

RED DE CONECTIVIDAD EN LA CUENCA DEL RÍO SANTIAGO: UN MODELO INNOVADOR PARA CONTRIBUIR AL CIERRE DE LA BRECHA DIGITAL EN EL MARCO DE LAS ALIANZAS MULTIACTOR

JUAN ANTONIO PACO FERNÁNDEZ

jpaco@pucp.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-0584-8751>

Pontificia Universidad Católica del Perú

RIVER QUISPE TACAS

riquispe@pucp.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-8434-2512>

Pontificia Universidad Católica del Perú

JOEL ARAGÓN VALLADARES

joel.aragon@pucp.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0009-7613-4922>

Pontificia Universidad Católica del Perú

Recibido: 15 de setiembre del 2024 / Aceptado: 16 de octubre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2024.n020.7401>

RESUMEN. Este artículo describe las características técnicas y las pruebas de desempeño de la red inalámbrica de banda ancha implementada en la cuenca del río Santiago (región Amazonas, Perú); además, detalla el contexto y el proceso de articulación interinstitucional en el que se ha desarrollado este proyecto. En el marco de una iniciativa amplia liderada por el Gobierno del Perú, se llevó a cabo un proceso de colaboración entre actores públicos, privados y la academia para el desarrollo de la provincia de Condorcanqui (región Amazonas, Perú); de este proceso surgieron diversos estudios y proyectos, entre ellos el diseño y la implementación de una solución de conectividad para la cuenca del río Santiago. El establecimiento de la red busca complementar los planes y proyectos que tiene el Estado en cuanto a la ampliación de la conectividad y los servicios de telecomunicaciones para cerrar la brecha digital en el Perú mediante una propuesta técnica no convencional. El principal resultado de la ejecución de este proyecto y del proceso seguido es la validación de una prueba de concepto sobre un modelo innovador de articulación, que busca combinar los esfuerzos de actores públicos y privados para reducir la brecha digital en comunidades rurales aisladas, con población escasa y dispersa. Además, la sostenibilidad de este despliegue también sigue un modelo innovador, que involucra a un operador de servicios de telecomunicaciones y promueve

el uso del acceso a internet por parte de las instituciones públicas de los sectores de salud y educación presentes en la cuenca del río Santiago. De ello se obtienen resultados complementarios como la capacitación de empleados públicos y el fortalecimiento de los servicios brindados por las instituciones públicas mediante la entrega de equipamiento médico e informático.

PALABRAS CLAVE: brecha digital / redes inalámbricas / áreas rurales / *backhaul* inalámbrico / diseño de red de datos / Alianzas Multiactor

ABSTRACT. This article describes the technical characteristics and performance tests of the broadband wireless network implemented in the Santiago River basin (Amazon Region - Peru). It also details the context and the process of inter-institutional coordination in which this project has been developed. Within the framework of a broad initiative led by the Peruvian National Government, a collaboration process was carried out between public and private actors and academia for the development of the province of Condorcanqui (Amazon Region - Peru). From this process, various studies and projects emerged, including the design and implementation of a connectivity solution for the Santiago River basin (Amazon Region - Peru). The implementation of the network seeks to complement the plans and projects that the State has regarding the expansion of connectivity and telecommunications services to close the digital divide in Peru, through an unconventional technical proposal. The main result of this project's execution, and the corresponding process, is the validation of a proof of concept for an innovative articulation model that seeks to combine the efforts of public and private actors to reduce the digital divide in isolated rural communities with sparse and dispersed populations. Furthermore, the sustainability of this deployment also follows an innovative model involving a telecommunications service operator and promoting Internet access by public institutions in the Health and Education sectors present in the Santiago River basin. It yields complementary results, such as the training of public employees and the strengthening of the services provided by public institutions through the delivery of medical and computer equipment.

KEYWORDS: digital divide / wireless networks / rural areas / wireless backhaul / data network design / multi-stakeholder partnerships

INTRODUCCIÓN

Actualmente, en el Perú, al igual que en varios países de Latinoamérica, siguen existiendo centros poblados rurales sin conexión a internet o con un servicio lento e intermitente. Lo mismo se puede decir, aunque en menor medida, sobre otros servicios de telecomunicaciones como la telefonía móvil. En el Perú, solo el 11 % de los centros poblados rurales dispone de internet fijo, en tanto que alrededor del 20 % cuenta con internet móvil 4G (Pronatel, 2022, p. 25). Por otro lado, la alta dispersión de los centros poblados y lo amplio del territorio dificultan que las empresas operadoras de servicios de telecomunicaciones y el propio Gobierno inviertan en redes terrenas tradicionales (microondas o fibra óptica) para brindar cobertura a estas poblaciones.

En el caso peruano, la mayoría de estos centros poblados tiene una población menor a 300 habitantes (Pronatel, 2021, p. 35), por lo que, en general, no son de interés para las empresas de telecomunicaciones por la baja demanda esperada. Para atender esta problemática, el Gobierno peruano ha creado el Programa Nacional de Telecomunicaciones (Pronatel), el cual es la institución gubernamental encargada de reducir la brecha de conectividad en las zonas rurales, objetivo que, a la fecha, aún se encuentra en proceso.

La falta de acceso a servicios de telecomunicaciones limita el desarrollo económico y la calidad de vida (MTC, 2023, p. 9). Es necesario diseñar nuevos modelos de financiamiento y cooperación para colaborar con el Gobierno en el despliegue de infraestructura y la promoción del uso de la tecnología y los recursos de banda ancha.

Frente a esta problemática, el Gobierno Regional de Amazonas, el Capítulo Perú del Plan Binacional Perú-Ecuador, la Secretaría de Gobierno y Transformación Digital de la Presidencia del Consejo de Ministros del Perú (SGTD-PCM), la Municipalidad Provincial de Condorcanqui, la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y otras instituciones han colaborado para diseñar e implementar una solución de conectividad de banda ancha para la cuenca del río Santiago con el fin de permitir el acceso a internet a instituciones públicas de los sectores salud y educación de cinco centros poblados de esta zona. La PUCP ha realizado el diseño e implementación de esta red en tanto que la gestión y el financiamiento se ha efectuado en el marco de una Alianza Multiactor liderada por el propio Gobierno.

