

**Evaluación técnico-económica de una solución de conectividad rural con arquitectura híbrida de última milla, enlaces de microondas y redes inalámbricas de banda ancha en Solano, Caquetá**

Raúl Feo Vargas

Asesor

Raul Bareno Gutierrez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD  
Escuela de Ciencias Basicas, Tecnologia e Ingenieria ECBTI  
Especialización en Redes de Telecomunicaciones

2026

## **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado a las comunidades del municipio de Solano, Caquetá, cuyo contexto social y territorial evidencia los desafíos persistentes en materia de acceso a las tecnologías de la información y las comunicaciones. Su realidad constituye la principal motivación de esta investigación, orientada a proponer alternativas técnicas que aporten al fortalecimiento de la conectividad en territorios con limitaciones estructurales.

También se dirige a quienes, desde el ámbito académico y profesional, trabajan en el desarrollo de soluciones tecnológicas con enfoque social, entendiendo la conectividad no solo como un servicio, sino como un elemento necesario para la inclusión digital y el ejercicio efectivo de derechos.

Este trabajo representa, además, un compromiso personal con la aplicación responsable del conocimiento en redes de telecomunicaciones y con la búsqueda de propuestas viables que contribuyan al cierre de la brecha digital en regiones apartadas del país.

### **Agradecimientos**

Se agradece a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD por el marco académico y metodológico que permitió desarrollar esta investigación dentro del programa de Especialización en Redes de Telecomunicaciones.

Se reconoce igualmente el acompañamiento del director del trabajo, cuyas orientaciones fortalecieron el enfoque técnico y la rigurosidad del modelo propuesto.

De manera especial, se valora la información pública suministrada por entidades como el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), cuyos datos permitieron contextualizar la problemática de conectividad rural en Colombia.

Asimismo, los estudios sobre redes comunitarias desarrollados en América Latina constituyeron un referente importante para la formulación del modelo propuesto.

## Resumen

El acceso a Internet en zonas rurales de Colombia presenta limitaciones significativas debido a la dispersión poblacional, la complejidad geográfica y los altos costos de despliegue de infraestructura, como ocurre en el municipio de Solano, Caquetá. Esta situación profundiza la brecha digital y restringe el acceso a servicios educativos, económicos y sociales, lo que justifica la necesidad de proponer soluciones técnicas adaptadas a estos contextos.

En este sentido, el objetivo del presente trabajo es analizar los proveedores de última milla disponibles y diseñar una solución de conectividad rural basada en una arquitectura híbrida que integre enlaces de microondas y sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha, evaluando su viabilidad técnica y económica.

La metodología se desarrolla bajo un enfoque documental–analítico, mediante la revisión de literatura técnica, el análisis de tecnologías de telecomunicaciones y la estructuración de un modelo de red compuesto por niveles de acceso, transporte y distribución. Asimismo, se realiza una simulación del sistema considerando variables como capacidad, número de usuarios y calidad de servicio, complementada con una evaluación financiera basada en flujos de caja proyectados.

Los resultados evidencian que el modelo propuesto es técnicamente viable para la prestación de servicios básicos de conectividad, alcanzando niveles adecuados de cobertura y desempeño. Sin embargo, desde el punto de vista económico, el proyecto no resulta sostenible bajo condiciones conservadoras. Se concluye que la viabilidad financiera depende de factores como el incremento en la adopción de usuarios, la optimización de costos y ajustes en el esquema tarifario.

**Palabras clave:** conectividad, rural, microondas, telecomunicaciones.

## Abstract

Internet access in rural areas of Colombia presents significant limitations due to population dispersion, geographical complexity, and high infrastructure deployment costs, as occurs in the municipality of Solano, Caquetá. This situation deepens the digital divide and restricts access to educational, economic, and social services, justifying the need to propose technical solutions adapted to these contexts.

In this sense, the objective of this work is to analyze the available last-mile providers and design a rural connectivity solution based on a hybrid architecture that integrates microwave links and wireless broadband access systems, evaluating its technical and economic feasibility.

The methodology is developed under a documentary-analytical approach, through the review of technical literature, the analysis of telecommunications technologies, and the structuring of a network model composed of access, transport, and distribution levels. Likewise, a simulation of the system is carried out considering variables such as capacity, number of users, and quality of service, complemented by a financial evaluation based on projected cash flows.

The results show that the proposed model is technically feasible for the provision of basic connectivity services, reaching adequate levels of coverage and performance. However, from an economic point of view, the project is not sustainable under conservative conditions. It is concluded that financial viability depends on factors such as the increase in user adoption, cost optimization, and adjustments in the rate scheme.

**Keywords:** connectivity, rural, microwave links, telecommunications.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	13
Justificación .....	17
Viabilidad .....	17
Pertinencia .....	17
Relevancia .....	18
Acotación.....	18
Planteamiento del problema.....	20
Pregunta Problema.....	21
Objetivos.....	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específicos .....	22
Marco Referencial y Teórico .....	23
Antecedentes.....	25
Marco Conceptual.....	27
Marco Legal.....	28
Marco Contextual .....	29
Diseño Metodológico.....	31
Enfoque de la Investigación .....	31
Tipo de Investigación .....	31
Método.....	31
Técnicas de Recolección y Sistematización de la Información.....	32
Procedimiento .....	32

Definición Operativa de Variables .....	34
Indicadores de Evaluación del Modelo .....	35
Resultados.....	36
Análisis de Proveedores de Última Milla en el Municipio de Solano, Caquetá.....	36
Claro Colombia.....	36
Movistar Colombia .....	38
HughesNet .....	39
Starlink.....	39
Selección del Proveedor de Última Milla para la Solución Propuesta .....	43
Limitaciones de los operadores tradicionales .....	43
Limitaciones de HughesNet.....	43
Ventajas de Starlink .....	44
Consideración de la alianza Claro–Starlink.....	44
Justificación de la selección.....	44
Propuesta de Integración Dentro de la Arquitectura de Red .....	45
Diseño de Red de Transporte y Evaluación de Alternativas .....	46
Alternativa 1: Sistema Propio con Antenas de Microondas .....	50
Evaluación de Perfiles Topográficos y Línea de Vista.....	51
Análisis Técnico de los Radioenlaces.....	61
Limitaciones Operativas y Económicas.....	62
Alternativa 2: Uso de Infraestructura Móvil Existente y Torres Propias .....	62
Conexiones a Través de Antenas Existentes.....	63
Instalación de Torres Adicionales.....	63

Alimentación Eléctrica y Custodia. ....	63
Costos y Acuerdos Institucionales. ....	63
Conclusión de la Alternativa.....	64
Limitaciones Técnicas y Económicas de la Infraestructura Móvil.....	68
Alternativa 3: Selección de Starlink como la Alternativa Más Viable.....	68
Descripción Técnica.....	69
Equipos Necesarios.....	69
Ventajas.....	69
Justificación Económica. ....	70
Conclusión. ....	70
Comparación de Alternativas .....	70
<i>Conclusión del Capítulo</i> .....	71
Simulación y Evaluación del Modelo.....	74
Arquitectura del Modelo Propuesto.....	75
Topología Técnica del Modelo Comunitario Propuesto.....	76
Simulación Técnica del Modelo .....	78
Parámetros Técnicos de Simulación. ....	78
Simulación RF del Enlace Principal. ....	79
Evaluación de Capacidad y Desempeño.....	84
Comparación Técnica Frente a Alternativas Terrestres.....	85
Evaluación Económica del Modelo .....	86
Escenario de Sostenibilidad Comunitaria. ....	87
Resultados Generales de la Simulación.....	88

Segunda Simulación del Diseño de Red Inalámbrica Rural para la Vereda El Danubio .....	89
Escenario de Estudio y Análisis Geográfico.....	89
Análisis de Perfil de Elevación y Viabilidad del Enlace .....	90
Diseño de la Topología de Red Propuesta .....	92
Simulación Inalámbrica en UISP Design Center.....	93
Selección de Dispositivos y Costos Estimados .....	94
Análisis Económico y Rentabilidad.....	95
Funcionamiento General del Sistema .....	96
Conclusiones.....	99
Referencias Bibliográficas .....	102

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Variables clave del modelo</i> .....	34
<b>Tabla 2</b> <i>Comparativa de proveedores de última milla en Solano, Caquetá</i> .....	41
<b>Tabla 3</b> <i>Comparación técnica y de viabilidad de las alternativas de conectividad para la vereda El Danubio, Solano (Caquetá)</i> .....	72
<b>Tabla 4</b> <i>Comparación económica de alternativas (COP)</i> .....	73
<b>Tabla 5</b> <i>Equipos propuestos para la arquitectura de red</i> .....	75
<b>Tabla 6</b> <i>Parámetros técnicos de simulación</i> .....	81
<b>Tabla 7</b> <i>Parámetros técnicos del enlace inalámbrico simulado</i> .....	82
<b>Tabla 8</b> <i>Resultados obtenidos en la simulación MATLAB</i> .....	86
<b>Tabla 9</b> <i>Distribución estimada de capacidad por usuarios</i> .....	87
<b>Tabla 10</b> <i>Comparación técnica de alternativas de conectividad</i> .....	88
<b>Tabla 11</b> <i>Costos estimados de implementación (CAPEX)</i> .....	89
<b>Tabla 12</b> <i>Costos operativos mensuales estimados (OPEX)</i> .....	90
<b>Tabla 13</b> <i>Escenario estimado de sostenibilidad comunitaria</i> .....	90
<b>Tabla 14</b> <i>Resultados generales de la simulación</i> .....	90

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Vista general del municipio de Solano, Caquetá</i> .....	48
<b>Figura 2</b> <i>Vista general de la Base Militar de Tres Esquinas</i> .....	49
<b>Figura 3</b> <i>Distribución geográfica de comunidades rurales y posibles rutas de conectividad</i> .....	50
<b>Figura 4</b> <i>Perfil topográfico entre Solano y nodo rural 1</i> .....	51
<b>Figura 5</b> <i>Evaluación de línea de vista en enlace rural con obstrucción topográfica</i> .....	52
<b>Figura 6</b> <i>Evaluación de perfil topográfico con obstrucción parcial de línea de vista</i> .....	52
<b>Figura 7</b> <i>Análisis de enlace rural con afectación por vegetación selvática</i> .....	53
<b>Figura 8</b> <i>Perfil geográfico con pérdida de línea de vista entre nodos</i> .....	54
<b>Figura 9</b> <i>Evaluación topográfica de enlace con variaciones altitudinales</i> .....	54
<b>Figura 10</b> <i>Análisis de trayectoria de microondas en entorno selvático</i> .....	55
<b>Figura 11</b> <i>Perfil de elevación con obstrucción múltiple del terreno</i> .....	55
<b>Figura 12</b> <i>Evaluación geográfica de enlace rural con limitaciones de cobertura</i> .....	56
<b>Figura 13</b> <i>Análisis de enlace de larga distancia en zona rural dispersa</i> .....	57
<b>Figura 14</b> <i>Perfil topográfico con necesidad de infraestructura elevada</i> .....	57
<b>Figura 15</b> <i>Evaluación de condiciones de propagación en entorno rural</i> .....	58
<b>Figura 16</b> <i>Análisis de enlace con afectación por curvatura y relieve</i> .....	58
<b>Figura 17</b> <i>Evaluación de enlace rural con obstáculos naturales intermedios</i> .....	59
<b>Figura 18</b> <i>Perfil geográfico con requerimiento de repetidores adicionales</i> .....	60
<b>Figura 19</b> <i>Evaluación de enlace inalámbrico en zona de relieve irregular</i> .....	60
<b>Figura 20</b> <i>Análisis topográfico de trayectoria entre comunidades rurales</i> .....	61
<b>Figura 21</b> <i>Evaluación de viabilidad para enlaces terrestres de microondas</i> .....	61
<b>Figura 22</b> <i>Evaluación de condiciones de propagación en entorno rural</i> .....	62

