

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS



TESIS

**“DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA Y EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y
CONFIABILIDAD DE UNA RED DE RADIOENLACES EN ANGUÍA,
CAJAMARCA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE SISTEMAS

AUTOR:

Bach. Pelayo Garcia Marin

ASESOR:

DR. Ing. Carlos Jesús Koo Labrin

CAJAMARCA – PERÚ

AGOSTO 2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** PELAYO GARCIA MARIN
DNI: 72462698
Escuela Profesional: INGENIERÍA DE SISTEMAS
2. **Asesor:** DR. ING. CARLOS JESÚS KOO LABRÍN
Facultad: INGENIERÍA
3. **Grado académico o título profesional**
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. **Tipo de Investigación:**
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. **Título de Trabajo de Investigación:**
"DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA Y EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y CONFIABILIDAD DE UNA RED DE RADIOENLACES EN ANGUÍA, CAJAMARCA"
6. **Fecha de evaluación:** 11 de marzo del 2026
7. **Software antiplagio:** ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 4%
9. **Código Documento:** trn:oid:::3117:566529778
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 11 de marzo del 2026



FIRMA DEL ASESOR
DR. ING. CARLOS JESUS KOO LABRÍN
DNI: 07626109



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 11/03/2026 17:33:08-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

ACTA N° 0132-2026

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Art. 035 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, da a conocer que, a los **once días del mes de marzo de 2026**, siendo las siete horas con treinta minutos (07:30 a.m.) en la sala de Audiovisuales (Edificio 4K) de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Jaime Amador Meza Huamán.
Vocal : M.Cs. Ing. Néstor Elías Muñoz Abanto.
Secretario : M.Cs. Ing. Roger Manuel Sánchez Chávez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis **DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA Y EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y CONFIABILIDAD DE UNA RED RADIOENLACES EN ANGUÍA, CAJAMARCA**, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Sistemas **PELAYO GARCIA MARIN**, asesorado por el Dr. Ing. Carlos Jesús Koo Labrín, para la obtención del Título Profesional.

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante, debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 07 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 18 PTS dieciocho (En letras)

En consecuencia, se lo declara aprobado con el calificativo de dieciocho acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 09:00 horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Jaime Amador Meza Huamán.
Presidente

M.Cs. Ing. Néstor Elías Muñoz Abanto.
Vocal

M.Cs. Ing. Roger Manuel Sánchez Chávez.
Secretaria

Dr. Ing. Carlos Jesús Koo Labrín.
Asesor

COPYRIGHT © 2025
2025
Todos los Derechos Reservados ®

Agradecimiento

A Dios, por concederme la vida, la salud y la fortaleza necesaria para culminar esta etapa tan significativa de mi formación académica.

A mis padres, hermanos y hermanas, por su apoyo constante.

Al Ing. Carlos Jesús Koo Labrin, por su orientación y asesoramiento en esta tesis.

Finalmente, a mis amigos y compañeros, con quienes compartí gratos momentos durante esta etapa universitaria.

Dedicatoria

A mis padres, Jorge Zacarías García Vásquez y Reina Gladys Marin Ruiz, y a mis hermanos y hermanas, por ser el pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional y sus sacrificios silenciosos. Todo lo que soy y lo que he alcanzado tiene sus raíces en los valores y principios que me inculcaron desde mi niñez.

A mi esposa Erika Yanina Medina Cercado y a mi hija Alessia Nicole García Medina, por su amor, paciencia y comprensión durante este proceso, y por convertirse en mi mayor fortaleza en todo momento.

CONTENIDO

RESUMEN	14
ABSTRAC	15
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes Teóricos de la Investigación	19
2.2. Bases Teóricas	23
2.2.1. Fundamentos de las Telecomunicaciones Inalámbricas	23
2.2.2. Fundamentos Teóricos de los Radioenlaces Punto a Punto	24
2.2.3. Modelos de Propagación Aplicables a Enlaces Terrestres	26
2.2.4. Normativa Técnica y Marco Regulatorio	26
2.2.5. Simuladores de Radioenlaces y Herramientas de Planificación ...	27
2.2.6. Cambium Networks LinkPlanner: Configuración y Modelado Técnico	29
2.2.7. Fundamentos de Evaluación Económica de Proyectos de Telecomunicaciones.....	32
2.3. Definición de términos básicos	32
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1 Procedimiento	35
3.2 Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados	37
2.3.1. Fase 1 - Proyección poblacional y estimación de hogares y demanda, basada en criterios y recomendaciones de la UIT	38
2.3.2. Fase 2 – Identificación geográfica y análisis topográfico (Google Earth).....	42
2.3.3. Fase 3 - Diseño preliminar de la red, optimización de torres y zona de Fresnel.	49
2.3.4. Fase 4 - Simulación y validación técnica (ITU-R P.530-17) Interferencia y MCS	58
2.3.5. Síntesis de la sección de resultados de radioenlaces	95
2.3.6. Consolidación de parámetros de configuración por radioenlace ..	95
3.2.5. Fase 5 - Evaluación económica del diseño de la infraestructura de radioenlaces	102
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	115
4.1. Análisis de los resultados obtenidos	115
4.1.1. Análisis del diseño óptimo de la infraestructura	115
4.1.2. Evaluación del rendimiento y confiabilidad	116

4.1.3. Evaluación de viabilidad económica	118
4.2. Discusión de Resultados	118
4.2.1. Con los Antecedentes	118
4.2.2. Con las bases teóricas	121
4.3. Matriz de resultados obtenidos en las Fases Metodológicas	122
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
5.1. Conclusiones	124
5.2. Recomendaciones	126
Bibliografía	127
Anexos	132
Anexo 1: Comparación técnica y Evaluación de simuladores de radioenlaces	132
Anexo 2: Ecuaciones Radio de la 1. ^a zona de Fresnel	133
Anexo 3: Data Sheets de Equipos: Radios y Antenas	135
Anexo 4: Configuración general del proyecto	141
Anexo 5: Formulación del modelo ITU-R P.530 empleadas en el dimensionamiento radioeléctrico	144
Anexo 7: Metodología para el cálculo de throughput en cada radioenlace	153
Anexo 8: Cálculo del beneficio social anual equivalente	154
Anexo 9: Operacionalización de variables	156
Anexo 10: Matriz de consistencia	157

Índice de tablas

<i>Tabla 1.</i> Listado de CCPP por población y cantidad de hogares.	39
<i>Tabla 2.</i> Proyección poblacional al 2035 con una tasa de crecimiento de -0.3% anual.....	40
<i>Tabla 3.</i> Demanda de ancho de banda por centro poblado del distrito de Anguía	41
<i>Tabla 4.</i> Altitud de centros poblados del distrito de Anguía por región natural.	43
<i>Tabla 5.</i> Coordenadas de CCPP seleccionados.	45
<i>Tabla 6.</i> Acceso a energía eléctrica en los centros poblados del distrito de Anguía	48
<i>Tabla 7.</i> Altura de torres por nodo y ubicación geográfica y radioenlaces que soportan	58
<i>Tabla 8.</i> Síntesis de enlaces con ajuste geométrico requerido (criterio $0.6 \cdot r_1 + 1$ m, $K = 1$)	59
<i>Tabla 9.</i> Altura de torres verificación y recomendación de nuevas alturas.	60
<i>Tabla 10.</i> Throughput agregado vs Demanda HO por radioenlace (resultado de simulación).....	67
<i>Tabla 11.</i> Split TDD 75/25 Throughput agregado vs demanda HO por radioenlace (resultado de simulación).....	69
<i>Tabla 12.</i> Split TDD 80/20	70
<i>Tabla 13.</i> Resumen de métricas Globales	73
<i>Tabla 14.</i> Parámetros técnicos del radioenlace Torre 1 – Torre 4	75
<i>Tabla 15.</i> Parámetros técnicos del radioenlace Rodeopampa – Torre 4	78
<i>Tabla 16.</i> Parámetros técnicos del radioenlace Rodeopampa - Torre 4.....	81
<i>Tabla 17.</i> Parámetros técnicos del radioenlace Torre 5 - Vista Alegre	84
<i>Tabla 18.</i> Parámetros técnicos del radioenlace RDNFO Anguía → Torre 1	87
<i>Tabla 19.</i> Parámetros técnicos del radioenlace Torre 1 → Aliso	90
<i>Tabla 20.</i> Parámetros técnicos del radioenlace Torre 1 → Aliso	92
<i>Tabla 21.</i> Parámetros de configuración de cada radioenlace	97
<i>Tabla 22.</i> Resultados por radioenlace - throughput mínimo.....	99
<i>Tabla 23.</i> Resultados por radioenlace - throughput máximo	101
<i>Tabla 24.</i> Equipamiento activo PTP.....	103

<i>Tabla 25.</i> Equipamiento RF pasivo.....	103
<i>Tabla 26.</i> Infraestructura y equipamiento del NOC	104
<i>Tabla 27.</i> Instalación eléctrica del NOC.....	104
<i>Tabla 28.</i> Casetas técnicas	105
<i>Tabla 29.</i> Materiales de fibra óptica.....	105
<i>Tabla 30.</i> Instalación FO	105
<i>Tabla 31.</i> CAPEX total del proyecto	106
<i>Tabla 32.</i> Costo energético anual – sitios con red	107
<i>Tabla 33.</i> Mantenimiento anual de sistemas solares	108
<i>Tabla 34.</i> Mantenimiento preventivo anual	109
<i>Tabla 35.</i> Reserva para mantenimiento correctivo.....	109
<i>Tabla 36.</i> Operación del NOC	110
<i>Tabla 37.</i> OPEX anual total del proyecto.....	111
<i>Tabla 38.</i> Flujo de caja socioeconómico del proyecto.....	113
<i>Tabla 39.</i> Matriz de resultados obtenidos en las Fases Metodológicas	123
<i>Tabla 40.</i> Comparación técnica de los simuladores de radioenlaces.....	132
<i>Tabla 41.</i> Evaluación de los simuladores de radioenlaces.....	132
<i>Tabla 42.</i> Beneficio social anual total	155

Índice de figuras

<i>Fig. 1.</i> Mapa de ubicación del distrito de Chota.....	34
<i>Fig. 2.</i> Mapa del distrito de Anguía, Provincia de Chota, departamento de Cajamarca.	35
<i>Fig. 3.</i> Fases del procedimiento metodológico aplicado para el diseño y validación de la red de radioenlaces en el distrito de Anguía. (Elaboración propia.).....	37
<i>Fig. 4.</i> Gráfico de barras comparativo por centro poblado	42
<i>Fig. 5.</i> Ubicación de los Centros Poblados del distrito de Anguía. Fuente: Elaboración propia	45
<i>Fig. 6.</i> Mapa unifilar del Proyecto Regional Cajamarca de la RDNFO [43].	47
<i>Fig. 7.</i> Operadores de Telecomunicaciones en el Distrito de Anguía.	47
<i>Fig. 8.</i> Distribución eléctrica en Anguía.	49
<i>Fig. 9.</i> Diseño que interconecta los centros poblados sin línea de vista.	50
<i>Fig. 10.</i> Quebrada que separa los centros poblados del distrito de Anguía	51
<i>Fig. 11.</i> Primer diseño no optimizado.	52
<i>Fig. 12.</i> Perfil entre torre 10 y torre 13.....	52
<i>Fig. 13.</i> Torres 13, 14 y 15 para mejorar la interconexión de la parte este.....	53
<i>Fig. 14.</i> Diseño de la red de la parte derecha del distrito.....	53
<i>Fig. 15.</i> Optimización del subsistema este: reubicación de la Torre 10 a la posición de la Torre 16 y consolidación del hub en la Torre 13 para cubrir Rosapampa, Tendal, Nuevos Aires y Vista Alegre, eliminando T11–T12 y descartando T14–T15–T17 (elaboración propia).....	54
<i>Fig. 16.</i> Topología optimizada del sector este: consolidación en T16 y T13, eliminación de T9, T11, T12, T14, T15 y T17, y reducción de saltos hacia Nuevos Aires y Vista Alegre (elaboración propia).	54
<i>Fig. 17.</i> Topología del sector oeste antes de su optimización.	55
<i>Fig. 18.</i> Topología sin radioenlaces de la parte oeste.....	55
<i>Fig. 19.</i> Topología antes de ajustes de zona de despeje de Fresnel.	55
<i>Fig. 20.</i> Diseño de la red de radioenlaces en Anguía.	57
<i>Fig. 21.</i> Diseño con $\geq 60\%$ de F1 + ≥ 1 m de margen a $K = 1$ con las alturas ya ajustadas.....	62
<i>Fig. 22.</i> Perfil del radioenlace.....	62

<i>Fig. 23.</i> Comparativo del criterio $0,6r1 + 1$ m entre lo calculado y lo obtenido en el diseño	63
<i>Fig. 24.</i> Altura máxima por nodo / centro poblado	64
<i>Fig. 25.</i> Diseño consolidado de la red de radioenlaces de Anguía	64
<i>Fig. 26.</i> Demanda de Ancho de Banda por Centro Poblado	65
<i>Fig. 27.</i> Diseño final considerando la proyección de demanda y throughput por radioenlace.	67
<i>Fig. 28.</i> Comparación de throughput demandado y throughput logrado por hop.....	71
<i>Fig. 29.</i> Relación entre Fade Margin y MCS.....	76
<i>Fig. 30.</i> Relación entre Disponibilidad y MCS	77
<i>Fig. 31.</i> Relación entre Throughput y MCS.....	77
<i>Fig. 32.</i> Relación entre Fade Margin y MCS - Enlace Rodeopampa - Torre 4..	79
<i>Fig. 33.</i> Relación entre Disponibilidad y MCS - Enlace Rodeopampa - Torre 4.....	80
<i>Fig. 34.</i> Relación entre Throughput y MCS - Enlace Rodeopampa - Torre 4 ...	80
<i>Fig. 35.</i> Relación entre Fade Margin y MCS – Torre 4 – Torre 5	82
<i>Fig. 36.</i> Relación entre Disponibilidad y MCS – Torre 4 – Torre 5.....	83
<i>Fig. 37.</i> Relación entre Throughput y MCS – Torre 4 – Torre 5.....	83
<i>Fig. 38.</i> Relación entre Fade Margin y MCS.....	85
<i>Fig. 39.</i> Relación entre Disponibilidad y MCS	86
<i>Fig. 40.</i> Relación entre Throughput y MCS	86
<i>Fig. 41.</i> Relación entre Fade Margin y MCS RDNFO Anguía – Torre 1.....	88
<i>Fig. 42.</i> Relación entre Disponibilidad y MCS RDNFO Anguía – Torre 1	89
<i>Fig. 43.</i> Relación entre Throughput y MCS RDNFO Anguía – Torre 1	89
<i>Fig. 44.</i> Relación entre Fade Margin y MCS RDNFO Torre 1 – Aliso	91
<i>Fig. 45.</i> Relación entre Disponibilidad y MCS RDNFO Torre 1 – Aliso	91
<i>Fig. 46.</i> Relación entre Throughput y MCS RDNFO Torre 1 – Aliso.....	91
<i>Fig. 47.</i> Relación entre Fade Margin y MCS RDNFO Torre 1 - Rodeopampa .	93
<i>Fig. 48.</i> Relación entre Disponibilidad MCS RDNFO Torre 1 - Rodeopampa ..	93
<i>Fig. 49.</i> Relación entre Throughput MCS RDNFO Torre 1 – Rodeopampa	94
<i>Fig. 50.</i> Comparativo de Throughput logrado vs Demanda proyectada por radioenlace. (Elaboración propia con base en simulación LinkPlanner.)	116

<i>Fig. 51.</i> Disponibilidad anual por radioenlace según modelo ITU-R P.530-19. (Elaboración propia con base en resultados de simulación.).....	117
<i>Fig. 52.</i> Perfil del radioenlace Torre 5 a Rosapampa	147
<i>Fig. 53.</i> Perfil del radioenlace Torre 5 a Rosapampa	148
<i>Fig. 54.</i> Perfil del radioenlace Torre Anguía a Colcapampa	149
<i>Fig. 55.</i> Perfil del radioenlace Torre Anguía a Pampagrande	149
<i>Fig. 56.</i> Perfil del radioenlace Torre Anguía a Cercado.....	150
<i>Fig. 57.</i> Perfil del radioenlace Aliso a Chugur con presencia de vegetación. ..	151
<i>Fig. 58.</i> Perfil del radioenlace Torre 2 a Tayapotrero	152
<i>Fig. 59.</i> Perfil del radioenlace Torre 6 a Nuevos Aires	152

RESUMEN

La investigación abordó la problemática de conectividad en el distrito de Anguía, Cajamarca, caracterizada por dispersión poblacional, topografía accidentada y limitada infraestructura de telecomunicaciones. El diagnóstico geoespacial del portal oficial de OSIPTEL evidenció que la cobertura móvil territorial garantizada alcanza solo el 13.13 %, por lo que más del 86 % del distrito carece de servicio móvil garantizado [1]. Asimismo, aunque la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO) cuenta con un punto de presencia en la capital distrital, su infraestructura troncal no se extiende hacia los centros poblados periféricos, evidenciando la ausencia de una red de acceso de alta capacidad [2], [3].

El objetivo fue diseñar la infraestructura de radioenlaces necesaria para optimizar el rendimiento y la confiabilidad del servicio de conectividad en los centros poblados del distrito de Anguía, considerando su viabilidad técnica y económica. Se proyectó una demanda distrital en hora ocupada de 4.37 Gbps, identificándose flujos agregados superiores a 2.9 Gbps en los ejes principales y demandas locales de hasta 511 Mbps. El diseño verificó línea de vista y despeje del primer radio de Fresnel conforme a ITU-R P.530-19 [4]. Los enlaces de mayor capacidad se implementaron en banda Upper-6 GHz, mientras que los tramos de menor demanda se diseñaron en 5.8 GHz, optimizando eficiencia espectral y robustez frente a interferencias. La simulación en LinkPlanner demostró disponibilidades del orden de 99.9 % sin saturación de enlaces críticos.

Económicamente, el CAPEX total asciende a S/ 628,144 y el OPEX anual a S/ 173,674. Bajo un horizonte de 10 años y una tasa social de descuento del 8 %, el flujo neto anual es de S/ 126,326, obteniéndose un VAN social positivo y una TIR superior al 8%. Se concluye que la propuesta es técnica y económicamente viable para reducir la brecha digital en Anguía.

Palabras Clave: Radioenlaces, conectividad rural, disponibilidad, throughput, viabilidad económica, Anguía, Cajamarca, telecomunicaciones.

ABSTRAC

This research addressed the connectivity gap in the district of Anguía, Cajamarca (Peru), characterized by dispersed rural settlements, rugged topography, and limited telecommunications infrastructure. Geospatial analysis based on official OSIPTEL data revealed that guaranteed mobile coverage reaches only 13.13% of the district, leaving more than 86% of the territory without reliable mobile service. Although the National Fiber Optic Backbone Network (RDNFO) has a point of presence in the district capital, its trunk infrastructure does not extend to peripheral population centers, highlighting the absence of a high-capacity access network.

The objective was to design and evaluate the performance, reliability, and economic feasibility of a point-to-point wireless backhaul network to interconnect rural settlements with the RDNFO. Traffic projection under busy-hour conditions estimated a total district demand of 4.37 Gbps, with aggregated flows exceeding 2.9 Gbps along main backbone segments and local demands up to 511 Mbps. The geometric design verified line-of-sight conditions and first Fresnel zone clearance in accordance with ITU-R P.530-19. High-capacity links were implemented in the Upper-6 GHz band, while 5.8 GHz was used for distribution segments with lower bandwidth requirements, optimizing spectral efficiency and interference resilience. LinkPlanner simulations demonstrated link availabilities around 99.9% without congestion under projected load conditions.

The total CAPEX amounts to S/ 628,144, with an annual OPEX of S/ 173,674. Under a 10-year evaluation horizon and an 8% social discount rate, the project yields a positive social Net Present Value and an Internal Rate of Return above 8%, confirming its socio-economic viability. The proposed infrastructure constitutes a technically robust and economically sustainable solution to reduce the digital divide in Anguía.

Key Words: Radio links, rural connectivity, availability, throughput, economic feasibility, Anguía, Cajamarca, telecommunications.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El Perú cuenta con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO), una infraestructura troncal de más de 13,500 km diseñada para interconectar 180 capitales de provincia a nivel nacional, incluyendo varias en la región Cajamarca. Sin embargo, esta red ha mostrado limitaciones en su alcance real, ya que si bien garantiza capacidad de transmisión mayorista en cabeceras provinciales, no se han desarrollado de manera suficiente proyectos de acceso que extiendan dicha conectividad hacia los distritos rurales [5].

El problema central radica en la existencia de una brecha entre la infraestructura troncal y el acceso local, situación que genera un escenario de “fibra sin acceso”. A pesar de que Cajamarca dispone de nodos troncales de la RDNFO en provincias como Chota, la conectividad no llega a centros poblados rurales dispersos debido a factores como la baja rentabilidad económica, la dispersión poblacional y la complejidad geográfica. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), durante el primer trimestre de 2025 el 20.5 % de los hogares del área rural del país accedió a Internet, evidenciándose una persistente brecha digital en zonas rurales como el distrito de Anguía [6].

En consecuencia, comunidades como Anguía ubicadas en la región altoandina de Cajamarca, presentan graves limitaciones en su conectividad digital debido a su geografía accidentada y la dispersión de sus centros poblados [7], continúan excluidas de los beneficios de la infraestructura troncal, permaneciendo dependientes de servicios móviles de baja capacidad o enlaces satelitales caracterizados por alta latencia y limitada confiabilidad. Esta situación ha generado exclusión tecnológica y desigualdades en el acceso a servicios de educación, salud y desarrollo social [8], [9], [10]. La carencia de infraestructura de fibra óptica, cuya instalación resulta costosa y técnicamente inviable por la compleja topografía y baja densidad poblacional existente, hace necesaria la implementación de alternativas de menor inversión y mayor adaptabilidad, entre las cuales los radioenlaces constituyen una solución viable [11], [12].

En este contexto, surge la pregunta principal: ¿Cómo diseñar la infraestructura de una red de radioenlaces para interconectar los centros poblados del distrito

de Anguía con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, optimizando el rendimiento, la confiabilidad y la viabilidad económica del sistema? La hipótesis planteada sostiene que el diseño de una infraestructura de radioenlaces técnicamente optimizada permitiría describir un sistema con adecuados niveles de rendimiento, confiabilidad y viabilidad económica para la interconexión del distrito de Anguía con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica.

La investigación es importante porque aporta una solución técnica aplicable a zonas rurales con similares condiciones geográficas y económicas, contribuyendo al cierre de la brecha digital y ofreciendo beneficios indirectos en el acceso a educación, teleconsultas médicas y servicios digitales [13], [14]. Su alcance se limita al diseño de la infraestructura y a la evaluación de su viabilidad técnica y económica mediante simulaciones y análisis de costos; no contempla la implementación física ni la evaluación de impacto social a largo plazo.

El objetivo general de la investigación fue diseñar la infraestructura de radioenlaces necesaria para optimizar el rendimiento y la confiabilidad del servicio de conectividad en el distrito de Anguía, asegurando su viabilidad técnica y económica. Para alcanzar este propósito se plantearon los siguientes objetivos específicos: (i) determinar el diseño óptimo de la infraestructura, considerando el número y ubicación de torres y repetidores, para establecer una red eficiente en el distrito de Anguía; (ii) analizar los parámetros técnicos clave para describir el rendimiento y la confiabilidad de los radioenlaces; y (iii) evaluar la viabilidad económica del diseño de la infraestructura de radioenlaces mediante el análisis de costos de implementación, operación y mantenimiento.

La presente tesis se estructura en cinco capítulos, organizados de manera lógica y progresiva para el desarrollo del estudio: El Capítulo I presenta la introducción de la investigación, en la cual se describe el contexto del problema, se formula el planteamiento del problema, se establecen los objetivos general y específicos, se expone la justificación del estudio, así como los alcances y limitaciones de la investigación. El Capítulo II desarrolla los antecedentes internacionales, nacionales y regionales, junto con el marco teórico y conceptual que sustenta técnicamente la investigación, abordando los fundamentos de los radioenlaces, criterios de diseño, confiabilidad, rendimiento y evaluación económica de

proyectos de telecomunicaciones. El Capítulo III corresponde al desarrollo metodológico de la investigación. En este capítulo se define el tipo y diseño de investigación, se describen las técnicas e instrumentos utilizados principalmente la simulación técnica mediante software especializado, se presentan las fases de desarrollo del diseño de la red de radioenlaces, la operacionalización de las variables y la matriz de consistencia, alineadas con el nivel descriptivo del estudio y con hipótesis de carácter referencial. El Capítulo IV expone el análisis y la discusión de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones técnicas y del diseño propuesto. Los resultados se analizan en función de los objetivos específicos, contrastándolos con los modelos teóricos, normas técnicas y estudios previos revisados en el marco teórico, así como con los criterios de confiabilidad, rendimiento y viabilidad económica del sistema. Finalmente, el Capítulo V presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación, destacando los principales aportes técnicos, estructurales y económicos del diseño propuesto, así como las sugerencias orientadas a la implementación, operación, mantenimiento y futuras líneas de investigación relacionadas con la infraestructura de radioenlaces en zonas rurales.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Teóricos de la Investigación

La Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO) fue concebida para garantizar conectividad mayorista en las capitales provinciales del Perú; sin embargo, su impacto en zonas rurales ha sido limitado. Este fenómeno ha generado el escenario denominado “fibra sin acceso”, en el cual la infraestructura troncal existe, pero las comunidades rurales continúan dependiendo de soluciones como estaciones móviles o enlaces satelitales, caracterizados por alta latencia y baja confiabilidad [15]. En Cajamarca, a pesar de contar con nodos troncales en provincias como Chota, la cobertura de Internet en áreas rurales no supera el 20% de los hogares [16], debido a la baja rentabilidad para los operadores privados y a la ausencia de proyectos de última milla. En este contexto, se refuerza la pertinencia de soluciones alternativas como los radioenlaces, que permiten extender la capacidad troncal hacia comunidades aisladas con menor costo y mayor adaptabilidad.

A partir de esta realidad nacional y regional, es necesario revisar investigaciones y experiencias previas que han abordado el diseño e implementación de redes inalámbricas en contextos rurales. Estos antecedentes internacionales, nacionales y locales ofrecen un marco de comparación para el presente estudio, aportando metodologías, parámetros técnicos y resultados que orientan el diseño de una red de radioenlaces en el distrito de Anguía, Cajamarca.

Antecedentes Internacionales

Diversos estudios internacionales han abordado el diseño e implementación de redes de telecomunicaciones en zonas rurales de difícil acceso, empleando tecnologías inalámbricas de bajo costo y alta disponibilidad. Estos trabajos permiten identificar enfoques replicables en contextos similares al del distrito de Anguía.

Mayowa [17] , en el estudio titulado “Fixed Wireless and 5G in Rural Settings”, tuvo como objetivo principal analizar la viabilidad de las soluciones de Fixed Wireless Access (FWA) combinadas con tecnología 5G para mejorar la conectividad en comunidades rurales caracterizadas por baja densidad

poblacional y terrenos accidentados. La metodología empleada consistió en una revisión técnica y aplicada de proyectos piloto y despliegues de FWA, evaluando parámetros clave como throughput, latencia y capacidad de conexión por usuario en comparación con soluciones tradicionales como la fibra óptica o el satélite. Se analizaron las mejoras derivadas del uso de tecnologías específicas como beamforming, mmWave y dynamic spectrum sharing, así como el impacto en los tiempos de despliegue y en los costos de implementación. Las conclusiones del estudio destacan que las soluciones FWA basadas en 5G representan una alternativa técnicamente robusta y económicamente viable frente al despliegue de fibra en zonas rurales. Se alcanzaron mejoras significativas en el ancho de banda disponible y la reducción de la latencia, logrando un servicio adecuado para aplicaciones críticas como educación a distancia, telemedicina y servicios comunitarios. Asimismo, se resaltó la facilidad y rapidez de despliegue de estas soluciones frente a las restricciones geográficas. Este antecedente resulta relevante para la presente investigación, ya que confirma que los sistemas inalámbricos de alta capacidad —como los radioenlaces propuestos para Anguía, Cajamarca— constituyen una solución eficiente para superar la exclusión digital en territorios con condiciones geográficas adversas. Además, aporta métricas de desempeño comparables (throughput, disponibilidad, latencia) que permiten fortalecer el análisis técnico del diseño planteado en esta tesis.

Falou y Alouini [18], en su investigación titulada “Enhancement of Rural Connectivity by Recycling TV Towers with Massive MIMO Techniques”, cuyo objetivo principal fue evaluar la viabilidad de reutilizar torres de transmisión de televisión (TV towers) combinadas con técnicas multiusuario Massive MIMO (mMIMO) para ampliar la cobertura de conectividad en áreas rurales, con bajos costos de infraestructura. Se realizó un estudio de caso realista en una zona rural de Etiopía, simulando una estación base equipada con mMIMO en torres existentes. Se compararon el área de cobertura proporcionada frente a una estación base tradicional, analizando el alcance teórico de señal y el número de usuarios atendidos. Se tuvieron como conclusión principal que una torre reutilizada con tecnología mMIMO puede cubrir un área al menos 25 veces mayor que una estación base convencional. Esto representa una solución de

bajo costo y alta eficiencia para mejorar la conectividad en zonas rurales al aprovechar infraestructura ya presente. Este antecedente demuestra que las técnicas de radioenlace mejoradas (e.g., mMIMO en infraestructuras existentes) pueden multiplicar significativamente la cobertura con costos reducidos. En el contexto de Anguía, donde la topografía es accidentada y los recursos limitados, reutilizar estructuras como torres o cerros como puntos de transmisión puede potenciar la viabilidad técnica y económica del diseño de redes de radioenlaces.

Antecedentes Nacionales

Terán [19], en su tesis “Diseño de una red de telecomunicaciones para el distrito La Hualla, Ayacucho – 2024”, cuyo objetivo fue diseñar una red de telecomunicaciones basada en radioenlaces para mejorar el acceso a Internet en zonas rurales altoandinas, utilizó la metodología de investigación aplicada, con enfoque cuantitativo, diseño no experimental y nivel correlacional-explicativo. El estudio integró análisis técnico de datos secundarios, simulaciones mediante el software LinkPlanner y validación del diseño a través de juicio de expertos. Entre sus resultados, se evidenció que los radioenlaces diseñados alcanzaban márgenes de desvanecimiento superiores a 20 dB e incluso más de 40 dB en enlaces estratégicos, con niveles de disponibilidad mayores al 99.99%, cumpliendo estándares ITU-R. La capacidad agregada llegó hasta 2.2 Gbps, garantizando excedente para futuras expansiones. En el aspecto económico, el proyecto muestra un costo total de inversión de USD 419,479, un Valor Actual Neto (VAN) positivo de USD 61,690.56 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 11.6%, alcanzando el punto de equilibrio en el cuarto año. Este antecedente es relevante para la presente investigación porque confirma la viabilidad técnica y económica de diseñar redes de radioenlaces en contextos de topografía accidentada y pobreza estructural, similares al distrito de Anguía, Cajamarca. Además, aporta parámetros cuantitativos (margen de desvanecimiento, throughput, disponibilidad y VAN) que permiten establecer comparaciones directas con el diseño propuesto en esta tesis.

Quillas, Gálvez y Sandoval [20], en su estudio “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”, propone un sistema de radioenlaces para conectar localidades rurales aisladas,

desatendidas por los proveedores de telecomunicaciones debido a su baja densidad poblacional y ubicación remota. La metodología utilizada incluyó la identificación de localidades objetivo, el análisis geográfico para seleccionar puntos elevados con líneas de visión despejadas, el diseño técnico de radioenlaces con comunicación dúplex para garantizar calidad y disponibilidad, y la evaluación de condiciones climáticas como lluvias y tormentas para asegurar la funcionalidad del sistema durante todo el año. Este estudio es relevante para nuestra investigación porque aborda desafíos similares en zonas altoandinas, y su enfoque técnico proporciona lineamientos útiles para diseñar y evaluar radioenlaces en la banda de 6 GHz, garantizando confiabilidad y disponibilidad bajo condiciones climáticas adversas.

Antecedentes Locales

Barboza [21], en su tesis “Evaluación comparativa de redes de backhaul de 5.8 GHz y 6 GHz en zonas rurales de Cajamarca 2024”, cuyo objetivo fue determinar cuál de las dos bandas ofrece una mejor relación costo–beneficio para la implementación de redes inalámbricas de backhaul en contextos rurales, utilizó la metodología de simulación técnica de 26 enlaces en el distrito de Tongod, empleando software especializado para evaluar parámetros de rendimiento (throughput, disponibilidad, margen de desvanecimiento) y análisis económico-financiero comparativo (CAPEX y OPEX). Los resultados mostraron que ambas bandas pueden alcanzar disponibilidades superiores al 99.99% y márgenes de desvanecimiento mayores a 10 dB; sin embargo, la banda de 6 GHz, gracias a su mayor ancho de canal (160 MHz), ofreció mejores niveles de eficiencia espectral y mayores capacidades (hasta 1280 Mbps por enlace troncal). Por su parte, la banda de 5.8 GHz demuestra mayor robustez frente a interferencias simuladas (-85 dBm) y mejor tolerancia a condiciones climatológicas adversas, resultando idóneo para enlaces cortos de menos de 3 km y demandas menores a 800 Mbps. En términos económicos, los costos de inversión fueron similares en los tres escenarios evaluados (entre USD 1,035,000 y USD 1,059,702.80), pero el OPEX anual más bajo correspondió al escenario híbrido (USD 192,480.26), gracias a la optimización de enlaces y el ahorro energético. Este antecedente es relevante para la presente investigación, porque demuestra, con datos técnicos y económicos en un contexto rural de Cajamarca, que la elección

de la banda y el diseño híbrido permiten optimizar tanto el rendimiento de la red como su sostenibilidad financiera. Además, aporta métricas comparables (throughput, disponibilidad, márgenes, CAPEX y OPEX) que sirven como referencia directa para evaluar la viabilidad de la red de radioenlaces propuesta en Anguía.

Pichilingüe [22], en su estudio titulado "Solución para Acceso a Internet de Banda Ancha para la Provincia de San Ignacio – Región Cajamarca", tuvo como objetivo desarrollar una solución técnico-económica para proporcionar servicios de banda ancha en San Ignacio, mejorando la calidad del servicio y promoviendo el desarrollo socioeconómico en zonas rurales. La metodología incluyó el análisis situacional, la evaluación de la cobertura de telecomunicaciones existente, el diseño de enlaces punto a punto y punto a multipunto (PTP y PMTP), la selección de equipamiento, y un análisis de costos (CAPEX y OPEX), considerando factores geográficos y demográficos. Los resultados mostraron que la red propuesta, basada en enlaces microondas y tecnología PMTP, es técnicamente viable y económicamente sostenible, garantizando cobertura y calidad de servicio. Se concluyó que esta red facilita el acceso a servicios digitales como educación, telemedicina y comercio electrónico, fomentando el desarrollo económico local y la inclusión digital. Este antecedente es relevante para nuestra investigación porque ofrece un enfoque técnico y metodológico replicable para implementar soluciones de conectividad inalámbrica en regiones con desafíos geográficos similares.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Fundamentos de las Telecomunicaciones Inalámbricas

Las telecomunicaciones inalámbricas se fundamentan en la propagación de ondas electromagnéticas descritas por las ecuaciones de Maxwell, las cuales establecen que las variaciones de los campos eléctricos y magnéticos permiten la transmisión de energía e información a través del espacio. La información puede transportarse mediante variaciones de amplitud, frecuencia o fase de una portadora, dando origen a técnicas de modulación analógicas (AM, FM, PM) y digitales (ASK, FSK, PSK, QAM).

En sistemas modernos de radioenlaces terrestres, la modulación en cuadratura (QAM) es predominante debido a su alta eficiencia espectral. La capacidad máxima teórica de un canal está definida por el teorema de Shannon-Hartley:

$$C = B \log_2(1 + S/N)$$

donde C es la capacidad del canal (bps), B el ancho de banda (Hz) y SNR la relación señal-ruido. Esta expresión establece el límite físico superior de transmisión y constituye la base para el dimensionamiento de enlaces de alta capacidad.

2.2.2. Fundamentos Teóricos de los Radioenlaces Punto a Punto

Propagación electromagnética en espacio libre

Los radioenlaces punto a punto operan predominantemente bajo condiciones de línea de vista (LOS). En ausencia de obstáculos, la pérdida por espacio libre (Free Space Path Loss, FSPL) se estima mediante:

$$L_p = 32.44 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d)$$

donde f es la frecuencia en MHz y d la distancia en kilómetros. Esta relación evidencia que la atenuación aumenta con la frecuencia y la distancia, constituyendo el fundamento físico del dimensionamiento de enlaces terrestres. [18].

Presupuesto de enlace (Link Budget)

El presupuesto de enlace permite determinar si la potencia recibida supera la sensibilidad del receptor para un esquema de modulación específico. Se expresa como:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p$$

donde:

- P_t : potencia transmitida
- G_t, G_r : ganancias de antena
- L_p : pérdidas por propagación
- L_{sys} : pérdidas adicionales del sistema

El margen de desvanecimiento (Fade Margin) se define como la diferencia entre la potencia recibida y la sensibilidad del receptor. Este parámetro es determinante para alcanzar la disponibilidad objetivo del enlace.

Zona de Fresnel y condiciones de línea de vista

Además de la línea de vista geométrica, es necesario garantizar el despeje adecuado de la primera zona de Fresnel. Su radio se calcula como:

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

donde λ es la longitud de onda y d_1 , d_2 las distancias parciales desde el obstáculo a cada antena.

Se recomienda mantener al menos el 60 % del primer radio libre de obstrucciones para minimizar pérdidas por difracción, especialmente en trayectos de larga distancia o en terrenos accidentados.

Desvanecimiento y disponibilidad del sistema

Los radioenlaces terrestres están expuestos a fenómenos de desvanecimiento por multitrayectoria, variaciones atmosféricas y atenuación por lluvia. La recomendación ITU-R P.530 establece los modelos para estimar la probabilidad de indisponibilidad anual en enlaces de microondas.

La disponibilidad A del sistema puede expresarse como:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

donde $MTBF$ es el tiempo medio entre fallas y $MTTR$ el tiempo medio de reparación. Una disponibilidad del 99.9 % equivale aproximadamente a 8.76 horas de indisponibilidad anual.

Rendimiento y eficiencia espectral

El rendimiento efectivo (throughput) depende de la potencia recibida, la relación señal-ruido y el esquema de modulación y codificación (MCS). En sistemas modernos se emplea modulación adaptativa (ACM), que ajusta dinámicamente el MCS según las condiciones del canal.

La eficiencia espectral se define como:

$$\eta = \frac{C}{B}$$

donde C es la capacidad efectiva y B el ancho de banda. Este concepto es fundamental para seleccionar bandas de operación y anchos de canal en función de la demanda proyectada.

2.2.3. Modelos de Propagación Aplicables a Enlaces Terrestres

El diseño de radioenlaces terrestres se apoya en modelos recomendados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R), entre los cuales destacan:

- ITU-R P.530: predicción de propagación y desvanecimiento en enlaces terrestres [4].
- ITU-R P.676: atenuación por gases atmosféricos (oxígeno y vapor de agua) [23].
- ITU-R P.838: atenuación específica por lluvia [24].
- ITU-R F.758-8: parámetros técnicos para sistemas de radioenlaces fijos [25].

Estos modelos permiten estimar pérdidas adicionales más allá del espacio libre y dimensionar adecuadamente el margen de desvanecimiento requerido.

2.2.4. Normativa Técnica y Marco Regulatorio

El diseño de radioenlaces debe cumplir con el marco normativo internacional y nacional, que incluye:

- Recomendaciones UIT-R para sistemas de microondas terrestres.
- Norma TIA-222-H para diseño estructural de torres.
- Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF) del Perú.
- Normativa del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) sobre uso del espectro radioeléctrico.

El cumplimiento de estas disposiciones garantiza interoperabilidad, seguridad estructural y uso eficiente del espectro.

2.2.5. Simuladores de Radioenlaces y Herramientas de Planificación

Importancia de los simuladores en el diseño de radioenlaces

El diseño moderno de radioenlaces terrestres requiere herramientas de simulación que permitan modelar el comportamiento electromagnético del enlace antes de su implementación física. Los simuladores integran modelos de propagación, perfiles topográficos digitales, parámetros de equipos reales y recomendaciones normativas (UIT-R), con el fin de estimar niveles de potencia recibida, margen de desvanecimiento, disponibilidad anual y capacidad del enlace.

Estas herramientas permiten reducir incertidumbre técnica, optimizar el dimensionamiento de torres y validar el cumplimiento de los requerimientos de capacidad y confiabilidad.

- **Radio Mobile**

Radio Mobile es una herramienta de simulación gratuita ampliamente utilizada para el análisis de radioenlaces en bandas VHF, UHF y microondas. Utiliza modelos digitales de elevación (SRTM, DEM) y permite calcular perfiles topográficos, zonas de Fresnel y niveles de señal.

Entre sus principales características destacan:

- Cálculo de cobertura y enlaces punto a punto
- Modelos de propagación basados en ITU
- Uso de bases de datos topográficas globales
- Generación de mapas de cobertura

No obstante, su precisión depende de la correcta configuración manual de parámetros y no siempre incorpora modelos avanzados de disponibilidad ni integración directa con equipos comerciales específicos.

- **Pathloss**

Pathloss es una herramienta profesional de planificación de enlaces de microondas utilizada en entornos corporativos y operadores de telecomunicaciones. Permite realizar:

- Análisis detallado del perfil del terreno
- Cálculo avanzado del presupuesto de enlace
- Estimación de disponibilidad basada en ITU-R P.530
- Evaluación de interferencias y coordinación de frecuencias

Pathloss ofrece alta precisión técnica y modelado avanzado de fenómenos de propagación. Sin embargo, su licencia es de costo elevado y requiere experiencia especializada para su configuración óptima.

- **Ubiquiti Link Planner (UISP Design Center)**

La plataforma de planificación de Ubiquiti (UISP Design Center o AirLink) permite simular enlaces punto a punto empleando equipos de la marca Ubiquiti. Sus principales características incluyen:

- Modelado de enlaces con perfiles de terreno
- Estimación de potencia recibida y throughput
- Selección automática de MCS
- Evaluación básica de interferencia

Su principal limitación radica en que está orientada exclusivamente a dispositivos Ubiquiti, restringiendo la evaluación comparativa con otros fabricantes o configuraciones heterogéneas.

- **Cambium Networks LinkPlanner**

LinkPlanner es una herramienta profesional desarrollada por Cambium Networks para la planificación de radioenlaces en bandas sub-6 GHz y microondas. Integra modelos de propagación conforme a recomendaciones ITU-R, incluyendo P.530 y P.838, y permite: cálculo detallado del presupuesto de enlace, simulación de disponibilidad anual, evaluación de atenuación por lluvia y gases, modelado de

interferencias, Optimización automática de configuración de enlace y cálculo de throughput basado en tablas reales de MCS del fabricante.

2.2.6. Cambium Networks LinkPlanner: Configuración y Modelado Técnico

Descripción general de LinkPlanner

LinkPlanner es una herramienta profesional de planificación de radioenlaces desarrollada por Cambium Networks para el diseño de enlaces punto a punto (PTP) y punto–multipunto (PMP) en bandas sub-6 GHz y microondas. La plataforma integra modelos de propagación basados en recomendaciones UIT-R, datos topográficos globales (SRTM, DEM), parámetros reales de equipos comerciales y algoritmos de optimización automática.

