

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



TESIS

Red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.16 para garantizar la conectividad del I.E

Señor de Sicán, caserío Sapamé, Íllimo, Lambayeque

**Para optar por el título profesional de
Ingeniero(a) Electrónico(a)**

ELABORADA POR:

Bach. Josue Yair Mechan Palacios

Bach. Ariana Nicol Burga Muñoz

ASESOR:

Dr. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez


LAMBAYEQUE – PERÚ

10 de febrero de 2026

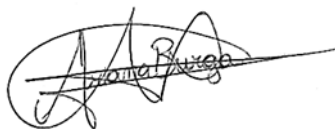
TESIS

**Red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.16 para garantizar la
conectividad del I.E Señor de Sicán, caserío Sapamé, Íllimo, Lambayeque**

AUTORES:

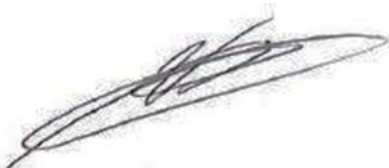


Bach. Josue Yair Mechan Palacios



Bach. Ariana Nicol Burga Muñoz

ASESOR:

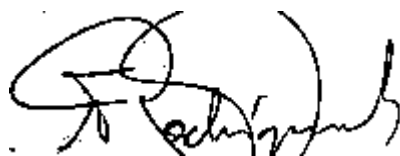


Dr. Ing. Oscar Ucchelly Romero Cortez

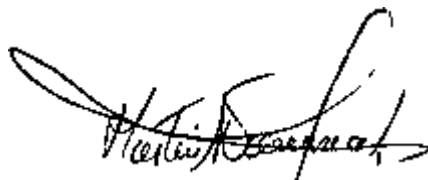
TESIS

**Red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.16 para garantizar la
conectividad del I.E Señor de Sicán, caserío Sapamé, Íllimo, Lambayeque**

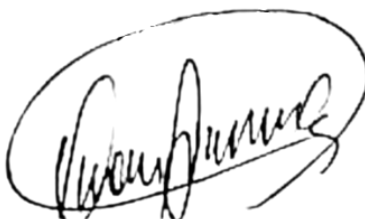
APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:



Dr. Frank Richard Rodríguez Chirinos
Presidente



Mg. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio
Secretario



Mg. Ing. Juan Carlos Ñañez Aguilar
Vocal



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 - 2023 - SUNEDU / CD



0036



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 14.-2026.-D/FACFyM

Siendo las 11:30 am del día 10 de febrero del 2026 se reunieron los miembros del Jurado evaluador de la Tesis titulada:

Red Inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.16 para garantizar la conectividad del I.E. Señor de Sicán, caserío Sapame, Illimo, Lambayeque

Designados por Resolución N° 575-2025 D/FACFyM de fecha 20 junio 2025

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

<u>Dr. Ing. Frank Richard Rodríguez Chirinos</u>	Presidente
<u>Mg. Ing. Martín Augusto Nombro Lasso</u>	Secretario
<u>Mg. Ing. Juan Carlos Navíz Aguilar</u>	Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) Mg. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez, nombrado por Resolución N° 575-2025 D/FACFyM de fecha 20 junio de 2025

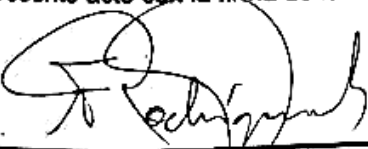
El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 047-2026 D/FACFyM de fecha 21 de enero de 2026

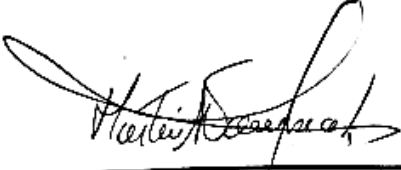
La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Mechan Palacios Josue Yair y Burga Muñoz Ariana Nicol y tuvo una duración de 54 minutos.

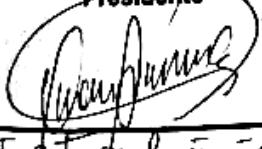
Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de Dieciseis (16) en la escala vigesimal, mención (Bueno).


Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12:38 pm se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.


 DR. ING. FRANK RICHARD RODRÍGUEZ CHIRINOS
 Presidente


 Mg. Ing. Martín A. Nombro Lasso
 Secretario


 Mg. Ing. Juan C. Navíz Aguilar
 Vocal


 DR. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez
 Asesor

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD
(RESOLUCIÓN N° 626-2021-CU DEL 30 DE DICIEMBRE 2021)

Yo, Oscar Uchelly Romero Cortez, usuario revisor del documento titulado **Red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.16 para garantizar la conectividad del I.E Señor de Sicán, caserío Sapamé, Íllimo, Lambayeque**. Cuyos autores son: **Bach. Josue Yair Mechan Palacios**, identificado con documento de identidad 75569848 y el **Bach. Ariana Nicol Burga Muñoz**, identificado con documento de identidad 72326111; declaro que la evaluación realizada por el programa informático ha arrojado un porcentaje de similitud de 11%, verificable en el resumen de reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 03 de Marzo del 2026



Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez DNI:

41812294
Asesor

Se adjunta:

*Resumen de Reporte automatizado de similitudes

*Recibo Digital

Red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.16 para garantizar la conectividad del I.E Señor de Sicán, caserío Sapamé, Íllimo, Lambayeque

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%	10%	3%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unprg.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
2	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo	1%
	Trabajo del estudiante	
3	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
4	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, UNAD	< 1%
	Trabajo del estudiante	
5	www.dykinson.com	< 1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.uta.edu.ec	< 1%
	Fuente de Internet	
7	www.slideshare.net	< 1%
	Fuente de Internet	
8	ebin.pub	< 1%
	Fuente de Internet	
9	www.coursehero.com	< 1%
	Fuente de Internet	
10	repositorio.upt.edu.pe	< 1%
	Fuente de Internet	

OSCAR UCHELLY
ROMERO CORTEZ
41812294



			< 1 %
11	luisjdgamarra.blogspot.com Fuente de Internet		< 1 %
12	www.cadie.org.ar Fuente de Internet		< 1 %
13	repositorio.upagu.edu.pe Fuente de Internet		< 1 %
14	Villanueva Napuri, Jesus Otto. "Acceso universal a las Tecnologías de la Información y la Comunicación en las zonas rurales del Perú.", Pontificia Universidad Católica del Perú – CENTRUM Católica (Perú), 2020 Publicación		< 1 %
15	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet		< 1 %
16	documentop.com Fuente de Internet		< 1 %
17	repositorio.uch.edu.pe Fuente de Internet		< 1 %
18	www.semanticscholar.org Fuente de Internet		< 1 %
19	prezi.com Fuente de Internet	OSCAR UCHELLY ROMERO CORTEZ 41812294	< 1 %
20	repositorio.usmp.edu.pe Fuente de Internet		< 1 %
21	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante		< 1 %

22	oa.upm.es Fuente de Internet	< 1 %
23	procesostarifarios.subtel.cl Fuente de Internet	< 1 %
24	Submitted to Universidad Tecnica De Ambato- Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE Trabajo del estudiante	< 1 %
25	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	< 1 %
26	1library.co Fuente de Internet	< 1 %
27	Andrés Enríquez Lenis, Jesús Hamilton Ortiz, Bazil Taha Ahmed. "Banda Ancha Inalámbrica", Omnia Publisher SL, 2014 Publicación	< 1 %
28	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	< 1 %
29	www.cacic2016.unsl.edu.ar Fuente de Internet	< 1 %
30	Submitted to Escuela Superior Politécnica del Litoral Trabajo del estudiante OSCAR UCHELLY ROMERO CORTEZ 41812294	< 1 %
31	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
32	Submitted to Universidad Tecnologica del Peru Trabajo del estudiante	< 1 %
33	Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA Trabajo del estudiante	< 1 %

34	www.spreaker.com Fuente de Internet	< 1 %
35	Ochochoque Yanapa, Sabino. "Calendario comunal agrofestivo en el fortalecimiento del aprendizaje en la Institución Educativa Secundaria Artesanal Taquile, 2024", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	< 1 %
36	issuu.com Fuente de Internet	< 1 %
37	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
38	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	< 1 %
39	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
40	rid.unam.edu.ar Fuente de Internet	< 1 %
41	dspace.esepoch.edu.ec Fuente de Internet	OSCAR UCHELLY ROMERO CORTEZ 41812294 < 1 %
42	www.alumbrera.com.ar Fuente de Internet	 < 1 %
43	Alarcón Huallpa, Elisabeth Catherine. "Análisis de Impacto Regulatorio ex Post del Régimen de Operadores de Infraestructura Móvil Rural (OIMR) en el Perú, en el Periodo 2016-2022", Pontificia Universidad Católica del Peru (Peru) Publicación	< 1 %




Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Ariana Nicol Burga Muñoz
Título del ejercicio: Quick Submit
Título de la entrega: Red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.16 para garantizar l...
Nombre del archivo: WIMAX_INFORME_FINAL_-_Sapame.docx
Tamaño del archivo: 4.95M
Total páginas: 72
Total de palabras: 12,802
Total de caracteres: 72,871
Fecha de entrega: 03-mar-2026 07:46a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2893279206

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS
"Red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.16 para garantizar la conectividad del I.F. Señor de Sicán, caserío Sapamé, Ñilimo, Lambayeque"

Para Optar por el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

ELABORADA POR:
Bach. Josue Yair Mechan Palacios
Bach. Ariana Nicol Burga Muñoz

ASESOR:
Dr. Ing. Oscar Uccelly Romero Cortez

LAMBAYEQUE - PERÚ
2025

**OSCAR UCHELLEY
ROMERO CORTEZ
41812294**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme esta oportunidad, por darme salud y sabiduría para lograr realizar este proyecto.

A mis padres que fueron pieza fundamental de la persona que soy hoy en día, motivándome cada día a no rendirme, y siendo también mi inspiración de personas fuertes y resilientes.

A mis profesores de la universidad, que con sus enseñanzas y paciencia me motivan a llegar a ser una profesional como ellos.

Al final de cuentas nosotros somos resultado de todas las personas que influyeron en nuestro camino, agradezco a cada uno por dejar una huella en vida y ser de inspiración para ser una mejor profesional y ser humano.

Ariana Nicol Burga Muñoz

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a mis padres por su amor, motivación y buenos consejos que hicieron que yo esté aquí presente.

A mi familia, que fueron mi fortaleza por enseñarme valores y por siempre estar a mi lado apoyándome.

A mis compañeros de universidad por los buenos momentos juntos en nuestra etapa universitaria motivándonos cada día a no rendirnos.

Finalmente, dedico este proyecto a mí misma, por no rendirme y seguir adelante a pesar de todas las dificultades.

Ariana Nicol Burga Muñoz

AGRADECIMIENTOS

Agradezco por sobre todo a Dios por brindarme mucha fuerza para perseverar hasta culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A mi familia, por su apoyo, comprensión y amor sin condición en cada momento, sin ello, este logro no habría sido posible.

A mis docentes, por transmitir sus conocimientos, motivándome constantemente a superarme, cada enseñanza fue esencial para el desarrollo de este trabajo y para mi crecimiento profesional.

Finalmente agradezco a todas las personas que creyeron en mi y con cada gesto o palabras de apoyo dejaron huella imborrable en mi vida y fueron parte esencial de este logro.

Josue Yair Mechan Palacios

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, por ser mi mayor fuente de motivación y fuerza.

A mis padres, por apoyarme siempre en cada paso de este camino y enseñarme el valor del esfuerzo.

Y lo dedico a mí mismo, por la constancia, disciplina y la fe que me impulsaron a superar cada desafío y convertir este sueño en realidad.

Josue Yair Mechan Palacios

ÍNDICE GENERAL

1	CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO	19
1.1	Antecedentes	19
1.1.1	Antecedentes Internacionales.....	19
1.1.2	Antecedentes Nacionales.....	20
1.1.3	Antecedentes Locales	21
1.2	Bases Teóricas	22
1.2.1	Fundamentos de las Telecomunicaciones Rurales	22
1.2.2	Redes inalámbricas de banda ancha.....	23
1.2.3	Estándar IEEE 802.16 (WiMAX)	25
2	CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES	28
2.1	Diseño de Contrastación de Hipótesis.....	28
2.2	Población, muestra	29
2.2.1	Población	29
2.2.2	Muestra	29
2.3	Técnicas, instrumentos, equipos y materiales	29
2.3.1	Técnicas	29
2.3.2	Instrumentos	29
2.3.3	Equipos y materiales	29
3	CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
3.1	Resultados.....	32
3.1.1	Estimación de la demanda y dimensionamiento del ancho de banda	32
3.1.2	Estimación de la demanda en la I.E. Señor de Sicán (Sapamé–Íllimo)	32
3.1.3	Dimensionamiento preliminar del ancho de banda para la I.E. Señor de Sicán	34
3.1.4	Margen de contingencia para el dimensionamiento del ancho de banda	35
3.1.5	Simulación de desempeño del enlace WiMAX (IEEE 802.16) - I.E. Señor de Sicán ...	36

3.1.6	Análisis de enlaces con Radio Mobile	37
3.1.7	Cálculo del link-budget y margen de desvanecimiento.....	48
3.1.8	Cálculo de la Capacidad del Canal:	60
3.1.9	Parámetros de alineamiento:.....	64
3.2	Discusión	68
4	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
4.1	Conclusiones.....	69
4.2	Recomendaciones.....	71
5	REFERENCIAS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Red inalámbrica en zonas rurales	22
Figura 2: Redes Inalámbricas	24
Figura 3: Estándar 302.16 - WiMAX	26
Figura 4 I.E Señor de Sicán, caserío Sapamé, Íllimo, Lambayeque	31
Figura 5 Topología de enlaces estimada mediante Radio Mobile (WiMAX) I.E. Señor de Sicán, Sapamé	37
Figura 6 Parámetros de emplazamiento y orientación de la estación en Illimo	39
Figura 7 Parámetros de emplazamiento y orientación de la estación receptora en la I.E. Señor de Sicán	41
Figura 8 Vista satelital de la antena en la I.E. Señor de Sicán (Sapamé).....	42
Figura 9 Trazado topográfico del enlace radioeléctrico entre Íllimo y la I.E. Señor de Sicán (Sapamé).....	52
Figura 10 Perfil longitudinal del enlace y evaluación de Fresnel y nivel de señal (Xirio)	53
Figura 11 Trazado en planta del enlace radioeléctrico entre Íllimo y la I.E. Señor de Sicán	54
Figura 12 Trazado del enlace radioeléctrico entre Íllimo y la I.E. Señor de Sicán (Vista satelital)	62
Figura 13 Geolocalización del caserío Sapamé, distrito de Íllimo, provincia de Lambayeque ...	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ancho de banda requerido para el enlace de acceso WiMAX I.E. Señor de Sicán	33
Tabla 2 Elementos del perfil radioeléctrico utilizado en Radio Mobile.....	38
Tabla 3 Parámetros de emplazamiento y orientación de la Estación Base en Íllimo.....	40
Tabla 4 Parámetros de emplazamiento y orientación de la estación receptora en la I.E. Señor de Sicán (Sapamé)	43
Tabla 5 Parámetros del sistema radio utilizados en el cálculo del link-budget	44
Tabla 6 Parámetros del sistema radio para el cálculo del link-budget.....	45
Tabla 7 Pérdidas por propagación calculadas (Radio Mobile) — valores en dB	46
Tabla 8 Pérdidas por propagación y margen estadístico (simulación Radio Mobile) - valores en dB	47
Tabla 9 Desempeño del enlace radioeléctrico simulado (Radio Mobile)	49
Tabla 10 Parámetros de desempeño del enlace Estación Base en Íllimo y la estación base I.E. Señor de Sicán.	50
Tabla 11 Resumen del link-budget del enlace WiMAX	51
Tabla 12 Cota y nivel de señal en puntos muestreados a lo largo de la trayectoria - 10MHz - 5.8Ghz	55
Tabla 13 Parámetros del enlace: distancia, cota y nivel de señal	56
Tabla 14 Informe de enlace muestreado a lo largo de la trayectoria - 20Mhz - 5.8Ghz.....	58
Tabla 15 Parámetros de alineamiento del enlace	64