<b>Figura 23</b> <i>Infraestructura de telecomunicaciones de operador móvil en Solano</i> .....	65
<b>Figura 24</b> <i>Evaluación de vista de estación móvil hacia zonas rurales</i> .....	66
<b>Figura 25</b> <i>Infraestructura móvil existente en el municipio de Solano</i> .....	67
<b>Figura 26</b> <i>Evaluación de cobertura y línea de vista desde antenas móviles existentes</i> .....	67
<b>Figura 27</b> <i>Análisis de propagación de señal desde infraestructura móvil regional</i> .....	68
<b>Figura 28</b> <i>Limitaciones de cobertura rural mediante infraestructura móvil terrestre</i> .....	69
<b>Figura 29</b> <i>Arquitectura conceptual de conectividad híbrida propuesta para Solano, Caquetá</i> ..	75
<b>Figura 30</b> <i>Ubicación del nodo principal y nodo central comunitario en la Vereda El Danubio</i>	78
<b>Figura 31</b> <i>Topología técnica del modelo comunitario propuesto</i> .....	80
<b>Figura 32</b> <i>Vista tridimensional del nodo transmisor propuesto en la IER Leoncitos</i> .....	84
<b>Figura 33</b> <i>Vista tridimensional del nodo receptor comunitario propuesto</i> .....	85
<b>Figura 34</b> <i>Variación estimada del nivel de señal a la distancia</i> .....	86
<b>Figura 35</b> <i>Distribución geográfica de viviendas y ubicación propuesta del nodo central en la vereda El Danubio</i> .....	94
<b>Figura 36</b> <i>Perfil de elevación entre el nodo principal y el nodo central de distribución</i> .....	95
<b>Figura 37</b> <i>Topología propuesta para la distribución de Internet en la Vereda El Danubio</i> .....	97
<b>Figura 38</b> <i>Simulación de cobertura y enlaces inalámbricos en UISP Design Center</i> .....	98
<b>Figura 39</b> <i>Equipos seleccionados y costo aproximado de implementación</i> .....	99
<b>Figura 40</b> <i>Funcionamiento general del sistema inalámbrico propuesto para la vereda El Danubio</i> .....	102

## Introducción

El acceso a Internet se ha consolidado como un componente esencial para el desarrollo social, económico y educativo, al facilitar el acceso a la información, la prestación de servicios digitales y la inclusión en entornos cada vez más digitalizados. A nivel global, organismos como la Unión Internacional de Telecomunicaciones han señalado que la conectividad constituye un elemento clave para el cierre de brechas sociales y el desarrollo sostenible, especialmente en territorios con limitaciones estructurales (International Telecommunication Union, 2022). Sin embargo, esta realidad no se presenta de manera homogénea, siendo las zonas rurales las más afectadas por la falta de acceso a servicios de telecomunicaciones.

En Colombia, la brecha digital entre áreas urbanas y rurales continúa siendo significativa. De acuerdo con el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (2023) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2023), factores como la dispersión poblacional, la complejidad geográfica y los altos costos de despliegue de infraestructura limitan la expansión de redes de conectividad en territorios apartados. Esta situación se ve agravada por la baja rentabilidad que representan estos mercados para los operadores tradicionales, lo que reduce la inversión en infraestructura y limita las alternativas de acceso al servicio.

El municipio de Solano, en el departamento del Caquetá, representa un caso crítico dentro de este contexto. Su amplia extensión territorial, la presencia de selva densa y las dificultades de acceso físico generan condiciones adversas para la implementación de redes tradicionales. En este territorio, la conectividad depende en gran medida de soluciones inalámbricas como servicios satelitales o redes móviles, las cuales presentan limitaciones asociadas a costos elevados, latencia y cobertura parcial, especialmente en zonas rurales dispersas (Song & Bae, 2019).

Diversos estudios han señalado que las soluciones de conectividad en entornos rurales requieren enfoques alternativos basados en la integración de tecnologías inalámbricas y modelos flexibles de despliegue. En este sentido, las redes comunitarias y las arquitecturas híbridas han demostrado ser una alternativa viable para extender la cobertura en territorios con baja densidad poblacional, al combinar diferentes tecnologías de acceso, transporte y distribución (Internet Society, 2018; GSMA, 2021). Estos enfoques permiten optimizar recursos, reducir costos y adaptar las soluciones a las condiciones específicas del entorno.

Para comprender la magnitud del desafío en Solano, es necesario desglosar los pilares tecnológicos de la propuesta. El concepto de Última Milla (Last Mile) define el segmento final de la red que conecta al usuario final con el nodo de agregación. En ingeniería de telecomunicaciones, este tramo representa el mayor desafío logístico y financiero. Mientras que en las ciudades la fibra óptica (FTTH) es el estándar, en la Amazonía colombiana la capilaridad de la red se ve interrumpida por la geografía, lo que convierte a las tecnologías inalámbricas de banda ancha en la única opción técnica viable para superar la “barrera de la distancia” sin incurrir en costos de obra civil prohibitivos (OECD, 2020).

En este ámbito, la evolución de los sistemas satelitales ha introducido un cambio de paradigma con la tecnología Starlink. A diferencia de los satélites geoestacionarios (GEO), que orbitan a más de 35,000 km y presentan retardos de propagación (latencia) superiores a los 600 ms, la constelación LEO (Low Earth Orbit) opera en la termósfera baja. Esta reducción en la distancia física permite alcanzar latencias de entre 20 ms y 40 ms, lo cual es técnicamente equivalente a una conexión de fibra óptica urbana. Esta baja latencia es crítica no solo para la navegación web, sino para el soporte de protocolos de comunicación en tiempo real, como el teletrabajo y la educación sincrónica, que son pilares del desarrollo en zonas apartadas.

Complementando el acceso satelital, los enlaces de microondas actúan como el sistema de transporte o “backbone” inalámbrico. Estos sistemas operan bajo principios de propagación de ondas electromagnéticas que requieren una línea de vista (LOS) despejada. En el contexto de Solano, el diseño de estos enlaces debe enfrentar el fenómeno de la difracción y la obstrucción por la curvatura terrestre y la vegetación. La literatura técnica subraya la importancia del cálculo del “Fade Margin” o margen de desvanecimiento, considerando que en regiones con alta pluviosidad como el Caquetá, el fenómeno de la “atenuación por lluvia” puede degradar severamente la señal en frecuencias superiores a los 10 GHz, lo que obliga a seleccionar bandas de frecuencia y esquemas de modulación adaptativa que aseguren la disponibilidad del servicio al 99.9%.

Finalmente, la distribución hacia el usuario final se plantea bajo un entorno que trasciende las limitaciones de las redes inalámbricas locales convencionales. Aunque el estándar 802.11 (Wi-Fi) es la interfaz más extendida en entornos domésticos, en este proyecto se privilegia el acceso inalámbrico de banda ancha de tipo metropolitano (IEEE 802.16), diseñado para cobertura amplia y rural. Esta tecnología permite enlaces de hasta 50 km con mecanismos de Calidad de Servicio (QoS) basados en programación de tráfico, lo que garantiza estabilidad incluso en escenarios con múltiples usuarios. A diferencia de las soluciones basadas en Wi-Fi, que dependen de la contienda por el medio y tienden a degradarse con el aumento de conexiones, el sistema metropolitano inalámbrico de largo alcance asegura la priorización de aplicaciones críticas como telemedicina y educación virtual, convirtiéndose en una solución más adecuada para territorios como Solano, Caquetá.

En este contexto, surge la necesidad de diseñar propuestas que no solo respondan a los desafíos técnicos de conectividad, sino que también consideren su viabilidad en términos

económicos y operativos. Por ello, el presente trabajo propone una solución de conectividad rural basada en una arquitectura híbrida estructurada en tres niveles: acceso mediante proveedores de última milla satelital, transporte a través de enlaces de microondas y distribución local mediante redes inalámbricas de banda ancha de tipo metropolitano (IEEE 802.16).

El enfoque adoptado integra el análisis técnico con la simulación del modelo y la evaluación financiera, permitiendo determinar su comportamiento bajo condiciones controladas y su viabilidad en un entorno real. De esta manera, se busca plantear una solución adaptable, escalable y orientada a contextos rurales con limitaciones de infraestructura, contribuyendo al cierre de la brecha digital en territorios como el municipio de Solano, Caquetá.

## **Justificación**

### **Viabilidad**

El desarrollo del presente proyecto es viable desde el punto de vista técnico, ya que se fundamenta en la convergencia de tecnologías inalámbricas de alto desempeño plenamente vigentes en la industria. La arquitectura propuesta integra radioenlaces de microondas de alta directividad y sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha, como el estándar IEEE 802.16, los cuales permiten una implementación eficiente en la compleja orografía del Caquetá sin las limitaciones de costo y mantenimiento de la infraestructura física cableada.

La viabilidad se fortalece al incorporar servicios de órbita terrestre baja (LEO), específicamente mediante la tecnología Starlink, que actúa como un backhaul de alta velocidad y latencia reducida, superando las deficiencias de los sistemas satelitales tradicionales. Asimismo, el modelo considera escenarios reales de operación, incluyendo la disponibilidad de proveedores de conectividad global y el análisis de las condiciones geográficas del territorio. Desde el enfoque metodológico, la investigación es viable al apoyarse en herramientas de simulación y estimaciones de ingeniería que permiten validar el comportamiento de la red y la propagación de señales sin requerir intervención directa en campo.

### **Pertinencia**

La investigación es pertinente en la medida en que responde a una problemática estructural relacionada con las limitaciones críticas de conectividad en zonas rurales, donde la selva densa y la dispersión poblacional imposibilitan el despliegue de redes convencionales. El estudio se enfoca en el municipio de Solano, lo que permite abordar una realidad concreta donde la falta de acceso a servicios digitales impacta la inclusión social y productiva de sus habitantes.

La pertinencia radica en el diseño de una solución que utiliza protocolos de capa de enlace optimizados para el largo alcance. A diferencia de las soluciones domésticas de corto radio, esta propuesta implementa mecanismos de programación de tráfico por intervalos de tiempo, propios de tecnologías metropolitanas como las redes inalámbricas de banda ancha de tipo metropolitano (IEEE 802.16). Esto asegura que el servicio no se degrade ante el aumento de usuarios. De este modo, la propuesta se alinea con la necesidad de desarrollar soluciones adaptadas a contextos específicos, evitando enfoques generalizados que no responden a las rigurosas condiciones climáticas y de cobertura de la región amazónica.