Este artículo describe tanto el modelo innovador de asociación multiactor que permitió la implementación de la red, así como el plan para su sostenibilidad y la descripción técnica de la propia red de telecomunicaciones. Esta red se encuentra operando y ha podido demostrar que sí existen vías alternativas para desplegar infraestructura de telecomunicaciones y reducir la denominada "brecha residual" (Ramírez García & Blanco Romero, 2021).

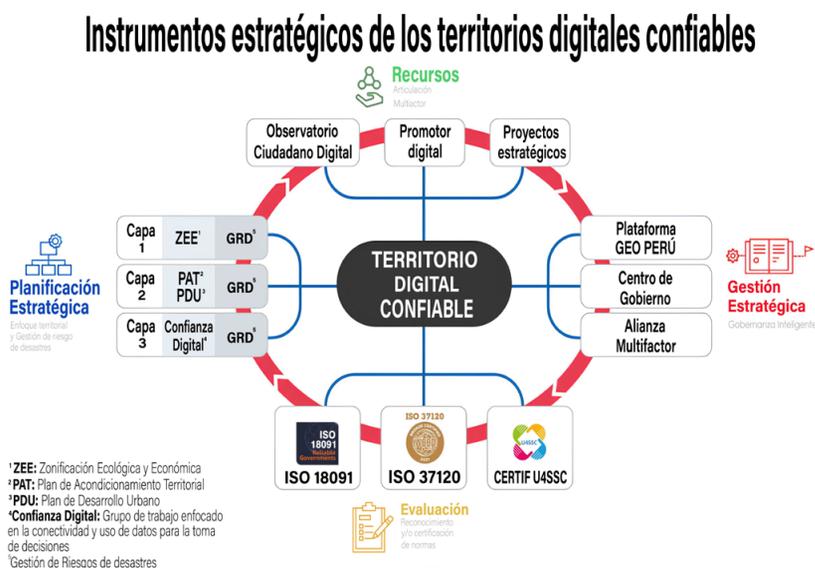
1. ALIANZA MULTIACTOR EN LA PROVINCIA DE CONDORCANQUI

En setiembre del 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) definió y aprobó 17 objetivos de desarrollo sostenible y 169 metas para la implementación de la denominada Agenda 2030. Esta propuesta de desarrollo es “un plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad que también tiene por objeto fortalecer la paz universal dentro de un concepto más amplio de la libertad” (ONU, 2015, párr. 1).

En este marco, la SGTD-PCM ha venido impulsando dos iniciativas importantes. Por un lado, la primera es la plataforma web Geo Perú, de acceso libre, la cual es una “plataforma digital de datos georreferenciados que integra información de fuentes oficiales del Estado. Permite identificar las brechas sociales, económicas, de infraestructura, entre otras, para la toma de decisiones a nivel territorial” (PCM, 2024, párr. 1). Por otro lado, la segunda iniciativa se denomina Alianzas Multiactor para el Desarrollo de Territorios Digitales Confiables, que, en la práctica, es un “proceso de articulación interinstitucional enmarcado en el Enfoque Territorial y las Alianzas Multiactor” (PCM, 2022, párr. 1). En base a ambas herramientas y a la concepción y visión de la SGTD-PCM (ver Figura 1), se desarrolló y promovió un conjunto de iniciativas en colaboración con otras instituciones públicas como ministerios, gobiernos regionales y municipalidades.

Figura 1

Instrumentos estratégicos de los territorios digitales confiables



Nota. De Plataforma Nacional de Datos Georreferenciados Geo Perú por PCM, 2022 (<https://www.geoperu.gov.pe/alianza-multiactor/>).

Estas iniciativas se implementan con una metodología de intervención que se basa en el ordenamiento territorial para la realización de un conjunto articulado de proyectos que, como en el caso de Condorcanqui, han incluido:

- I. Zonificación ecológica y económica
- II. Plan de Acondicionamiento Territorial, Plan de Desarrollo Urbano y Esquemas de Ordenamiento Urbano
- III. Carga de información provincial a la plataforma Geo Perú
- IV. Estudio hidromorfológico para la cuenca del río Santiago
- V. Diseño e implementación de la red de conectividad digital de la cuenca del río Santiago

En forma específica y como parte de este proceso, se han desarrollado diversas actividades y coordinaciones con instituciones públicas y privadas para el desarrollo sostenible de la provincia de Condorcanqui y, por extensión, de la región Amazonas. Para ello se han implementado un conjunto de mesas de trabajo con carácter multiactor que gestionan estos proyectos específicos en el territorio.

Debe indicarse que la evolución estratégica de la amplia iniciativa se ha organizado en etapas cuyos hitos coinciden con la realización de talleres multiactor, liderados por la PCM, en donde se articulan las diferentes mesas de trabajo para integrar propuestas y proyectos en forma sinérgica. Desde esta perspectiva, en octubre de 2018 se realizó el 1.º Taller de Coordinación Interinstitucional en la Universidad ESAN, donde se organizaron mesas de trabajo para abordar la problemática local enfocada en tres temas: conectividad digital, capacidades y agua y saneamiento. Asimismo, el 14 de marzo de 2019 se realizó en la PUCP el segundo taller con la presencia del viceministro de Gobernanza, representantes de la PCM, del Plan Binacional y de más de veinte instituciones públicas y privadas, donde la mesa de conectividad digital fue dirigida por el Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR). En forma más reciente, el 15 de octubre de 2020, se realizó un quinto taller en modalidad virtual, en el cual se firmaron acuerdos de los diferentes actores con los gobiernos regionales de Amazonas, Tumbes y Cajamarca, con el fin de consolidar los compromisos de los involucrados. Finalmente, en abril de 2023, se realizó el séptimo taller, el cual abrió una nueva etapa en la que se buscó consolidar el escalamiento de la iniciativa hacia otras regiones como Tumbes y Piura; además, amplió la cantidad de gobiernos regionales y locales que aplicasen a la obtención de la certificación ISO 18091.

1.1. Mesa de conectividad digital para la provincia de Condorcanqui

La mesa se centró en utilizar la tecnología de manera eficiente para mejorar la calidad de vida de la población del Condorcanqui, con pleno respeto a la sostenibilidad y la

interculturalidad. Se destacó la importancia de incorporar proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) y otros mecanismos para crear modelos replicables que puedan resolver problemas complejos, especialmente en la Amazonía.