RESUMEN

La presente investigación abordó el problema de la limitada conectividad digital en la Institución Educativa Señor de Sicán, ubicada en el caserío Sapamé, distrito de Íllimo, Lambayeque, lo cual restringe el acceso equitativo a recursos pedagógicos y tecnológicos. El objetivo principal fue diseñar una solución de red inalámbrica rural eficiente, basada en el estándar IEEE 802.16 (WiMAX), que permita mejorar la cobertura y calidad del servicio de internet en dicha institución. Para ello, se desarrolló un estudio de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo, que incluyó revisión de literatura especializada, caracterización de la demanda, análisis topográfico y simulaciones técnico-operativas mediante los softwares Radio Mobile y Xirio Online. Los resultados revelaron que, bajo condiciones reales del terreno y con una adecuada planificación del enlace (altura de antenas, azimut, potencia de transmisión), es posible establecer una conexión inalámbrica robusta y confiable con un margen de desvanecimiento superior a 20 dB y una tasa estimada de disponibilidad mayor al 99.9%. La evaluación técnica permitió validar la viabilidad del enlace propuesto, recomendando la implementación de torres de 15 a 20 metros, antenas direccionales de alta ganancia y control de tráfico QoS. Se concluye que la tecnología WiMAX representa una alternativa factible y sostenible para cerrar la brecha digital en zonas rurales como Sapamé, contribuyendo directamente al fortalecimiento de los procesos educativos mediante conectividad de banda ancha.

Palabras claves: Conectividad rural, Red inalámbrica, WiMAX y Brecha digital

ABSTRACT

This research addresses the issue of limited digital connectivity at the Señor de Sicán Educational Institution, located in the rural village of Sapamé, Íllimo district, Lambayeque, which restricts equitable access to technological and pedagogical resources. The main objective was to design an efficient rural wireless network solution based on the IEEE 802.16 (WiMAX) standard, to improve internet service coverage and quality in the institution. The study followed an applied research approach with a quantitative focus, including a literature review, demand characterization, topographic analysis, and technical-operational simulations using Radio Mobile and Xirio Online software. Results demonstrated that, under real terrain conditions and with appropriate link planning (antenna height, azimuth, transmission power), a robust and reliable wireless connection is feasible, showing a fade margin exceeding 20 dB and an estimated availability rate above 99.9%. The technical evaluation validated the viability of the proposed link and recommended the deployment of 15–20 meter towers, high-gain directional antennas, and QoS traffic control. It is concluded that WiMAX technology is a viable and sustainable alternative to reduce the digital divide in rural areas such as Sapamé, directly contributing to the enhancement of educational processes through broadband connectivity.

Keywords: Rural connectivity, Wireless network, Wimax and Digital divide

INTRODUCCIÓN

La brecha digital en zonas rurales persiste como un desafío crítico en el entorno mundial, limitando el acceso a educación de calidad y oportunidades socioeconómicas. Según la UNESCO, el 43% de las áreas rurales en países en desarrollo carecen de conectividad básica, afectando a más de 1.500 millones de personas (UNESCO, 2023). Aunque tecnologías como el estándar IEEE 802.16 (WiMAX) han demostrado eficacia en entornos remotos, su implementación es aún incipiente debido a costos de infraestructura y falta de políticas inclusivas (UIT, 2022). Esto genera desigualdad educativa, donde estudiantes rurales enfrentan desventajas frente a sus pares urbanos.

En el Perú, a pesar de los esfuerzos gubernamentales como el Programa Nacional de Telecomunicaciones y el Plan Nacional de Banda Ancha, la conectividad rural sigue siendo deficiente, con sólo el 40.1% de hogares rurales con acceso a internet (MINEDU, 2023), cifra que disminuye dramáticamente en zonas alejadas. Los proyectos de conectividad rural implementados por el PRONATEL han logrado conectar algunas instituciones educativas, pero enfrentan problemas de sostenibilidad y calidad de servicio, con velocidades promedio que apenas alcanzan 2 Mbps, insuficientes para aplicaciones educativas modernas. No obstante, experiencias positivas como la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica y programas piloto de WiMAX en regiones como Cusco y Puno han demostrado que, con la tecnología adecuada, es posible mejorar significativamente la conectividad en zonas rurales, aunque es necesaria una mayor inversión y coordinación entre los sectores público y privado para lograr un impacto sostenible (CEPLAN, 2024).

En el departamento de Lambayeque, muchas instituciones educativas rurales aún enfrentan una marcada exclusión digital. El caserío Sapamé, ubicado en el distrito de Íllimo, es un claro ejemplo de esta realidad: la I.E. Señor de Sicán no cuenta con un sistema de conectividad confiable, lo cual limita seriamente el acceso a recursos digitales, plataformas de aprendizaje y herramientas de gestión educativa. Si bien se han desarrollado algunas iniciativas locales con apoyo de entidades gubernamentales o privadas, estas no han sido sostenibles ni adaptadas a las particularidades topográficas de la zona. La falta de estudios técnicos para evaluar soluciones inalámbricas, como las basadas en IEEE 802.16, perpetúa la exclusión de los estudiantes rurales, comprometiendo su derecho a una educación moderna e inclusiva (MINEDU, 2024).

A nivel regional, más del 40% de las instituciones educativas rurales carecen de acceso a internet funcional (MTC, 2023). La implementación de tecnologías como IEEE 802.16 ha sido efectiva en zonas andinas de Bolivia y Ecuador, donde se ha logrado conectar a más de 500 comunidades. Estas cifras y experiencias evidencian la viabilidad del estándar IEEE 802.16 y la necesidad de aplicarlo a contextos locales como el caserío Sapamé (UNICEF, 2022).

Esta investigación adquiere relevancia crucial porque aborda uno de los aspectos más determinantes de la desigualdad educativa contemporánea: el acceso desigual a recursos digitales y conectividad. Implementar una red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.16 en la I.E Señor de Sicán no solo resolverá un problema técnico (Espino, 2023), sino que tendrá un impacto transformador en múltiples dimensiones: educativamente, permitirá a estudiantes y docentes acceder a recursos pedagógicos globales, participar en comunidades de aprendizaje y desarrollar competencias digitales esenciales; socialmente, contribuirá a reducir la brecha digital entre

entornos urbanos y rurales, promoviendo mayor equidad (García-Zaballos et al., 2021); económicamente, mejorará las perspectivas laborales futuras de los estudiantes al familiarizarlos con herramientas tecnológicas; y desde una perspectiva de innovación, establecerá un modelo replicable para otras comunidades rurales con características geográficas similares, maximizando el impacto de la inversión pública en infraestructura digital educativa (Estela & Jimenez, 2024).

La presente tesis se justifica ante la urgente necesidad de superar la exclusión digital que afecta a la I.E Señor de Sicán y, por extensión, a toda la comunidad del caserío Sapamé, donde la falta de conectividad perpetúa ciclos de desigualdad educativa y socioeconómica (Flores-Cueto et al., 2021). La selección del estándar IEEE 802.16 responde específicamente a las características topográficas y demográficas de la zona, ofreciendo una solución técnicamente viable, económicamente sostenible y socialmente transformadora (Solorzano, 2025). Este proyecto no solo aportará conocimiento técnico sobre la implementación de redes inalámbricas en entornos rurales complejos, sino que establecerá un precedente metodológico para futuras intervenciones en comunidades con similares desafíos, contribuyendo así al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con educación de calidad (ODS 4) y reducción de desigualdades (ODS 10) en uno de los contextos donde más urgentemente se requiere (Zulu et al., 2024).

1 CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes Internacionales

Solorzano (2025), propuso como objetivo diseñar una infraestructura de red WiMAX mediante simulaciones para mejorar el acceso de banda ancha en la Parroquia Colonche. Utilizó una metodología cuantitativa aplicada con simulación en software Atoll, analizando la cobertura en una población de 40,058 habitantes distribuidos en 1,137.2 km². Se emplearon antenas Airspan SEC65X-3.2-D4.3-T0-1 y el modelo de propagación Erceg-Greenstein. Los resultados mostraron una cobertura efectiva en más del 85% de zonas con señal superior a -70 dBm, garantizando conectividad incluso en áreas remotas. Se concluyó que la implementación de una red WiMAX es viable y favorable para cubrir áreas de difícil acceso, reduciendo significativamente la brecha digital en la comunidad rural.

Burgos (2022), planteó como objetivo implementar un sistema LTE utilizando SDR. Metodológicamente siguió un enfoque investigativo-aplicativo dividido en tres fases: configuración de equipos, implementación de escenarios y pruebas. Se utilizaron computadores, tarjetas USRP Ettus B210, antenas y dispositivos móviles para simular transmisores y receptores LTE. Las mediciones se realizaron con analizador de espectro y aplicaciones móviles. Los resultados evidenciaron transmisiones MIMO con mejores características de RSRP (-106,9 dBm) frente a transmisiones SISO, buena modulación en ambientes indoor y outdoor con condiciones

de borde de celda, y cumplimiento de parámetros radioeléctricos LTE, como ocupación del ancho de banda de 9,123 MHz sobre 10 MHz disponibles y sincronización perfecta entre antenas.

1.1.2 Antecedentes Nacionales

Gavidia (2023), planteó como objetivo diseñar un sistema de red Wimax aplicando la norma IEEE 802.16 para optimizar las telecomunicaciones en la empresa mencionada. Utilizando una metodología experimental con diseño cuasi-experimental de tipo propositivo-explicativa, se trabajó con una población de 6 áreas de la empresa, aplicando cuestionarios como instrumentos de recolección de datos. Los resultados evidenciaron que la implementación del diseño propuesto aumentó significativamente la capacidad de ancho de banda, pasando de valores entre 34-85 Mbps a 398-662 Mbps, lo que representó una optimización superior al 80%. Se concluyó que el sistema Wimax con la norma IEEE 802.16 logró optimizar sustancialmente las telecomunicaciones entre locales, mejorando la velocidad y reduciendo los tiempos de respuesta.

Rosas (2021) propone como objetivo identificar escenarios futuros que incentiven el uso de la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica y Proyectos Regionales, cuyo aprovechamiento al 2021 era solo del 3.2%. Mediante metodología prospectiva exploratoria, empleó análisis multidimensional (político-regulatorio, tecnológico, económico, social, ambiental), vigilancia tecnológica con estudio bibliométrico, matrices de impactos cruzados (MICMAC) y consulta a expertos utilizando encuestas Delphi. Se identificaron 20 drivers o factores de cambio, de los cuales se seleccionaron 10 drivers clave para elaborar 5 hipótesis. El estudio combinó estos elementos mediante el método SMIC (sistemas y matrices de impactos cruzados) para generar 32

escenarios prospectivos, determinando como escenario meta; El Estado junto a los operadores de infraestructura de acceso local, con tecnología de vanguardia y servicios de valor agregado, concluyendo que es posible desarrollar acciones presentes para maximizar el uso futuro de estas redes.

1.1.3 Antecedentes Locales

Barboza y Pérez (2023), Propuso como objetivo diseñar una red inalámbrica basada en espacios en blanco de televisión (TVWS) para garantizar conectividad en dos instituciones educativas rurales. Mediante un enfoque técnico-experimental, se utilizaron simulaciones con Radio Mobile y Google Earth, análisis de disponibilidad espectral y pruebas de enlace en la banda UHF (470-698 MHz). La muestra incluyó a 354 estudiantes de los colegios 10908 y 10997. Los resultados demostraron viabilidad técnica, con un 84% de canales TVWS disponibles y velocidades de hasta 150 Mbps mediante equipos RADWIN Outland™. Se concluyó que la implementación de TVWS reduce la brecha digital en zonas rurales, optimiza el uso del espectro y es replicable en contextos similares, asegurando acceso educativo sostenible.

Estela & Jimenez (2024) planteó como objetivo evaluar el rendimiento de una red rural mediante el análisis de demanda de servicios de telecomunicaciones en población, vivienda e instituciones. La metodología incluyó recolección de datos demográficos del INEI, diseño de redes inalámbricas (transporte y acceso) y simulación con NS3 y NetAnim. La población estudiada fueron 37 centros poblados, seleccionando 6 mediante criterios de ruralidad y viabilidad técnica. Se emplearon herramientas como Link Planner para planificación y simuladores para validación.