### **Relevancia**

El trabajo adquiere relevancia al abordar la conectividad como un factor determinante para el desarrollo social, educativo y económico de las comunidades rurales. La propuesta de un modelo de red híbrido aporta una alternativa técnica robusta para el cierre de la brecha digital en territorios con limitaciones estructurales.

La relevancia de esta arquitectura reside en su capacidad para ofrecer una Calidad de Servicio (QoS) garantizada, permitiendo priorizar aplicaciones críticas como telemedicina o educación virtual mediante una gestión inteligente del ancho de banda. Además, el estudio integra componentes técnicos con un análisis de sostenibilidad, lo que fortalece su aporte al campo de las telecomunicaciones al considerar no solo el diseño de la infraestructura inalámbrica de área metropolitana, sino también su viabilidad económica y operativa en un horizonte de tiempo definido para comunidades con baja densidad de suscriptores.

### **Acotación**

La investigación se delimita al análisis de la conectividad rural en el municipio de Solano, Caquetá, considerando exclusivamente tecnologías inalámbricas de jerarquía superior

como proveedores de última milla satelital, enlaces de microondas y sistemas de distribución de banda ancha metropolitana basados en IEEE 802.16.

El alcance del estudio se centra en el diseño, simulación y evaluación de un modelo de red híbrido, sin contemplar la implementación física o la instalación de nodos en el territorio. Asimismo, el análisis se circunscribe a la evaluación de parámetros de rendimiento como la latencia, el ancho de banda y la estabilidad del enlace bajo condiciones controladas. El componente económico se desarrolla a partir de proyecciones y estimaciones de mercado actuales, lo que permite validar la sostenibilidad del modelo propuesto como una solución escalable para la ruralidad dispersa del departamento.

## **Planteamiento del Problema**

El acceso a servicios de Internet en el municipio de Solano, Caquetá, presenta limitaciones significativas derivadas de condiciones geográficas, económicas y de infraestructura. La amplia extensión territorial, la presencia de selva densa y la dispersión poblacional dificultan el despliegue de redes de telecomunicaciones convencionales, generando una cobertura limitada y desigual en el territorio.

En este contexto, la conectividad se concentra principalmente en la cabecera municipal, mientras que las zonas rurales y veredales presentan acceso intermitente o inexistente. Esta situación restringe el uso de servicios digitales esenciales, afectando procesos educativos, actividades económicas y la comunicación de las comunidades, lo que contribuye al aumento de la brecha digital.

Adicionalmente, las alternativas disponibles para el acceso a Internet presentan limitaciones en términos de cobertura, costos y calidad del servicio. Las soluciones actuales no logran garantizar una conectividad estable ni accesible para la mayoría de la población rural, lo que limita su aprovechamiento y sostenibilidad en el tiempo.

La ausencia de un modelo estructurado que integre el acceso al servicio, el transporte de datos y la distribución local de la conectividad impide el desarrollo de soluciones adaptadas a las condiciones del territorio. Esto genera una dependencia de servicios aislados que no responden de manera integral a las necesidades de la población.

En consecuencia, se hace evidente la necesidad de plantear una solución que permita articular diferentes tecnologías de telecomunicaciones, con el fin de extender la conectividad hacia zonas rurales del municipio y reducir las limitaciones actuales en el acceso a servicios digitales.

**Pregunta Problema**

¿Cómo integrar proveedores de última milla con soluciones de transporte basadas en microondas y sistemas de distribución inalámbrica de banda ancha (IEEE 802.16 – WiMAX) para garantizar una conectividad técnica y económicamente viable en zonas rurales del municipio de Solano, Caquetá?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar los proveedores de última milla disponibles en el municipio de Solano, Caquetá, para diseñar y evaluar una solución de conectividad rural basada en una arquitectura híbrida que integre enlaces de microondas y sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha (IEEE 802.16 – WiMAX), garantizando su viabilidad técnica y económica en zonas rurales de difícil acceso.

### **Objetivos Específicos**

Analizar los proveedores de última milla disponibles en el municipio de Solano, Caquetá, considerando sus condiciones técnicas y económicas.

Diseñar una arquitectura de red de transporte basada en enlaces de microondas para extender la conectividad en zonas rurales.

Evaluar el desempeño técnico y la viabilidad económica del modelo propuesto mediante simulación y análisis financiero.

## Marco Referencial y Teórico

El análisis de soluciones de conectividad en zonas rurales ha sido abordado ampliamente en la literatura académica reciente, especialmente en contextos donde las condiciones geográficas, económicas y sociales limitan el despliegue de infraestructura tradicional. En este sentido, el presente marco integra el estado del arte y los fundamentos teóricos que sustentan el diseño del modelo propuesto, a partir de una revisión de literatura en bases de datos académicas como Scopus, Scielo y Google Scholar, priorizando publicaciones entre 2018 y 2025.

A nivel internacional, diversos estudios han evidenciado que la conectividad rural requiere enfoques diferenciados frente a los modelos urbanos. En regiones de África subsahariana, se ha demostrado que las redes inalámbricas de bajo costo y las arquitecturas descentralizadas permiten ampliar la cobertura en comunidades dispersas, aunque su sostenibilidad depende de factores económicos y organizativos (Murphy et al., 2019). De manera similar, en zonas rurales de Europa, particularmente en países como España y Grecia, se han implementado redes comunitarias y soluciones híbridas que combinan tecnologías inalámbricas para garantizar acceso en territorios con baja densidad poblacional (Saldana et al., 2020).

En América Latina, la conectividad rural ha sido abordada desde enfoques comunitarios y modelos de autogestión. Estudios realizados en países como México y Argentina evidencian que las redes comunitarias permiten reducir la brecha digital mediante esquemas participativos y de bajo costo, siempre que exista apropiación social y sostenibilidad económica (Rey-Moreno et al., 2018). En Centroamérica, investigaciones recientes destacan el uso de tecnologías inalámbricas para extender la conectividad en zonas rurales de difícil acceso, resaltando la importancia de adaptar las soluciones a las condiciones territoriales y a la capacidad de pago de la población (Galperin & Mariscal, 2020).

En el contexto asiático, particularmente en China, se han desarrollado estrategias de conectividad rural basadas en la integración de tecnologías inalámbricas y políticas públicas orientadas a la expansión de cobertura. Estos modelos han permitido mejorar el acceso a servicios digitales en regiones remotas, combinando soluciones de infraestructura con enfoques de optimización de costos (Zhang et al., 2021).

De manera complementaria, estudios globales han señalado que las arquitecturas híbridas, que integran tecnologías de última milla, enlaces de transporte y redes de distribución local, representan una alternativa eficiente para entornos rurales. Estas soluciones permiten optimizar el uso de recursos técnicos y económicos, adaptándose a las condiciones específicas de cada territorio (GSMA, 2021; Internet Society, 2018).

Desde el punto de vista teórico, el diseño de soluciones de conectividad rural se fundamenta en la integración de tres componentes principales: acceso, transporte y distribución. Las tecnologías de última milla corresponden al punto de entrada del servicio de Internet, incluyendo opciones como servicios satelitales, redes móviles e ISP locales. Estas alternativas presentan ventajas y limitaciones en términos de cobertura, latencia, costos y disponibilidad, lo que hace necesario su análisis dentro del contexto específico de aplicación.

Por su parte, los enlaces de microondas constituyen una solución eficiente para el transporte de datos en entornos rurales, permitiendo la comunicación entre nodos mediante radioenlaces de línea de vista. Su desempeño depende de variables como la distancia, la frecuencia de operación, la potencia de transmisión y las condiciones del entorno, incluyendo la posible afectación por vegetación o condiciones climáticas (Song & Bae, 2019). En regiones como el Caquetá, donde la humedad y la pluviosidad son elevadas, resulta fundamental

considerar fenómenos como la atenuación por lluvia y la obstrucción por crecimiento de la vegetación.

Finalmente, la distribución local del servicio se plantea bajo un esquema de acceso inalámbrico de banda ancha diseñado para cubrir áreas metropolitanas y rurales. En este sentido, el estándar IEEE 802.16 (WiMAX) ofrece una alternativa más robusta que las redes domésticas tradicionales, al implementar mecanismos de programación de tráfico que garantizan la Calidad de Servicio (QoS). Este enfoque permite priorizar aplicaciones críticas como telemedicina y educación virtual, asegurando estabilidad incluso en escenarios con múltiples usuarios. A diferencia de las soluciones basadas en Wi-Fi, que dependen de la contienda por el medio y tienden a degradarse con el aumento de conexiones, WiMAX asegura enlaces de largo alcance (hasta 50 km) y una gestión eficiente del espectro, convirtiéndose en una opción más adecuada para territorios como Solano, Caquetá.

En conjunto, la literatura revisada y los fundamentos teóricos analizados permiten establecer que la integración de tecnologías inalámbricas en arquitecturas híbridas constituye una alternativa viable para la conectividad rural. Este enfoque proporciona las bases necesarias para el diseño del modelo propuesto en el municipio de Solano, Caquetá, garantizando coherencia entre el contexto, la teoría y la solución planteada.

### **Antecedentes**

Las iniciativas de conectividad comunitaria no son completamente nuevas. En varios países han surgido como respuesta directa a la falta de cobertura comercial en territorios rurales o aislados. En muchos casos, estas redes nacieron a pequeña escala, impulsadas por organizaciones locales, universidades o incluso por las propias comunidades que buscaban resolver necesidades básicas de comunicación. En distintos países de América Latina se han

documentado experiencias donde las propias comunidades han impulsado la instalación de redes inalámbricas básicas, inicialmente con recursos limitados y, en algunos casos, con acompañamiento técnico de universidades u organizaciones sociales.

En México, por ejemplo, algunas comunidades indígenas desarrollaron modelos de telecomunicaciones autónomas para suplir la falta de operadores tradicionales. Estos proyectos no solo resolvieron un problema técnico, sino que fortalecieron procesos organizativos locales. De manera similar, se han documentado experiencias en zonas rurales de Argentina y Brasil, donde redes comunitarias basadas en tecnología Wi-Fi permitieron ampliar el acceso a servicios digitales sin depender exclusivamente de grandes empresas proveedoras.

En Colombia, el debate sobre conectividad rural ha estado presente en políticas públicas recientes, especialmente en regiones apartadas de la Amazonía y la Orinoquía. No obstante, aunque existen programas gubernamentales orientados a ampliar cobertura, la documentación académica sobre modelos comunitarios estructurados aún es limitada. La mayoría de iniciativas reportadas se enfocan en proyectos institucionales, pero no siempre profundizan en esquemas sostenibles de autogestión.

En el departamento del Caquetá, particularmente en municipios con amplia extensión territorial como Solano, las dificultades de acceso geográfico han influido directamente en el rezago tecnológico. La conectividad, cuando existe, suele concentrarse en cabeceras municipales, dejando a veredas y asentamientos más alejados con acceso intermitente o inexistente. Esta situación ha generado dependencia de soluciones temporales o individuales que no siempre garantizan continuidad.

