

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



TESIS

**“Sistema de Comunicación Inalámbrica para la conectividad de los CP. San
Pedro y Las Vegas, distritos de Lagunas, Chiclayo”**

Para Optar por el Título Profesional de Ingeniero(a) Electrónico(a)

ELABORADA POR:

Bach. Joel Alvino Cruz Neciosup

Bach. Noemi Aracely Santamaria Sonapo

ASESOR:

M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla

LAMBAYEQUE – PERÚ

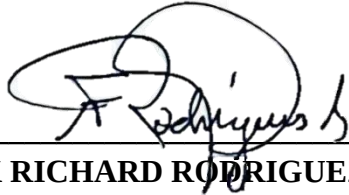
2025

TESIS

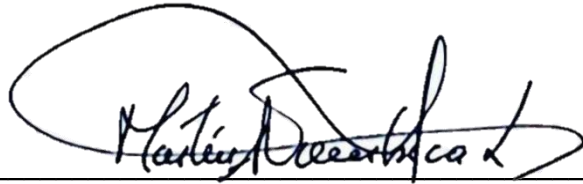
**“Sistema de Comunicación Inalámbrica para la conectividad de los CP. San Pedro y Las
Vegas, distritos de Lagunas, Chiclayo”**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A)
ELECTRÓNICO(A)**

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:



DR. ING. FRANK RICHARD RODRIGUEZ CHIRINOS
PRESIDENTE



MG. ING. MARTIN AUGUSTO NOMBERRA LOSSIO
SECRETARIO



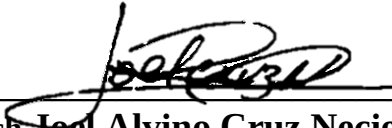
MAG. ING. THAUSO GAD PACHAMANGO BAUTISTA
VOCAL

TESIS

**“SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA LA
CONECTIVIDAD DE LOS CP. SAN PEDRO Y LAS VEGAS, DISTRITOS
DE LAGUNAS, CHICLAYO”**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO(A) ELECTRÓNICO(A)**

AUTORES:

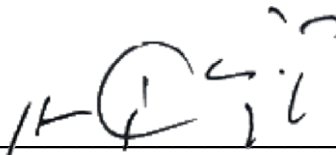


Bach Joel Alvino Cruz Neciosup



Bach. Noemi Aracely Santamaria Sonapo

ASESOR:



M. Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla

AGRADECIMIENTOS JOEL

A Dios, por darme la vida, la salud y la fortaleza para superar cada desafío en este camino académico y profesional.

A mis padres, por su amor incondicional, por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la humildad y la perseverancia. Gracias por estar siempre presentes, por sus consejos y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A mis hermanos, por su compañía, por compartir conmigo alegrías y dificultades, y por ser parte esencial de mi crecimiento personal.

A toda mi familia, por ser mi base, mi refugio y mi impulso. Este logro no es solo mío, sino de todos quienes me han acompañado con amor y fe.

Y a todas las personas que estuvieron a mi lado apoyando y son parte de este logro.

Esta tesis representa el fruto de un esfuerzo compartido, donde el cariño, el compromiso y el apoyo familiar han sido el motor principal. A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

AGRADECIMIENTO NOEMÍ

A Dios, por infundir en mí la valentía y la fe necesarias para superar cada obstáculo durante este camino académico.

A mi familia, por su amor incondicional, su paciencia y su apoyo constante. Gracias por ser mi refugio y mi motor, por creer en mí y acompañarme en cada paso de este proceso. Su fe y cariño han sido el pilar que me impulsó a seguir adelante y alcanzar esta meta.

DEDICATORIA JOEL

A Dios, por su fidelidad infinita. Por sostenerme en cada momento de debilidad, por darme sabiduría en los días de incertidumbre y por abrir caminos donde no los había. Todo lo que he logrado es para Su gloria.

**A mi padre, por su ejemplo de esfuerzo y por cada oración elevada en silencio por mí.
Gracias por enseñarme que, con Dios y trabajo, todo es posible.**

A mi madre, por sus oraciones constantes, por su ternura y por enseñarme a confiar en Dios en todo momento. Tu fe ha sido mi fortaleza.

A mis hermanos, por su compañía sincera y por caminar conmigo en este proceso, compartiendo alegrías y desafíos.

A mi abuela, por sus consejos llenos de sabiduría y por sus oraciones que me sostuvieron en silencio. Su fe y su fortaleza han sido luz en mi camino, y este logro también es suyo.

A mis seres queridos quienes ya descansan en la presencia del Señor. Su amor, sus palabras y su ejemplo siguen vivos en mi corazón. Este logro también les pertenece.

A toda mi familia, por ser mi refugio, mi impulso y mi mayor motivación. Este logro es para ustedes, con todo mi corazón y gratitud.

DEDICATORIA NOEMÍ

A Dios, por la fuerza y la claridad para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles, por su guía silenciosa pero siempre presente.

A mis abuelos, cuyo legado de esfuerzo, humildad y sabiduría ha sido una guía constante en mi vida. Aunque ya no estén físicamente, su presencia vive en cada paso que doy y en cada logro que alcanzo.

A mi madre, por ser el pilar más fuerte en mi camino, por su amor incansable, su ejemplo de perseverancia y por enseñarme, con su vida, el verdadero significado del sacrificio y la dedicación.

A mi hermano, compañero incondicional, por su apoyo sincero, su paciencia y por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudé.

A toda mi familia, por estar presente con su cariño, sus palabras de aliento y su fe constante en mí.

A quienes me acompañaron en este camino, con sus gestos de apoyo y sus palabras alentadoras. Cada uno aportó luz en momentos clave y fortaleció mi ánimo para continuar.

Este trabajo es también de ustedes. Gracias por caminar conmigo

ÍNDICE GENERAL

1	CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO	20
1.1	Antecedentes	20
1.1.1	Antecedentes Internacionales.....	20
1.1.2	Antecedentes Nacionales	22
1.2	Bases Teóricas.....	24
1.2.1	Sistemas de comunicaciones.....	24
1.2.2	Redes Inalámbricas	25
1.2.3	Tecnologías inalámbricas.....	26
1.2.4	Redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal-Area Networks - WPAN)	27
1.2.5	Redes inalámbricas de área local (Wireless Local-Area Networks - WLAN)	28
1.2.6	Redes inalámbricas de área metropolitana (Wireless Metropolitan-Area Networks - WMAN)29	
1.2.7	Redes inalámbricas de área amplia (WWAN)	30
1.2.8	Ancho de banda.....	30
2	CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES	32
2.1	Diseño de Contrastación de Hipótesis.....	32
2.2	Población, muestra	33
2.2.1	Población.....	33
2.2.2	Muestra	33
2.3	Técnicas, instrumentos, equipos y materiales	33

2.3.1	Técnicas	33
2.3.2	Instrumentos.....	34
2.3.3	Equipos y materiales	34
3	CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
3.1	RESULTADOS	35
3.1.1	Enlace Antena Emisora – San Pedro mediante WiMAX 5.8 GHz (Simulación en LinkPlanner)	38
3.1.2	Simulación del Enlace mediante WiMAX 5.8 GHz en Xirio	45
3.1.3	Simulación de Enlaces mediante Tecnología TVWS	47
3.1.4	Enlace San Pedro - Usuarios Potenciales.....	51
3.1.5	Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas: Simulación mediante WiMAX 5.8 GHz en LinkPlanner	57
3.1.6	Simulación del Enlace mediante WiMAX 5.8 GH.....	64
3.1.7	Enlace Antena Emisora - Centro Poblado Las Vegas mediante TVWS.....	66
3.1.8	Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas mediante IEEE 802.11 (2,4 GHz) 68	
3.2	Discusión.....	73
4	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
4.1	Conclusiones	75
4.2	Recomendaciones.....	76

REFERENCIAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Sistemas de Comunicaciones</i>	24
Figura 2: <i>Sistemas de Telecomunicaciones Inalámbricas</i>	25
Figura 3: <i>Clasificación de las redes inalámbricas</i>	26
Figura 4: <i>Comunicación para Dispositivos</i>	27
Figura 5: <i>Esquema de una WLAN en el hogar</i>	28
Figura 6: <i>Diagrama de una red WiMAX</i>	29
Figura 7: <i>Redes de telefonía móvil y de satélite</i>	30
Figura 8: <i>Ancho de Banda</i>	31
Figura 9: <i>Enlace Antena Emisora - San Pedro</i>	38
Figura 10 <i>Resultados de capacidad y disponibilidad del enlace en la Antena Emisora y en el Centro Poblado San Pedro</i>	43
Figura 11 <i>Perfil Topográfico y Desempeño del Enlace en Xirio</i>	45
Figura 12 <i>Simulación de Enlaces mediante Tecnología TVWS</i>	47
Figura 13 <i>Configuración de Enlace Punto a Punto (PTP) bajo el Estándar IEEE 802.11</i>	48
Figura 14 <i>Radiación del Enlace entre la Antena Emisora y San Pedro</i>	49
Figura 15 <i>Resultados de Capacidad y Disponibilidad del Enlace en la Antena Emisora y en San Pedro</i>	50
Figura 16 <i>Configuración de Antena Omnidireccional en el Enlace de San Pedro</i>	51
Figura 17 <i>Enlace San Pedro – Usuario San Pedro 01</i>	52
Figura 18 <i>Enlace San Pedro – Usuario San Pedro 02</i>	52

Figura 19 Enlace San Pedro – Usuario San Pedro 03 _____	53
Figura 20 Enlace San Pedro – Usuario SP10 _____	54
Figura 21 Resultados de Simulación del Enlace entre San Pedro y el Usuario SP10 _____	55
Figura 22 Radiación del Enlace Antena Emisora - Centro Poblado Las Vegas _____	57
Figura 23 Configuración del Enlace con Antena PTP670 en la Banda de 5.8 GHz _____	58
Figura 24 Resultados de Simulación del Enlace en la Antena Emisora _____	58
Figura 25 Resultados de la Configuración de Antenas en la Estación Emisora y en el Centro Poblado Las Vegas _____	59
Figura 26 Resultados de Simulación del Enlace: Capacidad y Disponibilidad en la Antena Emisora y en el Centro Poblado Las Vegas _____	61
Figura 27 Resultado Topográfico del Enlace Simulado en Xirio _____	64
Figura 28 Topografía y Parámetros Técnicos del Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas _____	66
Figura 29 Configuración del Enlace IEEE 802.11 en 2,4 GHz para la Antena Emisora _____	68
Figura 30 Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas (IEEE 802.11, 2,4 GHz) ____	69
Figura 31 Rendimiento del Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas (IEEE 802.11, 2.4 GHz) _____	69
Figura 32 Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas en Banda de 2.4 GHz (IEEE 802.11) _____	70
Figura 33 Enlace Punto a Multipunto entre la Estación Base Las Vegas y el Usuario VS_____	71
Figura 34 Potencia de Recepción y Disponibilidad del Enlace en el AP Las Vegas y la Estación Cliente VS1 _____	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Perú - Hogares con acceso a servicios y bienes de Tecnología de Información y Comunicación- TIC: Telefonía Fija, Telefonía Móvil, Televisión por Cable, Computadora e Internet Año: 2012 - 2022 _____	18
Tabla 2 Coordenadas del distrito de Lagunas, provincia de Chiclayo _____	35
Tabla 3 Demanda de ancho de banda por usuario _____	36
Tabla 4 Propuesta OSIPTEL VME de Banda Ancha _____	36
Tabla 5 Configuración de enlace _____	39
Tabla 6 Resultados de simulación en Antena Emisora _____	40
Tabla 7 Configuración de antena _____	41
Tabla 8 Resultado de Simulación _____	41
Tabla 9 Resultados de Throughput, Margen de Desvanecimiento y Disponibilidad según Esquema de Modulación _____	43
Tabla 10 Rendimiento del Enlace en la Antena Emisora según Esquema de Modulación ____	43
Tabla 11 Rendimiento del Enlace en San Pedro según Esquema de Modulación _____	44
Tabla 12 Parámetros Técnicos del Enlace: Resultados de la Simulación _____	46
Tabla 13 Parámetros de Configuración del Enlace Punto a Punto _____	49
Tabla 14 Resultados de Simulación del Desempeño del Enlace entre la Antena Emisora y San Pedro _____	50
Tabla 15 Registro de Estaciones de Suscriptor en San Pedro – Posibles Clientes _____	53
Tabla 16 Resumen de Resultados del Enlace Simulado _____	55
Tabla 17 Resultados de la Simulación del Enlace: Parámetros Técnicos e Interpretación ____	55

Tabla 18 Resultados de Simulación del Throughput Promedio por Modulación en el Enlace

Punto a Multipunto _____ 56

Tabla 19 Resumen de Parámetros de Simulación y Throughput Total Estimado del Enlace __ 56

Tabla 20 Resultados del Enlace: Throughput Agregado y Parámetros de Pérdida _____ 60

Tabla 21 Resultados de Simulación del Enlace: Rendimiento por Esquema de Modulación en la Antena Emisora y en Las Vegas _____ 62

Tabla 22 Resultados del Enlace: Parámetros de Modulación y Throughput en la Antena Emisora y Las Vegas _____ 62

Tabla 23 Resultados de Simulación del Enlace en el Centro Poblado Las Vegas _____ 63

Tabla 24 Informe de Enlace: Distancia, Cota y Nivel de Señal _____ 65

Tabla 25 Resultados de la Simulación del Enlace entre la Antena Emisora y el Centro Poblado Las Vega _____ 67

Tabla 26 Parámetros de Configuración de las Estaciones de Usuario en el Enlace PMP hacia el Centro Poblado Las Vegas _____ 70

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito diseñar y simular un sistema de comunicación inalámbrica para garantizar la conectividad en los Centros Poblados San Pedro y Las Vegas, distrito de Lagunas, Chiclayo. Se exploró literatura especializada en telecomunicaciones y tecnologías inalámbricas, identificando opciones viables para zonas rurales. Posteriormente, se realizaron simulaciones con herramientas como LinkPlanner, Xirio y TVWS, evaluando parámetros de potencia recibida, throughput, pérdidas de propagación y disponibilidad. Los resultados evidenciaron que, bajo configuraciones con WiMAX 5.8 GHz e IEEE 802.11, es posible alcanzar capacidades entre 50 y 100 Mbps con niveles de disponibilidad cercanos al 100%, superando los mínimos establecidos por OSIPTEL. Asimismo, la simulación mediante TVWS confirmó la viabilidad de enlaces alternativos con throughput mínimos de 7 Mbps y márgenes de escucha superiores a 80 dB. Se concluye que el diseño propuesto cumple con criterios de viabilidad técnica, sostenibilidad económica y adaptabilidad a las condiciones geográficas, constituyendo una solución integral para reducir la brecha digital en entornos rurales y facilitar el acceso a servicios educativos, administrativos y comunitarios esenciales.

Palabras clave: Sistemas de comunicación, sistema inalámbrico y conectividad.

ABSTRACT

This research aimed to design and simulate a wireless communication system to ensure connectivity in the rural communities of San Pedro and Las Vegas, Lagunas district, Chiclayo. A review of specialized literature on telecommunications and wireless technologies was conducted to identify suitable alternatives for rural environments. Simulations were developed using tools such as LinkPlanner, Xirio, and TVWS, analyzing parameters such as received power, throughput, propagation losses, and availability. Results showed that, under WiMAX 5.8 GHz and IEEE 802.11 configurations, it is possible to achieve effective capacities between 50 and 100 Mbps with availability rates close to 100 %, exceeding OSIPTEL's minimum broadband requirements. Additionally, TVWS simulations confirmed the feasibility of alternative links with minimum throughput of 7 Mbps and listening margins above 80 dB. It is concluded that the proposed design meets the criteria of technical feasibility, economic sustainability, and adaptability to geographical conditions, providing an effective solution to reduce the digital divide in rural areas and to promote access to essential educational, administrative, and community services.

Keywords: Communication systems, wireless system, connectivity

INTRODUCCIÓN

En el ámbito internacional, el impacto de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) ha sido doble: mientras que ha permitido mejorar significativamente el acceso a la información y la calidad educativa, particularmente en países desarrollados, persisten desafíos importantes en contextos menos favorecidos. Aunque el uso de TIC ha democratizado el aprendizaje y facilitado la inclusión digital, la brecha digital sigue siendo un problema crítico en áreas rurales y en países en vías de desarrollo, donde la infraestructura limitada y el acceso desigual a la tecnología impiden que los beneficios de estas herramientas lleguen a todos los estudiantes. A pesar de los logros en la expansión del acceso a la educación digital, se requieren esfuerzos continuos para abordar las deficiencias en conectividad, formación docente en competencias digitales y la adaptación de contenidos educativos a contextos diversos (Situmorang et al., 2023)..

En el Perú, el uso de las TIC ha mostrado avances significativos, especialmente en la última década, con iniciativas gubernamentales que buscan integrar la tecnología en las aulas. Sin embargo, existen serias deficiencias que limitan su impacto, particularmente en las zonas rurales y en las regiones más alejadas del país, donde la infraestructura tecnológica es precaria o inexistente. Mientras que en áreas urbanas se han logrado mejoras notables en la calidad educativa a través de la integración de las TIC, en las zonas rurales persisten problemas de conectividad, falta de capacitación docente en el uso pedagógico de la tecnología, y una escasa adecuación de los contenidos educativos a las realidades locales. Estos factores contribuyen a una brecha educativa que mantiene en desventaja a una parte significativa de la población estudiantil, haciendo

urgente la necesidad de políticas y estrategias que enfrenten estas desigualdades (Gaggero et al., 2021)..

En el departamento de Lambayeque, la implementación de las TIC ha presentado desafíos particulares debido a la diversidad geográfica y socioeconómica de la región. Mientras que, en las áreas urbanas, especialmente en Chiclayo, se ha visto un progreso en la adopción de tecnologías educativas, las zonas rurales, como los distritos de Lagunas y otros, enfrentan serias limitaciones. Estas incluyen una conectividad deficiente, que afecta la implementación de plataformas educativas en línea, y una falta de recursos tecnológicos en las escuelas. Aunque se han realizado esfuerzos para mejorar la situación, como la dotación de equipos y programas de capacitación docente, la realidad es que muchos estudiantes aún no tienen acceso equitativo a las oportunidades educativas que brindan las TIC, perpetuando así la desigualdad en la calidad educativa dentro del departamento (Peralta, 2019)..