En 2019, se realizó un estudio sobre una solución de conectividad digital para la Cuenca del río Santiago, financiado por el Capítulo Perú del Plan Binacional Perú-Ecuador y ejecutado por el GTR-PUCP. Los resultados se entregaron en noviembre de ese año y, precisamente, durante el quinto taller multiactor (octubre de 2020), el Gobierno Regional de Amazonas, la Municipalidad Provincial de Condorcanqui y el Capítulo Perú del Plan Binacional Perú-Ecuador se comprometieron a financiar la implementación del primer tramo de esta red, con el apoyo de la SGT-D-PCM y la colaboración de las instituciones de la mesa de trabajo. Nuevamente, la PUCP a través del GTR se hizo cargo de la ejecución del proyecto.

Para su ejecución fue necesaria la elaboración de un proyecto de inversión pública, el cual fue aprobado en 2021. Luego de este hito, se realizaron las compras, trámites administrativos y actividades preparatorias que permitieron iniciar las actividades en sitio en agosto de 2022. Debe mencionarse que, a pesar de la pandemia por COVID-19, los episodios de convulsión social y los problemas de acceso derivados del sismo ocurrido a finales del año 2021 en Amazonas, se concluyó la instalación de la red de conectividad a mediados del año 2023 y se continuó con las actividades de fortalecimiento de los sectores salud y educación, y las coordinaciones con los distintos actores para el aseguramiento de su sostenibilidad.

2. RELEVANCIA Y SOSTENIBILIDAD

El proyecto es significativo porque es la primera iniciativa completada bajo la propuesta gubernamental Alianzas Multiactor para el Desarrollo de Territorios Digitales Confiables. Sirve como prueba de concepto y valida la metodología aplicada (como modelo de negocio). Por lo tanto, el siguiente paso es formalizar una política pública. Además, se está replicando esta experiencia en Tumbes y se están coordinando intervenciones similares en otras regiones. Es importante resaltar, según se observa, que el actor principal de este modelo de asociación es el Gobierno en sus tres niveles (nacional, regional y local) mientras que la academia, las empresas y las fuentes cooperantes son socios alineados con los objetivos nacionales.

Esta red de conectividad, desplegada por el Proyecto Río Santiago, está operativa desde junio de 2023. Alrededor de esta solución, se ha logrado desarrollar otros planes relacionados a salud y educación en cinco comunidades rurales. Así, la PUCP y la Fundación Enlace Hispano Americano de Salud (EHAS) obtuvieron financiamiento de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y la Comunidad de Madrid para mejorar estos servicios mediante equipamiento multimedia,

teleservicios y capacitación. También se busca coordinar con operadores para ofrecer telefonía móvil 4G. La información sobre estos financiamientos fue compartida con los socios de la Alianza Multiactor y gestionada en la mesa de conectividad.

El proyecto de conectividad en la cuenca del río Santiago no solo contempló el diseño y despliegue de una red de telecomunicaciones de banda ancha, sino también contempló un modelo de sostenibilidad para la red. Esta condición podría hacerse viable con la participación de una empresa operadora que brinde servicios móviles 4G con el uso de la infraestructura de la red. De este modo, su sostenibilidad ha sido gestionada en una mesa de coordinación multiactor, la cual logró un compromiso formal del Gobierno Regional de Amazonas y otras instituciones públicas para garantizar su desarrollo. Para ello se ha previsto la contratación de un operador rural de telecomunicaciones para el mantenimiento de la red; el Gobierno Regional ha asignado fondos para la operación y conservación durante el proceso de coordinación con el operador, que ya está en curso.

Finalmente, como parte de la réplica y continuidad del proyecto, las instituciones del comité de coordinación, lideradas por el gobierno regional, se han comprometido a una segunda fase del proyecto. Esta fase busca completar la red de telecomunicaciones desde Puerto Galilea hasta la comunidad de Cahuide, cerca de la frontera con Ecuador. Los estudios preliminares están en curso y se espera que concluyan al final del presente año 2024.

3. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA RED DE CONECTIVIDAD

El río Santiago está ubicado en la región de Amazonas en Perú, tiene unos 200 km de longitud y alberga comunidades nativas awajún y wampís sin servicios básicos como electricidad, agua potable y teléfono; incluso, el acceso a estos pueblos es solo por vía fluvial. Santa María de Nieva es el poblado más desarrollado, pero también tiene muchas carencias y está a unos 300 km por carretera de Chachapoyas, la capital del departamento.

Según se aprecia en la Figura 2, la red del río Santiago se implementó en la cuenca de este río y en parte de la cuenca del río Marañón, ubicadas en la zona norte del departamento de Amazonas en Perú. La red de datos cubre los poblados de Santa María de Nieva, Pagkintsa, Belén, Guayabal, Yutupis y Galilea, donde se implementó principalmente para brindar acceso a internet a centros educativos y de salud. Adicionalmente, dentro de la red se han implementado servicios de telefonía VolP, videoconferencia (IETF, 2022), telesalud y acceso a repositorios educativos.

Figura 2

Pueblos pertenecientes a la red del río Santiago

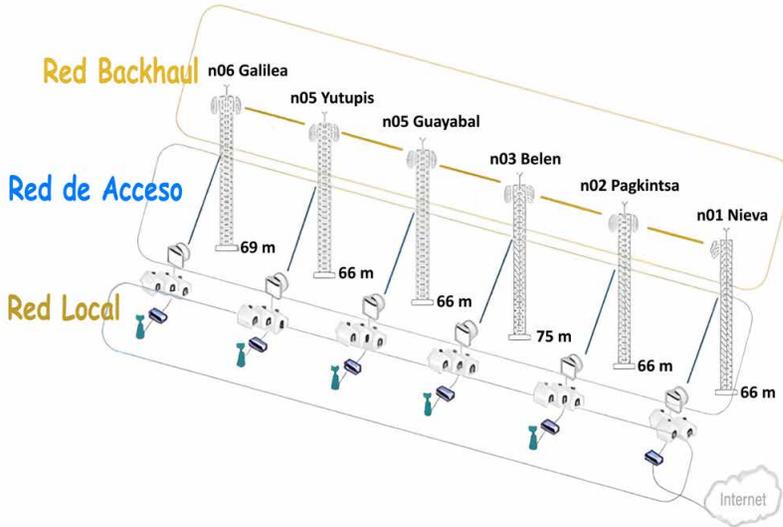


Nota. Pueblos que involucra a la red Río Santiago.