Frente a este panorama, los antecedentes revisados muestran que los modelos comunitarios pueden representar una alternativa viable, siempre que integren planificación

técnica y organización social. Sin embargo, también evidencian que la sostenibilidad no depende únicamente de instalar equipos; requiere acompañamiento, claridad en la gestión financiera y apropiación local.

A partir de los antecedentes revisados, se identifica un patrón común: las iniciativas que logran mantenerse en el tiempo no dependen únicamente de la instalación de infraestructura, sino de la articulación entre diseño técnico, sostenibilidad económica y apropiación comunitaria. Este hallazgo orienta directamente el enfoque del presente trabajo, el cual integra estos tres componentes en la propuesta desarrollada.

En consecuencia, el presente trabajo se sitúa en esa línea de análisis: retoma experiencias previas, reconoce sus aciertos y limitaciones, y propone un modelo adaptado a las condiciones específicas del municipio de Solano. No parte de cero, pero tampoco replica esquemas externos sin contextualización, considerando que la sostenibilidad de estas iniciativas depende de la integración entre diseño técnico, organización comunitaria y viabilidad económica (Rey-Moreno et al., 2018).

### **Marco Conceptual**

Las redes comunitarias no se limitan a la instalación de infraestructura tecnológica en un territorio determinado. Implican, en realidad, una forma distinta de concebir la conectividad, donde la comunidad participa activamente en la gestión, operación y sostenimiento del servicio (Internet Society, 2018).

La brecha digital, por su parte, no puede entenderse únicamente como ausencia de cobertura. También involucra capacidades de uso, apropiación tecnológica y continuidad en el tiempo, lo que evidencia desigualdades estructurales en el acceso y aprovechamiento de las tecnologías de la información (International Telecommunication Union, 2022).

El Wi-Fi comunitario suele apoyarse en tecnologías inalámbricas de estándar abierto que permiten distribuir conectividad sin requerir despliegues extensivos de cableado. En territorios con geografía compleja, esta característica resulta especialmente relevante, ya que reduce costos y facilita la implementación de soluciones de acceso local (Song & Bae, 2019). No obstante, en el contexto de Solano, Caquetá, se privilegia el uso de redes inalámbricas de banda ancha de tipo metropolitano (IEEE 802.16), dado que ofrecen mayor alcance, estabilidad y mecanismos de Calidad de Servicio (QoS) que resultan más adecuados para zonas rurales dispersas.

La sostenibilidad en proyectos de conectividad rural suele analizarse en tres dimensiones: técnica, económica y social. Desde el punto de vista técnico, implica garantizar niveles adecuados de cobertura y calidad de servicio; en el componente económico, asegurar que los costos de operación puedan ser cubiertos en el tiempo; y en el ámbito social, promover la apropiación del servicio por parte de la comunidad. La ausencia de cualquiera de estas dimensiones puede comprometer la continuidad del modelo propuesto (Rey-Moreno et al., 2018).

### **Marco Legal**

El acceso a los servicios de telecomunicaciones en Colombia se encuentra regulado por la Ley 1341 de 2009, la cual establece los principios para la promoción del acceso, el uso eficiente del espectro radioeléctrico y el desarrollo del sector TIC en el país. Esta normativa reconoce la importancia de garantizar conectividad en todo el territorio nacional, incluyendo zonas rurales y de difícil acceso.

En el ámbito regulatorio, la Comisión de Regulación de Comunicaciones establece lineamientos relacionados con la prestación de servicios de telecomunicaciones, la calidad del servicio y el uso adecuado del espectro radioeléctrico, lo cual implica que cualquier modelo de

conectividad debe operar dentro de los parámetros técnicos definidos por la normativa vigente (Comisión de Regulación de Comunicaciones, 2022).

En este contexto, las redes comunitarias pueden desarrollarse utilizando bandas de uso libre, lo que reduce barreras de entrada y facilita su implementación en territorios rurales. Sin embargo, estas iniciativas deben cumplir con condiciones técnicas como límites de potencia de transmisión, uso adecuado del espectro y respeto por la normativa en materia de protección de datos y servicios TIC.

De esta manera, el modelo propuesto se enmarca dentro de los lineamientos legales vigentes, garantizando que su implementación no solo sea técnicamente viable, sino también jurídicamente válida en el contexto colombiano.

### **Marco Contextual**

El municipio de Solano, en el departamento del Caquetá, presenta condiciones geográficas y sociales que lo convierten en un caso crítico para el análisis de conectividad rural. Su amplia extensión territorial, la presencia de selva densa y la dispersión poblacional dificultan el despliegue de infraestructura tradicional, generando una cobertura limitada y desigual. En este escenario, la conectividad depende principalmente de soluciones inalámbricas como servicios satelitales o redes móviles, las cuales presentan limitaciones asociadas a costos elevados, latencia y cobertura parcial.

La realidad de Solano evidencia que cualquier propuesta de conectividad debe considerar criterios de adaptabilidad, escalabilidad y sostenibilidad económica. Las soluciones convencionales basadas en cableado resultan inviables por los altos costos de obra civil y mantenimiento en un entorno selvático. Por ello, se requiere un modelo que aproveche

tecnologías inalámbricas de largo alcance y que pueda ajustarse progresivamente a las condiciones del territorio.

Por estas razones, el diseño del modelo de redes inalámbricas de banda ancha de tipo metropolitano (IEEE 802.16) no se formula de manera abstracta, sino tomando como referencia directa las características específicas del municipio. Este enfoque contextual busca evitar propuestas genéricas que, aunque puedan funcionar en teoría, no necesariamente respondan a la realidad local.

A partir de estas condiciones, se hace evidente que cualquier solución de conectividad debe ser diseñada bajo criterios de adaptabilidad, escalabilidad y bajo costo. Esto refuerza la pertinencia de un modelo de red comunitaria basada en acceso inalámbrico de largo alcance, en el cual la infraestructura pueda crecer progresivamente y ajustarse a las condiciones reales del territorio.

En este contexto, la propuesta de una arquitectura híbrida que combine proveedores de última milla satelital, enlaces de microondas y sistemas de distribución de banda ancha metropolitana se convierte en una alternativa técnica coherente con las necesidades de Solano. Este modelo no solo responde a las limitaciones geográficas y económicas, sino que también ofrece una solución escalable y sostenible para reducir la brecha digital en comunidades rurales dispersas del Caquetá.

## **Diseño Metodológico**

### **Enfoque de la Investigación**

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto con predominio cualitativo y alcance descriptivo–analítico. El estudio no contempla trabajo de campo experimental, sino el análisis sistemático de información técnica, normativa y académica relacionada con conectividad rural, proveedores de última milla y diseño de redes inalámbricas.

Este enfoque permite estructurar un modelo de conectividad basado en la integración de diferentes tecnologías, en el cual se analizan tanto variables técnicas como económicas. Asimismo, se incorpora el análisis de proveedores de última milla como elemento clave para la definición del modelo, lo que permite establecer criterios de acceso a Internet en el contexto del municipio de Solano, Caquetá. La investigación documental resulta adecuada para este tipo de estudios, ya que permite analizar información existente y estructurar propuestas aplicables a contextos específicos.

### **Tipo de Investigación**

Se trata de una investigación de tipo documental–analítica. Bajo este enfoque, se recopila, organiza y examina información proveniente de literatura científica, documentos técnicos, marcos regulatorios y datos oficiales, con el fin de construir una propuesta estructurada aplicable al contexto del municipio de Solano.

El componente analítico permite interpretar la información recopilada para transformarla en criterios de diseño, integrando el análisis de tecnologías de última milla, enlaces de microondas y redes inalámbricas de banda ancha de tipo metropolitano (IEEE 802.16) en un modelo de conectividad rural.

### **Método**

El método empleado es inductivo–analítico. A partir del estudio de experiencias nacionales e internacionales sobre conectividad rural, así como del análisis de tecnologías de telecomunicaciones, se identifican patrones y elementos comunes que permiten formular un modelo adaptado a las condiciones territoriales del municipio objeto de estudio.

Este enfoque facilita la construcción de una propuesta contextualizada, en la cual los elementos teóricos se integran con variables reales del entorno, particularmente en aspectos como acceso al servicio, transporte de datos y distribución de la conectividad.

### **Técnicas de Recolección y Sistematización de la Información**

La información fue recolectada mediante una revisión estructurada de literatura académica y técnica en bases de datos como Scopus, Scielo y Google Scholar, priorizando estudios relacionados con conectividad rural, tecnologías de última milla, enlaces de microondas y redes inalámbricas.

Para fortalecer la trazabilidad del análisis, la información fue organizada mediante matrices comparativas que permitieron identificar variables técnicas y de gestión relevantes.

Entre las variables analizadas se incluyen el tipo de proveedor de última milla, cobertura del servicio, capacidad de transmisión, tecnologías empleadas, costos de implementación y operación, modelos de sostenibilidad.

Cada fuente fue evaluada con base en estas variables, lo que permitió establecer criterios de comparación entre diferentes enfoques y tecnologías.

### **Procedimiento**

El desarrollo del modelo propuesto se estructuró en tres fases principales:

En una primera fase, se realizó la identificación y análisis de los proveedores de última milla disponibles en el municipio de Solano, evaluando sus características técnicas, cobertura,

costos y disponibilidad del servicio.

En la segunda fase, se diseñó la arquitectura del modelo de red, estructurada en tres niveles: acceso (proveedor de última milla), transporte (enlaces de microondas) y distribución (red inalámbrica de banda ancha de tipo metropolitano – IEEE 802.16), considerando las condiciones geográficas y poblacionales del territorio.

En la tercera fase, se llevó a cabo la simulación del modelo propuesto y la evaluación de su viabilidad técnica y económica, mediante el análisis de variables como capacidad, cobertura, número de usuarios, calidad de servicio (QoS) y proyección de flujos de caja.

La simulación del modelo propuesto se realizó mediante un enfoque analítico basado en modelos teóricos de propagación de señal y distribución de capacidad, apoyado en herramientas de cálculo como hojas de cálculo (Excel). Este enfoque permitió estimar el comportamiento del sistema bajo condiciones controladas, sin requerir herramientas de simulación a nivel de paquetes, lo cual resulta adecuado para el alcance del presente estudio de carácter aplicado y exploratorio.

No obstante, es importante señalar que en el ámbito académico y profesional existen herramientas especializadas ampliamente utilizadas para la simulación de redes de telecomunicaciones, tales como NS-3, OPNET Modeler, Cisco Packet Tracer y MATLAB, las cuales permiten modelar con mayor nivel de detalle variables como latencia, pérdida de paquetes, congestión y calidad de servicio (QoS).

En este trabajo, la simulación se orienta a la estimación del desempeño general del sistema, enfocándose en variables como capacidad, cobertura, número de usuarios y distribución del ancho de banda. Este enfoque permite validar la coherencia técnica del modelo propuesto y

establecer condiciones base para su implementación en contextos reales, manteniendo consistencia con el enfoque metodológico planteado.

