

**Análisis del impacto en la implementación de radioenlaces en la conectividad en zonas
rurales de Norte de Santander**

Autor

Cristo Elian Mejía Ovalle

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingeniería

Ingeniería de Sistemas

2025

**Análisis del impacto en la implementación de radioenlaces en la conectividad en zonas
rurales de Norte de Santander**

Autor

Cristo Elian Mejía Ovalle

Trabajo de grado presentado para optar al título Ingeniero de Sistemas

Director de Proyecto:

Jesús Emiro Vega

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingeniería

Ingeniería de Sistemas

2025

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Lugar y fecha

Resumen

En Colombia, muchas zonas rurales enfrentan dificultades para acceder a servicios de internet, situación que limita oportunidades de desarrollo social, educativo y económico. Esta brecha digital es particularmente aguda en regiones como Norte de Santander, donde factores como la dispersión geográfica, el conflicto armado y la escasa inversión en infraestructura tecnológica han perpetuado el aislamiento digital. Para abordar este problema, se presenta a continuación una investigación con enfoque descriptivo, basada en la revisión documental de estudios previos sobre conectividad rural y radioenlaces. Se seleccionaron fuentes académicas, informes técnicos y casos aplicados que permitieron analizar las condiciones antes y después de la implementación de esta tecnología.

Los hallazgos indican que los radioenlaces representan una alternativa viable para mejorar la conectividad en zonas rurales, al ofrecer soluciones costo-efectivas frente a la imposibilidad de desplegar redes cableadas. Se documentaron beneficios en acceso a la educación, salud, participación ciudadana y desarrollo económico local, aunque persisten barreras técnicas, sociales y económicas que pueden afectar la sostenibilidad del servicio. En conclusión, los radioenlaces pueden contribuir significativamente a reducir la brecha digital en regiones vulnerables si se acompañan de políticas públicas integrales, capacitación comunitaria y mecanismos de sostenibilidad técnica y financiera.

Palabras clave: radioenlace, conectividad, tecnología, desarrollo, zonas rurales.

Abstract

In Colombia, many rural areas face difficulties accessing internet services, a situation that limits opportunities for social, educational, and economic development. This digital divide is particularly acute in regions such as Norte de Santander, where factors such as geographic dispersion, armed conflict, and limited investment in technological infrastructure have perpetuated digital isolation. To address this problem, a descriptive research approach was developed, based on a documentary review of previous studies on rural connectivity and radio links. Academic sources, technical reports, and applied cases were selected to analyze the conditions before and after the implementation of this technology.

The findings indicate that radio links represent a viable alternative to improve connectivity in rural areas, offering cost-effective solutions when deploying wired networks is not possible. Benefits in access to education, healthcare, citizen participation, and local economic development were documented, although technical, social, and economic barriers persist that may affect the sustainability of the service. In conclusion, radio links can significantly contribute to bridging the digital divide in vulnerable regions if accompanied by comprehensive public policies, community training, and technical and financial sustainability mechanisms.

Keywords: radio links, connectivity, technology, development, rural areas

Tabla de contenido

Resumen	4
Introducción.....	10
Planteamiento del Problema	12
Justificación	14
Objetivos.....	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos	16
Marco Teórico	17
Espectro electromagnético	18
Bandas de frecuencia	18
Estándar IEEE 802.11	19
Redes inalámbricas	20
Radioenlace.....	21
Tipologías de radioenlaces	22
Internet	25
Ancho de banda	26
Tasa de transferencia	27
Criterios de calidad de un radioenlace	27
Pérdidas en trayectoria por el espacio libre	28
Margen de desvanecimiento	29
Diseño Metodológico	31
Tipo de investigación.....	31
Enfoque metodológico.....	31
Técnicas e instrumentos.....	31
Criterios de inclusión y exclusión.....	32
Criterios de inclusión	32
Criterios de exclusión.....	32
Ecuación de búsqueda.....	33
Desarrollo del Proyecto	35
Estado de la conectividad en zonas rurales de Norte de Santander antes de los radioenlaces	35

Impacto documentado de los radioenlaces identificando condiciones en el acceso, uso y calidad de las tecnologías de la información y la comunicación	48
Efectividad, beneficios y barreras identificadas en la adopción de los radioenlaces como alternativa para el acceso a la conectividad digital en zonas rurales de Norte de Santander	52
Conclusiones.....	58
Recomendaciones	60
Bibliografía.....	62

Lista de Tablas

Tabla 1. Selección de la información	34
Tabla 2. Comparativo	40
Tabla 3. Dimensiones	55

Lista de Figuras

Figura 1. Radioenlaces	21
Figura 2. Enlace Punto a Multipunto (PTMP).....	24
Figura 3. Enlace multipunto a multipunto (PTMP).....	25
Figura 4. Ancho de banda.....	26

Introducción

En Colombia, persisten desigualdades significativas en el acceso a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), especialmente en zonas rurales y apartadas. Según el Ministerio TIC (2024), mientras en las zonas urbanas más del 60 % de los hogares cuenta con conexión fija a internet, en las zonas rurales esta cifra no supera el 15 %. Esta brecha digital representa un obstáculo para el desarrollo equitativo del país.

El acceso a internet es un habilitador clave del desarrollo social, educativo y económico. En el departamento de Norte de Santander, la dispersión geográfica, la baja inversión en infraestructura y las secuelas del conflicto armado han profundizado la brecha digital en comunidades rurales, consolidando un aislamiento que limita la calidad de vida y las oportunidades de desarrollo. Municipios como Hacarí, El Tarra o Teorama reflejan de manera crítica estas barreras estructurales e históricas. Ante este panorama, la presente monografía tiene como objetivo analizar el impacto de la implementación de radioenlaces como alternativa para mejorar la conectividad en dichas zonas, evaluando su efectividad, beneficios y limitaciones mediante una revisión documental.

Frente a esta realidad, los radioenlaces surgen como una alternativa técnica viable y de bajo costo para ampliar la cobertura digital. A diferencia de tecnologías tradicionales como la fibra óptica, estos sistemas permiten establecer enlaces inalámbricos en zonas de difícil acceso, ofreciendo una solución inmediata y escalable.

Esta monografía se propone analizar el impacto de la implementación de radioenlaces en zonas rurales de Norte de Santander. Para ello, se aplica una metodología de revisión documental, con el fin de identificar las condiciones previas de conectividad, evaluar los efectos alcanzados en términos de acceso, uso y calidad del servicio, y visibilizar tanto los beneficios como las barreras que enfrenta esta tecnología.

Planteamiento del Problema

A pesar de los avances en conectividad digital en Colombia, persisten brechas significativas entre zonas urbanas y rurales. Según el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), al cierre de 2024 existían más de 9 millones de accesos fijos a internet, concentrados en las ciudades, mientras que departamentos como Norte de Santander continúan enfrentando limitaciones estructurales. La baja inversión en infraestructura, la dispersión poblacional y las secuelas del conflicto armado en regiones como el Catatumbo han consolidado una exclusión digital que profundiza desigualdades y restringe el ejercicio de derechos fundamentales como la educación, la salud y la participación ciudadana.

El impacto de esta desconexión se manifiesta en múltiples esferas. Por ejemplo, estudiantes deben desplazarse grandes distancias para acceder a educación virtual; ciudadanos enfrentan barreras para realizar trámites en línea o acceder a información institucional; y comunidades rurales quedan excluidas de programas de formación, salud digital y comercio electrónico.

La elección de tecnologías adecuadas para brindar conectividad en estas zonas debe considerar aspectos como la topografía, los costos de instalación y mantenimiento, y la sostenibilidad a largo plazo. Las soluciones tradicionales como la fibra óptica o la infraestructura cableada suelen resultar inviables en contextos rurales remotos.

Frente a este panorama, los radioenlaces se perfilan como una alternativa eficiente y costo-efectiva, al permitir la transmisión de datos entre puntos distantes sin necesidad de cableado. No obstante, su implementación exige una evaluación crítica de su impacto, efectividad y sostenibilidad en zonas afectadas no solo por la desconexión, sino también por fenómenos como el desplazamiento forzado, que exige respuestas integrales en materia de conectividad y reparación territorial.

Por tanto, surge la necesidad de investigar cómo la adopción de radioenlaces puede contribuir a reducir la brecha digital en Norte de Santander, evaluando no solo los beneficios técnicos y sociales, sino también las barreras estructurales que persisten y los retos asociados a su apropiación por parte de las comunidades.

Justificación

El acceso a internet se ha consolidado como un factor esencial para el desarrollo educativo, social y económico de las comunidades, pues constituye una herramienta que facilita la inclusión digital y la participación en la vida contemporánea. Sin embargo, en las zonas rurales del departamento de Norte de Santander la carencia de infraestructura tecnológica y la ausencia de políticas públicas sostenidas han limitado gravemente las oportunidades de sus habitantes, profundizando la desigualdad frente a los entornos urbanos.