La red de datos del río Santiago se ha dividido en tres partes: la red *backhaul*, la red de acceso y la red local (Martínez-Fernández et al., 2016; Ting et al., 2012; Quispe Tacas et al., 2021; Simo-Reigadas et al., 2015). En la Figura 3, se muestra un diagrama general de la red, así como la altura de las torres (m) y la distancia (km) de los enlaces. La infraestructura también se ha dispuesto en la torre de telecomunicaciones, el sistema de energía y el sistema de protección eléctrica. Además, esta red de datos se ha implementado con el uso principalmente de enlaces inalámbricos en banda libre (MTC, 2013a, 2013b).

Figura 3

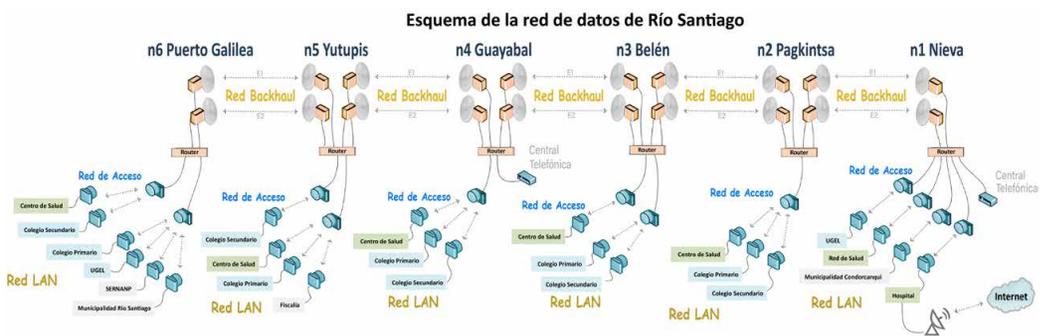
Topología de la red del río Santiago



La red *backhaul* está compuesta por enlaces inalámbricos de larga distancia y se utiliza para interconectar todas las localidades que conforman el proyecto; está diseñada con un doble enlace inalámbrico paralelo entre cada localidad. La red de acceso está compuesta por enlaces inalámbricos de corta distancia para conectar a las instituciones beneficiarias con la red *backhaul*; estos enlaces van desde la torre hasta las instituciones. La red local está compuesta por los equipos de red que utilizará el usuario en cada institución para acceder a los servicios que ofrece la red. En la Figura 4, se muestra un diagrama de las tres redes.

Figura 4

Diagrama de la red del río Santiago



3.1. Red *backhaul*

La red *backhaul* está compuesta por diez enlaces inalámbricos punto a punto de larga distancia que se extienden desde el poblado de Nieva hasta Puerto Galilea; sin embargo, entre cada localidad se ha instalado un doble enlace inalámbrico en paralelo (ver Tabla 1). La distancia de los enlaces inalámbricos va desde los 5 km hasta los 30 km, los cuales están configurados en la banda libre de 5 GHz y cumplen con las restricciones establecidas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Para redirigir el tráfico de datos entre las instituciones beneficiarias, se utiliza un *router* Mikrotik 4011 en cada nodo del *backhaul* (Mikrotik, 2024a). El equipo utilizado para implementar los enlaces inalámbricos es el Cambium PTP 670 (Cambium Networks, 2018), y en los enlaces críticos se utilizan antenas tipo UHPX (Ultra High Performance Extreme) para minimizar las posibles interferencias.

Tabla 1
Enlaces inalámbricos de backhaul

Enlace inalámbrico del <i>backhaul</i> punto a punto	Zona que atraviesa el enlace	Enlace	Frecuencia (MHz)	Distancia (km)
Yutupis (M1) – Galilea (S1)	Zona rural	E1	5805	5
Yutupis (M2) – Galilea (S2)		E2	5320	
Guayabal (M1) – Yutupis (S1)	Zona rural	E1	5250	13
Guayabal (M2) – Yutupis (S2)		E2	5805	
Belén (M1) – Guayabal (S1)	Zona rural	E1	5825	9
Belén (M2) – Guayabal (S2)		E2	5765	
Pagkintsa (M1) – Belén (S1)	Zona rural	E1	5320	30
Pagkintsa (M2) – Belén (S2)		E2	5250	
Nieva (M1) – Pagkintsa (S1)	Zona rural urbano	E1	5280	16
Nieva (M2) – Pagkintsa (S2)		E2	5320	

3.2. Red de acceso

La red de acceso permite la interconexión de la red local de las instituciones beneficiarias con el *backhaul*. Esta red está implementada mediante doce enlaces inalámbricos del tipo punto a punto y punto a multipunto, la distancia de estos enlaces es menor a 2 km, están configurados en la banda libre de 5 GHz y cumplen las restricciones establecidas por el MTC. En la Tabla 2, se muestran los doce enlaces de acceso que se han implementado en cada localidad, los doce máster de acceso y 23 clientes de acceso que lo conforman. Los equipos de telecomunicaciones son Disk Lite (Mikrotik, 2024b), MantBox (Mikrotik, 2024c) y DynaDish Mikrotik (Mikrotik, 2024d).

Tabla 2*Enlaces de inalámbricos de la red de acceso*

Pueblos	Número de máster de acceso	Número de clientes de acceso	Frecuencia (MHz)	Cantidad y tipo de enlaces de acceso
Nieva	4	4	5745	4 PtP ^a links (1 cliente) de 800 m
			5745	
			5745	
			5765	
Pagkintsa	1	3	5745	1 PtM ^b link (3 clientes) de 1,5 km
Belén	2	3	5320	1 PtM link (2 clientes) de 300 m
			5280	1 PtP link (1 cliente) de 1,7 km
Guayabal	1	3	5745	1 PtM link (3 clientes) de 400 m
Yutupis	2	4	5745	1 PtM link (3 clientes) de 1 km
			5825	1 PtP link (1 cliente) de 900 m
Galilea	2	6	5745	1 PtM link (2 clientes) de 700 m
			5825	1 PtM link (4 clientes) de 1,1 km

Nota. ^a PtP: Punto a punto. ^b PtM: Punto a multipunto

3.3. La red local de usuarios

En cada institución se ha implementado un *router* y un punto de acceso wifi BaseBox 2 (Mikrotik, 2024e), el cual permite a todos los usuarios conectarse a los servicios de red.