Se definieron variables clave que permiten evaluar el modelo desde un enfoque técnico y económico:

**Tabla 1**

*Variables clave del modelo*

Variable	Definición	Justificación
Proveedor de última milla	Tipo de tecnología y disponibilidad	Define acceso al servicio
Cobertura	Área atendida por nodo	Determina alcance
Capacidad	Usuarios simultáneos	Dimensionamiento
Ancho de banda	Velocidad por usuario	Calidad del servicio
Costos	CAPEX y OPEX	Sostenibilidad
Disponibilidad	Continuidad del servicio	Funcionamiento
Ingresos	Recursos generados	Evaluación financiera

*Nota.* Se presentan las variables técnicas y económicas utilizadas para el diseño y evaluación del modelo de conectividad rural propuesto. *Fuente.* Autoría propia.

**Definición Operativa de Variables**

Proveedor de última milla: tipo de tecnología utilizada para el acceso a Internet (satelital, móvil o ISP local), evaluada en términos de cobertura, costo y disponibilidad en la región.

Cobertura: área efectiva alcanzada por cada nodo, estimada a partir de parámetros de propagación de señal y condiciones del entorno.

Capacidad: número máximo de usuarios simultáneos que puede soportar el sistema sin degradación significativa del servicio.

Ancho de banda: velocidad promedio asignada por usuario, definida en función del tipo de uso esperado.

Costos (CAPEX y OPEX): valores monetarios asociados a la implementación y operación del sistema.

Ingresos: flujo económico generado a partir del número de usuarios y la tarifa establecida.

Disponibilidad: porcentaje estimado de continuidad del servicio, considerando estabilidad del enlace y condiciones operativas.

### **Indicadores de Evaluación del Modelo**

Para evaluar el desempeño del modelo propuesto se definieron los siguientes indicadores relacionados con el nivel de cobertura alcanzado, número de usuarios atendidos, Relación costo/usuario, Punto de equilibrio, Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR).

Asimismo, se incorporan variables técnicas asociadas al desempeño de redes inalámbricas, tales como nivel de señal recibido (RSSI), relación señal-ruido (SNR) y capacidad efectiva del enlace, las cuales permiten complementar el análisis del modelo desde un enfoque de ingeniería de telecomunicaciones

## Resultados

### **Análisis de Proveedores de Última Milla en el Municipio de Solano, Caquetá**

El acceso a Internet en zonas rurales depende en gran medida de los proveedores de última milla, quienes permiten la conexión entre el usuario final y el nodo de agregación de la red. En el municipio de Solano, Caquetá, las condiciones geográficas y la dispersión poblacional han limitado la presencia de operadores tradicionales, generando una dependencia de soluciones inalámbricas y satelitales. La selva amazónica, la baja densidad poblacional y la falta de infraestructura terrestre convierten a Solano en un caso representativo de la brecha digital rural en Colombia.

En este capítulo se analizan los principales proveedores de última milla disponibles, considerando su origen, fecha de integración, evolución tecnológica, solución ofrecida, cobertura, costos, velocidades, limitantes, ventajas y desventajas, con el fin de determinar su aplicabilidad en el modelo de conectividad propuesto.

#### ***Claro Colombia***

Claro pertenece al grupo mexicano América Móvil. Llegó a Colombia en 2003 tras la integración de Comcel. Aunque nació como operador celular, en su expansión también ofreció servicios de Internet fijo sobre cobre (ADSL) en zonas urbanas, aprovechando la infraestructura de telefonía básica.

Claro combina redes móviles celulares (2G, 3G, 4G LTE, 4.5G) con servicios fijos sobre cobre y, más recientemente, fibra en ciudades.

Las redes móviles funcionan mediante estaciones base que transmiten señal de radiofrecuencia a dispositivos móviles.

Con la evolución hacia 3G y 4G LTE se introdujeron técnicas como OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) y MIMO (Multiple Input Multiple Output), que aumentaron la velocidad y capacidad de transmisión.

En 2024, Claro integró la tecnología satelital LEO de Starlink, ampliando cobertura en zonas selváticas.

Evolución cronológica:

Telefonía fija con cobre (años 90–2000): Internet por ADSL, velocidades de 1–5 Mbps en ciudades. Nunca llegó a Solano.

2G (2003): Voz y SMS, datos básicos (WAP) a 50–100 kbps. Limitante: no soportaba Internet real.

3G (2007): Internet móvil hasta 2 Mbps. Permitió navegación básica y correo electrónico. En Solano, cobertura mínima.

4G LTE (2014): Velocidades de 5–20 Mbps. Gracias a OFDMA y MIMO, permitió streaming y videollamadas en cabeceras municipales. En veredas, señal débil.

4.5G (2020): Mejoró capacidad espectral, alcanzando hasta 50 Mbps en ciudades. En Solano, impacto limitado.

Starlink LEO (2024): Claro integró Starlink, ofreciendo velocidades de 100 Mbps y latencias de 40–80 ms en zonas selváticas.

Cobertura en Solano: Cabecera municipal con LTE; veredas dependen de Starlink.

Costos de servicio: Planes móviles desde \$40.000 COP; Starlink desde \$250.000 COP mensuales + kit inicial (\$599.000–1.3M).

Ventajas: Infraestructura híbrida móvil-satelital; soporte técnico nacional; alianza con Starlink.

Desventajas: Señal móvil débil en selva; costos altos de Starlink para familias rurales.

### ***Movistar Colombia***

Movistar es filial de Telefónica (España). Llegó a Colombia en 2004 tras la compra de BellSouth. A diferencia de Claro, Movistar tuvo un fuerte componente de telefonía fija sobre cobre, ofreciendo Internet por módem dial-up y luego ADSL, antes de expandirse a redes móviles y fibra óptica.

Movistar combina telefonía fija (cobre y ADSL), redes móviles celulares y fibra óptica en ciudades. La fibra transmite datos mediante pulsos de luz en cables de vidrio, ofreciendo velocidades muy superiores y baja latencia, pero su despliegue es costoso en zonas rurales.

Evolución cronológica:

Telefonía fija con cobre (años 90–2000): Conexión por módem dial-up, velocidades de 56 kbps. Limitante: muy lenta y dependiente de líneas telefónicas.

ADSL (2000–2005): Internet sobre cobre, velocidades de 1–5 Mbps en ciudades. Nunca llegó a Solano.

2G (2004): Voz y SMS. Sin acceso real a Internet.

3G (2006): Internet móvil hasta 2 Mbps. Permitió navegación básica. En Solano, cobertura marginal.

4G LTE (2014): Velocidades de 10–30 Mbps. Permitió streaming y videollamadas en cabeceras. En veredas, sin cobertura.

Fibra óptica (2018): Velocidades de hasta 300 Mbps en ciudades. No llegó a Solano por inviabilidad económica y geográfica.

Cobertura en Solano: Cabecera municipal; sin cobertura en veredas.

Costos de servicio: Planes móviles desde \$45.000 COP; fibra desde \$100.000–\$150.000 COP (no disponible en Solano).

Ventajas: Estabilidad urbana; integración de voz y datos; reconocimiento de marca.

Desventajas: No llega a veredas; dependencia de torres; inviabilidad en zonas selváticas.

### ***HughesNet***

HughesNet es filial de Hughes Network Systems (EE. UU.). Llegó a Colombia en 2016 como proveedor satelital GEO.

Utiliza satélites geoestacionarios (GEO), ubicados a 36.000 km de la Tierra. Estos permanecen fijos respecto al planeta, lo que permite cobertura amplia pero con alta latencia (~600 ms). La señal viaja desde el usuario al satélite y luego a la estación terrestre, generando retrasos perceptibles.

Evolución cronológica:

Satélites GEO (2016): Introdujo Internet satelital en Colombia. Velocidades de 10–25 Mbps.

Cobertura en Solano: Total, incluyendo veredas selváticas.

Costos de servicio: Desde \$150.000 COP mensuales + instalación inicial.

Ventajas: Cobertura nacional; disponibilidad inmediata; independencia de infraestructura terrestre.

Desventajas: Latencia elevada que afecta aplicaciones en tiempo real. Costos poco sostenibles, costos de instalación (~\$800.000 COP) y mensualidades (~\$150.000 COP) altos para comunidades rurales.

### ***Starlink***

Starlink es parte de SpaceX (EE. UU.). Llegó a Colombia en 2023, con despliegue

progresivo en regiones apartadas.

Utiliza satélites de órbita baja (LEO), ubicados a 550 km de la Tierra. Al estar más cerca, reducen la latencia a 20–60 ms. La constelación de miles de satélites permite cobertura global y velocidades de 50–250 Mbps.

Evolución cronológica:

Satélites LEO (2023): Inicio de operaciones en Colombia. Velocidades de 50–250 Mbps; latencia de 20–60 ms.

Alianza con Claro (2024): Amplió cobertura y paquetes empresariales/comunitarios.

Limitaciones:

Cobertura en Solano: Total, incluyendo veredas selváticas.

Costos de servicio: \$230.000–\$250.000 COP mensuales + kit inicial (~\$2.5M COP).

Ventajas: Baja latencia; velocidades comparables a fibra; viable para aplicaciones críticas; cobertura en veredas selváticas.

Desventajas: Costos elevados; costos iniciales (~\$2.5M COP por kit) y mensualidad (~\$250.000 COP). Requiere energía eléctrica estable. Adopción individual limitada, necesita modelos comunitarios.

## Tabla 2

*Comparativa de proveedores de última milla en Solano, Caquetá*

Proveedor	Tecnología principal	Cobertura en Solano	Velocidad promedio	Latencia	Costos mensuales	Ventajas	Limitaciones
Claro	Telefonía fija cobre (ADSL),	Cabecera municipal con LTE;	5–20 Mbps (LTE),	40–80 ms (LEO),	\$40.000–\$250.000 + kit	Infraestructura híbrida	Señal móvil débil en selva; costos altos de

	redes móviles	veredas dependen de Starlink	hasta 100 Mbps (Starlink)	>100 ms (LTE rural)	inicial \$599.000 –1.3M	móvil-satelital; soporte técnico nacional; alianza con Starlink	Starlink para familias rurales
Movistar	Telefonía fija cobre (dial-up/ADSL), redes móviles 2G/3G/4G LTE, fibra óptica en ciudades	Cabecera municipal ; sin cobertura en veredas Solano)	10–30 Mbps (LTE), hasta 300 Mbps en fibra (no disponible en Solano)	80–120 ms	\$45.000–\$150.000 (LTE/fibra)	Estabilizada urbana; integración de voz y datos; reconocimiento de marca	No llega a veredas; dependencia de torres; inviabilidad en zonas selváticas
HughesNet	Satélite GEO	Cobertura total en Solano	10–25 Mbps	~600 ms	\$150.000 +; instalación inicial >\$800.000	Cobertura nacional; disponibilidad inmediata en zonas remotas;	Latencia alta; poco útil para telemedicina o educación virtual; costos poco sostenibles

						independe	
						ncia de	
						infrastru	
						ctura	
						terrestre	
Starlink	Satélite	Cobertura	50–250	20–60	\$230.000	Baja	Costos
	LEO	total en	Mbps	ms	–	latencia;	elevados;
		Solano			\$250.000	velocidad	requiere
					+ kit	es	energía
					inicial	comparab	eléctrica
					~\$2.500.0	les a	estable;
					00	fibra;	adopción
						viable	individual
						para	limitada;
						aplicacion	necesita
						es	modelos
						críticas;	comunitarios
						cobertura	
						en	
						veredas	
						selváticas	

---

*Nota.* La información corresponde a una comparación de los principales proveedores de última milla disponibles para el municipio de Solano, Caquetá, considerando cobertura, tecnología, velocidad, latencia, costos, ventajas y limitaciones. *Fuente.* Autoría propia con base en información técnica de los proveedores y fuentes consultadas.