A diferencia de simuladores genéricos, LinkPlanner utiliza tablas reales de sensibilidad, potencia, curvas de rendimiento y esquemas de modulación (MCS) propios del fabricante, lo que permite estimar con mayor precisión:

- Potencia recibida (dBm)
- Margen de desvanecimiento (dB)
- Disponibilidad anual (%)
- Throughput agregado (Mbps)
- Impacto de interferencias

Parámetros de configuración fundamentales

La configuración de un radioenlace en LinkPlanner requiere definir los siguientes parámetros técnicos:

a) Ubicación geográfica

- Coordenadas geográficas (latitud y longitud)
- Altitud sobre el nivel del mar
- Altura de torre o mástil
- Tipo de estructura

El software genera automáticamente el perfil topográfico del trayecto y calcula la línea de vista y la zona de Fresnel.

b) Banda de frecuencia y canal

- Selección de banda (5.8 GHz, Upper-6 GHz, etc.)
- Ancho de canal (20, 40, 80, 160 MHz)
- Frecuencia central

El ancho de canal influye directamente en el ruido térmico, según:

$$N = kTB$$

donde el ruido aumenta proporcionalmente al ancho de banda.

c) Potencia de transmisión y EIRP

LinkPlanner calcula la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP) considerando:

$$EIRP = P_t + G_t - L_{cables}$$

El sistema permite verificar automáticamente el cumplimiento de límites regulatorios.

d) Modelo de propagación y disponibilidad

El software integra modelos basados en:

- ITU-R P.530 (desvanecimiento)
- ITU-R P.838 (atenuación por lluvia)
- ITU-R P.676 (absorción atmosférica)

Permite configurar:

- Clima regional
- Intensidad de lluvia (mm/h)
- Nivel de disponibilidad objetivo

Con estos datos, estima la probabilidad de indisponibilidad anual.

e) Modulación y rendimiento (MCS)

LinkPlanner selecciona automáticamente el esquema de modulación y codificación (MCS) en función del SNR estimado. La herramienta calcula el throughput efectivo basado en:

- Sensibilidad del receptor
- Curvas reales del equipo
- Nivel de interferencia estimado

Esto permite predecir la capacidad útil del enlace bajo condiciones reales.

Validación del presupuesto de enlace

La herramienta genera un reporte detallado que incluye:

- Potencia recibida (dBm)
- Nivel de ruido (dBm)
- SNR (dB)
- Margen de desvanecimiento (dB)
- Disponibilidad anual (%)
- Throughput agregado (Mbps)

Estos parámetros permiten validar si el diseño cumple los requerimientos técnicos de capacidad y confiabilidad definidos en la investigación.

Ventajas técnicas frente a otras herramientas

Desde el punto de vista metodológico, LinkPlanner ofrece:

- Integración directa con parámetros reales de equipos
- Cálculo automático de disponibilidad anual
- Modelado detallado de lluvia y condiciones climáticas
- Optimización automática de configuración
- Exportación de reportes técnicos completos

Estas características lo convierten en una herramienta adecuada para estudios de diseño donde se requiere coherencia entre teoría (ITU-R) y práctica (equipos comerciales específicos).

2.2.7. Fundamentos de Evaluación Económica de Proyectos de Telecomunicaciones

La evaluación económica de proyectos de infraestructura se sustenta en la teoría del valor temporal del dinero. El Valor Actual Neto (VAN) se calcula como:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - I_0$$

donde F_t es el flujo neto anual, i la tasa de descuento e I_0 la inversión inicial.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) corresponde a la tasa que hace $VAN = 0$. Estos indicadores permiten evaluar la sostenibilidad económica de proyectos de telecomunicaciones, considerando costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX).

2.3. Definición de términos básicos

Para efectos de esta investigación, se definen los siguientes conceptos clave, directamente vinculados con las variables de estudio:

- **Radioenlace:** Enlace inalámbrico de alta capacidad que transmite datos entre dos puntos fijos mediante microondas, generalmente bajo condiciones de línea de vista.
- **Zona de Fresnel:** Región alrededor de la línea de vista directa que debe permanecer libre de obstáculos para evitar pérdidas significativas en la señal.
- **EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power):** Potencia radiada equivalente de un sistema transmisor, que combina la potencia del equipo y la ganancia de la antena.
- **Throughput:** Capacidad efectiva de transmisión de datos de un radioenlace, expresada en Mbps o Gbps.
- **Disponibilidad:** Porcentaje de tiempo en que un enlace permanece operativo en un periodo anual; para backhaul se exige ≥ 99.9 %.

- **Fade Margin:** Margen de seguridad entre la potencia recibida y la potencia mínima requerida, expresado en dB, que asegura la robustez del enlace frente a desvanecimientos.
- **CAPEX/OPEX:** Costos de inversión inicial y costos operativos/mantenimiento del sistema, respectivamente.
- **VAN/TIR:** Indicadores financieros para evaluar la rentabilidad de proyectos. El VAN mide la rentabilidad neta descontada, mientras que la TIR representa la tasa de crecimiento esperada.
- **ACM (Adaptive Coding and Modulation):** técnica que ajusta dinámicamente la modulación y codificación según las condiciones del canal para maximizar el throughput.
- **XPIC (Cross-Polarization Interference Cancellation):** tecnología que duplica la capacidad del canal mediante el uso de polarización cruzada.
- **BER (Bit Error Rate):** proporción de bits erróneos respecto al total transmitido; indicador directo de calidad de enlace.
- **SLA (Service Level Agreement):** compromiso contractual de disponibilidad y calidad mínima del servicio.
- **MTBF/MTTR:** indicadores de confiabilidad operacional del sistema.

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica donde se realizó la investigación

La investigación se desarrolló en el distrito de Anguía, ubicado en la provincia de Chota, departamento de Cajamarca, Perú. El área de estudio comprende el ámbito territorial del distrito en su conjunto, incluyendo su capital distrital y zonas rurales, considerando las características demográficas y geográficas que influyen en la planificación de infraestructura de telecomunicaciones.

El distrito presenta una geografía predominantemente accidentada, con presencia de cerros, quebradas y formaciones montañosas que superan los 3 000 m s. n. m., condiciones que inciden directamente en el diseño, trazado y viabilidad técnica de redes inalámbricas basadas en radioenlaces. En las Fig. 1 y 2 se muestra la ubicación geográfica del distrito de Anguía en el contexto nacional y regional.

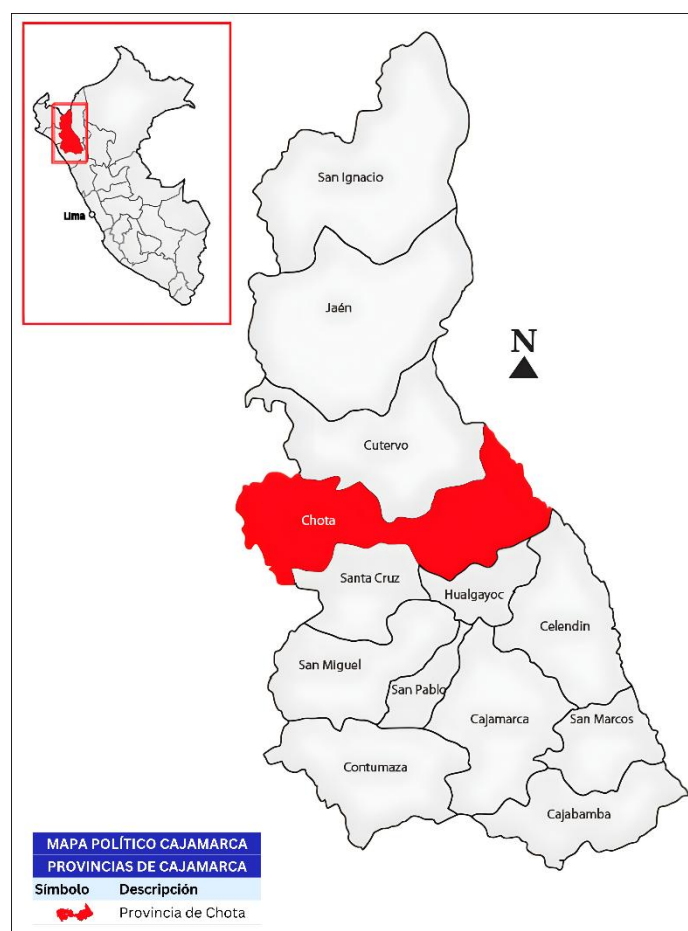


Fig. 1. Mapa de ubicación del distrito de Chota.



Fig. 2. Mapa del distrito de Anguía, Provincia de Chota, departamento de Cajamarca.

La investigación se desarrolló entre los meses de enero y agosto del 2025 del comprendiendo la recolección de información secundaria, el diseño técnico, la simulación de radioenlaces y el análisis de resultados.

3.1 Procedimiento

La presente investigación es de tipo aplicada, con nivel descriptivo, diseño no experimental y enfoque cuantitativo, orientada al diseño y validación técnica de una red de radioenlaces para el distrito de Anguía. Metodológicamente, el estudio se alinea con el enfoque Top-Down [26] de planificación de redes y con el modelo PPDIOO [27] hasta la fase de Design, dado que el alcance comprende la preparación, planificación y diseño técnico, sin implementación física ni operación en campo.

En una primera fase se realizó la proyección poblacional al año 2035, adoptando un horizonte de planificación de diez años. Este periodo resulta técnicamente consistente con el ciclo de vida útil del equipamiento activo de radioenlaces, cuya renovación tecnológica suele producirse entre los 7 y 10 años debido a la evolución de estándares, eficiencia espectral y requerimientos de capacidad. Si bien la infraestructura pasiva (torres y casetas) puede tener una vida útil superior a 20 años [28], [29], el dimensionamiento de la red se fundamenta en la capacidad del sistema activo, por lo que un horizonte de diez años permite garantizar sostenibilidad técnica sin sobredimensionamientos innecesarios.

Posteriormente, se efectuó la identificación y georreferenciación de las unidades territoriales de análisis, desarrollándose el diseño preliminar mediante evaluación topográfica y optimización de emplazamientos. Se definieron torres ventadas arriostradas de 20 a 40 m. como solución estándar y, en casos específicos, torres autosoportadas de mayor altura. En todos los trayectos se verificó el despeje de la primera zona de Fresnel, garantizando condiciones adecuadas de línea de vista.

Con el trazado definido, se seleccionó el equipamiento en función de la demanda estimada, optimizando la elección de bandas en 5.8 GHz y 6 GHz según los requerimientos de capacidad, alcance y robustez frente a interferencias. Se evaluaron escenarios de interferencia y se dimensionaron parámetros críticos como el margen de desvanecimiento, la disponibilidad anual y los esquemas de modulación adaptativa (MCS).

La validación técnica se realizó mediante la implementación del modelo de propagación ITU-R P.530 en el simulador seleccionado, lo que permitió estimar el desempeño radioeléctrico bajo condiciones reales de topografía y clima. El Anexo 1 presenta la evaluación comparativa de los simuladores analizados; de acuerdo con la valoración ponderada efectuada, LinkPlanner obtuvo el mayor puntaje global (4.65/5), justificando su selección como herramienta principal de simulación.

Finalmente, se efectuó la evaluación económica preliminar del proyecto mediante el análisis de inversión (CAPEX) y costos operativos (OPEX), con el propósito de determinar su viabilidad técnica y socioeconómica.

La Fig. 3 sintetiza las fases del procedimiento metodológico.

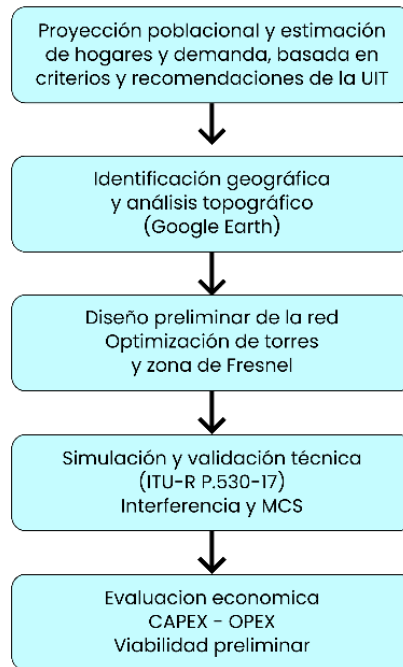


Fig. 3. Fases del procedimiento metodológico aplicado para el diseño y validación de la red de radioenlaces en el distrito de Anguía.
(Elaboración propia.)

3.2 Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados

El procedimiento metodológico de la investigación se estructuró en cinco fases secuenciales e interrelacionadas, orientadas a asegurar coherencia técnica entre el diagnóstico territorial, el dimensionamiento de la demanda y el diseño–evaluación económica de la red de radioenlaces propuesta para el distrito de Anguía. Esta organización garantiza trazabilidad de datos y reproducibilidad del proceso de diseño.

En esta sección se desarrolla la Fase 1, correspondiente a la caracterización demográfica y estimación de la demanda de conectividad, utilizando información oficial y criterios técnicos de proyección.

La muestra está conformada por los centros poblados considerados en el diseño de la red, seleccionados bajo el criterio principal de contar con más de veinte (20) hogares, por representar unidades territoriales con demanda potencial significativa de acceso a Internet.

De manera complementaria, se incorporó el Centro Poblado de Castilla, el cual registra seis (6) hogares según el último censo [30], [31]. Su inclusión no

responde a un criterio demográfico, sino a una necesidad técnica derivada de la topología propuesta. La torre proyectada en Castilla constituye el nodo estratégico que permite la interconexión del Centro Poblado de Yamse Ushum con 88 viviendas ocupadas [30], garantizando continuidad y viabilidad estructural del diseño. En consecuencia, Castilla fue anexado al análisis de demanda como nodo funcional dentro de la arquitectura de red, manteniendo coherencia metodológica con los objetivos técnicos del proyecto.

2.3.1. Fase 1 - Proyección poblacional y estimación de hogares y demanda, basada en criterios y recomendaciones de la UIT

3.2.1.1. Condiciones socioeconómicas del distrito

El distrito de Anguía presenta condiciones socioeconómicas críticas que inciden directamente en el limitado acceso a servicios básicos y en la reducción de oportunidades de desarrollo para su población. Según el Mapa de Pobreza Monetaria 2023 del INEI, más del 40 % de los habitantes del distrito se encuentra en situación de pobreza, lo que se traduce en bajos ingresos familiares y una alta dependencia de actividades de subsistencia [32].

La economía local se basa predominantemente en la agricultura y ganadería de subsistencia, orientadas principalmente al autoconsumo, con comercialización limitada en mercados locales de Chota y zonas aledañas. La escasa tecnificación productiva, las restricciones de infraestructura y el aislamiento geográfico reducen la competitividad económica del distrito [7].

En el ámbito educativo, si bien existen instituciones de nivel inicial, primario y secundario distribuidas en la mayoría de los centros poblados, se evidencia un déficit de infraestructura y recursos tecnológicos que limita la incorporación de herramientas digitales en los procesos de enseñanza. El acceso a educación superior requiere, en la mayoría de los casos, la migración de los jóvenes hacia ciudades como Chota o Cajamarca [33].

3.2.1.2. Caracterización habitacional y ocupación de viviendas

La estimación de ocupantes por vivienda en el distrito de Anguía evidenció un promedio distrital de 2.6 personas por hogar, valor inferior al promedio rural nacional (≈ 3.6 personas por hogar, según INEI) [34]. Esta diferencia no implica

inconsistencia estadística, sino que responde a dinámicas demográficas propias del distrito, caracterizadas por migración temporal o permanente hacia centros urbanos, envejecimiento poblacional y existencia de viviendas con ocupación parcial.

El análisis por centro poblado mostró variaciones significativas. Localidades como Huallangate (3.4), Tayapotrero (3.7) y Chiut (3.1) presentan estructuras familiares más cercanas al promedio rural nacional, mientras que Yamse Ushun (1.2), Cercado (1.5) y Pampagrande (2.0) registran valores inferiores, lo que sugiere presencia de hogares unipersonales, adultos mayores o viviendas parcialmente habitadas. Estas diferencias evidencian la heterogeneidad demográfica del distrito y los distintos patrones de ocupación residencial.

Este indicador resulta fundamental para la proyección de la demanda de conectividad, ya que el número de ocupantes por vivienda incide directamente en la probabilidad de uso simultáneo del servicio de Internet. A mayor densidad habitacional, mayor concurrencia potencial de dispositivos y consumo de ancho de banda. La Tabla 1 presenta el detalle de población y viviendas ocupadas por centro poblado.

Tabla 1. Listado de CCPP por población y cantidad de hogares.

Centro Poblado	Población Total	Viviendas Ocupadas	Promedio de ocupantes por vivienda
Anguía	395	146	2.7
Tayapotrero	121	33	3.7
Huallangate	436	129	3.4
Vista Alegre	99	34	2.9
Yamse Ushun	105	88	1.2
Chiut	233	75	3.1
Tendal	185	68	2.7
Rodeopampa	158	54	2.9
Aliso	409	140	2.9
Succha	120	44	2.7
Pampagrande	156	77	2.0
Chugur	353	130	2.7
Colcabamba	191	93	2.1
Cercado	111	76	1.5
Castilla	19	6	3.2
Rosapampa	74	33	2.2
Nuevos Aires	46	22	2.1
Total	3,211	1,244	2.6

3.2.1.3. Proyección poblacional al 2035

Con el fin de estimar la demanda futura de servicios de telecomunicaciones, se realizó una proyección poblacional al horizonte de 10 años (2025–2035). Para ello, se empleó el método de crecimiento geométrico, recomendado por el INEI para proyecciones en áreas rurales [34], conforme a la expresión:

$$P_t = P_0 (1 + r)^n \dots (1)$$

donde P_t es la población proyectada al año t , P_0 la población base, r la tasa de crecimiento anual y n el número de años proyectados.

De acuerdo con el Informe Económico y Social de Cajamarca, la tasa promedio de crecimiento poblacional en zonas rurales de la región durante el periodo 2008-2017 fue de -0.3 % anual, atribuida principalmente a procesos migratorios hacia zonas urbanas [35]. Esta tasa fue adoptada como referencia para el presente estudio.

Aplicando el modelo con $r = -0.003$ y $n = 10$, se obtuvo un factor de proyección de 0.9704, lo que representa una reducción aproximada del 3 % en el periodo analizado. En consecuencia, la población total del distrito pasó de 3,211 habitantes en 2025 a un valor estimado de 3,115 habitantes en 2035. La Tabla 2 muestra el detalle de la proyección poblacional por centro poblado.

Tabla 2. Proyección poblacional al 2035 con una tasa de crecimiento de -0.3% anual

Nº	Centro Poblado	Población Base (2025)	Viviendas Ocupadas	Ocupantes por vivienda	Población 2035 ($r = -0.3\%$)
1	Anguía	395	146	2.7	383
2	Tayapotrero	121	33	3.7	117
3	Huallangate	436	129	3.4	423
4	Vista Alegre	99	34	2.9	96
5	Yamse Ushun	105	88	1.2	102
6	Chiut	233	75	3.1	226
7	Tendal	185	68	2.7	180
8	Rodeopampa	158	54	2.9	153
9	Aliso	409	140	2.9	397
10	Succha	120	44	2.7	116
11	Pampagrande	156	77	2.0	151
12	Chugur	353	130	2.7	343
13	Colcabamba	191	93	2.1	185
14	Cercado	111	76	1.5	108
15	Castilla	19	6	3.2	18
16	Rosapampa	74	33	2.2	72
17	Nuevos Aires	46	22	2.1	45
	Total	3,211	1,244	2.6	3,115

Si bien la proyección poblacional evidencia una tasa negativa de crecimiento, este comportamiento no responde únicamente a dinámicas demográficas naturales, sino principalmente a la ausencia de servicios básicos y de telecomunicaciones, lo que impulsa la migración hacia centros urbanos. Diversos estudios señalan que la disponibilidad de servicios esenciales, particularmente de conectividad digital, contribuye a reducir la migración sostenida y a mejorar la calidad de vida en zonas rurales [32], [36], [37].

3.2.1.4. Determinación de ancho de banda por hogar

Para el dimensionamiento de la red se adoptó un caudal objetivo de 10 Mbps por hogar rural, considerando usos simultáneos típicos como clases virtuales, videollamadas, navegación web y reproducción de contenidos audiovisuales, así como un margen adicional del 20–30 % asociado a protocolos y variaciones instantáneas de tráfico.

Este valor es consistente con recomendaciones internacionales para la inclusión digital básica en áreas rurales y con lineamientos de la UIT relacionados con la planificación de calidad de servicio (QoS) y reserva de capacidad para tráfico concurrente [38], [39], [40]. La demanda pico agregada por centro poblado se estimó mediante la expresión:

$$D_{CP} = N_{hogares} \times 10 \text{ Mbps} \times f_{sim} \dots (2)$$

donde f_{sim} representa el factor de simultaneidad horario, adoptado en el rango de 0.30 a 0.40. Para el presente estudio se utilizó un valor de 0.35.

La Tabla 3 presenta la demanda pico estimada de ancho de banda por centro poblado, obteniéndose una demanda agregada distrital de aproximadamente 4.37 Gbps al horizonte 2035.

Tabla 3. Demanda de ancho de banda por centro poblado del distrito de Anguía

Centro Poblado	Viviendas Ocupadas	Demanda CP (Mbps)
Anguía	146	511.0
Tayapotrero	33	115.5
Huallangate	129	451.5
Vista Alegre	34	119.0
Yamse Ushun	88	308.0
Chiut	75	262.5
Tendal	68	238.0
Rodeopampa	54	189.0
Aliso	140	490.0
Succha	44	154.0

Pampagrande	77	269.5
Chugur	130	455.0
Colcabamba	93	325.5
Cercado	76	266.0
Castilla	6	21.0
Rosapampa	33	115.5
Nuevos Aires	22	77.0
Total	1,368	4,368.0 Mbps ($\approx$ 4.37 Gbps)

La Fig. 4 muestra el gráfico comparativo de la demanda por centro poblado.

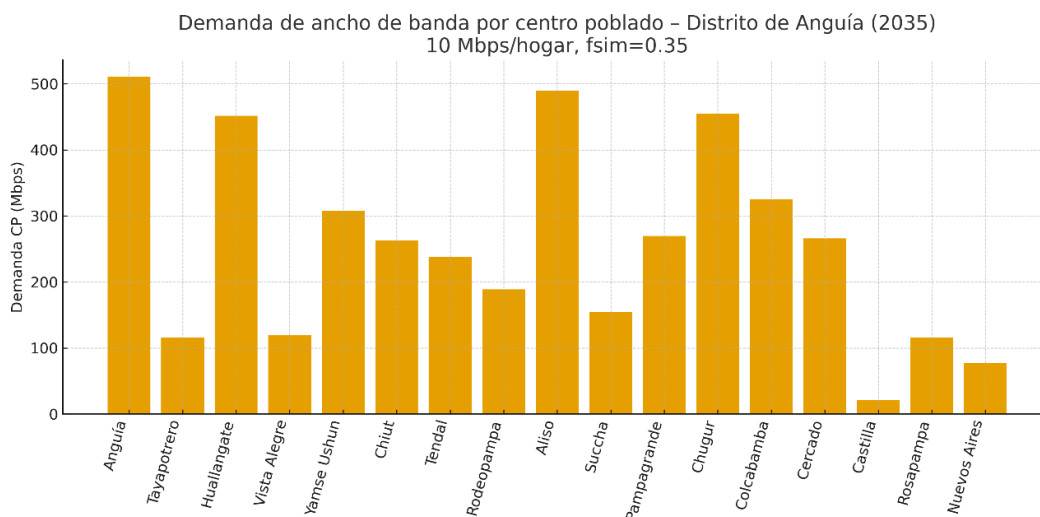


Fig. 4. Gráfico de barras comparativo por centro poblado

2.3.2. Fase 2 – Identificación geográfica y análisis topográfico (Google Earth)

La Fase 2 tuvo como finalidad caracterizar el entorno físico, geográfico y territorial del área de estudio, a partir del análisis de información geográfica, topográfica y cartográfica, con el propósito de identificar las condiciones naturales y de infraestructura que influyen directamente en el diseño y viabilidad de la red de radioenlaces propuesta para el distrito de Anguía.

Esta fase constituye un insumo fundamental para la definición de la topología de red, la selección de ubicaciones para torres y nodos intermedios, y la evaluación de las condiciones de propagación radioeléctrica en el entorno rural altoandino.

3.2.2.1. Caracterización geográfica y topográfica

A partir del análisis geográfico y topográfico del área de estudio se determinó que el distrito de Anguía presenta un relieve predominantemente accidentado y montañoso, característico de la sierra norte del Perú. Para esta caracterización

se utilizaron las coordenadas oficiales de los centros poblados proporcionadas por el INEI [41], las cuales fueron verificadas y analizadas en Google Earth Pro.

Mediante la generación de perfiles altimétricos se obtuvieron diferencias de cota, pendientes y distancias entre los emplazamientos evaluados, lo que permitió identificar posibles obstrucciones naturales y analizar la viabilidad preliminar de línea de vista (LoS) entre nodos.

El análisis altitudinal evidenció elevaciones que oscilan aproximadamente entre 1 800 y 3 200 m s. n. m., con presencia de mesetas intermedias, laderas pronunciadas y quebradas profundas. Estas condiciones constituyen una restricción relevante para el diseño de radioenlaces punto a punto, ya que requieren garantizar el despeje adecuado de la primera zona de Fresnel y, en algunos casos, la incorporación de torres intermedias.

La Tabla 4 presenta las altitudes de los centros poblados y su clasificación altitudinal, información utilizada como insumo para el dimensionamiento geométrico de la red.

Tabla 4. Altitud de centros poblados del distrito de Anguía por región natural.

CÓDIGO	CENTROS POBLADOS	REGIÓN NATURAL	ALTITUD (m s. n. m.)
0001	Anguía	Quechua	2 620
0002	Tayapotrero	Yunga fluvial	2 102
0003	Huallangate	Quechua	2 438
0004	Vista Alegre	Quechua	2 521
0005	Yamse Ushun	Yunga fluvial	1 813
0006	Chiut	Quechua	2 330
0007	Tendal	Quechua	2 616
0008	Rodeopampa	Quechua	2 372
0009	Aliso	Quechua	2 730
0010	Succha	Quechua	2 656
0011	Pampagrande	Quechua	2 570
0012	Chugur	Quechua	2 690
0013	Colcabamba	Quechua	2 418
0014	Cercado	Quechua	2 721
0015	Castilla	Yunga fluvial	2 034
0016	Rosapampa	Quechua	2 687
0017	Nuevos Aires	Quechua	2 526

En la Fig. 5 se muestra una representación del relieve accidentado del área de estudio, donde se evidencia la presencia de barreras naturales que dividen el distrito en sectores con diferentes niveles de accesibilidad.

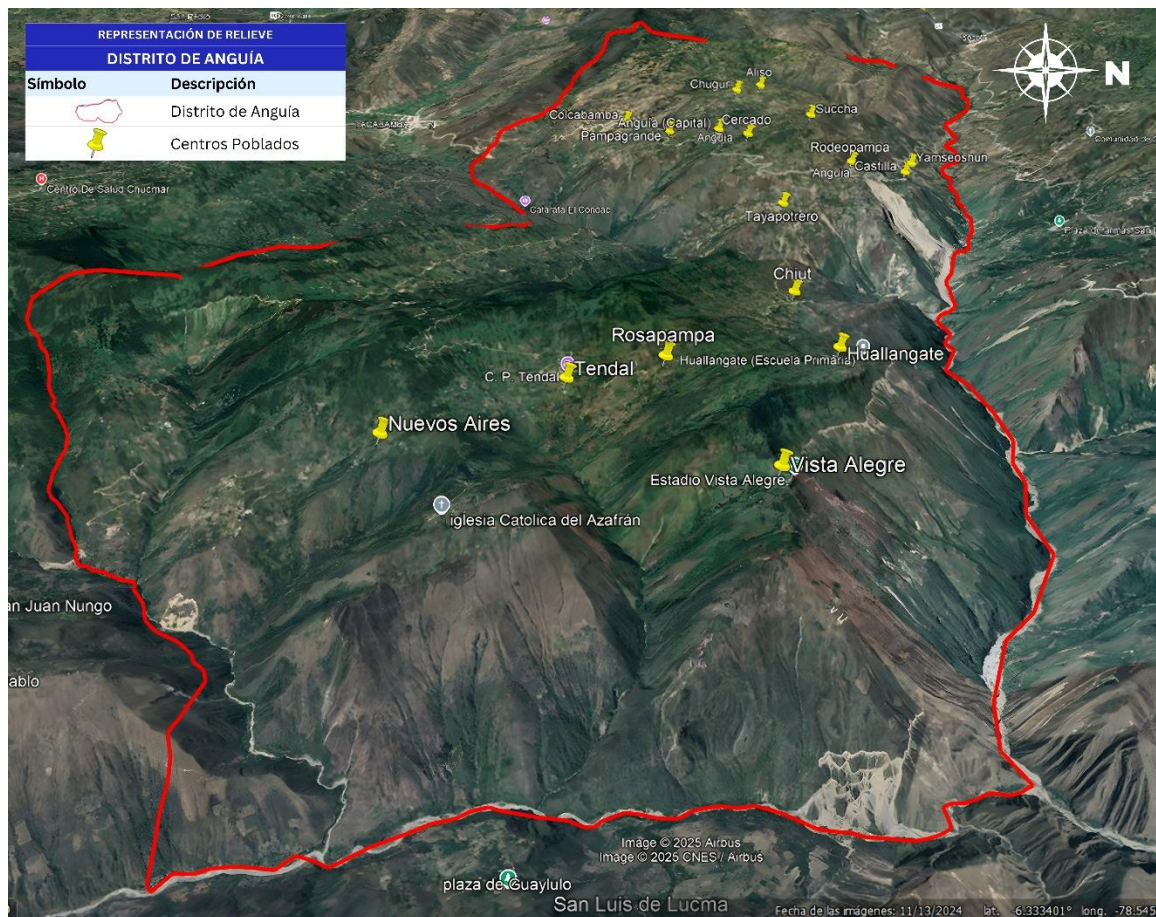


Fig. 5. Representaciones del relieve geográfico del distrito de Anguía, vista de Este a Oeste.

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2. Georeferenciación de los centros poblados

Con el propósito de analizar la distribución espacial de los centros poblados y evaluar su incidencia en el diseño de la red de radioenlaces, se realizó la georeferenciación de las localidades seleccionadas del distrito de Anguía. Para ello, se empleó la Plataforma Nacional de Datos Georeferenciados del Perú, la cual proporciona información cartográfica oficial y coordenadas geográficas de referencia [42].

En la Tabla 5 se presentan las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de los centros poblados considerados en el estudio, información que constituye un insumo fundamental para el análisis de distancias, la evaluación de línea de vista (LoS) y la planificación de los enlaces inalámbricos.

Tabla 5. Coordenadas de CCPP seleccionados.

Centro Poblado	Latitud (°)	Longitud (°)
Aliso	06.340785	-78.62473
Angüía	06.341865	-78.60537
Castilla	06.316355	-78.61100
Cercado	06.336635	-78.60219
Chiut	06.319695	-78.56269
Chugur	06.343635	-78.62222
Colcabamba	06.357725	-78.60998
Huallangate	06.312115	-78.55036
Nuevos Aires	06.347245	-78.51993
Pampa Grande	06.348395	-78.60251
Rodeopampa	06.322125	-78.60412
Rosapampa	06.340105	-78.57255
Succha	06.330535	-78.61466
Tayapotrero	06.328985	-78.59291
Tendal	06.341545	-78.53256
Vista Alegre	06.341155	-78.52577
Yamse Ushun	06.316405	-78.62082

En la Fig. 5 se muestra la ubicación espacial de los principales centros poblados del distrito de Angüía, donde se observa una distribución dispersa y condicionada por el relieve montañoso. Las altitudes de las localidades georreferenciadas varían aproximadamente entre los 2 000 y 2 730 m.s.n.m., destacando que Yamse Ushun constituye el único centro poblado que se sitúa por debajo de los 2 000 m.s.n.m.

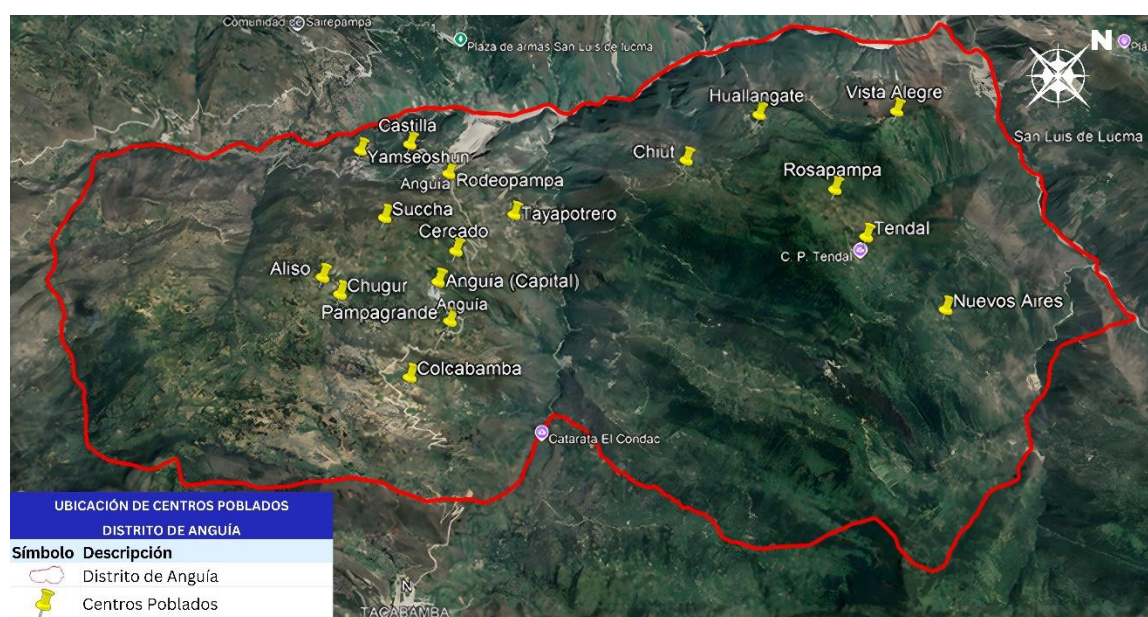


Fig. 5. Ubicación de los Centros Poblados del distrito de Angüía.

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3. Infraestructura de soporte del proyecto

La infraestructura de soporte del proyecto comprende el análisis de los recursos existentes que permiten o condicionan la implementación de la red de telecomunicaciones propuesta. En esta fase se evalúan dos componentes fundamentales: la infraestructura de telecomunicaciones disponible y la infraestructura energética del distrito de Anguía, ambos determinantes para la viabilidad técnica y económica del diseño planteado.

3.2.2.3.1 Infraestructura de telecomunicaciones

Durante el periodo de investigación se identificó que la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO) atraviesa la capital distrital de Anguía, donde se encuentra instalado un nodo de distribución correspondiente al Proyecto Regional Cajamarca. Esta infraestructura troncal constituye el principal punto de acceso a conectividad de alta capacidad para el distrito.

No obstante, se evidenció que dicha infraestructura se encuentra subutilizada, debido a la ausencia de proyectos de última milla que permitan extender el servicio de conectividad hacia los centros poblados rurales. Actualmente, la cobertura efectiva de Internet se limita principalmente al área urbana de la capital distrital.

Tal como se aprecia en la Fig. 6, la RDNFO proporciona un punto de interconexión estratégico desde el cual se proyecta el despliegue de una red de radioenlaces punto a punto, destinada a interconectar los centros poblados del distrito y asegurar su articulación con la infraestructura troncal nacional.

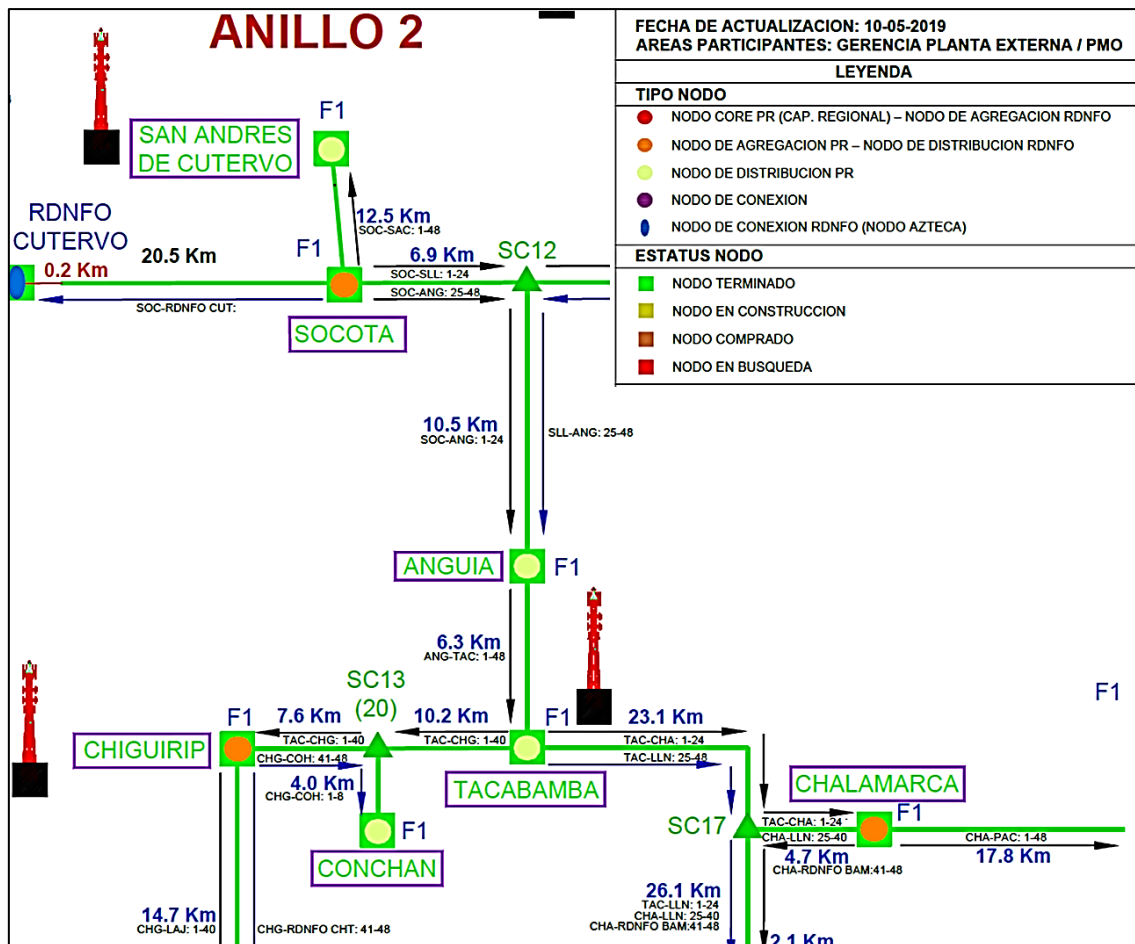


Fig. 6. Mapa unifilar del Proyecto Regional Cajamarca de la RDNFO [43].

Asimismo, el diagnóstico de cobertura móvil realizado mediante el portal de OSIPTEL evidenció que solo el 13.13 % del territorio distrital cuenta con algún nivel de servicio, lo que confirma la necesidad de implementar redes inalámbricas complementarias para cerrar la brecha de conectividad (ver Fig. 7).

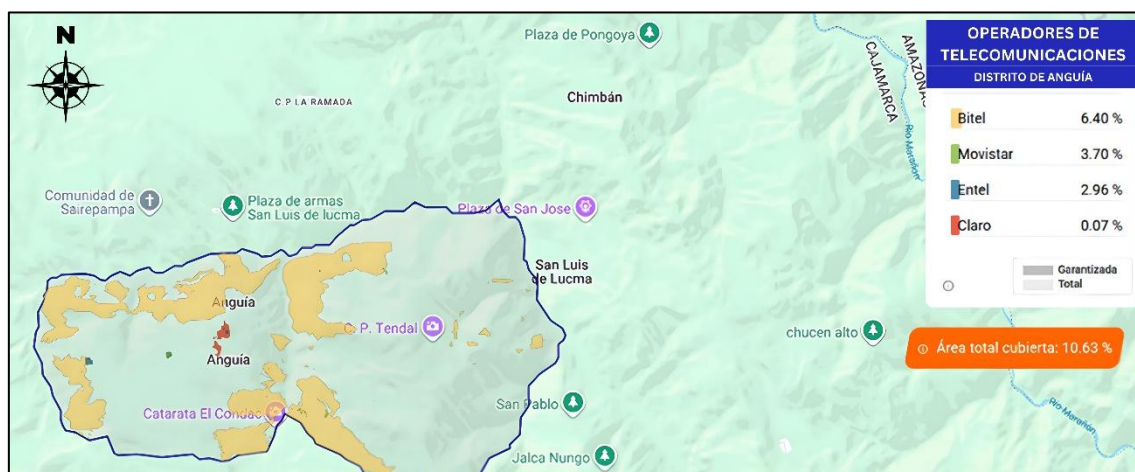


Fig. 7. Operadores de Telecomunicaciones en el Distrito de Anguía.

3.2.2.3.2 Infraestructura energética

El análisis de la infraestructura energética se realizó a partir de información del Mapa Energético Minero, lo que permitió identificar la disponibilidad de suministro eléctrico en los centros poblados del distrito de Anguía. Los resultados muestran que, si bien la mayoría de las localidades cuenta con acceso a la red eléctrica nacional, existen centros poblados que carecen de infraestructura eléctrica visible.

Los centros poblados de Tayapotrero, Yamse Ushun, Succha, Castilla, Rosapampa y Nuevos Aires no presentan acceso a red eléctrica convencional, lo que limita la operación de equipos de telecomunicaciones mediante fuentes tradicionales de energía.

La Tabla 6 resume el acceso a energía eléctrica por centro poblado, información relevante para la planificación técnica y económica del proyecto

Tabla 6. Acceso a energía eléctrica en los centros poblados del distrito de Anguía

Centro Poblado	Acceso a energía eléctrica	Observaciones
Anguía	Sí	Capital distrital, conectada a red de media tensión.
Tayapotrero	No	Zona aislada, sin infraestructura eléctrica visible.
Huallangate	Sí	Cercano a tendidos eléctricos.
Vista Alegre	Sí	Conexión desde red principal cercana.
Yamse Ushun	No	Único centro poblado bajo los 2000 m.s.n.m.; no se observa red cercana.
Chiut	Sí	Acceso a red eléctrica de media tensión.
Tendal	Sí	Conectado a red local.
Rodeopampa	Sí	Cercano a líneas de media tensión.
Aliso	Sí	Núcleo poblacional importante, conectado.
Succha	No	Centro pequeño y disperso, sin infraestructura visible.
Pampagrande	Sí	Conexión identificada en mapa eléctrico.
Chugur	Sí	Centro poblado intermedio con acceso a red.
Colcabamba	Sí	Conectado a líneas locales.
Cercado	Sí	Acceso identificado en el mapa.
Castilla	No	Centro muy pequeño, sin red eléctrica.
Rosapampa	No	Población reducida, sin conexión eléctrica.
Nuevos Aires	No	Centro pequeño, sin red eléctrica.

Este diagnóstico energético constituye un insumo clave para la evaluación económica del proyecto, ya que permite priorizar el uso de la red eléctrica convencional en las localidades conectadas y considerar la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos únicamente en aquellos centros poblados sin acceso a energía eléctrica, optimizando los costos de inversión y operación del sistema (ver Fig. 8).



Fig. 8. Distribución eléctrica en Anguía.