Estudios recientes indican que la brecha digital en el Perú es una barrera significativa para el desarrollo equitativo del sistema educativo. Según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), el cual se visualiza en la tabla N° 01 del informe 03-informe-tecnico-tics-ii-trimestre-2023, revela la evolución del acceso a diferentes servicios y bienes de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) en los hogares peruanos entre 2012 y 2022. Se observa una disminución constante en la penetración de la telefonía fija, que pasa del 29,4% en 2012 al 10,0% en 2022, reflejando una transición hacia tecnologías más modernas. Por el contrario, la telefonía móvil muestra un incremento significativo, alcanzando un 94,5% de cobertura en 2022, lo que subraya la creciente preferencia por la conectividad móvil. El acceso a televisión por cable también experimenta variaciones, alcanzando su punto máximo en 2017 con un 38,0%, y descendiendo a 32,0% en 2022. En cuanto a las computadoras, el acceso se mantiene relativamente estable, con

una ligera tendencia al alza, alcanzando un 34,2% en 2022. Sin embargo, el acceso a Internet muestra un crecimiento notable, aumentando de 20,2% en 2012 a 55,2% en 2022, lo que indica un avance significativo en la inclusión digital en el país, reflejando los esfuerzos por mejorar la conectividad en los hogares peruanos. Este análisis resalta la evolución tecnológica en el Perú, con un claro desplazamiento hacia tecnologías inalámbricas y digitales, a la vez que evidencia desafíos en la adopción de dispositivos y servicios más avanzados (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2023).

Tabla 1:

Perú - Hogares con acceso a servicios y bienes de Tecnología de Información y Comunicación- TIC:

Telefonía Fija, Telefonía Móvil, Televisión por Cable, Computadora e Internet Año: 2012 - 2022

Año / Trimestre	Telefonía fija	Telefonía móvil	Televisión por cable	Computadora	Internet
2012	29,4	79,7	31,9	29,9	20,2
2013	28,6	82,0	33,6	32,0	22,1
2014	26,9	84,9	35,9	32,3	23,5
2015	24,5	87,2	36,7	32,6	23,2
2016	23,5	88,9	37,1	33,5	26,4
2017	21,9	90,2	37,4	33,2	28,2
2018	20,6	90,9	37,7	33,3	29,8
2019	19,1	92,1	38,0	32,7	35,9
2020	13,6	95,0	31,0	33,3	38,7
2021	12,1	94,1	30,7	33,9	48,7
2022	10,0	94,5	32,0	34,2	55,2

Para enfrentar los desafíos de conectividad en áreas remotas, se han diseñado diversas soluciones tecnológicas. Entre ellas se encuentran los sistemas de comunicación satelital, las redes de radioenlace, las tecnologías de acceso inalámbrico de largo alcance y los sistemas de comunicación híbridos que integran diferentes tecnologías. Estas alternativas permiten crear enlaces de comunicación confiables y con alta capacidad, incluso en regiones donde la infraestructura terrestre es escasa. No obstante, la implementación de estas soluciones exige una

planificación meticulosa, una inversión considerable y un conocimiento técnico especializado. (Quillas-Cupe et al., 2020).

El distrito de Lagunas, ubicado en la provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque, es una comunidad rural con una economía predominantemente agrícola, centrada en el cultivo de arroz, maíz y frijoles, favorecida por los canales de riego que atraviesan la región. A pesar de su fuerte sentido de identidad cultural y cohesión social, el distrito enfrenta significativos desafíos en infraestructura, especialmente en cuanto a conectividad y acceso a servicios básicos como educación y salud. Con un clima árido típico de la costa norte del Perú y una baja densidad poblacional, Lagunas se presenta como una zona prioritaria para proyectos de desarrollo que busquen mejorar la calidad de vida de sus habitantes a través de la implementación de tecnologías de comunicación y conectividad, esenciales para su progreso y sostenibilidad. (Toro-Bernal, 2020).

La presente tesis se justifica en la necesidad urgente de mejorar la conectividad y el acceso a las TIC en los Centros Poblados de San Pedro y Las Vegas, en los distritos de Lagunas, Chiclayo. La falta de un sistema de comunicación inalámbrica efectivo en estas áreas no solo limita las oportunidades educativas, sino que también perpetúa la exclusión social y económica de sus habitantes. Al diseñar un sistema de comunicación inalámbrica adaptado a las condiciones específicas de la zona, esta tesis busca proporcionar una solución técnica viable que no solo mejorará la conectividad, sino que también contribuirá al desarrollo integral de estas comunidades, facilitando el acceso a la educación, la información y otros servicios esenciales.

1 **CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO**

1.1 Antecedentes

1.1.1 *Antecedentes Internacionales*

(Paternina, 2022) propone la implementación de una solución tecnológica de última milla para resolver los problemas de conectividad en la localidad de Sumapaz, Bogotá, y analizar su impacto social. La metodología empleada es de tipo exploratorio y descriptivo con un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), basado en una revisión bibliográfica de artículos indexados en bases de datos científicas como SCOPUS, EBSCO HOST, y otros. La población de estudio se enfoca en la localidad 20 de Bogotá, con especial énfasis en su infraestructura de telecomunicaciones. Los instrumentos utilizados incluyen simulaciones en Radio Mobile, mapas de cobertura móvil y la metodología de toma de decisiones Scoring. Los resultados principales indican que la tecnología BPL (Broadband over Power Lines) es la opción más adecuada para la región, superando otras alternativas como las tecnologías móviles, TVWS e internet satelital. En cuanto a las conclusiones, se resalta que la implementación de BPL contribuiría significativamente a cerrar la brecha digital en Sumapaz, lo cual tendría un impacto positivo en la seguridad, la educación y el desarrollo social de la región.

(Yoza, 2020) Propone implementar una red inalámbrica utilizando tecnología Ubiquiti para mejorar el acceso a internet en la Unidad Educativa Ocho de Enero, ubicada en el Cantón Jipijapa, provincia de Manabí, Ecuador. La investigación sigue una metodología cualitativa y cuantitativa, empleando métodos como el analítico, hipotético-deductivo, descriptivo, bibliográfico, estadístico y propositivo. La población de estudio está compuesta por la comunidad educativa de la Unidad Educativa Ocho de Enero,

incluyendo 494 estudiantes y 23 docentes, de los cuales se seleccionó una muestra de 216 personas. Los instrumentos utilizados incluyen encuestas, entrevistas, y la observación directa para recolectar datos sobre las necesidades de conectividad. Los resultados principales indican que la implementación de dos dispositivos Access Point de la marca Ubiquiti bajo la topología de malla extendida mejoró significativamente la cobertura de internet en toda la institución, permitiendo a los estudiantes y docentes acceder de manera más eficiente a plataformas educativas. En cuanto a las conclusiones, se resalta que la solución implementada resolvió de manera efectiva los problemas de déficit de ancho de banda, contribuyendo al fortalecimiento del proceso de enseñanza-aprendizaje en la institución.

(Martínez, 2022) compara las soluciones de conectividad entre enlaces punto a punto (PtP) y redes TVWS (TV White Spaces) para determinar cuál es más adecuada en términos de costo y viabilidad técnica para conectar escuelas rurales en el departamento del Cesar, Colombia. La metodología utilizada fue de tipo comparativo y descriptivo con un enfoque en estudios técnicos de campo y simulaciones. La población de estudio incluyó varias instituciones educativas rurales en el departamento del Cesar, seleccionadas en función de su accesibilidad y características geográficas. Los instrumentos utilizados incluyeron software de simulación (PathLoss y RADWIN) y la Base de Datos de Espacios en Blanco (BDEB) de la Agencia Nacional del Espectro (ANE). Los resultados principales mostraron que, aunque la solución TVWS es inicialmente más costosa en términos de equipos, ofrece una mejor cobertura en zonas montañosas y una reducción del 12% en los costos generales del proyecto comparado con los enlaces PtP. En cuanto a las conclusiones,

se determinó que la tecnología TVWS es una alternativa más eficiente y económica para conectar escuelas rurales en áreas de difícil acceso, lo que contribuiría significativamente a cerrar la brecha digital en estas regiones.

1.1.2 Antecedentes Nacionales

(Flores et al., 2021) Propone, la implementación de una red de banda ancha que permita la interconexión digital a través de internet en las zonas rurales del Perú para reducir la brecha digital y mejorar la calidad educativa en estas regiones. La metodología empleada incluye un análisis del contexto de la conectividad en las zonas rurales, el uso de herramientas ágiles para la solución de problemas de negocio, y la implementación de un modelo de negocio sostenible. La población de estudio se enfoca en las comunidades rurales de la región andina del Perú, con un estudio específico en Acobamba, Huancavelica. Los instrumentos utilizados incluyen encuestas y análisis de datos provenientes de fuentes oficiales como el INEI y ESCALE. Los resultados principales muestran que la implementación de redes inalámbricas basadas en fibra óptica es viable y tendría un impacto significativo en la mejora de la educación en las zonas rurales. En cuanto a las conclusiones, el estudio resalta que la conectividad digital es crucial para el desarrollo educativo y social en estas regiones, y propone la colaboración entre el sector público y privado para implementar soluciones tecnológicas que sean sostenibles a largo plazo.

Peralta (2019), El texto analiza el desempeño de redes inalámbricas en áreas rurales utilizando herramientas computacionales para modelar y simular dichas redes. Se emplean el Riverbed Opnet Modeler y Matlab/GUI para realizar el análisis, subrayando su utilidad

en la simulación de redes de alto rendimiento, tanto terrestres como satelitales. Los objetivos del estudio incluyen la creación y validación de modelos computacionales que apoyen la implementación de redes inalámbricas eficientes en zonas rurales, enfocándose en mejorar el throughput, disminuir errores en la transmisión de datos, y optimizar los niveles de señal en los receptores. Entre los hallazgos, se destaca la capacidad de estas herramientas para simular escenarios realistas y ofrecer soluciones prácticas a los desafíos de conectividad en áreas remotas. La investigación se centra en zonas rurales donde se despliegan estas tecnologías, identificando vacíos temáticos relacionados con la cobertura y eficiencia bajo diversas condiciones ambientales y topográficas. Este estudio aporta a la literatura existente al ofrecer una metodología sólida para la evaluación y planificación de infraestructuras de comunicación en áreas desatendidas, resaltando la importancia de integrar nuevas tecnologías para superar las limitaciones de las redes convencionales.

(Rodríguez, 2020) evalúa las tecnologías de redes inalámbricas Wimax, Wi-Fi, y 4G LTE para determinar cuál es la más adecuada para ser implementada en el centro poblado Corazón de Jesús, en el departamento de Huánuco, Perú. La investigación sigue una metodología pre-experimental y utiliza un enfoque cuantitativo con simulaciones en software especializado como AirLink y Radio Mobile para medir la viabilidad del diseño propuesto. La población de estudio incluye a representantes de instituciones públicas y privadas en el centro poblado, además de pobladores locales, con un total de 30 participantes. Los instrumentos utilizados incluyen encuestas, análisis documental, y herramientas de simulación. Los resultados principales indican que la tecnología Wi-Fi en su estándar IEEE 801.11ac es la más viable para la zona, superando en rendimiento a

Wimax y 4G LTE en términos de velocidad de transmisión, cobertura, y costo-beneficio. En cuanto a las conclusiones, se destaca que la implementación de la red inalámbrica basada en Wi-Fi podría tener un impacto positivo significativo en la conectividad y desarrollo social de las zonas rurales en el Perú, especialmente en áreas con características geográficas similares a las del centro poblado estudiado.

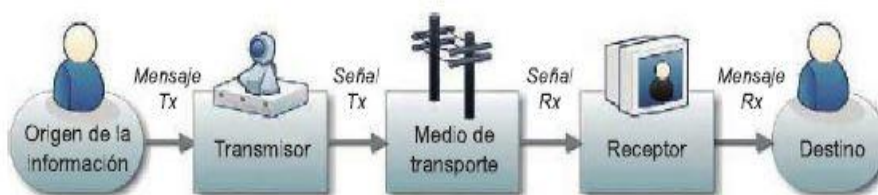
1.2 Bases Teóricas

1.2.1 *Sistemas de comunicaciones*

Los sistemas de telecomunicaciones engloban una amplia gama de métodos, herramientas y soluciones que permiten el intercambio de información a grandes distancias entre personas o dispositivos. Estas tecnologías incluyen desde la telefonía tradicional y móvil hasta las redes informáticas, y la transmisión de televisión y radio, utilizando ondas electromagnéticas o medios físicos como el cableado para transmitir y recibir datos en formatos de audio, video y texto. La infraestructura de las telecomunicaciones facilita conexiones instantáneas a nivel global, apoyando tanto las comunicaciones personales como las transacciones comerciales y los dispositivos de respuesta urgente. (Toro-Bernal, 2020).

Figura 1:

Sistemas de Comunicaciones

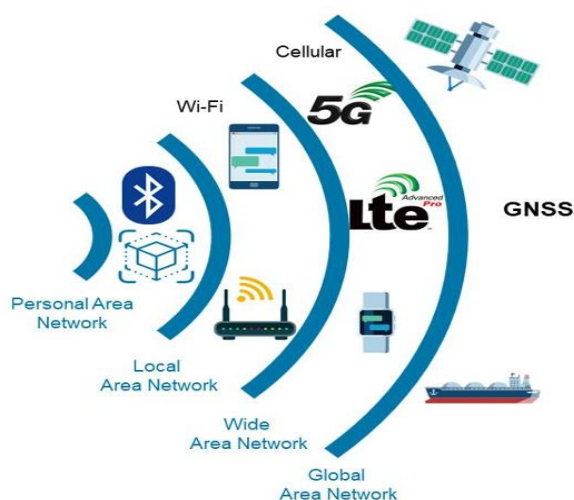


1.2.2 Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas, que conectan dispositivos a través de ondas de radio sin necesidad de cables, incluyen equipos como computadoras, teléfonos móviles, tablets y localizadores. Funcionan de manera similar a las redes cableadas, pero convierten las señales de información para su transmisión a través del aire. Estas redes son útiles tanto como sustituto de las redes tradicionales como para ofrecer acceso a datos desde ubicaciones remotas. Aunque su instalación es más económica que las opciones cableadas, su verdadero valor radica en facilitar el acceso a la información, lo que se traduce en beneficios económicos locales al ahorrar tiempo y esfuerzo. Además, las redes inalámbricas permiten conexiones remotas sin necesidad de infraestructura física invasiva, lo que ha impulsado su rápida popularidad. Sin embargo, estas redes enfrentan desafíos relacionados con la interferencia y la seguridad, debido a la naturaleza abierta de las ondas electromagnéticas, lo que requiere regulaciones y medidas de protección para garantizar la privacidad de los datos transmitidos (Arias-Rodríguez, 2022).

Figura 2:

Sistemas de Telecomunicaciones Inalámbricas



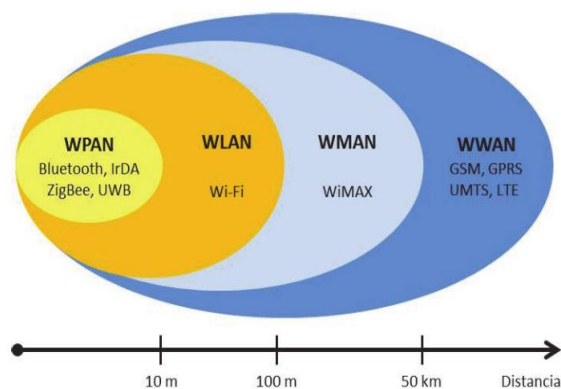
1.2.3 Tecnologías inalámbricas

Las redes inalámbricas se pueden clasificar en cuatro grupos específicos según el área de aplicación y el alcance de la señal:

- Redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal-Area Networks - WPAN)
- Redes inalámbricas de área local (Wireless Local-Area Networks - WLAN)
- Redes inalámbricas de área metropolitana (Wireless Metropolitan-Area Networks - WMAN)
- Redes inalámbricas de área amplia (Wireless Wide-Area Networks - WWAN).

Figura 3:

Clasificación de las redes inalámbricas



Además, Las redes inalámbricas se dividen en dos grandes categorías: de corto y largo alcance. Las redes de corto alcance están limitadas a áreas específicas, como redes de área local (LAN) en edificios corporativos, campus educativos, fábricas o viviendas, y redes de área personal (PAN), donde los dispositivos deben estar muy cerca para comunicarse. Estas redes suelen operar en bandas de frecuencia sin licencia, como las de 2,4 GHz y 5 GHz, disponibles en la mayoría de los países, lo que facilita su uso sin necesidad de obtener una licencia, promoviendo su amplia adopción. Por otro lado, las redes de largo alcance son generalmente ofrecidas como un servicio por empresas especializadas, cubriendo grandes áreas como ciudades, estados o incluso países.

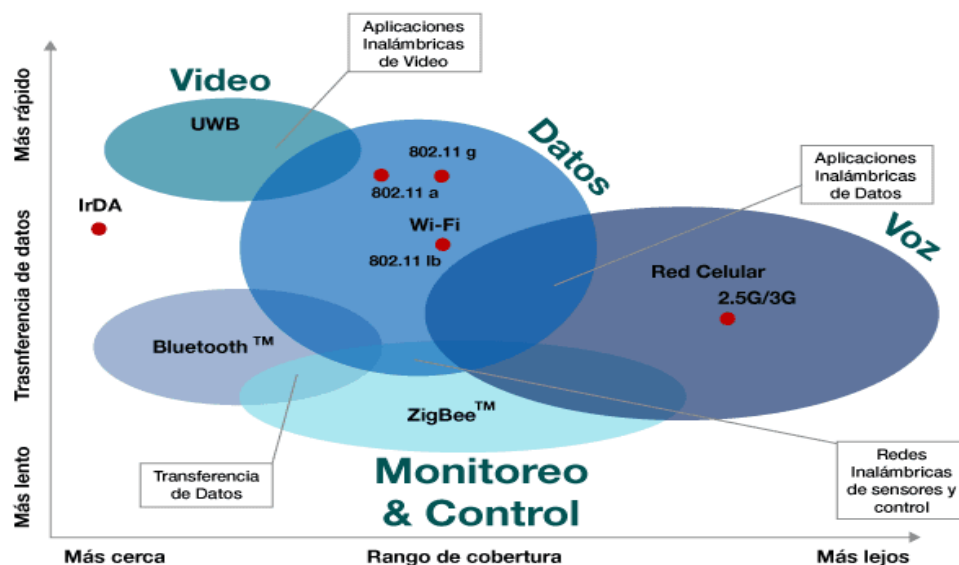
enteros. La red inalámbrica de área amplia (WWAN) es la más común en esta categoría, y para una cobertura verdaderamente global, también se utilizan redes satelitales.

1.2.4 Redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal-Area Networks - WPAN)

Las redes inalámbricas de área personal (WPAN) se basan en el estándar IEEE 802.15 y permiten la comunicación a distancias muy cortas, generalmente alrededor de 10 metros. A diferencia de otras redes inalámbricas, las WPANs suelen requerir poca o ninguna infraestructura externa, lo que las hace ideales para soluciones compactas, de bajo consumo energético y coste reducido, que se pueden implementar en dispositivos como teléfonos inteligentes y PDAs. Estas redes, conocidas por su bajo consumo de energía y velocidades de transmisión relativamente bajas, utilizan tecnologías como Bluetooth, IrDA, ZigBee y UWB. Bluetooth se emplea comúnmente en dispositivos como ratones, teclados y manos libres; IrDA es ideal para enlaces punto a punto para transferencias simples de datos y sincronización de archivos; ZigBee está diseñado para redes confiables en aplicaciones de seguimiento y control de procesos, mientras que UWB se utiliza en enlaces multimedia que requieren un gran ancho de banda.