## **Selección del Proveedor de Última Milla para la Solución Propuesta**

El análisis comparativo de los proveedores de última milla en Solano, Caquetá, evidencia diferencias sustanciales en cuanto a cobertura, desempeño técnico, costos y pertinencia para un modelo de conectividad rural. La selección del proveedor no puede basarse únicamente en la disponibilidad del servicio, sino en una evaluación integral que considere la viabilidad técnica, económica y social en el contexto amazónico.

### ***Limitaciones de los Operadores Tradicionales***

Los operadores móviles tradicionales, Claro y Movistar, han demostrado avances tecnológicos significativos en el país, pasando de redes sobre cobre (ADSL) y telefonía básica a 2G, 3G, 4G LTE y despliegues iniciales de fibra óptica. Sin embargo, en Solano su cobertura es parcial y limitada a la cabecera municipal, dejando a las veredas selváticas sin acceso real.

**Claro:** Aunque cuenta con una alianza con Starlink, su modelo actual está orientado a clientes urbanos y empresariales, con costos elevados y sin esquemas comunitarios.

**Movistar:** Su despliegue de fibra óptica y LTE es robusto en ciudades, pero inexistente en zonas rurales dispersas.

En ambos casos, la dependencia de infraestructura terrestre (torres, cableado) y la baja rentabilidad del mercado rural hacen inviable su expansión hacia Solano.

### ***Limitaciones de HughesNet***

HughesNet, proveedor satelital GEO, garantiza cobertura nacional y disponibilidad inmediata en zonas remotas. Sin embargo, su latencia elevada (~600 ms) lo hace inviable para aplicaciones modernas como telemedicina, educación virtual o videoconferencias. Además, los costos de instalación (~\$800.000 COP) y mensualidades (~\$150.000 COP) resultan poco sostenibles para comunidades rurales. Aunque HughesNet cumple con la cobertura, no satisface

los requisitos de calidad de servicio que demanda un proyecto orientado a cerrar la brecha digital.

### ***Ventajas de Starlink***

En contraste, Starlink introduce un modelo más eficiente gracias a su constelación de satélites LEO (Low Earth Orbit), que ofrecen:

Velocidades de 50–250 Mbps, comparables a la fibra óptica.

Latencias de 20–60 ms, aptas para aplicaciones críticas en tiempo real.

Cobertura total en Solano, incluyendo veredas selváticas.

Estas características lo convierten en el único proveedor capaz de garantizar calidad de servicio en un entorno amazónico donde la infraestructura terrestre es inviable.

### ***Consideración de la Alianza Claro–Starlink***

Es cierto que en 2024 se anunció la alianza entre Claro y Starlink en Colombia, orientada principalmente a empresas, entidades gubernamentales y sectores productivos. Este servicio empresarial incluye soporte técnico especializado, acuerdos de nivel de servicio (SLA) y atención 24/7. Sin embargo, sus costos y condiciones lo hacen inaccesible para comunidades rurales dispersas como las de Solano. Por lo tanto, aunque la solución existe en el mercado, no está diseñada para hogares campesinos ni instituciones educativas rurales, sino para clientes corporativos con capacidad de pago.

### ***Justificación de la Selección***

La pertinencia de seleccionar Starlink como proveedor de última milla se fundamenta en razones técnicas y sociales:

**Accesibilidad técnica:** Es el único proveedor que garantiza velocidades y latencias adecuadas para aplicaciones críticas como educación virtual, telemedicina y trámites digitales.

Cobertura total: A diferencia de Claro y Movistar, Starlink llega a todas las veredas selváticas de Solano, sin depender de torres ni cableado.

Modelo comunitario: Aunque los costos individuales son elevados (~\$250.000 COP mensuales + kit inicial de ~\$2.5M COP), el proyecto propone un esquema de redistribución comunitaria, instalando Starlink en un punto central (escuela) y compartiendo la señal mediante antenas omnidireccionales y routers domésticos. Esto reduce la carga económica y amplía el impacto social.

Sostenibilidad energética: La integración de paneles solares asegura continuidad en zonas sin red eléctrica estable, resolviendo una de las principales limitaciones del servicio.

Impacto social y académico: La propuesta prioriza aplicaciones críticas para la población rural, generando beneficios directos en educación, salud y productividad local. Además, documentar este modelo aporta conocimiento replicable en otras regiones amazónicas.

La selección de Starlink como proveedor de última milla para el proyecto se justifica plenamente en términos técnicos, económicos y sociales. Aunque Claro y Movistar ofrecen soluciones parciales y HughesNet garantiza cobertura con baja calidad de servicio, solo Starlink cumple con los requisitos de velocidad, latencia y cobertura total en Solano. La alianza Claro–Starlink refuerza la viabilidad tecnológica, pero el proyecto académico aporta un modelo comunitario, sostenible y adaptado a la ruralidad amazónica, que complementa y diferencia la propuesta de las soluciones empresariales existentes.

### **Propuesta de Integración Dentro de la Arquitectura de Red**

Con base en lo anterior, se propone una solución de conectividad basada en una arquitectura híbrida, en la cual el proveedor satelital actúa como punto de acceso principal a

Internet, mientras que la distribución del servicio se realiza mediante tecnologías inalámbricas complementarias.

En este modelo, el enlace satelital proporciona la conexión inicial, la cual es transportada hacia diferentes puntos del territorio a través de enlaces de microondas. Estos enlaces permiten extender la cobertura hacia zonas aledañas sin necesidad de infraestructura cableada.

Posteriormente, la conectividad es distribuida a los usuarios finales mediante redes Wi-Fi locales, facilitando el acceso compartido al servicio y optimizando el uso del ancho de banda disponible. Este enfoque permite reducir costos, mejorar la cobertura y adaptar la solución a las condiciones geográficas del municipio.

De esta manera, se plantea una solución escalable y técnicamente viable que integra proveedores de última milla con tecnologías de transporte y distribución, contribuyendo a mejorar el acceso a servicios de conectividad en zonas rurales del municipio de Solano, Caquetá.

### **Diseño de Red de Transporte y Evaluación de Alternativas**

El municipio de Solano y sus comunidades rurales, como El Danubio, presentan condiciones geográficas complejas que dificultan el acceso a servicios de conectividad. Este capítulo analiza tres alternativas de transporte de red: (1) un sistema propio con antenas de microondas, (2) el aprovechamiento de infraestructura móvil existente y la instalación de torres adicionales, y (3) la conectividad satelital mediante Starlink. El objetivo es demostrar, con evidencia técnica y económica, cuál es la solución más viable y sostenible para reducir la brecha digital en la región.

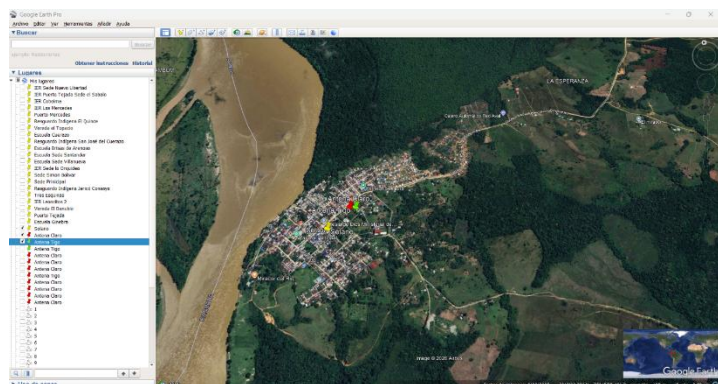
El diseño de soluciones de conectividad rural en territorios selváticos requiere evaluar no solo la disponibilidad tecnológica, sino también las condiciones geográficas, económicas y operativas del entorno. En el municipio de Solano, Caquetá, la presencia de selva densa, variaciones

topográficas, dispersión poblacional y ausencia de infraestructura terrestre dificultan la implementación de redes convencionales.

En este capítulo se analizan tres alternativas de conectividad para el transporte de datos hacia zonas rurales: (1) enlaces de microondas mediante infraestructura propia, (2) aprovechamiento de infraestructura móvil existente y expansión mediante torres adicionales y (3) conectividad satelital mediante tecnología Starlink. El análisis se desarrolla a partir de evidencia geográfica obtenida en Google Earth Pro, perfiles de elevación y evaluación técnica de línea de vista (LOS), con el propósito de determinar la alternativa más viable para el contexto del municipio de Solano.

## Figura 1

### *Vista general del municipio de Solano, Caquetá*

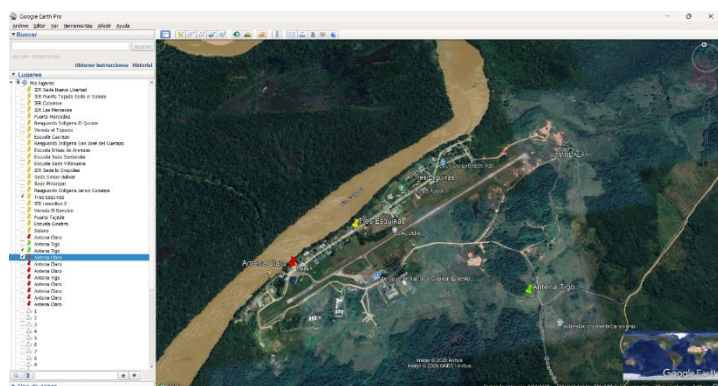


*Nota.* Captura obtenida mediante Google Earth Pro, utilizada para identificar la distribución geográfica del municipio de Solano y las posibles rutas de conectividad rural. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 1 permite observar la extensión territorial del municipio de Solano y la dispersión geográfica de las comunidades rurales. Esta condición representa una limitación importante para el despliegue de infraestructura cableada y obliga a considerar soluciones inalámbricas de largo alcance.

## Figura 2

### *Vista general de la Base Militar de Tres Esquinas*



*Nota.* Imagen elaborada mediante Google Earth Pro que presenta la ubicación geográfica de la

Base Militar de Tres Esquinas, localizada aproximadamente a 2 km del casco urbano del municipio de Solano (Caquetá). *Fuente.* Autoría propia.