2.3.3. Fase 3 - Diseño preliminar de la red, optimización de torres y zona de Fresnel.

En esta fase se desarrolló el diseño técnico y la optimización progresiva de la red de radioenlaces propuesta para el distrito de Anguía, utilizando como insumo la información demográfica, geográfica y territorial obtenida en las fases anteriores. El propósito fue definir una topología preliminar técnicamente viable, minimizando el número de torres y la complejidad de la red, sin comprometer el alcance de conectividad entre centros poblados.

El proceso se realizó de forma iterativa, iniciando con un trazado conceptual de interconexión y evolucionando hacia un diseño optimizado basado en criterios geométricos (línea de vista, selección de cotas elevadas, reducción de saltos y consolidación de nodos hub). La validación cuantitativa del despeje de la primera zona de Fresnel y el desempeño radioeléctrico (MCS, SNR, disponibilidad y

throughput) se desarrollan posteriormente en la Fase 4, mediante simulación en software especializado.

3.2.3.1. Esquema inicial de interconexión (diseño no optimizado)

Como punto de partida, se elaboró un esquema inicial de interconexión entre los centros poblados del distrito, concebido únicamente como una primera aproximación para visualizar la cobertura territorial de la red. En este diseño preliminar, mostrado en la Fig. 9, los centros poblados fueron interconectados de manera teórica, sin considerar la existencia de línea de vista (LoS) entre los nodos.

Este esquema permitió identificar de forma inmediata que la mayoría de los enlaces propuestos no cumplían con el requisito básico de visibilidad directa, lo que evidenció la inviabilidad técnica del trazado inicial y justificó la necesidad de realizar ajustes posteriores basados en el análisis topográfico y geométrico del terreno.



Fig. 9. Diseño que interconecta los centros poblados sin línea de vista.

3.2.3.2. Restricciones topográficas identificadas

El análisis detallado del relieve del distrito permitió identificar una restricción geográfica determinante para el diseño de la red: la presencia de una quebrada profunda que desciende hasta aproximadamente los 1 500 m s. n. m., la cual divide el territorio distrital en dos grandes sectores o subsistemas (Fig. 10).

Esta condición interrumpe la visibilidad directa entre varios centros poblados y obliga a considerar ubicaciones estratégicas de torres y nodos intermedios en puntos elevados para asegurar continuidad en la red.

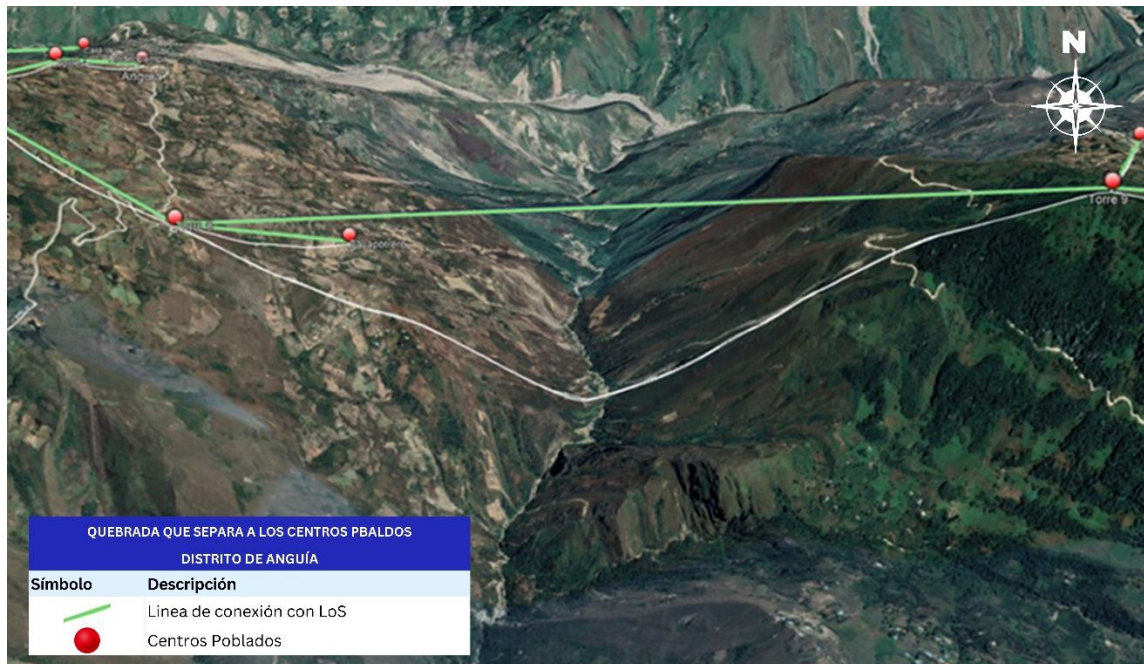


Fig. 10. Quebrada que separa los centros poblados del distrito de Anguía

3.2.3.3. Primer diseño preliminar no optimizado

A partir del esquema inicial, se elaboró un primer diseño preliminar incorporando parcialmente la topografía (Fig. 11). En el sector este se logró línea de vista en algunos tramos; sin embargo, hacia el sureste (Nuevos Aires y zonas adyacentes), la quebrada y las laderas pronunciadas impidieron visibilidad directa, por lo que se plantearon ubicaciones alternativas de torres (Torres 13, 14 y 15) para evaluación posterior.

Los tramos sin línea de vista confirmaron la necesidad de iteraciones sucesivas, con ajustes de emplazamiento y altura, para alcanzar una topología viable.

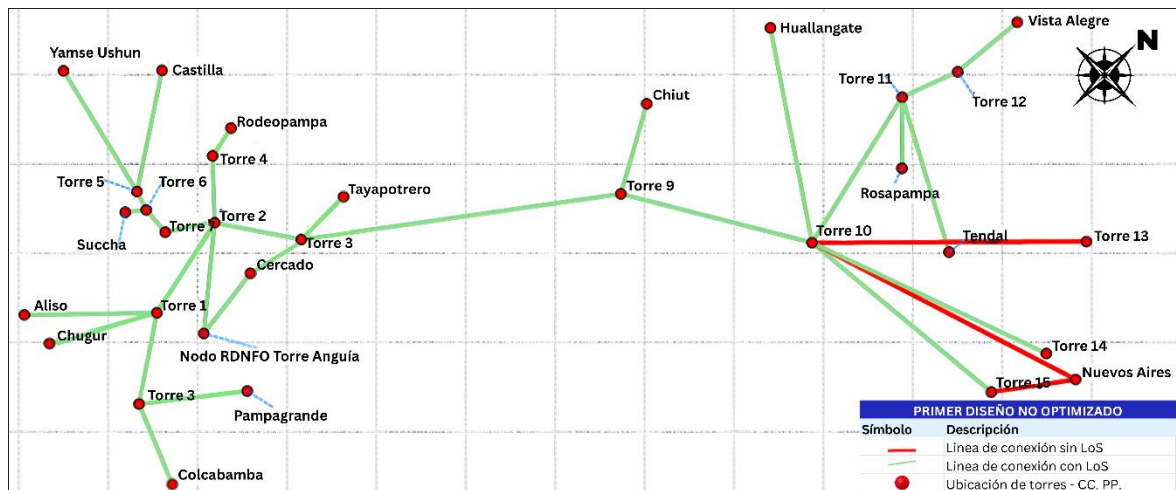


Fig. 11. Primer diseño no optimizado.

3.2.3.4. Iteraciones del diseño y criterios de optimización

Con base en el diseño preliminar, se desarrollaron iteraciones orientadas a mejorar la factibilidad técnica y reducir infraestructura. Estas iteraciones incluyeron: análisis de perfiles de terreno, micro-reubicaciones de emplazamientos, selección de nodos pivote en cotas elevadas, eliminación de torres redundantes y reducción de saltos innecesarios.

De la Fig. 13 a la Fig. 20 documentan la evolución del diseño desde su estado preliminar hasta una configuración optimizada.

3.2.3.5. Optimización del subsistema este

El análisis de perfiles permitió seleccionar nodos pivote y consolidar un hub principal. La reubicación de la Torre 10 hacia la posición de la Torre 16 mejoró la visibilidad directa con nodos clave y permitió eliminar torres redundantes. La topología final del subsistema este quedó consolidada con la Torre 16 como nodo central y la Torre 13 como nodo de distribución hacia Nuevos Aires, Vista Alegre y Rosapampa (Fig. s. 12 a 16).

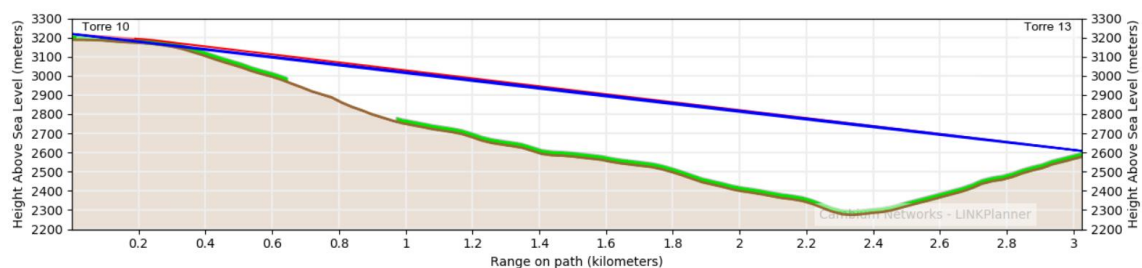


Fig. 12. Perfil entre torre 10 y torre 13.

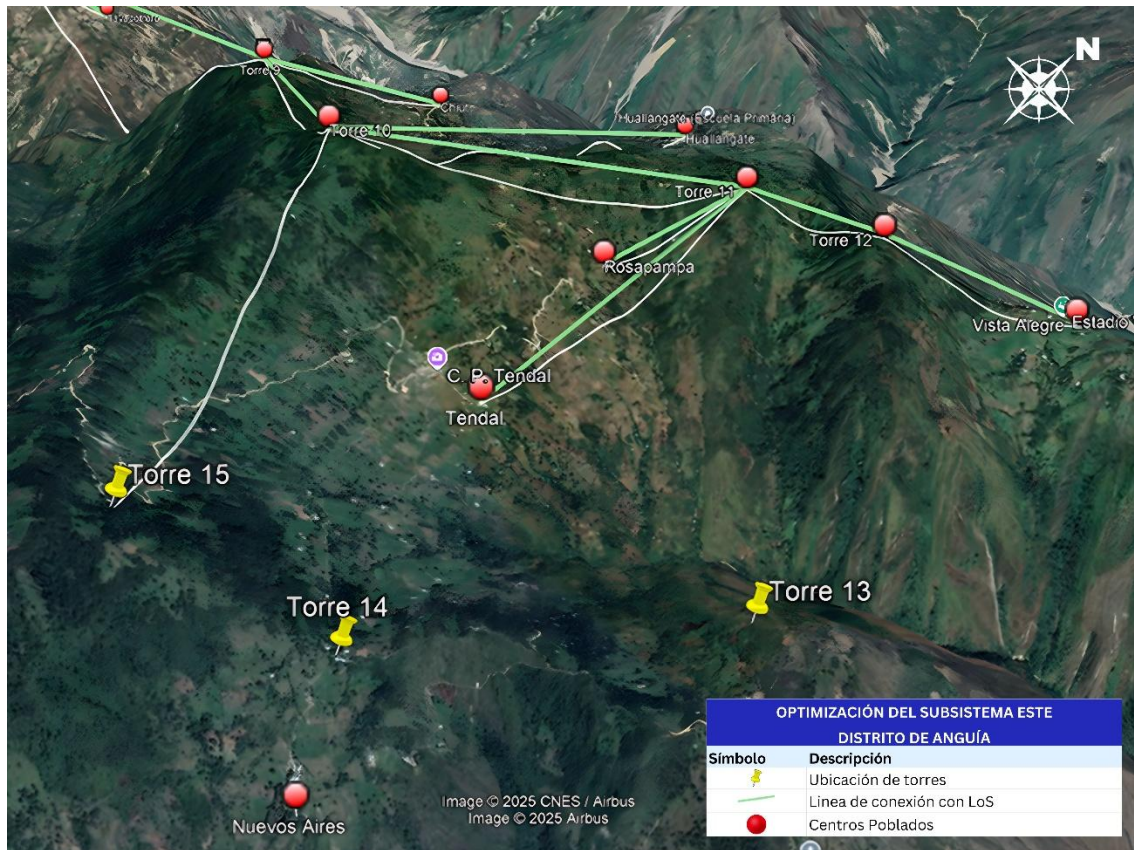


Fig. 13. Torres 13, 14 y 15 para mejorar la interconexión de la parte este.

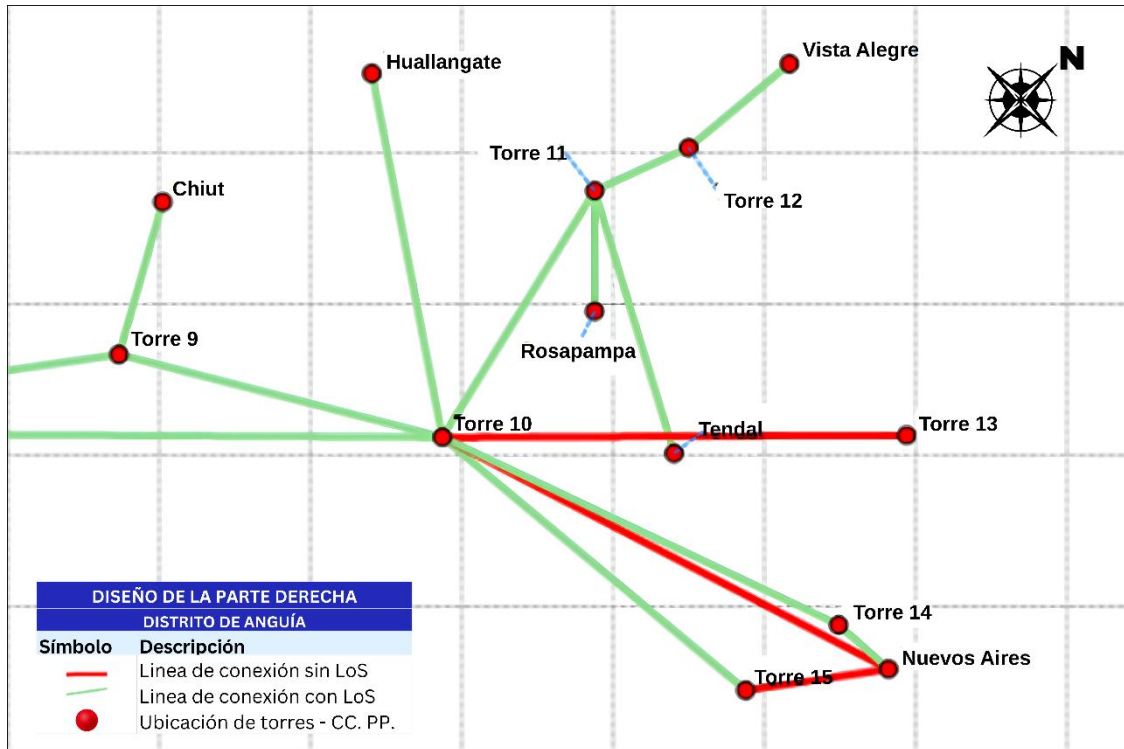


Fig. 14. Diseño de la red de la parte derecha del distrito.

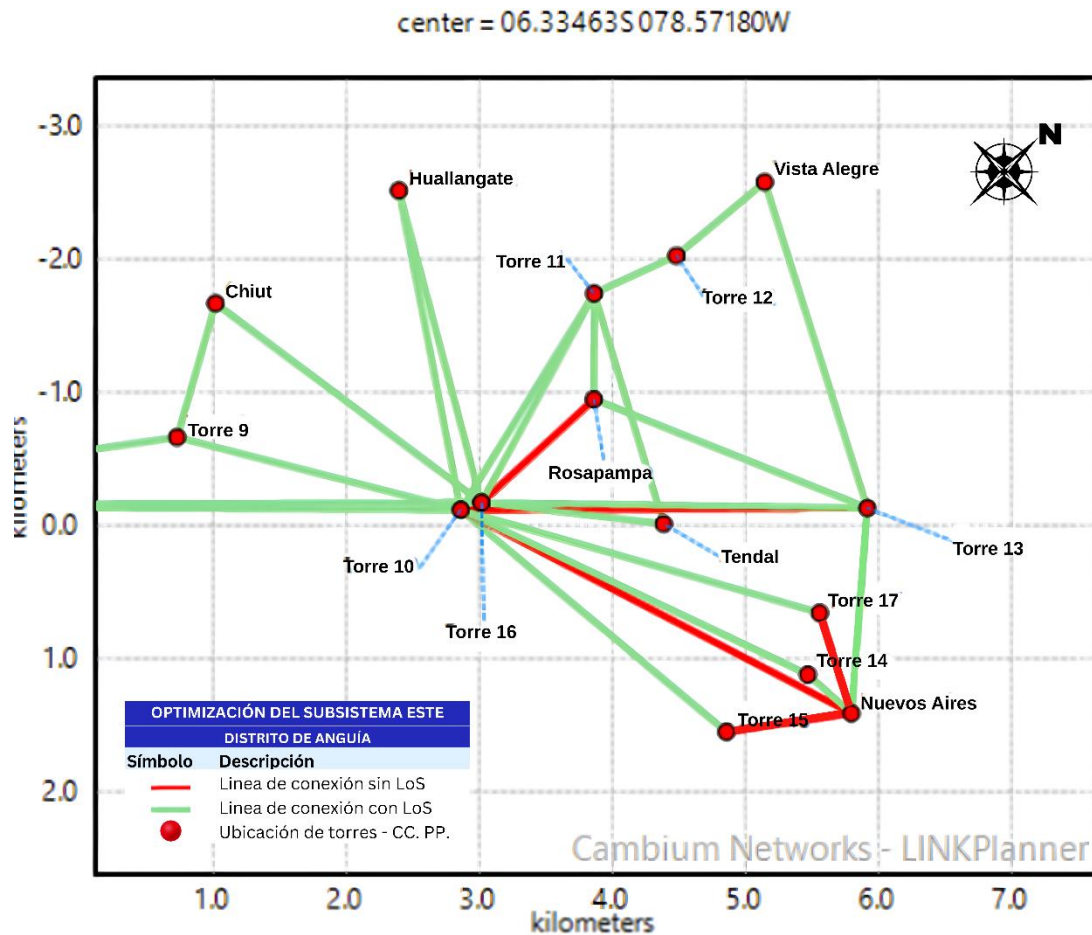


Fig. 15. Optimización del subsistema este: reubicación de la Torre 10 a la posición de la Torre 16 y consolidación del hub en la Torre 13 para cubrir Rosapampa, Tendal, Nuevos Aires y Vista Alegre, eliminando T11–T12 y descartando T14–T15–T17 (elaboración propia).

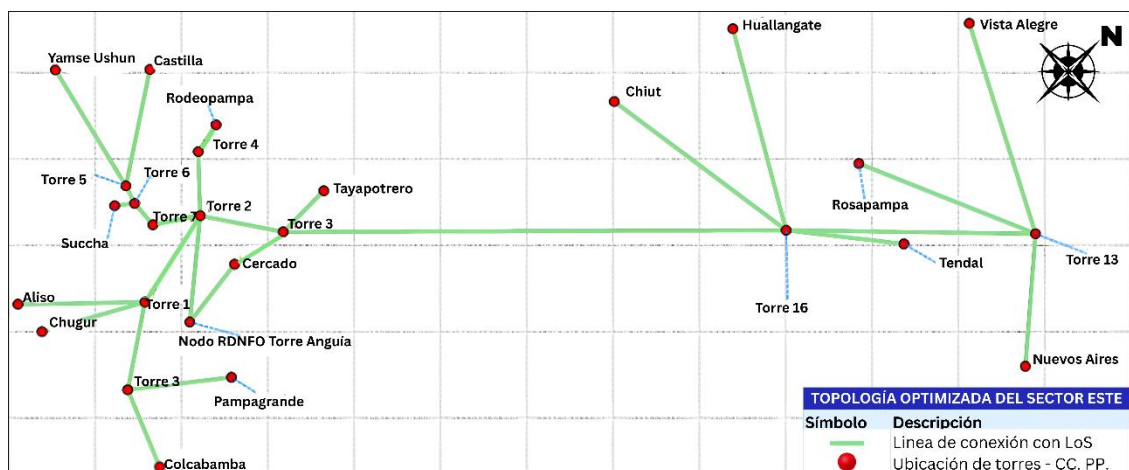


Fig. 16. Topología optimizada del sector este: consolidación en T16 y T13, eliminación de T9, T11, T12, T14, T15 y T17, y reducción de saltos hacia Nuevos Aires y Vista Alegre (elaboración propia).

3.2.3.6. Optimización del subsistema oeste

En paralelo, se optimizó el subsistema oeste priorizando enlaces con LoS y alturas moderadas (≤ 35 m en la mayoría de los casos). Desde el nodo de Anguía se establecieron enlaces directos hacia Pampagrande y Colcabamba, eliminando torres innecesarias; y se consolidaron corredores de interconexión hacia Aliso y Castilla (Fig. 17 a 19).

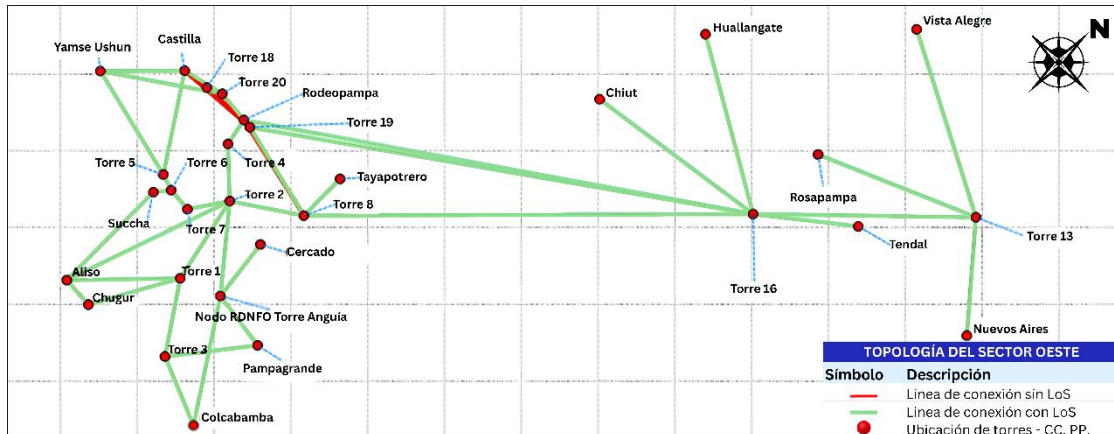


Fig. 17. Topología del sector oeste antes de su optimización.

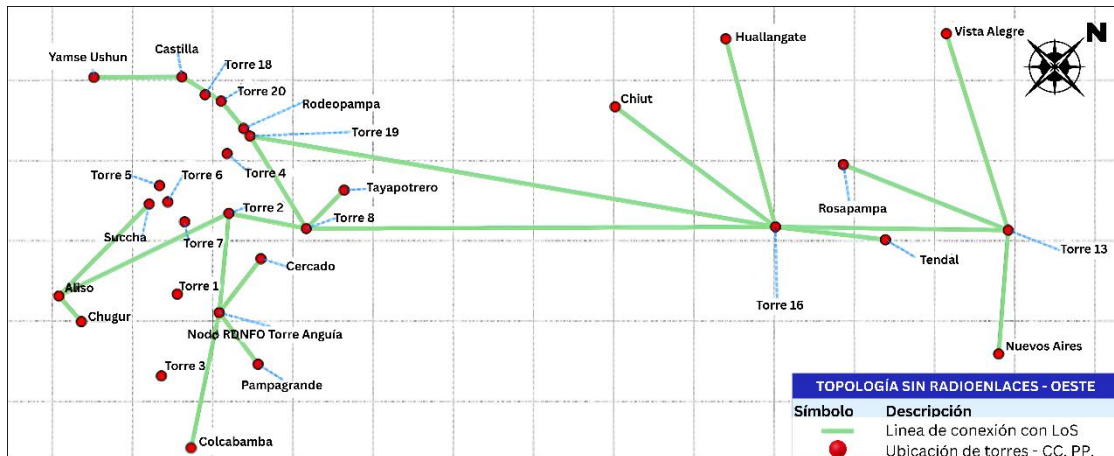


Fig. 18. Topología sin radioenlaces de la parte oeste

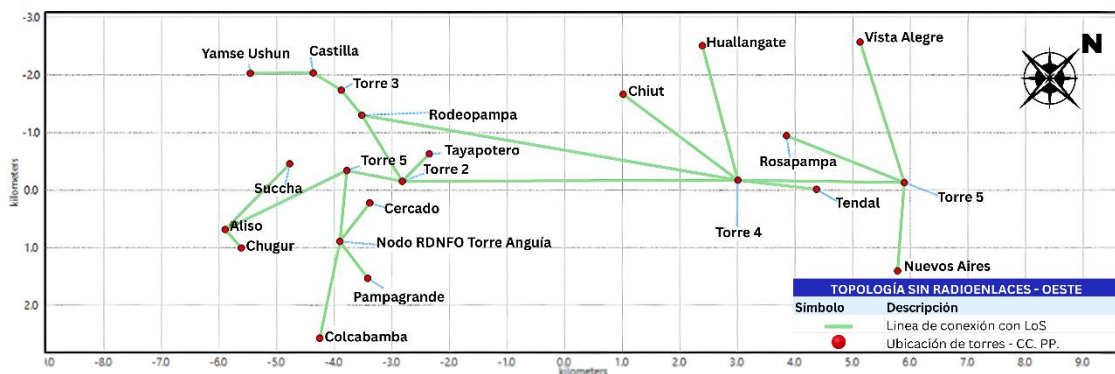


Fig. 19. Topología antes de ajustes de zona de despeje de Fresnel.

3.2.3.7. Topología optimizada y salida de la fase

Como resultado de las iteraciones, se definió la topología optimizada preliminar de la red (Fig. 20), reduciendo la infraestructura inicial y estableciendo una estructura troncal y de acceso proporcional a la distribución espacial de los centros poblados.

Asimismo, se elaboró el inventario de nodos y alturas preliminares (Tabla 7), información necesaria para planificar la obra civil y preparar la simulación técnica posterior.

La confirmación cuantitativa del despeje de la primera zona de Fresnel, los ajustes de alturas por enlace y el desempeño radioeléctrico mediante simulación (throughput, MCS, SNR, fade margin, disponibilidad y análisis TDD) se desarrollan en la Fase 4, como validación técnica del diseño final.

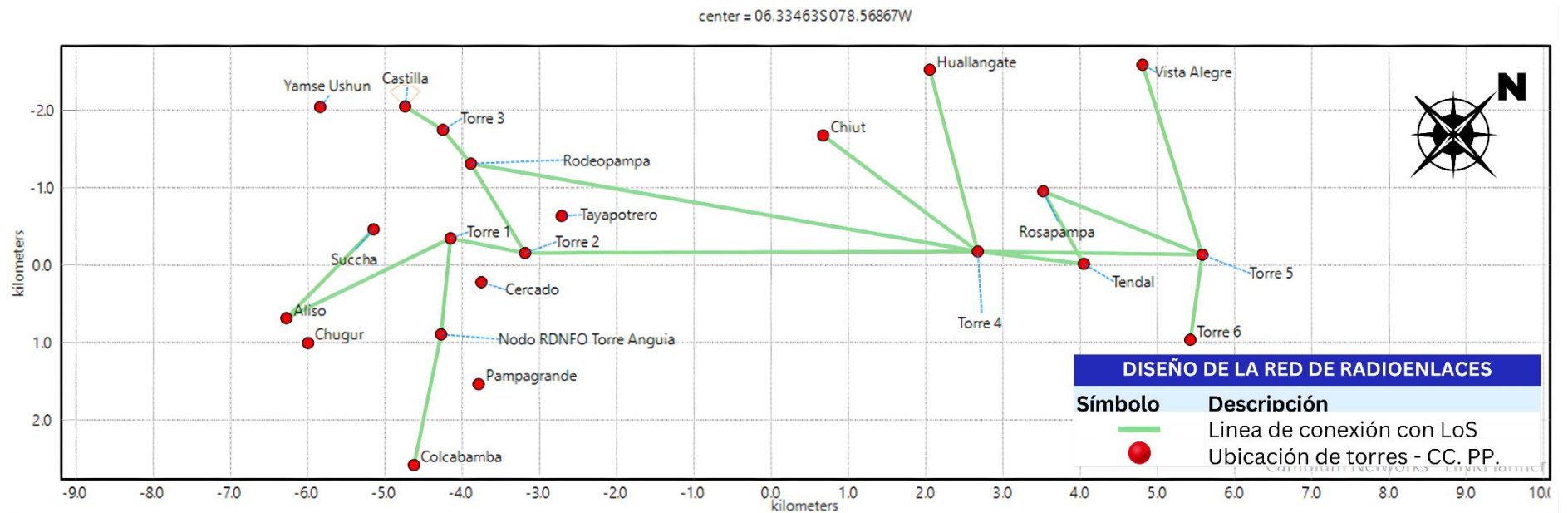


Fig. 20. Diseño de la red de radioenlaces en Anguía.

Tabla 7. Altura de torres por nodo y ubicación geográfica y radioenlaces que soportan

Nodo	Lat (°)	Long (°)	Alt. máx. (m)	PTP salientes
Aliso	06.340785	078.62473 W	35.0	1
Castilla	06.316353	078.64100 W	35.0	2
Chiut	06.319695	078.56269 W	25.0	1
Colcabamba	06.327888	078.60111 W	25.0	1
Huallangate	06.312115	078.55036 W	30.0	1
Torre Anguía	06.342645	078.60685 W	25.0	2
Rodeopampa	06.322955	078.60341 W	30.0	3
Rosapampa	06.326145	078.53725 W	33.0	2
Succha	06.330553	078.61466 W	25.0	1
Tendal	06.341525	078.53256 W	33.0	1
Torre 1	06.331075	078.60705 W	30.0	3
Torre 2	06.337458	078.59713 W	30.0	3
Torre 3	06.319057	078.61103 W	40.0	2
Torre 4	06.334295	078.54488 W	40.0	5
Torre 5	06.337895	078.51778 W	30.0	4
Torre 6	06.338888	078.518 W	30.0	1
Vista Alegre	06.314135	078.52758 W	35.0	1

2.3.4. Fase 4 - Simulación y validación técnica (ITU-R P.530-17) Interferencia y MCS

En esta fase se realizó la validación técnica del diseño optimizado obtenido en la Fase 3, mediante simulación y verificación cuantitativa de criterios geométricos y radioeléctricos. El objetivo fue confirmar que la topología propuesta cumple con: (i) línea de vista (LoS), (ii) despeje mínimo de la primera zona de Fresnel, (iii) capacidad de transmisión (throughput) suficiente frente a la demanda proyectada en hora ocupada (HO), y (iv) confiabilidad del enlace mediante márgenes adecuados de desvanecimiento y disponibilidad.

Para ello, se empleó simulación técnica con software especializado (LinkPlanner) y se aplicaron criterios basados en recomendaciones internacionales para enlaces de microondas, particularmente el enfoque de confiabilidad y disponibilidad utilizado en la ingeniería de radioenlaces (p. ej., ITU-R P.530). Adicionalmente, se incorporó un análisis de capacidad por dirección considerando particiones típicas TDD (75/25 y 80/20), con el fin de verificar consistencia entre demanda y capacidad no solo agregada, sino también en downlink y uplink.

3.2.4.1. Verificación geométrica: despeje de la primera zona de Fresnel

Como condición previa para la simulación radioeléctrica, se verificó el despeje de la 1.^a zona de Fresnel en cada hop del diseño, adoptando un criterio conservador:

- Factor $K = 1$, y
- Despeje mínimo $\geq 0.6 \cdot r_1 + 1$ m,

donde r_1 representa el radio de la primera zona de Fresnel en el punto crítico del trayecto. Este criterio permite reducir pérdidas por difracción y asegurar estabilidad geométrica del enlace, especialmente en entornos con relieve accidentado como el distrito de Anguía.

La verificación se desarrolló para cada radioenlace usando perfiles de elevación. Como resultado, la mayoría de los enlaces cumplió directamente el umbral adoptado; sin embargo, se identificaron casos puntuales donde fue necesario realizar incrementos mínimos de altura en uno o ambos extremos. La síntesis de estos casos críticos se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Síntesis de enlaces con ajuste geométrico requerido (criterio $0.6 \cdot r_1 + 1$ m, $K = 1$)

Enlace	Déficit detectado	Decisión adoptada
Anguía → Colcabamba	+0,72 m	+1 m (lado B)
Anguía → Pampagrande	+0,23 m	+0,5 m (o PTMP)
T2 ↔ T4 (6 GHz)	Umbral $\approx 6,1$ m	40/45 m → clearance $\approx 8,4$ m

En el clúster Anguía – Colcabamba – Pampagrande – Cercado, los déficits geométricos identificados fueron resueltos mediante micro-reubicaciones del emplazamiento de Anguía, orientadas a mejorar el despeje de la primera zona de Fresnel sin incrementar significativamente la altura de las estructuras, manteniendo la coherencia topológica del diseño.

Con el fin de asegurar trazabilidad técnica, el detalle completo de la verificación geométrica —incluyendo valores de $0,6 \cdot F1$, *clearance*, Δ requerido y la recomendación de ajuste por extremo— se consolida en la Tabla 9, la cual sirve como base para fijar las alturas finales de implementación.

Tabla 9. Altura de torres verificación y recomendación de nuevas alturas.

Enlace	Dist (km)	Banda	Alt A (m)	Alt B (m)	0.6·F1 (m)	Clearance (m)	Δ necesario	Recomendación (lado y Δ)
Aliso → Chugur	0.421	5.8	35	30	1.40	2.30	0.00	Sin acción.
Castilla → Yamse Ushun	1.087	5.8	25	25	2.25	10.00	0.00	Sin acción.
RDNFO Anguía → Cercado	0.841	5.8	20	20	1.98	5.00	0.00	Sin acción (PTMP sectorial también viable, < 1 km).
RDNFO Anguía → Colcabamba	1.703	5.8	35	25	2.82	2.10	0.72	Subir B (Colcabamba) +1,0 m. Alternativa: +0,5/+0,5.
RDNFO Anguía → Pampagrande	0.797	5.8	25	25	1.93	1.70	0.23	Subir B (Pampagrande) +0,5 m (o PTMP desde Anguía).
RDNFO Anguía → Torre 1	1.230	5.8	20	30	2.39	5.00	0.00	Sin acción.
Rodeopampa → Torre 3	0.559	5.8	20	30	1.61	6.70	0.00	Sin acción.
Rodeopampa → Torre 4	6.579	5.8	30	40	5.53	9.80	0.00	Sin acción.
Rosapampa → Tendal	1.061	5.8	30	33	2.22	4.60	0.00	Trazado definitivo (30–35 m).
Succha → Aliso	1.589	5.8	25	25	2.72	7.10	0.00	Sin acción.
Torre 1 → Aliso	2.333	5.8	30	25	3.30	3.60	0.00	Margen bajo: subir B (Aliso) +1 m si hay arbolado.
Torre 1 → Torre 2	0.973	5.8	20	20	2.13	12.90	0.00	Sin acción.
Torre 2 → Rodeopampa	1.335	5.8	20	20	2.49	13.70	0.00	Sin acción.
Torre 2 → Tayapotrero	0.665	5.8	25	20	1.76	6.70	0.00	Sin acción.

Torre 3 → Castilla	0.568	5.8	40	35	1.63	7.40	0.00	Sin acción.
Torre 4 → Chiut	2.470	5.8	30	25	3.39	4.70	0.00	Sin acción.
Torre 4 → Huallangate	2.399	5.8	30	30	3.34	6.00	0.00	Sin acción.
Torre 4 → Tendal	1.366	5.8	30	50	2.52	4.40	0.00	Descartado en el diseño final (exige > 40 m).
Torre 5 → Rosapampa	2.188	5.8	30	30	3.19	4.00	0.00	Subir un lado +1 m (objetivo interno ≥ 4,0 m).
Torre 5 → Torre 6	1.097	5.8	30	30	2.26	5.00	0.00	Sin acción.
Torre 5 → Vista Alegre	2.540	5.8	30	35	3.44	6.00	0.00	Sin acción.
Torre 5 → Nuevos Aires	1.724	5.8	30	30	2.83	3.00	0.00	Margen mínimo: subir B (Nuevos Aires) +1 m si se usa este hop; preferir repetidor/micro- PoP vía T6.
Torre 2 → Torre 4	5.788	6.0	40	40	3.4	NO	Subir ambos +2/+2 m (preferente). Si solo un lado: A (T2) +4 m.	
Torre 4 → Torre 5	2.872	6.0	3.59	7.50	0.00	Sin acción.		

El caso del enlace Torre 2 ↔ Torre 4, donde se descartaron alternativas de reubicación y se optó por el incremento de altura estructural para preservar la visibilidad con nodos dependientes, se documenta en el Anexo 4 (Ajustes finos representativos), incluyendo perfiles y justificación técnica. Asimismo, las micro-reubicaciones del nodo Anguía y las soluciones con micro-PoP/mástiles para nodos de baja demanda se presentan de manera detallada en dicho anexo.

La representación gráfica del cumplimiento del criterio geométrico se muestra en la Fig. 21, donde se observa el diseño con alturas ajustadas únicamente en los casos necesarios. La Fig. 22 ilustra un perfil representativo y la Fig. 23 compara, para cada hop, el despeje mínimo requerido frente al despeje obtenido, evidenciando el cumplimiento global del umbral adoptado.

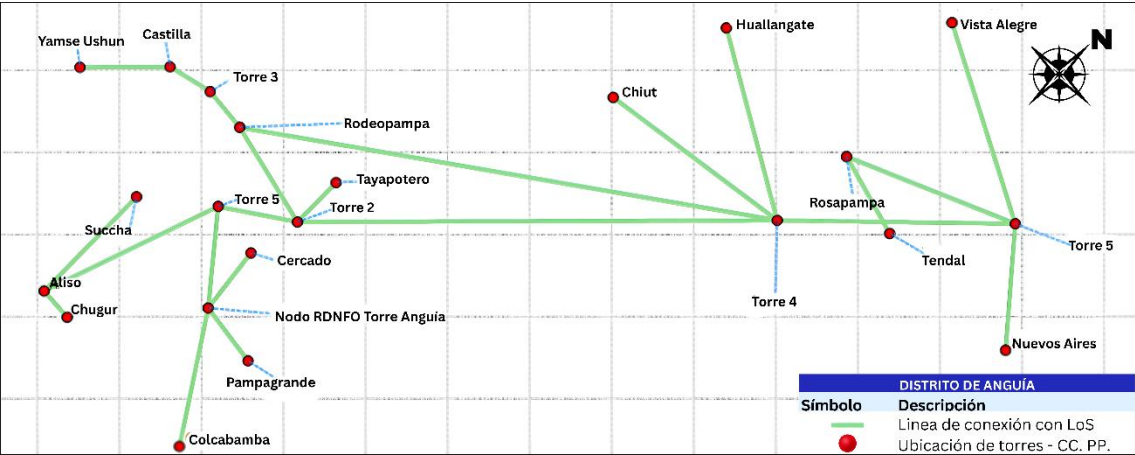


Fig. 21. Diseño con $\geq 60\%$ de $F1 + \geq 1\text{ m}$ de margen a $K = 1$ con las alturas ya ajustadas.

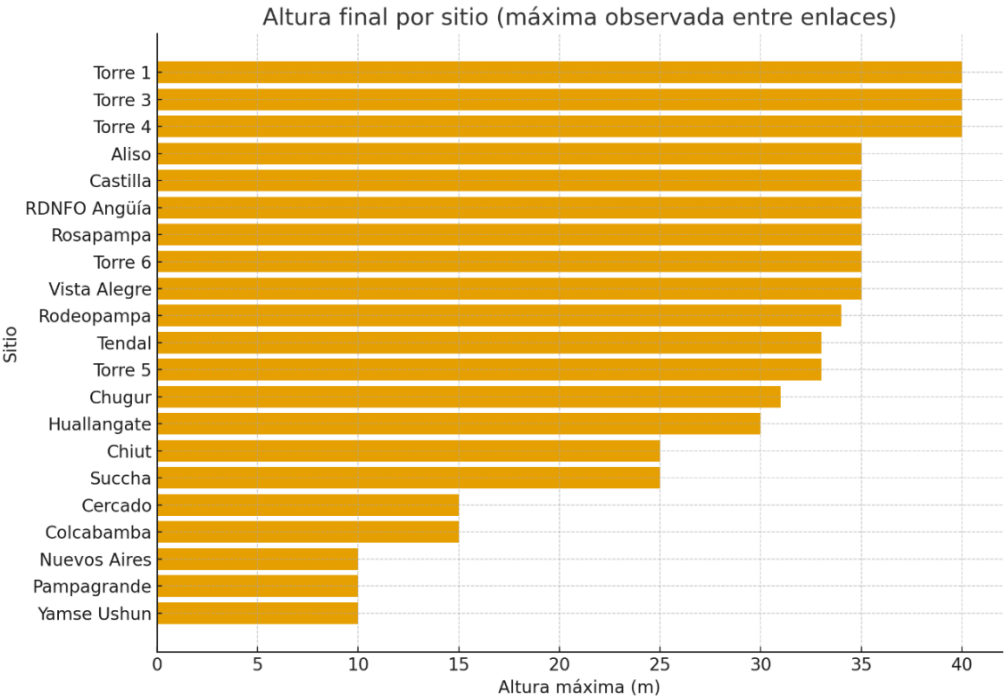


Fig. 22. Perfil del radioenlace

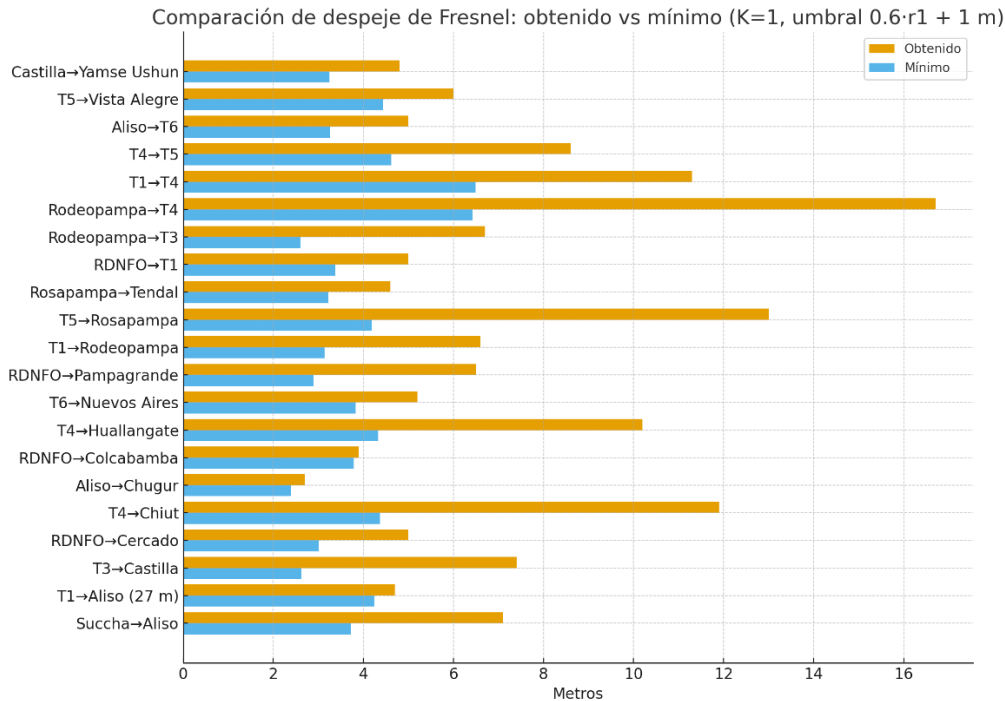


Fig. 23. Comparativo del criterio $0,6r_1 + 1$ m entre lo calculado y lo obtenido en el diseño

Finalmente, se priorizó mantener los emplazamientos definidos en la Fase 3 y ajustar únicamente alturas cuando fue estrictamente necesario. Esta estrategia contribuye a un CAPEX trazable y estable, al evitar reubicaciones que implicarían nuevos permisos, accesos y cimentaciones, reduciendo incertidumbre técnica y económica.