Los resultados demostraron que las redes propuestas superaron la demanda estimada (hasta 797 Mbps agregados), garantizando velocidades adecuadas y escalabilidad. Se concluyó que el diseño integral, respaldado por simulación, ofrece un modelo replicable para áreas rurales, mejorando conectividad y desarrollo socioeconómico

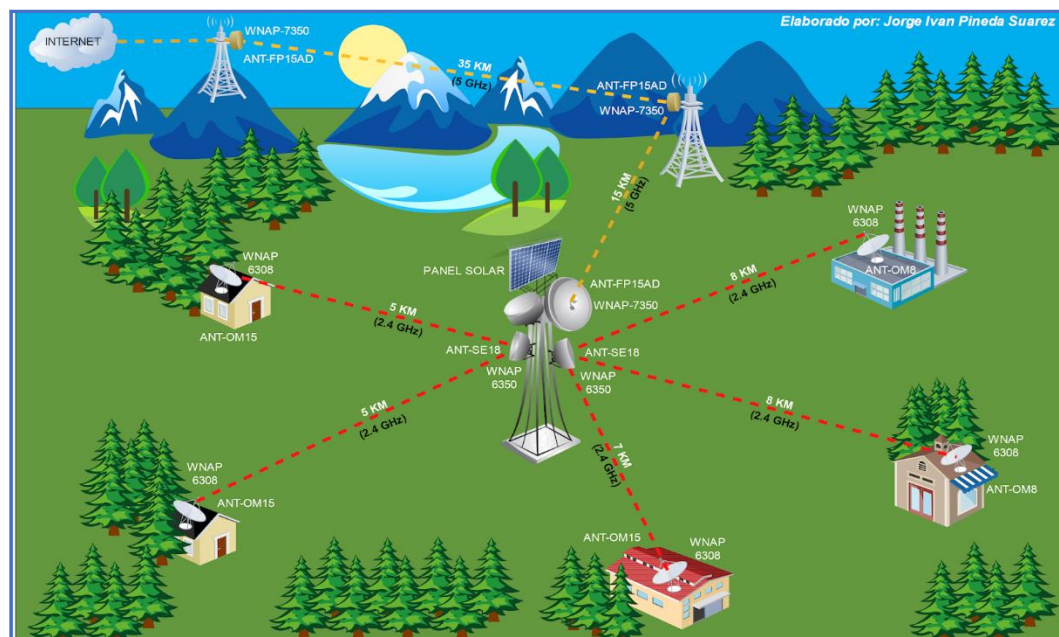
1.2 Bases Teóricas

1.2.1 Fundamentos de las Telecomunicaciones Rurales

La brecha digital en zonas rurales constituye un problema persistente, reflejando la desigualdad en el acceso a tecnologías de la información y comunicación. Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT, 2022), millones de personas en áreas rurales aún carecen de conectividad básica, lo cual limita el acceso a servicios esenciales como la educación y la salud(INEI, 2023a).

Figura 1:

Red inalámbrica en zonas rurales



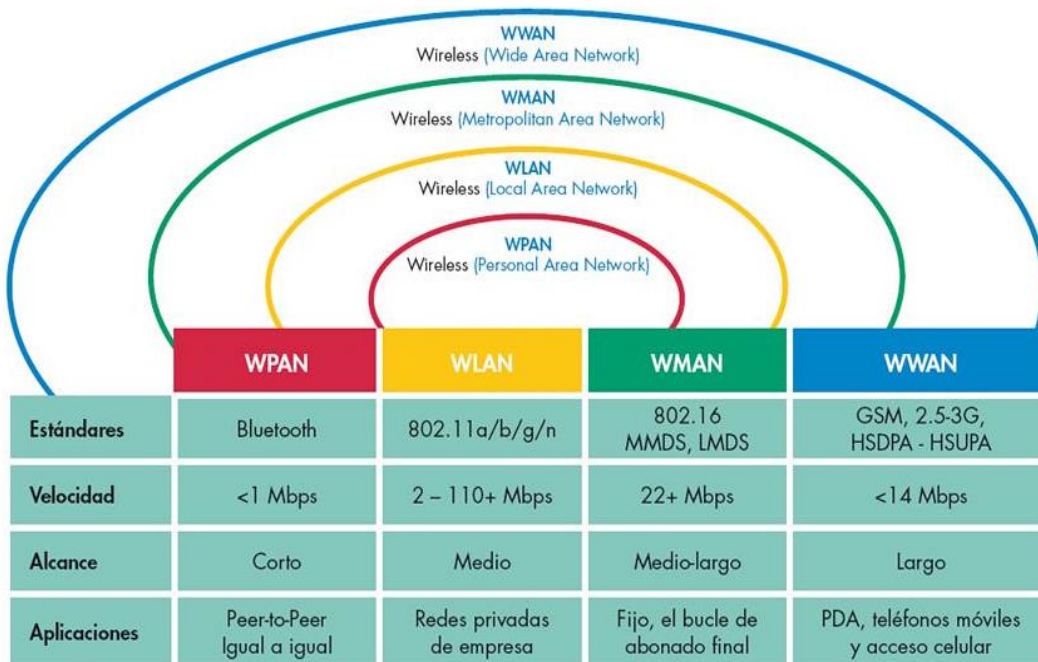
Estas escuelas enfrentan grandes desafíos: la falta de infraestructura tecnológica, la limitada capacitación docente en entornos digitales y la imposibilidad de integrar recursos virtuales en los procesos pedagógicos. La conectividad, en este contexto, no solo habilita el acceso a contenidos educativos, sino que transforma la enseñanza mediante plataformas virtuales, recursos interactivos y estrategias de aprendizaje remoto, promoviendo una educación más inclusiva y equitativa (INEI, 2023b). Frente a estas problemáticas, se han implementado soluciones tecnológicas como redes satelitales, enlaces microondas, sistemas LTE y WiMAX en diversas regiones del mundo, las cuales han demostrado ser eficaces para conectar zonas geográficamente adversas, aunque requieren adaptaciones técnicas, sostenibilidad operativa y evaluación contextualizada para su implementación exitosa (Solorzano, 2025).

1.2.2 Redes inalámbricas de banda ancha

Las redes inalámbricas de banda ancha son sistemas de telecomunicación que permiten la transmisión de datos a altas velocidades sin necesidad de cables físicos, utilizando ondas electromagnéticas en diversas bandas de frecuencia (Ahmed et al., 2021). Su principal característica es la capacidad de ofrecer acceso continuo y de alta velocidad a internet en un área determinada, mediante la instalación de nodos emisores y receptores estratégicamente distribuidos. A diferencia de las redes cableadas, que requieren infraestructura física como fibra óptica o cable coaxial, las redes inalámbricas pueden desplegarse rápidamente y con menor costo, especialmente en terrenos de difícil acceso o baja densidad poblacional, como las zonas rurales (Estela & Jimenez, 2024).

Existen múltiples tecnologías que habilitan estas redes, entre ellas Wi-Fi (para entornos cerrados de corto alcance), LTE (utilizado en redes móviles), LoRa y Sigfox (orientadas al internet de las cosas con bajo consumo energético) y WiMAX (basado en el estándar IEEE 802.16), ideal para cubrir distancias amplias con capacidades de transmisión de datos robustas (Aanandaram & Deepalakshmi, 2024). Si bien las tecnologías inalámbricas presentan ventajas como flexibilidad de instalación, escalabilidad y cobertura extendida, también enfrentan limitaciones, como la interferencia electromagnética, la degradación de la señal por obstáculos naturales y la dependencia de condiciones climáticas, lo cual requiere una adecuada planificación del diseño de red para garantizar su funcionamiento óptimo en contextos rurales (Almeida-Correa, 2022).

Figura 2:
Redes Inalámbricas



1.2.3 Estándar IEEE 802.16 (WiMAX)

El estándar IEEE 802.16, conocido comercialmente como WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), fue desarrollado a principios del siglo XXI por el IEEE para proporcionar acceso inalámbrico de banda ancha en áreas metropolitanas, suburbanas y rurales (Solorzano, 2025). Su evolución ha incluido diversas versiones, desde 802.16d (WiMAX fijo) hasta 802.16e (WiMAX móvil), que ampliaron su aplicabilidad a dispositivos en movimiento. WiMAX se concibió como una alternativa al cableado físico en lugares donde la instalación de fibra óptica no es viable económicamente o técnicamente, ofreciendo un rendimiento comparable en términos de velocidad y estabilidad (Pandey & Kundu, 2023).

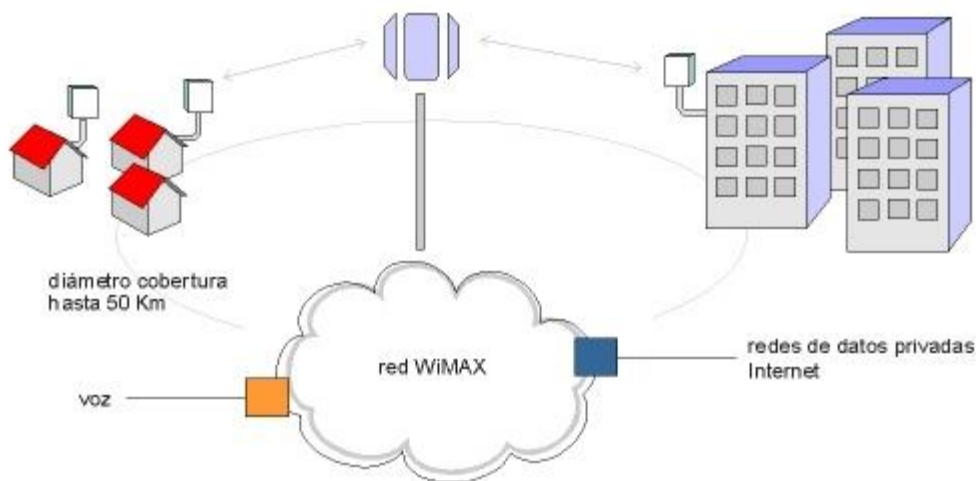
La arquitectura del sistema WiMAX se compone principalmente de tres elementos: la Estación Base (BS), que actúa como transmisor principal de la señal; la Estación de Suscriptor (SS), instalada en el punto de destino para recibir y enviar datos; y la Red de Acceso, que interconecta las estaciones base con el núcleo de internet (Singh et al., 2023). Esta arquitectura permite establecer enlaces punto a punto o punto a multipunto, facilitando su adaptación a diferentes condiciones topográficas y demandas de tráfico.

Entre las especificaciones técnicas más relevantes del estándar se encuentran las bandas de frecuencia utilizadas, típicamente en 2.3 GHz, 2.5 GHz y 3.5 GHz, que permiten un equilibrio entre cobertura y capacidad de transmisión (Gavidia, 2023). La modulación empleada incluye esquemas como OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y QAM (Quadrature

Amplitude Modulation), que optimizan el uso del espectro y la resistencia a interferencias. El ancho de banda puede variar entre 1.25 MHz y 20 MHz, permitiendo alcanzar velocidades de hasta 70 Mbps con una cobertura efectiva de 3 a 10 kilómetros en zonas rurales, e incluso más bajo condiciones ideales (Zhou et al., 2023). Además, el acceso al canal se gestiona mediante esquemas como TDMA (Time Division Multiple Access) y OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), garantizando eficiencia y calidad de servicio para múltiples usuarios (Amara et al., 2025).

Figura 3:

Estándar 802.16 - WiMAX



Entre las ventajas de WiMAX para zonas rurales destacan su amplia cobertura, facilidad de despliegue, capacidad para brindar servicios triples play (voz, datos y video) y adaptabilidad a diversas geografías (Atrash et al., 2021). Existen múltiples casos de aplicación exitosa, como el proyecto “WiMAX en los Andes” en Bolivia y Perú, implementado con apoyo de organismos internacionales, que logró conectar instituciones educativas y centros de salud en áreas remotas con resultados positivos en acceso y calidad de servicios digitales. Estas experiencias evidencian que WiMAX, correctamente diseñado, representa una solución viable y sostenible para reducir la brecha digital en zonas rurales (Espinoza & Oropeza, 2022).

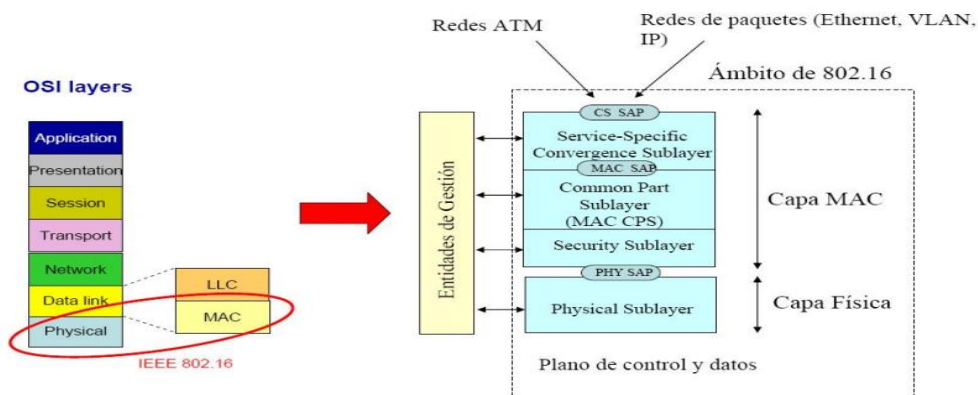
2 CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Diseño de Contrastación de Hipótesis

Partiendo de los fundamentos teóricos de las telecomunicaciones y las tecnologías inalámbricas de banda ancha, la presente investigación desarrollará un estudio técnico orientado al diseño de una red de comunicación inalámbrica que garantice la conectividad en la Institución Educativa Señor de Sicán, ubicada en el caserío Sapamé, distrito de Íllimo, provincia de Lambayeque. Considerando las condiciones propias del entorno rural, se propondrá una solución tecnológica basada en el estándar IEEE 802.16, con el propósito de proporcionar un sistema de conectividad estable, eficiente y sostenible, adecuado para entornos educativos rurales (Solorzano, 2025). El estudio contemplará simulaciones mediante software especializado y una evaluación comparativa de parámetros técnicos del sistema propuesto, con el fin de validar su rendimiento y adaptabilidad. Esta investigación, de tipo descriptiva, con enfoque cuantitativo y diseño no experimental, tiene como finalidad generar una propuesta replicable que contribuya al cierre de la brecha digital en instituciones educativas rurales, facilitando así el acceso equitativo a los recursos digitales en el marco de una infraestructura tecnológica adecuada.

Figura 5:

Diseño de Contrastación Hipótesis



2.2 Población, muestra

2.2.1 Población

La población de estudio está constituida por el conjunto de redes de comunicación inalámbricas diseñadas e implementadas bajo el estándar IEEE 802.16 (WiMAX), orientadas a brindar conectividad de banda ancha en comunidades rurales, particularmente redes que han sido empleadas para atender necesidades de comunicación en instituciones educativas rurales.

2.2.2 Muestra

La muestra está conformada por una selección de redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.16 implementadas específicamente en instituciones educativas ubicadas en zonas rurales con características geográficas similares a las del caserío Sapamé.

2.3 Técnicas, instrumentos, equipos y materiales

2.3.1 Técnicas

- Análisis documental.
- Uso de simuladores especializados

2.3.2 Instrumentos

- Fichas bibliográficas.
- Fichas de contenido.
- Datos de tesis y artículos científicos.

2.3.3 Equipos y materiales

- Laptop con procesador de alta velocidad.