Esta realidad quedó en evidencia durante la pandemia de COVID-19, cuando la conectividad se convirtió en un requisito indispensable para acceder a la educación virtual, los servicios de salud digital y los trámites institucionales. Muchas familias rurales se vieron forzadas a desplazarse hacia áreas urbanas en busca de acceso a internet, lo que generó impactos negativos en su calidad de vida, aumentó el desarraigo de las comunidades y exacerbó fenómenos como el abandono escolar y la pérdida de vínculos sociales y territoriales. De este modo, la brecha digital en el contexto rural no solo representa un obstáculo tecnológico, sino también una barrera estructural que profundiza la exclusión social y limita el ejercicio efectivo de derechos fundamentales.

En este contexto, los radioenlaces se presentan como una alternativa técnica viable y económica, ya que permiten extender la conectividad sin necesidad de desplegar infraestructura cableada costosa o inviable en zonas de difícil acceso. Desde el punto de

vista técnico, estos sistemas ofrecen ventajas como facilidad de instalación, escalabilidad y flexibilidad operativa.

En el plano social, su implementación favorece el acceso a la educación virtual, a servicios de salud digital y a trámites institucionales, fomentando la inclusión digital y el ejercicio efectivo de derechos. Asimismo, promueve la participación ciudadana y el fortalecimiento de economías locales a través del uso de herramientas digitales.

Por tanto, esta investigación resulta pertinente al proponer un análisis sobre el impacto de la implementación de radioenlaces en zonas rurales de Norte de Santander, con el objetivo de aportar insumos para la formulación de políticas públicas, proyectos de inversión en conectividad y estrategias de sostenibilidad tecnológica en territorios históricamente marginados.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el impacto de la implementación de radioenlaces en la mejora de la conectividad en zonas rurales de Norte de Santander, con la finalidad de comprender su efectividad, beneficios y barreras de acceso a las tecnologías de la información y la comunicación para estas comunidades.

Objetivos Específicos

Identificar la situación en relación con condiciones de conectividad en las zonas rurales de Norte de Santander previo a la implementación de radioenlaces, a través de revisión documental.

Identificar efectos documentados sobre la implementación de radioenlaces en relaciones con términos de acceso, uso y calidad en el servicio de tecnologías de la información y la comunicación en zonas rurales.

Develar efectividad, beneficios y barreras de acceso asociadas a esta tecnología en el contexto rural de Norte de Santander, a partir de estudios, informes técnicos y experiencias previas.

Marco Teórico

La comprensión del impacto de los radioenlaces en la conectividad rural implica que se esbozan algunos fundamentos conceptuales, teóricos y técnicos que permitan dar un contexto sobre el funcionamiento de las redes inalámbricas, el espectro electromagnético y las tecnologías que se asocian a la transmisión de datos. Por esta razón, se presenta a continuación un marco teórico que aborda una revisión estructural de los principales conceptos que sustentan este tipo de alternativas que ofrecen las tecnologías de la información y la comunicación.

Dado que la conectividad a internet en zonas alejadas o rurales implica una serie de retos particulares relacionados con la ubicación geográfica, los costos de infraestructura y las barreras técnicas de las alternativas tradicionales, es importante y significativo examinar aquellas características y ventajas que ofrecen los radioenlaces, los cuales permiten la transmisión de datos entre puntos remotos a través de ondas electromagnéticas, sin que se requiera instalar redes físicas cableadas.

De la misma forma, se abordaron concepto como el de ancho de banda, las bandas de frecuencia, los estándares de redes inalámbricas como el IEEE 802.11 (WiFi), y los diferentes tipos de radioenlaces punto a punto, punto a multipunto y redes en malla, con la finalidad de conocer una perspectiva más clara e integral de las condiciones técnicas necesarias para su implementación. Aunado, se desarrollarán conceptos clave como la tasa de transferencia, el margen de desvanecimiento y la disponibilidad del sistema, que permiten evaluar la calidad del servicio en este tipo de tecnologías.

Finalmente, el presente marco teórico contextualiza la alternativa tecnológica propuesta, pero también los elementos requeridos para la interpretación del impacto real en comunidades rurales como las del departamento de Norte de Santander, en términos de acceso a las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), inclusión digital y desarrollo social.

Espectro electromagnético

El espectro electromagnético comprende un amplio conjunto de ondas naturales, que incluyen aquellas responsables de generar fenómenos como la electricidad, la luz visible, los rayos cósmicos, y que conjuntamente permiten la transmisión de señales en sistemas de telecomunicaciones. La energía electromagnética se propaga de maneras diferentes, bien sea por un conductor, como es un alambre de aluminio, por medio de ondas de radio que se desplazan en el espacio libre, o como luz en una fibra óptica. Esta tipología de energía se distribuye a lo largo de un espectro de frecuencias casi ilimitado. (Novoa & Carreño, 2018)

Bandas de frecuencia

Respecto a las bandas de frecuencia y los servicios asociados, hay que indicar que responden a criterios técnicos establecidos desde hace décadas. Un ejemplo de ello, es el espectro electromagnético que actúa como una banda de microondas, ampliamente utilizada en las comunicaciones por radio, abarcando frecuencias desde los 500 MHz hasta los 40

GHz o incluso más. Este tipo de bandas se subcategorizan en rangos específicos identificados con letras desde la época de 1940.

Según (Novoa & Carreño, 2018) las bandas de frecuencia son usadas para el funcionamiento de diferentes dispositivos y servicios. Algunas de ellas, son la televisión, el internet, la telefonía y la radio, operan mediante la transmisión de señales que atraviesan distancias grandes, muchas veces apoyadas con infraestructuras inalámbricas como son los radioenlaces o las estaciones satelitales. (p.158)

Estándar IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11, comúnmente conocido como WiFi, es reconocido como uno de los primeros protocolos desarrollados para establecer redes de área local inalámbricas (WLAN), consolidándose como el más usado a nivel internacional. Este tipo de estándar permite acceder a internet mediante la metodología de banda ancha en diversos entornos, tanto en el sector público como en el privado, ofertando una alternativa económica y de fácil adopción frente a los modelos tradicionales que exigen una infraestructura cableada. La tecnología WiFi opera a través de un sistema de señales de radiofrecuencia y su principal función es la de interconectar dispositivos electrónicos, permitiendo a través de ellas, la transmisión de datos de forma inalámbrica bajo el uso de puntos de acceso o routers.

Según García, (2016) la tecnología del Wi-Fi ha sido fundamental para desarrollar entornos de aprendizaje virtuales y digitalización de procesos educativos, fortaleciendo

significativamente este sector, y reduciendo las brechas tecnológicas en territorios donde el acceso es limitado. Sumado a ello, el estándar IEEE 802.11 ha evolucionado con el tiempo, dando origen a distintas versiones como 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac y más recientemente 802.11ax (WiFi 6), cada una con mejoras en velocidad, estabilidad y eficiencia en el uso del espectro.

En territorios rurales, aunque el alcance del WiFi puede verse limitado por la distancia o las barreras físicas, herramientas o alternativas como los radioenlaces permiten ampliar la cobertura, conectando a las comunidades que residen en sectores remotos con centros de acceso a internet. De esta manera, WiFi continúa siendo una herramienta clave para promover la inclusión digital y garantizar el derecho a la información y la comunicación en zonas vulnerables.

Redes inalámbricas

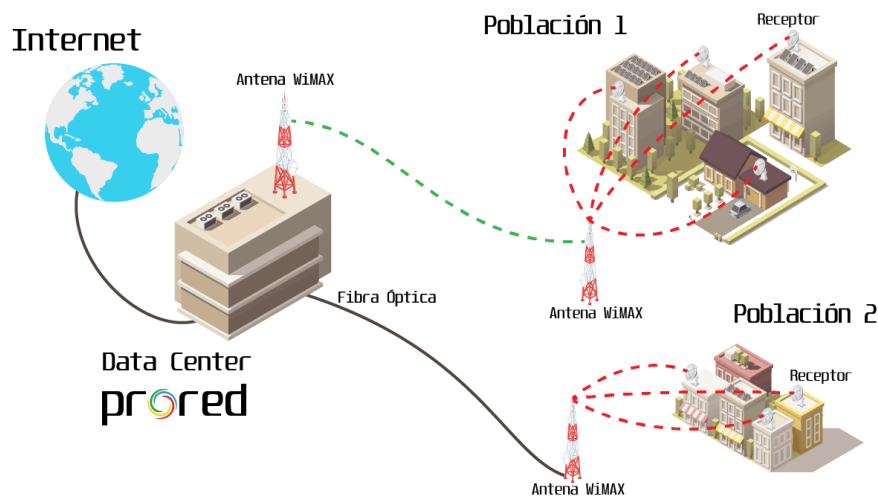
Este tipo de tecnologías inalámbricas varían según la velocidad de transmisión, la frecuencia usada y el alcance, influyendo en su rendimiento y en las aplicaciones que pueden soportar. Este tipo de redes posibilitan que múltiples dispositivos puedan conectarse entre sí y al internet mediante un punto de acceso o router inalámbrico, eliminando la necesidad de conexiones por cable. Dentro de las principales ventajas de este tipo de herramientas, se encuentra que permiten mantener la conectividad incluso durante el desplazamiento por cierta área, aportando al mejoramiento en la movilidad y flexibilidad del usuario. En función de su cobertura, estas redes pueden clasificarse como redes de área personal (WPAN), de área local (WLAN), de área metropolitana (WMAN) o de área

amplia (WWAN), cada una diseñada para responder a distintos escenarios de uso (Salveti, 2011).