3.4. Acceso a internet

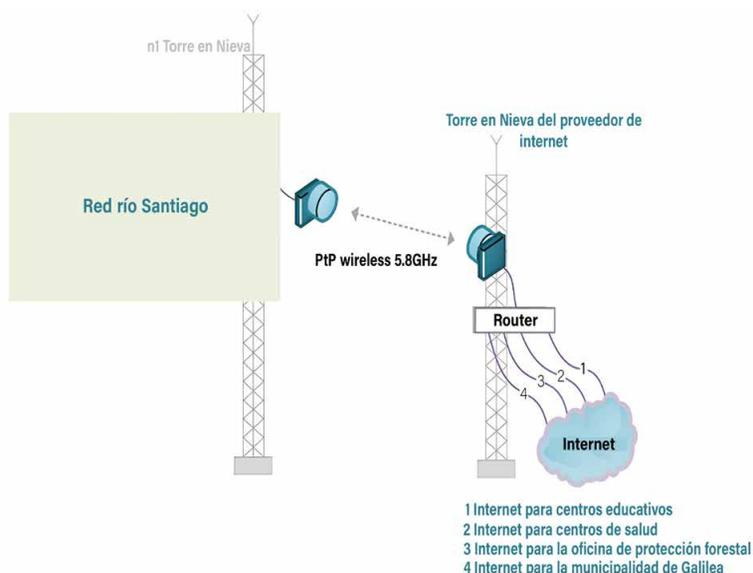
Para conectar la red al servicio de acceso a internet, se ha instalado temporalmente en Nieva, específicamente en el Hospital Santa María de Nieva, un módulo Starlink (Starlink, 2024a, 2024b). Los usuarios hacen uso de este sistema, pero posteriormente las instituciones de salud y educación deberán contratar su propio servicio de internet a través de una empresa operadora ubicada en Nieva (ver Figura 5). Actualmente, la capacidad de acceso a internet con Starlink se asigna de acuerdo con la demanda de cada institución; sin embargo, ello no garantiza una capacidad o disponibilidad específica para su conexión. Por ese motivo, se realizaron mediciones de ancho de banda de manera continua mediante Speedtest durante aproximadamente dos semanas y se obtuvo un promedio de 40/28 MB/s (*downlink/uplink*), que representó una disponibilidad de 99,5 %.

3.5. Acceso a internet cuando la red sea entregada al Gobierno Regional de Amazonas

El servicio de internet que se brinda actualmente a las instituciones es temporal. La meta es que los titulares de las instituciones de salud y educación contraten este servicio en Nieva; la red del río Santiago será el medio para llevar internet a estas instituciones ubicadas en la cuenca del río Santiago. Una empresa de telecomunicaciones en Nieva ya está empezando a brindar el servicio de internet, por lo que el siguiente paso es que las instituciones se pongan de acuerdo para contratarlo. La Figura 5 muestra la futura interconexión de la red del río Santiago con el operador de internet que estará iniciando sus servicios en los próximos meses.

Figura 5

Interconexión entre la red del río Santiago y la empresa proveedora de internet



3.6. Alimentación eléctrica de los equipos

En estas poblaciones no existe servicio público de electricidad y si lo hay es muy inestable. Por ello, se ha optado por utilizar sistemas fotovoltaicos para abastecer de electricidad a los equipos de la red.

4. PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE LA RED DE CONECTIVIDAD

4.1. Capacidad de la red *backhaul*

Para determinar el desempeño de la red, se realizaron pruebas de medición de *throughput* tanto en la red de *backhaul* como en la red de acceso. La red de *backhaul* ha sido

diseñada para proporcionar 10 MB/s (descarga)/3 MB/s (carga) a cada institución para el acceso a internet si todos acceden de manera simultánea; por lo tanto, el enlace crítico para soportar este tráfico es el de Nieva-Pagkintsa, que debería soportar alrededor de 210 MB/s en total. En la Tabla 3, observamos que, de acuerdo con las pruebas, en el mejor de los casos, se tiene 260 MB/s en el enlace Nieva-Pagkintsa, lo que cumple así con el plan de diseño. Los datos fueron obtenidos del mismo equipo Cambium.

Tabla 3*Capacidad de la red backhaul*

Enlaces inalámbricos	Throughput agregado y potencia de recepción	
E1 M1-S2 5805 MHz	Nieva M1	Pagkintsa S1
	-59 dBm	-59 dBm
	280 MB/s	280 MB/s
E2 M2-S2 5320 MHz	Nieva M2	Pagkintsa S2
	-65 dBm	-65 dBm
	260 MB/s	260 MB/s
E1 M1-S2 5250 MHz	Pagkintsa M1	Belén S1
	-59 dBm	-59 dBm
	280 MB/s	280 MB/s
E2 M2-S2 5320 MHz	Pagkintsa M2	Belén S2
	-51 dBm	-50 dBm
	210 MB/s	210 MB/s
E1 M1-S2 5825 MHz	Belén M1	Guayabal S1
	-46 dBm	-45 dBm
	310 MB/s	310 MB/s
E2 M2-S2 5785 MHz	Belén M2	Guayabal S2
	-47 dBm	-46 dBm
	260 MB/s	260 MB/s
E1 M1-S2 5320 MHz	Guayabal M1	Yutupis S1
	-49 dBm	-48 dBm
	270 MB/s	270 MB/s
E2 M2-S2 5260MHz	Guayabal M2	Yutupis S2
	-52 dBm	-53 dBm
	210 MB/s	210 MB/s

(continúa)

(continuación)

Enlaces inalámbricos	Throughput agregado y potencia de recepción	
E1 M1-S2 5280 MHz	Yutupis M1	Galilea S1
	-52 dBm	-52 dBm
	350 MB/s	350 MB/s
E2 M2-S2 5320 MHz	Yutupis M2	Galilea S2
	-49 dBm	-48 dBm
	309 MB/s	310 MB/s

4.2. Capacidad de la red de acceso

Los enlaces inalámbricos no presentan problemas de capacidad para cada institución. En la Tabla 4, se muestra como ejemplo la capacidad obtenida en el enlace Galilea para sus seis clientes, que tiene garantizado alrededor de 50 MB/s para cada institución.