3 CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Institución Educativa Señor de Sicán, ubicada en el centro poblado de Sapamé (distrito de Íllimo, provincia de Lambayeque), evidencia limitaciones estructurales de conectividad digital que inciden de manera directa en el proceso de enseñanza–aprendizaje y en la gestión pedagógica y administrativa. Aun cuando la institución cuenta con nivel secundario y un aula de cómputo, el ancho de banda disponible, la inestabilidad del servicio y la imposibilidad de sostener aplicaciones sensibles a retardo como videoconferencias, plataformas educativas y recursos multimedia configuran un déficit tecnológico que restringe el acceso equitativo a las TIC frente a instituciones de ámbitos urbanos. Este escenario se ve reforzado por la baja priorización de inversión de operadores comerciales en zonas rurales, lo que consolida una brecha digital persistente.

En respuesta, se plantea el diseño de una solución de acceso inalámbrico con backhaul por microondas, ajustada a las condiciones geográficas, técnicas y sociales del entorno. El presente capítulo expone y analiza los resultados obtenidos a partir de la modelación y evaluación de dicha propuesta, organizando la discusión en torno a tres ejes: (i) cobertura y calidad radioeléctrica en el campus (potencia recibida, relación señal–interferencia–ruido y cumplimiento del despeje de la primera zona de Fresnel); (ii) capacidad y desempeño bajo escenarios de carga representativos de uso escolar (throughput agregado por sector y por usuario, eficiencia espectral y políticas de priorización de tráfico educativo); y (iii) confiabilidad operativa (disponibilidad estimada del

servicio, latencia extremo a extremo y pérdida de paquetes), en relación con umbrales de aceptación pertinentes para contextos rurales.

Figura 4

I.E Señor de Sicán, caserío Sapamé, Íllimo, Lambayeque



La discusión contrasta el estado inicial de conectividad con el comportamiento esperado de la arquitectura propuesta, identifica compromisos diseño–desempeño (altura de mástil, sectorización, ancho de canal y esquemas de modulación–codificación) y examina la robustez ante factores de degradación previsibles (atenuación por lluvia, vegetación y microobstrucciones). Se integran además consideraciones de escalabilidad y sostenibilidad mantenimiento, gestión de red y consumo energético, a fin de valorar la viabilidad técnica de la solución para garantizar servicios críticos del ecosistema educativo (videoclases, LMS y actualización docente). Con ello, este

capítulo aporta evidencia técnica para sustentar que la propuesta contribuye de manera efectiva a reducir la brecha digital y a mejorar la calidad educativa en la I.E. Señor de Sicán, Sapamé.

3.1 Resultados

3.1.1 Estimación de la demanda y dimensionamiento del ancho de banda

Para dimensionar la propuesta de conectividad de esta investigación, solución en la I.E. Señor de Sicán (Sapamé–Íllimo), se evaluó la demanda de ancho de banda enfocada en el tráfico real durante la hora cargada (videoconferencias, LMS y contenidos multimedia), se consideró: (i) caracterización de actividades académicas con tasas de bit conservadoras; (ii) factor de simultaneidad por aula y clúster; (iii) priorización QoS para tráfico sensible a retardo; y (iv) ajustes por overhead y eficiencia MAC/PHY, incorporando sobre suscripción controlada y margen de crecimiento, la demanda resultante se contrasta con la capacidad de acceso y backhaul de la arquitectura propuesta (ancho de canal, sectorización, alturas y MCS), validando que el dimensionamiento garantice throughput, latencia y disponibilidad adecuados para la continuidad académica.

3.1.2 Estimación de la demanda en la I.E. Señor de Sicán (Sapamé–Íllimo)

La demanda de ancho de banda de la I.E. Señor de Sicán (Sapamé–Íllimo) para la hora cargada se estimó considerando el uso centralizado en el aula de cómputo y la conectividad requerida por el personal docente, se contempló dos escenarios: un escenario base con 30 estudiantes y 6 docentes (60% de estudiantes en videoconferencia SD y 40% en uso de LMS) y un

escenario exigente con 40 estudiantes y 8 docentes (50% de estudiantes en videoconferencia HD y 50% en LMS), para el dimensionamiento se usaron tasas referenciales por actividad (videoconferencia SD = 1.2 Mbps; HD = 2.0 Mbps; LMS = 0.3 Mbps; docente \approx 0.6 Mbps) y parámetros de ingeniería conservadores (overhead 20%, eficiencia MAC/PHY = 0.75, sobre suscripción 1.3 y margen de crecimiento 1.2).

La estimación de la demanda para el escenario base, refleja una necesidad de 72 Mbps downstream y 51 Mbps upstream; en el escenario riguroso, la demanda estimada asciende a \approx 127 Mbps downstream y \approx 97 Mbps upstream, estos resultados nos permiten adoptar un backhaul simétrico o casi simétrico de mínimo 150 Mbps \downarrow / 100 Mbps \uparrow , con una capacidad cercana a 200 Mbps downstream que garantice un headroom operativo, para el acceso inalámbrico se dimensionó la capacidad neta por sector en al menos 200 Mbps y priorizando políticas de QoS con el uso de videoconferencias y tráfico de plataformas educativas, asegurando la continuidad académica.

Tabla 1

Ancho de banda requerido para el enlace de acceso WiMAX I.E. Señor de Sicán

Usuario	Simultáneos	Actividades Principales	Ancho de Banda
Estudiantes	20	Navegación web, acceso a recursos educativos, video en 720p	2 Mbps
Docentes	6	Videollamadas, carga/descarga de materiales, uso de plataformas	3 Mbps

3.1.3 Dimensionamiento preliminar del ancho de banda para la I.E. Señor de Sicán

Para dimensionar la capacidad en hora cargada se efectuó un cálculo del ancho de banda a partir de las tasas asignadas por usuario y el número de usuarios concurrentes, se consideran 20 estudiantes simultáneos con un consumo promedio de 2 Mbps por estudiante y 6 docentes simultáneos con un consumo promedio de 3 Mbps por docente (valores referenciales asociados a actividades en el aula de cómputo).

Cálculos:

- **Estudiantes:**

Ecuación (1): Ancho de banda requerido por estudiantes

$$B_{\text{est}} = 20 \text{ usuarios} \times 2 \text{ Mbps} = 40 \text{ Mbps}$$

- **Docentes**

Ecuación (2): Ancho de banda requerido por docentes

$$B_{\text{doc}} = 06 \text{ usuarios} \times 3 \text{ Mbps} = 18 \text{ Mbps}$$

- **Ancho de banda agregado**

Ecuación (3) Ancho de banda agregado (estimación preliminar)

$$B_{\text{prelim}} = B_{\text{est}} + B_{\text{doc}} = 40 \text{ Mbps} + 18 \text{ Mbps} = 58 \text{ Mbps}$$

El valor considera las tasas netas por usuario, para obtener el requerimiento operacional se ajusta B_{prelim} , concentrando factores de corrección que reflejen overhead de protocolos, eficiencia de acceso al medio, sobre suscripción admisible y margen de crecimiento.

$$B_{\text{req}} = \frac{B_{\text{prelim}} \cdot (1 + \text{OH})}{\eta_{\text{MAC}}} \cdot \text{OS} \cdot \text{HR}$$

Donde:

OH = overhead de protocolos,

η_{MAC} = eficiencia MAC/PHY,

OS = factor de sobre suscripción

HR = margen de crecimiento.

3.1.4 Margen de contingencia para el dimensionamiento del ancho de banda

Para asegurar la estabilidad del servicio ante picos de demanda y posibles ampliaciones futuras (incorporación de dispositivos adicionales o mayor uso de actividades en línea), se incorpora un margen de contingencia del 30 % sobre la estimación base del ancho de banda. De este modo, el requerimiento garantizado se expresa como:

$$B_{\text{garantizado}} = B_{\text{preliminar}} \times (1 + 0,30) = 58 \text{ Mbps} \times 1,3 = 75,4 \text{ Mbps}$$

El valor de $B_{\text{garantizado}} \approx 75,4 \text{ Mbps}$, establece el ancho de banda mínimo que garantiza un servicio estable y con calidad apropiada para la solución propuesta.

3.1.5 Simulación de desempeño del enlace WiMAX (IEEE 802.16) - I.E. Señor de Sicán

Al evaluar la viabilidad técnica de la propuesta de conectividad para la I.E. Señor de Sicán, caserío Sapamé del distrito de Íllimo, se realizó una simulación de la red de acceso basada en el estándar IEEE 802.16 (WiMAX), seleccionamos esta tecnología ya que se fundamenta en su capacidad para proporcionar acceso de banda ancha en zonas rurales con infraestructura limitada, admitiendo topologías punto a punto (PtP) y punto a multipunto (PtMP) adecuadas a esta realidad.

El modelo incluyó condiciones reales, como la topografía local, datos de altura de terreno, obstáculos y distancias de enlace entre la estación base propuesta y los puntos de acceso en la institución, en la simulación se emplearon las herramientas Xirio y Radio Mobile, que permiten analizar enlaces PtP/PtMP y estimar parámetros críticos del enlace radioeléctrico, teniendo en cuenta pruebas para reproducir diferentes condiciones de operación (antenas y alturas propuestas, anchos de canal, potencia de transmisión y pérdida por clutter), con el propósito de que los resultados sean aplicables al diseño.

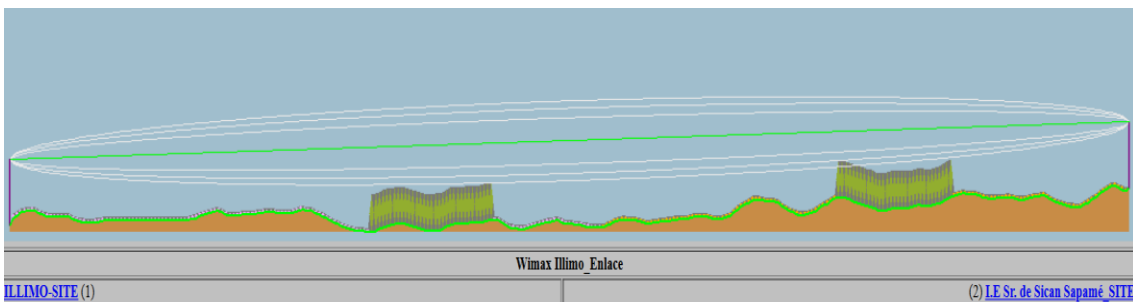
Los indicadores que se han tomado en cuenta para ser evaluados incluyen, línea de vista (LoS), la potencia de señal recibida (RSSI), la relación señal ruido (SNR), el throughput estimado por sector y por usuario, y el margen de desvanecimiento, estos datos permiten establecer la idoneidad del enlace frente a los requisitos de calidad como latencia, pérdida de paquetes y rendimiento agregado.

La simulación permite la validación de los resultados, contrastando la capacidad estimada del enlace con el requerimiento de ancho de banda previamente calculado ($\approx 75,4$ Mbps garantizados), permitiendo verificar la factibilidad del diseño que se ha propuesto y así poder determinar las configuraciones RF como la altura de mástil, ganancia de antena, ancho de canal y esquemas MCS, que son necesarias para lograr los umbrales de servicio, integrándose con el dimensionamiento del backhaul.

3.1.6 Análisis de enlaces con Radio Mobile

Figura 5

Topología de enlaces estimada mediante Radio Mobile (WiMAX) I.E. Señor de Sicán, Sapamé



La figura N° 05, muestra la sección longitudinal del enlace radioeléctrico modelada a través de Radio Mobile para el diseño del acceso WiMAX hacia la I.E. Señor de Sicán (Sapamé), en el eje horizontal se representa la distancia entre los extremos del enlace (estación base y receptor) y en el eje vertical la altimetría del terreno; la superficie coloreada muestra el perfil real del relieve y los obstáculos (elementos vegetales o edificaciones) detectados a lo largo de la trayectoria. La línea geométrica que une los puntos de antena marca la traza del enlace y las elipses superpuestas

corresponden a las primeras zonas de Fresnel trazadas con los parámetros de simulación empleados. Los bloques elevados sobre el perfil señalan obstáculos que, por su altura relativa, pueden reducir el despeje de Fresnel en tramos concretos.

Tabla 2

Elementos del perfil radioeléctrico utilizado en Radio Mobile

Elemento	Descripción Técnica
Línea Verde (LoS)	Representa la línea de vista directa teórica entre las antenas de transmisión y recepción, considerando la altura de los mástiles.
Elipse Blanca (Zona de Fresnel)	Representa la Zona de Fresnel, que es el volumen elipsoidal de espacio donde se concentra la mayor parte de la energía de la señal.
Terreno (Color Naranja/Marrón)	Representa la topografía y las elevaciones del Caserío Sapamé y sus alrededores.
Obstrucciones (Color Gris/Verde)	Bloques que representan la vegetación, edificios o accidentes geográficos que sobresalen del terreno.

La tabla N° 02, detalla los elementos representados en el perfil radioeléctrico modelado para el enlace hacia la I.E. Señor de Sicán, la línea verde (LoS) representa la trayectoria directa entre las antenas de transmisión y recepción, tomando en cuenta las alturas de mástiles; su presencia condiciona la atenuación por propagación libre y la operación con esquemas de modulación de mayor orden, la elipse blanca identifica la primera zona de Fresnel, volumen elipsoidal concentra la mayor parte de la energía útil; su grado de despeje determina pérdidas por difracción y el margen de desvanecimiento requerido en el link budget.

El terreno (color naranja/marrón) describe la topografía real del caserío Sapamé y de sus alrededores, permitiendo determinar las crestas y los valles que influyen en la visibilidad y en el comportamiento del enlace, además, las obstrucciones (bloques gris/verde) representan elementos sobresalientes, como la vegetación, las edificaciones o los accidentes geográficos, que pueden afectar en la zona de Fresnel y degradar la relación señal-ruido (SNR), reduciendo el throughput y la disponibilidad, estos indicadores son esenciales para interpretar los tramos críticos del perfil, así como el de cuantificar porcentajes de despeje y proponer acciones correctoras como el aumento de altura, cambio de emplazamiento o repetidores, reflejándose en el diseño final.

Figura 6

Parámetros de emplazamiento y orientación de la estación en Illimo

ILLIMO-SITE (1)	
Latitud	-6.474492 °
Longitud	-79.848901 °
Elevación del terreno	53.0 m
Altura de la antena	17.6 m
Azimuth	99.39 TN 101.14 MG °
Inclinación	0.18 °

La figura N° 06, muestra los parámetros georreferenciados y de emplazamiento del enlace Illimo, se indica una latitud de -6.474492° y longitud -79.848901°, una elevación del terreno de 51,0 m y una altura de antena de 10,0 m., siendo el azimut de orientación de 99.39° (Norte Verdadero TN) y 101.14° (Norte Magnético - MG), y la inclinación se registra en 0.18°, indicadores que han sido usados como entradas para el cálculo de trayectoria, link-budget y trazado de Fresnel en la simulación.