Radioenlace

El radioenlace se define como un sistema de comunicaciones inalámbrico que permite la transmisión de información entre dos o más puntos geográficos a través del uso de ondas de radio. Esta alternativa tecnológica permite intercambiar datos a través de señales electromagnéticas, que se propagan por el aire entre antenas instaladas en ubicaciones específicas, sin que se requiera una infraestructura cableada. (Martínez, 2018)

Figura 1. Radioenlaces



Nota: imagen del radioenlace tomado de www.google.com

Aunado, este tipo de tecnologías se usan comúnmente en comunicación punto a punto, y operan mediante frecuencias superiores a 1 GHz, ubicándose dentro del espectro de las microondas, motivo por el cual también se les conoce como enlaces de radio de

microondas. Así mismo, hay que indicar que este tipo de alternativas presentan algunas barreras en términos de disponibilidad y calidad en comparación con medios cableados, pero ofrecen mayor eficiencia y economía en territorios donde el despliegue de cables resulta técnica o financieramente inviable.

En contexto, este tipo de tecnologías de la información y la comunicación, como son los radioenlaces permiten alcanzar coberturas de hasta 70 kilómetros, ofreciendo anchos de bandas que se acercan a 11 Gbps y mantener una buena eficiencia espectral, convirtiéndose hoy en día en una solución óptima para las áreas urbanas y rurales, permitiendo establecer redes confiables incluso a nivel intermunicipal o regional (Martínez, 2018).

Tipologías de radioenlaces

De acuerdo con algunos autores, los radioenlaces se encuentran categorizados, de la siguiente forma:

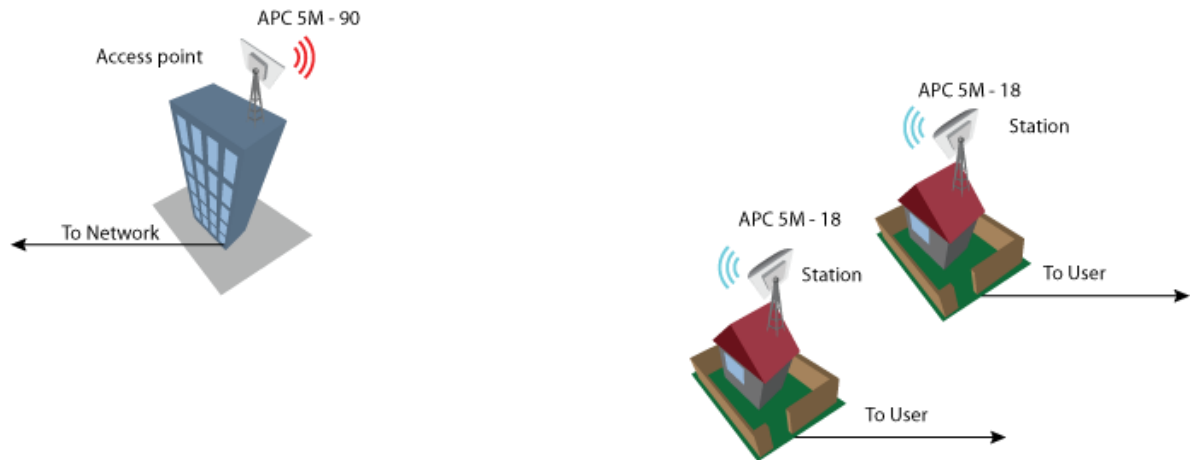
Enlace Punto a Punto (PTP). Hace referencia a un radioenlace que es viable con una distancia que varía entre 20 metros y 50 kilómetros, permitiendo una interconexión de dos redes remotas, a través de un canal de comunicación inalámbrico. Los enlaces punto a punto se usan generalmente para establecer comunicaciones específicas entre dos ubicaciones, especialmente cuando no existen tecnologías convencionales debidamente instaladas o con cobertura en la zona. Este tipo de enlaces ofrecen soluciones para actividades como transmisión en video, telefonía IP empresarial, transferencia de datos de

red, e incluso interconexión entre sedes remotas, funcionando como una alternativa eficaz en entornos aislados o de difícil acceso (Agudelo & Zuluaga, 2022).

Una vez son configuradas las redes de punto a punto, es importante considerar el modo de transmisión de datos que se va a aplicar. En modo simple, la comunicación se da en una sola dirección. Por su parte, en modo half dúplex, ambos dispositivos pueden transmitir y recibir, pero no al mismo tiempo; primero uno envía y luego el otro responde. Y finalmente, se encuentra el modo full dúplex, que permite una transmisión de datos entre ambas direcciones de forma simultánea, permitiendo una comunicación eficiente y fluida. (Agudelo & Zuluaga, 2022)

Enlace Punto a Multipunto (PTMP). Se trata de enlaces donde el canal de comunicación se vincula simultáneamente con varios centros a través de una única línea compartida por los terminales de la red. A través de estos se permite que fluya la información en ambos sentidos y se encuentre disponible para todos los terminales que se conecten. Esta modalidad representa grandes ventajas económicas, pero por otra parte, tiene una desventaja con la disminución de la velocidad en la transmisión de datos. Aunado a lo anterior, su formulación y adopción tienen mayor complejidad al compararse con otros enlaces, debido a la competencia entre múltiples nodos por los recursos disponibles de la red (Agudelo & Zuluaga, 2022).

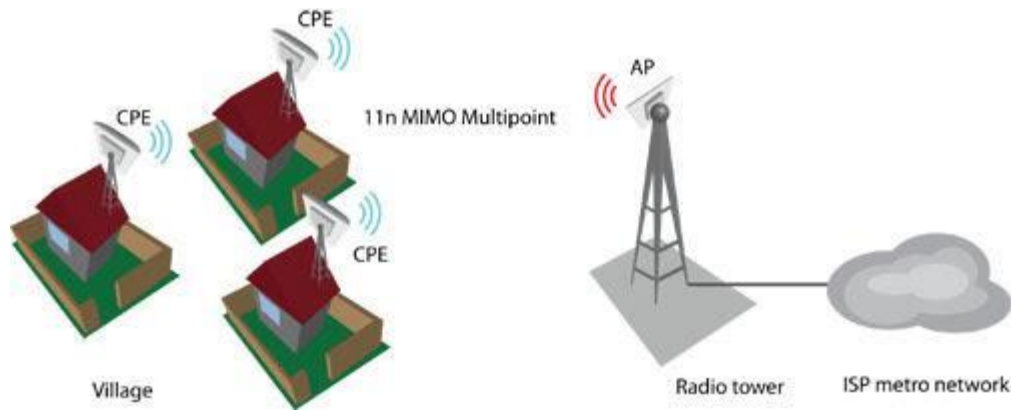
Figura 2. *Enlace Punto a Multipunto (PTMP).*



Nota: imagen del enlace punto a multipunto tomado de www.google.com

Enlace multipunto a multipunto (PTMP). También se le conoce como red ad-hoc y permite una configuración donde el nodo central de una red tiene la capacidad para comunicarse con cualquiera de los demás nodos. Este tipo de estructuras fortalece la incorporación de nuevos nodos sin necesidad de modificar la configuración de los ya existentes, toda vez que existe una red central fija y un nodo debe ser ubicado estratégicamente para mantener la conectividad. (Agudelo & Zuluaga, 2022)

Figura 3. Enlace multipunto a multipunto (PTMP)



Nota: imagen del enlace multipunto a multipunto tomado de www.google.com

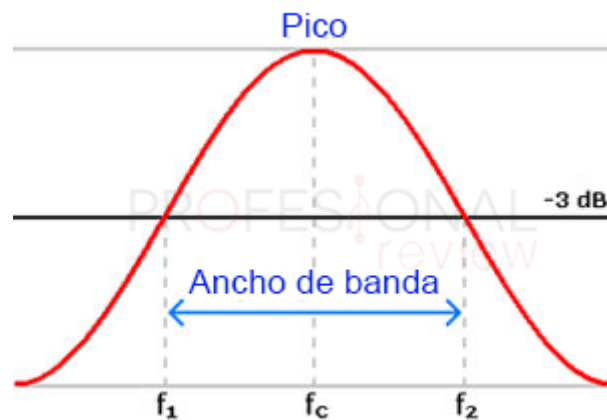
Internet

Este tipo de tecnologías se definen como redes globales de computadores interconectados. El mismo permite a las personas acceder a una red, que generalmente no es exclusivamente una infraestructura, sino también un conjunto de servicios y aplicaciones. Desde el contexto físico, el internet se compone por una cantidad de herramientas que tienen gran capacidad de almacenamiento en diferentes partes del mundo, y que conectan entre sí mediante diversos medios como cables, enlaces satelitales o radiofrecuencias. Las computadoras que conforman esta red no son idénticas entre sí, ya que cada una cumple funciones distintas (Tercero & Rivera, 2013).