Figura 4:

Comunicación para Dispositivos



1.2.5 Redes inalámbricas de área local (Wireless Local-Area Networks - WLAN)

Las redes inalámbricas de área local (WLAN), diseñadas para proporcionar acceso en un rango de hasta 100 metros, son comunes en hogares, escuelas, y oficinas. Basadas en el estándar IEEE 802.11 y comercializadas bajo la marca Wi-Fi, estas redes permiten a los usuarios moverse dentro de un área de cobertura manteniendo la conexión. Aunque otros estándares como HIPERLAN existieron, el IEEE 802.11 prevaleció por su rápida adopción y simplicidad de implementación. El estándar IEEE 802.11b, el primero ampliamente aceptado, ofrece hasta 11 Mbps en la banda de 2,4 GHz, mientras que su sucesor, el IEEE 802.11g, mejora la velocidad hasta 54 Mbps y es compatible con dispositivos 802.11b, aunque la velocidad se reduce en condiciones de señal débil o interferencias.

Figura 5:

Esquema de una WLAN en el hogar



1.2.6 Redes inalámbricas de área metropolitana (Wireless Metropolitan-Area Networks - WMAN)

Las redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN), basadas en el estándar IEEE 802.16 conocido como WiMAX, permiten la interconexión de redes LAN en una gran área metropolitana, eliminando la necesidad de costoso cableado. A diferencia de Wi-Fi, que cubre áreas pequeñas como oficinas, WiMAX ofrece cobertura a distancias mayores, operando en bandas de frecuencia de 2 a 66 GHz, con velocidades de hasta 70 Mbps en un rango de hasta 50 km. WiMAX puede funcionar tanto como sin línea de visión directa, utilizando frecuencias bajas para evitar obstáculos físicos y frecuencias altas para comunicaciones directas entre torres, lo que facilita la creación de redes entre ciudades.

Figura 6:

Diagrama de una red WiMAX

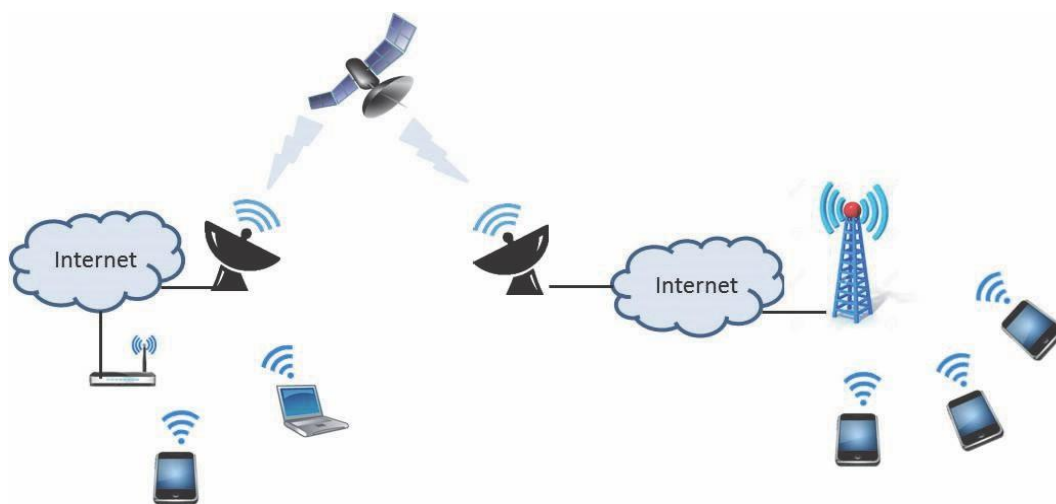


1.2.7 Redes inalámbricas de área amplia (WWAN)

Las redes inalámbricas de área amplia abarcan distancias superiores a 50 kilómetros y operan generalmente en frecuencias con licencia. Estas redes se implementan en grandes áreas, como ciudades o países, utilizando sistemas satelitales o antenas gestionadas por proveedores de servicios de Internet. Las dos principales tecnologías utilizadas en estas redes son la telefonía móvil y los satélites.

Figura 7:

Redes de telefonía móvil y de satélite

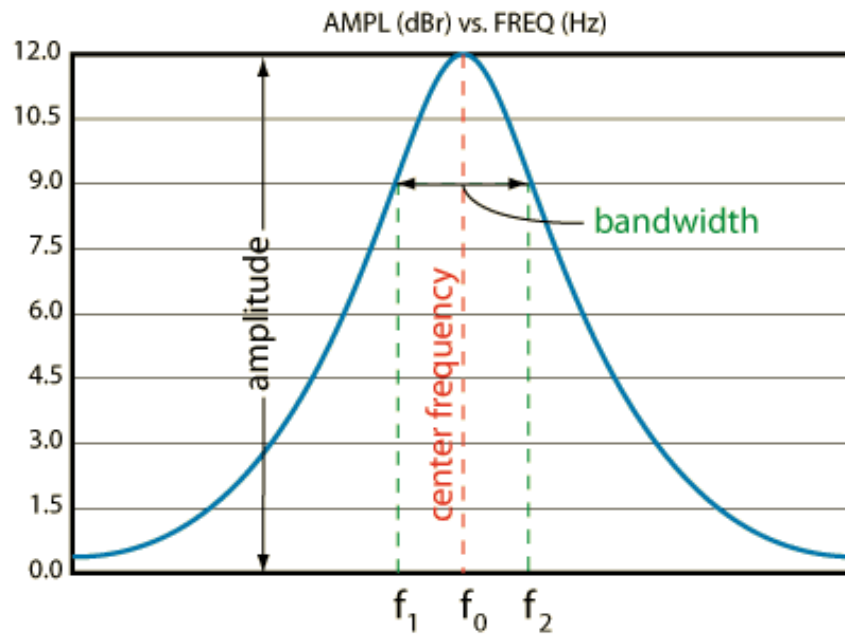


1.2.8 Ancho de banda.

El ancho de banda se refiere a la capacidad de una red para transmitir datos, medido en bits por segundo (bps). Este concepto indica cuántos datos pueden transferirse a través de una conexión en un tiempo determinado, lo que influye en la velocidad de transmisión de información entre dos puntos. Un ancho de banda mayor permite enviar más datos a la vez, lo que mejora la rapidez y eficiencia de la comunicación. (Medina-Beltrán, 2019).

Figura 8:

Ancho de Banda



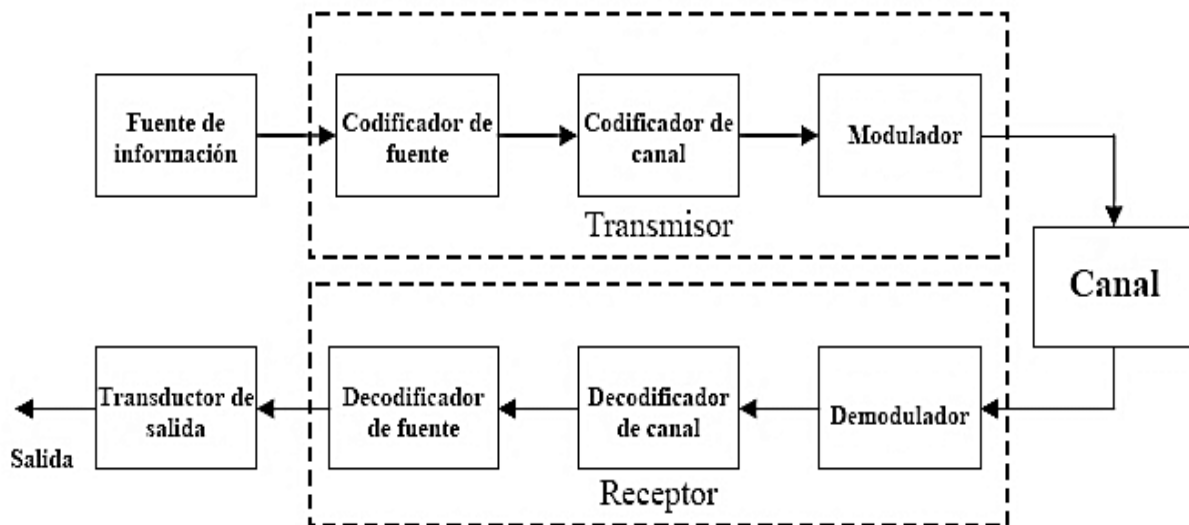
2 CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Diseño de Contrastación de Hipótesis

Tomando en cuenta diversos enfoques teóricos y conceptuales vinculados a las infraestructuras de telecomunicaciones, y considerando tanto las soluciones actuales como las innovaciones para ofrecer conectividad en regiones remotas y con desafíos geográficos, se propone una alternativa tecnológica novedosa. Esta alternativa utiliza métodos y estrategias específicas para superar las barreras de accesibilidad presentes los CP. San Pedro y Las Vegas, distritos de Lagunas, Chiclayo, donde la topografía irregular representa un desafío considerable para la implementación de servicios de comunicación.

Imagen 1:

Diseño de Contrastación Hipótesis



2.2 Población, muestra

2.2.1 Población

La población de esta investigación está constituida por el conjunto de sistemas de telecomunicaciones inalámbricas en operación destinados a proporcionar conectividad en zonas rurales remotas del Perú. Estos sistemas comprenden diversas tecnologías y configuraciones, implementadas para superar limitaciones geográficas y técnicas, con el propósito de garantizar el acceso a servicios de comunicación en comunidades alejadas.

2.2.2 Muestra

La muestra está conformada por los sistemas de comunicación inalámbrica instalados y operativos en los Centros Poblados de San Pedro y Las Vegas, pertenecientes al distrito de Lagunas, provincia de Chiclayo. Estos sistemas fueron seleccionados por su función específica de proveer conectividad a instituciones educativas de dichas localidades, representando un caso concreto para el análisis técnico y la propuesta de mejora planteada en la investigación.

2.3 Técnicas, instrumentos, equipos y materiales

2.3.1 Técnicas

Para el desarrollo de la investigación se aplicó la técnica de análisis documental, con el fin de revisar, organizar y evaluar información proveniente de fuentes académicas y técnicas relacionadas con sistemas de telecomunicaciones inalámbricas. Asimismo, se empleó el uso de especificaciones técnicas de la tecnología seleccionada, lo que permitió validar su idoneidad y viabilidad para las condiciones geográficas de los Centros Poblados de San Pedro y Las Vegas.

2.3.2 Instrumentos

Los instrumentos utilizados incluyeron fichas bibliográficas, destinadas a registrar de manera sistemática las referencias de las fuentes consultadas, y fichas de contenido, orientadas a sintetizar la información relevante para el marco teórico y la propuesta técnica. Además, se consideraron datos provenientes de tesis y artículos científicos, los cuales aportaron evidencias empíricas y criterios de comparación para sustentar las decisiones técnicas adoptadas en la investigación.

2.3.3 Equipos y materiales

La investigación se apoyó en el uso de una laptop con las capacidades necesarias para el procesamiento de información y ejecución de software especializado. Asimismo, se utilizó software especializado para simulación, que permitió modelar y evaluar el desempeño del sistema de comunicación inalámbrica propuesto, considerando las variables técnicas y ambientales propias del área de estudio.

3 CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 RESULTADOS

Para el desarrollo del presente proyecto se seleccionaron como puntos de muestreo los centros poblados de Las Vegas y San Pedro, pertenecientes al distrito de Lagunas, ambos constituyen las localidades objetivo donde se evaluará la factibilidad de implementar un sistema de comunicación inalámbrica. La propuesta de conectividad se fundamenta en el uso de tecnologías de acceso inalámbrico, por su capacidad de cubrir amplias distancias y adaptarse a las condiciones geográficas de la zona.

En el diseño planteado, los centros poblados de Las Vegas y San Pedro se establecen como estaciones receptoras, mientras que la Antena Emisora se define como el punto principal de transmisión de la señal, para garantizar la cobertura y calidad del servicio, en dicho emplazamiento se proyecta la instalación de antenas que operen en la banda de frecuencia correspondiente, considerando criterios de altura, línea de vista y factibilidad técnica, identificándose las coordenadas geográficas específicas de cada punto estratégico, con el fin de realizar las simulaciones y los cálculos necesarios que permitan evaluar el rendimiento del sistema propuesto.

Tabla 2

Coordenadas del distrito de Lagunas, provincia de Chiclayo

Nombre	Latitud	Longitud	UTM Ref.	MGRS Ref.
ANTENA EMISORA	07.05647S	079.70027W	17S 643551.2E 9219808.5N	17MPN4355119808
LAS VEGAS	07.05927S	079.70070W	17S 643502.8E 9219499.0N	17MPN4350219499
SAN PEDRO	07.05265S	079.71459W	17S 641970.5E 9220235.3N	17MPN4197020235

Para dar inicio al proyecto, resulta fundamental realizar una estimación preliminar de la demanda de conectividad, considerando como base la población de la zona de estudio. En este caso, se toma como referencia una comunidad conformada por aproximadamente 75 viviendas, lo que permite proyectar de manera inicial los requerimientos de ancho de banda que serían necesarios para garantizar un servicio adecuado. Este cálculo constituye un insumo esencial dentro del proceso de diseño del sistema de comunicación inalámbrica, ya que permite dimensionar de forma aproximada la capacidad en Mbps que una comunidad de estas características podría demandar para cubrir sus necesidades básicas de conectividad.

Tabla 3

Demanda de ancho de banda por usuario

Actividad	Asignación de capacidad de transmisión por persona
Navegación web, correo, redes sociales	1 Mbps
Videoconferencias (Zoom, Teams)	2 Mbps
Juegos en línea	3Mbps

No obstante, es pertinente considerar el consumo promedio de Internet por usuario, ya que este indicador constituye un referente fundamental para dimensionar adecuadamente la capacidad del sistema de comunicación inalámbrica propuesto.

Tabla 4

Propuesta OSIPTEL VME de Banda Ancha

Tipo	Red Fija		Red Móvil	
	Velocidad mínima efectiva de descarga	Velocidad mínima efectiva de carga	Velocidad mínima efectiva de descarga	Velocidad mínima efectiva de carga
Banda ancha	3 Mbps	1 Mbps	2 Mbps	0.768 Mbps

Nota: Elaborado por GPRC-OSIPTEL

A partir de la estimación realizada, se obtiene un promedio de 5 Mbps por usuario, lo que, al proyectarse sobre una población de 75 viviendas, representa un requerimiento total aproximado de 375 Mbps en condiciones de uso simultáneo. Sin embargo, es necesario matizar este cálculo al considerar la realidad de las áreas rurales, donde los patrones de consumo difieren respecto a los entornos urbanos. En este sentido, se debe tener en cuenta la sustitución gradual de los servicios de telefonía pública tradicional por soluciones basadas en conectividad inalámbrica, lo cual influye directamente en la estimación de la demanda real de ancho de banda y en el dimensionamiento del sistema propuesto para los centros poblados de San Pedro y Las Vegas.

En el marco normativo vigente, se considera área rural a aquellos centros poblados que cumplen con las siguientes tres condiciones establecidas por el INEI (2023) y Ley N° 31809 (2023):

- a. No formar parte de las áreas urbanas definidas por el INEI.
- b. Contar con una población menor a 3 000 habitantes, de acuerdo con el último censo poblacional o sus proyecciones oficiales más recientes.
- c. Presentar escasez de servicios básicos, entendida como la carencia de cobertura en al menos uno de los siguientes: servicio público móvil o acceso a internet fijo.

En relación con el consumo de internet, el ancho de banda promedio por persona varía en función de las actividades realizadas, pudiendo oscilar entre valores básicos (navegación y mensajería) y mayores requerimientos (videoconferencias o transmisión multimedia en alta definición). De acuerdo con DS. N° 003-2025-MTC (2025), que aprueba el reglamento de la Ley N.° 31809, ley para el fomento de un Perú conectado, en su Capítulo V, artículo 10, una conexión se considera de banda ancha únicamente si cumple de manera concurrente con las siguientes condiciones:

- a. Respetar los parámetros de velocidad mínima establecidos.
- b. Utilizar tecnologías de nueva generación.
- c. Uso de la infraestructura de acceso que soporte dichas tecnologías.

Bajo este marco, el presente estudio plantea un análisis de radioenlaces como alternativa tecnológica para garantizar la conectividad de los centros poblados de San Pedro y Las Vegas, permitiendo que cada usuario disponga de una conexión validada por OSIPTEL (2020), en términos de calidad y velocidad. Para tal fin, se han identificado puntos estratégicos de instalación de antenas considerando dos criterios fundamentales: la disponibilidad de suministro eléctrico y la ubicación en zonas elevadas que aseguren línea de vista punto a punto (PtP), lo cual contribuye a la reducción de costos de implementación y a la mejora en la eficiencia de la transmisión, se proponen los siguientes enlaces principales:

- Antena Emisora – San Pedro
- Antena Emisora – Las Vegas

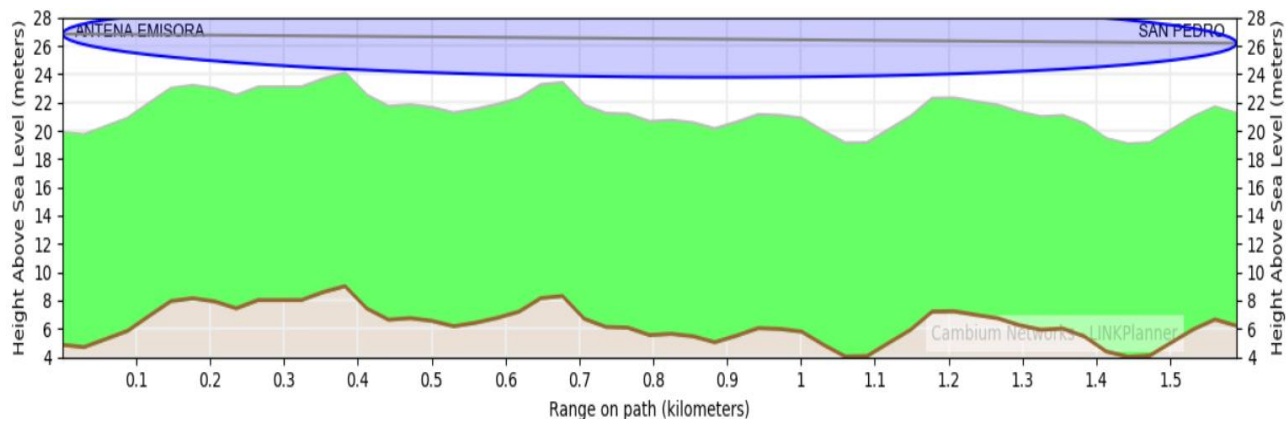
Además, se evaluará el número de usuarios finales potenciales en cada centro poblado, a fin de dimensionar de manera precisa la capacidad de los enlaces y garantizar que el sistema propuesto responda a las necesidades reales de conectividad de la comunidad.