Tabla 4

Capacidad de la red de acceso de Galilea

Máximo throughput agregado	
Máster de acceso 1	Colegio secundario
	150 MB/s máximo, garantizado 75 MB/s
Máster de acceso 1	Municipalidad
	150 MB/s máximo, garantizado 75 MB/s
Máster de acceso 2	Centro de salud
	150 MB/s máximo, garantizado 50 MB/s
Máster de acceso 2	Escuela primaria
	220 MB/s máximo, garantizado 50 MB/s
Máster de acceso 2	UGEL
	220 MB/s máximo, garantizado 50 MB/s
Máster de acceso 2	Sernanp
	200 MB/s máximo, garantizado 50 MB/s

4.3. Capacidad de la red local

En cada institución, los puntos de acceso (AP, del inglés *Access Point*) wifi (IEEE 802.11n) podrán controlar hasta treinta usuarios y su capacidad será de 200 MB/s.

4.4. Latencia y disponibilidad de la red *backhaul*

La red *backhaul* es la red más crítica para el correcto funcionamiento de todo el sistema, por lo que se le realizan mediciones de latencia y disponibilidad (Osiptel, 2018, 2023). Se han desarrollado pruebas durante dos semanas y se ha obtenido que la red muestra una latencia de 6 ms (tiempo de ida y vuelta) y una disponibilidad del 99,53 % (esto representa alrededor de 4 horas de inactividad al año). La medición se efectuó desde el borde de la red *backhaul* con el comando *ping*, con un tamaño de paquete de 1500 bytes. Los resultados de disponibilidad y latencia obtenidos cumplen con los parámetros de calidad sugeridos por Osiptel (2018, 2023) para este tipo de red, por lo que cualquier empresa de telecomunicaciones puede estar interesada en utilizar esta red.

5. RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE LA RED DE CONECTIVIDAD

La red del río Santiago se encuentra operativa desde hace 16 meses y permite que cinco centros de salud y diez centros educativos dispongan de internet. El 17 de junio, la red del río Santiago contaba con 230 usuarios que utilizaban la red. También permitía conectar a los centros de salud con el Hospital Santa María de Nieva para realizar teleconsultas, y a los centros educativos con su respectiva Unidad de Gestión Educativa Local (UGEL). Incluso, posteriormente permitirá que la Municipalidad de Galilea y la Oficina de Protección Forestal de Galilea accedan a internet. En las Figuras 6 al 9, se muestran las torres de telecomunicaciones de la red y el uso que los beneficiarios hacen de la red. En la Figura 6, se muestra el doble enlace inalámbrico del *backhaul* con antenas UHPX de MIMO 2x2 (del inglés *Multiple Input Multiple Output*).

Figura 6

Torre en el pueblo de Nieva



Figura 7

Torre en el pueblo de Galilea



Figura 8

Uso de internet y repositorios digitales en la escuela de Belén



Figura 9

Inducción a la plataforma Telesalud para el personal de salud de Yutupis, Galilea y Belén



5.1. Tráfico global hacia internet

La Figura 10 presenta el tráfico de descargas de internet durante siete días, generado por todos los usuarios de la red. Se puede observar que el mayor volumen de descargas ocurre entre las 6 y las 15 h, que corresponde aproximadamente a 40 MB/s. Por otro lado, la Figura 11 muestra el tráfico de subida a internet durante el mismo periodo, el cual se limita solo a unos 15 MB/s.

Figura 10

Tráfico global de descargas desde internet

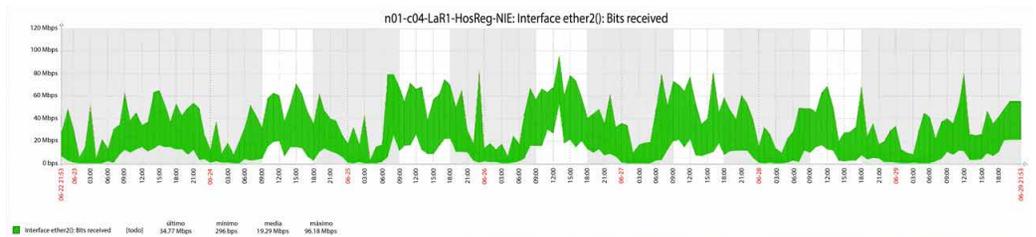
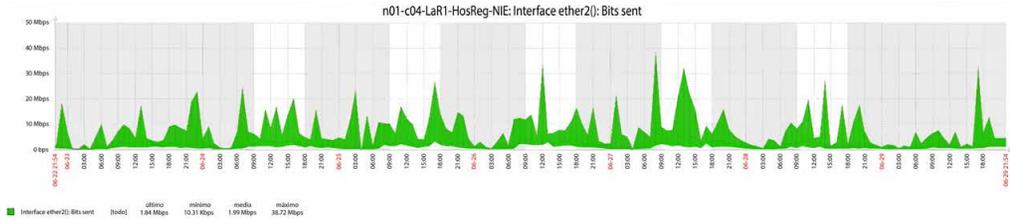


Figura 11

Tráfico de carga global a internet

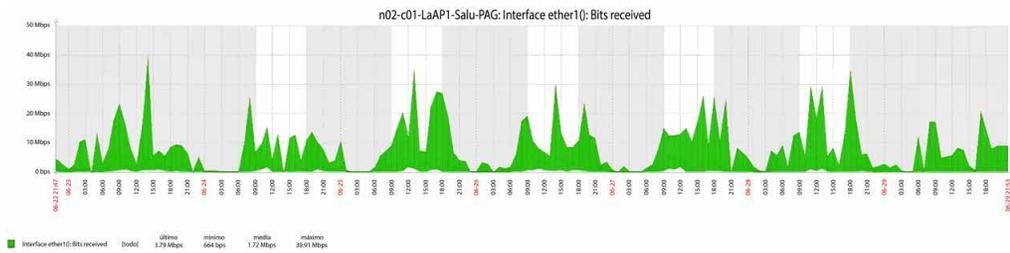


5.2. Tráfico de internet de cada institución

En la Figura 12, se presenta el tráfico de descarga del centro de salud de Pagkintsa durante los siete días. En horas pico se observa un promedio de 10 MB/s.