Estos parámetros evidencian un análisis serio para la Estación Base, fijando con exactitud la ubicación y la orientación para el diseño del enlace WiMAX, el azimut certifica un correcto diagrama de radiación hacia la I.E. Señor de Sicán, reduciendo las pérdidas por desalineación angular, la cota efectiva de instalación adiciona la elevación del terreno y la altura de la antena (53 m + 17.6 m = 70.6 m), empleando como referencia en el cálculo del despeje de Fresnel y del margen de desvanecimiento en el link-budget, siendo estos datos de entrada esenciales para la simulación radioeléctrica y la estimación de la disponibilidad del enlace.

Tabla 3

Parámetros de emplazamiento y orientación de la Estación Base en Íllimo

Parámetro	Valor	Significado
Latitud	-6.474492°	Coordenada Sur que ubica el sitio exacto de la Estación Base (BS) en Íllimo.
Longitud	-79.848901°	Coordenada Oeste que ubica el sitio exacto de la Estación Base (BS) en Íllimo.
Elevación del terreno	53.0 m	Altura sobre el nivel del mar del suelo donde se instalará el mástil/torre. Es fundamental para el perfil de elevación.
Altura de la antena	17.6 m	Altura a la que se instalará la antena de WiMAX (o sectorial) sobre el suelo. Este valor es clave para asegurar el despeje de la Zona de Fresnel.
Azimuth	99.39 TN 101.14MG°	Dirección horizontal en grados (respecto al Norte Verdadero - TN y Norte Magnético - MG) hacia donde debe apuntar la antena para establecer el enlace con la I.E. Señor de Sicán.
Inclinación (Tilt)	0.18°	Ángulo de inclinación vertical de la antena. Un valor muy cercano a (o ligeramente positivo/negativo) es común en enlaces terrestres, lo que indica que la antena está casi horizontal para optimizar el enlace de larga distancia.

La tabla N° 03, presenta los parámetros de emplazamiento y orientación de la Estación Base (BS) en Íllimo, disponible como entrada para la simulación radioeléctrica, registrándose las coordenadas geográficas, latitud -6.474492° y longitud -79.848901° , presentando una elevación del terreno sobre el nivel del mar de 53,0 m y una altura de la antena sobre el suelo de 17,6 m., indicadores necesarios para desarrollar el perfil topográfico, además se muestra el azimut de apuntado de 99.39° Norte Verdadero y 101.14° Norte Magnético, definiendo la dirección horizontal del haz hacia la I.E., y la inclinación de la antena de 0.18° , datos que se basan el ajuste de la cobertura y la ganancia efectiva.

Figura 7

Parámetros de emplazamiento y orientación de la estación receptora en la I.E. Señor de Sicán

(2) I.E Sr. de Sicán Sapamé_SITE	
Latitud	-6.478890°
Longitud	-79.822126°
Elevación del terreno	63.0 m
Altura de la antena	17.6 m
Azimuth	279.39 TN 281.16 MG $^\circ$
Inclinación	-0.20°

La figura N° 07, presenta las medidas georreferenciadas y de emplazamiento de la estación receptora en la I.E. Señor de Sicán (Sapamé), señalando como coordenadas, latitud -6.478890° , longitud -79.822126° , la elevación del terreno es de 63 m y la altura de la antena sobre el suelo en 10,0 m, determinándose la cota de instalación efectiva, el azimut de apuntado es de 279.39° Norte Verdadero - 281.16° Norte Magnético y como inclinación vertical en -0.20° .

Estas coordenadas geográficas de Íllimo y de la I.E. Señor de Sicán permitieron obtener la distancia precisa entre ambos extremos del enlace, obteniendo así la pérdida de espacio libre (FSPL), además de otros indicadores del link-budget, el azimut que se determinó en la I.E. Señor de Sicán es recíproco del azimut en Íllimo, registrando un aproximado de $279.39^\circ \approx 99.39^\circ + 180^\circ$, lo que muestra un adecuado apuntado y alineamiento mutuo de las antenas y establecer el enlace de microondas, además, las cotas de instalación como el de elevación del terreno más la altura de antena se integraron al perfil de elevación con el propósito de comprobar el despeje del terreno y de la primera zona de Fresnel, pudiendo garantizar la ausencia de obstrucciones importantes y condicionando el margen de desvanecimiento disponible en el diseño.

Figura 8

Vista satelital de la antena en la I.E. Señor de Sicán (Sapamé)



La tabla N° 04, presenta los parámetros de emplazamiento y orientación de la estación receptora en la I.E. Señor de Sicán (Sapamé), incluyendo las coordenadas geográficas de latitud -6.478890° y longitud -79.822126°, registra una elevación del terreno en 63 m y además una altura de la antena en 17.6 m, que definen la cota efectiva de instalación (≈ 80.6 m), también se señala un azimut de 279.39° Norte Verdadero y 281.16° Norte Magnético, presentando una inclinación vertical (tilt) de -0.20°, con esta información se realiza el trazado de la trayectoria, el cálculo de la primera zona de Fresnel, el link-budget y la comprobación del alineamiento angular con la estación base en Íllimo.

Tabla 4

Parámetros de emplazamiento y orientación de la estación receptora en la I.E. Señor de Sicán (Sapamé)

Parámetro	Valor	Función en la Tesis (Diseño WiMAX)
Latitud	-6.478890	Coordenada Sur que precisa la ubicación final del equipo receptor (Estación de Suscriptor, SS) en la I.E.
Longitud	-79.822126	Coordenada Oeste que precisa la ubicación final del equipo receptor (SS) en la I.E.
Elevación del terreno	63 m	Altura sobre el nivel del mar del punto de instalación en la I.E.
Altura de la antena	17.6 m	Altura a la que se montará la antena receptora sobre el suelo de la I.E. La altura total (63m +17.6m) es clave para el despeje de la Zona de Fresnel.
Azimuth	279.39 TN 281.16 MG	Dirección horizontal en grados (Norte Verdadero - TN) hacia la cual debe apuntarse la antena receptora para alinearse con precisión con la Estación Base en Íllimo.
Inclinación (Tilt)	-0.20°	Ángulo de inclinación vertical de la antena. Un valor ligeramente negativo indica un ligero apunte hacia abajo (o simplemente el ángulo necesario para la máxima potencia recibida).

Tabla 5

Parámetros del sistema radio utilizados en el cálculo del link-budget

Sistema de radio	
Potencia TX	26.99 dBm
Pérdida en cable TX	2.00 dB
Ganancia de antena TX	23.00 dBi
Ganancia de antena RX	23.00 dBi
Pérdida en cable RX	2.00 dB
Sensibilidad RX	-106.02 dBm

La tabla N° 05, muestra los parámetros del subsistema radio utilizados en el cálculo del link-budget, registrando como potencia de transmisión $P_{TX} = 26,99$ dBm, las pérdidas en cable de transmisión $L_{cable_TX} = 2$ dB, ganancia de antena transmisora $G_{TX}=23$ dBi, ganancia de antena receptora $G_{RX}=23$ dBi, pérdidas en cable receptor $L_{cable_RX}= 2$ dB y sensibilidad del receptor $SRX=-106,02$ dBm, indicadores que son la base del balance de enlace y determinan la potencia recibida prevista, así como el margen disponible frente a la sensibilidad, estableciendo la viabilidad energética del enlace y el margen de desvanecimiento necesario.

Tabla 6

Parámetros del sistema radio para el cálculo del link-budget

Parámetro	Valor	Unidad	Rol en la Ingeniería del Enlace
Potencia TX	26.99	dBm	Es la potencia de salida del transmisor (BS en Íllimo) antes de las pérdidas.
Pérdida en cable TX	2.00	dB	Representa la atenuación de la señal en el cable que conecta el equipo de radio y la antena. Es una pérdida que reduce la potencia transmitida.
Ganancia de antena TX	23.00	dBi	La amplificación de la señal que proporciona la antena transmisora. Es una ganancia que concentra la energía hacia la dirección de la receptora.
Ganancia de antena RX	23.00	dBi	La amplificación de la señal que proporciona la antena receptora en la I.E.
Pérdida en cable RX	2.00	dB	La atenuación en el cable que conecta la antena receptora y el equipo de radio en la I.E. Es una pérdida que reduce la potencia recibida.
Sensibilidad RX	-106.02	dBm	La mínima potencia que el receptor necesita recibir para demodular correctamente la señal y garantizar el <i>throughput</i> deseado. Este es el valor de referencia de tu Presupuesto de Enlace.

En la tabla N° 06, muestra los valores del subsistema radio usados en el análisis del link-budget del enlace WiMAX, mostrando que la potencia de transmisión $P_{TX}=26,99$ dBm; las pérdidas en el cable transmisor y receptor $L_{cable_TX} = L_{cable_RX} = 2$ dB; la ganancia de las antenas transmisora y receptora $G_{TX}=G_{RX}=23$ dBi; y la sensibilidad del receptor $S_{RX}=-106,02$ dBm, logrando estimar la potencia recibida y el margen disponible frente a la sensibilidad, por lo tanto también el margen de desvanecimiento garantizando la disponibilidad y el throughput del enlace. Con estos valores, puedes calcular la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP) y la Potencia Recibida (PR).

i. Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP)

La EIRP es la potencia efectiva con la que la señal sale de la antena transmisora.

$$EIRP (dBm) = Potencia Tx - Pérdida en cable TX + Ganancia de antena TX$$

$$EIRP (dBm) = 26,99 dBm - 2.00 dB + 23.00dBi = 47.99dBm$$

ii. Ecuación General del Enlace

El resultado final de tu tesis se obtendrá al aplicar todos estos valores a la ecuación de potencia recibida:

$$PR = EIRP - FSPL + Ganancia RX - Pérdida en cable RX$$

Donde:

FSPL (Pérdida de Espacio Libre) es la atenuación de la señal en el aire.

Margen de Desvanecimiento (M):

$$M(dB)=PR-Sensibilidad Rx$$

Tabla 7

Pérdidas por propagación calculadas (Radio Mobile) — valores en dB

	Propagation
Pérdida en espacio libre	117.24 dB
Pérdida por obstrucción	-4.69 dB
Pérdida por bosque	0.00 dB
Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida estadística	41.98 dB
Pérdida total	154.53 dB

La tabla N° 07, muestra las pérdidas por propagación, como son la pérdida en espacio libre (FSPL) = 117.24 dB, el ajuste por obstrucción = -4.69 dB, las pérdidas por bosque y urbanización = 0.00 dB, la pérdida estadística = 41.98 dB, y la pérdida total de propagación = 154.53 dB, valores que representan el componente de atenuación del trayecto radioeléctrico.

Tabla 8

Pérdidas por propagación y margen estadístico (simulación Radio Mobile) - valores en dB

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Pérdida en espacio libre (FSPL)	117.24	dB	Es la atenuación que experimenta la señal causado por la distancia y la frecuencia, tomando condiciones ideales sin obstáculos.
Pérdida por obstrucción	-4.69	dB	Un valor negativo es inusual en la simulación, significa una ganancia por path diversity o un efecto de reflexión favorable, o podría que el <i>software</i> compensa ligeramente una subida en el terreno que, por la altura de las antenas, actuando como una ayuda en la propagación (efecto de borde), generalmente es ignorado o tratado como cero si la LoS es despejada.
Pérdida por bosque	0.00	dB	Indica que no existe vegetación densa significativa a lo largo del camino que cause atenuación.
Pérdida por urbanización	0.00	dB	Muestra que el enlace no atraviesa por áreas urbanas densas que generen difracción o reflexión importante.
Pérdida estadística	41.98	dB	Describe el Margen de Desvanecimiento (Fade Margin) , es el margen de seguridad que compensa los fenómenos atmosféricos (lluvia, neblina, <i>fading</i>)..
Pérdida total	154.53	dB	Describe la suma de todas las pérdidas del canal, FSPL + Pérdida por Obstrucción + Otras Pérdidas, valor que representa la atenuación total del canal que debes usar en tu cálculo de Potencia Recibida (PR).

La tabla N° 08, presenta el desglose de pérdidas por propagación calculadas en la simulación radioeléctrica: pérdida en espacio libre (FSPL) = 117,24 dB; ajuste por obstrucción = -4,69 dB; pérdidas por bosque y urbanización = 0,00 dB; pérdida estadística = 41,98 dB; y pérdida total de propagación = 154,53 dB. En términos prácticos, la FSPL constituye la atenuación principal por distancia y frecuencia; el valor negativo en obstrucción es atípico y debe verificarse en la configuración del modelo (puede deberse a correcciones por reflexión o path diversity); los ceros en bosque/urbanización confirman un entorno rural sin vegetación densa ni difracciones urbanas relevantes; la pérdida estadística corresponde al margen de desvanecimiento requerido por la herramienta para alcanzar la disponibilidad objetivo. La pérdida total es la componente de propagación que se incorpora al cálculo del link-budget.

3.1.7 Cálculo del link-budget y margen de desvanecimiento

A partir de los parámetros del sistema radio y del término de propagación calculado, se procede al cálculo de la potencia recibida y del margen de desvanecimiento, siguiendo la formulación estándar del link-budget.

Datos:

- EIRP = 47,99 dBm
- Ganancia antena receptora $G_{RX} = 23,00$ dBi
- Pérdida en cable receptor $L_{cable_RX} = 2,00$ dB
- Sensibilidad del receptor $S_{RX} = -106,02$ dBm
- Pérdida total de propagación $L_{prop} = 154,53$ dB

✓ **Cálculo de la potencia recibida (PR)**

$$PR (dBm) = EIRP - L_{prop} + G_{RX} - L_{cable_RX}$$

Sustituyendo:

$$P_R = 47,99 - 154,53 + 23,00 - 2,00 \approx -85,55 \text{ dBm}$$

✓ **Cálculo del margen de desvanecimiento (M)**

El margen de desvanecimiento se define como la diferencia entre la potencia recibida y la sensibilidad mínima del receptor:

$$M (dB) = P_R - S_{RX} = -85,55 - (-106,02) = 20,47 \text{ dB}$$

✓ **Interpretación de resultados**

El margen obtenido, $M \approx 20,47 \text{ dBm}$, es amplio y robusto para un enlace WiMAX, presentando seguridad y holgura ante atenuaciones adicionales como la lluvia, el efecto de vegetación, las pequeñas desalineaciones, por otro lado la existencia de un margen de 20,47 dB no garantiza una disponibilidad cuantificada; es importante determinar las pérdidas producidas por la lluvia y otros fenómenos y además el throughput efectivo depende también de la relación SNR en los puntos de cobertura y de la configuración de QoS de la red.