3.1.1 Enlace Antena Emisora – San Pedro mediante WiMAX 5.8 GHz (Simulación en LinkPlanner)

Para la implementación del sistema se ha considerado la configuración en la banda de 5,8 GHz con un ancho de canal de 20 MHz, empleando antenas Cambium PTP 670. Este tipo de enlace inalámbrico presenta la capacidad de operar de manera adaptativa, ajustando su modulación en función de la calidad de la señal recibida, lo que le confiere robustez y eficiencia en diversos escenarios de propagación.

Figura 9.

Enlace Antena Emisora - San Pedro



En condiciones desfavorables, el sistema puede trabajar en BPSK 0.63 Sngl, alcanzando un rendimiento bruto aproximado de 12 Mbps, lo que permite mantener la conexión aun cuando la relación señal/ruido (SNR) se encuentra en rangos bajos de 3 a 6 dB, garantizando la continuidad del enlace. En contraste, bajo condiciones óptimas de propagación y alineación, el sistema escala hasta 256-QAM 0.81, logrando un rendimiento bruto cercano a 100 Mbps. Esta capacidad de modulación adaptativa asegura que el enlace mantenga niveles de operación estables, incrementando la modulación cuando el entorno es favorable y reduciéndola a esquemas más robustos (QPSK o BPSK) en presencia de interferencia, ruido o desalineación.

De este modo, el diseño propuesto no solo asegura la viabilidad de la conexión en escenarios rurales con condiciones cambiantes, sino que también optimiza el uso del espectro y la eficiencia en la transmisión de datos, aspectos fundamentales para garantizar la conectividad sostenible en los centros poblados de San Pedro y Las Vegas.

Tabla 5

Configuración de enlace

Region and Equipment Selection							
Band	Product	Regulation	Precise Network Timing				
5.8 GHz	PTP670	Peru (preliminary)	Disabled				

PTP670 Configuration								
Bandwidth	E1/T1	Optimization	Sync	Symmetry	Dual Payload	Highest Mod Mode	Lowest Ethernet Mode	Master
20 MHz	None	IP	Disabled	Symmetric	Enabled	256QAM 0.81	BPSK 0.63 Sngl	ANTENA EMISORA

Tabla 6

Resultados de simulación en Antena Emisora

Performance to ANTENA EMISORA	
Predicted Receive Power :	-35 dBm $\pm$ 5 dB
Mean IP Predicted :	99.80 Mbps
Mean IP Required :	5.0 Mbps
% of Required IP :	1996 %
Min IP Required :	1.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Con la configuración propuesta en 5,8 GHz y 20 MHz de ancho de canal, el enlace punto a punto presenta una potencia recibida estimada de -35 dBm en la estación terminal, valor que se considera excelente para un radioenlace de microondas al proporcionar un margen de desvanecimiento holgado frente a variaciones por multiproyecto, lluvia ligera o desalineaciones menores. En estas condiciones, el rendimiento bruto proyectado del sistema se sitúa en el intervalo ≈ 5 Mbps a 99,8 Mbps, en función de la modulación adaptativa (de esquemas robustos tipo BPSK/QPSK hasta 256-QAM en escenarios favorables).

La herramienta de modelado arrojó una disponibilidad teórica del 100 %; no obstante, a efectos de diseño y operación se asume de forma conservadora un objetivo $\geq 99,9$ %, reconociendo que condiciones ambientales y de interferencia pueden introducir indisponibilidades residuales.

La distancia enlazada es del orden de 1,6 km. En una evaluación preliminar se identificó riesgo de obstrucción por vegetación para la primera zona de Fresnel con alturas por debajo de lo recomendado; el análisis altimétrico con Google Earth evidenció que una elevación de 10 m en ambos extremos asegura línea de vista (LOS) y despeje Fresnel suficiente para el caso base. Para la corrida de simulación y con el fin de maximizar el margen radioeléctrico, se adoptó una configuración más exigente: antena emisora con reflector parabólico dual-polar RDH4510C a 22 m y antena receptora dual-polar RDH4509C a 20 m. Esta disposición incrementa el despeje de la zona de Fresnel (en un enlace de 1,6 km a 5,8 GHz, el radio del primer lóbulo en el punto medio es $\approx 4,5$ m; el criterio del 60 % exige $\approx 2,7$ m libres sobre obstáculos),

reduce pérdidas por difracción y mejora la relación señal-ruido (SNR) efectiva, favoreciendo el sostenimiento de modulaciones altas (p. ej., 256-QAM) y, por ende, mayor throughput útil.

Cabe indicar que, la potencia recibida de -35 dBm, las alturas de torre seleccionadas y el perfil de antenas dual-polar permiten sostener un enlace altamente confiable a 1,6 km, con capacidad dinámica entre ≈ 5 y 100 Mbps brutos según las condiciones del canal. Estos resultados respaldan la viabilidad técnica del radioenlace para los CP San Pedro y Las Vegas, y orientan la definición de políticas de QoS y planes de crecimiento como el ancho de canal, sectores adicionales o agregación, conforme se incremente la demanda comunitaria.

Tabla 7
Configuración de antena

ANTENA EMISORA	SAN PEDRO
Cambium Networks 4ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4510C (35.0dBi)	Cambium Networks 3ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4509C (32.6dBi)
Antenna Height : 22.0 meters (Max height at site is 20.0 m)	Antenna Height : 20.0 meters (Max height at site is 20.0 m)
Spatial Diversity : ☐	Spatial Diversity : ☐
Cable Loss : 1.0 dB ☐ Calculate	Cable Loss : 1.0 dB ☐ Calculate
Maximum EIRP : 45.0 dBm ☐ User limit	Maximum EIRP : 42.6 dBm ☐ User limit
Maximum Power : 11.0 dBm ☐ User limit	Maximum Power : 11.0 dBm ☐ User limit
☐ Interference :	☐ Interference :
MAC Address :	MAC Address :

Con respecto a la configuración propuesta, los resultados obtenidos evidencian la viabilidad técnica del radioenlace entre los centros poblados de San Pedro y Las Vegas.

Tabla 8
Resultado de Simulación

Link Summary	
Aggregate IP Throughput : 199.60 Mbps	
Lowest Mode Availability : 100.0000 %	
System Gain Margin :	56.61 dB
Free Space Path Loss :	111.74 dB
Gaseous Absorption Loss :	0.02 dB
Excess Path Loss :	0.00 dB
Total Path Loss :	111.76 dB

Los resultados obtenidos en la simulación permiten analizar parámetros críticos como el throughput agregado, las pérdidas de ruta y el margen de ganancia, indicadores fundamentales para determinar la calidad y confiabilidad del enlace diseñado.

En primer lugar, el throughput total del enlace alcanzó un valor de 199,60 Mbps, evidenciando una capacidad de transmisión adecuada para aplicaciones que demandan alto ancho de banda, tales como videoconferencia, transmisión de datos en tiempo real y servicios de voz sobre IP. Este rendimiento confirma la factibilidad del sistema para cubrir las necesidades de los centros poblados de San Pedro y Las Vegas, superando ampliamente los umbrales mínimos establecidos por las normativas nacionales para conexiones de banda ancha.

En cuanto a la disponibilidad del servicio, la simulación reportó un valor de 100 %, lo cual implica que, incluso en condiciones de propagación desfavorables, el enlace se mantiene continuo y estable. Este nivel de confiabilidad es especialmente relevante en entornos rurales, donde la resiliencia del sistema constituye un requisito esencial para garantizar la continuidad de servicios educativos, administrativos y de salud, el margen de ganancia calculado fue de 56,61 dB, indicador que refleja una señal robusta, capaz de compensar pérdidas ocasionadas por interferencias, atenuaciones o variaciones en el entorno. Dicho margen confirma que el diseño propuesto está sobredimensionado en términos de seguridad radioeléctrica, favoreciendo la estabilidad de la conexión a lo largo del tiempo.

Respecto a las pérdidas de propagación, se identificó una pérdida por espacio libre de 111,74 dB, valor característico en enlaces de microondas de media distancia, influenciado principalmente por la separación entre las estaciones y las propiedades de las antenas empleadas. A este valor se adiciona una pérdida por absorción gaseosa mínima de 0,02 dB, lo que demuestra que las condiciones atmosféricas ejercen un impacto prácticamente irrelevante en la calidad del enlace a la frecuencia de 5,8 GHz. En conjunto, la pérdida total de ruta se estimó en 111,76 dB, cifra que, al ser compensada con el margen de ganancia disponible, asegura la eficiencia global del sistema y respalda la viabilidad de la propuesta tecnológica para los centros poblados en estudio.

Figura 10

Resultados de capacidad y disponibilidad del enlace en la Antena Emisora y en el Centro Poblado San Pedro

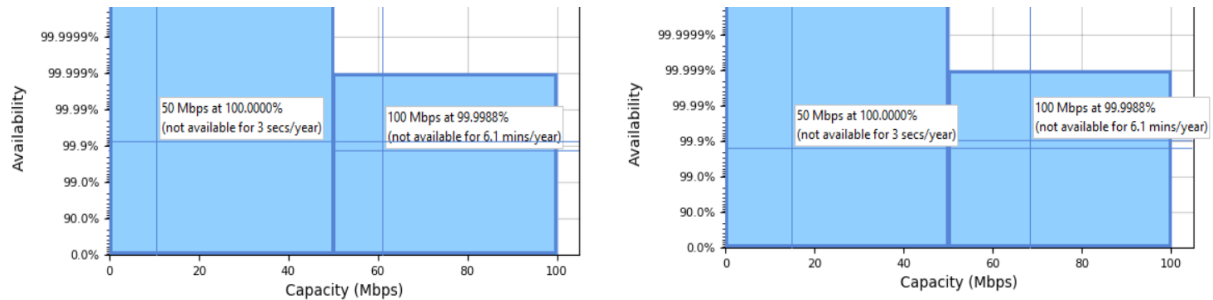


Tabla 9

Resultados de Throughput, Margen de Desvanecimiento y Disponibilidad según Esquema de Modulación

Common details													
Mode:	256QAM	64QAM	64QAM	16QAM	16QAM	256QAM	64QAM	64QAM	16QAM	16QAM	QPSK	QPSK	BPSK
Code Rate:	0.81	0.82	0.75	0.87	0.83	0.81	0.92	0.75	0.87	0.83	0.87	0.83	0.83
Payloads:	Dual	Dual	Dual	Dual	Dual	Single	Single	Single	Single	Single	Single	Single	Single
Max Aggregate IP Throughput (Mbps):	199.80	168.17	137.42	106.91	76.86	99.80	84.08	68.71	53.45	38.43	26.73	19.21	9.81
Performance to ANTENA EMISORA													
Max IP Throughput (Mbps):	99.80	84.08	68.71	53.45	38.43	49.90	42.04	34.36	26.73	19.21	13.36	9.81	4.80
Fade Margin (dB):	20.59	24.32	28.45	31.57	35.20	24.24	27.62	31.57	34.64	39.15	41.47	45.49	48.60
Mode Availability (%):	99.9988	99.9988	99.9988	99.9988	99.9988	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000
Receive Time in Mode (%):	99.9988	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Performance to SAN PEDRO													
Max IP Throughput (Mbps):	99.80	84.08	68.71	53.45	38.43	49.90	42.04	34.36	26.73	19.21	13.36	9.81	4.80
Fade Margin (dB):	18.59	22.32	26.45	29.57	33.20	22.24	25.62	29.57	32.64	37.15	39.47	43.49	46.60
Mode Availability (%):	99.9988	99.9988	99.9988	99.9988	99.9988	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000
Receive Time in Mode (%):	99.9988	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 10

Rendimiento del Enlace en la Antena Emisora según Esquema de Modulación

Modulación	Throughput Máximo (Mbps)	Margen de Desvanecimiento (dB)	Disponibilidad del Modo (%)	Tiempo de Recepción en Modo (%)
256QAM	99.80	20.59	99.9988	99.9988
64QAM	84.00	24.24	99.9988	99.9988
16QAM	68.71	28.45	99.9988	99.9988
8QAM	53.43	31.57	99.9988	99.9988
QPSK	38.43	36.20	99.9988	99.9988

Con los resultados obtenidos, se confirma que el sistema puede garantizar un rango de capacidad efectiva entre 50 y 100 Mbps, lo cual resulta suficiente para atender de manera simultánea a un promedio estimado de 20 usuarios activos en los centros poblados en estudio. Este nivel de rendimiento asegura la estabilidad del enlace y permite mantener un control eficiente de la conectividad, respondiendo de manera adecuada a las demandas de tráfico de la comunidad.

Tabla 11

Rendimiento del Enlace en San Pedro según Esquema de Modulación

Modulación	Throughput Máximo (Mbps)	Margen de Desvanecimiento (dB)	Disponibilidad del Modo (%)	Tiempo de Recepción en Modo (%)
256QAM	99.80	18.59	100.0000	100.0000
64QAM	84.00	22.24	100.0000	100.0000
16QAM	68.71	25.62	100.0000	100.0000
8QAM	53.57	29.57	100.0000	100.0000
QPSK	38.43	32.44	100.0000	100.0000

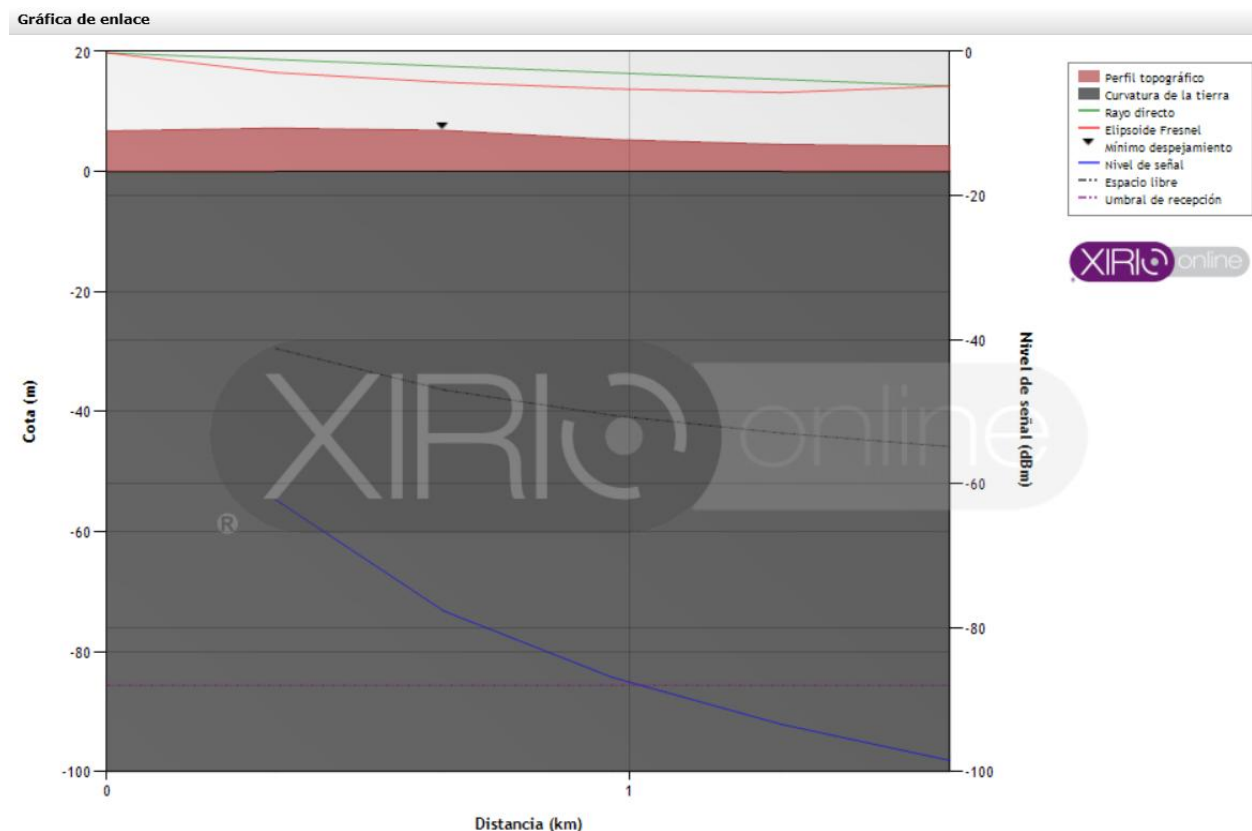
Los resultados obtenidos evidencian que el enlace presenta un nivel de confiabilidad elevado, alcanzando una disponibilidad de modo entre 99,9988 % y 100 % en todos los escenarios simulados. Se observa que, conforme se reduce el orden de modulación, el throughput máximo tiende a disminuir; sin embargo, el margen de desvanecimiento aumenta, lo que permite que el sistema mantenga una transmisión estable incluso en condiciones de señal debilitada o presencia de interferencias. En contraste, las modulaciones de orden superior, como 256-QAM, ofrecen mayores capacidades de transmisión de datos, aunque su desempeño depende de la existencia de un entorno radioeléctrico más favorable, caracterizado por baja interferencia y alta intensidad de señal. Estos resultados reflejan la adaptabilidad del enlace frente a diferentes condiciones de propagación y refuerzan la viabilidad técnica del diseño propuesto para los centros poblados de San Pedro y Las Vegas.

3.1.2 Simulación del Enlace mediante WiMAX 5.8 GHz en Xirio

Al utilizar las mismas coordenadas de los enlaces, con una configuración de antenas instaladas a 10 metros de altura sobre el nivel del suelo, los resultados de la simulación indican que no se presentan interferencias significativas. Sin embargo, al emplear la herramienta LinkPlanner, se evidenció una mayor interferencia, lo que resalta la importancia de realizar siempre una verificación topográfica complementaria para contrastar y validar los resultados obtenidos. En este escenario, se implementó la simulación con antenas WiMAX de 17,3 dBi y 65° de apertura, obteniéndose un desempeño favorable en la evaluación topográfica, lo que respalda la factibilidad técnica del enlace en las condiciones analizadas.

Figura 11

Perfil Topográfico y Desempeño del Enlace en Xirio



En la simulación realizada se obtuvo un nivel de señal de $-64,24$ dBm a una distancia de $1,612$ km, lo que permitió alcanzar una tasa de transmisión de 100 Mbps, resultado que valida y refuerza los valores previamente calculados mediante la herramienta LinkPlanner. Este desempeño confirma la viabilidad técnica del enlace bajo las condiciones topográficas y de configuración establecidas, dado que se cumplen los requisitos esenciales para una operación eficiente: la existencia de línea de vista directa (LOS) entre los extremos del enlace, la libertad de obstrucciones completo del primer elipsoide de Fresnel, la ausencia de obstáculos físicos que comprometan la propagación de la señal y la obtención de un nivel de potencia por encima del umbral de recepción. Estos factores garantizan la estabilidad del sistema, una adecuada relación señal/ruido y una baja probabilidad de errores en la transmisión, lo cual respalda la implementación de un enlace confiable y sostenible para los centros poblados en estudio.