3.2.4.2. Consolidación del diseño tras ajustes geométricos

A partir de los ajustes menores identificados durante la verificación geométrica (Tablas 8 y 9), se consolidó el diseño final de la red de radioenlaces manteniendo los emplazamientos definidos en la Fase 3 y aplicando únicamente ajustes de altura o soluciones livianas de acceso cuando fue necesario para cumplir el criterio de despeje.

Asimismo, en Cercado, Colcabamba, Pampagrande y Nuevos Aires no se consideró la instalación de torres dedicadas en todos los casos; en su lugar, se adoptaron mástiles de acceso ($\approx 10\text{--}15$ m) orientados hacia torres cercanas que brindan cobertura. Esta solución preserva la condición de LoS y mantiene el cumplimiento del criterio geométrico $\geq 0,6 \cdot r_1 + 1$ m ($K = 1$), previamente verificado.

La Fig. 24 presenta la distribución de alturas máximas adoptadas por nodo/centro poblado en la configuración final, y la Fig. 25 muestra la topología consolidada posterior a la validación geométrica.

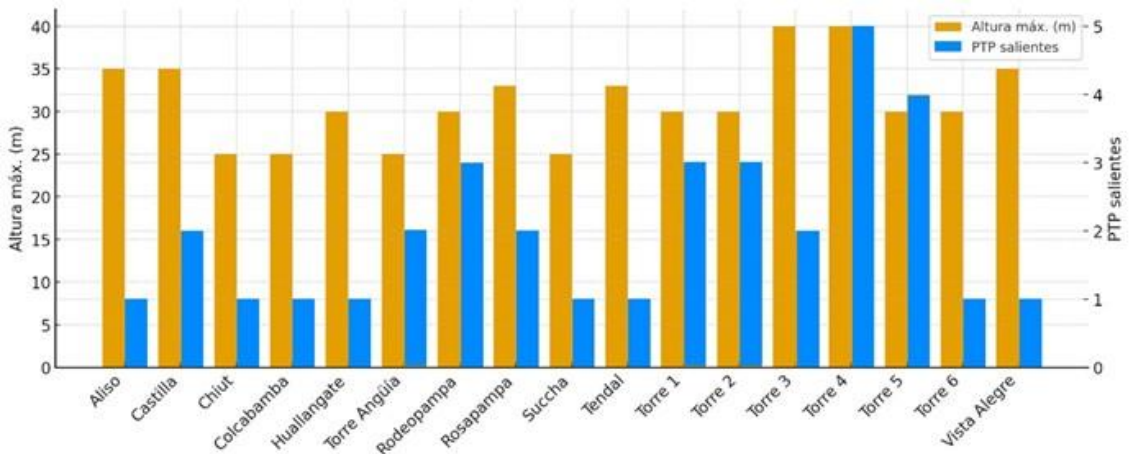


Fig. 24. Altura máxima por nodo / centro poblado

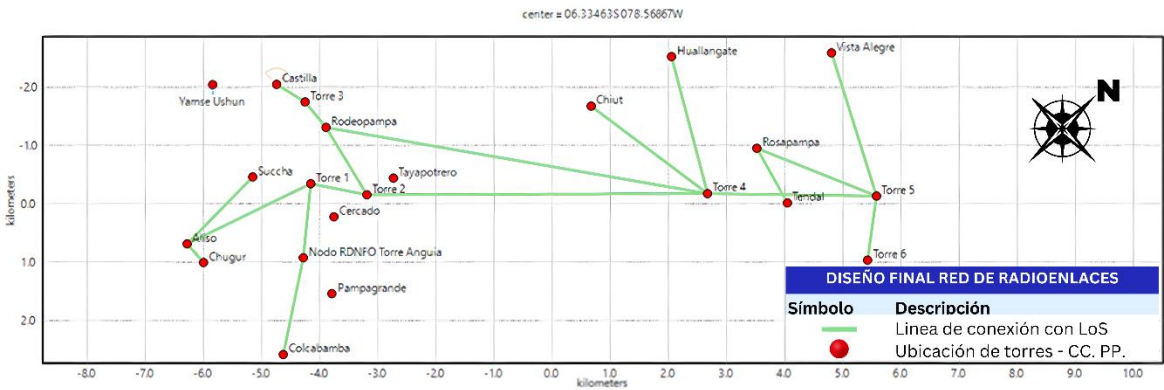


Fig. 25. Diseño consolidado de la red de radioenlaces de Anguía

Una vez verificado el cumplimiento del criterio geométrico y consolidadas las alturas finales mediante ajustes mínimos y trazables, el diseño queda geoméricamente validado para operación estable. Sobre esta base, se procede a evaluar la suficiencia de capacidad del diseño, contrastando el throughput simulado de cada hop frente a la demanda proyectada en hora ocupada (HO). En este contexto, la siguiente sección desarrolla el análisis de demanda agregada, distribución de flujos por rama y comparación capacidad–demanda.

3.2.4.3. Proyección de demanda por enlace en hora ocupada (HO) y consistencia del cálculo

Con el diseño geométrico consolidado, se proyectó la demanda de tráfico por cada radioenlace en hora ocupada (HO) a partir de la demanda por centro poblado y su propagación a lo largo de la topología. La distribución agregada se presenta en la Fig. 26.

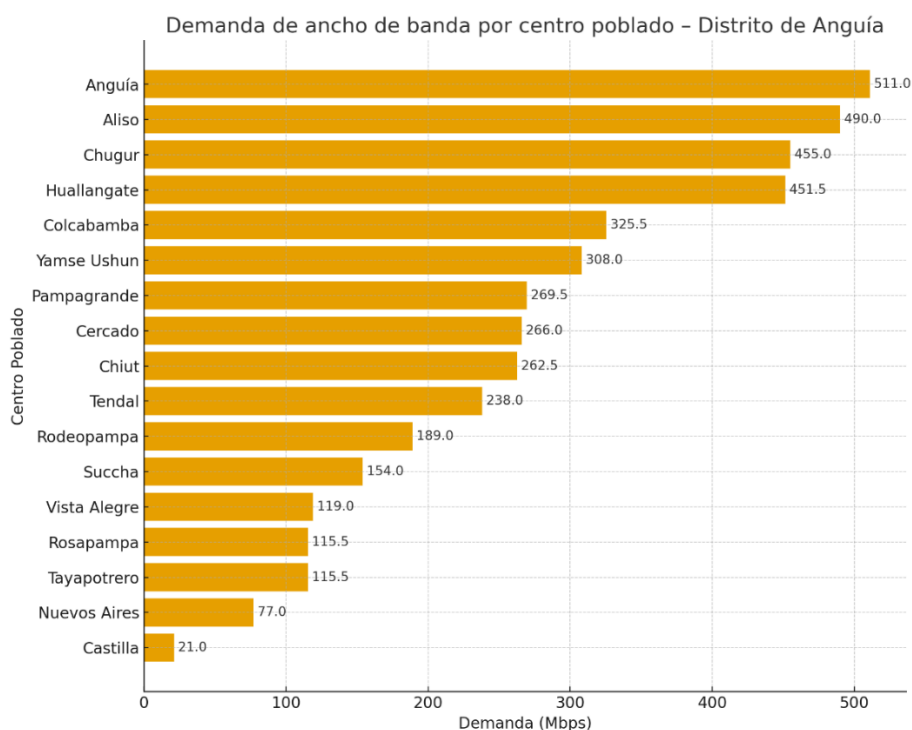


Fig. 26. Demanda de Ancho de Banda por Centro Poblado

Para asegurar consistencia, se calcularon los flujos por ramas principales:

Rama oeste (flujo HO):

- Yamse Ushun → Castilla: 308 Mbps
- Castilla → Torre 3 → Rodeopampa: 329 Mbps
- Rodeopampa → Torre 1: 518 Mbps
- Succha → Torre 1: 154 Mbps
- Chugur → Aliso: 455 Mbps
- Aliso → Torre 1: 1 099 Mbps (agregado: Aliso + Chugur + Succha)

El tráfico consolidado que llega a Torre 1 desde la rama oeste alcanza 2,998 Mbps.

Rama este (flujo HO):

- Chiut → Torre 4: 263 Mbps
- Huallangate → Torre 4: 452 Mbps
- Tendal → Rosapampa: 238 Mbps
- Rosapampa → Torre 4: 354 Mbps
- Vista Alegre → Torre 5: 119 Mbps
- Nuevos Aires → Torre 6 → Torre 5: 77 Mbps
- Torre 5 → Torre 4: 196 Mbps

El tráfico agregado en el enlace Torre 4 → Torre 1 asciende a 1 265 Mbps.

Ramas directas al nodo Anguía (Core):

- Cercado → Anguía: 266 Mbps
- Pampagrande → Anguía: 270 Mbps
- Colcabamba → Anguía: 326 Mbps
- Demanda local Anguía: 511 Mbps

La suma de flujos permite confirmar una demanda distrital aproximada de 4.37 Gbps, consistente con el total agregado estimado previamente (la diferencia marginal se atribuye a redondeos y no afecta el dimensionamiento).

3.2.4.4. Simulación de capacidad: throughput por enlace vs demanda HO

La validación técnica del diseño se realizó mediante la aplicación del modelo de propagación ITU-R P.530-17 en el software LinkPlanner (Cambium Networks, versión 5.7.5), configurado de acuerdo con los parámetros específicos definidos para cada radioenlace, tales como banda de frecuencia, ancho de canal, potencia de transmisión, modulación adaptativa (ACM) y criterios de disponibilidad anual.

Con el propósito de asegurar la trazabilidad, transparencia y reproducibilidad del proceso de simulación, en el Anexo A se presenta la configuración detallada del software, incluyendo capturas de los parámetros de propagación empleados, los perfiles topográficos analizados y los resultados de disponibilidad obtenidos para cada enlace.

La representación de la topología final considerando throughput por enlace se muestra en la Fig. 27. Complementariamente, el contraste cuantitativo entre throughput simulado y demanda HO por hop se resume en la Tabla 10, la cual identifica el enlace crítico del Core y los enlaces que cumplen holgura de capacidad.

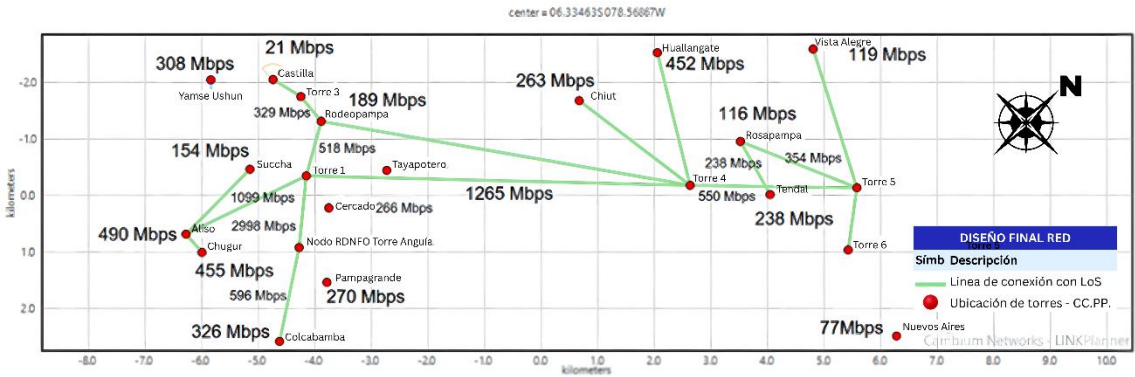


Fig. 27. Diseño final considerando la proyección de demanda y throughput por radioenlace.

Tabla 10. Throughput agregado vs Demanda HO por radioenlace (resultado de simulación)

Enlace	Distancia	Banda	Throughput	Demanda	Observación
RDNFO Anguía → Torre 1	1.259	Upper-6	2703.3	2998	Core ↔ hub oeste; con 1 portadora queda justo → evaluar 2ª portadora / más ancho.
Torre 1 → Aliso	2.333	Upper-6	2700.6	1099	OK.
Torre 1 → Torre 4	6.704	Upper-6	2549.9	1265	OK.
Aliso → Chugur	0.421	5.8	1127.0	455.0	OK.
Castilla → Yamse Ushun	1.087	5.8	1117.2	308.0	OK.
RDNFO Anguía → Cercado	0.867	5.8	1117.2	266.0	OK.
RDNFO Anguía → Colcabamba	1.674	5.8	1107.5	326.0	OK.
RDNFO Anguía → Pampagrande	0.777	5.8	1117.2	270.0	OK.
Rodeopampa → Torre 3	0.559	5.8	1127.0	329.0	OK.
Rodeopampa → Torre 4	6.538	5.8	1107.5	0	Enlace para Backup o Balanceo de carga.
Rosapampa → Tendal	1.061	5.8	1117.2	238.0	OK.

Succha → Aliso	1.589	5.8	1117.2	154.0	OK.
Torre 1 → Rodeopampa	0.988	5.8	1117.2	518.0	OK.
Torre 3 → Castilla	0.568	5.8	1127.0	329.0	OK.
Torre 4 → Chiut	2.436	5.8	1107.5	263.0	OK.
Torre 4 → Huallangate	2.386	5.8	1107.5	452.0	OK.
Torre 5 → Rosapampa	2.188	5.8	1107.5	360.0	OK.
Torre 5 → Torre 6	1.097	5.8	1117.2	77.0	OK.
Torre 5 → Vista Alegre	2.540	5.8	1107.5	119.0	OK.
Torre 6 → Nuevos Aires	1.724	5.8	1107.5	77.0	OK.
Torre 4 → Torre 5	2.912	Upper-6	2241.8	196.0	OK.

En el Anexo 2 se muestran los Datasheet de las radios en 6 GHz y 5.8 GHz.

3.2.4.5. Comparación capacidad vs. demanda por dirección aplicando Split TDD (75/25 y 80/20).

Con el fin de verificar que la capacidad de cada hop cubra la demanda proyectada no solo en agregado, sino también por dirección, se realizó una comparación capacidad–demanda (tabla 11) considerando dos configuraciones típicas de reparto TDD: 75/25 y 80/20. Para cada hop se evaluó:

- C_{DL} y D_{DL} : capacidad y demanda en downlink
- C_{UL} y D_{UL} : capacidad y demanda en uplink
- Estado: OK si cumple simultáneamente DL, UL y agregado ($C_{agg} \geq D_{tot}$)

Se utilizó el siguiente criterio de cálculo (redondeo a una decimal):

$$C_{DL} = \alpha_{DL} \cdot C_{agg}, D_{DL} = \alpha_{DL} \cdot D_{tot}$$

$$C_{UL} = \alpha_{UL} \cdot C_{agg}, D_{UL} = \alpha_{UL} \cdot D_{tot}$$

donde α_{DL} y α_{UL} corresponden a la fracción asignada a cada sentido (75/25 u 80/20).

Resultado 75/25

El análisis evidencia que 20 de 21 hops cumplen los criterios simultáneos DL/UL/agregado. El único enlace crítico es:

RDNFO Anguía → Torre 1, con déficits de:

- DL: -221.0 Mbps
- UL: -73.7 Mbps
- Agregado: -294.7 Mbps

Este resultado confirma que el tramo RDNFO Anguía → Torre 1 constituye el cuello de botella del Core, debido a que concentra el tráfico consolidado que ingresa desde la rama oeste.

Como acciones de ingeniería, se recomienda incorporar capacidad adicional mediante: (i) segunda portadora en upper-6 GHz, (ii) mayor ancho de canal, o (iii) reparto de tráfico descargando parte del caudal por rutas alternas (balanceo o redundancia troncal).

Tabla 11. Split TDD 75/25 Throughput agregado vs demanda HO por radioenlace (resultado de simulación)

Enlace (hop)	C_DL	D_DL	C_UL	D_UL	Estado
RDNFO Anguía → Torre 1	2027.5	2248.5	675.8	749.5	NO
Torre 1 → Aliso	2025.4	824.2	675.1	274.8	OK
Torre 1 → Torre 4	1912.4	948.8	637.5	316.3	OK
Aliso → Chugur	845.3	341.3	281.8	113.8	OK
Castilla → Yamse Ushun	837.9	231.0	279.3	77.0	OK
RDNFO Anguía → Cercado	837.9	199.5	279.3	66.5	OK
RDNFO Anguía → Colcabamba	830.6	244.5	276.9	81.5	OK
RDNFO Anguía → Pampagrande	837.9	202.5	279.3	67.5	OK
Rodeopampa → Torre 3	845.3	246.8	281.8	82.3	OK
Rodeopampa → Torre 4 (backup)	830.6	0.0	276.9	0.0	OK
Rosapampa → Tendal	837.9	178.5	279.3	59.5	OK
Succha → Aliso	837.9	115.5	279.3	38.5	OK
Torre 1 → Rodeopampa	837.9	388.5	279.3	129.5	OK
Torre 3 → Castilla	845.3	246.8	281.8	82.3	OK
Torre 4 → Chiut	830.6	197.3	276.9	65.8	OK
Torre 4 → Huallangate	830.6	339.0	276.9	113.0	OK
Torre 5 → Rosapampa	830.6	270.0	276.9	90.0	OK
Torre 5 → Torre 6	837.9	57.8	279.3	19.3	OK
Torre 5 → Vista Alegre	838.1	89.3	279.4	29.8	OK
Torre 6 → Nuevos Aires	830.6	57.8	276.9	19.3	OK
Torre 4 → Torre 5	1681.4	147.0	560.5	49.0	OK

Resultado 80/20

Con el reparto 80/20 se observa el mismo patrón: 20 de 21 hops cumplen (Tabla 12), y se mantiene como crítico el hop:

RDNFO Anguía → Torre 1, con déficits de:

- DL: -235.8 Mbps
- UL: -58.9 Mbps
- Agregado: -294.7 Mbps

El incremento del peso en Down link no resuelve el problema agregado, por lo que el cuello de botella persiste. En consecuencia, ningún ajuste del Split TDD por sí solo compensa el déficit estructural de capacidad en este enlace.

Tabla 12. Split TDD 80/20

Enlace (hop)	C_DL	D_DL	C_UL	D_UL	Estado
RDNFO Anguía → Torre 1	2162.6	2398.4	540.7	599.6	NO
Torre 1 → Aliso	2160.5	879.2	540.1	219.8	OK
Torre 1 → Torre 4	2039.9	1012.0	510.0	253.0	OK
Aliso → Chugur	901.6	364.0	225.4	91.0	OK
Castilla → Yamse Ushun	893.8	246.4	223.4	61.6	OK
RDNFO Anguía → Cercado	893.8	212.8	223.4	53.2	OK
RDNFO Anguía → Colcabamba	886.0	260.8	221.5	65.2	OK
RDNFO Anguía → Pampagrande	893.8	216.0	223.4	54.0	OK
Rodeopampa → Torre 3	901.6	263.2	225.4	65.8	OK
Rodeopampa → Torre 4 (backup)	886.0	0.0	221.5	0.0	OK
Rosapampa → Tendal	893.8	190.4	223.4	47.6	OK
Succha → Aliso	893.8	123.2	223.4	30.8	OK
Torre 1 → Rodeopampa	893.8	414.4	223.4	103.6	OK
Torre 3 → Castilla	901.6	263.2	225.4	65.8	OK
Torre 4 → Chiut	886.0	210.4	221.5	52.6	OK
Torre 4 → Huallangate	886.0	361.6	221.5	90.4	OK
Torre 5 → Rosapampa	886.0	288.0	221.5	72.0	OK
Torre 5 → Torre 6	893.8	61.6	223.4	15.4	OK
Torre 5 → Vista Alegre	894.0	95.2	223.5	23.8	OK
Torre 6 → Nuevos Aires	886.0	61.6	221.5	15.4	OK
Torre 4 → Torre 5	1793.4	156.8	448.4	39.2	OK

Criterio técnico sobre el Split DL/UL

En enlaces TDD no existe un porcentaje “oficial” prescrito por la UIT para el reparto DL/UL; el split es un parámetro operativo que se ajusta al patrón de tráfico (usualmente asimétrico en acceso residencial y backhaul rural). Son comunes configuraciones 75/25, 80/20 e incluso 90/10 en horas pico. El marco ITU-R P.530 se centra en propagación, desvanecimientos y disponibilidad, sin prescribir un split específico; por ello, su selección corresponde a ingeniería de tráfico y dimensionamiento, verificando siempre el cumplimiento de SNR/MCS y márgenes.

En este estudio se propone mantener 75/25 como configuraciones base y aplicar 80/20 únicamente en hops donde la operación confirme asimetría descendente marcada. En cualquier escenario, el hop RDNFO Anguía → Torre 1 requiere capacidad adicional, dado que el déficit agregado aproximado de 295 Mbps permanece.

Finalmente, la Fig. 28 presenta el comparativo entre la demanda total y el throughput agregado por hop, evidenciando el enlace crítico identificado.

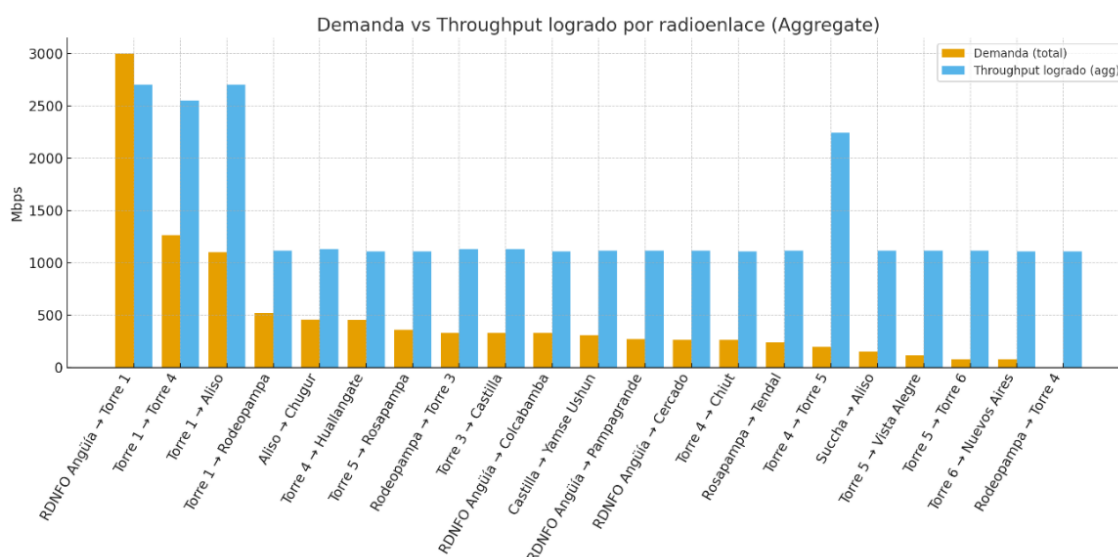


Fig. 28. Comparación de throughput demandado y throughput logrado por hop.

3.2.4.6. Implicancias de ingeniería y dimensionamiento del Core

A partir de la proyección de demanda obtenida, se derivan las siguientes implicancias de ingeniería:

1. El Core de la red hacia la RDNFO debe dimensionarse para un caudal mínimo de ≈ 4.4 Gbps en hora ocupada, incorporando una holgura recomendada del 20–30 % para crecimiento, lo que fija un objetivo de diseño entre ≈ 5.3 y 5.7 Gbps.
2. Los enlaces de mayor concentración de tráfico (principalmente los que convergen hacia Torre 1) requieren planificación específica de capacidad, considerando ancho de canal, MCS objetivo y alternativas de escalamiento como segunda portadora, dual-radio en upper-6 GHz o agregación de enlaces.
3. La estrategia de distribución mediante enlaces PTMP desde nodos hub permite evitar torres dedicadas en caseríos pequeños, reduciendo CAPEX y OPEX, siempre cumpliendo LoS y el despeje geométrico $\geq 0.6 \cdot r_1 + 1$ m ($K = 1$).

En conjunto, la proyección de demanda por enlace confirma que el diseño optimizado equilibra cargas en troncales y permite dimensionar el core con base en una demanda distrital realista de ≈ 4.37 Gbps, garantizando capacidad y crecimiento ordenado.

3.2.4.7. Asignación de bandas y métricas globales de la red

Los enlaces de mayor throughput y carácter troncal fueron planificados en la banda *upper-6 GHz*, mientras que los tramos de menor longitud y carga de tráfico se resolvieron en 5.8 GHz, banda que ofrece capacidad suficiente y mayor viabilidad económica debido a la amplia disponibilidad de equipamiento. En el diseño final (Tabla 13) se consideran 21 radioenlaces, con una longitud total de 41.708 km, de los cuales 13.208 km corresponden a *upper-6 GHz* y 28.500 km a 5.8 GHz. La longitud media de los enlaces es de 1.99 km, con un mínimo de 0.421 km (Aliso $\rightarrow$ Chugur) y un máximo de 6.704 km (Torre 1 $\rightarrow$ Torre 4).

El dimensionamiento radioeléctrico, así como la estimación de márgenes, disponibilidad y desempeño de los enlaces, se basaron en los modelos recomendados por la UIT, particularmente las Recomendaciones ITU-R P.530-17 e ITU-R P.838. La formulación teórica empleada como respaldo metodológico se resume en el Anexo 3, mientras que los valores finales fueron obtenidos mediante simulación técnica.

Tabla 13. Resumen de métricas Globales

Origen	Demanda (Mbps)	Distancia (km)	Altura der (m)	Altura izq (m)	Banda (GHz)	Ancho de Canal (MHz)	Ptx der (dBm)	Ptx izq (dBm)	Antena
Aliso - Succha	154	1,589	25	25	5.8	20	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Torre 1 - Aliso	1,099	2,333	27	30	Upper 6	80	18	18	Radio Waves 2ft Dual- Polar Parabolic SPD2-6 (30,6 dBi)
Torre 3 - Castilla	154	5,68	35	40	5.8	40	16	16	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Nodo RDNFO Torre Anguía - Cercado	266	8,67	15	20	5.8	20	20	20	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Torre 4 - Chugur	263	2,436	25	35	5.8	20	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Aliso - Chugur	455	4,21	31	35	5.8	40	14	14	Cambium Networks 2ft High

									Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Nodo RDNFO	326	1,674	15	35	5.8	40	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Torre Anguía									
-									
Colcabamba									
Torre 4 -	452	2,386	30	30	5.8	40	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Huallagata									
Torre 1 -	518	9,88	30	30	5.8	40	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Rodeopampa									
Torre 5 -	354	2,188	30	33	5.8	40	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Rosapampa									

En el Anexo 2 se presentan los Datasheet de las antenas.

3.2.4.8. Simulación de interferencias y desempeño de enlace

Con la caracterización del ruido e interferencias y la fijación de parámetros de operación —incluyendo MCS objetivo/AMC, ancho de canal, EIRP, plan de frecuencias y reutilización, sincronización y umbrales de SNR- se dio

cumplimiento al segundo objetivo específico, orientado a identificar las modulaciones y parámetros que aseguren confiabilidad y rendimiento bajo las condiciones geográficas y climáticas del distrito de Anguía.

Para las simulaciones se adoptó un piso de ruido/interferencia de -87 dBm para un canal de 160 MHz en 5.8/6 GHz, valor coherente con el comportamiento del ruido térmico, utilizado como referencia en el cálculo de SNR/SINR, selección de MCS, estimación de fade margin y proyección de disponibilidad. En enlaces con anchos de canal diferentes, el piso de ruido fue escalado proporcionalmente (p. ej., 80/40/20 MHz $\approx -90/-93/-96$ dBm, respectivamente).

Con el propósito de representar adecuadamente el comportamiento global de la red, se presentan los resultados de: (i) los cuatro enlaces de mayor distancia, y (ii) los tres enlaces de mayor throughput, seleccionados como casos representativos para validar el cumplimiento del objetivo específico.

3.2.4.9. Modulaciones y parámetros técnicos que garanticen la confiabilidad y el rendimiento de los radioenlaces bajo las condiciones geográficas y climáticas de Anguía

A) Torre 1 $\rightarrow$ Torre 4 — 6.704 km, upper-6 GHz

La Tabla 14 presenta los resultados obtenidos para el radioenlace Torre 1 – Torre 4 (6.704 km, banda upper-6 GHz), incluyendo throughput agregado, throughput por dirección, margen de desvanecimiento y disponibilidad proyectada.

Tabla 14. Parámetros técnicos del radioenlace Torre 1 – Torre 4

Modo (MCS)	Throughput Agregado (Mbps)	Throughput por Dirección (Mbps)	Fade Margin (dB)	Disponibilidad (%)
MCS13 (4096QAM Dual)	2669.25	2057.19	-6.68	0.0003
MCS12 (4096QAM Dual)	2397.22	1853.17	-2.98	0.0659
MCS11 (1024QAM Dual)	2227.21	1717.16	3.32	99.2344
MCS10 (1024QAM Dual)	2006.19	1547.15	7.02	99.9982
MCS9 (256QAM Dual)	1785.17	1377.13	12.02	99.9995
MCS8 (256QAM Dual)	1598.15	1241.12	13.72	99.9995
MCS7 (64QAM Dual)	1326.13	1020.10	17.32	99.9995
MCS6 (64QAM Dual)	1190.12	918.09	19.72	99.9995
MCS5 (64QAM Dual)	1054.10	816.08	21.72	99.9995
MCS4 (16QAM Dual)	782.08	612.06	26.32	99.9995
MCS3 (16QAM Dual)	527.05	408.04	29.72	99.9995
MCS2 (QPSK Dual)	391.04	306.03	33.32	99.9995

Tratamiento y análisis de datos – Torre 1 → Torre 4

La Fig. 29 muestra que los MCS de mayor orden (4096-QAM) operan con márgenes negativos (−6.68 dB y −2.98 dB), lo que evidencia una alta vulnerabilidad a los desvanecimientos y confirma su inviabilidad en este radioenlace. A medida que disminuye el orden de modulación, el margen de desvanecimiento aumenta progresivamente, pasando de 3.32 dB en MCS11 (1024-QAM) a valores superiores a 30 dB en los modos más robustos (QPSK). Este comportamiento indica que solo los MCS intermedios y bajos ofrecen un margen adecuado para asegurar la estabilidad del enlace.

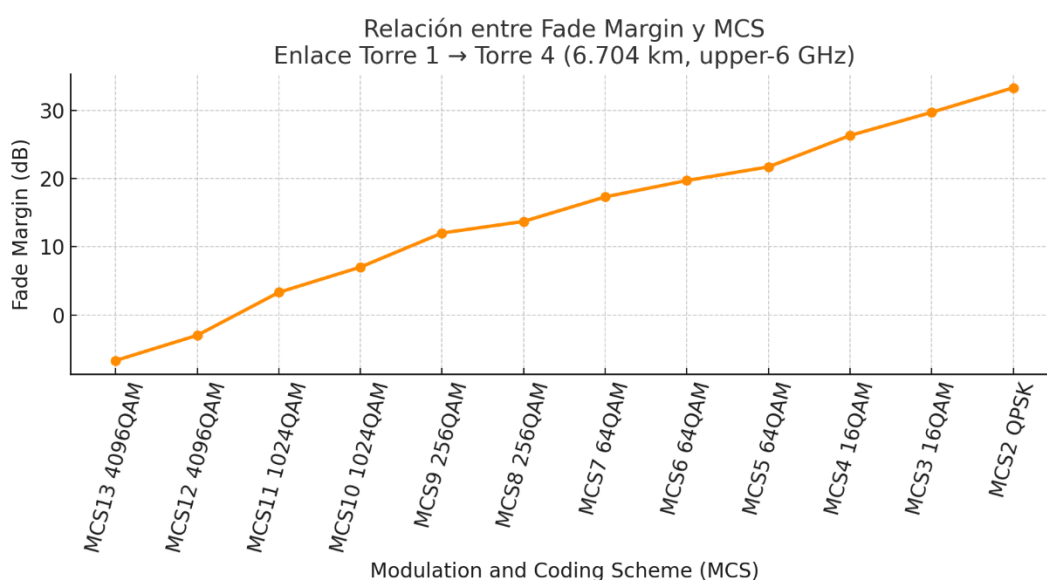


Fig. 29. Relación entre Fade Margin y MCS

En la Fig. 30, en la curva de disponibilidad, representada en escala logarítmica, se observa que MCS13 y MCS12 presentan valores inferiores al 90%, siendo inaceptables para aplicaciones críticas. La transición crítica se da en MCS11 (99.23%), que aún está por debajo de los estándares internacionales, y en MCS10 (99.9982%), donde ya se alcanza una disponibilidad de “cuatro nueves”. A partir de MCS9, la disponibilidad se mantiene por encima del 99.9995%, equivalente a menos de cinco minutos de caída anual, lo cual garantiza un servicio altamente confiable.

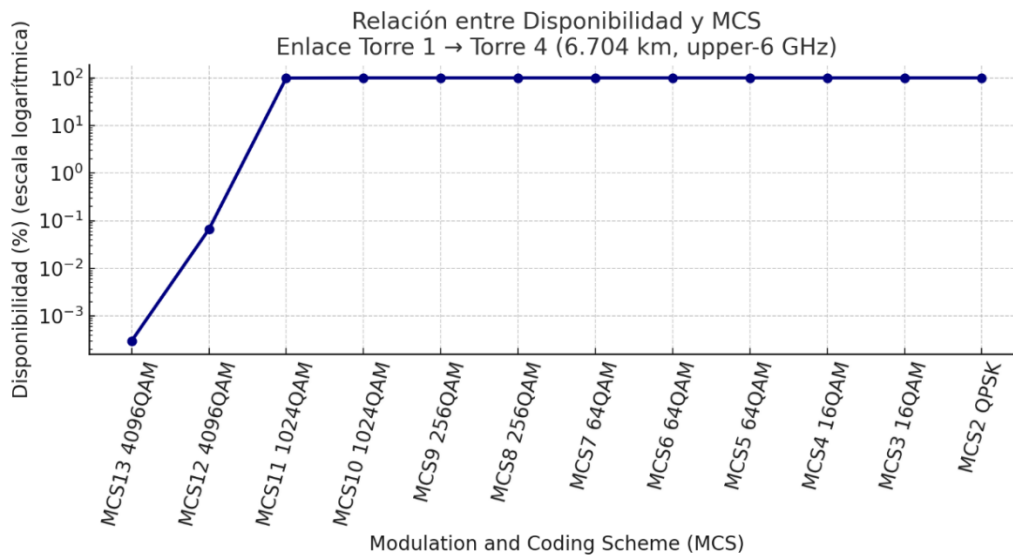


Fig. 30. Relación entre Disponibilidad y MCS

En la Fig. 31 el throughput máximo se alcanza con MCS13 (2669 Mbps) y disminuye gradualmente hasta 391 Mbps en QPSK. Sin embargo, los niveles de disponibilidad asociados a los MCS altos comprometen su utilidad práctica. El rango más equilibrado se encuentra entre MCS9 y MCS10, que combinan tasas de transmisión de 1.7–2.0 Gbps con disponibilidades superiores al 99.999%, representando así la mejor opción para garantizar tanto capacidad como confiabilidad en el enlace Torre 1 → Torre 4.

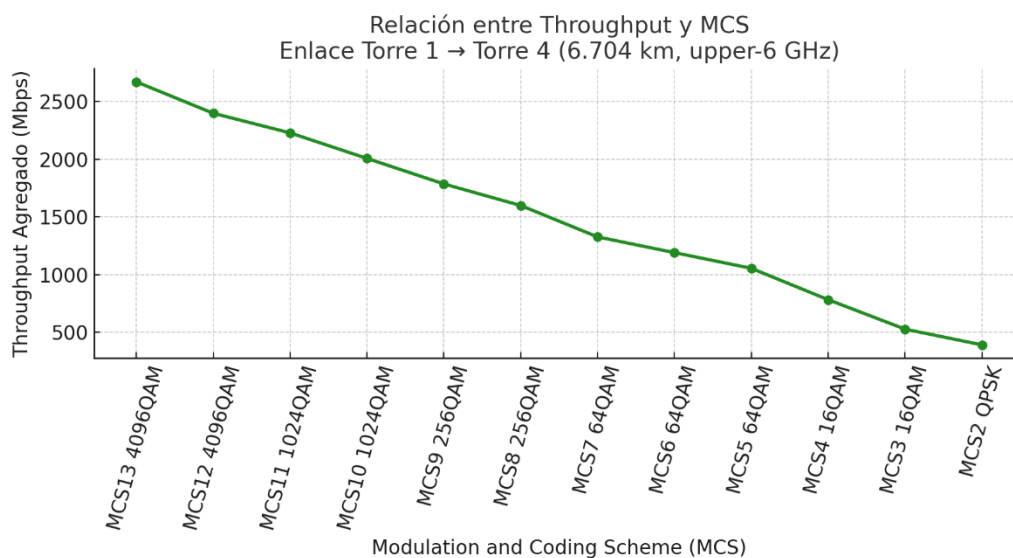


Fig. 31. Relación entre Throughput y MCS

Presentación de resultados – Torre 1 → Torre 4

- Los MCS de mayor orden (4096-QAM, MCS13 y MCS12) no resultan adecuados, ya que, aunque ofrecen más de 2.3–2.6 Gbps, presentan márgenes negativos o muy bajos (–6.68 dB y –2.98 dB) y disponibilidades deficientes (<0.1% y 0.06%).
- Los MCS intermedios (MCS9–MCS10, 256-QAM y 1024-QAM) constituyen el rango óptimo, alcanzando entre 1.7 y 2.0 Gbps, con márgenes de 7–12 dB y disponibilidades superiores al 99.998%, asegurando un servicio confiable de nivel “cuatro nueves”.
- El MCS11 (1024-QAM), aunque ofrece 2.2 Gbps, se queda corto en confiabilidad con una disponibilidad de apenas 99.23%, equivalente a varios días de caída al año.
- Los MCS de baja orden (16-QAM y QPSK) garantizan máxima robustez, con márgenes mayores a 30 dB y disponibilidad casi perfecta, aunque reducen la capacidad a valores inferiores a 1 Gbps.
- La operación con ACM es indispensable para balancear rendimiento y confiabilidad, adaptando el enlace según las condiciones atmosféricas.

B) Radioenlace Rodeopampa – Torre 4

En la tabla 15 se presentan los resultados obtenidos para el radioenlace Rodeopampa – Torre 4, considerando diferentes esquemas de modulación y codificación (MCS). Se muestran el throughput agregado máximo, el throughput por dirección, el margen de desvanecimiento (fade margin) y la disponibilidad proyectada.

Tabla 15. Parámetros técnicos del radioenlace Rodeopampa – Torre 4

Modo (MCS)	Throughput Agregado (Mbps)	Throughput por Dirección (Mbps)	Fade Margin (dB)	Disponibilidad (%)
MCS13 (4096QAM Dual)	2669.25	2057.19	-2.04	1.4795
MCS12 (4096QAM Dual)	2397.22	1853.17	1.66	89.4582
MCS11 (1024QAM Dual)	2227.21	1717.16	7.96	99.999
MCS10 (1024QAM Dual)	2106.19	1547.15	11.66	99.9995
MCS9 (256QAM Dual)	1785.17	1377.13	16.66	99.9995
MCS8 (256QAM Dual)	1598.15	1241.12	18.36	99.9995
MCS7 (64QAM Dual)	1326.13	1020.10	21.96	99.9995

MCS6 (64QAM Dual)	1190.12	918.09	24.36	99.9995
MCS5 (64QAM Dual)	1054.10	816.08	26.36	99.9995
MCS4 (16QAM Dual)	799.08	612.06	30.96	99.9995
MCS3 (16QAM Dual)	527.05	408.04	34.96	99.9995
MCS2 (QPSK Dual)	391.04	306.03	37.96	99.9995

Tratamiento y análisis de datos – Rodeopampa → Torre 4

La Fig. 32 muestra que los modos de alta modulación (MCS13 y MCS12, 4096-QAM) trabajan con márgenes muy bajos (incluso negativos en MCS13), lo que los hace extremadamente sensibles al desvanecimiento. A medida que se reduce el orden de modulación, el margen crece progresivamente, alcanzando valores superiores a 30 dB en esquemas robustos como 16-QAM y QPSK, lo cual garantiza mayor estabilidad.

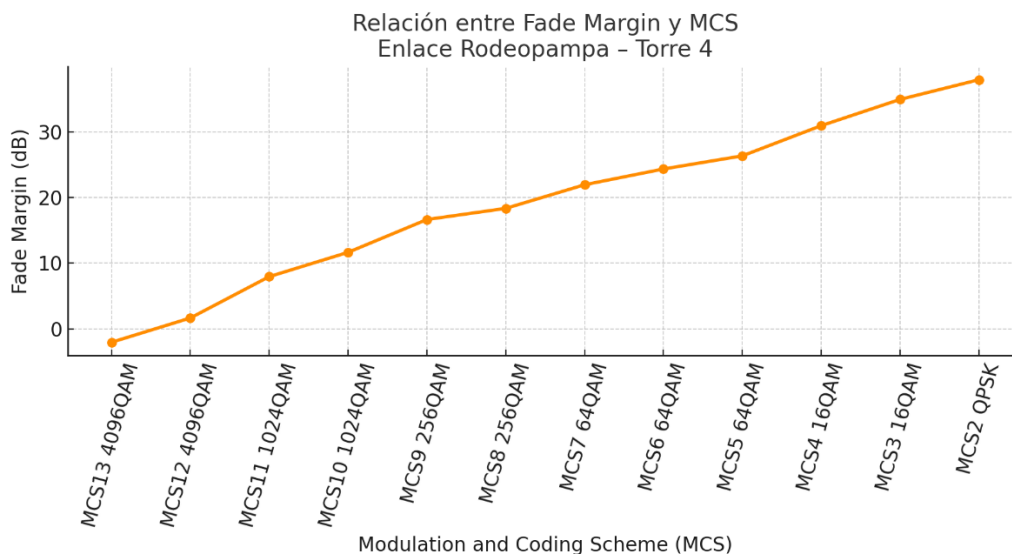


Fig. 32. Relación entre Fade Margin y MCS - Enlace Rodeopampa - Torre 4

En la Fig. 33 en escala logarítmica se observa claramente que la disponibilidad del enlace es inaceptable en MCS13 (1.47%) y todavía insuficiente en MCS12 (89.45%). A partir de MCS11 (1024-QAM) la disponibilidad supera el 99.999%, cumpliendo estándares internacionales de “cuatro nueves”. Esto confirma que los modos intermedios ofrecen un equilibrio óptimo.