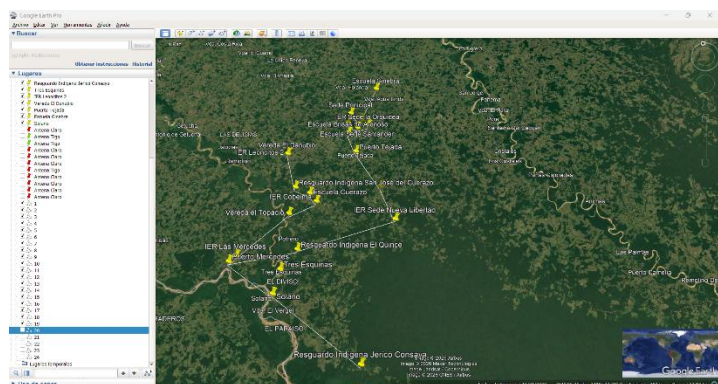
La Figura 2 evidencia la ubicación estratégica de la Base Militar de Tres Esquinas dentro del corredor geográfico cercano al municipio de Solano. Aunque esta infraestructura dispone de sistemas avanzados de telecomunicaciones y enlaces de transporte de alta capacidad, su utilización para proyectos civiles de conectividad resulta inviable debido a restricciones operacionales, protocolos de seguridad nacional y limitaciones de acceso a infraestructura militar.

Adicionalmente, el espacio aéreo y radioeléctrico asociado a instalaciones militares se encuentra sujeto a regulaciones especiales, lo que limita la posibilidad de implementar enlaces civiles de microondas o reutilizar infraestructura existente para distribución comunitaria de Internet.

Desde el punto de vista técnico y legal, la infraestructura militar no está diseñada para funcionar como red pública de acceso rural, razón por la cual no representa una solución viable para el modelo de conectividad planteado en esta investigación.

### Figura 3

*Distribución geográfica de comunidades rurales y posibles rutas de conectividad*



*Nota.* Imagen elaborada mediante Google Earth Pro que muestra la distribución geográfica de las comunidades rurales y las posibles rutas de conectividad entre la cabecera municipal y las zonas objeto de estudio. *Fuente.* Autoría propia.

La distribución de las comunidades evidencia grandes distancias entre nodos potenciales de conectividad, así como barreras naturales asociadas a la selva amazónica y a la topografía del terreno.

### ***Alternativa 1: Sistema Propio con Antenas de Microondas***

La primera alternativa evaluada consiste en la implementación de una red propia basada en radioenlaces de microondas punto a punto, utilizando torres de telecomunicaciones ubicadas en puntos estratégicos entre Solano y las comunidades rurales.

**Descripción:** Se plantea instalar torres en puntos altos para establecer enlaces punto a punto entre Solano y comunidades rurales.

**Validación geográfica:** Los perfiles de elevación muestran pendientes superiores al 15% y variaciones de altitud entre 185 m y 284 m. La vegetación, humedad y relieve irregular generan obstrucciones de línea de vista (LOS).

**Limitaciones:**

Dependencia total entre nodos: si falla una antena, toda la red se interrumpe.

Necesidad de torres de gran altura (25–30 m).

Atenuación por lluvia y crecimiento de árboles.

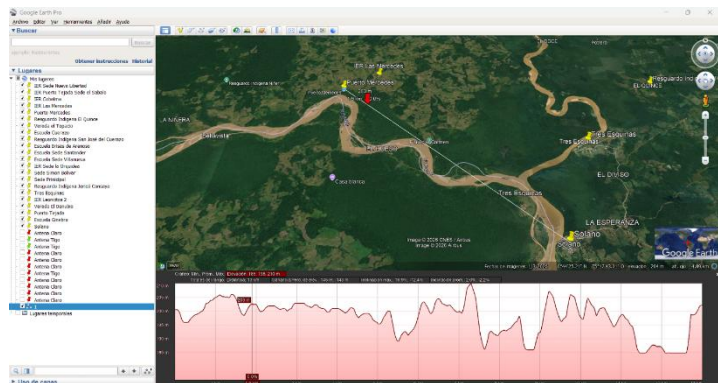
Costos elevados de instalación y mantenimiento.

**Conclusión:** Aunque el diseño puede simularse, se demuestra que no es viable por las condiciones geográficas y la fragilidad operativa.

## Evaluación de Perfiles Topográficos y Línea de Vista.

**Figura 4**

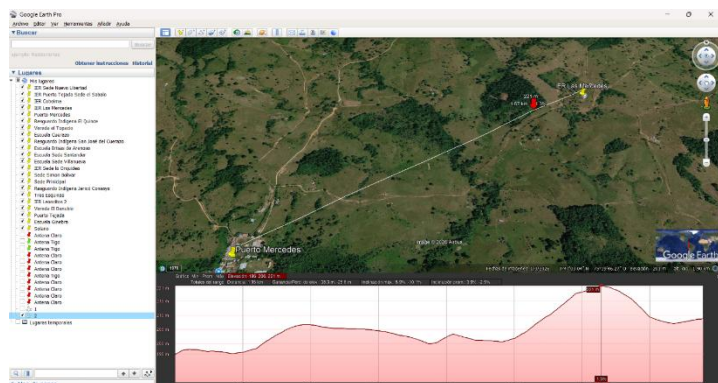
*Perfil topográfico entre Solano y nodo rural 1*



*Nota.* Perfil topográfico elaborado mediante Google Earth Pro que muestra la elevación del terreno entre el municipio de Solano y el nodo rural 1, utilizado para evaluar las condiciones de línea de vista entre los nodos propuestos de conectividad. *Fuente.* Autoría propia.

**Figura 5**

*Evaluación de línea de vista en enlace rural con obstrucción topográfica*



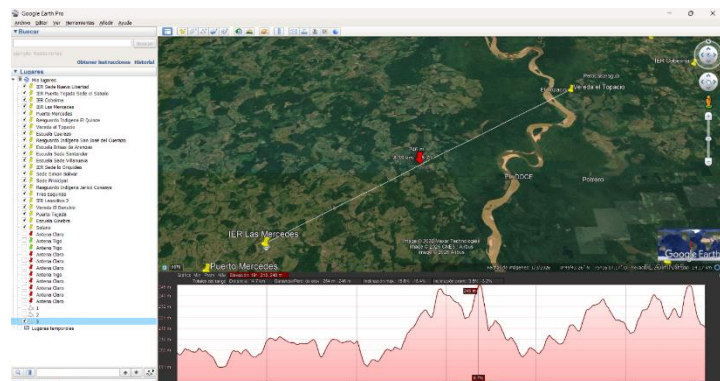
*Nota.* Perfil topográfico elaborado mediante Google Earth Pro para evaluar la viabilidad del radioenlace de microondas y verificar las condiciones de línea de vista entre los nodos propuestos. *Fuente.* Autoría propia.

Se identifican pendientes pronunciadas y múltiples elevaciones intermedias que

impedirían la propagación adecuada de señales de microondas sin la instalación de torres de gran altura.

### Figura 6

*Evaluación de perfil topográfico con obstrucción parcial de línea de vista*

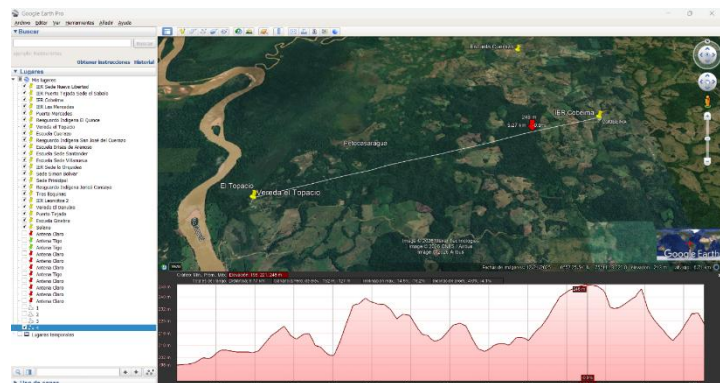


*Nota.* Perfil de elevación obtenido mediante Google Earth Pro para evaluar condiciones de propagación entre nodos rurales propuestos. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 6 evidencia obstrucciones parciales sobre la línea de vista debido a la presencia de elevaciones intermedias y cobertura vegetal densa. Estas condiciones afectarían directamente la estabilidad de un radioenlace de microondas en la zona evaluada.

### Figura 7

*Análisis de enlace rural con afectación por vegetación selvática*



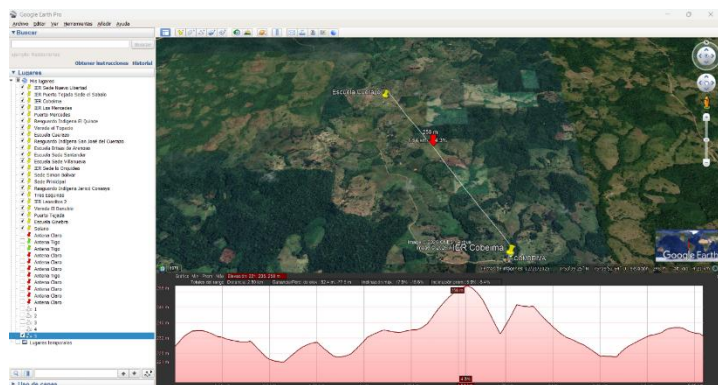
*Nota.* Captura generada en Google Earth Pro utilizada para analizar obstáculos naturales

presentes en la ruta del enlace. *Fuente.* Autoría propia.

En la Figura 7 se observa que la vegetación selvática representa un obstáculo significativo para la propagación de señales de microondas, especialmente en trayectos de larga distancia donde la cobertura arbórea invade parcialmente la zona de Fresnel.

## Figura 8

*Perfil geográfico con pérdida de línea de vista entre nodos*

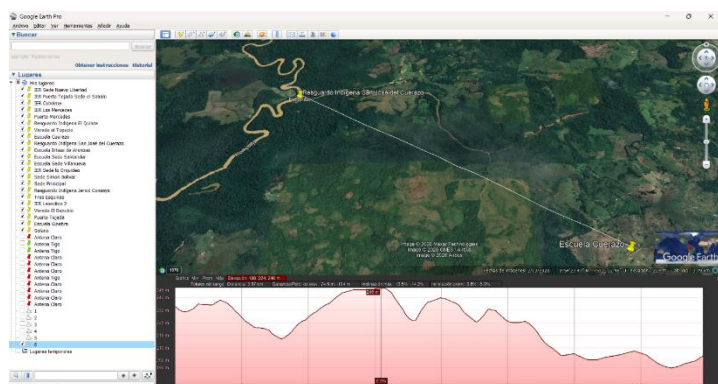


*Nota.* Imagen obtenida mediante Google Earth Pro para validar condiciones topográficas del enlace propuesto. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 8 muestra una pérdida evidente de línea de vista (LOS) ocasionada por irregularidades topográficas y elevaciones intermedias. Esta condición imposibilita la implementación de enlaces directos sin infraestructura adicional.

## Figura 9

### *Evaluación topográfica de enlace con variaciones altitudinales*



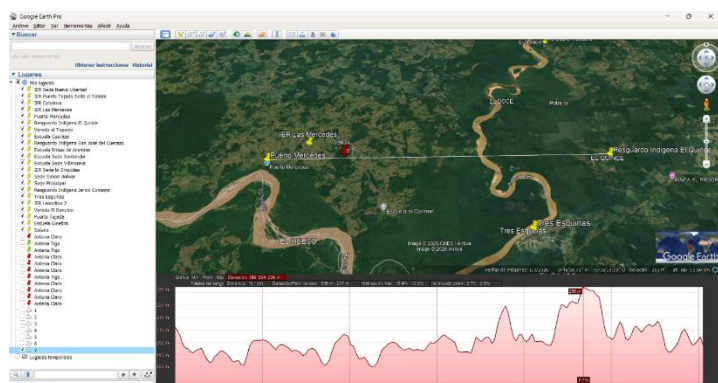
*Nota.* Perfil de elevación generado en Google Earth Pro para análisis de conectividad rural.

