	9,4 kg



A new model built on the same platform with previous systems which are successfully used in many countries on different continents.



No electromagnetic radiation



Narrow transmission diagram



Interception impossibility



The invisible band

To get detailed information and to order: +7 4912 300-955

e-mail: [sales@artolink.com](mailto:sales@artolink.com)  
[www.artolink.com](http://www.artolink.com)

# EL-1GL



Up to 4400m

- ✓ Throughput 10/100/1000 Mbit/s Full Duplex
- ✓ Double channel technology with backup supply voltage 48V DC
- ✓ Built-in service channel
- ✓ Systems of autotracking (targeting and aiming)
- ✓ IP monitoring
- ✓ Backup channel equipment (MW 72-75GHz) option
- ✓ 19" indoor units with power supply (AC 220V/DC 48V)



Basic interfaces	10/100/1000 BASE-TX SFP:1000 BASE-SX
Throughput	RJ-45: 10/100/1000 Mbit/s SFP: 1000 Mbit/s
Wavelength, nm	1550
Bandwidth, Mbit/s	1250 Full duplex
Fade margin at a distance of 1 km, dB	44
Latency of optical channel, ms	< 0.125
Links distances	4400
Alignment	Autotracking system
Dynamic range of angle deviation processing (position keeping angle), mrad (grade)	65 (3.7)
Speed of autotracking adjustment, mrad/s	8
Power supply, V	AC 100-242 DC 48 ± 12%
Power consumption, W	40 - 67 (with heated optics)
Operating temperature of the outdoor units, °C	-40 ... +50
Dimensions, mm	
Optical unit	480x300x285
Interface unit	445x300x45 (19" 1U)
Radio unit	245x225x70
Weight, kg	
Optical unit	9
Interface unit	2
Radio unit	1
Cables length, m	< 100
Management, monitoring	UDP (firmware) SNMP traps



**EC SYSTEM**

## Modular Tracking Device For FSO Laser Links



### Features

- Improves wireless communication up to 1500m
- Can be ordered for previously installed FSO links as well
- Auto tracking system & 3° circular compensation
- Can hold 100Mbps as well as Gigabit FSO links
- Rugged design for harsh wireless environment communication

### Electrical characteristics

Power Supply	PoE (802.3at, 802.3af)
Power consumption	7 Watts
Management	Integrated into the MGM of laser head (Web, SNMP) (also can be used and installed without MGM)
User Interface	LOD

### Physical characteristics

Housing	Aluminium alloy
Weight	0.9kg *
Dimensions	240 x 160 x 175mm *

### Tracking characteristics

Sensor type	CMOS
Wavelength	785nm
Field of view of sensor (FOV)	+ 8.211° (vertical) x 9.476.63°
Compensation method	Mechanical
Vertical / Horizontal compensation range	± 3°10 *
Compensation accuracy	0.1 mrad

### Environment

Operating temperature	-20 to +60 °C
Storage temperature	-40 to +60 °C
Humidity	95% non condensed
Protection rating	IP65

### Order Information

Product Code	Description
PXATNEXT1000	Modular tracking device for FSO laser links, works on 100-1500m distance, can hold laser heads up to PXWR50G (Gigabit) and PX1800PT (100Mb).

### Redefining wireless

\* values / rad

## G3 500-1500m Auto Tracking FSO Link



### Features

- Wireless upto 1500m communication
- Max 3.125Gbps bandwidth Full Duplex
- Auto tracking system & 3" drifter compensation
- Auto focus system—automatic beam divergence setting 0.5 mrad
- SNMP compatible management
- Rugged design for harsh wireless environment communication

### Electrical characteristics

Light source	Laser diode
Laser diode power	1x30 mW
Detector	SiAPD Photo diode
Dynamic range	>17 dB
Bandwidth	1.25 - 3.125 Gbps Full duplex
Management	Web based SNMP compatible management
System latency	<50ns

### Physical characteristics

Head housing	Aluminium alloy
Weight	23 kg *
Dimensions (with cover and alignment Unit)	450 x 320 x 360mm *