Tabla 9

Desempeño del enlace radioeléctrico simulado (Radio Mobile)

Performance	
Distance	2.998 km
Precisión	10.0 m
Frecuencia	5825.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente	62.946 W
Ganancia del sistema	175.01 dB
Fiabilidad requerida	99.900 %
Señ recibida	-85.55 dBm
Señ recibida	11.82 μ V
Márgen de escucha	20.47 dB

La tabla N° 09, presenta el desempeño del enlace de la simulación radioeléctrica, describe la distancia del enlace ≈ 2.998 km, la precisión del modelo 10 m, la frecuencia de operación 5825 MHz, la EIRP equivalente es de 62.946 W, y la ganancia del sistema en 175.01 dB, también indica la fiabilidad requerida en 99.900 %, la potencia recibida calculada es -85.55 dBm (equivalente a 11.82 μ V) y el margen de desvanecimiento en 20.47 dB, indicadores que garantizan la viabilidad energética y la amplitud operacional del enlace al cumplir con los requisitos de disponibilidad y throughput definidos en la investigación.

Tabla 10

Parámetros de desempeño del enlace Estación Base en Íllimo y la estación base I.E. Señor de Sicán.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Distance	2.998	Km	La distancia real del enlace entre la Estación Base en Íllimo y la estación I.E. Señor de Sicán.
Frecuencia	5825.000	MHz	La frecuencia de operación.
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente	62.946	W	La potencia efectiva con la que se transmite la señal desde Íllimo, ya considerando la ganancia de la antena y las pérdidas.
Fiabilidad requerida	99.9	%	Significa que se espera que el enlace esté operativo en el tiempo.
Señal recibida (Potencia)	-85.55	dBm	La Potencia Recibida en la simulada por el <i>software</i> .
Márgen de escucha (Fade Margin)	20.47	dB	Es el Margen de Desvanecimiento calculado. Confirma que la potencia recibida supera la sensibilidad del receptor.

La tabla N° 10, presenta los parámetros del enlace de la estación base en Íllimo y la estación base I.E. Señor de Sicán, simulada en Radio Mobile, mostrando que la distancia del trayecto \approx

2.998 km, la frecuencia de operación 5825 MHz, EIRP equivalente 62.946 W, y la fiabilidad objetivo 99.9%, además se puede observar que la potencia recibida calculada es de -85.55 dBm y el margen de desvanecimiento (fade margin) resultante es de 20.47 dB, lo que garantiza la viabilidad energética del enlace y la holgura disponible para afrontar atenuaciones adicionales.

Tabla 11

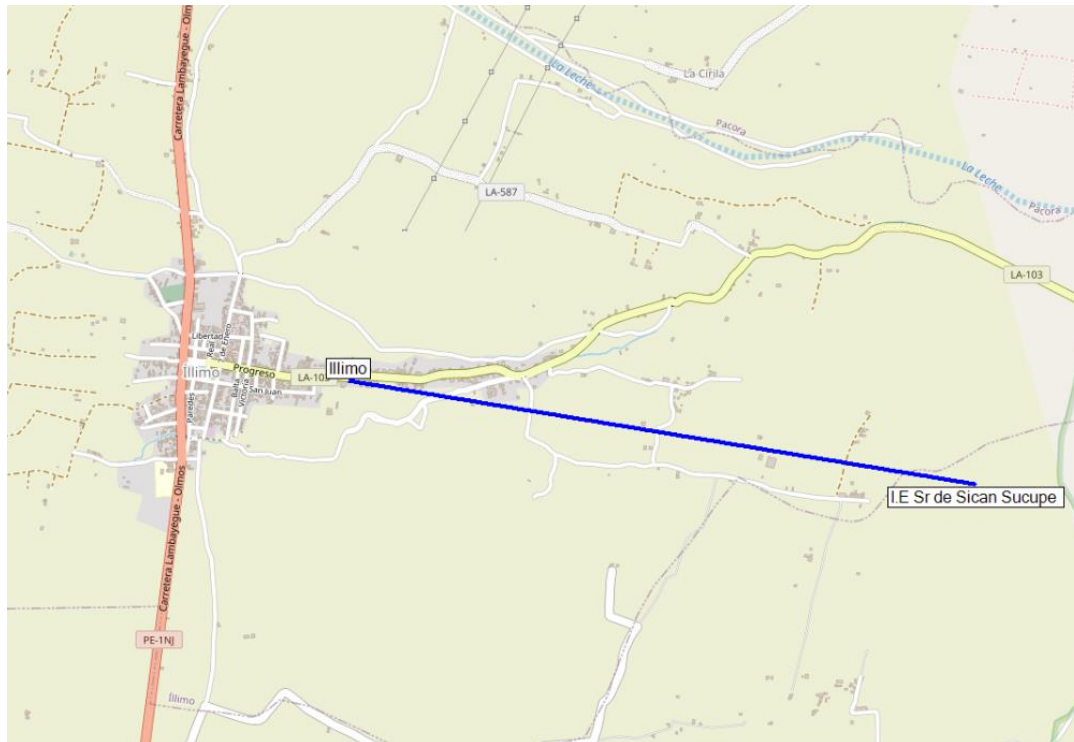
Resumen del link-budget del enlace WiMAX

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Distancia del Enlace	2.998	Km	Distancia favorable para un enlace de microondas en la banda de 5.8Ghz.
Ancho de Banda Requerido	75.4	Mbps	Cálculo que cubre la demanda simultánea de estudiantes y docentes.
Potencia Recibida	-85.55	dBm	Potencia medida y que supera el nivel mínimo necesario.
Sensibilidad del Receptor	-106.02	dBm	Mínima potencia requerida para garantizar el <i>throughput</i> deseado.
Margen de Desvanecimiento	20.47	dB	Indica un enlace robusto y confiable y superior al margen recomendado .
Fiabilidad Requerida	99.9	%	El enlace está diseñado para operar con alta disponibilidad, esencial para un servicio educativo.

La tabla N° 11, sintetiza los resultados del enlace diseñado, muestra que la distancia del trayecto es de 2.998 km, presenta un ancho de banda requerido de 75.4 Mbps (valor calculado con margen de contingencia), también se muestra una potencia recibida estimada en -85.55 dBm frente a la sensibilidad del receptor -106.02 dBm, y también muestra un margen de desvanecimiento de 20.47 dB.

Figura 9

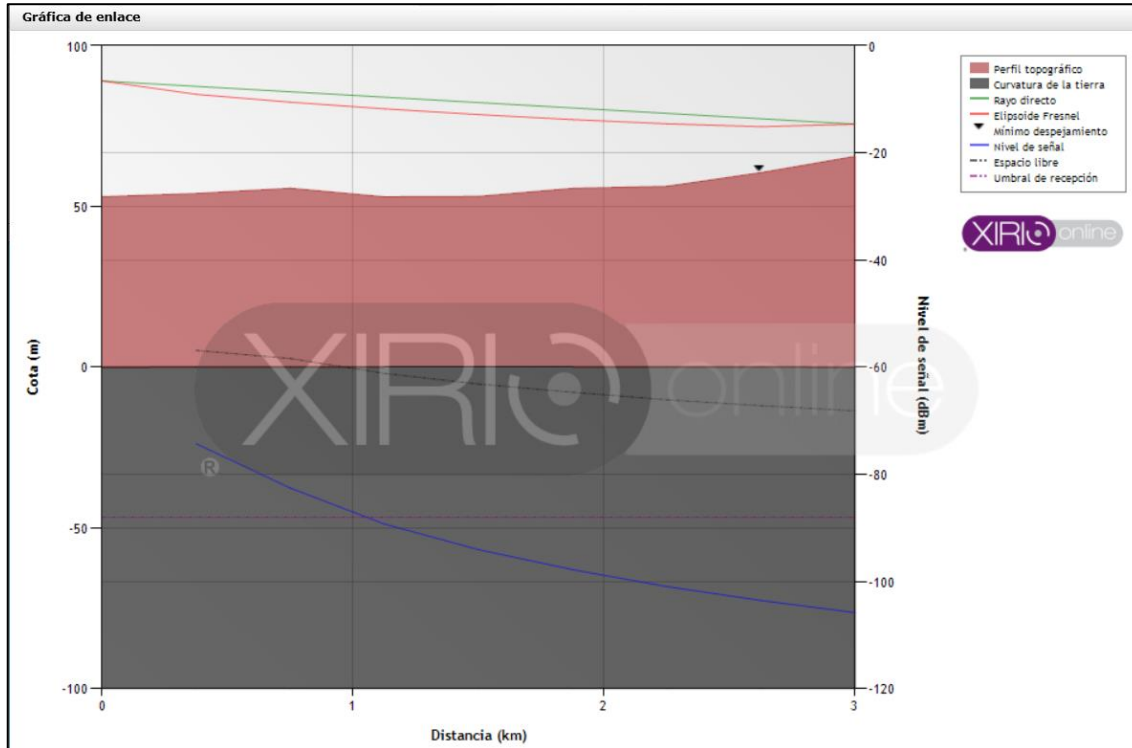
Trazado topográfico del enlace radioeléctrico entre Íllimo y la I.E. Señor de Sicán (Sapamé)



La figura N° 09, presenta la vista del trazado topográfico usado en el análisis del enlace radioeléctrico entre la estación base en Íllimo y la I.E. Señor de Sicán (Sapamé), la línea azul describe el recorrido directo del enlace considerado en los modelos de simulación, también se identifican en el mapa centros poblados, carreteras importantes y elementos hidrográficos permitiendo entender el trayecto, este mapa representa la base para extraer el perfil longitudinal, calcular la distancia real del enlace calculado en 2.998 km y ubicar puntos para el estudio de visibilidad y de site-survey.

Figura 10

Perfil longitudinal del enlace y evaluación de Fresnel y nivel de señal (Xirio)



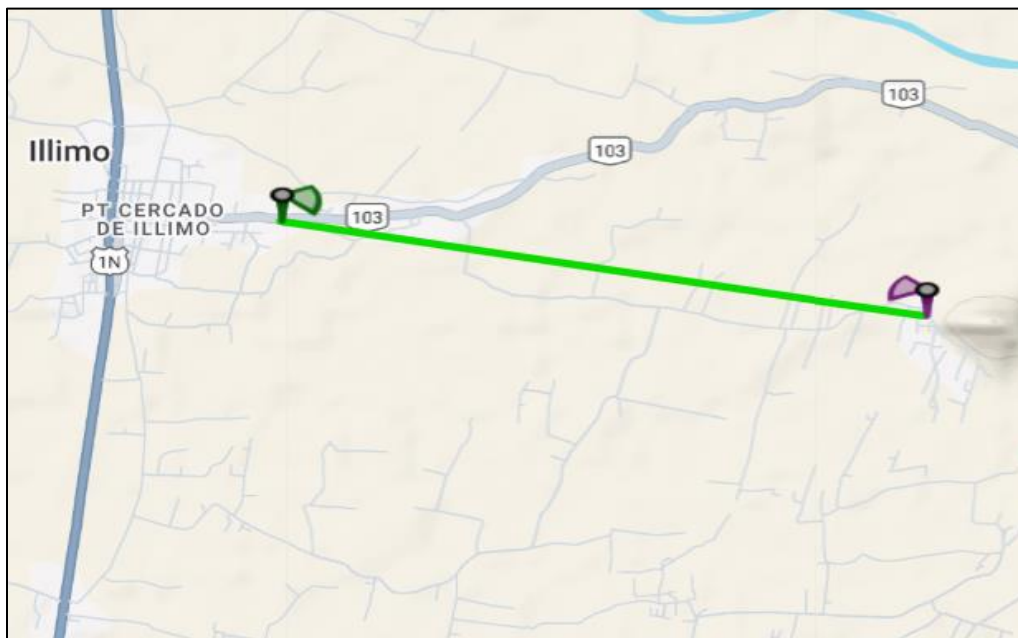
La figura N° 10, visualiza la sección longitudinal del enlace la cual fue lograda a través de Xirio, mediante el perfil topográfico (eje vertical en metros) e integrándolo con indicadores de propagación y rendimiento (eje derecho en dB/dBm) a lo largo del recorrido (km). En la figura se muestra, las características del terreno (área coloreada), la línea de vista y la trayectoria geométrica, las elipses de la primera zona de Fresnel, el nivel de la señal estimada (curva azul) y la referencia de umbral de recepción, se logra identificar trechos con reducción de despeje de Fresnel y comparar la potencia recibida frente a la sensibilidad del equipo, proporcionando el

margen de desvanecimiento y determinar las acciones de corrección (aumento de altura, realineamiento o repetidor intermedio).

La curva azul (Nivel de Señal) muestra la disminución de potencia a lo largo de la trayectoria radioeléctrica, iniciando en -70 dBm y disminuyendo hasta aproximadamente -85 dBm a los 3 km, coincidiendo con la potencia recibida P_R la cual fue identificada en -85,55 dBm, reflejando la integración de pérdidas por espacio libre y demás atenuaciones de propagación, la línea morada (Umbral de Recepción) muestra la sensibilidad del receptor señalada con el valor de -106,02 dBm, mostrando el nivel mínimo necesario para demodular la señal correctamente, la distancia entre la curva azul y la línea morada es el margen de desvanecimiento con un valor de aproximadamente ~20,47 dB, que mide la disponibilidad frente a atenuaciones adicionales y describe la disponibilidad y fortaleza del servicio.

Figura 11

Trazado en planta del enlace radioeléctrico entre Íllimo y la I.E. Señor de Sicán



La figura N° 11, presenta el trazado topográfico empleado en el enlace radioeléctrico entre la estación base en Íllimo (extremo izquierdo) y la I.E. Señor de Sicán (extremo derecho), la línea verde marca la trayectoria tomada en cuenta para la simulación (dirección y alineamiento del haz); los iconos marcan los emplazamientos de la estación emisora y del receptor. El mapa describe la ruta a la red vial local y la orografía circundante, y vale como referencia para elegir puntos de muestreo y verificar la visibilidad en el site-survey.