Tabla 12

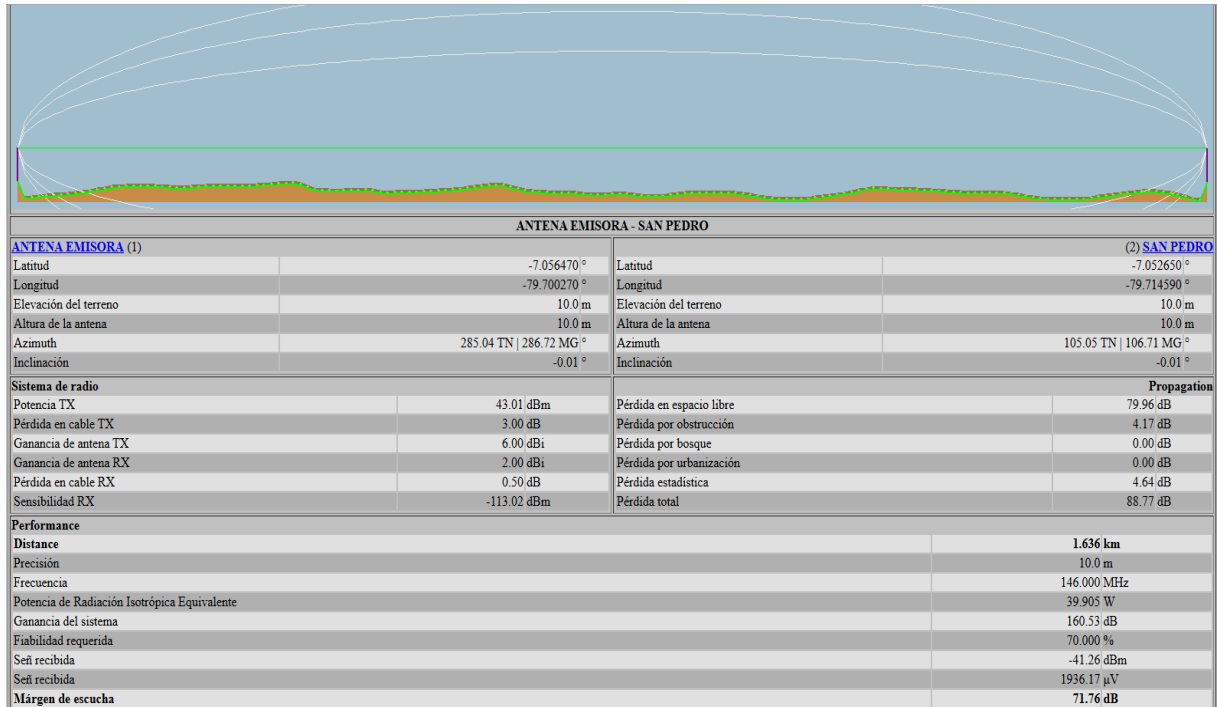
Parámetros Técnicos del Enlace: Resultados de la Simulación

Parámetro	Valor	Unidad / Descripción
Distancia del Enlace	1.6	km
Altura de la antena transmisora	10	m
Zona de Fresnel despejada	100%	No hay obstrucción
Existencia de línea de vista (LOS)	Sí	Confirmada
Nivel de señal recibido	~ -72	dBm
Umbral de recepción	-84	dBm
Margen sobre umbral	~ 12	dB
Libre obstrucciones mínimo cumplido	Sí	Línea de vista
Obstrucción topográfica	No	El perfil del terreno no intercepta el rayo directo

3.1.3 Simulación de Enlaces mediante Tecnología TVWS

Figura 12

Simulación de Enlaces mediante Tecnología TVWS



Como método de validación, se realizó una simulación complementaria utilizando las mismas características de diseño. Los resultados evidenciaron una garantía de disponibilidad del 70 %, con ambas antenas instaladas a 10 metros de altura sobre el nivel del terreno, una ganancia de 6,00 dBi en la antena transmisora y 2,00 dBi en la receptora. La potencia de transmisión (TX) fue configurada en 43,01 dBm (20 W), considerando pérdidas por cable de 3,00 dB en el transmisor y 0,50 dB en el receptor.

El análisis determinó una pérdida total por propagación de 88,77 dB, integrada por pérdida en espacio libre (79,96 dB), obstrucciones menores (4,17 dB) y un componente estadístico (4,64 dB). No se identificaron pérdidas adicionales asociadas a vegetación o urbanización, lo que confirma la existencia de un entorno limpio para la propagación electromagnética.

El nivel de señal recibido fue de $-41,26$ dBm, valor significativamente superior a la sensibilidad del receptor ($-113,02$ dBm), lo que generó un margen de escucha de $71,76$ dB. Este resultado representa un desempeño sobresaliente y altamente confiable del enlace, incluso bajo condiciones desfavorables. En consecuencia, la configuración adoptada garantiza una fiabilidad del 70 %, la cual puede optimizarse mediante ajustes menores en altura de antena o potencia de transmisión en caso de requerirse mayor disponibilidad, además, la simulación demostró que el enlace diseñado es técnicamente sólido y robusto frente a pérdidas, con capacidad suficiente para aplicaciones que demandan transmisión de datos en entornos rurales o semiurbanos. Se estima que el throughput mínimo alcanzable es de aproximadamente 7 Mbps, valor que asegura continuidad en la prestación de servicios básicos de comunicación y acceso a información.

Figura 13

Configuración de Enlace Punto a Punto (PTP) bajo el Estándar IEEE 802.11

Region and Equipment Selection						
Band	Product	Remote Product	Regulation	ePMP PTP Mode		
2.4 GHz	ePMP 1000 (retired)	ePMP 1000 (retired)	Peru	PTP		

ePMP Configuration						
Bandwidth	DL/UL Ratio	Frame Period	Maximum Mod Mode	Guard Interval	Master	Gb Ethernet Port
20 MHz	50/50	5 ms	MCS15 (64QAM 0.83)	Short	ANTENA EMISORA	None

Con la configuración en la banda de 2,4 GHz y un ancho de canal de 20 MHz, el sistema presenta la ventaja de no requerir una antena de distribución adicional, dado que la antena emisora cumple la función principal de transmisión. En este esquema, la cobertura se optimiza mediante el apoyo de repetidores estratégicamente ubicados, lo que permite extender la señal hacia las áreas de interés sin necesidad de implementar infraestructura de distribución más compleja. Esta

característica representa una alternativa eficiente y de bajo costo para entornos rurales, donde resulta prioritario garantizar la conectividad con un diseño sencillo y técnicamente sostenible.

Tabla 13
Parámetros de Configuración del Enlace Punto a Punto

Parámetro	Valor seleccionado
Banda de frecuencia	2.4 GHz
Producto utilizado	ePMP 1000 (retirado)
Regulación nacional	Perú
Modo de operación	PTP (Punto a Punto)
Ancho de banda	20 MHz
Relación DL/UL	50/50
Periodo de trama	5 ms
Modo de modulación máx.	MCS15 (64QAM 0.83)
Intervalo de guarda	Corto
Rol del equipo maestro	Antena emisora
Puerto Ethernet Gb	No habilitado

Figura 14
Radiación del Enlace entre la Antena Emisora y San Pedro

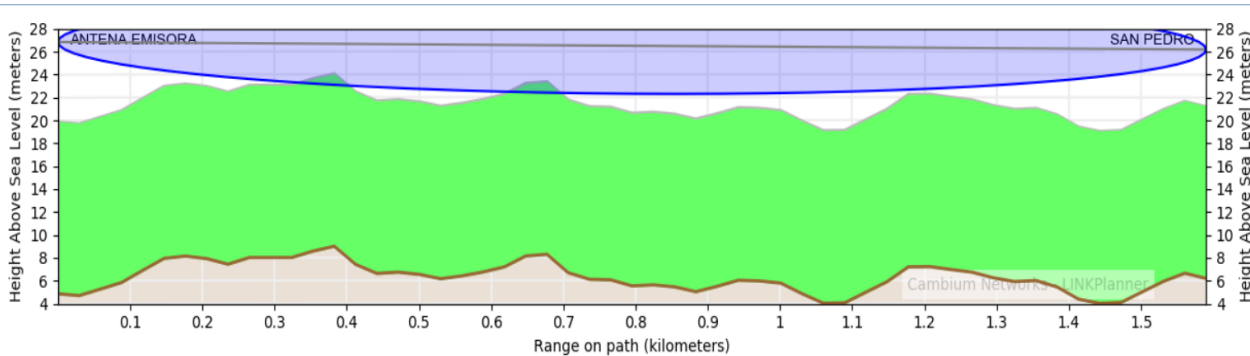


Tabla 14

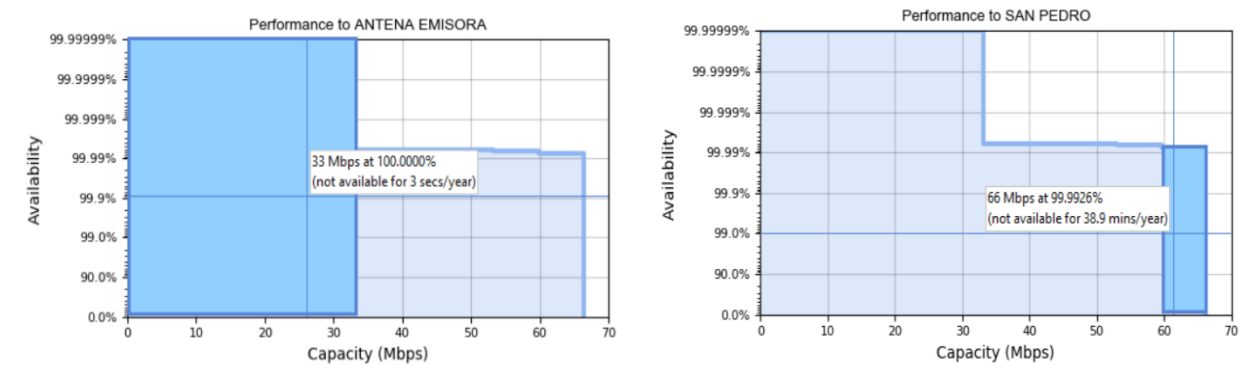
Resultados de Simulación del Desempeño del Enlace entre la Antena Emisora y San Pedro

Performance to ANTENA EMISORA		Performance to SAN PEDRO	
Predicted Receive Power : -60 dBm ± 8 dB		Predicted Receive Power : -60 dBm ± 8 dB	
Mean IP Predicted :	66.48 Mbps	Mean IP Predicted :	66.21 Mbps
Mean IP Required :	5.0 Mbps	Mean IP Required :	5.0 Mbps
% of Required IP :	1330 %	% of Required IP :	1324 %
Min IP Required :	1.0 Mbps	Min IP Required :	1.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %	Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %	Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

En este caso, la simulación muestra una capacidad de transmisión de 66,21 Mbps, resultado atribuible al uso de bandas bajas, las cuales permiten una señal más robusta y estable frente a condiciones adversas de propagación. Este comportamiento confirma la ventaja de emplear frecuencias menores en entornos rurales, ya que favorecen una mayor penetración y resiliencia de la señal, garantizando la continuidad del servicio

Figura 15

Resultados de Capacidad y Disponibilidad del Enlace en la Antena Emisora y en San Pedro



3.1.4 Enlace San Pedro - Usuarios Potenciales

Figura 16

Configuración de Antena Omnidireccional en el Enlace de San Pedro

Region and Equipment Selection											
Band	Product	Country	Sync Input	Encryption Variant							
5.8 GHz	PMP450i	Other	Generate Sync	AES							
PMP450i Configuration											
Bandwidth	Color Code	Adjacent Channel Support	Range Units	SM Range	Frame Period	Max Registrations Allowed	Downlink Data	Contention Slots	Effective Contention Slots	Broadcast Repeat Count	Total Virtual Circuits
30 MHz	0	Disabled	kilometers	0.270 km	2.5 ms	238	50 %	3	3	0	40
Max: 1 mi.											
Antenna Configuration											
Antenna Selection				Modeled Beamwidth	Antenna Height	Antenna Azimuth	Antenna Tilt	Cable Loss			
KP Performance Antennas 360° KP Omni Antenna KPPA-5GHZ-DPOMA				360 °	16.0 meters	236 °	0 °	Calc Tilt 0.8 dB			
(Max height at site is 20.0 m)											
Power											
EIRP	Power	User Limit	SM Receive Target Level	AP Interference?	Default SM Interference?						
40.0 dBm	27.0 dBm		-56 dBm								
(Max Power is 27.0 dBm)											

Para el diseño del sistema se empleó el equipo Cambium PMP450i, operando en la banda de 5,8 GHz bajo una configuración de despliegue punto a multipunto (PMP) de corta distancia, orientado a brindar alto rendimiento a múltiples estaciones de usuario en un entorno rural. Se estableció un ancho de canal de 30 MHz con un período de trama de 2,5 ms, con el objetivo de mantener niveles de latencia reducidos y favorecer aplicaciones de tiempo real. El sistema fue configurado con una capacidad de hasta 238 usuarios registrados, aunque el diseño específico contempla un máximo de 35 clientes activos, lo que asegura un dimensionamiento eficiente y realista en función de la demanda local.

Para la transmisión se utilizó una antena omnidireccional de 360° (modelo KPPA-5GHZ-DPOMA), instalada a una altura de 20 metros en la simulación para evitar errores de validación del software. Sin embargo, el análisis técnico demuestra que una altura de 10 metros resulta suficiente para garantizar la libertad de obstrucciones del primer elipsoide de Fresnel y mantener la calidad del enlace, lo que reduce costos de implementación sin afectar el desempeño. Esta

configuración permite una cobertura uniforme en el área de servicio, siendo adecuada para escenarios donde los usuarios se encuentran distribuidos radialmente alrededor del punto de acceso.

La potencia se configuró con una transmisión de 27 dBm, alcanzando una potencia radiada efectiva (EIRP) de 40 dBm, considerando una pérdida por cable de 0,8 dB. Asimismo, el nivel de señal objetivo en los módulos de suscriptor se fijó en -56 dBm, lo que posibilita el uso de modulaciones de orden superior y asegura un enlace robusto y estable. Finalmente, se consideró un total de 35 usuarios activos, tomando en cuenta que la presencia de vegetación cercana puede generar ligeras variaciones en la propagación; no obstante, con una altura de torre de 2 metros por encima del nivel de interferencia de plantas, se garantiza que el sistema opere sin inconvenientes significativos.

Figura 17

Enlace San Pedro – Usuario San Pedro 01

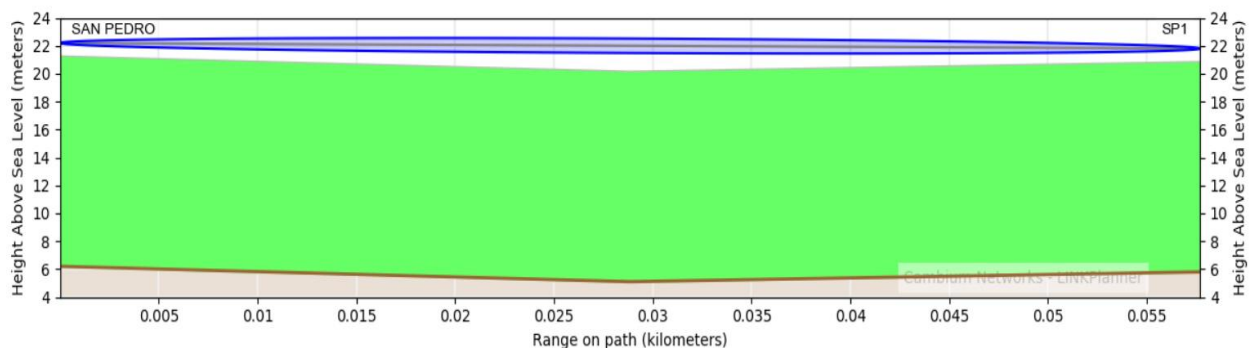


Figura 18

Enlace San Pedro – Usuario San Pedro 02

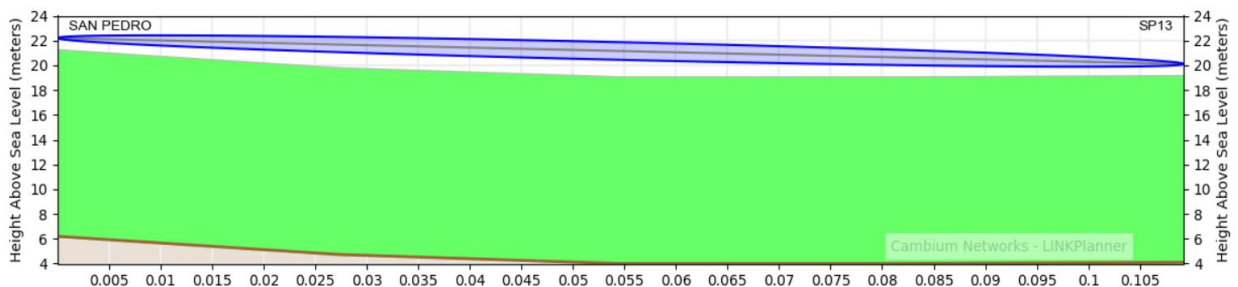


Figura 19

Enlace San Pedro – Usuario San Pedro 03

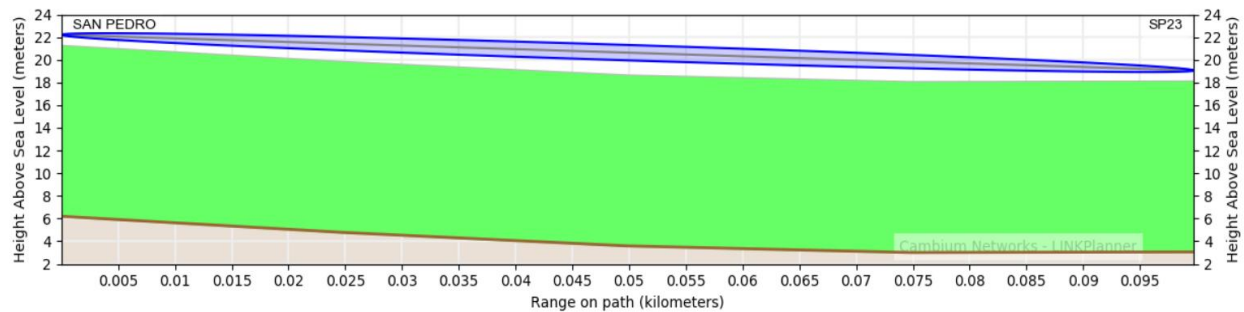


Tabla 15

Registro de Estaciones de Suscriptor en San Pedro – Posibles Clientes

SM Name	Product	SM Latitude	SM Longitude	SM Height (m)	SM Antenna
SP33	PMP 450b Omni	07.05291S	079.71624W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP32	PMP 450b Omni	07.05290S	079.71617W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP31	PMP 450b Omni	07.05290S	079.71610W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP30	PMP 450b Omni	07.05286S	079.71602W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP29	PMP 450b Omni	07.05284S	079.71593W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP34	PMP 450b Omni	07.05257S	079.71570W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP28	PMP 450b Omni	07.05281S	079.71568W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP35	PMP 450b Omni	07.05252S	079.71564W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP27	PMP 450b Omni	07.05280S	079.71563W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP36	PMP 450b Omni	07.05255S	079.71557W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP19	PMP 450b Omni	07.05279S	079.71549W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP18	PMP 450b Omni	07.05276S	079.71544W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP37	PMP 450b Omni	07.05253S	079.71544W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP21	PMP 450b Omni	07.05275S	079.71534W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP17	PMP 450b Omni	07.05329S	079.71533W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP20	PMP 450b Omni	07.05273S	079.71527W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP222	PMP 450b Omni	07.05279S	079.71519W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP38	PMP 450b Omni	07.05247S	079.71513W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP15	PMP 450b Omni	07.05329S	079.71511W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP40	PMP 450b Omni	07.05213S	079.71511W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP23	PMP 450b Omni	07.05271S	079.71501W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP24	PMP 450b Omni	07.05270S	079.71496W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP39	PMP 450b Omni	07.05242S	079.71495W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP16	PMP 450b Omni	07.05320S	079.71491W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP14	PMP 450b Omni	07.05326S	079.71489W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP13	PMP 450b Omni	07.05340S	079.71488W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP25	PMP 450b Omni	07.05269S	079.71484W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP12	PMP 450b Omni	07.05340S	079.71481W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP26	PMP 450b Omni	07.05266S	079.71475W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP11	PMP 450b Omni	07.05342S	079.71467W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP10	PMP 450b Omni	07.05378S	079.71465W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
SP7	PMP 450b Omni	07.05342S	079.71445W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna

Se empleó una configuración avanzada de radio punto a multipunto (PMP450i) operando en la banda de 5,8 GHz, con un ancho de canal de 20 MHz y soporte para modulaciones de orden superior (x8) en ambos sentidos, lo cual optimiza la capacidad de transmisión del sistema. La antena seleccionada corresponde a un modelo direccional de alta ganancia (23 dBi), instalada a una altura de 16 metros, garantizando una línea de vista despejada y reduciendo la probabilidad de interferencias en el enlace.

La configuración incorpora técnicas de MIMO (Multiple Input Multiple Output), lo que incrementa la eficiencia espectral y aporta mayor robustez frente a variaciones en el canal de propagación. Asimismo, se alcanzó una potencia radiada efectiva (EIRP) de 16 dBm, suficiente para cubrir de manera confiable el área de servicio. El rango operativo estimado para las estaciones cliente es de 220 metros, valor adecuado para entornos urbanos y suburbanos donde se requieren conexiones estables y de alta velocidad.

Este diseño asegura enlaces de alta calidad y estabilidad, aptos para la prestación de servicios de banda ancha inalámbrica en escenarios con densidad de usuarios o presencia potencial de interferencias. Además, constituye una solución escalable y eficiente para la implementación de redes punto a multipunto, con capacidad de adaptarse a diferentes condiciones topográficas y de demanda.

Figura 20

Enlace San Pedro – Usuario SP10

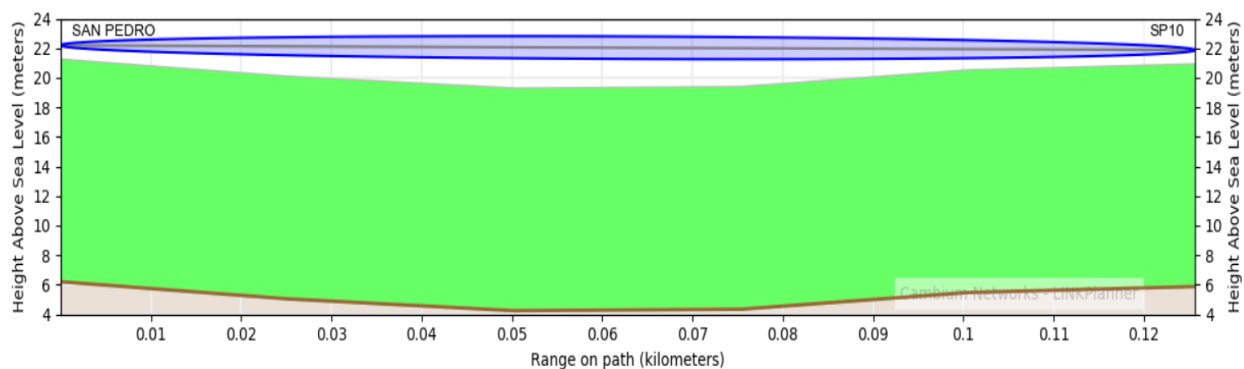


Figura 21

Resultados de Simulación del Enlace entre San Pedro y el Usuario SP10

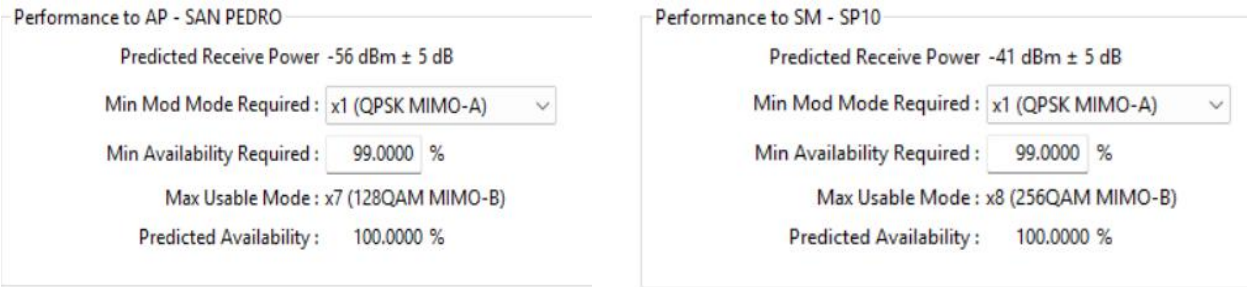


Tabla 16

Resumen de Resultados del Enlace Simulado

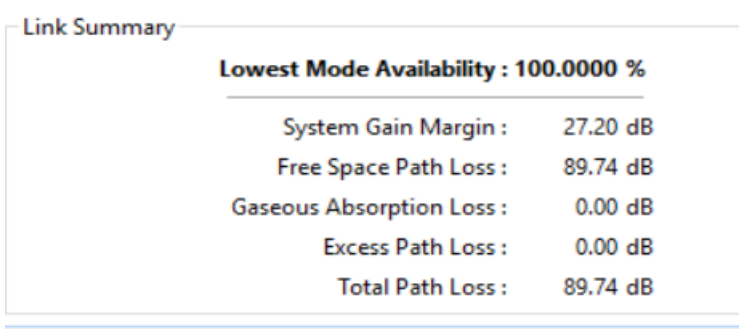


Tabla 17

Resultados de la Simulación del Enlace: Parámetros Técnicos e Interpretación

Parámetro	Valor	Interpretación
Disponibilidad del modo más bajo	100%	Garantiza conectividad continua en todo momento, incluso en condiciones críticas.
Margen de ganancia del sistema	27.20 dB	Valor alto, lo que indica una reserva robusta frente a pérdidas inesperadas o interferencias.
Pérdida por espacio libre	89.74 dB	Dentro de lo esperado para enlaces de corta a media distancia en condiciones de línea de vista (LOS).
Pérdida por absorción gaseosa	0.00 dB	No significativa en esta frecuencia (2.4 GHz), como es habitual.
Pérdidas adicionales	0.00 dB	No hay obstáculos en el trayecto ni degradación adicional.
Pérdida total de trayecto	89.74 dB	Coincide con la pérdida por espacio libre, confirmando un entorno limpio de interferencias físicas.

Tabla 18
Resultados de Simulación del Throughput Promedio por Modulación en el Enlace Punto a Multipunto

SMs per DL modulation				SMs per UL modulation				Total Mean Predicted Throughput	
x8 (256QAM MIMO-B)	35	100.0%	103.22 Mbps	x8 (256QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x8 (256QAM MIMO-B)	103.22 Mbps
x7 (128QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x7 (128QAM MIMO-B)	35	100.0%	90.32 Mbps	x7 (128QAM MIMO-B)	90.32 Mbps
x6 (64QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x6 (64QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x6 (64QAM MIMO-B)	0.00 Mbps
x5 (32QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x5 (32QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x5 (32QAM MIMO-B)	0.00 Mbps
x4 (16QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x4 (16QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x4 (16QAM MIMO-B)	0.00 Mbps
x3 (8QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x3 (8QAM MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x3 (8QAM MIMO-B)	0.00 Mbps
x2 (QPSK MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x2 (QPSK MIMO-B)	0	0.0%	0.00 Mbps	x2 (QPSK MIMO-B)	0.00 Mbps
x4 (256QAM MIMO-A)	0	0.0%	0.00 Mbps	x4 (256QAM MIMO-A)	0	0.0%	0.00 Mbps	x4 (256QAM MIMO-A)	0.00 Mbps
x3 (64QAM MIMO-A)	0	0.0%	0.00 Mbps	x3 (64QAM MIMO-A)	0	0.0%	0.00 Mbps	x3 (64QAM MIMO-A)	0.00 Mbps
x2 (16QAM MIMO-A)	0	0.0%	0.00 Mbps	x2 (16QAM MIMO-A)	0	0.0%	0.00 Mbps	x2 (16QAM MIMO-A)	0.00 Mbps
x1 (QPSK MIMO-A)	0	0.0%	0.00 Mbps	x1 (QPSK MIMO-A)	0	0.0%	0.00 Mbps	x1 (QPSK MIMO-A)	0.00 Mbps
Total				Total				Total	
								193.54 Mbps	

Parámetro	Valor
Número total de clientes	35
Modulación DL predominante	256QAM MIMO-B (x8) - 100%
Throughput DL total	103.22 Mbps
Modulación UL predominante	128QAM MIMO-B (x7) - 100%
Throughput UL total	90.32 Mbps
Throughput total estimado	193.54 Mbps

Tabla 19
Resumen de Parámetros de Simulación y Throughput Total Estimado del Enlace

El enlace punto a multipunto configurado para 35 clientes alcanzó un throughput total agregado de 193,54 Mbps. Con base en este resultado, se determinó el rendimiento promedio por usuario dividiendo la capacidad total entre el número de estaciones activas bajo las condiciones simuladas. De esta manera, cada usuario dispone de una capacidad aproximada de 5,53 Mbps para la transmisión y recepción de datos. Este valor corresponde a una estimación teórica y, en la práctica, puede experimentar variaciones asociadas a factores como la calidad de la señal, la presencia de interferencias y la asignación dinámica de ancho de banda entre los usuarios.

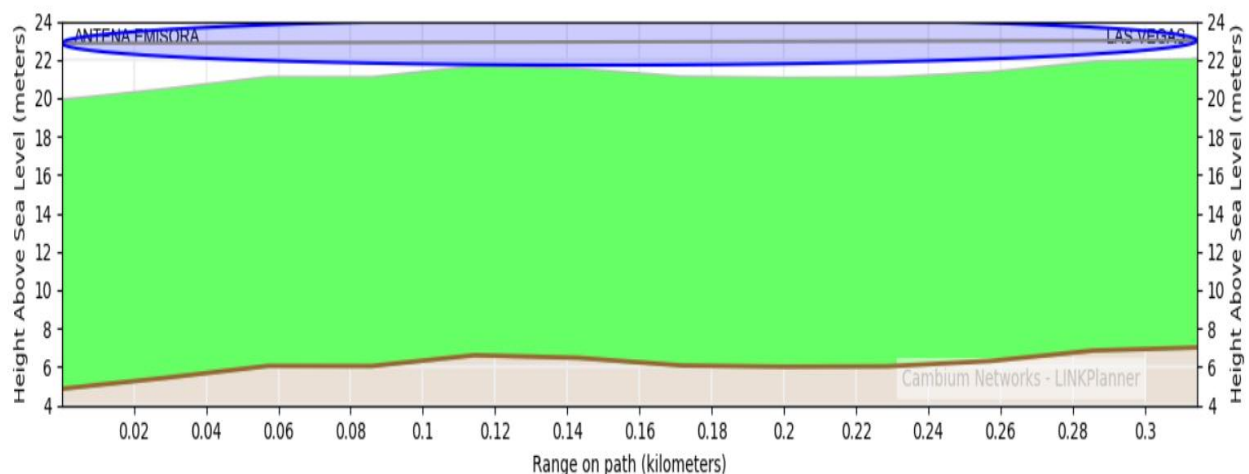
La capacidad promedio obtenida resulta adecuada para la mayoría de aplicaciones de uso cotidiano, entre ellas la navegación en internet, la transmisión de video en calidad estándar y el acceso a redes sociales, asegurando así una experiencia de usuario satisfactoria dentro del escenario de simulación planteado.

3.1.5 Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas: Simulación mediante WiMAX

5.8 GHz en LinkPlanner

Figura 22

Radiación del Enlace Antena Emisora - Centro Poblado Las Vegas



Con la configuración en la banda de 5,8 GHz, utilizando un ancho de canal de 20 MHz y antenas PTP 670, el enlace demuestra la capacidad de operar de manera adaptativa, ajustando su esquema de modulación en función de la calidad de la señal. En condiciones menos favorables, puede trabajar en BPSK 0.63 Sngl, alcanzando aproximadamente 20 Mbps brutos, lo que permite mantener la conectividad aun cuando la relación señal/ruido (SNR) se encuentra en rangos muy bajos, entre 3 y 6 dB. En contraste, bajo condiciones óptimas, el sistema escala hasta 256-QAM 0.81, logrando un rendimiento cercano a 100 Mbps brutos. Esta adaptación automática de la modulación asegura la continuidad del enlace, ya que incrementa la eficiencia cuando las condiciones son ideales y reduce la modulación a esquemas más robustos, como BPSK o QPSK, cuando existe presencia de ruido, interferencia o desalineación de antenas.

Figura 23
Configuración del Enlace con Antena PTP670 en la Banda de 5.8 GHz

Region and Equipment Selection

Band

Product

Regulation

Precise Network Timing

5.8 GHz

PTP670

Peru (preliminary)

Disabled

PTP670 Configuration

Bandwidth

E1/T1

Optimization

Sync

Symmetry

Dual Payload

Highest Mod Mode

Lowest Ethernet Mode

Master

20 MHz

None

IP

Disabled

Symmetric

Enabled

256QAM 0.81

BPSK 0.63 Sngl

ANTENA EMISORA

Figura 24
Resultados de Simulación del Enlace en la Antena Emisora

Performance to ANTENA EMISORA	
Predicted Receive Power :	-35 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	99.80 Mbps
Mean IP Required :	5.0 Mbps
% of Required IP :	1996 %
Min IP Required :	1.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

La simulación indica que la potencia de señal recibida en la antena emisora alcanza -35 dBm, valor considerado excelente para un enlace de microondas, ya que resulta suficientemente alto para asegurar la calidad y estabilidad de la transmisión. En estas condiciones, la capacidad estimada del enlace se encuentra en un rango que oscila entre 5 Mbps y 99,80 Mbps, con una predicción de disponibilidad del 100 %, lo que demuestra que se trata de un enlace altamente confiable.

El tramo de enlace presenta una distancia aproximada de 0,4 km, y aunque la configuración inicial no resultaba apropiada debido a la influencia de la vegetación sobre el rango efectivo, el análisis determinó que una altura de 10 metros en ambas antenas es suficiente para garantizar que se mantenga libre de obstrucciones la primera zona de Fresnel y mantener la continuidad del servicio. No obstante, para efectos de la simulación se adoptó una configuración más exigente, con una antena dual-polar parabólica RDH4510C de 20 metros en la estación emisora y una antena dual-polar parabólica RDH4509C de 18 metros en la estación receptora. Esta disposición asegura una mayor robustez frente a interferencias y contribuye a optimizar la calidad del enlace bajo las condiciones planteadas.

Figura 25

Resultados de la Configuración de Antenas en la Estación Emisora y en el Centro Poblado Las Vegas

ANTENA EMISORA	LAS VEGAS
Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29.1dBi)	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29.1dBi)
Antenna Height : 18.0 meters (Max height at site is 20.0 m)	Antenna Height : 16.0 meters (Max height at site is 30.0 m)
Spatial Diversity : ☐	Spatial Diversity : ☐
Cable Loss : 1.0 dB ☐ Calculate	Cable Loss : 1.0 dB ☐ Calculate
Maximum EIRP : 34.1 dBm ☐ User limit	Maximum EIRP : 34.1 dBm ☐ User limit
Maximum Power : 6.0 dBm ☐ User limit	Maximum Power : 6.0 dBm ☐ User limit
☐ Interference :	☐ Interference :
MAC Address :	MAC Address :

La configuración de las antenas parabólicas, con alturas optimizadas de 18,0 metros en la Antena Emisora y 16,0 metros en Las Vegas, garantiza una excelente línea de visibilidad y la minimización de posibles obstrucciones en el trayecto del enlace. Las pérdidas por cable de 1,0 dB se encuentran dentro de valores adecuados para este tipo de instalación, lo que asegura que la señal transmitida mantenga una alta calidad. Asimismo, el EIRP máximo de 34,1 dBm en ambos extremos del enlace proporciona una cobertura eficiente y un alcance robusto, aspectos fundamentales para garantizar la estabilidad y confiabilidad del sistema. Finalmente, la potencia de transmisión de 6,0 dBm se mantiene dentro de los límites regulatorios, lo cual resulta esencial tanto para el cumplimiento de las normativas locales como para la minimización de interferencias con otros sistemas de comunicación.

Con respecto a esta configuración, se obtuvo como resultado un enlace técnicamente sólido y confiable, capaz de garantizar la transmisión de datos con niveles de potencia adecuados y márgenes de seguridad suficientes. La combinación de alturas optimizadas en ambas antenas, junto con las pérdidas de cable controladas y el EIRP de 34,1 dBm, permitió alcanzar una cobertura estable y una capacidad de enlace consistente, cumpliendo con los requisitos normativos y asegurando un desempeño robusto frente a posibles variaciones de propagación o interferencias.