Figura 12

Tráfico de internet del centro de salud y Pagkintsa

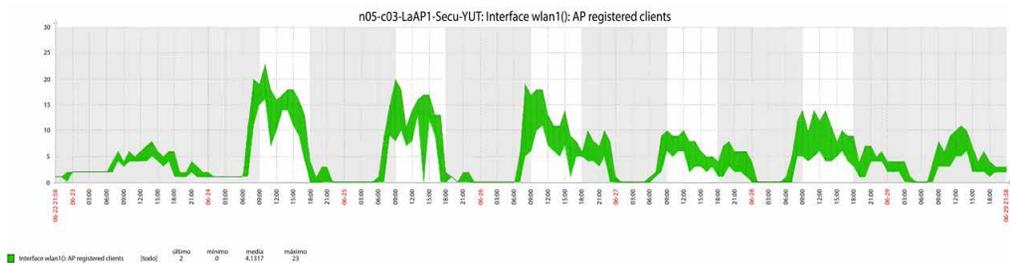


5.3. Número de usuarios que utilizan la red

En la Figura 13, se muestra el número de usuarios de un colegio en Yutupis que utiliza la red en siete días. Se observa que hay un máximo de 23 usuarios que utilizan la red simultáneamente en un día específico.

Figura 13

Número de usuarios que utiliza la red en una escuela secundaria en Yutupis



6. ANÁLISIS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SERVICIO MÓVIL 4G EN LA RED DE CONECTIVIDAD

Uno de los problemas de la red es su mantenimiento. Para solucionarlo, la red podría ser cedida a una empresa privada de telecomunicaciones para ofrecer el servicio móvil 4G, pero antes se debe demostrar que el *backhaul* de la red puede ser usado también como *backhaul* del servicio móvil. Para ofrecer el servicio móvil 4G, se necesitan estaciones base en cada pueblo, los cuales deberán estar conectados al *router* del *backhaul* y uno de sus enlaces se podrá usar como el *backhaul* del servicio móvil.

En Perú, la banda más baja para el servicio móvil es la de 700 MHz (B28), adjudicada en 2016 a tres operadores. Esta banda ofrece mayor cobertura y mejor penetración, de modo que optimiza la cantidad de estaciones base necesarias y proporciona servicios móviles adecuados para zonas rurales. Los valores pico en una estación base 4G con MIMO 2x2 y un ancho de canal de 15 MHz son 110,1 MB/s de descarga y 37,9 MB/s de carga, aunque en condiciones promedio se logran 25,5 MB/s de descarga y 10,5 MB/s de carga (Metsälä & Salmelin, 2015).

A continuación, se calculan los requisitos de capacidad de ancho de banda para atender cada centro poblado con servicio móvil 4G, ya que este servicio se agregará a la red inalámbrica del *backhaul*. Las consideraciones por cada centro poblado son las siguientes:

- Cantidad de estaciones base: 1
- Banda: 700 Mhz
- Diversidad: MIMO 2x2
- Operador móvil de red: 1
- Tipo de antena: Omnidireccional
- Población promedio: 300 habitantes
- Penetración móvil en la región Amazonas al 2022 (Observatorio Nacional de Prospectiva, 2024, Fig. 5): 53,9 %
- Concurrencia: 6 %
- Cantidad de sectores: 1
- Velocidad de descarga por usuario: 2 MB/s
- Velocidad de carga por usuario: 1 MB/s

$$\text{Capacidad DL por nodo de 1 sector} = 300 \times 53,9 \% \times 6 \% \times 1 \times 1 = 19,4 \text{ MB/s} \quad (1)$$

$$\text{Capacidad UL por nodo de 1 sector} = 300 \times 53,9 \% \times 6 \% \times 1 \times 1 = 9,7 \text{ MB/s} \quad (2)$$

Los valores obtenidos están dentro del rango esperado (Metsälä & Salmelin, 2015); se requieren 29,1 MB/s por cada centro poblado. En el enlace crítico del *backhaul* (Pagkintsa-Nieva), la capacidad agregada es 145,5 MB/s, menor al ancho de banda del enlace (210 MB/s), por lo que la red del río Santiago permite soportar el servicio 4G.

Respecto a las condiciones de latencia y pérdida de paquetes, de acuerdo con Metsälä y Salmelin (2015) y las especificaciones 3GPP TS23.203 para aplicaciones que no son de tiempo real, se requiere como máximo un *round-trip time* de extremo a extremo de 200 ms para el plano de control y de 600 ms para el plano de usuario, así como de 0,0001 % para la pérdida de paquete. Por lo tanto, en el *backhaul* de la red se deberá asegurar esta latencia y pérdida de paquetes; como se ha evidenciado, esto se cumple.

7. CONCLUSIONES

El proyecto ha demostrado que la colaboración entre actores públicos y privados puede reducir los plazos de ejecución y optimizar la inversión económica. Un ejemplo de lo anterior se puede encontrar en la obtención de la compatibilidad y la certificación ambiental (menos de ocho meses, cuando el periodo habitual es de más de un año), y en el propio proyecto de inversión pública. Por otro lado, este modelo de asociación, considerado como una innovación pública, tiene al Gobierno como actor principal y utiliza la coordinación y articulación como herramientas claves de gestión. La financiación y articulación de múltiples actores, la alineación con políticas gubernamentales, el uso de bandas no licenciadas, la participación de universidades, la implementación de teleservicios y el apoyo de la cooperación al desarrollo son elementos innovadores para aumentar el acceso a servicios de banda ancha en comunidades rurales aisladas y poco pobladas.