### Optical characteristics

Wavelength	785 nm
Beam divergence	0.5 mrad, Auto Focus Function
Receiver angle	6 mrad
Laser class	Class 1M
Power to the head	48V Power Supply

### Environment

Operating temperature	-20 to +60 °C
Storage temperature	-40 to +60 °C
Humidity	95% non condensed
Laser head protection rating	IP65

### Fade Margin

Normal visibility (Fog 3dB/Km Rain ~6mm/h)	1500m
Medium visibility (Fog 15dB/Km Rain ~50mm/h)	1000m
Low visibility (Fog 30dB/Km Rain ~130mm/h)	800m

## Order Information

Product Code	Description
PXAT1600HM	G3 Gigabit FO/Multimode connection 500-1500m distance laser link, 48V power supply, installation kit and SNMP web management included.
PXAT1600HMH	G3 Gigabit FO/Multimode connection 500-1500m distance laser link, 48V power supply, installation kit and SNMP web management included with heater.
PXAT1600HS	G3 Gigabit FO/Single mode connection 500-1500m distance laser link, 48V power supply, installation kit and SNMP web management included.
PXAT1600HSH	G3 Gigabit FO/Single mode connection 500-1500m distance laser link, 48V power supply, installation kit and SNMP web management included, with heater.

Redefining wireless

\* values / end

# 100Mb 200-3000m Auto Tracking Laser Link



## Electrical characteristics

Light source	Laser Diode
Laser diode power	2x35 mW
Detector	SIAPD Photo diode
Dynamic range	>40dB
Bandwidth	100 Mbits
Management	Web based SNMP compatible In-band management
System latency	<50ns

## Physical characteristics

Head housing	Aluminium Alloy
Weight	22 kg *
Dimensions (with cover and alignment Unit)	690 x 320 x 360mm *

## Optical characteristics

Wavelength	785 nm
Beam divergence	2-5 mrad, Auto Focus Function
Receiver angle	8.5 mrad
Laser class	Class 1M
Power to the head	48V Power Supply

## Environment

Operating temperature	-20 to +60 °C
Storage temperature	-40 to +80 °C
Humidity	95% non condensed
Laser head protection rating	IP65

## Fade Margin @ 3000m

Normal visibility (Fog 3dB/Km Rain ~5mm/h)	24 dB
Medium visibility (Fog 15dB/Km Rain ~50mm/h)	16 dB
Low visibility (Fog 30dB/Km Rain ~130mm/h)	7 dB

## Order Information

Product Code	Description
PXAT3000FT	100Mb Ethernet IP 200-3000m distance laser link, 48V power supply, installation kit and SNMP web management included.

Redefining wireless

\* values / end

## Gigabit 100-500m Auto Focus Laser Link



### Electrical characteristics

Light source	Laser Diode
Laser diode power	1x 25 mW
Detector	SIAPD Photodiode
Dynamic range	-35dB
Bandwidth	1.25Gbps
Management	Web based SNMP compatible Out-band management
System latency	<50ns

### Physical characteristics

Head housing	Aluminium Alloy
Weight	8 kg *
Dimensions (with cover and alignment Unit)	390 x 258 x 290 mm *

### Optical characteristics

Wavelength	785 nm
Beam divergence	1-10 mRad, Manual Focus Function
Receiver angle	0.5 mRad
Laser class	Class 1M

### Environment

Operating temperature	-20 to +60 °C
Storage temperature	-40 to +80 °C
Humidity	95% non condensed
Laser head protection rating	IP65

### Power

Power Required	IEEE 802.3af (Power over Ethernet)
Power to the Head	IEEE 802.3af (Power over Ethernet)
Power to the Head	POE injector

### Fade Margin @ 500m

Normal visibility (Fog 3dB/Km Rain ~6mm/h)	Max 29 dB
Medium visibility (Fog 15dB/Km Rain ~50mm/h)	Max 23 dB
Low visibility (Fog 30dB/Km Rain ~130mm/h)	Max 16 dB

## Order Information

Product Code	Description
PXAFW500GT	Gigabit TX/FX Ethernet IF 100-500m distance laser link. POE power supply, installation kit, SNMP web management included, with Auto Focus and Auto Back-up function.
PXAFW500GTH	Gigabit TX/FX Ethernet IF 100-500m distance laser link. POE power supply, installation kit, SNMP web management included, with Auto Focus and Auto Back-up function, with heater.