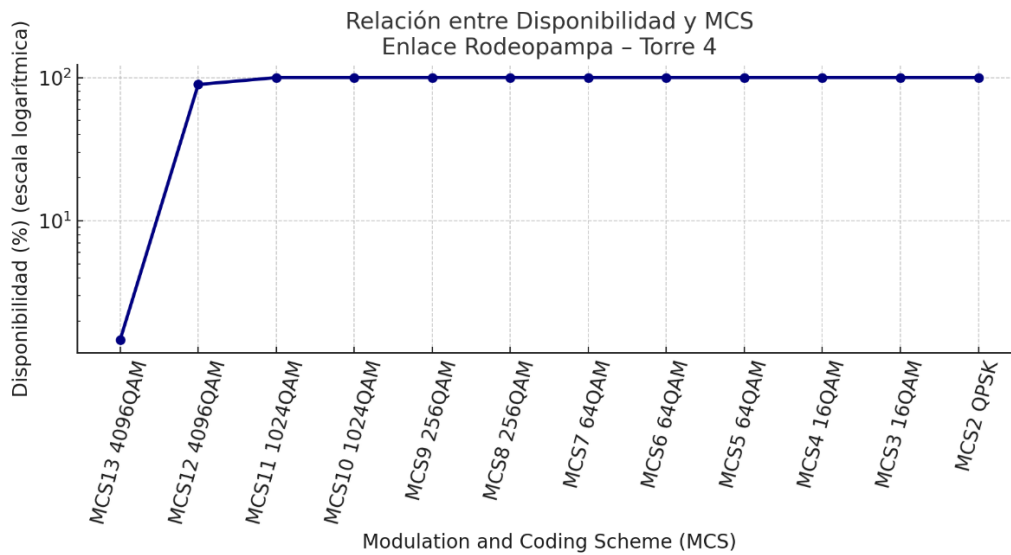


Fig. 33. Relación entre Disponibilidad y MCS - Enlace Rodeopampa - Torre 4

En la Fig. 34 el throughput alcanza su punto máximo con MCS13 (2669 Mbps), pero cae bruscamente en esquemas más robustos como QPSK (391 Mbps). Este comportamiento refleja el compromiso inherente entre capacidad y confiabilidad: los MCS de alta orden maximizan la velocidad, pero sacrifican la disponibilidad, mientras que los de baja orden aseguran estabilidad a costa de menor capacidad.

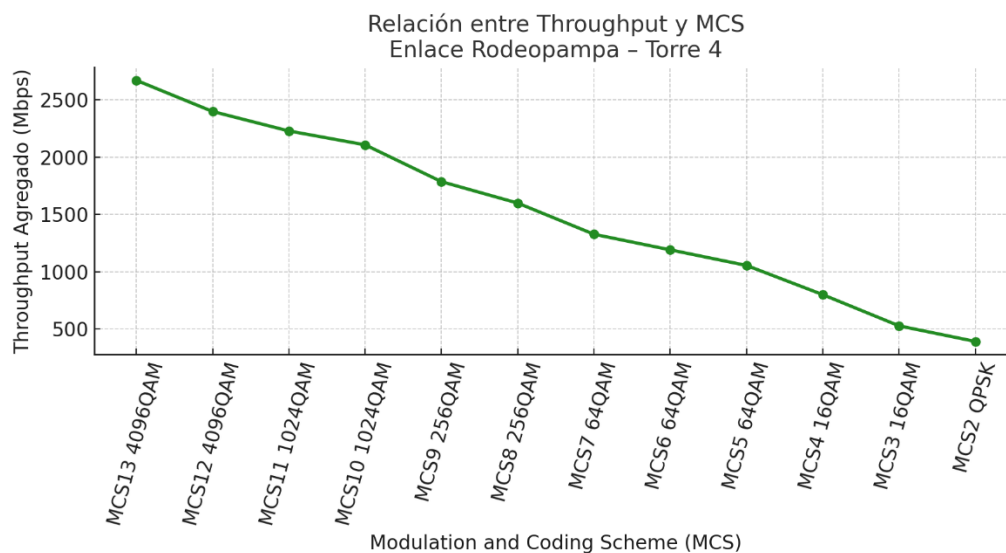


Fig. 34. Relación entre Throughput y MCS - Enlace Rodeopampa - Torre 4

Presentación de resultados – Rodeopampa → Torre 4

- Los MCS de mayor orden (4096-QAM, MCS13 y MCS12) no son viables para operación continua, ya que aunque alcanzan hasta 2.6 Gbps, presentan márgenes insuficientes (–2.04 dB y 1.66 dB) y disponibilidades muy bajas (1.47% y 89.45%).
- Los MCS intermedios (MCS9–MCS11, 256-QAM y 1024-QAM) representan el punto de equilibrio, ofreciendo entre 1.7 y 2.2 Gbps, con márgenes de 8–16 dB y disponibilidades superiores al 99.999%, lo que garantiza confiabilidad de nivel “cuatro nueves”.
- Los MCS de baja orden (16-QAM y QPSK) aseguran robustez extrema, con márgenes mayores a 30 dB y disponibilidad prácticamente perfecta, aunque con capacidad limitada (<1 Gbps).
- Se recomienda la operación mediante Adaptive Coding and Modulation (ACM), permitiendo que el enlace aproveche MCS altos en condiciones favorables y degrade automáticamente a modulaciones más robustas en presencia de desvanecimiento, asegurando continuidad del servicio.

C) Torre 4 → Torre 5 — 2.912 km, *upper-6 GHz*

La tabla 16 muestra los resultados obtenidos para el radioenlace Torre 4 – Torre 5 (2.912 km, *upper-6 GHz*). Se presentan los valores de throughput agregado máximo, throughput por dirección, margen de desvanecimiento y disponibilidad estimada para cada esquema de modulación y codificación (MCS).

Tabla 16. Parámetros técnicos del radioenlace Rodeopampa - Torre 4

Modo (MCS)	Throughput Agregado (Mbps)	Throughput por Dirección (Mbps)	Fade Margin (dB)	Disponibilidad (%)
MCS13 (4096QAM Dual)	2703.26	2074.20	-1.29	10.7995
MCS12 (4096QAM Dual)	2414.22	1853.17	2.41	96.3628
MCS11 (1024QAM Dual)	2227.21	1717.16	8.71	99.9992
MCS10 (1024QAM Dual)	2006.19	1547.15	12.41	99.9995
MCS9 (256QAM Dual)	1785.17	1377.13	17.41	99.9995
MCS8 (256QAM Dual)	1615.16	1241.12	19.11	99.9995
MCS7 (64QAM Dual)	1343.13	1037.10	22.71	99.9995
MCS6 (64QAM Dual)	1190.12	918.09	25.11	99.9995
MCS5 (64QAM Dual)	1054.10	816.08	27.11	99.9995

MCS4 (16QAM Dual)	799.08	612.06	31.71	99.9995
MCS3 (16QAM Dual)	527.05	408.04	35.11	99.9995
MCS2 (QPSK Dual)	391.04	306.03	38.71	99.9995

Tratamiento y análisis de datos – Torre 4 → Torre 5

En la Fig. 35, se observa que los modos de alta modulación (MCS13 y MCS12, 4096-QAM) presentan márgenes reducidos, siendo negativo en MCS13 (−1.29 dB) y apenas 2.41 dB en MCS12, lo que compromete seriamente la estabilidad del enlace. A partir de MCS11 (1024-QAM) el margen se eleva a 8.71 dB y crece progresivamente hasta superar los 30 dB en modulaciones más robustas (16-QAM y QPSK). Este comportamiento indica que, al ser un salto relativamente corto (2.912 km), el enlace logra márgenes muy altos en MCS intermedios y bajos, lo cual garantiza una operación confiable.

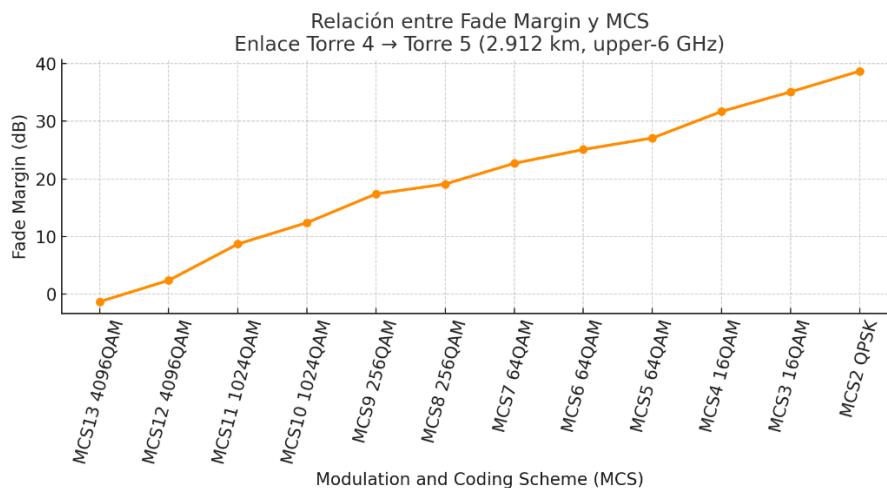


Fig. 35. Relación entre Fade Margin y MCS – Torre 4 – Torre 5

En la Fig. 36, el gráfico de disponibilidad evidencia una diferencia notable respecto a otros enlaces: aunque MCS13 presenta apenas 10.8% de disponibilidad, en MCS12 ya se alcanza 96.36%, muy superior al caso de distancias mayores. A partir de MCS11 en adelante, la disponibilidad supera el 99.999%, lo que significa que el enlace podría operar sin interrupciones perceptibles. Esto confirma que la corta distancia favorece la confiabilidad incluso en modulaciones relativamente altas.

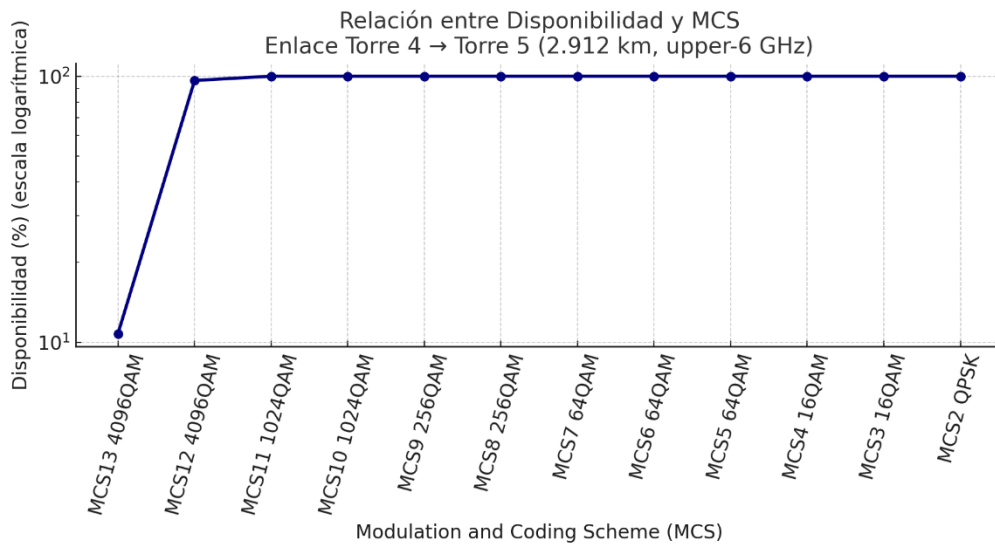


Fig. 36. Relación entre Disponibilidad y MCS – Torre 4 – Torre 5

En la Fig. 37, en este enlace se alcanzan valores máximos de throughput de 2.7 Gbps en MCS13 y 2.4 Gbps en MCS12, aunque con las limitaciones de margen y disponibilidad mencionadas. El punto de equilibrio técnico se encuentra entre MCS9 y MCS11, que combinan tasas de 1.7–2.2 Gbps con disponibilidades superiores a 99.999%, constituyendo la opción óptima para asegurar simultáneamente capacidad y estabilidad. En caso de condiciones adversas, los MCS más robustos mantienen la disponibilidad en niveles prácticamente perfectos, aunque sacrificando capacidad (<1 Gbps).

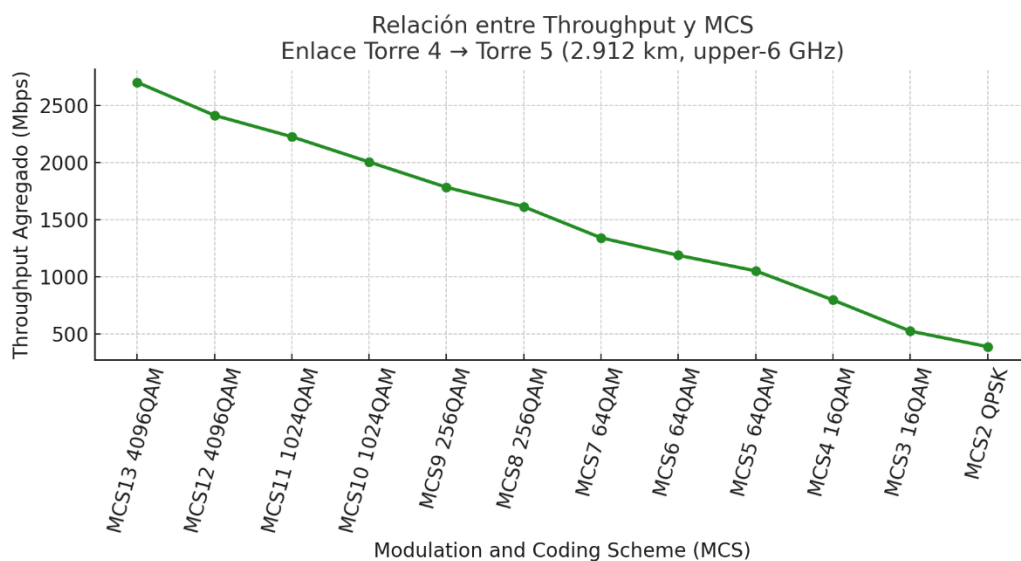


Fig. 37. Relación entre Throughput y MCS – Torre 4 – Torre 5

Presentación de resultados – Torre 4 → Torre 5

- Los MCS de mayor orden (4096-QAM, MCS13 y MCS12) no resultan viables para operación continua: aunque ofrecen capacidades de hasta 2.7 Gbps, presentan márgenes muy bajos (–1.29 dB y 2.41 dB) y disponibilidades insuficientes (10.79% y 96.36%).
- Los MCS intermedios (MCS9–MCS11, 256-QAM y 1024-QAM) constituyen el punto de equilibrio, alcanzando entre 1.7 y 2.2 Gbps con márgenes de 8–17 dB y disponibilidades superiores al 99.999%, lo que asegura una confiabilidad de nivel “cuatro nueves”.
- Los MCS de baja orden (16-QAM y QPSK) garantizan máxima robustez, con márgenes superiores a 30 dB y disponibilidad prácticamente perfecta, aunque con capacidades reducidas (<1 Gbps), siendo adecuados como modos de respaldo.
- Se recomienda la operación con Adaptive Coding and Modulation (ACM), de modo que el enlace trabaje en MCS altos bajo condiciones normales y degrade automáticamente a modulaciones más robustas durante eventos de desvanecimiento o interferencia, asegurando la continuidad del servicio.

D) Torre 5 → Vista Alegre - 2.540 km, 5.8 GHz

La tabla 17 muestra los resultados obtenidos en el enlace Torre 5 - Vista Alegre (2.540 km, 5.8 GHz), considerando los diferentes esquemas de modulación y codificación (MCS).

Tabla 17. Parámetros técnicos del radioenlace Torre 5 - Vista Alegre

Modo (MCS)	Throughput Agregado (Mbps)	Throughput por Dirección (Mbps)	Fade Margin (dB)	Disponibilidad (%)
MCS11 (1024QAM)	1107.54	854.94	12.30	99.9995
MCS10 (1024QAM)	1000.66	767.50	14.30	99.9995
MCS9 (256QAM)	893.80	689.78	19.30	99.9995
MCS8 (256QAM)	796.65	612.06	21.30	99.9995
MCS7 (64QAM)	670.35	514.91	26.30	99.9995
MCS6 (64QAM)	592.62	456.61	28.30	99.9995

MCS5 (64QAM)	524.62	408.04	31.30	99.9995
MCS4 (16QAM)	388.61	301.17	34.30	99.9995
MCS3 (16QAM)	262.31	204.02	38.30	99.9995
MCS2 (QPSK)	184.59	145.73	42.30	99.9995
MCS1 (QPSK)	126.30	97.15	45.30	99.9995

Tratamiento y análisis de datos

En la Fig. 38, el margen de desvanecimiento aumenta progresivamente al disminuir el orden de modulación: desde 12.3 dB en MCS11 (1024-QAM) hasta más de 45 dB en MCS1 (QPSK). Esto confirma que, debido a la corta distancia del enlace (2.540 km), incluso los MCS altos ofrecen márgenes suficientes para una operación confiable.

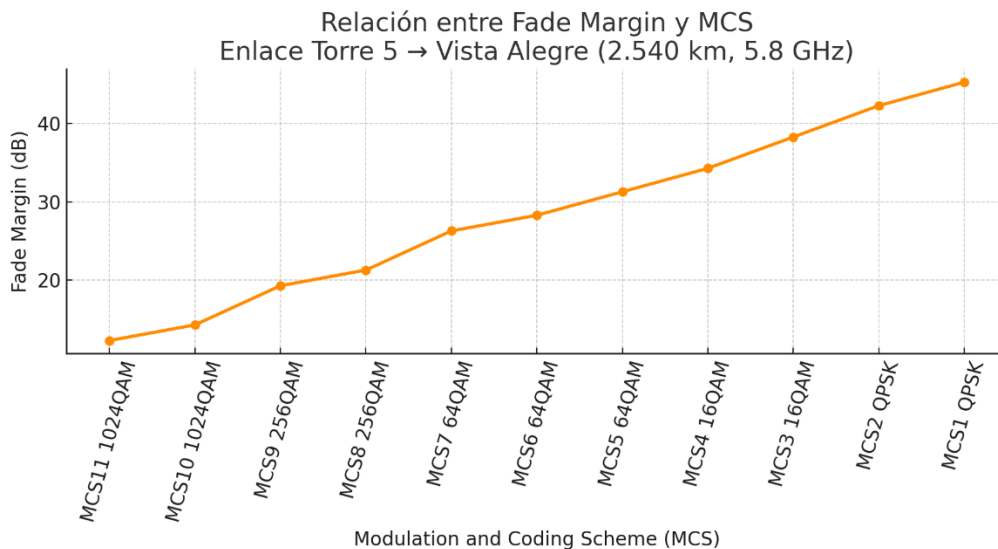


Fig. 38. Relación entre Fade Margin y MCS

En la Fig. 40, la disponibilidad es prácticamente constante en todos los MCS evaluados, manteniéndose en torno al 99.9995%. Esto implica que, a diferencia de enlaces de mayor distancia, la confiabilidad del enlace no se ve comprometida incluso en modulaciones de orden superior, garantizando un nivel de servicio óptimo.

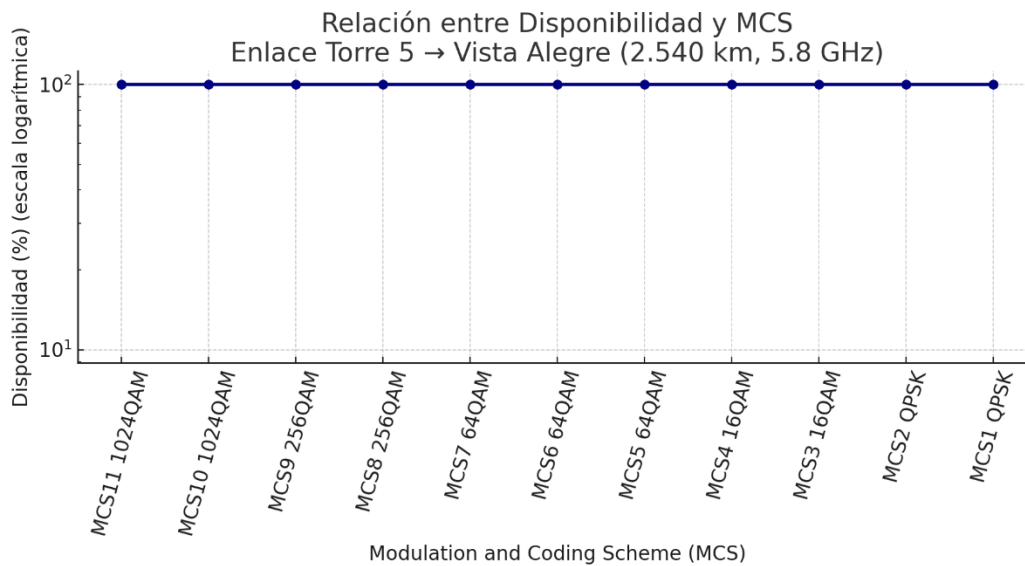


Fig. 39. Relación entre Disponibilidad y MCS

En la Fig. 40, el throughput varía entre 1107 Mbps en MCS11 (1024-QAM) y 126 Mbps en MCS1 (QPSK). Se evidencia el trade-off entre capacidad y robustez, aunque en este caso la alta disponibilidad de todos los MCS permite priorizar modulaciones más altas para maximizar la capacidad sin sacrificar confiabilidad.

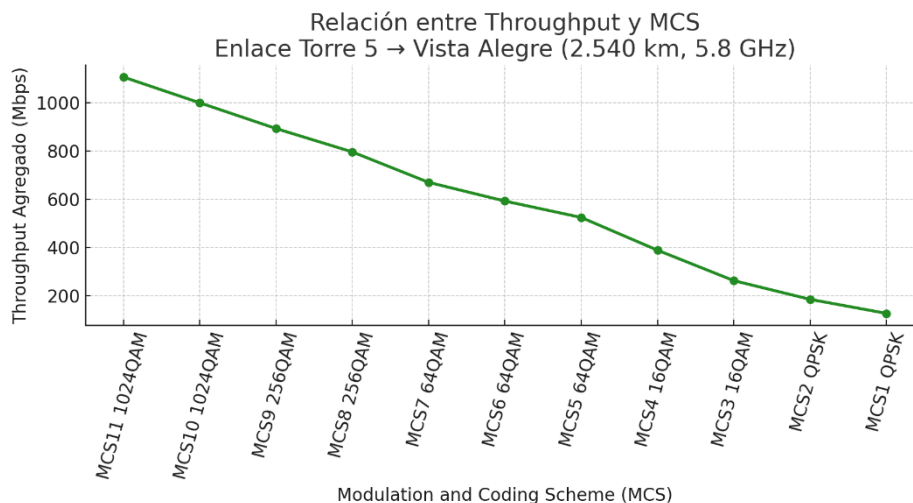


Fig. 40. Relación entre Throughput y MCS

Presentación de resultados – Torre 5 → Vista Alegre

- Los MCS de mayor orden (MCS11–MCS10, 1024-QAM) son plenamente viables, ofreciendo capacidades de 1.0–1.1 Gbps, con márgenes aceptables (12–14 dB) y disponibilidades superiores al 99.999%.

- Los MCS intermedios (MCS7–MCS9, 64-QAM y 256-QAM) garantizan un rendimiento de 0.6–0.9 Gbps, con márgenes más elevados (>19 dB), constituyendo una alternativa sólida de operación en escenarios con condiciones de propagación variables.
- Los MCS de baja orden (QPSK y 16-QAM) proporcionan robustez extrema, con márgenes superiores a 30 dB y disponibilidad perfecta, aunque sacrificando la capacidad (<400 Mbps).
- En este caso, se recomienda operar normalmente en MCS10–MCS11 para maximizar la capacidad disponible, dejando los MCS intermedios y bajos como respaldo automático mediante Adaptive Coding and Modulation (ACM).

Radioenlaces (Top 3; demanda total por hop en Mbps)

A) RDNFO Anguía → Torre 1 — 2 998 Mbps ← *cuello de botella actual*

La tabla 18 resume los resultados para el enlace RDNFO Anguía – Torre 1, considerando los diferentes esquemas de modulación y codificación (MCS). Se incluyen los valores de throughput máximo, throughput por dirección, margen de desvanecimiento y disponibilidad estimada.

Tabla 18. Parámetros técnicos del radioenlace RDNFO Anguía → Torre 1

Modo (MCS)	Throughput Agregado (Mbps)	Throughput por Dirección (Mbps)	Fade Margin (dB)	Disponibilidad (%)
MCS13 (4096QAM Dual)	2703.26	2074.20	9.15	99.9993
MCS12 (4096QAM Dual)	2431.23	1870.18	12.85	99.9995
MCS11 (1024QAM Dual)	2244.21	1717.16	16.15	99.9995
MCS10 (1024QAM Dual)	2006.19	1547.15	18.85	99.9995
MCS9 (256QAM Dual)	1785.17	1377.13	22.85	99.9995
MCS8 (256QAM Dual)	1615.16	1241.12	24.55	99.9995
MCS7 (64QAM Dual)	1343.13	1037.10	27.15	99.9995
MCS6 (64QAM Dual)	1207.12	935.09	29.55	99.9995
MCS5 (64QAM Dual)	1054.10	816.08	30.55	99.9995
MCS4 (16QAM Dual)	799.08	612.06	34.15	99.9995
MCS3 (16QAM Dual)	527.05	408.04	37.55	99.9995

Tratamiento y análisis de datos

En la Fig. 41, el margen de desvanecimiento aumenta conforme disminuye el orden de modulación: parte de 9.15 dB en MCS13 (4096-QAM) y asciende hasta más de 37 dB en MCS3 (16-QAM). Incluso en modulaciones altas, los márgenes son aceptables para operación confiable, reflejando que el enlace presenta condiciones de propagación muy favorables.

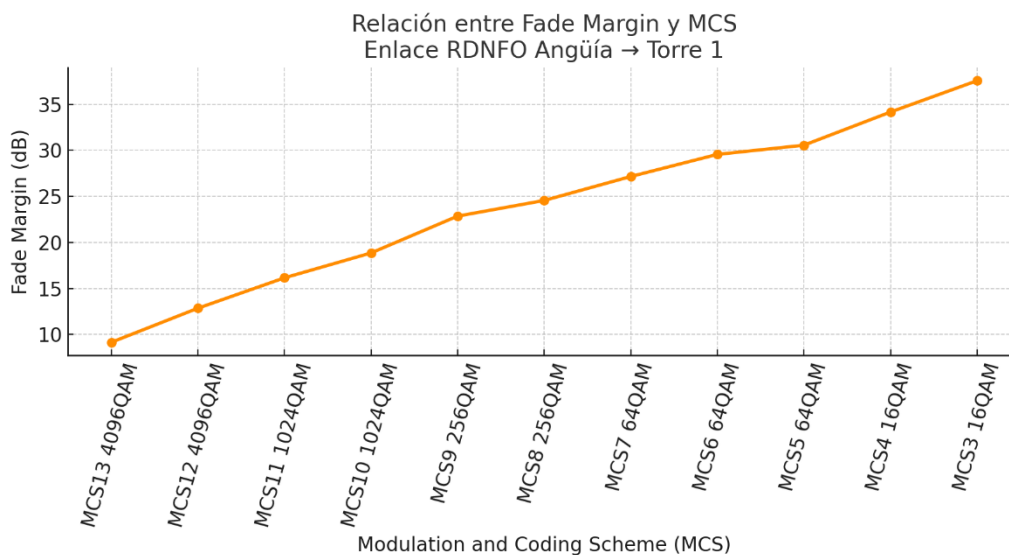


Fig. 41. Relación entre Fade Margin y MCS RDNFO Angüía – Torre 1

En la Fig. 43, la disponibilidad se mantiene estable y superior al 99.999% en prácticamente todos los MCS evaluados. Esto significa que el enlace RDNFO Angüía – Torre 1 puede operar de manera confiable incluso en esquemas de modulación de orden superior, garantizando interrupciones mínimas.

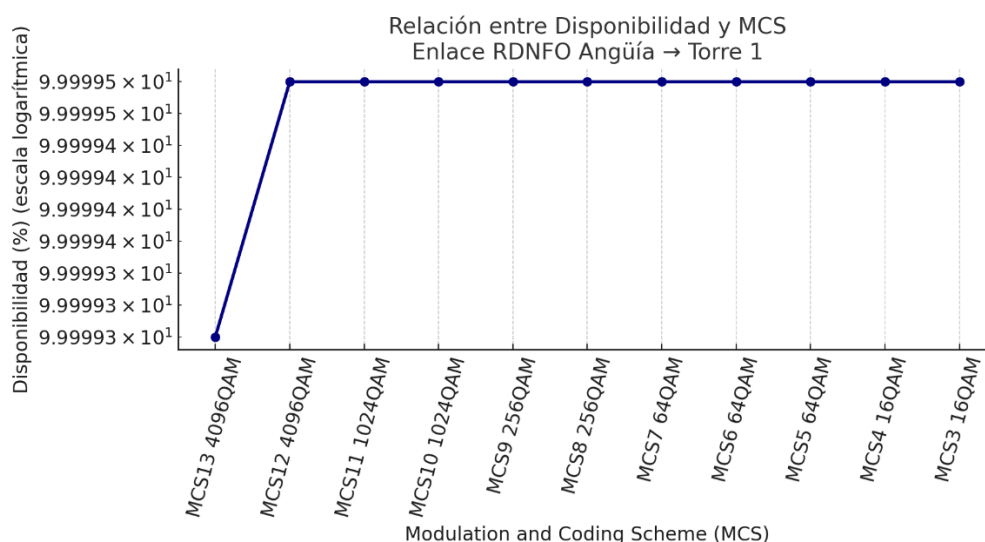


Fig. 42. Relación entre Disponibilidad y MCS RDNFO Anguña – Torre 1

En la Fig. 43, el throughput varía entre 2703 Mbps en MCS13 y 527 Mbps en MCS3, mostrando el clásico trade-off entre capacidad y robustez. Sin embargo, dado que la disponibilidad se mantiene estable en todos los casos, es posible priorizar MCS altos para maximizar el throughput sin sacrificar la confiabilidad del enlace.

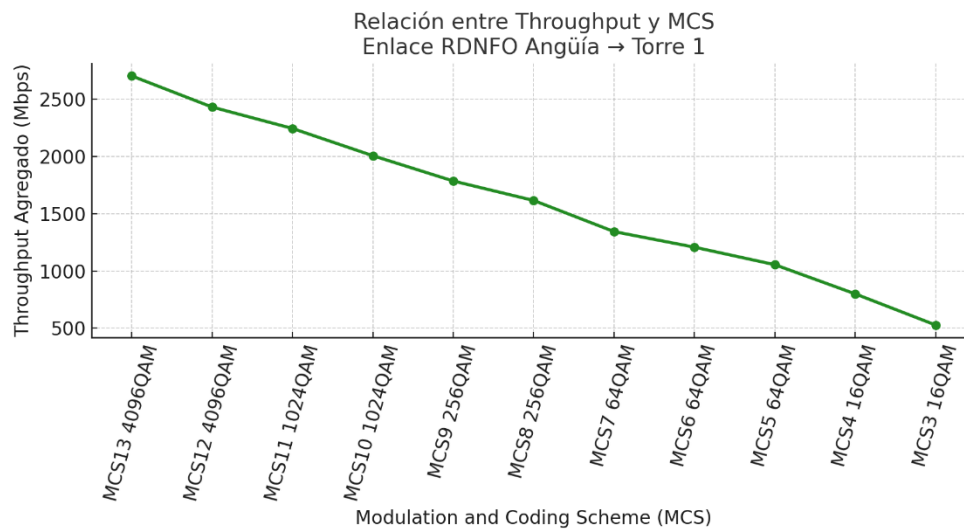


Fig. 43. Relación entre Throughput y MCS RDNFO Anguña – Torre 1

Presentación de resultados – RDNFO Anguña → Torre 1

- Los MCS de mayor orden (MCS12–MCS13, 4096-QAM) son viables, ya que ofrecen 2.4–2.7 Gbps con márgenes de 9–12 dB y disponibilidades superiores al 99.999%.
- Los MCS intermedios (MCS9–MCS11, 256-QAM y 1024-QAM) representan un rango seguro, con capacidades de 1.7–2.2 Gbps, márgenes de 16–23 dB y confiabilidad superior al 99.999%.
- Los MCS de baja orden (64-QAM y 16-QAM) garantizan márgenes muy altos (>27 dB) y disponibilidad prácticamente perfecta, pero reducen la capacidad a menos de 1 Gbps.
- Se recomienda operar normalmente en MCS11-MCS12, donde se combina alta capacidad con confiabilidad de nivel “cuatro nueves”, utilizando ACM para adaptar dinámicamente el enlace en condiciones adversas.

B) Torre 1 → Aliso — 1 099 Mbps

La tabla 19 presenta los resultados del enlace Torre 1 – Aliso, considerando los diferentes esquemas de modulación y codificación (MCS). Se incluyen el throughput agregado máximo, el throughput por dirección, el margen de desvanecimiento y la disponibilidad proyectada.

Tabla 19. Parámetros técnicos del radioenlace Torre 1 → Aliso

Modo (MCS)	Throughput Agregado (Mbps)	Throughput por Dirección (Mbps)	Fade Margin (dB)	Disponibilidad (%)
MCS13 (4096QAM Dual)	2703.26	2074.20	0.64	67.7812
MCS12 (4096QAM Dual)	2414.22	1853.17	4.34	99.8805
MCS11 (1024QAM Dual)	2227.21	1717.16	10.64	99.9995
MCS10 (1024QAM Dual)	2006.19	1547.15	14.34	99.9995
MCS9 (256QAM Dual)	1785.17	1377.13	19.34	99.9995
MCS8 (256QAM Dual)	1615.16	1241.12	21.04	99.9995
MCS7 (64QAM Dual)	1343.13	1037.10	24.24	99.9995
MCS6 (64QAM Dual)	1190.12	918.09	27.04	99.9995
MCS5 (64QAM Dual)	1054.10	816.08	29.04	99.9995
MCS4 (16QAM Dual)	799.08	612.06	33.64	99.9995
MCS3 (16QAM Dual)	527.05	408.04	37.04	99.9995

Tratamiento y análisis de datos

En la Fig. 44, el margen de desvanecimiento es crítico en MCS13 (0.64 dB), lo que explica su baja disponibilidad. A partir de MCS12 (4.34 dB) el enlace mejora, y desde MCS11 en adelante los márgenes superan los 10 dB, alcanzando más de 37 dB en modulaciones más robustas, garantizando estabilidad en escenarios de desvanecimiento.

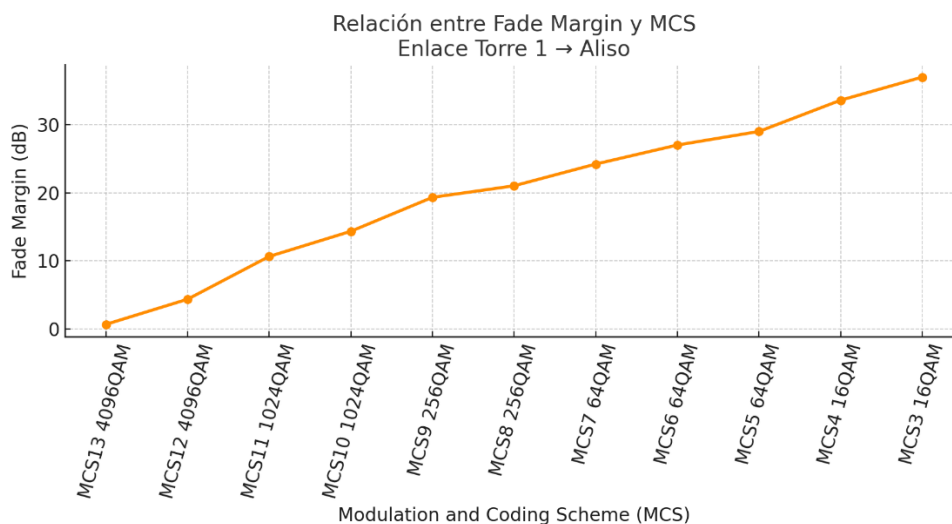


Fig. 44. Relación entre Fade Margin y MCS RDNFO Torre 1 – Aliso

En la Fig. 46, la disponibilidad es muy baja en MCS13 (67.78%), insuficiente para operación confiable. En MCS12 ya asciende a 99.88%, aunque todavía por debajo del estándar de cuatro nueves. Desde MCS11 en adelante, la disponibilidad se estabiliza en niveles superiores al 99.999%, asegurando confiabilidad de primer nivel.

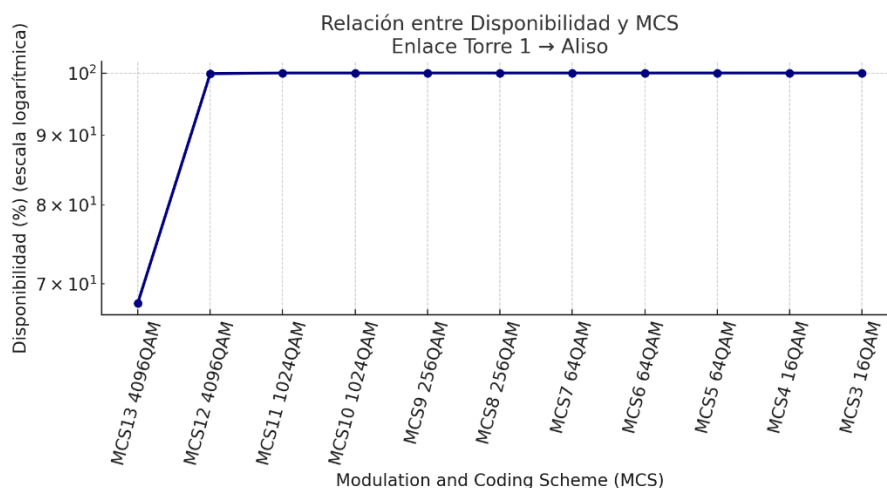


Fig. 45. Relación entre Disponibilidad y MCS RDNFO Torre 1 – Aliso

En la Fig. 46, el throughput máximo de 2703 Mbps en MCS13 no es aprovechable por la baja disponibilidad. El rango operativo viable se encuentra entre MCS9 y MCS11, que permiten entre 1.3 y 2.2 Gbps con alta confiabilidad. Para garantizar estabilidad, el diseño del enlace debe priorizar modulaciones intermedias, manteniendo como respaldo los MCS de menor orden.

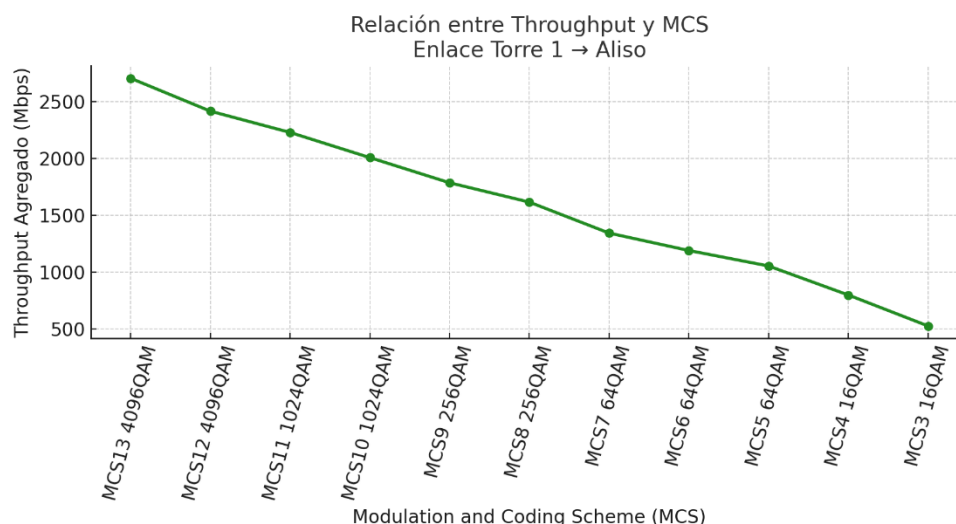


Fig. 46. Relación entre Throughput y MCS RDNFO Torre 1 – Aliso

Presentación de resultados – Torre 1 → Aliso

- Los MCS de mayor orden (4096-QAM, MCS13) no son viables debido a su baja disponibilidad (67.78%), a pesar de su alta capacidad de 2.7 Gbps.
- MCS12 (4096-QAM) ofrece 2.4 Gbps, pero con 99.88% de disponibilidad, insuficiente para garantizar continuidad en un enlace troncal.
- Los MCS intermedios (MCS9–MCS11, 256-QAM y 1024-QAM) constituyen el rango óptimo, combinando entre 1.3 y 2.2 Gbps con disponibilidades superiores al 99.999%.
- Los MCS de baja orden (64-QAM y 16-QAM) garantizan márgenes muy altos y disponibilidad perfecta, aunque sacrifican la capacidad a valores inferiores a 1 Gbps.
- Se recomienda la operación con Adaptive Coding and Modulation (ACM), priorizando MCS intermedios en condiciones normales y degradando a modos más robustos durante eventos de desvanecimiento.

C) Torre 1 → Rodeopampa — 518 Mbps

La tabla 20 resume los resultados del enlace Torre 1 – Rodeopampa, considerando distintos esquemas de modulación y codificación (MCS).

Tabla 20. Parámetros técnicos del radioenlace Torre 1 → Aliso

Modo (MCS)	Throughput Agregado (Mbps)	Throughput por Dirección (Mbps)	Fade Margin (dB)	Disponibilidad (%)
MCS11 (1024QAM Dual)	1117.25	854.94	19.51	99.9995
MCS10 (1024QAM Dual)	1010.38	777.22	21.51	99.9995
MCS9 (256QAM Dual)	893.80	689.78	24.51	99.9995
MCS8 (256QAM Dual)	806.36	621.77	26.51	99.9995
MCS7 (64QAM Dual)	670.35	514.91	30.51	99.9995
MCS6 (64QAM Dual)	602.34	466.33	32.51	99.9995
MCS5 (64QAM Dual)	524.62	408.04	34.51	99.9995
MCS4 (16QAM Dual)	398.33	310.89	37.51	99.9995
MCS3 (16QAM Dual)	262.31	204.02	41.51	99.9995
MCS2 (QPSK Dual)	194.30	155.44	43.51	99.9995
MCS1 (QPSK Dual)	126.30	97.15	46.51	99.9995

Tratamiento y análisis de datos

En la Fig. 47, el margen de desvanecimiento es muy favorable: parte de 19.5 dB en MCS11 (1024-QAM) y asciende progresivamente hasta 46.5 dB en QPSK. Esto significa que el enlace es altamente robusto incluso en modulaciones de orden superior.

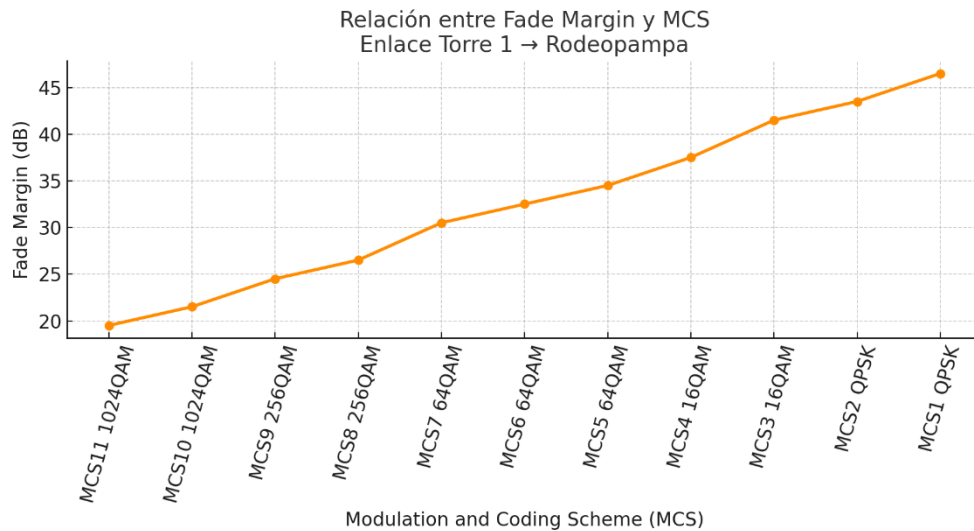


Fig. 47. Relación entre Fade Margin y MCS RDNFO Torre 1 - Rodeopampa

En la Fig. 48, todos los MCS mantienen una disponibilidad superior a 99.999%, lo que asegura una confiabilidad de nivel “cinco nueves”. Esto convierte al enlace en altamente confiable en cualquiera de las modulaciones evaluadas.