Ancho de banda

Otro de los conceptos importantes, se relaciona con el ancho de banda, que se relaciona con la cantidad de datos que se pueden transmitir de un punto al otro en un intervalo de tiempo delimitado. Dicha capacidad se expresa en unidades como los kilobits por segundo (kbps), megabits por segundo (Mbps) y gigabits por segundo (Gbps), donde 1 kbps equivale a 10^3 bps (bits por segundo), 1 Mbps a 10^6 bps, y 1 Gbps a 10^9 bps.

Figura 4. Ancho de banda



Nota: imagen del ancho de banda tomado de www.google.com

Tasa de transferencia

Por su parte, el ancho de banda real se puede evaluar mediante las bandas específicas de internet cuando se descargan archivos. La velocidad de las transferencias obtenidas depende del volumen que se esté transmitiendo como del número de usuarios a los que se está dirigiendo la transferencia. (Tercero & Rivera, 2013)

Criterios de calidad de un radioenlace

Finalmente, el funcionamiento de los radioenlaces, requiere que se cumpla con estándares de calidad conforme funciones los sistemas de transmisión, garantizando un servicio eficiente. De acuerdo con Rodríguez, (2003) existen algunos factores que son determinantes para la calidad del radioenlace, como son la disponibilidad y la fidelidad. Investigaciones como las de Pérez et al. (2021) y Torres & Ramírez (2020) resaltan que la calidad de los radioenlaces hoy depende de tecnologías de gestión automatizada que ajustan el enlace en función de parámetros de entorno, como la interferencia electromagnética y la meteorología. Estas soluciones, respaldadas por sistemas SDN (Redes Definidas por Software), permiten mantener tasas de disponibilidad por encima del 95 % en zonas rurales con condiciones adversas.

La disponibilidad de este hace referencia a la capacidad de un equipo o sistema para poder operar según lo previsto, expresándose como la probabilidad de que se encuentren en condiciones funcionales en un momento específico. Este concepto abarca tanto en periodos

en los que el sistema está disponible como los de indisponibilidad. Para evaluar este aspecto, se establece un umbral de tolerancia que marca el límite a partir del cual se considera que el desempeño del sistema ha disminuido. La indisponibilidad total se calcula dividiendo la suma de los tiempos en que el sistema no estuvo operativo por el tiempo total de observación, según la fórmula:

$$U = \Sigma T_{\text{indisp}} / T \times 100 (\%).$$

Por otro lado, la fidelidad se relaciona con la precisión y la calidad de la señal recibida. Cuando el radioenlace opera bajo condiciones normales, pueden ocurrir pequeñas interrupciones o degradaciones menores que provocan errores en los bits transmitidos. Estas alteraciones afectan la claridad de la señal, es decir, su fidelidad. Esta se mide en distintos niveles y se cuantifica con base en los márgenes de error tolerables y el porcentaje de tiempo en que no deben ser sobrepasados (Rodríguez, 2003).

Pérdidas en trayectoria por el espacio libre

Lo que comúnmente se conoce como pérdida en trayectoria por el espacio libre ocurre cuando una onda electromagnética viaja en línea recta a través del vacío, sin que haya absorción ni reflexión por parte de objetos cercanos. Aunque se le llama "pérdida", en realidad no se pierde energía como tal; lo que sucede es que, a medida que la onda se aleja de su fuente, la energía se va distribuyendo en un área cada vez mayor, lo que hace que la potencia disponible en un punto específico disminuya. Por eso, un término más preciso para describir este fenómeno sería pérdida por dispersión. Esta pérdida ocurre por un principio

físico básico: la ley del cuadrado inverso, que indica que la intensidad disminuye a medida que aumenta la distancia. Así, estas pérdidas están directamente relacionadas con la distancia que debe cubrir el radioenlace y la frecuencia con la que se transmite (Tomasi, 2003).

Estudios recientes Ramírez & Cárdenas, (2022) han incorporado el uso de modelos como ITU-R P.530 y herramientas de simulación GIS para estimar pérdidas por trayectoria en zonas rurales montañosas, ajustando los márgenes de diseño de los radioenlaces para optimizar la cobertura y eficiencia espectral.

Margen de desvanecimiento

El margen de desvanecimiento es una pérdida que se presenta por diversas razones, aunque la más común está relacionada con la trayectoria que sigue la señal en un radioenlace. Esta puede verse afectada por la inclinación del terreno o por características topográficas que no son adecuadas para este tipo de tecnología.

En términos generales, el margen de desvanecimiento se incorpora como un factor adicional de seguridad dentro del cálculo de ganancia del sistema, con el fin de compensar las condiciones no ideales e impredecibles de la propagación de ondas de radio. Estas condiciones incluyen fenómenos como la propagación por trayectorias múltiples, en la que la señal rebota en diferentes superficies antes de llegar al receptor, y también la interacción con el relieve del terreno, que puede amplificar o atenuar la señal. Todos estos factores provocan alteraciones temporales y anómalas en la propagación, especialmente por efectos

atmosféricos, que terminan afectando negativamente el rendimiento y la eficiencia del sistema. (Saiz, Jácome & Caraballo, 2023).

Diseño Metodológico

Tipo de investigación

El trabajo de investigación se enfocó en una metodología de tipo descriptivo documental, fundada en un análisis y revisión de información existente sobre la implementación de radioenlaces en zonas rurales de Norte de Santander. A partir de allí se aborda una comprensión del impacto de esta tecnología a partir de fuentes secundarias, como son artículos científicos, documentos institucionales, informes técnicos y estudios de caso previamente publicados.

Enfoque metodológico

El enfoque que se adoptó fue el método cualitativo, que permitió la interpretación y análisis de la información recopilada, identificando beneficios, ventajas y barreras en la implementación de los radioenlaces en escenarios rurales. Así mismo, no se aplicaron ni encuestas ni recolección de datos primarios, sino una revisión documental de la literatura especializada.

Técnicas e instrumentos

Respecto a las técnicas e instrumentos dentro de la investigación, se usó la revisión documental, apoyándose en bases de datos académicas como RedALyC, Dialnet, Scielo y Google Académico. Para la organización y análisis de la información, se empleó una

matriz de análisis documental en la que se sistematizaron los datos encontrados por categorías temáticas.

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión

Como criterio de inclusión se tuvo en cuenta que fuentes documentales publicadas durante 2010 a 2025, asegurando que fuesen actuales y pertinencia de la información.

Seguidamente, se tuvieron en cuenta artículos científicos, trabajos de grado, informes técnicos, políticas públicas y estudios de caso direccionados sobre la temática de investigación, conectividad rural y tecnologías de acceso a internet.

Complementariamente, las fuentes fueron en español y tienen análisis relevantes para el contexto colombiano.

Y finalmente, se tuvo como base documentos que incluyen datos técnicos, evaluaciones de impacto, beneficios y limitaciones de los radioenlaces.

Criterios de exclusión

Documentos sin sustento académico, institucional o técnico como foros, blogs, y publicaciones.

Fuentes que fueron publicadas antes de 2010 y que no tengan información actualizada sobre la temática.

Estudios enfocados exclusivamente en tecnologías no relacionadas con radioenlaces, como fibra óptica o redes móviles urbanas.

Publicaciones con sesgos comerciales o de opinión sin evidencia técnica.

Ecuación de búsqueda

Referente a la ecuación de búsqueda, esta se formuló bajo una serie de consultas estructuradas de forma similar a una ecuación matemática, en la que se combinan diferente término y operadores lógicos para la obtención de resultados específicos. De la misma forma, que sucede en una ecuación matemática se busca encontrar una combinación óptima entre los términos que permitió identificar estudios relevantes y evitando resultados relevantes.

Para orientar la búsqueda documental, se emplearon ecuaciones que combinan términos clave relacionados con radioenlaces, conectividad y zonas rurales. A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas:

“Radioenlaces” AND “conectividad” AND “zonas rurales” AND “Colombia”

“Conectividad rural” AND “tecnologías inalámbricas” AND “acceso a internet”

“Tecnologías de la información y la comunicación” AND “ruralidad” AND “radioenlaces”

“Acceso a internet” AND “brecha digital” AND “comunidades rurales” AND
“radioenlace”

“Impacto social” AND “radioenlaces” AND “Norte de Santander” OR “zonas
rurales”

Tabla 1. Selección de la información

Ecuación de búsqueda	RedALyC	Researchgate	SciELO	Google Académico
“Radioenlaces” AND “conectividad” AND “zonas rurales” AND “Colombia”		1		1
“Conectividad rural” AND “tecnologías inalámbricas” AND “acceso a internet”				1
“Tecnologías de la información y la comunicación” AND “ruralidad” AND “radioenlaces”				1
“Acceso a internet” AND “brecha digital” AND “comunidades rurales” AND “radioenlace”	2			
“Impacto social” AND “radioenlaces” AND “Norte de Santander” OR “zonas rurales”	1	1	1	1

Desarrollo del Proyecto

El presente capítulo expone los hallazgos derivados de la revisión documental sobre el impacto de los radioenlaces en la conectividad de las zonas rurales de Norte de Santander. A partir de la sistematización de estudios académicos, informes técnicos y casos aplicados, se organiza la información en torno a tres ejes de análisis: el estado de la conectividad antes de la implementación de los radioenlaces, los efectos documentados de esta tecnología en términos de acceso, uso y calidad de los servicios digitales, y la identificación de beneficios, limitaciones y barreras que han acompañado su adopción en contextos rurales.