Tabla 12

Cota y nivel de señal en puntos muestreados a lo largo de la trayectoria - 10MHz - 5.8Ghz

Distancia (km)	Cota (m)	Nivel de señal (dBm)
0	53.04	---
0.375	54	-74.31
0.75	55.58	-82.58
1.126	52.87	-89.29
1.501	53	-94.08
1.876	55.54	-97.79
2.251	56.18	-100.96
2.626	60.47	-103.56
3.001	65.6	-105.83

La tabla N° 12, presenta el resumen de métricas de enlace a lo largo de la trayectoria, en la primera columna aparece la distancia acumulada desde 0 a 3.001 km, en la segunda la columna se muestra la cota del terreno en cada punto desde ≈ 53 a 65.6 m y en la tercera columna se observa el nivel de la señal estimado (dBm) en esos puntos, la curva muestra una atenuación progresiva: desde -74.31 dBm a 0.375 km hasta -105.83 dBm a 3.001 km, lo que muestra una degradación continua de la potencia relacionada con el aumento de la distancia y la orografía, es importante señalar que, el valor final se aproxima al umbral de sensibilidad del receptor, el cual está indicado

en ≈ -106.02 dBm, teniendo que verificar coherencia con el link-budget y, de ser necesario, considerar acciones correctoras como ajuste de altura, realineamiento o aumento de ganancia.

Tabla 13

Parámetros del enlace: distancia, cota y nivel de señal

Parámetro	Descripción
Distancia (km)	Representa la ubicación de puntos intermedios a lo largo del trayecto del enlace, desde el punto de transmisión (0 km) hasta el receptor (3.001 km).
Cota (m)	Altura del terreno sobre el nivel del mar en cada punto intermedio. Refleja la topografía del enlace.
Nivel de señal (dBm)	Potencia de la señal recibida en decibelios-milivatios.

La tabla N° 13, muestra los parámetros empleados en el enlace, se observa a la distancia en km, la ubicación de puntos a lo largo de la trayectoria entre transmisor y receptor; la Cota en metros, también se muestra a la altitud del terreno sobre el nivel del mar en cada punto, se observa también la topografía del trazado; y el Nivel de señal descrita en dBm, también se observa a la potencia recibida expresada en decibelios - milivatios, donde valores más negativos equivalen a una señal más débil.

✓ **Distancia del enlace:**

El enlace presenta una longitud total de 3.001 km, encontrándose dentro de los límites apropiados para el trabajo con WiMAX, siempre que exista línea de vista (LoS) o condiciones tolerables de propagación.

✓ **Topografía del terreno (Cota):**

La altitud varía entre los 52.87 m y los 65.6 m, se muestra un terreno parcialmente ondulado, esto genera obstáculos, perturbando la calidad de la señal, en especial si no se cuenta con torres que eleven adecuadamente las antenas transmisoras y receptoras.

✓ **Nivel de señal:**

- En el tramo inicial al 0.375 km, el nivel de señal es de -74.31 dBm, siendo aceptable para una conexión WiMAX estable.
- A medida que aumenta la distancia, la señal se atenúa gradualmente, pasando por:
 - -82.58 dBm (0.75 km), aún se encuentra dentro del umbral operativo.
 - -89.29 dBm (1.126 km), presenta una señal débil, posible pérdida de calidad.
 - -94.08 dBm a -97.79 dBm (1.5 km – 1.87 km), mantiene un riesgo de degradación de servicio o pérdida de conexión.
 - A partir de 2.25 km, los niveles de señal descienden por debajo de -100 dBm, logrando un mínimo de -105.83 dBm al final del enlace a los 3.001 km, a ese nivel se considera no operativo para WiMAX, ya que el umbral de sensibilidad mínima suele ser entre -95 dBm y -100 dBm, dependiendo del tipo de equipo y modulación utilizada.
- La simulación muestra una señal demasiado débil para la segunda mitad del trayecto, indicando que la conexión directa sin repetidores ni torres elevadas no es viable bajo las condiciones actuales.

- La pérdida por propagación, contiguo con una topografía no completamente favorable, indica la necesidad de implementar acciones correctivas, como:
 - Integrar antenas de mayor ganancia.
 - Elevación de torres para garantizar la línea de vista (LoS).
 - Implementar un repetidor intermedio o una estación base secundaria.
 - Optimizar el diseño de la red para reducir la distancia total del enlace.
- Reformular el perfil de enlace, teniendo en cuenta la instalación de torres intermedias, para mejorar la visibilidad y evitar pérdidas por obstrucciones.
- Verificar de que el enlace cumpla con un margen de desvanecimiento mínimo de 10 a 20 dB con el propósito de garantizar la estabilidad ante interferencias o condiciones atmosféricas adversas.

Tabla 14

Informe de enlace muestreado a lo largo de la trayectoria - 20Mhz - 5.8Ghz

Distancia (km)	Cota (m)	Nivel de señal (dBm)
0	53.04	---
0.375	54	-49.37
0.75	55.58	-62.63
1.126	52.87	-71.01
1.501	53	-76.8
1.876	55.54	-81.23
2.251	56.18	-84.95
2.626	60.47	-87.99
3.001	65.61	-90.63

La tabla N° 14, muestra indicadores del enlace muestreado a lo largo de la trayectoria, en la primera columna aparece la distancia acumulada, registrada desde 0 km a 3.001 km, en la segunda columna podemos observar, la cota del terreno en cada punto desde ≈ 53 a 65.6 m y en la

tercera columna vemos el nivel de señal descrito en dBm, la información describen una atenuación gradual de la potencia recibida con la distancia desde -49.37 dBm a 0.375 km hasta -90.63 dBm a 3.001 km, reflejando el efecto integrando la propagación y la orografía sobre el enlace, indicadores que evalúan la cobertura por tramos y verifican la suficiencia del margen frente a la sensibilidad del receptor.

Tabla 15

Informe de enlace muestreado a lo largo de la trayectoria - 40Mhz - 5.8Ghz

Distancia (km)	Cota (m)	Nivel de señal (dBm)
0	53.04	---
0.375	54	-41.91
0.75	55.58	-55.17
1.126	52.87	-63.54
1.501	53	-69.34
1.876	55.54	-73.77
2.251	56.18	-77.49
2.626	60.47	-80.53
3.001	65.61	-83.17

La tabla N° 15, muestra indicadores del enlace muestreado a lo largo de la trayectoria, en la primera columna aparece la distancia acumulada, registrada desde 0 km a 3.001 km, en la segunda columna podemos observar, la cota del terreno en cada punto desde ≈53 a 65.6 m y en la tercera columna vemos el nivel de señal descrito en dBm, la información describen una atenuación gradual de la potencia recibida con la distancia desde -41.91 dBm a 0.375 km hasta -83.17 dBm a 3.001 km, reflejando los efectos combinados de la propagación y la orografía del terreno sobre el enlace. El valor final de potencia recibida se encuentra ampliamente por encima del umbral de sensibilidad del receptor, proporcionando un margen de enlace adecuado que garantiza la

estabilidad, confiabilidad y calidad de la comunicación, incluso ante variaciones del canal o interferencias moderadas.

El enlace propuesto, abarca una distancia de 3,001 km y cruza un terreno cuyas cotas varían entre 52,87 m.s.n.m. a 65,6 m.s.n.m., datos que muestran un relieve mayormente plano con ligeras oscilaciones altimétricas, condiciones favorables para el despliegue de un enlace inalámbrico con características LOS (línea de vista), minimizando la necesidad de repetidores intermedios.

3.1.8 Cálculo de la Capacidad del Canal:

I. Ruido Térmico

$$N = -174 \frac{dBm}{Hz} + 10 \log_{10}(B) + NF$$
$$N = -174 + 76.02 + 5$$
$$N = -92.98 \text{ dBm}$$

- N = Ruido térmico
- B = Ancho de banda (Hz)
- NF = *Noise Figure* del receptor

II. Relación señal-ruido

$$SNR(dB) = P_S - N$$
$$SNR(dB) = (-85.55) - (-92.98)$$
$$SNR(dB) = 7.43 \text{ dB}$$

Conversión de SNR de dB a forma lineal

$$SNR_{lineal} = 10^{\frac{SNR(dB)}{10}}$$

$$SNR_{lineal} = 5.54$$

III.- Capacidad del canal

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR)$$
$$C = 40\,000\,000 \cdot \log_2(1 + 5.44)$$
$$c = 40\,000\,000 (2.71)$$
$$c = 108.4 \text{ Mbps}$$

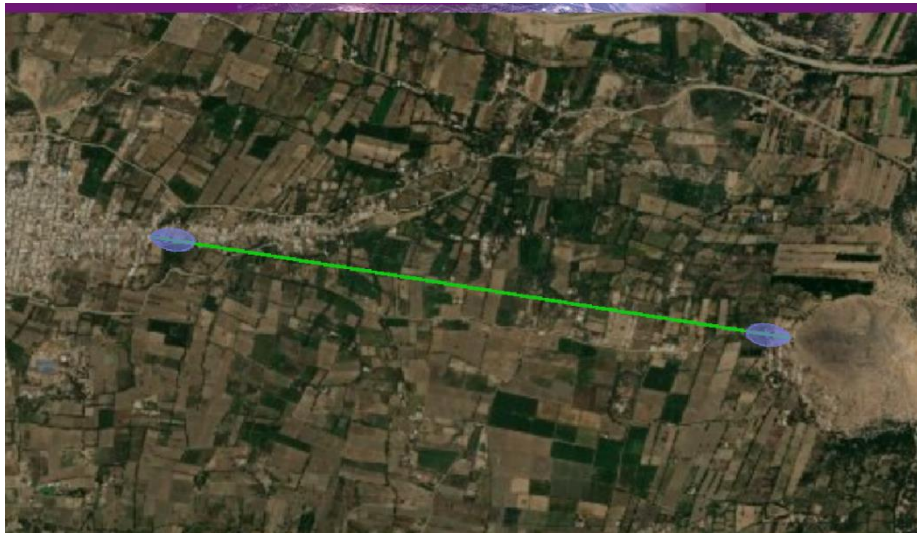
- B = Ancho de banda (Hz)
- SNR = Relación señal-ruido (en forma lineal, no en dB)

El nivel de señal (potencia recibida) establece la calidad y estabilidad del enlace inalámbrico, los datos obtenidos van entre -40 dBm y -70 dBm, mostrando una señal fuerte, permitiendo modulaciones de alta eficacia con elevado throughput, entre los -70 dBm y los -85 dBm la señal es buena y apropiada para servicios sensibles a retardo, además los rangos desde -85 dBm a -95 dBm trabajan en el margen, aunque son funcionales, reflejando una menor modulación, mostrando más retransmisiones y posible degradación de throughput y latencia, conviniendo optimizar alineamiento y ganancia, con valores menores de -95 dBm, el enlace es críticamente inestable y demanda acciones correctoras como la implementación de antenas de mayor prestaciones, elevación de mástiles, aumentar EIRP o el uso de repetidores.

La simulación muestra que, los tramos iniciales hasta aproximadamente los 1,126 km presentan niveles de señal óptimos, observando valores superiores a -71 dBm., a partir de los 1,500 km la potencia se degrada de manera progresiva, no obstante, permanece funcional a lo largo de la trayectoria, logrando un -90,63 dBm al final, el nivel de señal nos muestra que el enlace es técnicamente viable bajo el estándar IEEE 802.16, no se lograron detectar obstrucciones críticas ni atenuaciones excesivas que comprometan la calidad del enlace, pudiendo mantener el ancho de banda requerido para la I.E. Señor de Sicán, debemos asegurar el uso de equipos adecuados como antenas direccionales, radios de media - alta potencia y estructura de soporte adecuadas, con torres de altura moderada (15–20 m) con el propósito de mejorar la línea de vista y poder reducir pérdidas.

Figura 12

Trazado del enlace radioeléctrico entre Íllimo y la I.E. Señor de Sicán (Vista satelital)



La figura N° 12, describe la vista satelital del trazado planimétrico del enlace entre la estación base en Íllimo (izquierda) y la estación base en la I.E. Señor de Sicán (derecha), la línea verde muestra la trayectoria estimada para la modelación radioeléctrica, en los extremos señalan las posiciones de las antenas o estaciones, la estructura espacial facilita poder evaluar el entorno como el uso del suelo, las manchas de cultivo y las áreas despejadas, además se logra identificar de forma visual los posibles obstáculos, contribuyendo con un contexto geográfico a los análisis de visibilidad y al perfil longitudinal y cálculo de Fresnel.

Al analizar la viabilidad del enlace inalámbrico según el estándar IEEE 802.16, se alineó la antena transmisora en la estación base en Íllimo y la antena receptora en la estación base en la I.E. Señor de Sicán, optimización que incrementó la eficiencia de propagación y redujo las pérdidas asociadas a la desalineación angular.

3.1.9 Parámetros de alineamiento:

La tabla N° 15, muestra los parámetros angulares de apuntado para el enlace, con el azimut y la inclinación de la antena en el nodo transmisor de la estación base en Íllimo y en el receptor en la estación base en la I.E. Señor de Sicán, el transmisor tiene un azimut de $99,33^\circ$ con una inclinación de $+0,26^\circ$, mientras que la antena receptora posee un azimut de $297,32^\circ$ y una inclinación $-0,26^\circ$, datos que aseguran el alineamiento recíproco de las antenas (diferencia de $\sim 180^\circ$ en azimut), escenarios que benefician la máxima ganancia dirigida y minimizan pérdidas por desalineación.

Tabla 15

Parámetros de alineamiento del enlace

Parámetro	Transmisor (Nodo Principal)	Receptor (I.E. Señor de Sicán)
Azimut	99.33°	297.32°
Inclinación	$+0.26^\circ$	-0.26°

A. Descripción técnica

El azimut precisa la orientación horizontal de la antena respecto al norte geográfico, en el diseño de la propuesta de esta investigación, el transmisor apunta hacia el este - sureste $99,33^\circ$ y el receptor hacia el noroeste $297,32^\circ$, mostrando un alineamiento recíproco con un valor aproximado de $\approx 180^\circ$ de diferencia, asegurando una línea de vista (LOS) entre ambos extremos del enlace.

La inclinación. lo determina el ángulo vertical de la antena, se aplicó una leve inclinación descendente en el transmisor con $+0,26^\circ$ y compensada por una inclinación opuesta en el receptor con $-0,26^\circ$, estas ligeras variaciones verticales concentran el lóbulo principal del haz sobre el eje del enlace, disminuyendo la radiación fuera de objetivo y contribuyendo a mejorar la relación señal - ruido (SNR) en el punto de recepción.

La optimización angular simultánea (azimut e inclinación) garantiza un acoplamiento eficiente del enlace, característica esencial en zonas rurales como Sapamé, aportando beneficios operativos como el de mantener la señal dentro de los rangos operativos previstos, reduciendo pérdidas por desalineamiento y dispersión y ofrece también a una cobertura estable y fiable para la institución educativa, incluso ante variaciones ambientales o climáticas.

B. Análisis detallado del rendimiento del enlace inalámbrico basado con WIMAX

El diseño del enlace inalámbrico bajo el estándar IEEE 802.16 - WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), contiene un análisis detallado del rendimiento del sistema con el fin de asegurar niveles correctos de fiabilidad, eficiencia espectral y cobertura.