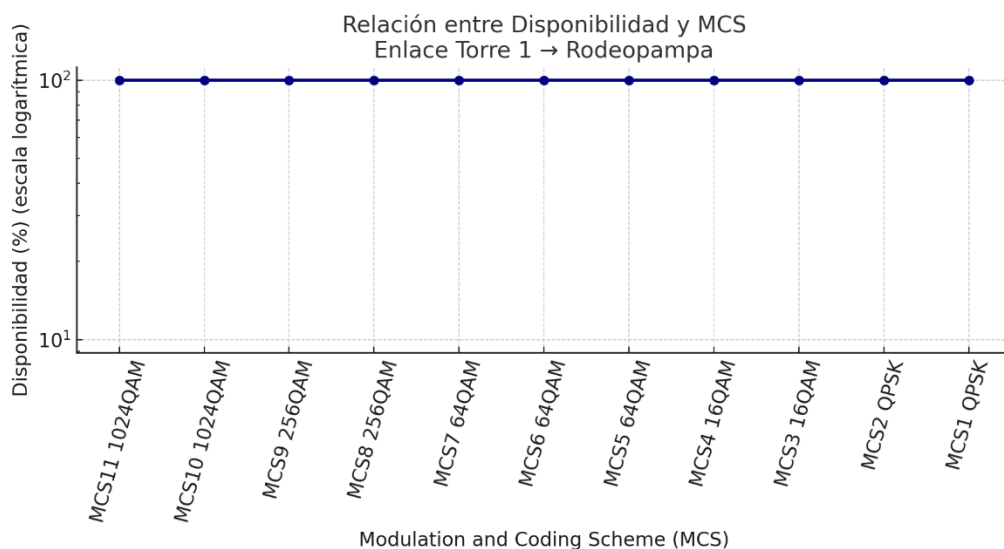


Fig. 48. Relación entre Disponibilidad MCS RDNFO Torre 1 - Rodeopampa

En la Fig. 49, el throughput máximo se obtiene en MCS11 (1117 Mbps), mientras que el mínimo corresponde a QPSK (126 Mbps). Dado que la disponibilidad es constante y elevada, el rango óptimo de operación es en MCS10–MCS11, con tasas de 1.0–1.1 Gbps y alta confiabilidad.

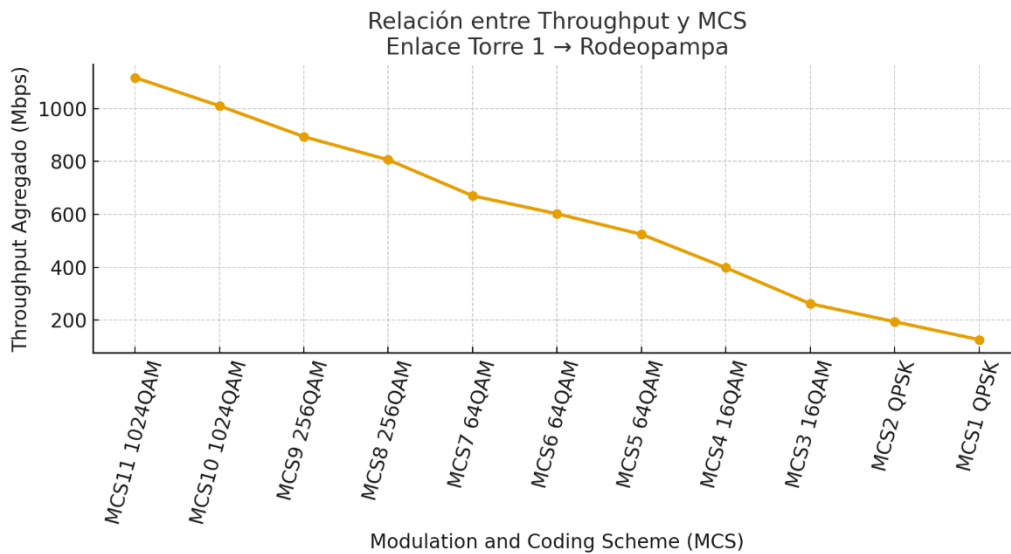


Fig. 49. Relación entre Throughput MCS RDNFO Torre 1 – Rodeopampa

Presentación de resultados – Torre 1 → Rodeopampa

- Los MCS altos (MCS10–MCS11, 1024-QAM) son plenamente viables: ofrecen entre 1.0 y 1.1 Gbps, con márgenes superiores a 19 dB y disponibilidad mayor a 99.999%.
- Los MCS intermedios (MCS7–MCS9, 64-QAM y 256-QAM) mantienen altos niveles de robustez, con márgenes de 24–30 dB y capacidades entre 0.6 y 0.9 Gbps.
- Los MCS de baja orden (QPSK, 16-QAM) aseguran márgenes muy altos (>37 dB) y disponibilidad perfecta, pero sacrifican capacidad (<400 Mbps).
- El rango recomendado de operación es MCS10–MCS11, dejando los MCS más robustos como respaldo mediante Adaptive Coding and Modulation (ACM), para garantizar continuidad del servicio frente a desvanecimientos.

2.3.5. Síntesis de la sección de resultados de radioenlaces

La red diseñada, como resultado del primer objetivo específico, permitió definir la topología óptima y los parámetros técnicos necesarios para garantizar la conectividad en el área de estudio. A partir de esta base, se evaluó el desempeño de siete radioenlaces representativos, seleccionados por su mayor distancia y mayor throughput proyectado, incorporando además una interferencia de -87 dBm, considerada típica en la zona rural.

Los resultados demuestran que todos los enlaces analizados superan la demanda proyectada, alcanzando márgenes de confiabilidad adecuados y disponibilidades superiores a los estándares internacionales, incluso bajo condiciones de interferencia. En consecuencia, los enlaces de menor distancia y demanda no fueron objeto de análisis detallado, ya que su desempeño resulta aún más favorable.

De este modo, se valida que la red propuesta no solo cumple con los requerimientos de capacidad y disponibilidad, sino que además responde de manera robusta ante escenarios adversos, alcanzando así el segundo objetivo específico de la investigación. Los resultados técnicos completos de cada radioenlace se encuentran documentados en el Anexo 5.

2.3.6. Consolidación de parámetros de configuración por radioenlace

La Tabla 19 consolida, para cada salto, los parámetros de instalación y operación derivados del diseño: origen–destino, demanda (Mbps), distancia, alturas de torres, banda de operación, ancho de canal seleccionado, potencia de transmisión por extremo y antena (modelo/ganancia). Estos valores fueron definidos enlace por enlace a partir del presupuesto de enlace y de la evaluación del SNIR frente a los umbrales de MCS del fabricante (considerando $+3$ dB de margen de implementación). La selección de ancho de canal y potencia se realizó buscando el mínimo recurso espectral que garantice la capacidad exigida por cada tramo.

Con esta configuración base, en la sección siguiente se presentan los resultados de verificación (throughput logrado, MCS operativo, fade margin y disponibilidad) que evidencian el cumplimiento del Objetivo 2: operar cada radioenlace con FM

≥ 10 dB y disponibilidad anual $\geq 99,99$ % (o 99,9995 %, según el criterio que adoptes de forma uniforme), sin comprometer la demanda de tráfico indicada en la tabla y bajo las condiciones geográficas y climáticas de Anguía.

Para todas las simulaciones se adoptó un piso uniforme de ruido + interferencia de -87 dBm, referido al ancho de canal de referencia y reescalado al ancho efectivo mediante $10 \cdot \log_{10} \left(\frac{B_{nuevo}}{B_{ref}} \right)$. Este supuesto asegura consistencia en las estimaciones de SNIR, FM y disponibilidad que sustentan la configuración consolidada en la tabla 21.

Tabla 21. Parámetros de configuración de cada radioenlace

Origen	Demanda (Mbps)	Distancia (km)	Altura der (m)	Altura izq (m)	Banda (GHz)	Ancho de Canal (MHz)	Ptx der (dBm)	Ptx izq (dBm)	Antena
Aliso - Succha	154	1,589	25	25	5.8	20	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Torre 1 - Aliso	1,099	2,333	27	30	Upper 6	80	18	18	Radio Waves 2ft Dual-Polar Parabolic SPD2-6 (30,6 dBi)
Torre 3 - Castilla	154	5,68	35	40	5.8	40	16	16	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Nodo RDNFO Torre Anguía - Cercado	266	8,67	15	20	5.8	20	20	20	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Torre 4 - Chugur	263	2,436	25	35	5.8	20	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Aliso - Chugur	455	4,21	31	35	5.8	40	14	14	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Nodo RDNFO Torre Anguía - Colcabamba	326	1,674	15	35	5.8	40	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Torre 4 - Huallagata	452	2,386	30	30	5.8	40	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Torre 1 - Rodeopampa	518	9,88	30	30	5.8	40	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Torre 5 - Rosapampa	354	2,188	30	33	5.8	40	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)

Rosapampa - Tendal	238	1,061	33	33	5.8	20	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Nodo RDNFO Torre Anguía - Torre 1	2,998	1,259	35	20	Upper 6	160	18	18	Radio Waves 2ft Dual-Polar Parabolic SPD2-6 (30,6 dBi)
Rodeopampa - Torre 3	189	5,59	30	20	5.8	40	16	16	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Rodeopampa - Torre 4	2,998	6,538	40	30	Upper 6	20	18	18	Radio Waves 3ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6 (33,6 dBi)
Torre 1 - Torre 4	1,265	6,704	35	40	Upper 6	160	18	18	Radio Waves 3ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6 (33,6 dBi)
Torre 4 - Torre 5	550	2,912	30	35	Upper 6	20	18	18	Radio Waves 2ft Dual-Polar Parabolic SPD2-6 (30,6 dBi)
Torre 5 - Torre 6	77	1,097	30	30	5.8	20	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Torre 5 - Vista Alegre	119	2,54	35	35	5.8	20	18	18	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)
Castilla - Yamse Ushum	308	1,087	10	25	5.8	40	22	22	Cambium Networks 2ft High Performance Dual-Polar Parabolic RDH4508C (29,1 dBi)

supuesto común: ruido + interferencia = -87 dBm reescalado al ancho de canal; esta configuración sirve de base para verificar FM ≥ 10 dB, disponibilidad ≥ 99.99 % y throughput $\geq$ demanda.

3.2.4.10. Resultados de robustez: Throughput de referencia, MCS, Fade Margin y Disponibilidad por radioenlace

Con el objetivo de caracterizar la robustez radioeléctrica de cada hop bajo un supuesto común de interferencia, se registraron los resultados de simulación asociados al MCS de referencia que cumple simultáneamente:

- Fade Margin (FM) ≥ 10 dB, y
- Disponibilidad $\geq 99,9995$ %,

bajo el supuesto: piso de ruido + interferencia = -87 dBm, reescalado al ancho de canal efectivo.

En este apartado, el “Throughput logrado” debe interpretarse como un indicador de desempeño en condición robusta (robust throughput), es decir, el throughput que el enlace puede sostener manteniendo holgura de margen y disponibilidad muy alta para el MCS consignado. Por tanto, no representa necesariamente la capacidad máxima del enlace, sino un valor conservador de operación para asegurar continuidad de servicio.

Los resultados se muestran en la Tabla 22, donde además se incluye la demanda del hop con fines de trazabilidad (la validación estricta de suficiencia de capacidad se desarrolla en la sección de comparación capacidad–demanda).

Tabla 22. Resultados por radioenlace - throughput mínimo

Origen	Throughput robusto (Mbps)	Esquema de Modulación y Codificación	Fade Margin (dB)	Demanda (Mbps)	Disponibilidad (%)
Aliso - Succha	187	MCS8	26,38	154	99,9995
Torre 1 - Aliso	398,33	MCS6	21,04	1.099	99,9995
Torre 3 - Castilla	194,3	MCS2	43,31	154	99,9995
Nodo RDNFO Torre Anguía - Cercado	398,33	MCS4	37,65	266	99,9995
Torre 4 - Chugur	315,74	MCS7	23,66	263	99,9995
Aliso - Chugur	534,34	MCS5	34,92	455	99,9995
Nodo RDNFO Torre Anguía - Colcabamba	398,33	MCS4	29,92	326	99,9995

Torre 4 - Huallagata	524,61	MCS5	23,84	452	99,9995
Torre 1 - Rodeopampa	602,34	MCS6	29,51	518	99,9995
Torre 5 - Rosapampa	420,8	MCS9	18,6	354	99,9995
Rosapampa - Tendal	284,17	MCS6	32,89	238	99,9995
Nodo RDNFO Torre Anguía - Torre 1	1.615,16	MCS8	24,55	2.998	99,9995
Rodeopampa - Torre 3	262,31	MCS3	41,45	189	99,9995
Rodeopampa - Torre 4	1.598,15	MCS8	13,36	2.998	99,9995
Torre 1 - Torre 4	1.326,13	MCS7	15,75	1.265	99,9995
Torre 4 - Torre 5	592,62	MCS6	22,41	550	99,9995
Torre 5 - Torre 6	126,3	MCS5	37,6	77	99,9995
Torre 5 - Vista Alegre	187,02	MCS8	41,29	119	99,9995
Castilla - Yamse Ushum	398,33	MCS4	41,79	308	99,9995

El throughput reportado corresponde al MCS indicado bajo criterio robusto; la suficiencia de capacidad se valida mediante la comparación throughput agregado vs demanda HO y el análisis por dirección (Split TDD).

3.2.4.11. Resultados de dimensionamiento: MCS máximo que satisface demanda con FM y disponibilidad objetivo

Luego de caracterizar la condición robusta, se determinó para cada hop el MCS máximo operativo que permite satisfacer la demanda del enlace manteniendo simultáneamente:

- $FM \geq 10$ dB, y
- Disponibilidad $\geq 99,9995$ %,

bajo el mismo supuesto de ruido + interferencia = -87 dBm, reescalado al ancho de canal.

Este criterio identifica el mejor punto de operación (máxima eficiencia espectral) sin sacrificar confiabilidad y sirve como base para la configuración recomendada del enlace en condiciones nominales, considerando operación con ACM/AMC.

Los resultados se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados por radioenlace - throughput máximo

Origen	Throughput logrado (Mbps)	Esquema de Modulación y Codificación	Fade Margin (dB)	Demanda (Mbps)	Disponibilidad (%)
Aliso - Succha	259,88	MCS11	18,38	154	99,9995
Torre 1 - Aliso	1.785,17	MCS9	14,34	1.099	99,9995
Torre 3 - Castilla	1.126,96	MCS11	19,31	154	99,9995
Nodo RDNFO Torre Anguía - Cercado	1.117,25	MCS11	19,65	266	99,9995
Torre 4 - Chugur	471,19	MCS10	13,66	263	99,9995
Aliso - Chugur	1.126,96	MCS11	19,92	455	99,9995
Nodo RDNFO Torre Anguía - Colcabamba	1.010,38	MCS10	13,92	326	99,9995
Torre 4 - Huallagata	893,8	MCS9	13,84	452	99,9995
Torre 1 - Rodeopampa	1.117,25	MCS11	16,51	518	99,9995
Torre 5 - Rosapampa	471,19	MCS10	14,6	354	99,9995
Rosapampa - Tendal	524,62	MCS11	18,89	238	99,9995
Nodo RDNFO Torre Anguía - Torre 1	2.244,21	MCS11	16,15	2.998	99,9995
Rodeopampa - Torre 3	1.126,96	MCS11	19,45	189	99,9995
Rodeopampa - Torre 4	1.598,15	MCS8	13,36	2.998	99,9995
Torre 1 - Torre 4	1.598,15	MCS8	13,15	1.265	99,9995
Torre 4 - Torre 5	893,8	MCS9	16,11	550	99,9995
Torre 5 - Torre 6	259,88	MCS11	21,6	77	99,9995
Torre 5 - Vista Alegre	259,88	MCS11	14,3	119	99,9995
Castilla - Yamse Ushum	1.117,25	MCS11	23,79	308	99,9995

3.2.5. Fase 5 - Evaluación económica del diseño de la infraestructura de radioenlaces

Se evaluará la viabilidad económica del diseño de la infraestructura de radioenlaces mediante un análisis detallado de los costos de implementación, operación y mantenimiento, considerando tanto la red inalámbrica propuesta como la interconexión por fibra óptica con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica (RDNFO), bajo criterios de sostenibilidad técnica y económica.

3.2.5.1. Evaluación económica CAPEX – OPEX y Viabilidad preliminar

La estimación del CAPEX se realizó mediante un enfoque de presupuesto por metrado, consistente en:

1. Identificación de componentes del diseño (radioenlaces, nodos, NOC, energía, seguridad, fibra óptica).
2. Cuantificación física (BOQ – Bill of Quantities) Número de equipos, longitudes, unidades de obra y servicios requeridos.
3. Asignación de precios unitarios referenciales de mercado, obtenidos de:
 - proveedores nacionales de telecomunicaciones,
 - proyectos similares ejecutados en zonas rurales,
 - precios promedio de mercado vigentes.
4. Cálculo de subtotales por partida, integración del CAPEX directo y aplicación de contingencia.

Este procedimiento permite asegurar trazabilidad técnica y económica, requisito clave en evaluaciones bajo Invierte.pe.

CAPEX – Infraestructura de radioenlaces

Equipamiento activo de telecomunicaciones (Tabla 24)

Metrado técnico

- Radioenlaces PTP: 21
- Extremos de radio: 42
- Radios Upper-6 GHz (troncales): 8
- Radios 5.8 GHz (distribución/acceso): 34

Tabla 24. Equipamiento activo PTP

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	PU (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Radio PTP Upper-6 GHz	un	8	2,360	18,880
2	Radio PTP 5.8 GHz	un	34	1,400	47,600
Subtotal equipamiento activo					66,480

Equipamiento RF pasivo y montaje (Tabla 25)

Criterio de metrado

Cada extremo PTP requiere antena, herrajes y consumibles de sellado.

Tabla 25. Equipamiento RF pasivo

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	PU (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Antena Upper-6 GHz	un	8	1,200	9,600
2	Antena 5.8 GHz	un	34	850	28,900
3	Kit de montaje RF	kit	42	120	5,040
4	Consumibles RF	kit	42	50	2,100
Subtotal RF pasivo					45,640

CAPEX – Centro de Operaciones de Red – NOC (Tabla 26)

Infraestructura física del NOC

El NOC se implementa en la capital distrital de Anguía e incluye:

- Ambiente técnico dedicado,
- Rack de telecomunicaciones,
- Sistema eléctrico independiente,
- Sistema de energía ininterrumpida,
- Climatización pasiva/forzada básica,
- Seguridad y ordenamiento de cableado.

Tabla 26. Infraestructura y equipamiento del NOC

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	PU (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Router / Firewall	un	1	2,800	2,800
2	Switch core de agregación	un	1	3,500	3,500
3	Servidor de monitoreo / NVR	un	1	6,000	6,000
4	Rack 42U + accesorios	set	1	4,300	4,300
5	UPS online 3 kVA	un	1	4,500	4,500
Subtotal equipamiento NOC					21,100

Instalación eléctrica del NOC (Tabla 27)

Alcance técnico

- Tablero eléctrico dedicado,
- Llave termomagnética general y ramales,
- Supresor de sobretensiones (SPD),
- Puesta a tierra,
- Tomacorrientes regulados,
- Iluminación técnica.

Tabla 27. Instalación eléctrica del NOC

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	PU (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Tablero eléctrico técnico	un	1	1,200	1,200
2	Llaves TM + SPD	set	1	900	900
3	Sistema de puesta a tierra	set	1	1,100	1,100
4	Canalización, tomas e iluminación	global	1	1,300	1,300
Subtotal instalación eléctrica NOC					4,500

CAPEX – Casetas técnicas (Tabla 28)

Criterio de diseño

- 21 nodos → 21 casetas técnicas de 3×3 m
- Función: protección de equipos, energía, seguridad y mantenimiento.

Tabla 28. Casetas técnicas

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	PU (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Caseta técnica 3×3 m	un	21	12,000	252,000

CAPEX – Interconexión por fibra óptica – RDNFO (Tabla 29 - 30)

Alcance de la interconexión

- Longitud total: 2 km
- Tipo de fibra: ADSS 24 hilos
- Vano promedio: 100 m
- Número de vanos: 20
- Postes existentes (uso compartido)
- Empalme en NOC y empalme en nodo RDNFO Cajamarca

Metrado y costos de fibra óptica

Tabla 29. Materiales de fibra óptica

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	PU (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Fibra ADSS 24 hilos	m	2,000	8.50	17,000
2	Herrajes ADSS (anclaje + suspensión)	vano	20	450	9,000
3	Cajas de empalme óptico	un	2	1,200	2,400
4	Pigtails y bandejas	set	2	800	1,600
5	ODF 24 hilos	un	2	1,500	3,000
Subtotal materiales FO					33,000

Instalación y pruebas de fibra

Tabla 30. Instalación FO

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	PU (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Tendido FO ADSS	m	2,000	4.50	9,000
2	Empalmes de fibra	empalme	2	1,500	3,000
3	Certificación OTDR	global	1	3,500	3,500
Subtotal instalación FO					15,500

CAPEX – Resumen general (Tabla 31)

Tabla 31. CAPEX total del proyecto

Componente	Subtotal (S/.)
Equipamiento activo PTP	66,480
RF pasivo	45,640
NOC (equipos + eléctrico)	25,600
Casetas técnicas	252,000
Interconexión FO (material + instalación)	48,500
Sistemas de energía	74,800
Seguridad y videovigilancia	9,870
Implementación general	48,150
CAPEX directo	571,040
Contingencia (10%)	57,104
CAPEX total	628,144

3.2.5.2. OPEX - Operación y mantenimiento

El análisis del Costo Operativo Anual (OPEX) comprende todos los gastos recurrentes necesarios para garantizar la operación continua, segura y sostenible de la infraestructura de radioenlaces y del Centro de Operaciones de Red (NOC) durante su vida útil.

A diferencia del CAPEX, el OPEX no incluye adquisiciones de infraestructura nueva, sino costos asociados a:

- Consumo energético,
- Mantenimiento preventivo y correctivo,
- Gestión operativa del NOC,
- Alquiler de espacios,
- Seguridad física de la infraestructura,
- Reposición de componentes menores,
- Seguros y contingencias.

La estimación se realizó bajo un enfoque realista, incorporando costos propios del contexto rural del distrito de Anguía, tales como el alquiler de terrenos para torres y la contratación de apoyo local para seguridad.

Costos energéticos de operación

Consumo eléctrico en sitios con red

En la Tabla 32 se observa, el costo energético anual de 10 nodos con acceso a energía eléctrica convencional.

Para estos sitios se consideró una potencia promedio instalada de 250 W, que incluye:

- Radio(s) PTP,
- Switch (cuando aplica),
- Cámara IP,
- Pérdidas por conversión y respaldo.

Supuestos de cálculo:

- Operación continua: 24 h/día
- Periodo anual: 365 días
- Tarifa promedio: S/ 0.65 por kWh

Cálculo por sitio:

$$0.25 \text{ kW} \times 24 \times 365 = 2\,190 \text{ kWh/año}$$

$$2\,190 \times 0.65 = 1\,423.5 \text{ S/./año}$$

Costo total anual (10 sitios):

$$10 \times 1\,423.5 = 14,235 \text{ S/./}$$

Tabla 32. Costo energético anual – sitios con red

Concepto	Cantidad	Costo unitario anual (S/.)	Subtotal (S/.)
Energía eléctrica nodos con red	10 sitios	1,423.5	14,235

Sistemas fotovoltaicos autónomos

Para los 11 nodos sin acceso a red eléctrica, el diseño incorpora sistemas fotovoltaicos autónomos (Tabla 33). Estos sistemas no generan consumo eléctrico facturable; sin embargo, sí requieren mantenimiento periódico y reposición programada de baterías.

Se adoptó como criterio conservador un costo anual equivalente al 5% del CAPEX del sistema solar por sitio, que cubre:

- Inspección de paneles,
- Limpieza,
- Revisión de controladores,
- Degradación y reposición parcial de baterías.

Costo por sitio:

- CAPEX solar $\approx$ S/ 4,800
- 5% $\approx$ S/ 240 / sitio / año

Costo total anual (11 sitios):

$$11 \times 240 = 2,640 \text{ S/}$$

Tabla 33. Mantenimiento anual de sistemas solares

Concepto	Cantidad	Costo unitario anual (S/.)	Subtotal (S/.)
Mantenimiento sistemas FV	11 sitios	240	2,640

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo tiene como objetivo reducir la probabilidad de fallas, prolongar la vida útil de los equipos y asegurar niveles adecuados de disponibilidad (Tabla 34).

Criterio de frecuencia

- NOC y nodos de distribución: 2 visitas técnicas/año
- Nodos terminales: 1 visita técnica/año

Cada visita incluye:

- Inspección estructural básica de torre/mástil,
- Revisión de alineamiento RF,
- Verificación de sistemas eléctricos y puesta a tierra,
- Limpieza y revisión de equipos,
- Verificación de caseta y seguridad.

Costo promedio por visita: S/ 1,200 (incluye personal técnico, transporte y viáticos)

Tabla 34. Mantenimiento preventivo anual

Tipo de sitio	Cantidad	Visitas/año	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
NOC + nodos de distribución	7	2	1,200	16,800
Nodos terminales	14	1	1,200	16,800
Total mantenimiento preventivo				33,600

Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo cubre la atención de fallas no previstas, reemplazo de componentes dañados y reparación de eventos ocasionados por condiciones climáticas o vandalismo (Tabla 35).

Se adoptó como práctica estándar una reserva anual equivalente al 3% del CAPEX del equipamiento activo, que incluye:

- Radios,
- Switches,
- Cámaras IP.

CAPEX activo aproximado: S/ 147,000

Reserva anual (3%): S/ 4,410

Tabla 35. Reserva para mantenimiento correctivo

Concepto	Monto anual (S/.)
Mantenimiento correctivo	4,410

Operación del Centro de Operaciones de Red (NOC)

La operación del NOC incluye supervisión de la red, monitoreo de enlaces, atención de incidencias y gestión básica de seguridad (Tabla 36).

Personal y servicios

Se consideró un esquema de monitoreo parcial, sin presencia 24/7, adecuado al tamaño del proyecto.

- Costo mensual: S/ 1,200
- Costo anual: S/ 14,400

Consumo energético adicional del NOC

El equipamiento del NOC (servidor, UPS y switch Core) genera un consumo adicional estimado de 150 W.

$$0.15 \times 24 \times 365 \times 0.65 = 854 \text{ S/}.$$

Tabla 36. Operación del NOC

Concepto	Subtotal anual (S/.)
Operación y monitoreo	14,400
Energía adicional NOC	854
Subtotal NOC	15,254

Alquiler de espacios e infraestructura

Alquiler de espacios para torres

Se consideró un pago mensual de S/ 150 por torre, correspondiente al uso del terreno o espacio de emplazamiento (Tabla 37).

- Torres: 21
- Costo anual: S/ 37,800

Alquiler del local del NOC

- Costo mensual: S/ 800
- Costo anual: S/ 9,600

Seguridad física de la infraestructura

Para reducir riesgos de vandalismo y robo, se consideró la coordinación con un poblador cercano a cada torre para labores de vigilancia básica y reporte de incidencias.

- Costo mensual: S/ 200 por torre
- Costo anual: S/ 50,400

Este esquema es habitual en proyectos rurales y contribuye a la sostenibilidad del sistema.

Videovigilancia y reposiciones

Se estimó una reposición anual equivalente al 10% del parque de cámaras IP, considerando desgaste, fallas o vandalismo.

- Cámaras: 21
- Costo unitario: S/ 350
- Costo anual: S/ 735

Seguros y contingencias operativas

Incluye seguros básicos de equipos y una reserva para gastos operativos menores no previstos.

- Costo anual: S/ 5,000

Resumen del OPEX anual

Tabla 37. OPEX anual total del proyecto

Componente	OPEX anual (S/.)
Energía eléctrica (red)	14,235
Mantenimiento sistemas solares	2,640
Mantenimiento preventivo	33,600
Mantenimiento correctivo	4,410
Operación del NOC	15,254
Alquiler de torres	37,800
Seguridad local	50,400
Alquiler NOC	9,600
Videovigilancia	735
Seguros y contingencias	5,000
OPEX ANUAL TOTAL	173,674

Interpretación económica del OPEX

El OPEX anual estimado refleja adecuadamente las condiciones de operación de una red de telecomunicaciones en entorno rural, donde los costos asociados a mantenimiento, seguridad y alquiler de espacios representan una fracción significativa del gasto operativo. No obstante, estos costos son necesarios para garantizar la continuidad del servicio y proteger la inversión realizada, constituyéndose en un componente clave para la sostenibilidad del proyecto.

3.2.5.3. Evaluación económica (VAN y TIR)

A partir de los costos de inversión y operación previamente determinados, se procedió a la evaluación socioeconómica del proyecto, conforme a los lineamientos del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones – Invierte.pe, considerando que la infraestructura de radioenlaces propuesta no genera ingresos monetarios directos, sino beneficios sociales medibles en términos de ahorro de costos y mejora en la provisión de servicios públicos.

Construcción del flujo de caja socioeconómico

Para la evaluación se adoptaron los siguientes parámetros:

- **Inversión inicial (CAPEX):** S/ 628,144, correspondiente a los costos de implementación de la infraestructura, obtenidos mediante el metrado detallado del diseño técnico, que incluye radioenlaces, casetas, sistemas energéticos, el Centro de Operaciones de Red (NOC) y la interconexión por fibra óptica con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica.
- **Costo operativo anual (OPEX):** S/ 173,674, que considera energía, mantenimiento preventivo y correctivo, operación del NOC, alquiler de espacios para torres, seguridad local, videovigilancia y seguros.
- **Beneficio social anual equivalente:** S/ 300,000, estimado a partir de la monetización de ahorros reales generados por la conectividad, tales como la reducción de desplazamientos físicos, el ahorro de tiempo del personal institucional y la disminución de costos operativos asociados a comunicaciones y gestiones presenciales, detalle del cálculo en el Anexo 6.
- **Horizonte de evaluación:** 10 años.

- **Tasa social de descuento:** 8 %, de acuerdo con los criterios establecidos por Invierte.pe.

Con base en estos parámetros, el flujo neto socioeconómico anual se obtuvo como la diferencia entre el beneficio social anual y el costo operativo anual, según la siguiente expresión:

Flujo neto anual = Beneficio social – OPEX

Flujo neto anual = 300,000 - 173,674 = 126,326 ; S/.

De esta manera, el flujo de caja socioeconómico del proyecto quedó definido como se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38. Flujo de caja socioeconómico del proyecto

Año	Flujo (S/.)	Descripción
0	-628,144	Inversión inicial (CAPEX)
1	126,326	Beneficio social – OPEX
2	126,326	Beneficio social – OPEX
3	126,326	Beneficio social – OPEX
4	126,326	Beneficio social – OPEX
5	126,326	Beneficio social – OPEX
6	126,326	Beneficio social – OPEX
7	126,326	Beneficio social – OPEX
8	126,326	Beneficio social – OPEX
9	126,326	Beneficio social – OPEX
10	126,326	Beneficio social – OPEX

Cálculo del Valor Actual Neto (VAN) social

El Valor Actual Neto (VAN) social se calculó descontando los flujos netos anuales a la tasa social de descuento del 8 %, utilizando la expresión:

$$VAN = -CAPEX + \sum_{t=1}^{10} \left(\frac{F_t}{(1 + 0.08)^t} \right)$$

donde (F_t) representa el flujo neto socioeconómico del año (t).

Al aplicar esta expresión, se obtuvo un VAN social positivo, lo que indica que el valor presente de los beneficios sociales generados por el proyecto supera la

inversión inicial requerida. Este resultado evidencia que el proyecto genera valor social neto durante su horizonte de evaluación.

Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) social

La Tasa Interna de Retorno (TIR) social se determinó como la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero, es decir, aquella tasa que satisface la siguiente condición:

$$0 = -CAPEX + \sum_{t=1}^{10} \left(\frac{F_t}{(1 + TIR)^t} \right)$$

El valor obtenido para la TIR social resultó superior al 8 %, que corresponde a la tasa social de descuento establecida por Invierte.pe. Este resultado confirma que el rendimiento socioeconómico del proyecto es mayor al mínimo exigido para proyectos de inversión pública.

Síntesis de resultados y viabilidad económica

Los resultados obtenidos permiten establecer que el proyecto es económicamente viable desde una perspectiva socioeconómica. En efecto, el Valor Actual Neto (VAN) social calculado es positivo, lo que evidencia que los beneficios sociales actualizados generados por el proyecto superan los costos totales de inversión, operación y mantenimiento. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) social obtenida es superior a la tasa social de descuento del 8 %, cumpliendo con los criterios de evaluación establecidos por el sistema Invierte.pe para proyectos de inversión pública.

En consecuencia, el diseño propuesto cumple con los lineamientos técnicos y económicos exigidos para iniciativas orientadas al cierre de brechas de conectividad. De manera global, la Fase 5 permitió determinar la viabilidad económica del diseño de la infraestructura de radioenlaces mediante un análisis detallado del CAPEX, construido a partir del metrado de cada componente del sistema, incluyendo el Centro de Operaciones de Red (NOC) y la interconexión por fibra óptica con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, así como la incorporación de costos reales de operación y mantenimiento (OPEX). Estos resultados constituyen la base cuantitativa para la discusión desarrollada en el Capítulo IV.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de los resultados obtenidos

El presente capítulo desarrolla el análisis integral de los resultados obtenidos mediante la aplicación del procedimiento metodológico estructurado en cinco fases. A diferencia de una simple presentación descriptiva, la discusión se orienta a interpretar el comportamiento sistémico de la red propuesta, integrando variables geométricas, espectrales, operativas y económicas.

El análisis se organiza conforme a los objetivos específicos de la investigación, permitiendo establecer la coherencia entre el diseño estructural adoptado, el rendimiento técnico alcanzado y la sostenibilidad económica del proyecto en un contexto distrital caracterizado por limitada cobertura móvil territorial ($\approx 13.13\%$) y ausencia de infraestructura de acceso de alta capacidad.

4.1.1. Análisis del diseño óptimo de la infraestructura

Determinar el diseño óptimo de la infraestructura, considerando el número y ubicación de torres y repetidores, para establecer una red eficiente en el distrito de Anguía.

El diseño resultante corresponde a una arquitectura jerárquica con tres nodos estratégicos de agregación (Torre 1, Torre 2 y Torre 3), interconectados con nodos intermedios y terminales que atienden directamente a los centros poblados seleccionados bajo el criterio de demanda significativa (>20 hogares).

El análisis topográfico, realizado en altitudes entre 1800 y 3200 m.s.n.m., confirmó que todos los radioenlaces cumplen el criterio conservador de despeje $\geq 0.6 \cdot F1 + 1$ m ($K = 1$), garantizando integridad geométrica del trayecto. Las alturas finales - entre 25 m y 40 m, fueron determinadas mediante iteraciones técnicas que evitaron sobredimensionamiento estructural.

La separación funcional adoptada upper-6 GHz para troncales y 5.8 GHz para acceso, permitió optimizar simultáneamente capacidad y robustez. Bajo esta arquitectura, la red fue dimensionada para soportar una demanda agregada proyectada de 4.37 Gbps en hora ocupada.

Sin embargo, el análisis sistémico reveló que el comportamiento estructural no está gobernado por la dispersión territorial, sino por la concentración progresiva del tráfico hacia el nodo de interconexión con la RDNFO. El tramo RDNFO Anguía → Torre 1 consolida aproximadamente 2.9 Gbps, constituyéndose en el eje crítico del diseño.

Este hallazgo demuestra que en redes rurales jerárquicas la optimización no se logra reduciendo nodos indiscriminadamente, sino distribuyendo adecuadamente los puntos de agregación para evitar saturación en el Core.

4.1.2. Evaluación del rendimiento y confiabilidad

Analizar los parámetros técnicos clave para describir el rendimiento y la confiabilidad de los radioenlaces.

La simulación técnica realizada en LinkPlanner bajo el modelo ITU-R P.530 permitió evaluar throughput efectivo, margen de desvanecimiento, disponibilidad anual y comportamiento bajo un escenario común de interferencia (-87 dBm reescalado por ancho de canal).

Los resultados muestran que la mayoría de los enlaces secundarios presentan márgenes ≥ 10 dB y disponibilidades superiores al 99.99 %, alcanzando en algunos tramos valores cercanos a 99.9995 %. Esto confirma estabilidad operativa bajo condiciones conservadoras. La relación entre capacidad lograda y demanda proyectada se presenta en la Fig. 50.

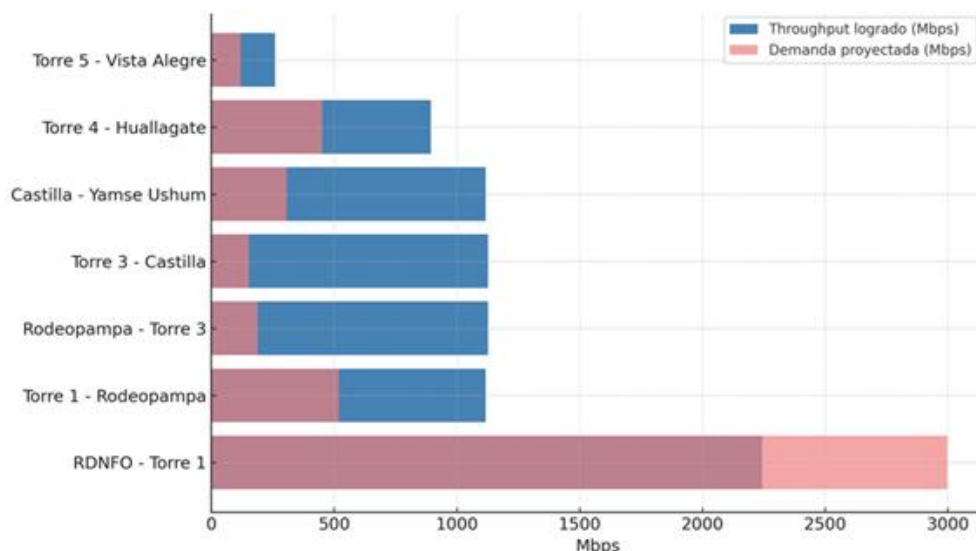


Fig. 50. Comparativo de Throughput logrado vs Demanda proyectada por radioenlace. (Elaboración propia con base en simulación LinkPlanner.)

La Fig. 50 evidencia que el throughput alcanzado supera la demanda proyectada en todos los tramos evaluados, confirmando ausencia de saturación estructural bajo el escenario de crecimiento al 2035. No obstante, se observa que el margen más reducido corresponde al enlace de agregación principal (RDNFO → Torre 1), donde se identifica un déficit aproximado de 295 Mbps en hora ocupada.

Este comportamiento confirma el principio de cuello de botella: el rendimiento agregado está condicionado por el tramo de menor capacidad relativa frente a la demanda consolidada.

La evaluación de disponibilidad anual, presentada en la Fig. 51, complementa este análisis.

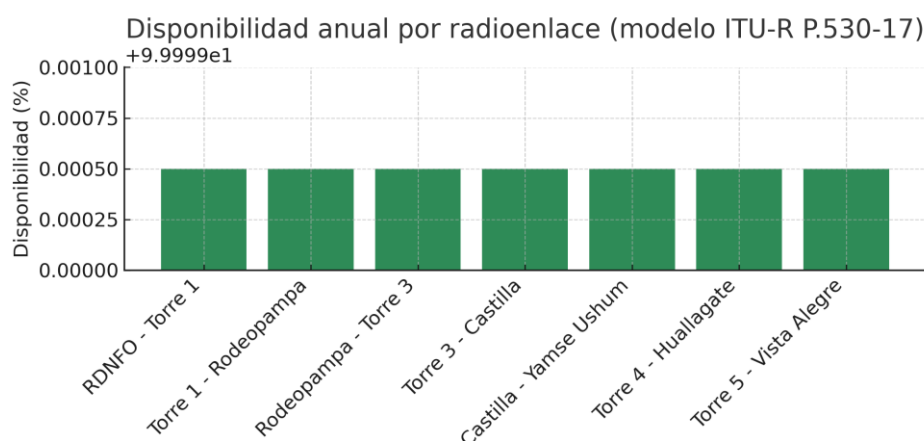


Fig. 51. Disponibilidad anual por radioenlace según modelo ITU-R P.530-19.
(Elaboración propia con base en resultados de simulación.)

La Fig. 51 demuestra que todos los radioenlaces cumplen niveles de disponibilidad compatibles con servicios de banda ancha rural. La estabilidad anual superior al 99.99 % valida que el diseño no solo es capaz en términos de throughput, sino también robusto ante desvanecimientos por lluvia y variaciones atmosféricas.

La evaluación bajo split TDD 75/25 y 80/20 confirmó que la redistribución direccional no incrementa la capacidad total del canal, lo cual explica que el déficit del Core no pueda resolverse mediante ajustes de configuración, sino que requiere escalamiento estructural (segunda portadora o ampliación de ancho de canal).

En consecuencia, el análisis técnico demuestra que el diseño es globalmente viable, condicionado únicamente al refuerzo del tramo de agregación principal.

4.1.3. Evaluación de viabilidad económica

Evaluar la viabilidad económica del diseño mediante el análisis de costos de implementación, operación y mantenimiento.

El análisis financiero determinó un CAPEX total aproximado de S/ 628,144 y un OPEX anual de S/ 173,674. Considerando un beneficio social anual estimado de S/ 300,000, un horizonte de 10 años y una tasa social de descuento del 8 %, el proyecto presenta VAN positivo y TIR superior a la tasa de descuento.

Estos resultados confirman sostenibilidad económica bajo los supuestos adoptados. Sin embargo, la viabilidad financiera está directamente vinculada al desempeño técnico: una degradación en el Core podría afectar la calidad de servicio y, por ende, el beneficio social proyectado.

El análisis demuestra que en contextos rurales altoandinos el CAPEX se concentra principalmente en infraestructura civil y energía autónoma, mientras que la sostenibilidad depende en mayor medida de la gestión de OPEX (seguridad, mantenimiento y energía).

4.2. Discusión de Resultados

4.2.1. Con los Antecedentes

El análisis de los resultados obtenidos en el distrito de Anguía permite contrastar empíricamente los fundamentos teóricos y antecedentes revisados en el Capítulo II, evidenciando convergencias metodológicas, confirmaciones cuantitativas y particularidades propias del contexto altoandino evaluado.

Desde el enfoque internacional, Mayowa [17] sostiene que las soluciones Fixed Wireless Access (FWA) basadas en tecnologías inalámbricas de alta capacidad constituyen una alternativa técnicamente robusta frente al despliegue de fibra óptica en entornos rurales con baja densidad poblacional y terrenos accidentados. En dicha investigación se reportan mejoras significativas en

throughput y reducción de latencia, con despliegues más rápidos y económicamente eficientes que las soluciones cableadas tradicionales.