El propósito de este apartado no es únicamente describir experiencias previas, sino también establecer un marco comparativo que permita comprender las particularidades de Norte de Santander frente a otros territorios rurales de la región andina. De esta manera, se busca valorar la efectividad real de los radioenlaces como alternativa tecnológica, al tiempo que se visibilizan los retos sociales, económicos y técnicos que condicionan su sostenibilidad en el mediano y largo plazo.

Estado de la conectividad en zonas rurales de Norte de Santander antes de los radioenlaces

El propósito de esta sección es examinar el estado de la conectividad en Norte de Santander y contrastarlo con experiencias investigativas previas en Colombia y América Latina que han explorado el uso de redes inalámbricas y radioenlaces como estrategia de inclusión digital. El análisis, permite observar cómo diferentes propuestas académicas han

contribuido desde 2010 a evidenciar la magnitud de la brecha digital y a plantear soluciones viables en contextos rurales.

Uno de los antecedentes iniciales es el estudio de Caiza, Proaño y Jiménez (2015), titulado “Diseño de una Red para Brindar Acceso a Internet a las Instituciones Educativas del Cantón Pujilí”. Esta investigación permitió identificar limitaciones estructurales similares a las que enfrenta Norte de Santander: territorios con clima extremo, geografía montañosa y dispersión poblacional que dificultan la expansión de redes cableadas modernas. En Ecuador, como en el Catatumbo, el Estado ha priorizado obras de infraestructura básica sobre la conectividad digital, perpetuando desigualdades y afectando derechos como la educación y el acceso a la información.

En el caso colombiano, Alba y Navarro (2017) desarrollaron la tesis “Diseño de una red de datos para la Institución Educativa Aguas Claras de Ocaña, Norte de Santander”. Su diagnóstico evidenció que la ausencia de conectividad digital obstaculizaba los procesos de aprendizaje, administrativos y comunicacionales en la institución, mostrando cómo las deficiencias en infraestructura tecnológica afectan de manera directa la calidad educativa en zonas rurales. Las autoras concluyen que es indispensable implementar redes que suplan la carencia de infraestructuras tradicionales, resaltando la necesidad de soluciones escalables y sostenibles como los radioenlaces.

Un año después, en Perú, Fernández (2018) presentó el estudio “Diseño de una red inalámbrica de banda ancha para mejorar la transmisión de datos y voz de la organización Iglesia del Nazareno en Lambayeque”. Allí se identificó que las deficiencias en

telecomunicaciones profundizaban la brecha digital entre zonas urbanas y rurales, afectando sobre todo a niños y adolescentes en edad escolar. El autor propuso la implementación de redes inalámbricas en la banda no licenciada de 5.8 GHz, lo que ofrecía facilidad de instalación, bajos costos y gran flexibilidad en territorios donde el cableado era inviable o excesivamente costoso.

A nivel nacional, la evolución de proyectos técnicos ha permitido validar la pertinencia de los radioenlaces como alternativa. En Antioquia, Moncada Colorado, Gómez Gaviria y Yepes Zuluaga (2015) diseñaron un radioenlace digital de microondas como backbone de bajo presupuesto, enmarcado en el Plan Vive Digital, destacando no solo la viabilidad técnica, sino también su papel en la inclusión social y la reducción de la pobreza. Posteriormente, en Boyacá, Novoa y Carreño (2018) diseñaron radioenlaces para instituciones educativas de El Cocuy, logrando superar limitaciones geográficas mediante nodos intermedios y demostrando la factibilidad financiera del proyecto. Finalmente, en el corregimiento de La Gabarra (Tibú, Catatumbo), Martínez Rincón (2020) confirmó la viabilidad técnica y económica de un radioenlace punto a punto en la banda de 5 GHz, con aplicaciones directas en el territorio de estudio.

En 2021, Durán Zapata desarrolló en la Universidad Autónoma de Occidente, en colaboración con EMCALI, un trabajo orientado al rediseño de un sistema de telecomunicaciones mediante radioenlaces en zonas rurales y urbanas del Valle del Cauca. El estudio partió de la identificación de deficiencias en la infraestructura existente, implementada varios años atrás, que no respondía a la demanda creciente de usuarios. Además, se encontró que algunos enlaces funcionaban en bandas licenciadas y otros en no

licenciadas, lo que requería una reorganización estratégica del espectro. La propuesta consistió en un nuevo diseño soportado en cálculos matemáticos, pruebas de tráfico y simulaciones, garantizando un sistema más eficiente y con capacidad de responder a las necesidades presentes y futuras. Este caso resulta ilustrativo porque, más allá de resolver un problema puntual de cobertura, enfatiza en la importancia de planificar con visión de sostenibilidad y expansión en el tiempo.

Un año después, en 2022, Perea Murillo desde la UNAD propuso el “diseño de una red de telecomunicaciones para el corregimiento Cauca, en Cartago (Valle del Cauca)”, con el fin de reducir las brechas digitales en esta zona rural. A diferencia de Durán Zapata, cuyo trabajo se enfocó en reorganizar sistemas ya existentes, la propuesta de Perea partió de la ausencia casi total de infraestructura de conectividad, lo que hacía urgente plantear soluciones de última milla y redes comunitarias para ampliar la cobertura. El proyecto incluyó un análisis de proveedores, tecnologías de acceso y características geográficas, proponiendo un esquema de distribución alternativo y flexible que buscaba garantizar sostenibilidad técnica y económica.

En términos críticos, el estado de la conectividad en Norte de Santander revela una contradicción estructural: mientras que el internet se ha consolidado como un derecho habilitante para la educación, la participación ciudadana y el desarrollo económico, en las zonas rurales del departamento sigue operando bajo la lógica de la exclusión y la precariedad. Las investigaciones revisadas coinciden en que el problema no se reduce únicamente a factores técnicos, como la falta de infraestructura o la geografía montañosa, sino que obedece a un entramado histórico de abandono estatal, conflicto armado y

ausencia de políticas sostenidas en materia de telecomunicaciones. De este modo, el acceso digital no solo es limitado, sino que reproduce las desigualdades sociales ya existentes, relegando a las comunidades rurales a un círculo de marginación educativa, económica y cultural. En este contexto, la apuesta por los radioenlaces emerge no como una alternativa secundaria, sino como una estrategia necesaria y urgente para garantizar inclusión digital en territorios históricamente olvidados.

Tabla 2. Comparativo

Autor/Año	Objetivo del Estudio	Metodología	Principales Hallazgos	Fortalezas	Limitaciones	Relevancia para esta investigación
Moncada Colorado et al. (2015)	Diseñar un radioenlace digital de microondas de bajo presupuesto o como backbone para zonas	Proyecto técnico de diseño e implementación bajo el marco del Plan Vive Digital.	Viabilidad técnica y social de radioenlaces de bajo costo.	Integra conectividad con inclusión social y reducción de pobreza.	Limitado a un piloto regional; falta de evaluación a largo plazo.	Demuestra cómo radioenlaces pueden ser política pública de inclusión digital.

rurales de

Antioquia.

Caiza,	Diseñar	Diagnóstico	Geografía montañosa	Analiza	Enfoque centrado en	Aporta contexto
Proaño &	red para	territorial y	limita la expansión de	condiciones	diagnóstico inicial, sin	comparado
Jiménez	institucion	modelamien	fibra óptica; se requieren	geográficas	implementación completa	regional sobre
(2015)	es	to con	alternativas inalámbricas.	similares al		limitaciones
	educativas	Radio		Catatumbo.		estructurales.
	en Pujilí,	Mobile.				
	Ecuador.					

Alba & Navarro (2017)	Diseñar red de datos para la I.E. Aguas Claras en Ocaña.	Tesis de grado con diagnóstico institucional y propuesta de red.	Ausencia de conectividad limita procesos académicos y administrativos.	Muestra impacto directo en educación rural de Norte de Santander.	Limitada a un solo caso institucional.	Relevancia directa para el contexto de esta investigación en el Catatumbo.
Fernández, (2018)	Mejorar conectividad de la Iglesia del Nazareno en Lambayeque, Perú.	Diseño de red inalámbrica de banda ancha (5.8 GHz).	Instalación sencilla, bajos costos y flexibilidad en zonas rurales.	Propuesta replicable en entornos rurales latinoamericanos.	Caso particular institucional, no regional.	Permite contrastar viabilidad técnica con soluciones aplicables al Catatumbo.