- **La distancia** entre transmisor y receptor del enlace es de 2,998 km, medida considera moderada que bajo condiciones topográficas propicias, se encuentra en el rango operativo apropiado para enlaces LOS en la banda de 5,8 GHz; sin embargo, su viabilidad dependerá del despeje de la primera zona de Fresnel y de la ausencia de obstrucciones importantes.

- **La precisión** es de 10,0 m, indicando el margen de error asociado a la medición de la distancia empleada en el análisis topográfico y de propagación, resulta adecuado para evaluaciones técnicas preliminares simuladas y para modelaciones iniciales del enlace.
- **La frecuencia de operación** seleccionada es 5825.000 MHz (banda de 5,8 GHz), brinda ventajas técnicas del sub – banda, que facilitan mayores capacidades y soportan esquemas de modulación de orden elevado, además presentan niveles de interferencia comparativamente bajos en zona rurales, aunque operar en 5,8 GHz implica mayores pérdidas por espacio libre y mayor sensibilidad a la atenuación por lluvia en relación a bandas inferiores y una menor tolerancia a escenarios NLOS.
- **Potencia Isotrópica Equivalente Radiada (EIRP)** es de 62,946 W, aproximadamente 48 dBm, La EIRP describe la potencia efectiva irradiada en la dirección de máxima ganancia, integrando la potencia de transmisión, las pérdidas en la línea y la ganancia de la antena, el valor de 63 W indica un nivel de radiación elevado y debe ser ajustado conforme a la normativa local para impedir interferencias con sistemas adyacentes.
- **La Ganancia total del sistema** detectada es de 175,01 dB, que refleja la diferencia entre la potencia isotrópica efectiva irradiada (EIRP) y la sensibilidad mínima del receptor posteriormente de considerar las pérdidas de propagación, obstrucciones y otros atenuantes del trayecto, este indicador describe la holgura disponible del enlace con un valor de 175 dB puede

tolerar degradaciones ambientales como lluvia, vegetación y pequeñas desalineaciones, manteniendo la integridad de la señal.

- **Fiabilidad requerida** indica un 99.900 %, reflejando que el sistema permanecerá disponible aproximadamente el 99,9 % del tiempo a lo largo de un año, este valor indica que se espera una caída acumulada del enlace de aproximadamente 08,76 horas al año, garantizando continuidad funcional en la mayor parte del tiempo.
- La señal recibida estimada en el receptor es -85,55 dBm. considerándose técnicamente correcto para operar con esquemas de modulación de orden elevado como 64-QAM, siempre que la relación señal-ruido (SNR) sea la apropiada, al integrar estos datos con los indicadores de sensibilidad del receptor registrado en -106,02 dBm y con el margen de desvanecimiento calculado en $\approx 20,47$ dB, demuestra una holgura operacional suficiente para afrontar atenuaciones adicionales por lluvia o pequeñas desalineaciones.
- **El margen de desvanecimiento (fade margin)** calculado en 20,47 dB., que es la diferencia entre la potencia recibida y la sensibilidad mínima del receptor, ósea, el margen de atenuación adicional que el enlace puede soportar antes de perder operatividad, este valor de 20,47 dB se brinda holgura suficiente para afrontar atenuaciones por lluvia intensa, interferencias o obstrucciones temporales sin entorpecer el servicio.

3.2 Discusión

Los resultados exponen que el dimensionamiento del sistema propuesto garantiza cumplir con la demanda estimada de la I.E. Señor de Sicán, con un requerimiento aproximado de 75,4 Mbps, procedente de la evaluación de usuarios simultáneos y la aplicación de los factores de corrección; este valor fortalece la recomendación de un backhaul de al menos 150/100 Mbps y con capacidad cercana a 200 Mbps.

La simulación radioeléctrica realizada mediante los softwares Xirio y Radio Mobile, garantiza la factibilidad técnica del enlace bajo el estándar IEEE 802.16 al integrar topografía, parámetros de antena y pérdidas de propagación, permitiendo identificar trayectos críticos y ajustes RF necesarios.

El análisis brinda un link-budget que asegura una potencia recibida de $-85,55$ dBm y un margen de desvanecimiento de $20,47$ dB, mostrando holgura suficiente ante atenuaciones atmosféricas y pequeñas desalineaciones, estos resultados concuerdan con estudios previos que muestran la viabilidad de WiMAX en zonas rurales cuando la planificación y la configuración RF son correctas.

4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La revisión de casos de estudio previos y alternativas (WiMAX, LTE rural, enlaces satelitales, TVWS, etc.) evidenció que las redes WiMAX han logrado reducir la brecha digital en comunidades alejadas en zonas rurales, al ofrecer cobertura de banda ancha, satisfaciendo la necesidad local de conectividad educativa sin incurrir en los costos elevados de tendido de fibra óptica y con adaptabilidad a la topografía rural.
- Haciendo uso de herramientas especializadas como Xirio y Radio Mobile, permitieron replicar fielmente las condiciones topográficas y ambientales de Sapamé, señalando la eficiencia de la solución propuesta, se modeló el enlace inalámbrico entre Íllimo y la I.E. Señor de Sicán, tomando en cuenta el perfil de elevación real, vegetación y otros factores de atenuación, concluyendo en que la red WiMAX diseñada puede garantizar el throughput requerido de ≈ 75 Mbps, con una potencia recibida en torno a -85 dBm en el receptor y un margen de desvanecimiento superior a 20 dB.
- Se concluye que el sistema de comunicación basado en el estándar IEEE 802.16 - WiMAX con enlace de microondas punto a punto es la alternativa óptima para Sapamé, al cumplir con criterios de factibilidad técnica y adaptabilidad geográfica, WiMAX ofrece velocidades de

conexión adecuadas para aplicaciones educativas, garantizando conectividad confiable al caserío Sapamé, contribuyendo a cerrar la brecha digital en la comunidad de Sapame.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar una planificación rigurosa, que permite ubicar las antenas a la altura óptima y en la posición adecuada, que garantice la no existan de obstáculos que degraden la señal, asegurando que el diseño teórico se traduzca en un rendimiento real.
- Se recomienda sobredimensionar tanto el ancho de banda del enlace como los márgenes de seguridad radioeléctricos para futuras implementaciones, con el propósito de garantiza que la red pueda absorber picos de uso, crecimiento en el número de usuarios o servicios adicionales sin degradar la calidad, proporcionando adaptabilidad, flexibilidad y solidez ante condiciones adversas.
- Para garantizar la sostenibilidad del sistema se recomienda, establecer un plan de mantenimiento preventivo periódico y capacitación técnica a personal local, es aconsejable programar inspecciones trimestrales en el alineamiento de antenas, estado de cables, conectores y equipos activos, así como monitorear continuamente la calidad de la señal y el tráfico mediante herramientas de gestión remota.
- Se recomienda, formar a un responsable técnico de la comunidad o de la institución educativa, en operaciones básicas de la red como reorientar una antena, reiniciar equipos o diagnosticar problemas comunes, de modo que puedan resolverse incidencias menores rápidamente in situ, con el propósito de reducir tiempos de inactividad y aseguran que la inversión en conectividad mantenga su impacto educativo a largo plazo.

5 REFERENCIAS

- Aanandaram, V., & Deepalakshmi, P. (2024). Blockchain-based Digital Identity for Secure Authentication of IoT Devices In 5G Networks. *IEEE Int. Conf. Intell. Techniques Control, Optim. Signal Process., INCOS - Proc. 2024 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing, INCOS 2024 - Proceedings*. Scopus. <https://doi.org/10.1109/INCOS59338.2024.10527739>
- Ahmed, A. H., Hicks, S., Riegler, M. A., & Elmokashfi, A. (2021). Predicting High Delays in Mobile Broadband Networks. *IEEE Access*, 9, 168999-169013. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3138695>
- Almeida-Correa, D. (2022). *Diseño e implementación de un sistema de localización y rastreo GPS de lanchas pesqueras utilizando comunicación inalámbrica* [bachelorThesis, Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23783>
- Amara, S., Yazid, M., & Mammeri, S. (2025). Up-Link OFDMA Hybrid Access for Enabling IoT-Based Remote Video Monitoring Over Wi-Fi 7. En Hatti M. (Ed.), *Lect. Notes Networks Syst.: Vol. 1238 LNNS* (pp. 623-633). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80301-7_66
- Atrash, M., Abdalla, M. A., & Elhennawy, H. M. (2021). A fully-textile wideband AMC-backed antenna for wristband WiMAX and medical applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.1017/S1759078720001397>

- Barboza, R., & Pérez, X. H. D. (2023). *Diseño de una red TVWS desde UNPRG para brindar acceso a internet a los colegios 10908 Naylamp y 10997, provincia de Lambayeque* [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].
<http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11839>
- Burgos, J. A. (2022). *Implementación de un transmisor y receptor de LTE basado en software definido radio (SDR) para el laboratorio de comunicaciones de la FIE*. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/20803>
- CEPLAN. (2024). *Observatorio Nacional de Prospectiva*. <https://observatorio.ceplan.gob.pe>
- Espino, C. (2023). *Red de acceso a la Red Dorsal Nacional de fibra óptica (RDNFO) en uno de los distritos más pobres del Perú, Oxamarca – 2022* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/6061>
- Espinoza, A. A., & Oropeza, J. (2022). *Sistema de red Wimax de banda ancha inalámbrica para mejorar los servicios de cobertura en telecomunicaciones tecnología y redes aplicando la norma IEEE. 802.16 en el distrito de Huancabamba – Oxapampa, 2020* [Tesis de grado, Universidad Privada TELESUP].
<https://repositorio.utelesup.edu.pe/handle/UTELESUP/1397>
- Estela, A., & Jimenez, S. S. (2024). *Análisis de desempeño de red de banda ancha rural Caso de estudio distrito de Shamboyacu, San Martín* [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/12782>

- Flores-Cueto, J., Hernández, R., & Garay-Argandoña, R. (2021). Tecnologías de información: Acceso a internet y brecha digital en Perú. *Revista Venezolana de Gerencia*, 25(90), 17.
- García-Zaballos, A., Huici, H., Puig, P., & Iglesias, E. (2021). *Cerrando la brecha de conectividad digital Políticas públicas para el servicio universal en América Latina y el Caribe* (No. 903; IDB-MG-903, Número 903, p. 128). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://52.3.123.36/bitstream/handle/123456789/93/Cerrando-la-brecha-de-conectividad-digital-Policas-publicas-para-el-servicio-universal-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gavidia, J. E. (2023). *Diseño de un sistema de red Wimax aplicando la norma IEEE 802.16 para optimizar las telecomunicaciones en la empresa ferretera Vásquez SAC– Cajamarca* [Tesis de grado, Universidad Privada ANtonio Guillermo Urrelo]. <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/2913>
- INEI. (2023a). *Compendio Estadístico 2023*. INEI. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/4932612-compendio-estadistico-peru-2023>
- INEI. (2023b). *Estadísticas de las Tecnologías de las Información y Comunicación en los Hogares* (Informe Técnico No. 03; Trimestre: Abril-Mayo-Junio 2023, Número 03, p. 50). Instituto Nacional de Estadística e Informática. <https://m.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/03-informe-tecnico-tics-ii-trimestre-2023.pdf>

MINEDU. (2023). *Censo Educativo 2023*. Ministerio de Educación.

https://escale.minedu.gob.pe/documents/10156/9345030/PPT_Censo_Educativo_2023_final.pdf

MINEDU. (2024). *UE - ESCALE - Unidad de Estadística Educativa*.

<https://escale.minedu.gob.pe/uee>

MTC. (2023). *INNOVAR PARA CONECTAR: Estrategias y medidas de regulación inteligente para reducir la brecha digital*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4341442/Innovar%20para%20conectar.pdf>

Pandey, D., & Kundu, S. (2023). Dual-Band Compact Antenna Development in WiMAX and Wi-Fi Bands for Healthcare Service Wireless Connectivity. En L. M. Pandey, R. Gupta, R. P. Thummer, & R. K. Kar (Eds.), *Healthcare Research and Related Technologies* (pp. 395-403). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4056-1_27

Rosas, H. (2021). *Redes Nacionales de Banda Ancha en el Perú: Escenarios al 2030* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú].

<https://www.proquest.com/openview/abc70971980bbf3ce76faa446f1d93df/1?cbl=2026366&diss=y&pq-origsite=gscholar>

Singh, A., Sharma, A., Sharma, S., Roges, R., & Mishra, R. K. (2023). Design of a Compact Hexagonal Wideband Antenna for Modern WiMAX, Wi-Fi, and IoT Applications. *Int. Conf. Adv. Comput., Commun. Inf. Technol., ICAICCIT*, 1-6. Scopus.

<https://doi.org/10.1109/ICAICCIT60255.2023.10466094>

- Solorzano, G. (2025). *Diseño y simulación de infraestructura WiMAX para la parroquia Colonche* [bachelorThesis, La Libertad, Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2025]. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/12852>
- UIT. (2022). *Informe sobre la conectividad mundial de 2022*. Unión Internacional de Telecomunicaciones. https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/ind/D-IND-GLOBAL.01-2022-SUM-PDF-S.pdf
- UNESCO. (2023). *Tecnología en la educación: ¿una herramienta en los términos de quién?* - UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386147_spa
- UNICEF. (2022). *Modelos de conectividad alternativa para escuelas de difícil acceso Actores, tecnologías e inversiones necesarias*. Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). <https://www.unicef.org/argentina/media/17701/file/Modelos%20de%20conectividad%20alternativa%20para%20escuelas%20de%20dif%C3%ADcil%20acceso.pdf>
- Zhou, Z., Niu, Y., Wan, B., & Xiang, P. (2023). Design and Performance Analysis of a Novel HQAM for Telecommunication Systems. *Int. Conf. Electron. Eng Informatics, EEI*, 652-659. Scopus. <https://doi.org/10.1109/EEI59236.2023.10212916>
- Zulu, M. L. T., Pillay Carpanen, R., & Tiako, R. (2024). Optimization of Internet of Things (IoT) for Smart Grid Energy Management Using Artificial Intelligence (AI) Techniques to Reach SDG7. *Proc. South. African Univ. Power Eng. Conf., SAUPEC*. Proceedings of the 32nd Southern African Universities Power Engineering Conference, SAUPEC 2024. Scopus. <https://doi.org/10.1109/SAUPEC60914.2024.10445033>

ANEXOS

ANEXO 01: Geolocalización

Figura 13

Geolocalización del caserío Sapamé, distrito de Íllimo, provincia de Lambayeque