Los resultados obtenidos en Anguía son coherentes con esta línea argumentativa. La red diseñada alcanza una capacidad agregada proyectada de 4.37 Gbps para el horizonte 2035, con disponibilidades superiores al 99.99 % en la mayoría de los enlaces y márgenes de desvanecimiento compatibles con estándares ITU-R. Estos valores confirman que, aun sin recurrir a infraestructura de fibra hacia cada centro poblado, es posible garantizar niveles de desempeño adecuados para aplicaciones críticas como educación virtual y teleconsultas médicas, tal como plantea Mayowa. Sin embargo, el presente estudio aporta un elemento adicional no siempre explicitado en estudios FWA: el fenómeno de agregación progresiva en el Core. Mientras los antecedentes internacionales se concentran en cobertura y rendimiento por celda o sector, el caso de Anguía demuestra que la variable determinante en redes jerárquicas rurales no es únicamente la cobertura, sino la capacidad de absorción del nodo de interconexión principal.

En relación con Falou y Alouini [18], quienes demuestran que la reutilización de torres existentes combinada con técnicas avanzadas puede multiplicar hasta 25 veces el área cubierta frente a estaciones tradicionales, el diseño adoptado en Anguía confirma la validez del principio de reutilización estratégica de infraestructura. La selección de elevaciones naturales y estructuras existentes permitió minimizar nuevas construcciones y reducir el CAPEX sin comprometer el despeje de Fresnel ($\geq 0.6 \cdot F1 + 1 \text{ m}$). No obstante, a diferencia del enfoque basado en Massive MIMO propuesto por dichos autores, el presente estudio opta por radioenlaces punto a punto de alta capacidad, priorizando estabilidad y previsibilidad de disponibilidad anual. Esto revela una diferencia contextual: mientras el estudio etíope enfatiza maximización de cobertura mediante técnicas multiusuario, el caso de Anguía privilegia control de disponibilidad y confiabilidad bajo condiciones topográficas severas.

En el ámbito nacional, el contraste con Terán [19] resulta particularmente relevante. En La Hualla se reportan márgenes de desvanecimiento superiores a 20 dB e incluso 40 dB en enlaces estratégicos, con disponibilidades mayores al

99.99 % y capacidad agregada cercana a 2.2 Gbps. En Anguía, los márgenes observados en enlaces secundarios superan los 10 dB —valor técnicamente suficiente para cumplir objetivos de disponibilidad rural— y la capacidad agregada prácticamente duplica la reportada en dicho antecedente. Esta diferencia se explica por el mayor ancho de canal adoptado en troncales upper-6 GHz y por la proyección de demanda más elevada (4.37 Gbps distrital). Sin embargo, ambos estudios convergen en un punto esencial: la validación técnica mediante simulación basada en ITU-R P.530 permite alcanzar disponibilidades ≥ 99.99 % sin necesidad de sobredimensionamientos estructurales extremos.

El estudio de Quillas, Gálvez y Sandoval [20] enfatiza la importancia de garantizar línea de vista y evaluar condiciones climáticas en zonas altoandinas. Los resultados del presente trabajo confirman esa premisa. Todos los enlaces cumplen criterio geométrico conservador, y la modelación bajo ITU-R P.530, P.838 y P.676 demostró estabilidad anual aún bajo escenario común de interferencia (−87 dBm reescalado). En este sentido, la investigación no solo replica el enfoque metodológico nacional, sino que lo amplía al incorporar análisis de agregación y evaluación económica integrada.

En el ámbito local, la comparación con Barboza [44] es especialmente significativa. Dicho estudio demuestra que la banda de 6 GHz permite mayores capacidades (hasta 1280 Mbps en troncales) mientras que 5.8 GHz ofrece mayor robustez en enlaces cortos. El diseño de Anguía adopta precisamente un esquema híbrido funcional: upper-6 GHz en troncales de agregación y 5.8 GHz en enlaces secundarios. Los resultados confirman la coherencia técnica de esa decisión, ya que los tramos de acceso mantienen holgura suficiente y el rendimiento global supera la demanda proyectada. La diferencia crítica radica en que, aun utilizando banda de mayor capacidad, el enlace RDNFO → Torre 1 presenta un déficit aproximado de 295 Mbps debido a la concentración progresiva del tráfico. Este hallazgo complementa el antecedente local al evidenciar que la elección de banda, aunque determinante, no elimina el efecto estructural de agregación en el Core.

El estudio de Pichilingüe [22], quien demostró la viabilidad técnica y económica de redes de banda ancha basadas en radioenlaces microondas en zonas rurales de Cajamarca. Al igual que dicho antecedente, la presente investigación presenta indicadores económicos positivos, con un CAPEX estimado de S/ 628,144 y un OPEX anual de S/ 173,674; asimismo, el proyecto evidencia un VAN positivo y una TIR superior al 8 % bajo un horizonte de evaluación de 10 años. Estos resultados respaldan la pertinencia de los radioenlaces como estrategia para promover la inclusión digital en territorios de baja densidad poblacional.

4.2.2. Con las bases teóricas

Desde el punto de vista estrictamente teórico, los resultados también se alinean con los fundamentos de Shannon-Hartley. El incremento del ancho de canal permitió elevar la capacidad C conforme a la relación $C = B \log_2(1 + S/N)$. Sin embargo, el estudio demuestra empíricamente el compromiso entre eficiencia espectral y confiabilidad: modulaciones extremadamente altas (como 4096QAM) reducen el margen de desvanecimiento en enlaces largos, afectando disponibilidad. Esta observación confirma el principio teórico de que la maximización de eficiencia espectral ($\eta = C/B$) no puede desligarse de la estabilidad del enlace bajo variabilidad atmosférica.

Asimismo, el cumplimiento del presupuesto de enlace y los márgenes observados validan la aplicación práctica del modelo de pérdida por espacio libre (FSPL) y del cálculo de Fade Margin como predictor de disponibilidad. La coherencia entre los valores simulados y las metas de disponibilidad anual confirma que la metodología adoptada mantiene consistencia entre teoría electromagnética y modelado aplicado.

Finalmente, en el plano económico, la evaluación mediante VAN y TIR se alinea con la teoría del valor temporal del dinero. El VAN positivo y la TIR superior al 8 % confirman que el diseño no solo es técnicamente viable, sino socialmente rentable. Este resultado coincide con antecedentes nacionales como Terán [19], pero aporta una escala de inversión diferente ($\text{CAPEX} \approx \text{S/ } 628,144$),

demostrando que incluso en distritos con cobertura móvil territorial limitada ($\approx 13.13\%$), un dimensionamiento técnico adecuado puede traducirse en sostenibilidad financiera.

En síntesis, el contraste con los antecedentes teóricos e investigaciones previas permite afirmar que los resultados obtenidos en Anguía no solo confirman la literatura existente sobre radioenlaces rurales, sino que introducen un aporte específico: la identificación cuantificada del efecto de agregación en el Core como variable crítica en redes jerárquicas rurales de alta dispersión territorial. Este hallazgo amplía el marco de análisis tradicional, desplazando el foco desde la mera cobertura o disponibilidad individual hacia el dimensionamiento estructural del nodo de interconexión principal.

4.3. Matriz de resultados obtenidos en las Fases Metodológicas

La presente matriz de la Tabla 40 permite articular los resultados obtenidos en las distintas fases del Capítulo III con el análisis y discusión desarrollados en el Capítulo IV. Dado el carácter descriptivo y no experimental de la investigación, las hipótesis cumplen un rol referencial, orientando la interpretación de los resultados sin establecer relaciones de causalidad.

Tabla 39. Matriz de resultados obtenidos en las Fases Metodológicas

Pregunta de investigación	Objetivo	Hipótesis (referencial)	Fase del Cap. III donde se obtuvieron los resultados
General: ¿Cómo diseñar la infraestructura de una red de radioenlaces para interconectar los centros poblados del distrito de Anguía con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, optimizando el rendimiento, la confiabilidad y la viabilidad económica del sistema?	General: Diseñar la infraestructura de radioenlaces necesaria para optimizar el rendimiento y la confiabilidad del servicio de conectividad en los centros poblados del distrito de Anguía, considerando su viabilidad técnica y económica.	El diseño de una infraestructura de radioenlaces técnicamente optimizada permitiría describir un sistema con adecuados niveles de rendimiento, confiabilidad y viabilidad económica para la interconexión del distrito de Anguía con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica.	Fase 2: Diseño preliminar de la red Optimización de torres y zona de Fresnel Fase 3: Simulación y validación técnica (ITU-R P.530-17) Interferencia y MCS
Específica 1: ¿Cómo optimizar el diseño de la infraestructura de radioenlaces para minimizar el número de torres y repetidores necesarios?	OE1: Determinar el diseño óptimo de la infraestructura, considerando el número y ubicación de torres y repetidores, para establecer una red eficiente en el distrito de Anguía.	La optimización topográfica y geométrica del diseño permitiría describir una infraestructura con menor número de torres, manteniendo los criterios de línea de vista y despeje de Fresnel.	Fase 2: Diseño preliminar de la red Optimización de torres y zona de Fresnel
Específica 2: ¿Qué modulaciones y parámetros técnicos garantizan el rendimiento y la confiabilidad de los radioenlaces bajo las condiciones geográficas y climáticas de Anguía?	OE2: Analizar los parámetros técnicos clave para describir el rendimiento y la confiabilidad de los radioenlaces.	La selección adecuada de modulaciones y parámetros técnicos permitiría caracterizar radioenlaces con elevados niveles de rendimiento y confiabilidad bajo las condiciones geográficas del distrito de Anguía.	Fase 3: Simulación y validación técnica (ITU-R P.530-17) Interferencia y MCS
Específica 3: ¿Cómo un análisis detallado de costos contribuye a evaluar la viabilidad económica del diseño de la red de radioenlaces?	OE3: Evaluar la viabilidad económica del diseño de la infraestructura de radioenlaces mediante el análisis de costos de implementación, operación y mantenimiento.	El análisis detallado de los costos de inversión y operación permitiría describir la viabilidad económica del diseño de la infraestructura de radioenlaces para el distrito de Anguía.	Fase 5: Evaluación económica CAPEX - OPEX Viabilidad preliminar

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Conclusión respecto al Objetivo Específico 1

Se determinó que la configuración óptima del sistema está compuesta por seis torres estratégicamente ubicadas, lo que representó una reducción aproximada del 25 % en infraestructura respecto a un escenario preliminar con mayor número de emplazamientos.

El análisis topográfico y geométrico confirmó que todos los enlaces cumplen condición de línea de vista y despeje $\geq 0.6 \cdot F1 + 1$ m en la primera zona de Fresnel, garantizando estabilidad electromagnética del trayecto. Esta optimización estructural permitió minimizar nuevas construcciones, reducir costos de implementación y mantener coherencia con la realidad geográfica altoandina del distrito.

Se concluye que el diseño óptimo no se fundamentó en la simple reducción de torres, sino en la distribución adecuada de nodos de agregación para equilibrar cobertura territorial y concentración de tráfico.

Conclusión respecto al Objetivo Específico 2

El análisis técnico evidenció que los radioenlaces operan predominantemente con esquemas de modulación entre MCS8 y MCS11 (256-QAM y 1024-QAM), alcanzando throughputs efectivos comprendidos entre 259 Mbps y 2244 Mbps según el tramo evaluado, valores superiores a las demandas individuales proyectadas para los centros poblados.

Los márgenes de desvanecimiento obtenidos oscilaron entre 13 dB y 24 dB, asegurando estabilidad ante variaciones atmosféricas y condiciones de lluvia modeladas conforme a ITU-R. La disponibilidad anual del sistema se situó en el rango 99.9 % – 99.9995 %, cumpliendo estándares de confiabilidad para redes rurales de acceso y transporte.

Asimismo, se comprobó que la redistribución del split TDD (75/25 y 80/20) no incrementa la capacidad total del canal, manteniéndose la capacidad agregada proyectada en 4.37 Gbps. Se identificó que el tramo de interconexión RDNFO → Torre 1 concentra aproximadamente 2.9 Gbps en hora ocupada, registrando un déficit cercano a 295 Mbps, lo que confirma que el rendimiento agregado está condicionado por el tramo de mayor concentración de tráfico y no por ajustes de configuración direccional.

Se concluye que la combinación de bandas 5.8 GHz para acceso y upper-6 GHz para troncales, junto con antenas de alta ganancia y modulación adaptativa (ACM), permitió alcanzar un equilibrio técnicamente consistente entre eficiencia espectral y robustez operativa. La red fue dimensionada para soportar una demanda agregada de 4.37 Gbps, con disponibilidades superiores al 99.99 % y márgenes de desvanecimiento ≥ 10 dB en la mayoría de los enlaces, lo que evidencia estabilidad frente a variaciones atmosféricas. Asimismo, el uso de ACM optimizó dinámicamente la eficiencia espectral sin comprometer la continuidad del servicio, asegurando desempeño estable incluso bajo escenarios conservadores de interferencia (-87 dBm reescalado).

Conclusión respecto al Objetivo Específico 3

La evaluación económica determinó que la inversión inicial (CAPEX = S/ 628,144) incluye equipamiento activo, infraestructura pasiva, sistemas energéticos, NOC e interconexión mediante 2 km de fibra ADSS hacia la RDNFO. El OPEX anual estimado de S/ 173,674 contempla energía, mantenimiento, operación, seguridad y alquiler de emplazamientos.

Bajo un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa social de descuento del 8%, el flujo neto anual proyectado de S/ 126,326 genera un Valor Actual Neto (VAN) social positivo de S/ 219,493 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 15%, superando en 7.2 puntos porcentuales la tasa mínima exigida y representando una rentabilidad aproximadamente 90% mayor que el estándar establecido. Estos resultados demuestran que el proyecto no solo recupera la inversión inicial de S/ 628,144, sino que además produce un excedente social neto significativo en términos de valor presente, garantizando rentabilidad social sostenida

durante todo el periodo de evaluación y confirmando su viabilidad económica desde una perspectiva pública, en coherencia con los criterios de inversión en infraestructura digital rural.

Se concluye que la sostenibilidad financiera del sistema depende no solo del nivel de inversión inicial, sino del mantenimiento de estándares técnicos adecuados en el enlace de agregación principal, dado que una degradación del Core podría impactar el beneficio social proyectado.

5.2. Recomendaciones

Validación estructural y cumplimiento normativo

Antes de la ejecución, se debe verificar en campo el despeje $\geq 0.6 \cdot F1 + 1$ m y asegurar que la infraestructura cumpla con TIA-222-H y recomendaciones UIT-R, incluyendo adecuada puesta a tierra y protección eléctrica.

Monitoreo y gestión operativa

Se recomienda implementar monitoreo remoto continuo de parámetros críticos (RSSI, SNR, MCS y disponibilidad), así como evaluaciones periódicas de interferencia para preservar estabilidad técnica del sistema.

Seguimiento económico y sostenibilidad

Se sugiere actualizar anualmente el análisis económico considerando demanda real y costos efectivos, garantizando que el VAN social se mantenga positivo y la TIR supere la tasa social de descuento.

Bibliografía

- [1] F. Huillca, «Checa tu señal», OSIPTEL. Accedido: 1 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://checatusenal.osiptel.gob.pe/>
- [2] Proinversión, «Anexo 6. Versión final del contrato de financiamiento del proyecto regional Cajamarca - RDNFO». 2016.
- [3] Fitel, «Especificaciones técnicas de la Red de Acceso. Anexo 8-B». 2015.
- [4] ITU-R., «Recommendation ITU-R P.530-19: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.» 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-19-202509-I%21%21PDF-E.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [5] MTC, «Red dorsal Nacional de Fibra Óptica», Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Accedido: 12 de septiembre de 2020. [En línea]. Disponible en: https://portal.mtc.gob.pe/logros_red_dorsal.html
- [6] INEI, «Estadísticas de las tecnologías de información y comunicación.», Encuesta Nacional de Hogares ENAHO. Accedido: 9 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/03-informe-tecnico-tics-ii-trimestre-2023.pdf>
- [7] GRC, «Gobierno Regional Cajamarca, Diagnóstico Territorial del Departamento de Cajamarca.» 2014. Accedido: 4 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/20141128_Diagnostico_Territorial_Cajamarca_V1.pdf
- [8] GRC, «77% de la población en la región Cajamarca no tiene acceso a Internet | Gobierno Regional Cajamarca». Accedido: 20 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://portal.regioncajamarca.gob.pe/noticias/77-de-la-poblacion-en-la-region-cajamarca-no-tiene-acceso-internet>
- [9] C. E. para A. L. y el Caribe, «Brecha digital podría ampliarse en América Latina». Accedido: 4 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/comunicados/brecha-digital-podria-ampliarse-america-latina>

- [10] G. Pascual, I. Elvía, y A. Reinaldo, «Broadband, crisis and GDP growth in Latin American countries in the 2005 2015 period», en *2017 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, jun. 2017, pp. 1-5. doi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7976041>.
- [11] L. Camacho, *Redes Inalámbricas para Zonas Rurales*. 2011.
- [12] D. Espinoza y D. Reed, «Wireless technologies and policies for connecting rural areas in emerging countries: a case study in rural Peru», *Digital Policy, Regulation and Governance*, vol. 20, n.º 5, pp. 479-511, oct. 2018, doi: <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/abs/pii/S239850381800019X>.
- [13] Gobierno Regional de Cajamarca, «Se beneficiarán más de 374 mil habitantes con proyecto de acceso a Internet». Accedido: 13 de septiembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/regioncajamarca/noticias/301526-se-beneficiaran-mas-de-374-mil-habitantes-con-proyecto-de-acceso-a-internet>
- [14] J. Witte y S. Mannon, *The Internet and Social Inequalities*. Routledge., 2010.
- [15] D. A. Gómez Navarro, R. A. Alvarado López, M. Martínez Domínguez, y C. Díaz de León Castañeda, «La brecha digital: una revisión conceptual y aportaciones metodológicas para su estudio de México», *Entreciencias*, vol. 6, n.º 16, mar. 2018, doi: 10.22201/enesl.20078064e.2018.16.62611.
- [16] INEI, «Estadísticas de Tecnologías de Información y Comunicación en los Hogares 2023.» 2024.
- [17] A. Mayowa, «Fixed Wireless and 5G in Rural Settings». 2025. [En línea]. Disponible en: www.researchgate.net/publication/392572242_Fixed_Wireless_and_5G_in_Rural_Settings
- [18] A. E. Falou y M.-S. Alouini, «Enhancement of Rural Connectivity by Recycling TV Towers with Massive MIMO Techniques», *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, n.º 4, pp. 78-83, abr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.003.2200257>

- [19] S. Terán y C. Koo, «Diseño de una red de telecomunicaciones para el distrito la Hualla, Ayacucho 2024», Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, 2025.
- [20] A. A. Quillas Cupe, J. V. Gálvez Quiñones, y J. F. Sandoval López, «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», 2020, Accedido: 15 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/6316>
- [21] E. Díaz y C. Koo, «Evaluación comparativa de redes de backhaul de 5.8 GHz y 6 GHz en zonas rurales de Cajamarca 2024», Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, 2025.
- [22] M. Sáenz Pichilingue, F. N. Navarro Asencios, M. Sáenz Pichilingue, y F. N. Navarro Asencios, «Solución para acceso a internet de banda ancha para la provincia de San Ignacio – Región Cajamarca», *Repositorio Institucional - URP*, 2022, Accedido: 8 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/5028>
- [23] ITU-R, «Recommendation ITU-R P.676-13: Attenuation by atmospheric gases and related effects»,. Amendments., 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-13-202208-1%21%21PDF-E.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [24] ITU-R, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.838-3: Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción». 2007.
- [25] ITU-R., «Effects of interference on terrestrial fixed service systems. Recommendation ITU-R F.758-8». Geneva, Switzerland., 2025.
- [26] P. Oppenheimer, *Top-Down Network Design, Third Edition*. 2019. Accedido: 5 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.oreilly.com/library/view/top-down-network-design/9781587140051/?utm_source=chatgpt.com
- [27] Cisco Systems, «Cisco Lifecycle Services Approach.» Cisco White Paper., 2005.

- [28] J. F. Monks, «Evaluación financiera de proyectos de inversión en telecomunicaciones.», *Revista Peruana de Ingeniería Económica*, 2019.
- [29] J. Santiago y L. Esteban Villamizar, «GESTIÓN DE PROYECTOS EN TELECOMUNICACIONES 2012-2013», *Revista FACE*, vol. 9, pp. 1-6, dic. 2013.
- [30] INEI, «Consultar datos en el Sistema de Información Distrital del INEI». Accedido: 18 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/27392-consultar-datos-en-el-sistema-de-informacion-distrital-del-inei>
- [31] INEI, «Sistema de Información Geográfica. Sistema de Consulta de Centros Poblados.» [En línea]. Disponible en: <http://sige.inei.gob.pe/test/atlas/>
- [32] INEI, «INEI, Mapa de Pobreza Monetaria 2023.» 2024.
- [33] MINEDU, «MINEDU, Estadísticas de la Educación Básica Regular 2023». 2023.
- [34] INEI, «Estimaciones y proyecciones de población 2018–2050: metodología y supuestos.» 2019.
- [35] BCRP, «Informe Económico y Social – Región Cajamarca, Banco Central de Reserva del Perú.» 2023.
- [36] CEPAL, «La ruralidad en América Latina: persistencias y cambios en un mundo globalizado, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.», Santiago, 2022.
- [37] ITU, «The economic impact of broadband, digitization and ICT regulation,.», Geneva, 2021.
- [38] ITU, «ITU, Quality of Service Regulation Manual.», Geneva, 2020.
- [39] World Bank, «World Bank, World Development Report 2021: Data for Better Lives.», Washington, DC, 2021.
- [40] ITU, «Measuring Digital Development: Facts and Figures 2022.», Geneva, 2022.
- [41] INEI, «Directorio Nacional de Centros Poblados». Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en:

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm

- [42] Geo Perú, «Plataforma Nacional de Datos Georeferenciados». Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://visor.geoperu.gob.pe/>
- [43] Redes Andinad de Comunicaciones, «Diagrama Unifilar “Proyecto de Banda Ancha para la Conectividad Integral y Desarrollo Social de la Región Cajamarca”».» Quanta Services Perú, Lima, 2019.
- [44] E. Barboza y C. Koo, «Evaluación comparativa de redes de backhaul de 5.8 ghz y 6 ghz en zonas rurales de ajamarca 2024», Universidad Nacional de Cajamarca., Cajamarca, 2025.
- [45] Ministerio de Economía y Finanzas (MEF), «Invierte.pe – Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones.» 2024. [En línea]. Disponible en: [//www.gob.pe/inviertepe](http://www.gob.pe/inviertepe). Accedido: feb. 2026.

Anexos

Anexo 1: Comparación técnica y Evaluación de simuladores de radioenlaces

Tabla 40. Comparación técnica de los simuladores de radioenlaces

Criterio	Radio Mobile	Pathloss	Ubiquiti Planner	LinkPlanner
Modelo de terreno (DEM/SRTM)	Sí	Sí	Sí	Sí
Presupuesto de enlace detallado	Básico	Avanzado	Intermedio	Avanzado
Modelos ITU-R P.530	Parcial	Sí	Limitado	Sí
Cálculo de disponibilidad anual	Limitado	Sí	No completo	Sí
Modelado de lluvia (P.838)	No detallado	Sí	No	Sí
Evaluación de interferencia	Básica	Avanzada	Básica	Avanzada
Integración con equipos reales	Genérica	Genérica	Solo Ubiquiti	Equipos Cambium
Optimización automática	No	Parcial	Sí (limitada)	Sí (avanzada)
Uso académico	Alto	Medio	Medio	Alto
Uso profesional operador	Medio	Alto	Medio	Alto

Tabla 41. Evaluación de los simuladores de radioenlaces

Criterio	Peso	Radio Mobile	Pathloss	Ubiquiti Planner	LinkPlanner
Implementación ITU-R P.530	0.15	3	5	2	5
Modelado de lluvia (ITU-R P.838)	0.10	2	5	1	5
Cálculo de disponibilidad anual	0.15	2	5	2	5
Presupuesto de enlace detallado	0.10	2	5	3	5
Evaluación de interferencia	0.10	2	5	2	4
Integración con equipos reales	0.10	3	3	4	5
Optimización automática del enlace	0.10	1	3	3	4
Aplicabilidad profesional en operadores	0.10	3	5	3	4
Facilidad de validación técnica	0.10	3	4	3	5

Anexo 2: Ecuaciones Radio de la 1.^a zona de Fresnel

$$r_1(x) = \sqrt{\frac{\lambda x (D-x)}{D}} \dots (3)$$

donde D es la longitud total del enlace (m), x la distancia desde el sitio A (m), y $\lambda = \frac{c}{f}$ es la longitud de onda (m), con $c \approx 3 \times 10^8$ m/s y f la frecuencia (Hz).

1. Forma práctica en km/GHz

$$r_1(x) [\text{m}] = 17,32 \sqrt{\frac{d_1 [\text{km}] d_2 [\text{km}]}{f [\text{GHz}] D [\text{km}]}} \dots (4)$$

con $d_1 = x$ y $d_2 = D - x$.

2. En el punto medio ($x = D/2$)

$$r_{1,\text{mid}} [\text{m}] \approx 8,66 \sqrt{\frac{D [\text{km}]}{f [\text{GHz}]}} \dots (5)$$

3. Curvatura terrestre efectiva (abombamiento)

$$b(x) = \frac{x(D-x)}{2 R_{\text{eff}}}, R_{\text{eff}} = K R_{\oplus} \dots (6)$$

donde $R_{\oplus} \approx 6,370$ km y $K = 1$ para la verificación conservadora.

4. Altura del rayo directo (interpolación lineal)

$$h_{\text{ray}}(x) = h_A + \frac{h_B - h_A}{D} x \dots (7)$$

con h_A y h_B las cotas (msnm) de los centros de antena en los sitios A y B.

5. Función de despeje (criterio adoptado)

$$C(x) = h_{\text{ray}}(x) - [h_{\text{ter}}(x) + h_{\text{veg}}(x) + b(x)] - 0,6 r_1(x) \dots (8)$$

6. Condición de diseño

$$\min_{x \in [0, D]} C(x) \geq m, \text{ con } m = 1 \text{ m} \dots (9)$$

Es decir, el despeje por encima de $0,6 r_1$ debe conservar ≥ 1 m de margen en el punto más crítico del trayecto.

Notas de implementación.

- $h_{\text{ter}}(x)$ es el perfil de terreno; $h_{\text{veg}}(x)$ representa arbolado/edificaciones (si aplica).
- Ajustar terreno + vegetación con $b(x)$ (o, de forma equivalente, restar $b(x)$ al rayo).
- El análisis y los ajustes de altura de la tabla se han verificado con $K = 1$; por lo tanto, con $K \approx 1,33$ el despeje es más holgado.

Anexo 3: Data Sheets de Equipos: Radios y Antenas

DataSheets ePMP 400C



ePMP Force 400 Series

Spectrum (Force 400C/Force 425)	
Channel Width MHz	20 40 80
Proprietary Physical Layer	802.11ax, 2x2 MIMO/OFDM
Channel Spacing	Configurable in 5 MHz increments
Frequency Range	Wide-band operation 4910–6135 MHz (Note: Country-dependent based on local regulations. Support of 5870 to 6135 MHz coming in a future software upgrade.)
MAC Layer (Media Access Control)	Cambium Proprietary
Ethernet Interface	100/1000 BaseT, compatible with Cambium PoE & Standard PoE pinouts; SFP/SFP+
Protocols Used	IPv4/IPv6 (dual management stack), UDP, TCP, ICMP, SNMPv2c, NTP, STP, IGMP, SSH
Network Management	IPv4/IPv6, HTTPs, SNMPv2c, SSH, Cambium Networks' cnMaestro
VLAN	802.1Q with 802.1p priority

Performance (Force 400C/Force 425)	
ARQ	Yes
Maximum Capacity	1 Gbps
Latency	<5 ms
Nominal Receive Sensitivity (w/FEC) @20 MHz Channel	MCS 0 = -93 dBm to MCS 11 (1024 QAM-5/6) = -63 dBm (per chain)
Nominal Receive Sensitivity (w/FEC) @40 MHz Channel	MCS 0 = -90 dBm to MCS 11 (1024 QAM-5/6) = -60 dBm (per chain)
Nominal Receive Sensitivity (w/FEC) @80 MHz Channel	MCS 0 = -87 dBm to MCS 11 (1024 QAM-5/6) = -57 dBm (per chain)
Modulation Levels (Adaptive)	MCS 0 (BPSK) to MCS 11 (1024 QAM-5/6)
Transmit Power Range	+3 to +28 dBm (combined, to regional EIRP limit) (1 dB interval)
Maximum Distance	In PTP application deployments, the maximum distance supported is 32 km (19.9 mi)

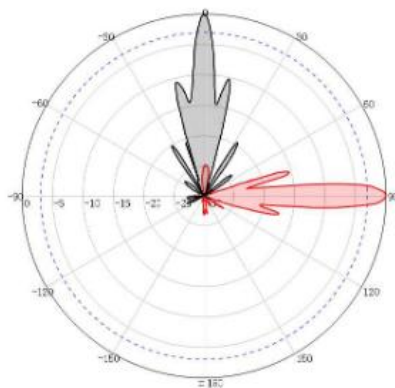


ePMP™ 4600 Series Access Point

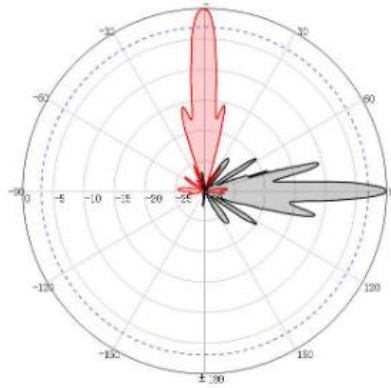
Spectrum and Interface		
	ePMP 4600	ePMP 4600L
Channel Width	20 40 80 160 MHz	20 40 80 160 MHz
Proprietary Physical Layer	4x4 MU-MIMO/OFDMA	2x2 MIMO/OFDMA
Channel Spacing	Configurable in 5 MHz increments	Configurable in 5 MHz increments
Frequency Range Note: Allowable frequencies and bands are dictated by individual country regulations.	Wide Band Operation 5725–7125 MHz ¹	Wide Band Operation 5725–7125 MHz ¹
1) Performance of radio from 5725–5925 MHz is TBD		
MAC Layer (Media Access Control)	Cambium Proprietary	Cambium Proprietary
Ethernet Interfaced	100/1000 BaseT, rate auto negotiated, 802.3at compliant & Aux SFP+ port	100/1000 BaseT, rate auto negotiated, 802.3at compliant & Aux SFP+ port
Supported Powering Methods	56V 30W PoE (included), standard 802.3at PoE Supply, or cnMatrix Tower Switch	56V 30W PoE (included), standard 802.3at PoE Supply, or cnMatrix Tower Switch
Protocols Used	IPv4/IPv6, UDP, TCP, IP, ICMP, SNMPv2c, HTTPs, STP, SSH, IGMP Snooping	IPv4/IPv6, UDP, TCP, IP, ICMP, SNMPv2c, HTTPs, STP, SSH, IGMP Snooping
Network Management	HTTP/HTTPS, SNMPv2c, SNMPv3, SSH 802.1Q	HTTP/HTTPS, SNMPv2c, SNMPv3, SSH
VLAN	802.1Q with 802.1p priority	802.1Q with 802.1p priority
Performance		
	ePMP 4600	ePMP 4600L
Subscribers per Sector	Up to 120	Up to 120
ARQ	Yes	Yes
Nominal Receive Sensitivity (w/FEC) @20 MHz Channel	MCS 0 = -92 dBm to MCS 13 (4096 QAM-5/6) = -54 dBm (per chain)	MCS 0 = -92 dBm to MCS 13 (4096 QAM-5/6) = -53 dBm (per chain)
Nominal Receive Sensitivity (w/FEC) @40 MHz Channel	MCS 0 = -89 dBm to MCS 13 (4096 QAM-5/6) = -50 dBm (per chain)	MCS 0 = -89 dBm to MCS 13 (4096 QAM-5/6) = -50 dBm (per chain)
Nominal Receive Sensitivity (w/FEC) @80 MHz Channel	MCS 0 = -86 dBm to MCS 13 (4096 QAM-5/6) = -46 dBm (per chain)	MCS 0 = -86 dBm to MCS 13 (4096 QAM-5/6) = -47 dBm (per chain)
Nominal Receive Sensitivity (w/FEC) @160 MHz Channel	MCS 0 = -83 dBm to MCS 13 (4096 QAM-5/6) = -43 dBm (per chain)	MCS 0 = -83 dBm to MCS 13 (4096 QAM-5/6) = -44 dBm (per chain)
Modulation Levels (Adaptive)	MCS 0 (BPSK) to MCS 13 (4096 QAM-5/6)	MCS 0 (BPSK) to MCS 13 (4096 QAM-5/6)
GPS Synchronization	Yes, via Internal GPS or Cambium Sync	Yes, via Internal GPS or Cambium Sync
QoS (Quality of Service)	Three level priority (Voice, High, Low) with packet classification by DSCP, COS, VLAN ID, IP & MAC Address, Broadcast, Multicast and Station Priority, MIR/CIR support	Three level priority (Voice, High, Low) with packet classification by DSCP, COS, VLAN ID, IP & MAC Address, Broadcast, Multicast and Station Priority, MIR/CIR support

4900-6500MHz 25dBi Dual-Polarity & X-Polarized Dish Antenna

Model	SD6G25M2
Electrical Specifications	
Frequency Range (MHz)	4900-6500MHz
Polarization	Adjustable - Dual Polarized (Vertical and Horizontal) or X-Polarized (+45° and -45°)
Gain	25dBi
VSWR	≤ 2.0
Horizontal Beamwidth	7.5°
Vertical Beamwidth	7.5°
F/B Ratio	≥32dB
Isolation	≥28dB
Nominal Impedance	50Ω
Maximum Power	100W
Lightning protection	DC Ground
Mechanical Specifications	
Connector	2xN-Female
Mounting Mast size	Φ30-55mm
Dimensions	Φ40cm
Weight	2.5kg
Max. Wind Velocity	210km/h
Operating Temperature	-40~+60℃



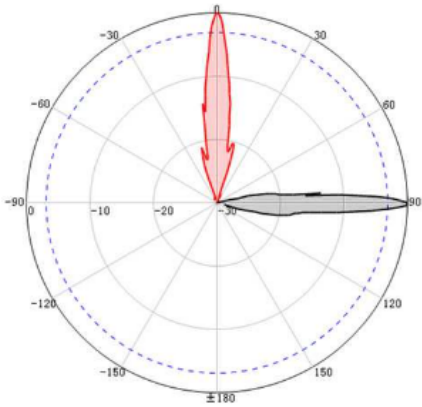
H-Pol



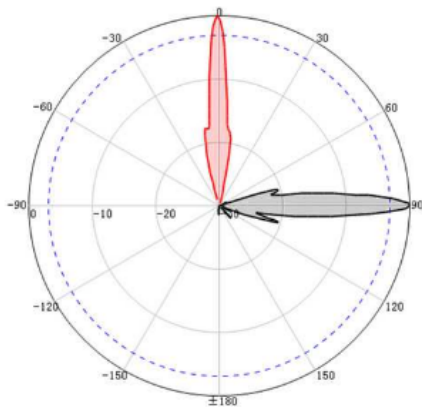
V-Pol

4900-6500MHz 30dBi Dual-Polarity & X-Polarized Dish Antenna

Model	SD6G30M2-PRO
Electrical Specifications	
Frequency Range	4900-6500MHz
Polarization	Adjustable - Dual Polarized (Vertical and Horizontal) or X-Polarized (+45° and -45°)
Gain	30 ± 0.5 dBi
VSWR	≤2.0
Horizontal Beamwidth	6°
Vertical Beamwidth	5°
F/B Ratio	≥32dB
Isolation	≥28dB
Nominal Impedance	50Ω
Maximum Power	100W
Lightning protection	DC Ground
Mechanical Specifications	
Connector	2 x N-Female
Mounting Mast size	Φ40-70mm
Dimensions	Φ60cm
Weight	6.5 KG
Max. Wind Velocity	210km/h
Operating Temperature	-40~+60℃



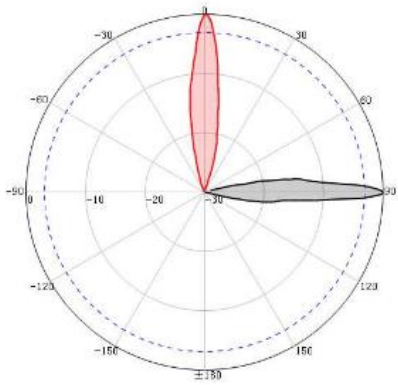
H-Pol



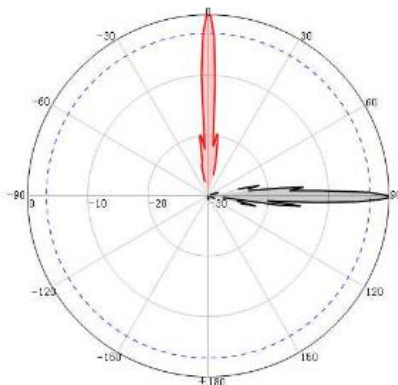
V-Pol

4900-6500MHz 34dBi Dual Polarity & X-Polarized Dish Antenna

Model	SD6G34M2-PRO
Electrical Specifications	
Frequency Range	4900-6500MHz
Polarization	Adjustable---Dual Polarized (H+V) or X-Polarized (+45° and -45°)
Gain	34 ± 1dBi
VSWR	≤2.0
Horizontal Beamwidth	4°
Vertical Beamwidth	3°
F/B Ratio	≥32dB
Isolation	≥28db
Nominal Impedance	50Ω
Maximum Power	100W
Lightning protection	DC Ground
Mechanical Specifications	
Connector	2xN-Female
Mounting Mast size	Φ40-70mm
Dimensions	Φ 90cm
Weight	9.9 KG
Max. Wind Velocity	210km/h
Operating Temperature	-40~+60℃



H-Pol



V-Pol

Antenas ALG DISH ANTENNA/PARÁBOLA ABIERTA 30.2, 33.6, 35.7 dBi

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS ELECTRICAL SPECIFICATIONS/CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

PA-5800-XX-XX-DP	29-06	32-09	35-12
Frequência de operação <i>Frequency range/Rango de frecuencia</i>	4.9 – 6.25 GHz*		
Diâmetro <i>Diameter/Diámetro</i>	0.6 m 2ft	0.9 m 3ft	1.2 m 4ft
Ganho Banda Alta <i>Gain High Band/Ganancia banda alta</i>	30.2 dBi	33.6 dBi	35.7 dBi
Ganho Banda Média <i>Gain Mid band/ Ganancia Banda media</i>	29.2 dBi	32.6 dBi	34.6 dBi
Ganho Banda Baixa <i>Gain Low band/ Ganancia Banda baja</i>	28.6 dBi	31.5 dBi	33.5 dBi
Ângulo de meia potência <i>Beamwidth/Ángulo de media potencia</i>	8.8°	3.6°	3.1°
Relação frente-costas (165° - 180°) <i>Front-to-back ratio/Relación frente-dorso</i>	>40 dB	>54 dB	>57 dB
VSWR	4.9 – 5.25 < 2.0:1 5.25 – 5.875 < 1.6:1 5.875 – 6.25 < 1.8:1		
Polarização <i>Polarization/Polarización</i>	Double (V and H) Doble (V y H)		
Conexão <i>Antenna input/Conexión</i>	N female or SMA Female reverse N Hembra o SMA Hembra reverso		

* Homologação ANATEL-BR N° 00842 - 13 - 05639:

Uso deve respeitar regulações da região de operação

Applications must comply with regulations imposed by country of operation

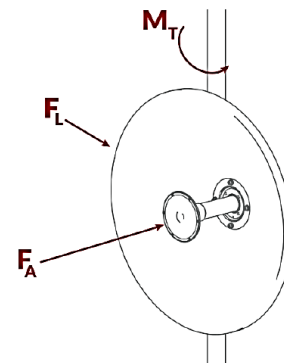
Aplicaciones deben cumplir con las regulaciones impuestas por el país de operación

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS/ MECHANICAL SPECIFICATIONS/CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

PA-5800-XX-XX-DP	29-06	32-09	35-12
Ajuste de elevação <i>Elevation adjustment/Ajuste de elevación</i>	+/- 6°	+/- 7.5°	+/- 7.5°
Ajuste de azimute <i>Azimuth adjustment/Ajuste de azimut</i>	Manual		
Ajuste de polarização <i>Polarization adjustment/Ajuste de polarización</i>	+/- 5°		
Peso da antena <i>Approximate weight/Peso aproximado</i>	4.1 kg	8.0 kg	19.5 kg
Fixação em mastro <i>Mounting pipe diameter/Fijación en mástil</i>	Ø1"-Ø2"	Ø1"-Ø2"	Ø2"-Ø4.1/2"
Vento operacional <i>Operational windspeed/Viento operativo</i>	110 km/h		
Vento de sobrevivência <i>Survival windspeed/Viento de supervivencia</i>	200 km/h		

INCIDENT FORCES ON SURVIVAL WIND FUERZAS INCIDENTES SOBRE VIENTO DE SUPERVIVENCIA

PA-5800-XX-XX-DP	29-06	32-09	35-12
Força Axial (F_A) <i>Axial Force/Fuerza Axial</i>	907 N	1448 N	1911 N
Força Lateral (F_L) <i>Lateral Force/Fuerza Lateral</i>	265 N	492 N	1600 N
Momento Torsor (M_T) <i>Torque/Momento Torsor</i>	115 Nm	298 Nm	966 Nm



Anexo 4: Configuración general del proyecto

Proyecto: Anguia_Tesis100925

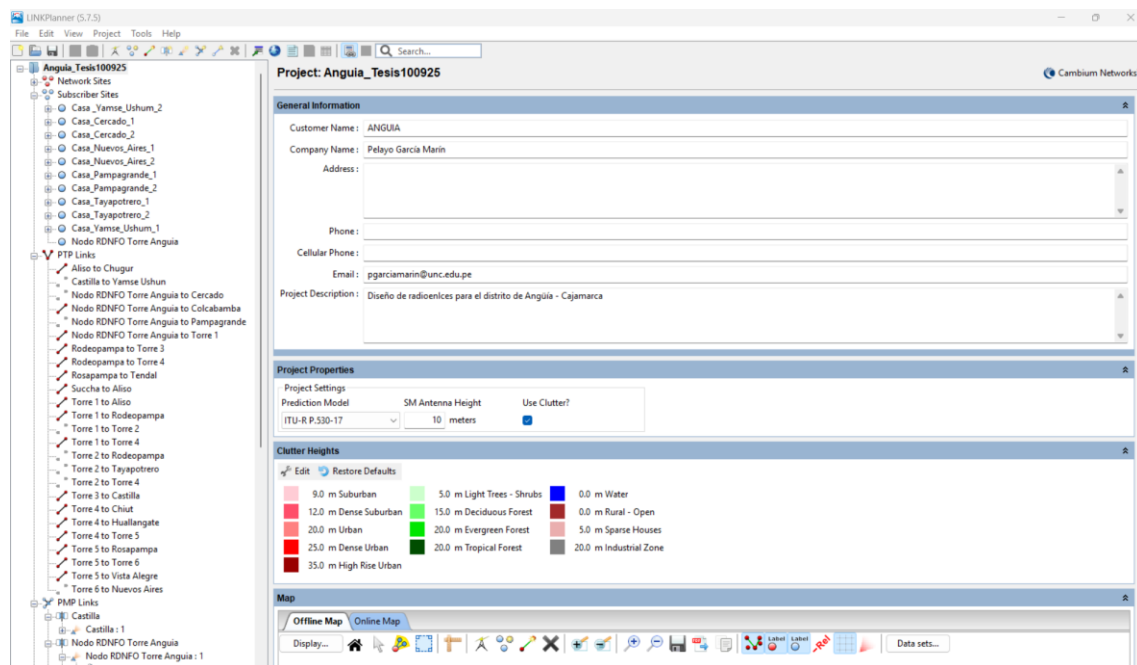
Tipo de enlaces: Punto a Punto (PTP)

Modelo de propagación: ITU-R P.530-17

Modo de cálculo: Línea de vista (LoS)

Datos topográficos: Integrados en LinkPlanner (DEM/SRTM)

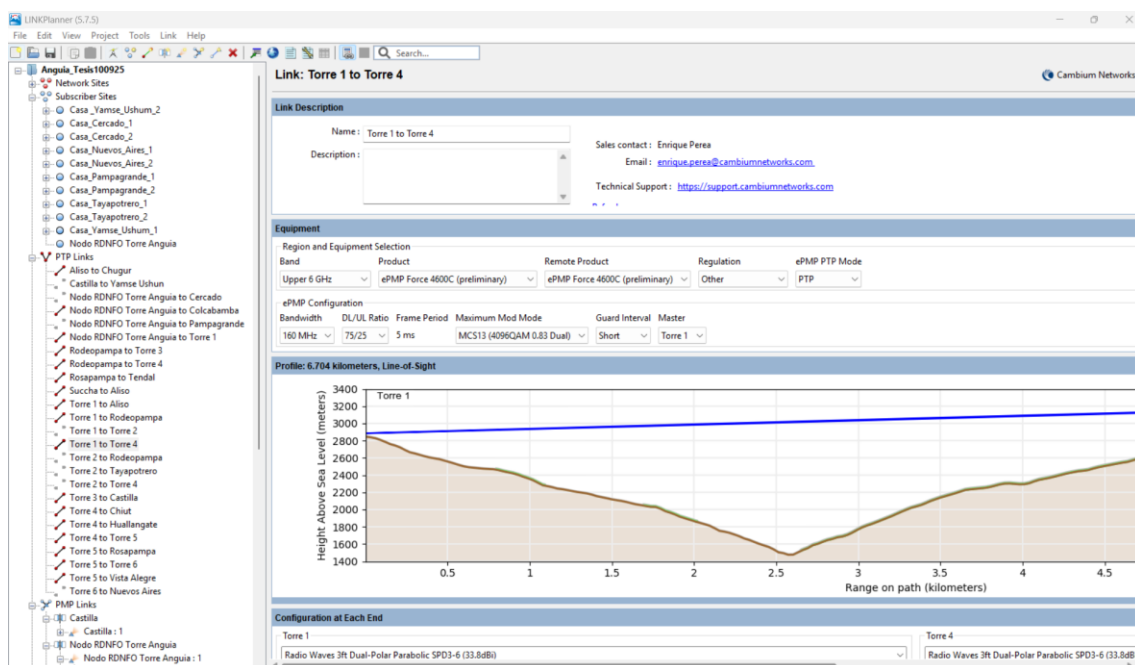
Criterio de disponibilidad: Cálculo automático anual activado



Configuración de un enlace troncal representativo en 6GHz y 5.8 GHz.