Novoa & Carreño (2018)	Diseñar radioenlaces para institución es educativas de El Cocuy.	Modelamiento con Radio Mobile y análisis espectral.	Viabilidad técnica y financiera con uso de Cerro Mahoma como nodo intermedio	Considera aspectos técnicos, económicos y sociales	Dependencia de nodos de altura para garantizar conexión.	Comparte retos de geografía montañosa con Norte de Santander.
Martínez Rincón (2020)	Diseñar radioenlace punto a punto en La Gabarra, Tibú.	Simulación con software Ubiquiti (Airlink).	Viabilidad técnica y económica del enlace en 5 GHz.	Caso aplicado directamente al Catatumbo.	No incluye análisis de sostenibilidad social a largo plazo.	Antecedente clave para soluciones en Norte de Santander.

Durán Zapata (2021)	Rediseñar sistema de telecomunicaciones con radioenlaces en EMCALI.	Simulación, pruebas de tráfico y cálculos matemáticos.	Necesidad de reorganización entre bandas licenciadas y no licenciadas.	Enfatiza sostenibilidad y expansión futura.	Enfoque urbano-rural; menos centrado en zonas apartadas.	Aporta visión de planificación sostenible aplicable a Norte de Santander.
Perea Murillo (2022)	Diseñar red de telecomunicaciones en corregimiento	Diagnóstico geográfico, análisis de proveedores y diseño de red comunitaria.	Cobertura alternativa con soluciones de última milla.	Integra sostenibilidad técnica y comunitaria.	Limitado a estudio de caso local.	Resalta pertinencia de redes comunitarias como complemento a radioenlaces.

	Cauca, Cartago.					
Tapias & Camacho (2019)	Implementación de radioenlaces en el hospital de la Candelaria para telemedicina.	Estudio de caso. Implementación práctica	Conexión efectiva entre hospital y puestos de salud; mejora en servicios de telemedicina.	Evidencia aplicada en salud.	Limitado al sector sanitario.	Relevante para analizar beneficios en salud rural en Colombia.
Pérez, Gómez	Analizar estrategias de	Estudio técnico,	Redes con monitoreo automatizado alcanzan disponibilidad 95%	Propuesta innovadora con	No considera factores sociales o de	Útil para evaluar sostenibilidad técnica en zonas rurales

& Tovar (2021)	resiliencia en radioenlac es rurales	simulacione s.		tecnologías SDN	adopción comunitaria.	
Ramírez & Cardena s (2022)	Modelar pérdidas en radioenlac es rurales mediante ITU-R y GIS	Modelado matemático y simulacione s	Mejora diseño al ajustar márgenes de cobertura en zonas montañosas.	Precisión técnica para contextos complejos	No analiza beneficios sociales.	Complementa diseño técnico para Norte de Santander por su geografía montañosa

Nota fuente: Elaboración propia con base en los autores citados (2015–2022).

A partir de la revisión documental, se pudo establecer que previo a la implementación de radioenlaces, las zonas rurales del departamento de Norte de Santander presentan condiciones críticas en términos de conectividad digital. Desde una perspectiva de ingeniería de sistemas, se identificaban múltiples obstáculos estructurales y técnicos que dificultan el acceso eficiente y continuo a servicios de internet. Factores como la geografía montañosa, la baja densidad poblacional y la falta de infraestructura adecuada impedían el despliegue de soluciones cableadas como la fibra óptica.

Estas limitaciones se agravaron en municipios como Hacarí, Teorama y San Calixto, donde además de las condiciones físicas del terreno, se sumaban las consecuencias históricas del conflicto armado, generando retrasos significativos en los planes de desarrollo tecnológico. La ausencia de conectividad estable restringía la operación de instituciones educativas, centros de salud y dependencias administrativas, afectando directamente el acceso a servicios esenciales y la interacción con plataformas digitales.

Desde el enfoque técnico, los estudios analizados evidencian que la infraestructura previa se basaba mayoritariamente en redes móviles con cobertura intermitente o en conexiones satelitales de alto costo, las cuales presentan baja capacidad de transmisión, latencia elevada y escasa fiabilidad. Esta situación limitaba la implementación de aplicaciones en tiempo real, restringía el acceso a plataformas virtuales y desincentivaba el uso de herramientas TIC por parte de la comunidad.

En conclusión, el diagnóstico previo a la intervención con radioenlaces permite establecer que existía una brecha tecnológica significativa que requería soluciones viables, escalables y de rápida implementación, como las tecnologías inalámbricas de mediano alcance que permiten cubrir topografías complejas con menor inversión inicial.

Impacto documentado de los radioenlaces identificando condiciones en el acceso, uso y calidad de las tecnologías de la información y la comunicación

Posterior a ese primer objetivo, hay que afirmar que luego de la revisión documental de diez artículos académicos, entre trabajos de grados, artículos de revistas reconocidas e informes, se pudo determinar que la implementación de radioenlaces en zonas rurales es una alternativa cuyos efectos positivos se reflejan en el acceso, uso y calidad en los servicios de tecnologías de la información y la comunicación, especialmente en escenarios donde la infraestructura tradicional no es viable por condiciones técnicas, económicas, sociales, geográficas, demográficas, entre otras.

En el primer punto, es decir el acceso a los servicios de conectividad, hay que indicar que los autores consultados, dan cuenta que la adopción de los radioenlaces en zonas rurales, permite mejorar el acceso y la democratización de la conectividad. En el trabajo de investigación realizado por (Tapias & Camacho, 2019), se identifica que mediante este tipo de alternativas se logran redes de punto a punto, y punto de multipunto, que conectan puesto de salud y centro educativos que previamente no contaban con este servicio, tal como se implementó en caso del hospital de La Candelaria y los centros satélites en Purificación, Tolima.

A partir de allí, se avizora un panorama efectivo que elimina barreras como la orografía compleja, la falta de inversión pública o de grandes operadores, y la dispersión poblacional. En territorios como Norte de Santander, donde la geografía es altamente compleja, se ha documentado como el despliegue de los enlaces inalámbricos ha permitido mejorar el acceso a la conectividad en escuelas ubicadas en áreas remotas.

De la misma forma, se puede reflejar que los radioenlaces son alternativas de conexión que permiten la creación de redes comunitarias privadas, para mejorar los servicios y la participación de las comunidades en estas regiones. De acuerdo con la investigación de Maldonado & Rodríguez, (2020) en departamento como Norte de Santander una solución viable son los radioenlaces con frecuencias como la de 5.8 GHz, que no requiere permisos costosos de uso del espectro, haciendo que las comunidades puedan autogestionar sus propias redes. (p.13)

Aunado a lo anterior, este tipo de herramientas además de impactar positivamente en el acceso, también mejoran los patrones de uso de las tecnologías de la información y la comunicación en comunidades rurales. Al documentar en la información recolectada para el desarrollo del análisis, se puede avizorar que una se establece la conectividad mediante este tipo de sistemas, las comunidades comienzan a usar recursos digitales no solo para los procesos de aprendizaje, sino también para la gestión de trámites, para la comunicación familiar, formación en línea y para promover la comercialización de productos agrícolas o turísticos locales.

Este planteamiento se sustenta en trabajos de investigación como de la comunidad de Cantón Pujilí en Ecuador, citado como una referencia comparativa, donde se pudo poner en evidencia que los radioenlaces adoptados en instituciones educativas en el contexto rural, permiten fortalecer los procesos de aprendizaje, elevando el nivel de alfabetización digital de niños, docentes y padres de familia. (Caiza, Proaño, & Jiménez, 2015)

De la misma forma, este tipo de proyectos permite que se promueva con más intensidad y progresividad, el proceso de apropiación tecnológica, donde los usuarios del sector rural generalmente se encuentran relegados, comenzando a construir habilidades digitales, que permitan a futuro superar barreras de desconocimiento, desconfianza o poca disponibilidad de dispositivos.

En cuanto a la calidad del servicio, que implica estabilidad, velocidad y cobertura, se pudo determinar que los estudios revelan que los radioenlaces, cuando se encuentran bien estructurados y diseñados, bajo diseños técnicos adecuados, permiten ofrecer una banda ancha estable, con niveles de latencia y velocidad suficientes para soportar servicios como videollamadas, navegación, uso de plataformas educativas y transmisión de datos médicos básicos.

En el trabajo de investigación presentado por (Fernández, 2018) se pone en evidencia que las redes que se diseñan con topologías híbridas y redundancias logran mantener una disponibilidad superior al 90 % del tiempo, lo cual es significativo en zonas donde previamente no existía ninguna forma de conectividad. (p.12) Sin embargo, la calidad de la conectividad se puede afectar por factores como interferencias en las bandas

no licenciadas, errores de alineación de antenas o condiciones meteorológicas extremas. Por esta razón, proyectos más actualizados y recientes, han venido incorporando herramientas de gestión remota y monitoreo en tiempo real, mejorando la resiliencia de las redes instaladas.

De la exposición anterior, se puede establecer que la implementación de radioenlaces en zonas rurales de Norte de Santander ha representado una estrategia tecnológica efectiva para superar las barreras impuestas por la geografía y la dispersión poblacional. A partir del análisis documental de diez estudios técnicos y académicos, se concluye que esta tecnología ha contribuido significativamente a mejorar los niveles de acceso, uso y calidad del servicio de internet en comunidades previamente desconectadas.