Tabla 20

Resultados del Enlace: Throughput Agregado y Parámetros de Pérdida

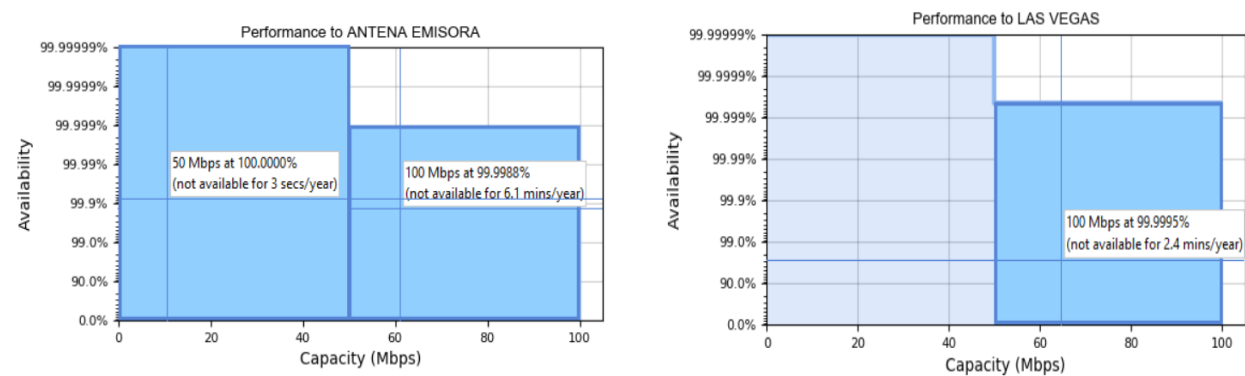
Link Summary	
Aggregate IP Throughput : 301.53 Mbps	
Lowest Mode Availability : 100.0000 %	
System Gain Margin :	54.60 dB
Free Space Path Loss :	97.65 dB
Gaseous Absorption Loss :	0.00 dB
Excess Path Loss :	0.00 dB
Total Path Loss :	97.65 dB

La simulación reporta que la disponibilidad del modo más bajo alcanza el 100 %, lo cual refleja un nivel de confiabilidad y estabilidad elevado en la operación del enlace bajo las condiciones analizadas. Asimismo, el margen de ganancia del sistema es de 54,60 dB, valor que proporciona una reserva amplia para compensar posibles pérdidas adicionales o interferencias presentes en el entorno de transmisión.

Respecto a la pérdida por espacio libre (Free Space Path Loss), esta se estimó en 97,65 dB, cifra que corresponde a la atenuación natural de la señal debido a la distancia y a las características del espacio libre. Los valores de absorción gaseosa (0,00 dB) y pérdidas excesivas (0,00 dB) evidencian que el escenario de propagación se encuentra relativamente libre de atenuaciones adicionales ocasionadas por factores atmosféricos o ambientales. De este modo, la pérdida total del enlace también se establece en 97,65 dB, valor que se encuentra dentro de los parámetros aceptables para mantener la calidad y estabilidad del sistema de comunicación inalámbrica.

Figura 26

Resultados de Simulación del Enlace: Capacidad y Disponibilidad en la Antena Emisora y en el Centro Poblado Las Vegas



Los gráficos presentados ofrecen una visión clara de la relación entre la disponibilidad del enlace y la capacidad de transmisión. Tanto el enlace hacia la Antena Emisora como el correspondiente al Centro Poblado Las Vegas evidencian un alto grado de fiabilidad, con

interrupciones mínimas a lo largo del año, lo que confirma que el sistema es apto para aplicaciones de misión crítica.

Se observa que el ligero ajuste en la disponibilidad al incrementarse el throughput a 100 Mbps responde a una optimización adecuada del diseño del enlace, en la que se logra un equilibrio entre capacidad de transmisión y confiabilidad operativa, garantizando estabilidad y desempeño sostenido en condiciones reales de funcionamiento.

Tabla 21
Resultados de Simulación del Enlace: Rendimiento por Esquema de Modulación en la Antena Emisora y en Las Vegas

Common details													
Mode:	256QAM	64QAM	64QAM	16QAM	16QAM	256QAM	64QAM	64QAM	16QAM	16QAM	QPSK	QPSK	BPSK
Code Rate:	0.81	0.92	0.75	0.87	0.83	0.81	0.92	0.75	0.87	0.83	0.87	0.83	0.83
Payloads:	Dual	Dual	Dual	Dual	Dual	Single	Single	Single	Single	Single	Single	Single	Single
Max Aggregate IP Throughput (Mbps):	199.80	168.17	137.42	106.91	78.88	99.80	84.08	68.71	53.45	38.43	28.73	19.21	9.61
Performance to ANTENA EMISORA													
Max IP Throughput (Mbps):	99.80	84.08	68.71	53.46	38.43	49.90	42.04	34.36	28.73	19.21	13.36	9.61	4.80
Fade Margin (dB):	28.35	32.09	36.21	39.34	42.96	32.01	35.38	39.34	42.40	46.91	49.23	53.26	56.36
Mode Availability (%):	99.9995	99.9995	99.9995	99.9995	99.9995	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000
Receive Time in Mode (%):	99.9995	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Performance to LAS VEGAS													
Max IP Throughput (Mbps):	99.80	84.08	68.71	53.46	38.43	49.90	42.04	34.36	28.73	19.21	13.36	9.61	4.80
Fade Margin (dB):	28.35	32.09	36.21	39.34	42.96	32.01	35.38	39.34	42.40	46.91	49.23	53.26	56.36
Mode Availability (%):	99.9995	99.9995	99.9995	99.9995	99.9995	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000
Receive Time in Mode (%):	99.9995	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 22
Resultados del Enlace: Parámetros de Modulación y Throughput en la Antena Emisora y Las Vegas

Parámetro	Antena Emisora	Las Vegas	Comentarios
Modulación	256QAM MIMO-B (DL), 128QAM MIMO-B (UL)	128QAM MIMO-B (DL y UL)	Modulación de alta capacidad (256QAM) en bajada, 128QAM en subida.
Máximo demanda	99.80 Mbps	84.08 Mbps	El throughput es mayor en DL hacia la antena emisora.
Margen de desvanecimiento	28.35 dB	28.35 dB	Garantiza estabilidad ante variaciones en el canal.
Disponibilidad del modo	99.9995%	99.9995%	Alta disponibilidad del modo en ambas direcciones
Tiempo de recepción en modo	99.9995%	99.9995%	Tiempo de recepción muy alto, lo que implica un enlace eficiente y continuo.
Total de throughput agregado	103.22 Mbps (DL)	90.32 Mbps (UL)	El throughput total se distribuye de manera eficiente entre la subida y la bajada.

Tabla 23

Resultados de Simulación del Enlace en el Centro Poblado Las Vegas

Performance to LAS VEGAS	
Predicted Receive Power :	-35 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	99.80 Mbps
Mean IP Required :	5.0 Mbps
% of Required IP :	1996 %
Min IP Required :	1.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

La potencia de recepción predicha es de $-35 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$, valor que asegura que la señal recibida en el extremo receptor se mantenga dentro de los niveles óptimos para enlaces de esta distancia y configuración, garantizando la calidad de la comunicación. El throughput promedio estimado alcanza los 99,80 Mbps, lo cual demuestra la capacidad del enlace para manejar grandes volúmenes de datos sin comprometer el rendimiento, incluso bajo condiciones de tráfico elevado.

El throughput mínimo requerido se fijó en 5,0 Mbps, ampliamente superado por el valor predicho, lo que representa un 1996 % de sobrecumplimiento. Este margen evidencia que el sistema está sobredimensionado en términos de capacidad, ofreciendo solidez frente a escenarios de alta demanda. Asimismo, el throughput mínimo garantizado es de 1,0 Mbps, lo que proporciona un margen de seguridad adicional para asegurar que el enlace no descienda por debajo de este nivel, incluso en condiciones adversas, en cuanto a la confiabilidad, la disponibilidad mínima requerida del 99,99 % fue superada por la disponibilidad mínima predicha del 100 %, lo cual confirma que el enlace puede operar de manera prácticamente continua, sin caídas o pérdidas de conectividad en condiciones normales. Con estos resultados se valida que el enlace garantiza capacidades de entre 5 Mbps y 100 Mbps, suficientes para atender de manera simultánea a

aproximadamente 40 usuarios, asegurando un control eficiente del tráfico y la estabilidad del sistema.

3.1.6 Simulación del Enlace mediante WiMAX 5.8 GH

Al emplear las mismas coordenadas del enlace con una configuración de antenas a 10 metros de altura sobre el suelo, los resultados obtenidos en la simulación muestran que no existe interferencia significativa. Este hallazgo contrasta con los valores obtenidos en LinkPlanner, donde se evidenciaba una mayor interferencia, lo que pone de manifiesto la importancia de verificar los resultados mediante un análisis topográfico detallado.

En este escenario, se emplearon antenas tipo WiMAX de 17,3 dBi y 65° de apertura, lo que permitió constatar en la simulación topográfica que las condiciones del terreno favorecen el correcto desempeño del enlace, garantizando la cobertura y reduciendo los riesgos de degradación de la señal.

Figura 27

Resultado Topográfico del Enlace Simulado en Xirio



En el gráfico se aprecia que la distancia total del enlace es de 0,313 km en el punto de referencia. La cota de las antenas se encuentra en 6,79 m al inicio del enlace, mientras que a los 0,313 km la cota disminuye a 5,96 m. Estos valores confirman que el despeje de la línea de vista (LOS) se mantiene adecuado a lo largo de toda la trayectoria del enlace. En el punto inicial (0 km) no se registra un nivel de señal, dado que el sistema aún no inicia la medición; sin embargo, en el extremo del enlace, a 0,313 km, se obtiene un nivel de señal de $-57,72$ dBm, valor que se ubica dentro de los parámetros aceptables para enlaces de esta naturaleza y que asegura la estabilidad de la conexión.

A medida que la distancia se incrementa, los resultados de la tabla muestran que el nivel de señal presenta una disminución gradual, lo cual responde al comportamiento esperado por el efecto de la atenuación en función de la distancia. Por ejemplo, a 1 km de separación, el nivel de señal cae hasta $-64,50$ dBm, valor que sigue siendo adecuado para enlaces operando en bandas de 2,4 GHz o 5 GHz, frecuencias en las que la señal suele ser más sensible a la atenuación, pero que aun así permiten garantizar una transmisión confiable.

Tabla 24

Informe de Enlace: Distancia, Cota y Nivel de Señal

Informe de enlace		
Distancia (km)	Cota (m)	Nivel de señal (dBm)
0	6.79	---
0.313	5.96	-57.72

Se obtuvo un nivel de señal de $-57,72$ dBm a una distancia de 0,313 km, valor que permitió alcanzar una tasa de transmisión de 100 Mbps, lo cual refuerza los resultados previamente estimados mediante la simulación en LinkPlanner.

Los valores presentados en la tabla confirman que, aun cuando la distancia se incrementa, la señal se mantiene estable sin registrar pérdidas críticas, lo que garantiza que el enlace pueda operar con baja latencia y alta confiabilidad. Estos resultados evidencian que el diseño planteado es viable para las distancias simuladas, ya que cumple con los requisitos de calidad de señal, disponibilidad y margen de seguridad necesarios para asegurar una conectividad confiable y continua en el escenario de implementación.

3.1.7 Enlace Antena Emisora - Centro Poblado Las Vegas mediante TVWS

Figura 28

Topografía y Parámetros Técnicos del Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas

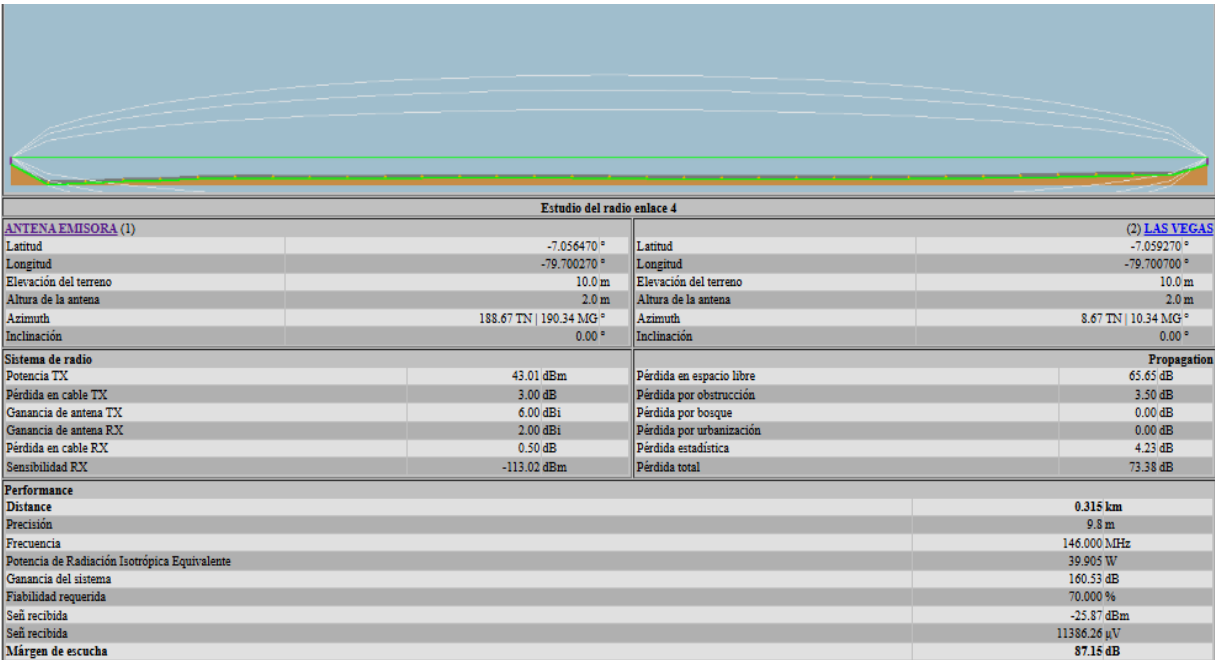


Tabla 25*Resultados de la Simulación del Enlace entre la Antena Emisora y el Centro Poblado Las Vega*

Parámetro	Antena Emisora	Las Vegas
Latitud	-7.056470°	-7.059727°
Longitud	-79.70270°	-79.70070°
Elevación del terreno	2.0 m	10.0 m
Altura de la antena	20.0 m	10.0 m
Azimut	188.67°	8.67°
Inclinación	0°	0°
Potencia de transmisión (TX)	43.01 dBm	43.01 dBm
Pérdida de cable (TX y RX)	6.00 dB (TX), 0.50 dB (RX)	6.00 dB (TX), 0.50 dB (RX)
Ganancia de las antenas (TX y RX)	12.00 dB (TX), 13.00 dB (RX)	12.00 dB (TX), 13.00 dB (RX)
Pérdida por espacio libre	65.65 dB	65.65 dB
Pérdida por obstrucción	0.00 dB	0.00 dB
Pérdida por vegetación	0.00 dB	0.00 dB
Pérdida por atenuación	0.00 dB	0.00 dB
Pérdida estadística	0.00 dB	0.00 dB
Pérdida total	73.35 dB	73.35 dB
Distancia	0.315 km	0.315 km
Frecuencia	146.000 MHz	146.000 MHz
Ancho de banda	39.95 W	39.95 W
Nivel de señal recibido (RX)	-25.68 dBm	-25.68 dBm
Margen de escucha	87.15 dB	87.15 dB

Como método de confirmación se efectuó una simulación empleando la banda de 146 MHz (TVWS), manteniendo las mismas características del diseño base. Las antenas fueron instaladas a una altura de 2 metros sobre un terreno con 10 metros de elevación, utilizando una potencia de transmisión de 43,01 dBm y antenas con ganancia de 6 dBi en el emisor y 2 dBi en el receptor.

El análisis determinó una pérdida total por propagación de 73,03 dB, atribuida principalmente a la pérdida en espacio libre, además de un margen estadístico de 7,38 dB, sin que se registraran obstrucciones en el trayecto del enlace. La señal recibida alcanzó -25,87 dBm,

superando de manera amplia la sensibilidad del receptor (−113,02 dBm), lo que resultó en un margen de escucha de 87,15 dB.

Estos resultados validaron la viabilidad técnica del enlace, mostrando alta confiabilidad y robustez, condiciones que permiten la transmisión estable de datos en aplicaciones locales, como comunicaciones rurales, telemetría y redes comunitarias. además, la configuración demuestra ser escalable a mayores distancias, siempre que se realicen ajustes adecuados en la altura de las antenas o la potencia de transmisión.

3.1.8 Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas mediante IEEE 802.11 (2,4 GHz)

Figura 29
Configuración del Enlace IEEE 802.11 en 2,4 GHz para la Antena Emisora

Region and Equipment Selection						
Band	Product	Remote Product	Regulation	ePMP PTP Mode		
2.4 GHz	ePMP 1000 (retired)	ePMP 1000 (retired)	Peru	PTP		

ePMP Configuration						
Bandwidth	DL/UL Ratio	Frame Period	Maximum Mod Mode	Guard Interval	Master	Gb Ethernet Port
20 MHz	50/50	5 ms	MCS15 (64QAM 0.83)	Short	ANTENA EMISORA	None

Con la implementación de un enlace en la banda de 2.4 GHz y un ancho de canal de 20 MHz, se establece una configuración que elimina la necesidad de contar con una antena de distribución intermedia. En este esquema, la antena emisora asume el rol principal de transmisión, garantizando la cobertura hacia los receptores previstos. El sistema se apoya en la incorporación de repetidores estratégicos, lo cual permite ampliar el alcance de la señal y asegurar la continuidad del servicio en el área de influencia. Esta configuración resulta especialmente adecuada para

entornos rurales o de baja densidad poblacional, donde se requiere una solución práctica y eficiente para garantizar la conectividad.