Se presentan las configuraciones para dos enlaces con frecuencias de 6GHz y 5.8 GHz, de forma similar se realizan las configuraciones para cada site del diseño.

(Ejemplo: Torre 1 – Torre 4)



Distancia: 6.704 km

Banda: Upper 6 GHz

Equipo: ePMP Force 4600C

Ancho de canal: 160 MHz

Modo PTP: Activado

Modulación máxima configurada: MCS13 (4096QAM 0.83 Dual)

DL/UL ratio: 75/25

Frame period: 5 ms

Guard interval: Short

Antenas utilizadas:

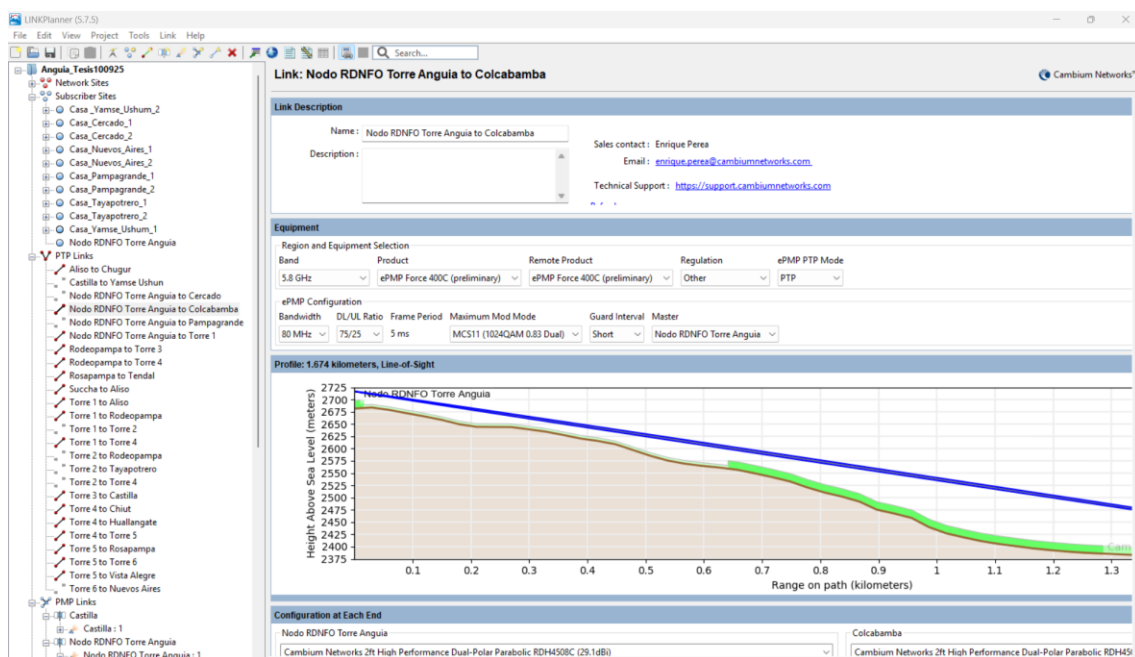
Radio Waves 3 ft Dual-Polar Parabolic SPD3-6 (≈ 33.8 dBi)

Resultado técnico relevante:

Despeje completo de LoS y Fresnel conforme perfil mostrado.

Configuración de un enlace de distribución

(Ejemplo: Nodo RDNFO – Colcabamba)



Distancia: 1.674 km

Banda: 6 GHz

Ancho de canal: 80 MHz

Modulación máxima: MCS11 (1024QAM 0.83 Dual)

Antenas: Cambium 2 ft High Performance Dual-Polar Parabolic

Resumen global de enlaces simulados

Se simuló un total de 17 radioenlaces PTP, cuyos parámetros principales incluyen:

- Distancias entre 0.421 km y 6.704 km
- Despeje de zona de Fresnel entre 2.7 m y 18.9 m
- Alturas de torre entre 10 m y 45 m
- Throughput agregado por enlace superior a la demanda proyectada

La configuración presentada permite la replicabilidad técnica del estudio, ya que todos los parámetros de frecuencia, potencia, modulación, antenas, alturas y modelo de propagación se encuentran explícitamente definidos y documentados.

Anexo 5: Formulación del modelo ITU-R P.530 empleadas en el dimensionamiento radioeléctrico

Las expresiones presentadas en este anexo corresponden a la formulación teórica del modelo ITU-R P.530-17 y recomendaciones asociadas, utilizadas como base conceptual para el dimensionamiento y validación de los radioenlaces. En la práctica, dichos modelos fueron implementados mediante simulación técnica, documentándose aquí con fines de trazabilidad, consistencia metodológica y respaldo normativo.

1. Pérdida de espacio libre (FSPL) — f en GHz, d en km

$$FSPL [dB] = 92.45 + 20\log_{10}(f_{\text{GHz}}) + 20\log_{10}(d_{\text{km}})$$

2. Presupuesto de enlace, potencia recibida y SNR

$$\begin{aligned} \text{EIRP [dBm]} &= P_{\text{TX}} + G_{\text{TX}} - L_{\text{TX}} \\ P_{\text{RX}} [dBm] &= \text{EIRP} - \text{FSPL} - L_{\text{atm}} - L_{\text{lluvia}} - L_{\text{misc}} + G_{\text{RX}} \\ N [dBm] &= -174 + 10\log_{10}(B [\text{Hz}]) + NF \\ \text{SNR [dB]} &= P_{\text{RX}} - N \end{aligned}$$

Se verifica que $\text{SNR} \geq \text{umbral MCS}$; el throughput se aproxima como $C \approx \eta_{\text{SE}} B$, con η_{SE} = eficiencia espectral de la modulación/codificación. Esta relación se emplea como aproximación conceptual; los valores finales de throughput fueron obtenidos mediante simulación considerando eficiencia real del sistema, overheads MAC y condiciones de interferencia.

3. Atenuación por lluvia (P.530/P.838)

$$\gamma_R(p) [\text{dB/km}] = k(f, \text{pol}) R_p^{\alpha(f, \text{pol})}, A_R(p) = \gamma_R(p) d_{\text{ef}}$$

- R_p = intensidad de lluvia excedida p % del tiempo (mm/h).
- k, α = coeficientes por frecuencia y polarización.
- $d_{\text{ef}} = r(p, f, d) d$ = longitud efectiva (con el factor de reducción r para trayectos terrestres indicado por P.530).

4. Multipath / variaciones del factor K (clima claro)
Se estima la profundidad de desvanecimiento $A_{mp}(p)$ excedida p % del tiempo (método P.530). El margen plano requerido debe cumplir:

$$FM \geq A_R(p) + A_{mp}(p) + A_{\text{otras pérdidas}} + \text{margen}_{I/N}$$

Garantiza la disponibilidad objetivo $\mathcal{A} = 1 - \frac{p}{100}$ (p.ej., 99.9 %).

Donde:

- FSPL: pérdida de espacio libre (dB).
- P_{TX} : potencia de transmisión (dBm).
- G_{TX}, G_{RX} : ganancias de antena TX/RX (dBi).
- L_{TX} : pérdidas lado TX (cables, conectores) (dB).
- L_{atm} : pérdidas atmosféricas no debidas a lluvia (dB).
- L_{lluvia} : atenuación por lluvia (cuando se modela como pérdida media) (dB).
- L_{misc} : otras pérdidas (desalineación, polarización, etc.) (dB).
- EIRP: potencia isotrópica radiada equivalente (dBm).
- P_{RX} : potencia recibida (dBm).
- B : ancho de banda de canal (Hz).
- NF: Fig. ura de ruido del receptor (dB).
- N : potencia de ruido térmico (dBm).
- SNR: relación señal-ruido en la recepción (dB).
- R_p : lluvia excedida p % del tiempo (mm/h).
- $\gamma_R(p)$: atenuación específica por lluvia (dB/km).
- $A_R(p)$: atenuación total por lluvia para el trayecto (dB).
- $A_{mp}(p)$: pérdida por mutitrayecto/variaciones de K excedida p % (dB).
- $A_{\text{otras pérdidas}}$: pérdidas adicionales no modeladas arriba (dB).
- $\text{margen}_{I/N}$: holgura para interferencia/ruido adicional (dB).
- FM (Fade Margin): margen de desvanecimiento diseñado (dB) para soportar $A_R + A_{mp}$ + extras sin perder el MCS objetivo.

- $\mathcal{A}$: disponibilidad del enlace (p. ej., 99.9 % = $p = 0.1$ %).

Las fórmulas de Fresnel ya fueron presentadas y se aplican como condición geométrica previa; aquí se ha documentado únicamente lo no geométrico de ITU-R P.530-17 usado para dimensionar márgenes por lluvia y multipath, y verificar la disponibilidad.

Anexo 6: Ajustes finos representativos y verificación geométrica detallada de radioenlaces.

Nodo Anguía: micro-reubicaciones (~200 m) hacia Colcabamba, logrando holguras de 4–6,5 m con mástiles livianos de 10–15 m.

Enlace T2 ↔ T4: se descartaron reubicaciones y se adoptó la elevación de torres a 40 m (T2) y 45 m (T4), obteniendo 8,4 m de despeje (criterio superado).

Nuevos Aires: se resolvió mediante micro-PoP con backhaul PTP desde T5 (≤ 35 m) y celda PTMP al caserío, evitando torres de 50 m.

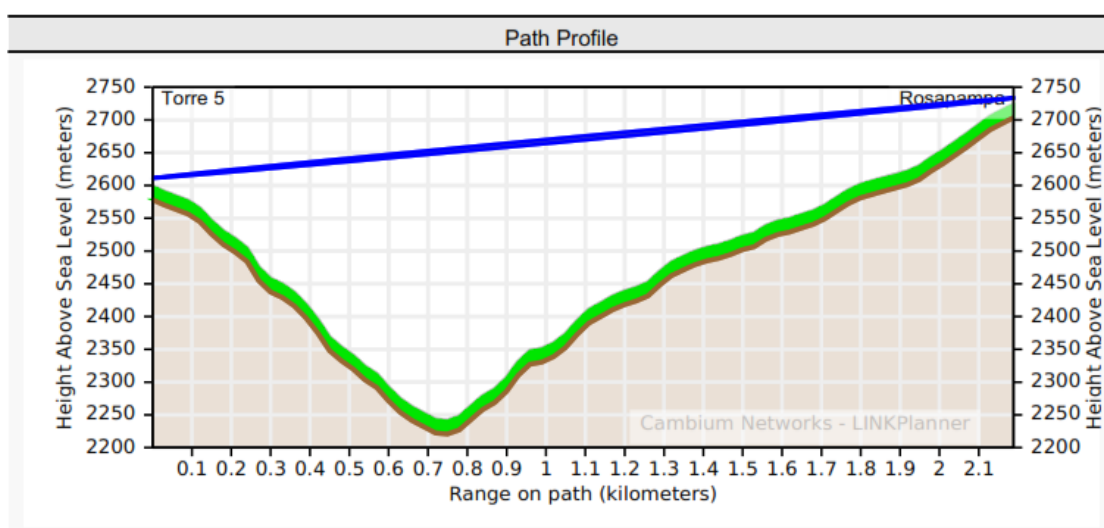


Fig. 52. Perfil del radioenlace Torre 5 a Rosapampa

- Torre 2 → Torre 4 (alternativas descartadas). Se analizó reubicar Torre 2 buscando una cota $\approx +70$ m para evitar mayor altura estructural; sin embargo, se perdía LoS con Rodeopampa y Tayapotrero. Torre 4 al desplazarla también comprometerían la visibilidad con Torre 5 y, por ende, con varias localidades dependientes. Por ello, se mantiene el emplazamiento actual y se opta por ajuste de altura.

Umbrales de diseño para el hop T2 ↔ T4 (upper-6 GHz):
Distancia $D = 5,788$ km; frecuencia $f = 6,0$ GHz $\rightarrow 5,10$ m + 1 m = 6,10 m

Decisión final para T2 ↔ T4. Para superar con holgura los 6,10 m y conservar la visibilidad con todos los destinos asociados, se adoptan alturas robustas:

- Torre 2: 40 m
- Torre 4: 45 m

Estas alturas otorgan 8,4 m y superan los 6,10 m, evitan reubicaciones que degradan la topología y proveen margen adicional ante variaciones de K, crecimiento de vegetación y futuros upgrades de antenería. En conjunto, los ajustes descritos estabilizan el despeje de Fresnel, mantienen los ruteos requeridos y cierran el objetivo de diseño con un perfil constructivo viable.

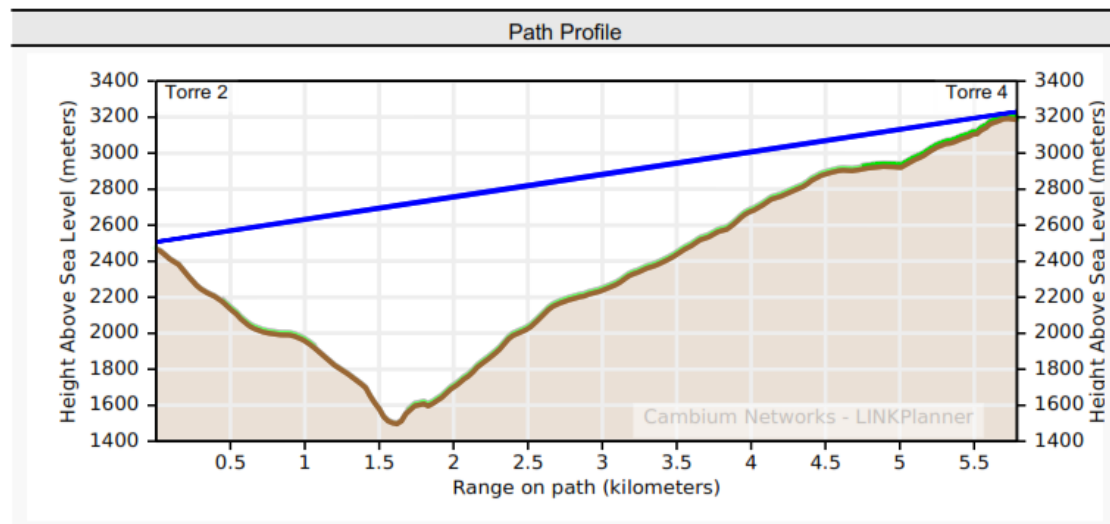


Fig. 53. Perfil del radioenlace Torre 5 a Rosapampa

Ajuste fino en el clúster Anguía – Colcabamba – Pampagrande – Cercado

En la Tabla 19 se observó que los enlaces RDNFO Anguía → Colcabamba y RDNFO Anguía → Pampagrande presentaban márgenes insuficientes frente al umbral de diseño (déficits de 0,72 m y 0,23 m, respectivamente). Para corregirlos sin elevar innecesariamente las torres, se ejecutó una micro - reubicación del sitio Anguía de ≈ 200 m en dirección a Colcabamba. Esta corrección mantiene las holguras ya logradas con el resto de los enlaces y restablece LoS con la 1.^a zona de Fresnel dentro del criterio de diseño.

Resultados ($K = 1$, ver Fig. s. 26–28):

- Anguía → Pampagrande: con mástil de 10 m en Pampagrande se obtiene un despeje $\approx 4,0$ m, superando el umbral de la Tabla 8.
- Anguía → Colcabamba: con mástil de 15 m en Colcabamba se logra un despeje $\approx 6,5$ m, holgura suficiente para operación estable.

- Anguía → Cercado: aun con mástiles de 15 m, el despeje es de $\approx 5,0$ m, por encima del objetivo.

Con esta solución, Anguía puede dar cobertura directamente a Pampagrande, Colcabamba y Cercado mediante PTP cortos con mástiles ligeros (10–15 m), evitando torres altas, reduciendo CAPEX/OPEX y cumpliendo el criterio de despeje $\geq 0,6 \cdot r_1$ (y con holgura respecto al objetivo de la Tabla 8).

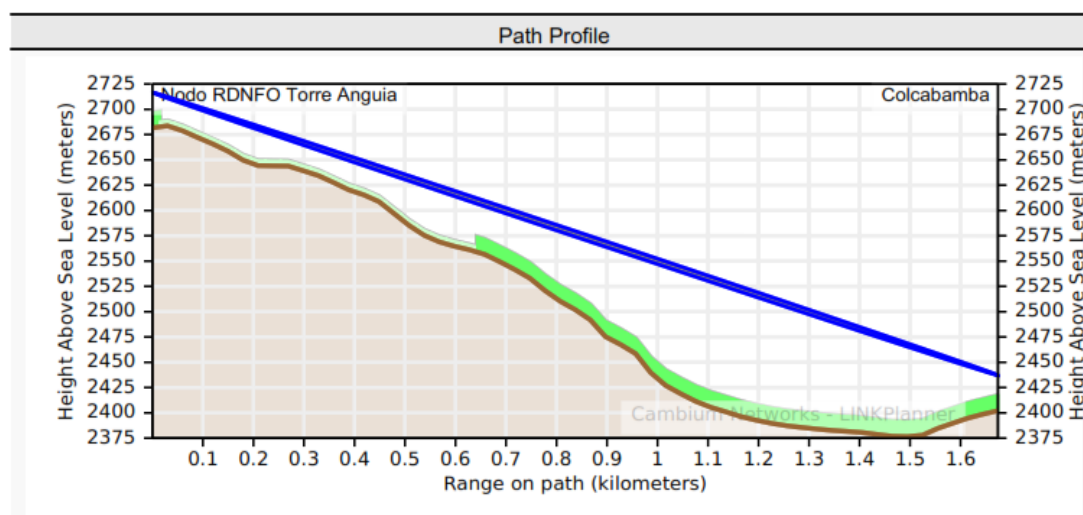


Fig. 54. Perfil del radioenlace Torre Anguía a Colcabamba

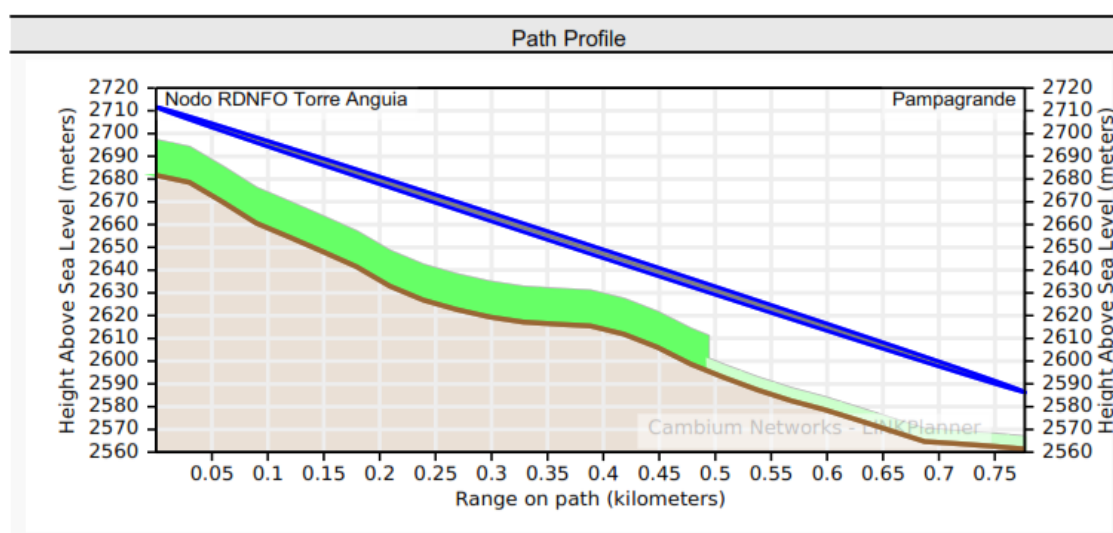


Fig. 55. Perfil del radioenlace Torre Anguía a Pampagrande

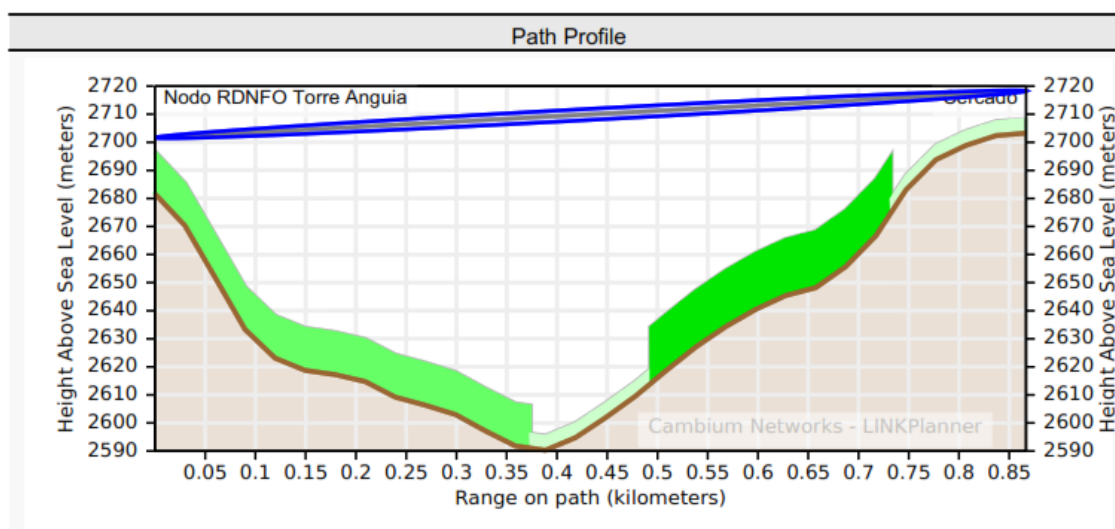


Fig. 56. Perfil del radioenlace Torre Anguía a Cercado

Decisión para el enlace Aliso ↔ Chugur

En la propuesta inicial se planteó dar cobertura Chugur desde Aliso ($\approx 0,42\text{--}0,48\text{ km}$) con mástiles domiciliarios; sin embargo, la vegetación densa impide disponer de alturas de 10–15 m en los hogares, por lo que se incorpora una torre en Chugur (Fig. 29).

Verificación radioeléctrica (5,8 GHz, $K = 1$).

En el punto medio, el radio de la 1.^a Fresnel es $r_1 \approx 8,66\sqrt{D/f}$.

- Para $D = 0,421\text{ km} \Rightarrow r_1 \approx 2,33\text{ m} \Rightarrow 0,6 \cdot F1 \approx 1,40\text{ m}$.
- (Si se toma $D = 0,480\text{ km}$, el umbral sería $0,6 \cdot F1 \approx 1,49\text{ m}$.)

Con 35 m en Aliso y 30 m en Chugur, el perfil arroja un *clearance* de $\approx 2,3\text{ m}$, es decir, un margen de $\approx 0,8\text{--}0,9\text{ m}$ sobre el umbral $0,6 \cdot F1$.

Se justifica instalar una torre arriostrada de 30 m en Chugur (y mantener 35 m en Aliso), con lo que el enlace cumple el criterio de despeje. Si se desea aplicar el criterio más conservador ($0,6 \cdot F1 + 1\text{ m}$), bastaría elevar +1 m en Chugur (31 m) para añadir holgura ante crecimiento de vegetación.

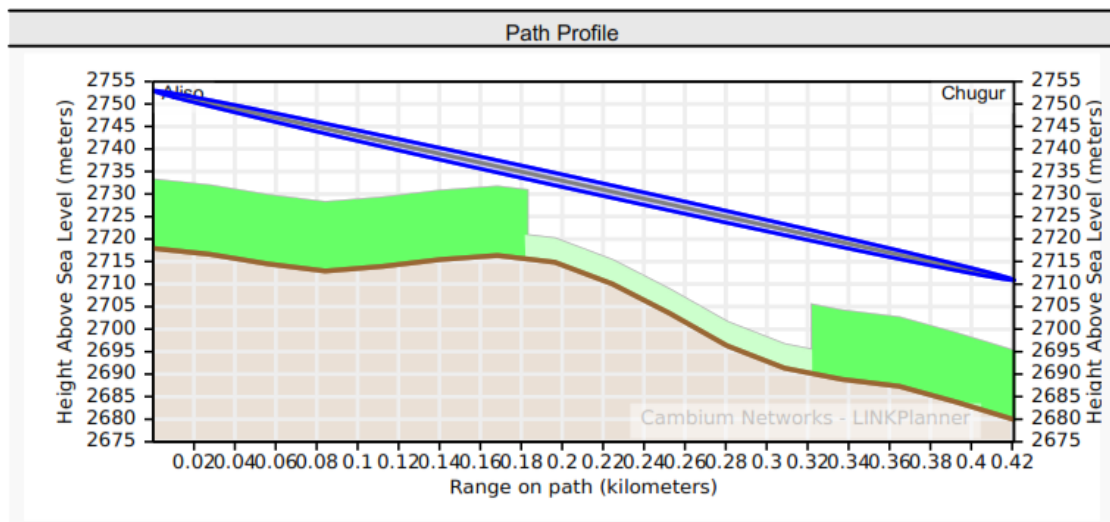


Fig. 57. Perfil del radioenlace Aliso a Chugur con presencia de vegetación.

Cobertura de Tayapotrero desde Torre 2

El análisis de perfil confirma que Tayapotrero puede ser atendido sin torre dedicada, utilizando antenas sectoriales en Torre 2 y mástiles domiciliarios de 10 m en los hogares.

- Parámetros del salto (referencia al eje radial Torre 2 → Tayapotrero):
 $D \approx 0,665 \text{ km}$, $f = 5,8 \text{ GHz}$.
- Verificación de Fresnel ($K = 1$):
 $r_1(\text{mid}) \approx 8,66\sqrt{D/f} \approx 2,93 \text{ m} \Rightarrow$
 Umbral $0,6 \cdot F1 \approx 1,76 \text{ m}$ (y criterio conservador $0,6 \cdot F1 + 1 \approx 2,76 \text{ m}$).
- Resultado de simulación con mástiles de 10 m en viviendas:
 holgura media $\approx 9,1 \text{ m}$, es decir, $+7,3 \text{ m}$ sobre $0,6 \cdot F1$ y $+6,3 \text{ m}$ sobre el criterio $0,6 \cdot F1 + 1 \text{ m}$.

La celda PTMP desde Torre 2 (5,8 GHz, 20–40 MHz) cumple con amplia holgura; no se requiere torre en Tayapotrero. Se recomienda solo verificar obstáculos muy próximos a las CPE (árboles puntuales) y, de ser necesario, elevar 1–2 m algún mástil individual para mantener márgenes altos.

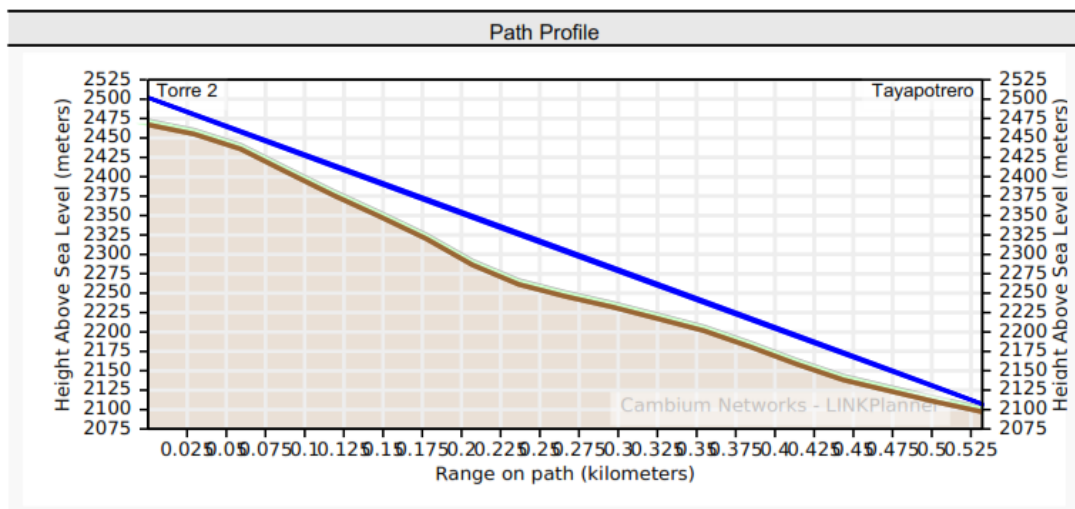


Fig. 58. Perfil del radioenlace Torre 2 a Tayapotrero

Cobertura de Nuevos Aires desde Torre 6 (sin torre local)

Para evitar instalar una torre en Nuevos Aires —donde sólo hay 22 hogares y 77 Mbps de demanda agregada— se evaluó la cobertura PTMP desde Torre 6. Con Torre 6 a 35 m y mástiles domiciliarios de 10 m, el perfil ($K = 1$) muestra una holgura de Fresnel $\approx 5,2$ m, suficiente para LoS robusta y superior al umbral de diseño $\geq 0,6 \cdot r_1$ (incluso considerando el criterio conservador $0,6 \cdot r_1 + 1$ m). En estas condiciones, una celda ePMP 3000 (40 MHz) ofrece >150 Mbps, holgura amplia frente a los 77 Mbps requeridos. Por tanto, la solución recomendada es elevar Torre 6 a 35 m y atender Nuevos Aires con sectoriales y CPE de 10 m, evitando CAPEX de una torre dedicada y manteniendo márgenes operativos adecuados.

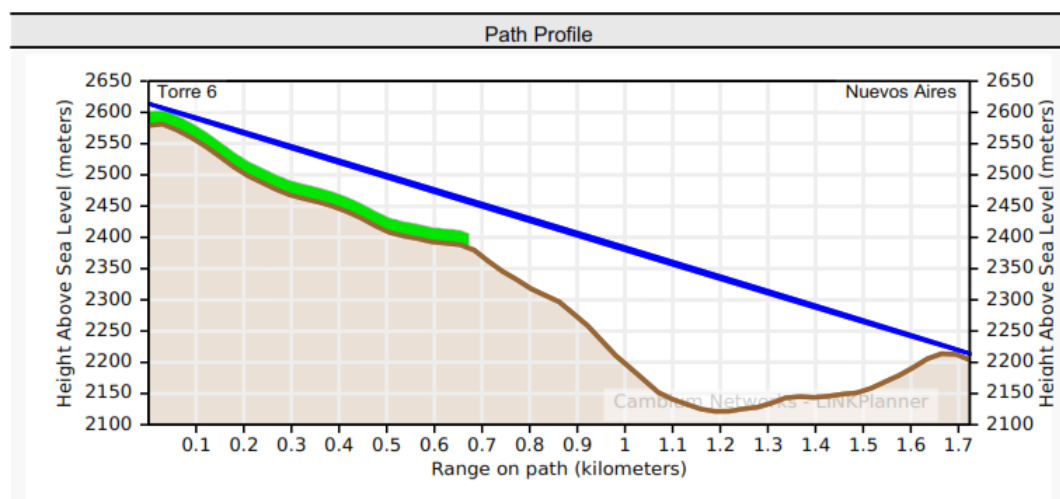


Fig. 59. Perfil del radioenlace Torre 6 a Nuevos Aires

Anexo 7: Metodología para el cálculo de throughput en cada radioenlace

1. Asignación de orígenes: cada centro poblado se asocia a su torre/sector de acceso (PTMP) según el diseño final.
2. Ruteo de tráfico: la demanda de cada centro se encamina por su ruta hasta el hub correspondiente y luego hacia la RDNFO; así se obtiene, para cada enlace PTP, la carga agregada que debe transportar.
3. Cálculo de carga en hora ocupada (HO): para cada centro, se toma la demanda HO y se suma a lo largo del camino de enlaces:

$$\text{Carga}_{\text{enlace}} = \sum_{i \in S_{\text{enlace}}} \text{Demanda}_{i, \text{HO}} \dots (10)$$

donde, i es el índice (o elemento) que recorre cada centro poblado cuya demanda pasa por ese enlace.

- S_{enlace} = conjunto de centros poblados que rutean su tráfico por ese enlace.
- $\text{Demanda}_{i, \text{HO}}$ = demanda en Hora Ocupada del centro poblado i .

Ejemplo: si por el enlace L pasan Anguía (120 Mbps) y Aliso (80 Mbps), entonces

$$S_{\text{enlace}} = \{\text{Anguía, Aliso}\} \text{ y } \text{Carga}_L = 120 + 80 = 200 \text{ Mbps.}$$

4. Comparación con capacidad efectiva: en cada enlace se contrastará la carga HO con la capacidad efectiva (ancho de canal, MCS objetivo, 95.º percentil), dejando margen del 20–30 % para crecimiento.
5. Resultado: una matriz enlace–demanda y una tabla de utilización (%) que prioriza ampliaciones de canal, ajustes de potencia/alineación o reacomodo de rutas si algún tramo supera el umbral (p. ej., $\leq 70\text{--}80\%$ en hora pico).

Con esta metodología, la demanda de la Figura (poblado por poblado) se traduce en carga por enlace, permitiendo dimensionar canales, definir planes de frecuencia y verificar que todos los troncales y accesos operen con holgura conforme al criterio radioeléctrico (LoS y $\geq 0,6 \cdot r_1 + 1 \text{ m}$).

Anexo 8: Cálculo del beneficio social anual equivalente

En proyectos evaluados bajo Invierte.pe, cuando no existen ingresos monetarios, los beneficios se estiman mediante ahorros sociales y externalidades positivas cuantificables. A continuación, los detalles del cálculo:

Ahorro en desplazamientos físicos

Antes del proyecto:

- Coordinaciones, reportes, trámites, soporte técnico → viajes presenciales.
- Transporte rural (moto/camioneta) + tiempo perdido.

Después del proyecto:

- Supervisión, coordinación y gestión → vía conectividad.

Supuesto conservador (defendible):

- Centros/nodos atendidos: 21
- Viajes evitados: 2 por mes por nodo
- Costo promedio por viaje (pasaje + viático): S/ 120

Cálculo anual:

$$21 \times 2 \times 12 \times 120 = \text{S/ } 60,480$$

Ahorro de tiempo del personal (valorización económica)

La conectividad reduce:

- Tiempos de coordinación,
- Espera,
- Duplicación de tareas.

Supuesto conservador:

- Personal beneficiado (municipal, educativo, salud): 30 personas
- Ahorro de tiempo: 1 hora/día
- Valor hora laboral promedio rural: S/ 12
- Días laborales/año: 250

Cálculo anual:

$$30 \times 1 \times 12 \times 250 = S/ 90,000$$

Reducción de costos operativos institucionales

Incluye:

- Menos uso de telefonía móvil/datos personales
- Menos impresiones y traslados
- Mejor gestión y coordinación interinstitucional

Supuesto conservador:

- Ahorro mensual institucional estimado: S/ 12,500
- (municipalidad + centros educativos + salud)

Cálculo anual:

$$12,500 \times 12 = S/ 150,000$$

Beneficio social anual total (resultado)

Tabla 42. Beneficio social anual total

Componente	Beneficio anual (S/.)
Ahorro en desplazamientos	60,480
Ahorro de tiempo del personal	90,000
Reducción de costos operativos	150,000
Beneficio social anual equivalente	300,480 $\approx$ 300,000

Redondeo conservador $\rightarrow$ S/ 300,000 / año

Anexo 9: Operacionalización de variables

Variable	Tipo de variable	Definición conceptual	Definición operativa	Indicadores	Técnicas	Instrumentos	Escala de medición
Diseño de la infraestructura de radioenlaces	Independiente	Configuración técnica y física del sistema de radioenlaces que permite la interconexión inalámbrica entre nodos geográficos mediante torres, antenas y equipos de transmisión.	Se caracteriza mediante el análisis de información territorial y la simulación técnica de radioenlaces, considerando topografía, ubicación de nodos, alturas de torres, despeje de la primera zona de Fresnel, frecuencia de operación, potencia y ancho de banda, con el fin de optimizar la estructura de la red.	Número de torres requeridas Altura de torres (m) Porcentaje de despeje de Fresnel (%) Frecuencia de operación (GHz) Ancho de banda (MHz)	• Revisión documental • Análisis de información secundaria • Simulación técnica. • Observación técnica	• Normas ITU-R y TIA • Bases de datos INEI (centros poblados, cartografía) • Cartografía digital (altimetría, coordenadas) • Software simulador de radioenlaces (Link Planner)	Escala numérica (cantidad) Escala continua (m, GHz, MHz) Escala porcentual (%)
Rendimiento y confiabilidad de los radioenlaces	Dependiente	Capacidad del sistema para transmitir datos de manera continua, estable y confiable, asegurando niveles adecuados de disponibilidad y calidad de servicio.	Se evalúa mediante simulaciones técnicas de los radioenlaces, considerando esquemas de modulación, relación señal/ruido (SNR), potencia recibida, margen de desvanecimiento y disponibilidad anual del enlace.	Throughput (Mbps) Disponibilidad (%) Fade Margin (dB)SNR (dB)	• Simulación técnica • Análisis técnico-comparativo • Observación técnica	• Software simulador de radioenlaces (Link Planner) • Hojas de cálculo para análisis comparativo	Escala continua (Mbps, dB) Escala porcentual (%)
Viabilidad económica del diseño	Dependiente	Capacidad del proyecto para sostenerse económicamente en el tiempo bajo un enfoque socioeconómico, considerando los costos y beneficios asociados a la infraestructura propuesta.	Se evalúa mediante la estimación detallada de los costos de inversión (CAPEX), costos de operación y mantenimiento (OPEX) y la construcción del flujo socioeconómico para la aplicación de los indicadores VAN y TIR social.	CAPEX (S/.) OPEX anual (S/.) VAN social TIR social	• Revisión documental • Análisis económico • Simulación de escenarios económicos	• Lineamientos metodológicos de Invierte.pe • Información de mercado y costos referenciales • Hojas de cálculo	Escala monetaria (S/.) Escala continua (%)

Anexo 10: Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis (referencial)	Variable	Indicadores	Técnica	Instrumento
General: ¿Cómo diseñar la infraestructura de una red de radioenlaces para interconectar los centros poblados del distrito de Anguía con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, optimizando el rendimiento, la confiabilidad y la viabilidad económica del sistema?	General: Diseñar la infraestructura de radioenlaces necesaria para optimizar el rendimiento y la confiabilidad del servicio de conectividad en los centros poblados del distrito de Anguía, considerando su viabilidad técnica y económica.	General: El diseño de una infraestructura de radioenlaces técnicamente optimizada permitiría describir un sistema con adecuados niveles de rendimiento, confiabilidad y viabilidad económica para la interconexión del distrito de Anguía con la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica.	Diseño de la infraestructura de radioenlaces	Número de torres requeridas Altura de torres (m) Frecuencia de operación (GHz) Ancho de banda (MHz)		
1. ¿Cómo optimizar el diseño de la infraestructura de radioenlaces para minimizar el número de torres y repetidores necesarios?	1. Determinar el diseño óptimo de la infraestructura, considerando el número y ubicación de torres y repetidores, para establecer una red eficiente en el distrito de Anguía.	1. La optimización topográfica y geométrica del diseño permitiría describir una infraestructura con menor número de torres, manteniendo los criterios de línea de vista y despeje de Fresnel.	Diseño de la infraestructura de radioenlaces	Número de torres Porcentaje de despeje de Fresnel	• Revisión documental • Análisis de información secundaria • Simulación técnica	• Normas ITU-R y TIA • Bases de datos INEI (centros poblados, cartografía) • Cartografía digital (altimetría, coordenadas) • Software simulador de radioenlaces (Link Planner)
2. ¿Qué modulaciones y parámetros técnicos garantizan el rendimiento y la confiabilidad de los radioenlaces bajo las condiciones geográficas y climáticas de Anguía?	2. Analizar los parámetros técnicos clave para describir el rendimiento y la confiabilidad de los radioenlaces.	2. La selección adecuada de modulaciones y parámetros técnicos permitiría caracterizar radioenlaces con elevados niveles de rendimiento y confiabilidad bajo las condiciones geográficas del distrito de Anguía.	Rendimiento y confiabilidad de los radioenlaces	Throughput (Mbps) Disponibilidad (%) Fade Margin (dB)	• Simulación técnica • Análisis técnico - comparativo	• Software simulador de radioenlaces (Link Planner) • Hojas de cálculo para análisis comparativo
3. ¿Cómo un análisis detallado de costos contribuye a evaluar la viabilidad económica del diseño de la red de radioenlaces?	3. Evaluar la viabilidad económica del diseño de la infraestructura de radioenlaces mediante el análisis de costos de implementación, operación y mantenimiento.	3. El análisis detallado de los costos de inversión y operación permitiría describir la viabilidad económica del diseño de la infraestructura de radioenlaces para el distrito de Anguía.	Viabilidad económica del diseño	CAPEX (S/.)OPEX anual (S/.)VAN social TIR social	• Revisión documental • Análisis económico • Simulación de escenarios económicos	• Lineamientos metodológicos de Invierte.pe • Información de mercado y costos referenciales • Hojas de cálculo