Técnicamente, el proyecto desarrollado para implementar una red de bajo costo ha sido viable, pues se ha logrado instalar una red funcional que brinda un servicio social a localidades rurales que carecían de acceso al servicio de internet. Además, en este proyecto se propuso utilizar redes inalámbricas en bandas libres para interconectar las localidades del río Santiago, las cuales, según el equipamiento, si bien tienen un límite de capacidad, permiten brindar servicios básicos de telecomunicaciones. Precisamente, el uso de bandas libres facilita la implementación de una red de estas características por parte de entidades, como la PUCP, que no son operadores y, si bien no son consideradas en general como una solución óptima, su uso en zonas sin servicio de telecomunicaciones presenta una mínima probabilidad de ser afectadas por posibles interferencias.

REFERENCIAS

Cambium Networks (2018). *User Guide PTP 670 Series System Release 670-02-67*. https://www.cambiumnetworks.com/wp-content/uploads/2018/11/PTP-670-Series-User-Guide_phn-4431_007v000.pdf

- Internet Engineering Task Force. (2022). *Operational Considerations for Streaming Media*. RFC 9317. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9317#name-latency-considerations>
- Martínez-Fernández, A., Vidal, J., Simo-Reigadas, J., Prieto-Egido, I., Agustín, A., Paco, J. A., & Rendón, A. (2016). The TUCAN3G project: wireless technologies for isolated rural communities in developing countries based on 3G small cell deployments. *IEEE Communications Magazine*, 54, 36-43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7509376>
- Metsälä, E., & Salmelin, J. (2015). *LTE backhaul: Planning and optimization*. Wiley Telecom. <https://doi.org/10.1002/9781118924655.ch2>
- Mikrotik. (2024a). *The 4011 series. Fuel your network*. https://i.mt.lv/cdn/product_files/RB4011-IN_240134.pdf
- Mikrotik. (2024b). *DISC Lite5 ac*. https://i.mt.lv/cdn/product_files/DISCplusLite5plusac_180227.pdf
- Mikrotik. (2024c). *mANTBox series*. https://i.mt.lv/cdn/product_files/mANTBox_series_170929.pdf
- Mikrotik. (2024d). *DynaDish 5*. https://i.mt.lv/cdn/product_files/DynaDish_5_170914.pdf
- Mikrotik. (2024e). *Base box*. https://i.mt.lv/cdn/product_files/basebox_out_220151.pdf
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013a, 4 de abril). Modifican el TUO del Reglamento General de la Ley de Telecomunicaciones, el Marco Normativo General para la promoción del desarrollo de los servicios públicos de telecomunicaciones de áreas rurales y lugares de preferente interés social, y establecen disposiciones complementarias. Decreto Supremo N° 006-2013-MTC. *El Peruano*, 492144-492146. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_4485.pdf
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013b, 18 de abril). Modifican la R.M. N° 777-2005-MTC/03 y la Nota P57A del Plan Nacional de Atribución de Frecuencias - PNAF aprobado mediante R.M. N° 187-2005-MTC/03. Resolución Ministerial N° 199-2013-MTC/03. *El Peruano*, 493082-493086. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/358686/1_0_4486.pdf
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2023). *Innovar para conectar: Estrategias y medidas de regulación inteligente para reducir la brecha digital*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4341442/Innovar%20para%20conectar.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

- Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones. (2018). *Metodología para medir los indicadores de nivel de servicio (SLA) de la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1531963/%20Informe%20N%C2%B0%20247-GSF/2018.pdf?v=1609885242>
- Observatorio Nacional de Prospectiva (2024). *Cierre de la brecha digital*. CEPLAN. https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/o10_ama
- Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones. (2023). *Resolución de Consejo Directivo N° 00014-2023-CD/OSIPTEL, Norma que aprueba los procedimientos de supervisión de indicadores de calidad de los servicios públicos de telecomunicaciones*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4084593/Resoluci%C3%B3n%20N%C2%B0%20014-2023-CD/OSIPTEL.pdf?v=1675286903>
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2022). *Proceso de Alianza Multiactor rumbo al Bicentenario*. Plataforma Nacional de Datos Georreferenciados Geo Perú. <https://www.geoperu.gob.pe/alianza-multiactor/>
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2024). *Sobre la Plataforma Digital Georreferenciada*. Plataforma Nacional de Datos Georreferenciados Geo Perú. <https://www.geoperu.gob.pe/marco-de-gobernanza-de-datos/>
- Programa Nacional de Telecomunicaciones. (2021). *Conectividad rural. Una mirada prospectiva del Programa Nacional de Telecomunicaciones*. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2372567/Reporte%20Anual%20PRONATEL%20FINAL-DIGITAL3_compressed.pdf.pdf
- Programa Nacional de Telecomunicaciones. (2022). *Contribución de PRONATEL al cierre de la Brecha Digital en el Perú*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4228612/Contribucio%CC%81n%20de%20Pronatel%20al%20cierre%20de%20brechasC.pdf.pdf>
- Quispe Tacas, R., Paco Fernandez, J. A., & Auccapuri Quispetupa, D. (2021). Design of a wireless network for the interconnection of the villages of the Santiago River. *2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/INTERCON52678.2021.9532828>
- Ramírez García, A., & Blanco Romero, G. (2021). Rediseño institucional para el cierre de brecha residual de telecomunicaciones en Perú: Una tercera vía de intervención para la emergencia de redes comunitarias sostenibles. *Revista Latinoamericana de Economía y Sociedad Digital*, 2, 1-32. <https://doi.org/10.53857/DGVB4810>
- Simo-Reigadas, J., Municio, E., Morgado, E., Castro, E. M., & Martinez, A. (2015). Sharing low-cost wireless infrastructures with telecommunications operators for

backhauling 3G services in deprived rural areas. *2015 IEEE 16th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2015.7158164>

Starlink. (2024a). *Planes de servicio*. <https://www.starlink.com/service-plans>

Starlink. (2024b). *Especificaciones*. <https://www.starlink.com/legal/documents/DOC-1470-99699-90?regionCode=PE>

Ting, A., Chieng, D., Kae Hsiang, K., & Andonovic, I. (2012). Optimization of heterogeneous multi-radio multi-hop rural wireless network. *2012 IEEE 14th International Conference on Communication Technology*, 1159-1165. <https://doi.org/10.1109/ICCT.2012.6511372>