Desde el punto de vista del acceso, los radioenlaces han permitido establecer conexiones de tipo punto a punto y punto a multipunto, habilitando el servicio de internet en instituciones educativas, centros de salud y puntos comunitarios. Esta cobertura, aunque limitada por condiciones topográficas y climáticas, representa un avance frente a la inexistencia de conectividad previa o a soluciones móviles de baja estabilidad.

En cuanto al uso, se evidencia una apropiación progresiva por parte de las comunidades, quienes han empezado a integrar herramientas digitales en procesos como la educación virtual, los trámites administrativos, la telemedicina y la comercialización de productos locales. Esta incorporación ha sido posible gracias a la disponibilidad básica del servicio, aunque aún persisten limitaciones en la alfabetización digital y en la cultura tecnológica local.

Respecto a la calidad, las configuraciones técnicas documentadas indican que, cuando los radioenlaces están correctamente instalados y calibrados, logran garantizar una disponibilidad de servicio superior al 90 %, con velocidades que permiten la navegación básica, el acceso a plataformas de videoconferencia y la consulta de contenidos educativos. No obstante, factores como el mantenimiento inadecuado, la interferencia electromagnética y las condiciones climáticas extremas pueden afectar negativamente su desempeño.

Desde la perspectiva de la ingeniería de sistemas, estos resultados reflejan que los radioenlaces son una solución costo-efectiva, de rápida implementación y relativamente flexible, que puede ser optimizada mediante sistemas de monitoreo remoto, gestión centralizada de red y mantenimiento preventivo. La incorporación de estas prácticas técnicas será clave para garantizar la continuidad y la calidad del servicio en el mediano y largo plazo.

Efectividad, beneficios y barreras identificadas en la adopción de los radioenlaces como alternativa para el acceso a la conectividad digital en zonas rurales de Norte de Santander

El tercer objetivo se enfocó en abordar la efectividad, en cuanto al cumplimiento de los objetivos que se formulan en proyectos de conectividad rural. A partir de allí, hay que indicar que al realizar un análisis comparativo respecto a los trabajos de investigación, informes y artículos académicos relacionados con la temática de esta monografía, se puede determinar que los radioenlaces son efectivamente una alternativa de conectividad viable y efectiva para consolidar la eliminación de brechas digitales en zonas rurales, donde existe

problemáticas para instalar infraestructuras tradicionales, especialmente en zonas de Planes de Desarrollo con Enfoque Territorial, caracterizadas por ser áreas rurales en Colombia que fueron severamente afectadas por el conflicto armado y que son prioritarias para la implementación de los acuerdos de paz PDET en Norte de Santander, como son Hacarí, Teorama, entre otros.

Al revisar los trabajos de investigación planteados se logró determinar que la instalación de radioenlaces permite lograr niveles de disponibilidad superiores al 80% en territorios de baja investigación y complejidad técnica, permitiendo la disminución en brechas digitales para el acceso a servicios como la educación, la salud, entre otros. Estos resultados, armonizan con los planteamientos del Plan Nacional de Conectividad Rural promovido por el Ministerio de las Tecnologías de la Información y la Comunicación, que reconoce la efectividad de este tipo de tecnologías en municipios con alta dispersión poblacional y baja densidad urbana, como las Zonas Comunitarias para la Paz (ZCP).

De acuerdo con los pronunciamientos del Ministerio de las TIC a marzo del 2025, se reportaron que 1.110 cabeceras municipales, ya habían sido beneficiadas con redes de conexión de alta velocidad, muchas de ellas, adoptadas a través del uso de herramientas inalámbricas como son los radioenlaces, demostrando un escalamiento y cumplimiento progresivo de los objetivos. Este tipo de efectividad permite además reconocer que entidades a nivel territorial como es la Secretaría TIC de Norte de Santander, viene trabajando conjuntamente para identificar nuevos sitios estratégicos para continuar con estas soluciones en comunidades étnicas y rurales dispersas.

De tales estrategias en el sector público y de los trabajos académicos consultados, se pueden observar beneficios como impacto positivo en los procesos de aprendizaje, acceso a los servicios de salud, participación ciudadana y economía rural. En cuanto a la educación, se avizora que los radioenlaces fortalecerán la conectividad y mejorarán el rendimiento académico, así como el acceso a contenidos digitales, especialmente en territorios donde no existe ningún tipo de acceso anteriormente. Los trabajos de investigación, permiten evidenciar que los estudiantes, docentes y padres de familia accedieron por primera vez a plataformas como Colombia Aprende, Google Classroom o realizar trámites escolares en línea.

Como parte de este proceso, el Ministerio de las TIC, ha venido consolidando el mismo, a través de la dotación de equipos de alta tecnología en instituciones educativas garantizando el uso efectivo de la conectividad, fortaleciendo los procesos de aprendizaje que en estas localidades, representan una esperanza en medio de un territorio devastado por la violencia generada por el conflicto armado.

Referente a la participación ciudadana, con el uso de los radioenlaces que conducen a una conectividad efectiva, se promueven los espacios de participación ciudadana y la apropiación digital. En el sector rural los radioenlaces promueven mayor interacción en plataformas institucionales, trámites en líneas, participación en consultas comunitarias, suscripción de proyectos de las juntas de acción comunal, entre otros, tal como lo avizoran los informes emitidos por las Zonas Digitales para la Paz. Las zonas Wi-Fi abiertas permiten el acceso comunitario desde dispositivos personales, favoreciendo el ejercicio de la ciudadanía digital.

Finalmente, en relación con el desarrollo económico, la implementación de los radioenlaces fortalece la promoción de espacios para la comercialización de sus productos en redes sociales, y el acceso a servicios financieros, demostrándose en experiencias de mujeres emprendedoras en el municipio de Tibú, Norte de Santander, dinamizando economías locales e incrementadas las oportunidades de capacitación.

El análisis documental permitió identificar, de manera estructurada, los beneficios, barreras y actores involucrados en los procesos de implementación de radioenlaces en zonas rurales de Norte de Santander. Esta sección sistematiza la información recolectada para ofrecer una visión integral del impacto y las condiciones de operación de estas soluciones tecnológicas.

A continuación, un esquema de las barreras, beneficios y actores:

Tabla 3. Dimensiones

Dimensión	Beneficios observados	Barreras identificadas	Actores involucrados
Educativa	- Acceso a plataformas virtuales (Google Classroom, Colombia Aprende)- Continuidad académica	- Bajo nivel de alfabetización digital docente y estudiantil- Escasa infraestructura de respaldo eléctrico en	Secretarías de Educación, instituciones educativas, docentes rurales, padres de

	contextos rurales-		familia, comunidad
	Uso de contenidos digitales educativos		estudiantil
Sanitaria	- Implementación de servicios de telemedicina- Consulta de resultados médicos en línea- Coordinación remota con hospitales urbanos	- Inestabilidad de señal en zonas críticas- Poca capacitación del personal de salud en herramientas digitales	Centros de salud rurales, EPS, MinSalud, alcaldías municipales, operadores de red
Participativa	- Acceso a plataformas estatales y trámites en línea- Mejora en comunicación ciudadanía y entidades públicas	- Escasa apropiación comunitaria de TIC- Desconfianza hacia herramientas gubernamentales	Ministerio TIC, alcaldías locales, personerías, líderes comunales
Económica	- Comercialización de productos locales vía redes sociales- Uso de servicios financieros	- Costos elevados de mantenimiento y operación- Falta de subsidios o incentivos	Emprendedores, asociaciones campesinas, bancos digitales, cámaras de para sostenibilidad

digitales (billeteras	comercio,
electrónicas)	cooperativas TIC

Nota fuente: Elaboración propia con base en los autores citados (2015–2022).

Desde la perspectiva de la ingeniería de sistemas, los beneficios observados pueden agruparse en cuatro dimensiones principales: educativa, sanitaria, participativa y económica. En el ámbito educativo, los radioenlaces han facilitado el acceso a plataformas como Google Classroom, Colombia Aprende y otras herramientas virtuales, permitiendo la continuidad académica en zonas rurales. En salud, han viabilizado servicios de telemedicina, atención remota y gestión de datos clínicos. En cuanto a la participación ciudadana, la conectividad ha mejorado el acceso a plataformas institucionales, facilitando trámites y fortaleciendo la comunicación con el Estado. Finalmente, en el campo económico, se ha promovido el uso de redes sociales para comercialización de productos locales y el acceso a servicios financieros digitales.

Sin embargo, también se identifican barreras importantes. En la dimensión técnica, persisten problemas relacionados con la intermitencia del servicio debido a condiciones climáticas adversas, interferencias y deficiencias en el mantenimiento. En el plano social, el déficit de alfabetización digital y la baja apropiación tecnológica dificultan una adopción más efectiva y sostenida. A nivel económico, el costo de operación y sostenibilidad de los radioenlaces sigue siendo un reto, especialmente para comunidades con recursos limitados.