Redefining wireless

\* values / end

## Gigabit 20-400m Manual Focus Laser Link



### Electrical characteristics

Light source	Laser Diode
Laser diode power	1x25 mW
Detector	SiAPD Photodiode
Dynamic range	>36dB
Bandwidth	1.25Gbps
Management	Web based SNMP compatible Out-band management
System latency	<50ns

### Physical characteristics

Head housing	Aluminium Alloy
Weight	8kg *
Dimensions (with cover and alignment Unit)	300 x 250 x 200 mm *

### Optical characteristics

Wavelength	785 nm
Beam divergence	2-5 mRad, Manual Focus Function
Receiver angle	8.5 mRad
Laser class	Class 1M

### Environment

Operating temperature	-20 to +60 °C
Storage temperature	-40 to +80 °C
Humidity	95% non condensed
Laser head protection rating	IP65

### Power

Power Required	IEEE 802.3af (Power over Ethernet)
Power to the Head	IEEE 802.3af (Power over Ethernet)
Power to the Head	PoE injector

### Fade Margin @ 400 m

Normal visibility (Fog 3dB/Km Rain ~6mm/h)	23 dB
Medium visibility (Fog 15dB/Km Rain ~50mm/h)	19 dB
Low visibility (Fog 30dB/Km Rain ~130mm/h)	14 dB

## Order Information

Product Code	Description
PXMF400GT	Gigabit TX/FX Ethernet IP 20-400m distance laser link. PoE power supply, installation kit, and SNMP web management included. Manual Beam Focus with Auto Back-up function.
PXMF400GTH	Gigabit TX/FX Ethernet IP 20-400m distance laser link. PoE power supply, installation kit, and SNMP web management included. Manual Beam Focus with Auto Back-up function and with heater.
PXMF400GT	Gigabit TX/FX Ethernet IP 20-400m distance laser link. PoE power supply, installation kit, and SNMP web management included. Manual Beam Focus.
PXMF400GTH	Gigabit TX/FX Ethernet IP 20-400m distance laser link. PoE power supply, installation kit, and SNMP web management included. Manual Beam Focus and with heater.

Redefining wireless

\* value / end

## 100Mb 650-1800m Laser Link



### Electrical characteristics

Light source	Laser Diode
Laser diode power	2x35mW
Detector	SiAPD Photodiode
Dynamic range	>40dB
Bandwidth	100 Mbits
Management	Web based SNMP compatible in-band management
System latency	<50ns

### Physical characteristics

Head housing	Aluminium Alloy
Weight	12 kg
Dimensions (with cover and alignment Unit)	563x324x296 mm

### Optical characteristics

Wavelength	785 nm
Beam divergence	0.5-15 mRad
Receiver angle	0.5 mRad
Laser class	Class 1M

### Environment

Operating temperature	-20 to +60 °C
Storage temperature	-40 to +80 °C
Humidity	95% non condensed
Laser head protection rating	IP65

### Power

Power Required	IEEE 802.3af (Power over Ethernet) 11W w/o heating w heating 21W
Power to the Head	IEEE 802.3af (Power over Ethernet) 11W w/o heating w heating 21W
Power to the Head	POE injector

### Fade Margin @ 1800m

Normal visibility (Fog 3dB/Km Rain ~5mm/h)	24 dB
Medium visibility (Fog 15dB/Km Rain ~50mm/h)	16 dB
Low visibility (Fog 30dB/Km Rain ~130mm/h)	7 dB

## Order Information

Product Code	Description
PX1800FT	100Mb TX Ethernet IP 650-1800m distance laser head, POE power supply, installation kit and SNMP web management included.
PX1800FTH	100Mb TX Ethernet IP 650-1800m distance laser head, POE power supply, installation kit and SNMP web management included with heater.

Redefining wireless

\* value / end