Figura 30

Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas (IEEE 802.11, 2,4 GHz)

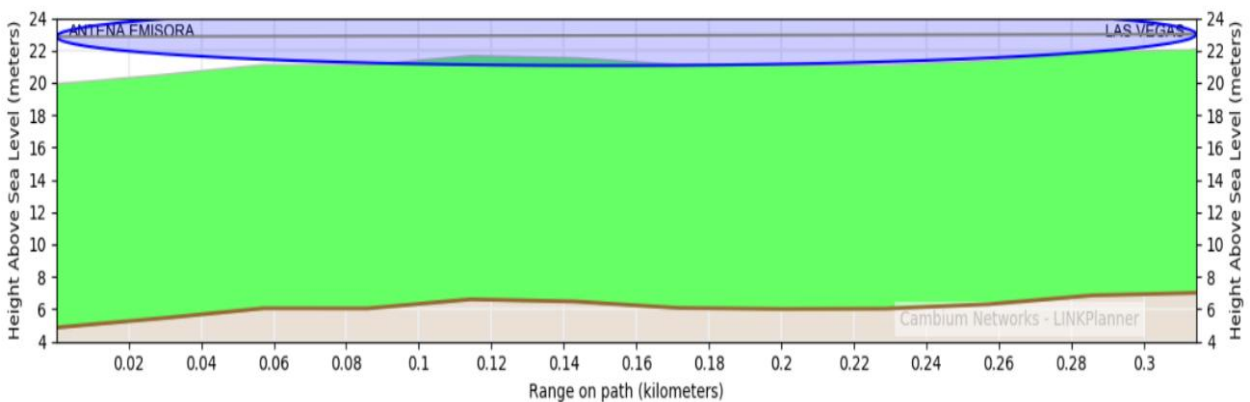


Figura 31

Rendimiento del Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas (IEEE 802.11, 2.4 GHz)

Performance to ANTENA EMISORA		Performance to LAS VEGAS	
Predicted Receive Power : -46 dBm ± 8 dB		Predicted Receive Power : -46 dBm ± 8 dB	
Mean IP Predicted :	66.57 Mbps	Mean IP Predicted :	66.35 Mbps
Mean IP Required :	5.0 Mbps	Mean IP Required :	5.0 Mbps
% of Required IP :	1331 %	% of Required IP :	1327 %
Min IP Required :	1.0 Mbps	Min IP Required :	1.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %	Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %	Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

En este caso, se obtiene un rendimiento de transmisión de 66.35 Mbps, resultado que responde al uso de la banda de 2.4 GHz, la cual, al tratarse de una frecuencia baja, ofrece una señal más robusta y menos susceptible a la atenuación por obstáculos o interferencias. Esta característica permite garantizar una mayor estabilidad en el enlace, asegurando una conectividad confiable y sostenida para el servicio de comunicaciones en el Centro Poblado Las Vegas.

Figura 32

Enlace Antena Emisora – Centro Poblado Las Vegas en Banda de 2.4 GHz (IEEE 802.11)

Operating Conditions	
Frame Size :	1518 Bytes
Link Summary	
Aggregate IP Throughput : 132.91 Mbps	
Lowest Mode Availability : 100.0000 %	
System Gain Margin :	43.65 dB
Free Space Path Loss :	90.16 dB
Gaseous Absorption Loss :	0.00 dB
Excess Path Loss :	2.79 dB
Total Path Loss :	92.95 dB

Tabla 26

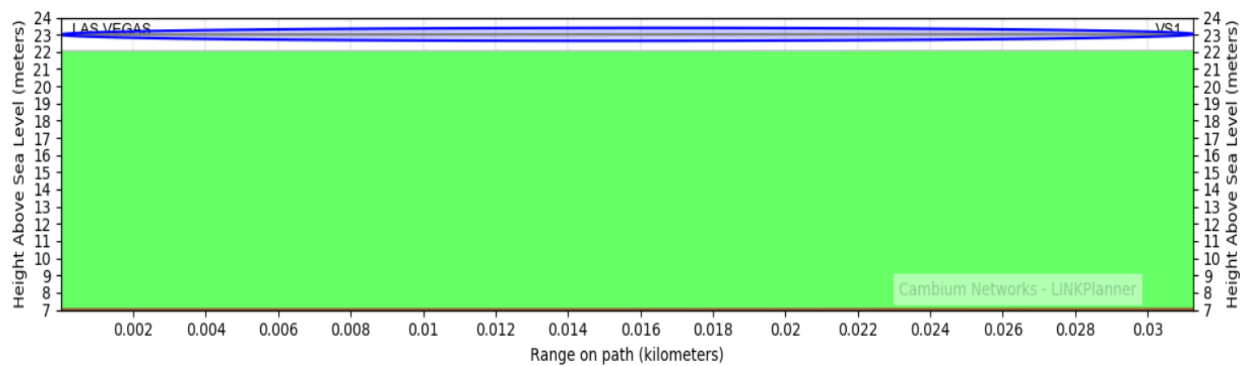
Parámetros de Configuración de las Estaciones de Usuario en el Enlace PMP hacia el Centro Poblado Las

SM Name	Product	SM Latitude	SM Longitude	SM Height (m)	SM Antenna
L5	PMP 450b Omni	07.05925S	079.70096W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L6	PMP 450b Omni	07.05910S	079.70090W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L7	PMP 450b Omni	07.05897S	079.70087W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L8	PMP 450b Omni	07.05888S	079.70082W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L9	PMP 450b Omni	07.05881S	079.70080W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L10	PMP 450b Omni	07.05869S	079.70077W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L11	PMP 450b Omni	07.05860S	079.70075W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L12	PMP 450b Omni	07.05852S	079.70072W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L13	PMP 450b Omni	07.05846S	079.70068W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L14	PMP 450b Omni	07.05841S	079.70068W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L15	PMP 450b Omni	07.05835S	079.70066W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L16	PMP 450b Omni	07.05831S	079.70039W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L17	PMP 450b Omni	07.05825S	079.70035W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L17	PMP 450b Omni	07.05829S	079.70062W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L18	PMP 450b Omni	07.05825S	079.70061W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L19	PMP 450b Omni	07.05820S	079.70059W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L20	PMP 450b Omni	07.05812S	079.70057W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L21	PMP 450b Omni	07.05812S	079.70030W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L22	PMP 450b Omni	07.05805S	079.70057W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L23	PMP 450b Omni	07.05799S	079.70056W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L24	PMP 450b Omni	07.05794S	079.70054W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L25	PMP 450b Omni	07.05789S	079.70052W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L26	PMP 450b Omni	07.05786S	079.70048W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L27	PMP 450b Omni	07.05770S	079.70044W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L28	PMP 450b Omni	07.05756S	079.70042W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L29	PMP 450b Omni	07.05748S	079.70035W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
L30	PMP 450b Omni	07.05725S	079.70030W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
VS1	PMP 450b Omni	07.05907S	079.70090W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna
VS2	PMP 450b Omni	07.05897S	079.70087W	16.0	Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni Antenna

Las coordenadas geográficas de cada estación remota se encuentran claramente definidas, aspecto fundamental en la planificación de un enlace punto a multipunto (PMP), ya que permite ubicar con precisión cada estación y evaluar tanto la visibilidad como la posible interferencia asociada al terreno circundante, en relación con la altura de instalación, todas las estaciones remotas han sido configuradas a 10 metros, lo que garantiza la existencia de línea de vista (LOS) y minimiza las obstrucciones que podrían afectar la propagación de la señal. Este parámetro resulta esencial para asegurar la calidad del servicio y la estabilidad del enlace. Se debe indicar también que todas las estaciones están equipadas con antenas Cambium Networks 360° 450 MicroPop Omni, cuyo diseño omnidireccional de 360 grados es particularmente adecuado para entornos PMP, ya que proporciona una cobertura uniforme y facilita la distribución eficiente de la señal hacia múltiples usuarios dentro del área de servicio.

Figura 33

Enlace Punto a Multipunto entre la Estación Base Las Vegas y el Usuario VS



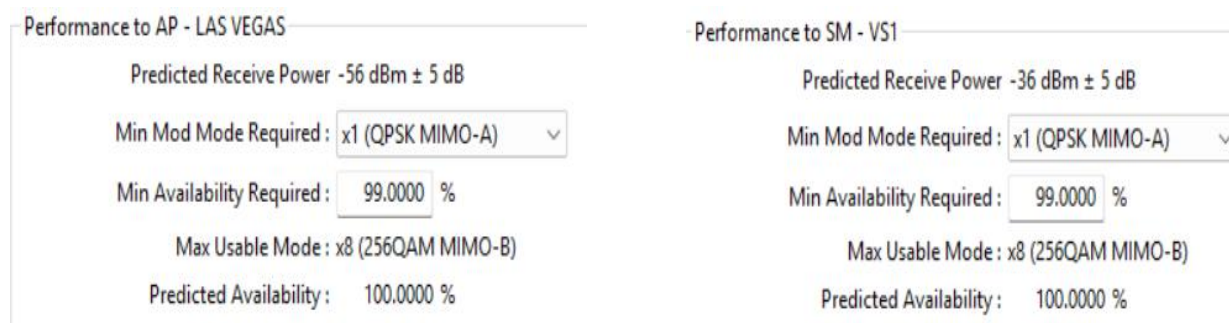
El perfil de enlace simulado evidencia que la comunicación a corta distancia (30 metros) entre la Antena Emisora y la estación en Las Vegas resulta altamente eficiente en términos de propagación de la señal. Las alturas constantes de las antenas, ubicadas entre los 21 y 23 metros sobre el nivel del mar, aseguran que la trayectoria del enlace permanezca completamente libre de

obstrucciones, evitando pérdidas significativas de señal. Asimismo, la corta distancia garantiza una baja latencia, lo que contribuye a la estabilidad y confiabilidad del sistema de transmisión.

Este tipo de configuración es especialmente adecuada para aplicaciones que demandan conexiones de alta calidad y confiabilidad, tales como la transmisión de datos en tiempo real, redes de telecomunicaciones de baja latencia o enlaces punto a punto en distancias reducidas. Las características topográficas del terreno, predominantemente plano y libre de obstáculos, refuerzan la eficiencia de la propagación, consolidando la viabilidad del sistema en escenarios rurales o semiurbanos, donde las condiciones favorecen el desempeño óptimo de los enlaces inalámbricos.

Figura 34

Potencia de Recepción y Disponibilidad del Enlace en el AP Las Vegas y la Estación Cliente VS1



En los resultados de la simulación del enlace inalámbrico PMP450i, se obtuvo una potencia de recepción estimada en el punto de acceso (AP) de $-56 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$, valor que cumple con la potencia mínima requerida para la modulación QPSK MIMO-A (x1) y permite alcanzar un modo de modulación máxima de 256QAM MIMO-B (x8), este comportamiento asegura una disponibilidad del enlace del 100 %, superando la fiabilidad mínima exigida del 99 %, lo que confirma la solidez y estabilidad del sistema bajo condiciones normales de operación.

En el caso de la estación cliente (SM), la potencia recibida predicha fue de $-22 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$, lo que excede el límite máximo aceptable de -32 dBm . Este resultado sugiere la posibilidad

de un escenario de saturación o interferencia por exceso de potencia en la recepción, lo que podría comprometer la calidad del enlace y requerir ajustes en la potencia transmitida o en la configuración de los equipos para optimizar su desempeño.

A pesar de ello, el sistema demuestra capacidad de operar mediante modulación adaptable, ajustando dinámicamente la tasa de transferencia en función de las condiciones del canal. En conjunto, el desempeño obtenido refleja un enlace inalámbrico robusto, con capacidad para conexiones de alta fiabilidad y rendimiento, siempre que se garantice un equilibrio adecuado entre la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor.

3.2 Discusión

El análisis bibliográfico permitió identificar un vacío significativo en la provisión de conectividad en zonas rurales, donde los sistemas tradicionales presentan limitaciones técnicas y económicas. Esta revisión sustentó la pertinencia de tecnologías inalámbricas de nueva generación como WiMAX, IEEE 802.11 y TVWS, al ser soluciones adaptables a situaciones de baja densidad poblacional, respondiendo así al primer objetivo específico. Los antecedentes internacionales y nacionales ratificaron que estas tecnologías han sido aplicadas con éxito en contextos rurales con condiciones similares, lo que valida su aplicabilidad en los centros poblados de San Pedro y Las Vegas.

Las simulaciones realizadas en plataformas como LinkPlanner, Xirio y TVWS permitieron comparar escenarios bajo diferentes configuraciones de frecuencia, altura de antenas y esquemas de modulación, los resultados evidenciaron que, mientras WiMAX y IEEE 802.11 alcanzan rendimientos entre 50 y 100 Mbps con disponibilidades cercanas al 100 %, la tecnología TVWS ofrece un throughput menor (≈ 7 Mbps), pero con ventajas de robustez frente a obstrucciones,

confirmando la importancia de realizar evaluaciones comparativas que contemplen tanto la capacidad como la estabilidad del enlace, especialmente en áreas rurales con condiciones topográficas desafiantes.

Se pudo concluir mediante los resultados, que la tecnología más óptima para los centros poblados evaluados es WiMAX en la banda de 5.8 GHz, al cumplir con los tres criterios planteados: viabilidad técnica, sostenibilidad económica y adaptabilidad geográfica, fundamentada en La capacidad de modulación adaptativa de este sistema, junto con márgenes de ganancia superiores a 50 dB y pérdidas de ruta dentro de los parámetros aceptables, respalda su confiabilidad para la prestación de servicios educativos, administrativos y comunitarios, aunque, tecnologías complementarias como IEEE 802.11 y TVWS podrían incorporarse en escenarios de baja demanda o como respaldo, constituyendo un modelo híbrido de conectividad que refuerza la sostenibilidad a largo plazo.

4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La revisión bibliográfica confirmó que tecnologías como WiMAX, TVWS e IEEE 802.11 son opciones viables y costo-eficientes para conectar zonas rurales. Estas soluciones destacan por su escalabilidad y capacidad de adaptarse a entornos educativos, contribuyendo a reducir la brecha digital en comunidades aisladas.
- Las simulaciones en LinkPlanner y Xirio mostraron enlaces estables, con potencias de -35 dBm y throughputs de hasta 99.8 Mbps al 100 % de disponibilidad. En escenarios PMP con 35 usuarios, se obtuvo un rendimiento agregado de 193.54 Mbps, suficiente para garantizar servicios básicos de comunicación y educación.
- El análisis comparativo determinó que la solución óptima combina un backhaul PTP en 5.8 GHz y una red PMP450i. Este diseño garantiza viabilidad técnica, sostenibilidad económica y adaptabilidad geográfica, asegurando conectividad confiable para San Pedro y Las Vegas y cumpliendo los criterios planteados en los objetivos de la investigación.

4.2 Recomendaciones

- Implementación progresiva del sistema propuesto, instalando en primera fase el backhaul PTP en 5.8 GHz con antenas parabólicas de alta ganancia, asegurando enlaces robustos hacia los centros poblados. En segunda fase, desplegar la red PMP450i para la distribución comunitaria en San Pedro y Las Vegas.
- Implementar un sistema de monitoreo (SNMP/telemetría) para supervisar niveles de señal, throughput, disponibilidad y márgenes de desvanecimiento, asegurando mantenimiento preventivo y correctivo oportuno.
- Planificar la sectorización de antenas PMP y el aumento de ancho de canal en caso de crecimiento de la demanda, manteniendo al menos 5 Mbps garantizados por usuario en horas de mayor uso, garantizando de esa manera la escalabilidad y crecimiento futuro.
- Priorizar la conexión de instituciones educativas, dado que la capacidad obtenida en las simulaciones garantiza servicios suficientes para actividades pedagógicas digitales, acceso a plataformas educativas y comunicación en tiempo real.

REFERENCIAS

- Arias-Rodríguez, A. (2022). *Caracterización de sistemas de comunicación RF y ópticos en aplicaciones submarinas* [Bachelor thesis, Universitat Politècnica de Catalunya].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/372768>
- DS. N° 003-2025-MTC. (2025). *Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de la Ley N° 31809, Ley para el fomento de un Perú conectado—DECRETO SUPREMO - N° 003-2025-MTC - TRANSPORTES Y COMUNICACIONES*.
<https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/undefined/dispositivo/NL/2382424-5>
- Flores, G., Paredes, L., Roldan, S., & Valdizan, D. (2021). *Implementar redes inalámbricas a través de fibra óptica para impulsar la educación en las zonas rurales del Perú*.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/20.500.12404/20957>
- Gaggero, G. B., Marchese, M., Moheddine, A., & Patrone, F. (2021). A possible smart metering system evolution for rural and remote areas employing unmanned aerial vehicles and internet of things in smart grids. *Sensors*, 21(5), 1-23. Scopus.
<https://doi.org/10.3390/s21051627>
- INEI. (2023). *Compendio Estadístico 2023*. INEI. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/4932612-compendio-estadistico-peru-2023>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2023). *Estadísticas de las Tecnologías de la Información y Comunicación en los Hogares* (Informe Técnico No. 03; Trimestre: Abril-Mayo-Junio 2023, p. 50). Instituto Nacional de Estadística e Informática.
<https://m.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/03-informe-tecnico-tics-ii-trimestre-2023.pdf>

Ley N° 31809. (2023). *Ley para el fomento de un Perú conectado*.

<https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/2191769-2>

Martinez, J. (2022). *Comparación entre enlaces punto a punto y redes TVWS para conectividad del grupo de escuelas rurales del departamento del Cesar asignadas a la empresa GLL Ingeniería EU en el Marco del Contrato 10K* [Tesis de grado, Universidad Santo Tomás].

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/44052/2022juanmartinez.pdf?sequence=1>

Medina-Beltrán, E. (2019). *Desarrollo de antenas miniatura UWB con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5G* [Tesis de grado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada].

<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2995>

Osiptel. (2020). *Retos para cerrar la brecha digital en el Perú*. Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones.

<https://www.osiptel.gob.pe/media/uaxgb32q/ppt-retos-cerrar-brechadigital.pdf>

Paternina, J. (2022). *Propuesta de una solución tecnológica de última milla para los problemas de conectividad de la localidad 20 de Bogotá (Sumapaz)*. [Bachelor thesis, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/47338>

Peralta, F. (2019). *Desempeño en Redes Wireless para zonas rurales* [Tesis Para optar el Grado Académico de Doctor, Universidad Nacional del Callao].

<http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/4483>

Quillas-Cupe, A. A., Gálvez-Quiñones, J. V., & Sandoval-López, J. F. (2020). *Diseño de un sistema de radioenlaces en la banda de 5,4 ghz de red de acceso para poblados rurales sin servicios de telecomunicaciones en el Perú en la región de Huancavelica* [Tesis para

optar el título profesional, Universidad del Callao].

<http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/6316>

Rodríguez, R. (2020). *Análisis de tecnologías de redes inalámbricas para centros poblados rurales en el Perú* [Tesis de grado, Universidad Señor de Sipan].

<http://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/9332>

Situmorang, A. C., Suryanegara, M., Gunawan, D., & Juwono, F. H. (2023). Proposal of the Indonesian Framework for Telecommunications Infrastructure Based on Network and Socioeconomic Indicators. *Informatics*, 10(2). Scopus.

<https://doi.org/10.3390/informatics10020044>

Toro-Bernal, H. (2020). *Análisis de tecnologías de comunicaciones inalámbricas para determinar la mejor opción a implementar para los servicios que presta la DITG-EAAB* [Bachelor thesis, Universidad Santo Tomás].

<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/20741>

Yoza, E. (2020). *Implementación de una red inalámbrica para el acceso a internet con tecnología Ubiquiti en la unidad educativa ocho de enero* [Tesis de grado, Universidad Estatal del Sur de Manabí].

<https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2265/1/YOZA%20SEGOVIA%20EDISON%20ANIBAL%20Falta%20URKUND%20Y%20FORMULARIO.pdf>