Conclusiones

El análisis de la conectividad en Norte de Santander muestra que, previo a la implementación de radioenlaces, las zonas rurales se encontraban en una situación de aislamiento digital estructural. Factores como la geografía montañosa, la dispersión poblacional y la baja inversión pública impidieron el despliegue de redes cableadas, mientras que el conflicto armado retrasó aún más los planes de desarrollo tecnológico. La dependencia de conexiones satelitales costosas y de redes móviles intermitentes limitó la operación de instituciones educativas, centros de salud y dependencias administrativas, consolidando una brecha digital que profundizó las desigualdades sociales y educativas en la región.

La revisión de antecedentes nacionales e internacionales demuestra que los radioenlaces constituyen una alternativa viable y replicable en contextos rurales donde las condiciones físicas y económicas imposibilitan la expansión de fibra óptica. Casos como los de Ecuador (Caiza et al., 2015), Perú (Fernández, 2018) y Colombia (Moncada Colorado et al., 2015; Novoa & Carreño, 2018; Martínez Rincón, 2020; Durán Zapata, 2021; Perea Murillo, 2022) confirman que estas tecnologías permiten superar barreras geográficas y garantizar conectividad a bajo costo. Sin embargo, también evidencian que su éxito depende de la adaptación al contexto local, la sostenibilidad financiera y, en algunos casos, la participación comunitaria como elemento clave para mantener las redes en funcionamiento.

La integración de los diferentes estudios analizados evidencia que los radioenlaces no solo representan una solución técnica, sino una herramienta estratégica para reducir la brecha digital en territorios rurales. Aunque existen diferencias en el enfoque —desde la reorganización de infraestructuras ya existentes (Durán Zapata, 2021) hasta el diseño de redes comunitarias en territorios desconectados (Perea Murillo, 2022), en todos los casos se reafirma su pertinencia como una alternativa escalable y costo-efectiva frente a la exclusión digital. Este panorama resalta que, en el caso particular de Norte de Santander, la implementación de radioenlaces debe concebirse no únicamente como una solución tecnológica, sino como parte de una estrategia integral de inclusión social.

El aporte central de esta investigación radica en ofrecer un análisis situado sobre la región del Catatumbo en Norte de Santander, un territorio donde la brecha digital no solo se explica por factores técnicos o geográficos, sino también por las secuelas históricas del conflicto armado y el abandono estatal. A diferencia de los estudios previos, que se han enfocado en diagnósticos técnicos o en casos internacionales, este trabajo proporciona evidencia localizada sobre cómo los radioenlaces pueden convertirse en una estrategia integral de inclusión digital en comunidades rurales. De esta manera, la investigación no solo valida la viabilidad técnica de los radioenlaces, sino que los proyecta como un instrumento para cerrar desigualdades estructurales y garantizar el acceso equitativo a derechos fundamentales en regiones históricamente marginadas.

Recomendaciones

Dado que los radioenlaces han demostrado ser técnicamente viables en contextos rurales con limitaciones de infraestructura, se recomienda desarrollar proyectos piloto en instituciones educativas y centros de salud de Norte de Santander. Estos pilotos deben contar con planes de expansión progresiva y con esquemas de evaluación técnica que permitan medir disponibilidad, velocidad y estabilidad del servicio. Los resultados de dichos pilotos deben servir como base para escalar la estrategia hacia otras comunidades rurales del departamento.

El impacto social de los radioenlaces se ve limitado por la baja alfabetización digital y la resistencia cultural frente a las TIC. Se recomienda diseñar programas de formación práctica para estudiantes, docentes, personal de salud y líderes comunitarios, orientados al uso cotidiano de herramientas digitales. Estos programas deben incluir actividades pedagógicas adaptadas a las realidades locales, con el fin de fomentar la confianza, el uso responsable y la apropiación de la tecnología por parte de las comunidades rurales.

La continuidad del servicio depende de la existencia de recursos y capacidades locales. Se recomienda crear fondos interinstitucionales que integren aportes del Gobierno Nacional, gobernaciones, alcaldías, sector privado y cooperación internacional para financiar el mantenimiento, la reposición de equipos y la capacitación técnica comunitaria. Asimismo, se sugiere establecer programas de formación de jóvenes rurales como técnicos

comunitarios en instalación y mantenimiento de radioenlaces, reduciendo la dependencia de operadores externos.

Las condiciones geográficas y climáticas de Norte de Santander exigen soluciones técnicas especializadas. Se recomienda incorporar modelos de simulación GIS, herramientas de monitoreo remoto y tecnologías de gestión automatizada (SDN) en el diseño y operación de los radioenlaces. Estas medidas permiten anticipar fallas, mejorar la cobertura y garantizar la estabilidad del servicio frente a la topografía accidentada y las variaciones climáticas de la región.

Los radioenlaces deben concebirse como una solución transitoria y complementaria. Se recomienda que el Ministerio TIC y las entidades territoriales incluyan estas tecnologías en el marco de una estrategia integral de conectividad rural que combine fibra óptica, redes móviles (4G/5G) y soluciones satelitales. Este enfoque debe estar acompañado de políticas de alfabetización digital, fortalecimiento institucional y programas de innovación comunitaria, de modo que se garantice un acceso a internet que sea constante, útil y sostenible en el largo plazo.

Bibliografía

- Alba, Y., & Navarro, C. (2017). Diseño de una red de datos para la Institución Educativa Aguas Claras de Ocaña, Norte de Santander \[Trabajo de grado, Universidad Francisco de Paula Santander]. Disponible en https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/bitstream/handle/20.500.14167/1485/CUERPO%20DEL%20TRABAJO%20-%20DISE%c3%91O%20DE%20UNA%20RED%20DE%20DATOS%20PARA%20LA%20INSTITUCI%c3%93N%20EDUCATIVA%20AGUAS%20CLARAS%20DE%20OCA%c3%91A%20NORTE%20DE%20SANTANDER._removed.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Agudelo, Ramírez, Alexandra y Zuluaga, Cruz, Leidy; (2022) Brecha Digital y Desigualdad Social. Disponible en <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Articulo+7+Educacion+rural+en+tiempos+de+pandemia.pdf>
- Caiza, R., Proaño, J., & Jiménez, J. (2015). Diseño de una red para brindar acceso a internet a las instituciones educativas del Cantón Pujilí. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/6887/688773651005.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2019). Boletín técnico: conectividad en zonas rurales de Colombia. DANE. Disponible en <https://www.dane.gov.co>
- Durán Zapata, A. (2021). Rediseño de un sistema de telecomunicaciones basado en radioenlaces en zonas rurales y urbanas con EMCALI \[Trabajo de grado,

Universidad Autónoma de Occidente]. Disponible en

<https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/65d7a6c2-4527-4041-a27a-688728f77b42/content>

Fernández, J. (2018). Diseño de una red inalámbrica de banda ancha para mejorar la transmisión de datos y voz de la organización Iglesia del Nazareno en el departamento de Lambayeque \[Trabajo de investigación, Universidad Señor de Sipán]. Disponible en file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/BC-4600%20FERNANDEZ%20CASTRO%20(4).pdf

Martínez Rincón, D. (2020). Diseño de un radioenlace punto a punto para el servicio de internet en la banda de 5 GHz en el corregimiento de La Gabarra (Tibú, Norte de Santander) \[Trabajo de grado, Universidad Francisco de Paula Santander].

Disponible en

<https://repositorio.ufps.edu.co/bitstream/handle/ufps/4492/1160101.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones – MinTIC. (2010). Plan Vive Digital. MinTIC. <https://www.mintic.gov.co>

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones – MinTIC. (2019).

Informe de conectividad en Colombia. MinTIC. Disponible en

<https://www.mintic.gov.co>

Moncada Colorado, A. M., Gómez Gaviria, A. J., & Yepes Zuluaga, S. M. (2015). Diseño e implementación de un radioenlace digital como estrategia de conectividad de bajo presupuesto para comunidades rurales en Antioquia \[Trabajo de grado, Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM]. Disponible en

<https://repositorio.itm.edu.co/server/api/core/bitstreams/c288ebbf-0439-4a17-9ad3-d09cba2d75c4/content>

Novoa, L. D., & Carreño, A. (2018). Diseño de radioenlace de comunicaciones desde el municipio de El Cocuy a las instituciones educativas rurales [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia]. Disponible de [https://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/10134/Dise% c3% b1o% 20de% 20radio% 20enlace% 20de% 20comunicaciones....pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/10134/Dise%c3%b1o%20de%20radio%20enlace%20de%20comunicaciones....pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Perea Murillo, W. A. (2022). Diseño de una red de telecomunicaciones para la zona rural del corregimiento Cauca, municipio de Cartago (Valle del Cauca), utilizando soluciones de última milla\ Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD]. Disponible en <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/51581/wapereamu.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Saiz-Sáenz, M. L., Jácome, R. T. y Caraballo, L. H. (2023). Las tecnologías de la información y las comunicaciones y la educación rural en tiempos de pandemia. *Revista UNIMAR*, 41(1), 27-40. <https://doi.org/10.31948/Rev.unimar/unimar41-1-art2>