*Fuente.* Autoría propia.

La variación altitudinal observada en la Figura 9 genera cambios abruptos en el perfil del terreno, lo que incrementa la complejidad técnica del enlace y obliga a considerar torres de mayor altura para garantizar visibilidad directa.

## Figura 10

### *Análisis de trayectoria de microondas en entorno selvático*

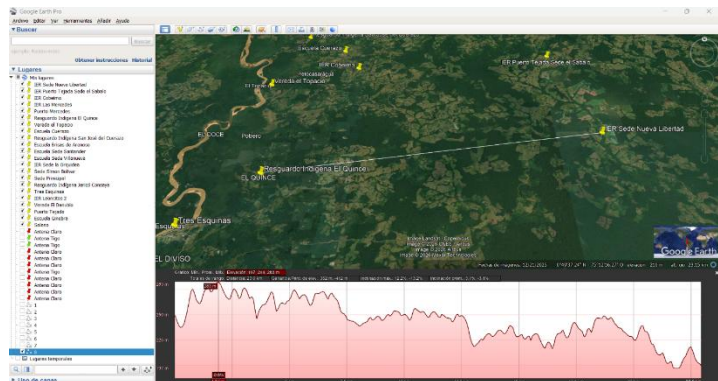


*Nota.* Captura obtenida mediante Google Earth Pro para evaluación de propagación en zonas rurales dispersas. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 10 permite identificar condiciones geográficas complejas asociadas a la selva amazónica, donde la humedad, vegetación y relieve reducen considerablemente la eficiencia de enlaces inalámbricos terrestres.

### Figura 11

*Perfil de elevación con obstrucción múltiple del terreno*



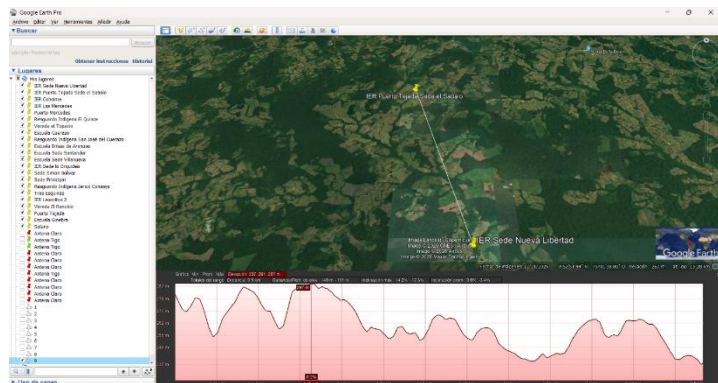
*Nota.* Imagen elaborada mediante Google Earth Pro para validar factibilidad de radioenlaces.

*Fuente.* Autoría propia.

En la Figura 11 se observan múltiples elevaciones intermedias que afectan la continuidad óptica del enlace. Estas obstrucciones impedirían una propagación estable sin el uso de repetidores adicionales.

### Figura 12

*Evaluación geográfica de enlace rural con limitaciones de cobertura*

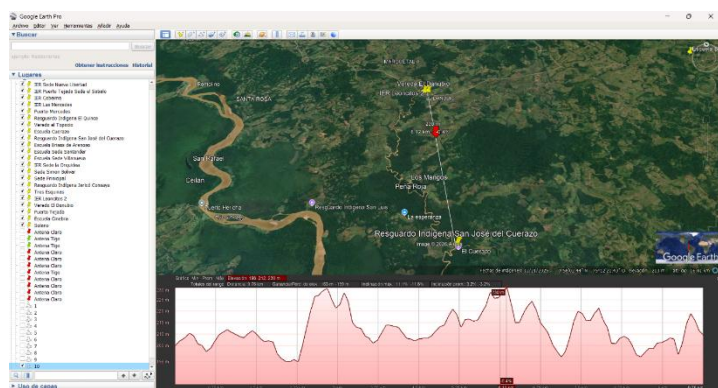


*Nota.* Perfil topográfico obtenido mediante Google Earth Pro como apoyo al análisis técnico del proyecto. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 12 evidencia que la cobertura del enlace se ve limitada por la irregularidad del terreno y por la ausencia de puntos altos estratégicos que permitan mantener una trayectoria despejada entre nodos.

### Figura 13

*Análisis de enlace de larga distancia en zona rural dispersa*

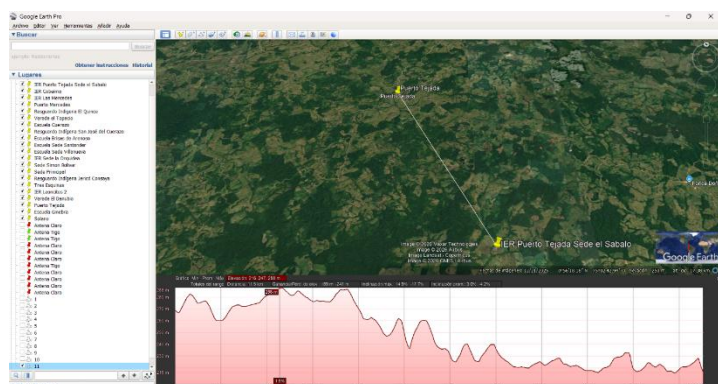


*Nota.* Captura generada en Google Earth Pro para evaluación de enlaces punto a punto. *Fuente.* Autoría propia.

En la Figura 13 se identifican distancias considerables entre nodos rurales, lo que incrementa la atenuación de la señal y reduce la viabilidad técnica de implementar enlaces de microondas de manera directa.

**Figura 14**

*Perfil topográfico con necesidad de infraestructura elevada*

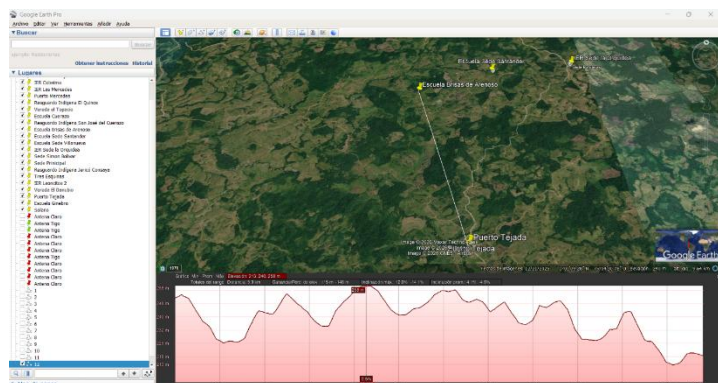


*Nota.* Imagen obtenida mediante Google Earth Pro para validar requerimientos de infraestructura. *Fuente.* Autoría propia.

La topografía observada en la Figura 14 demuestra la necesidad de instalar torres de gran altura para superar obstáculos naturales y mantener condiciones adecuadas de línea de vista.

**Figura 15**

*Evaluación de condiciones de propagación en entorno rural*



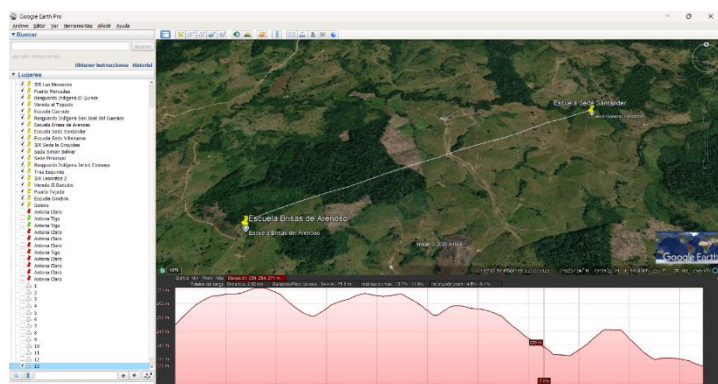
*Nota.* Perfil de elevación utilizado para análisis de viabilidad de conectividad inalámbrica.

*Fuente.* Autoría propia.

La Figura 15 refleja condiciones de propagación limitadas debido a las variaciones del terreno y a la dispersión geográfica de las comunidades rurales evaluadas.

**Figura 16**

*Análisis de enlace con afectación por curvatura y relieve*



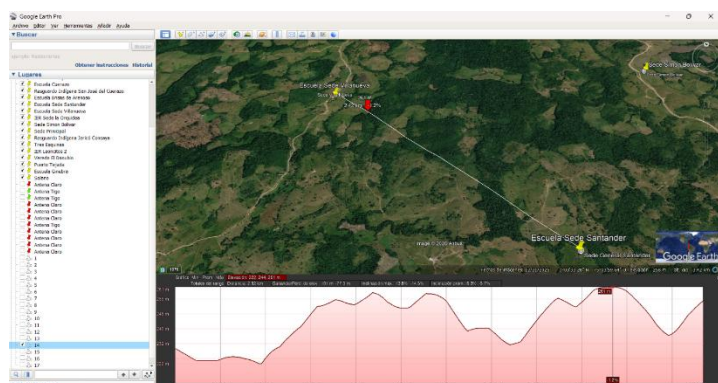
*Nota.* Captura generada en Google Earth Pro para evaluación técnica de radioenlaces rurales.

*Fuente.* Autoría propia.

En la Figura 16 se evidencian afectaciones derivadas de la curvatura del terreno y del relieve irregular, factores que dificultan la implementación de enlaces de microondas estables a larga distancia.

**Figura 17**

*Evaluación de enlace rural con obstáculos naturales intermedios*



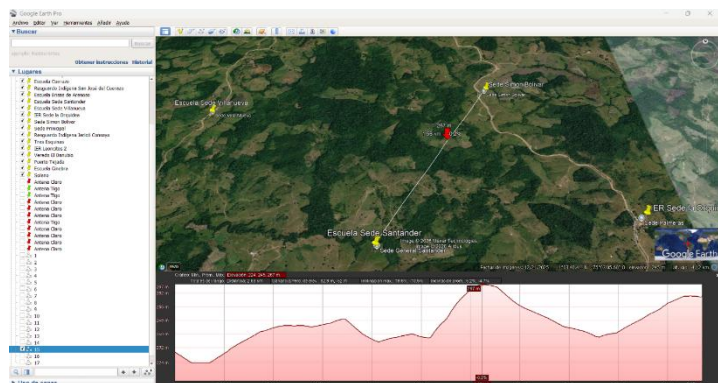
*Nota.* Perfil topográfico elaborado mediante Google Earth Pro para análisis de conectividad.

*Fuente.* Autoría propia.

La presencia de obstáculos naturales intermedios observados en la Figura 17 afecta la continuidad del enlace y aumenta la probabilidad de pérdidas de señal en condiciones climáticas adversas.

### Figura 18

*Perfil geográfico con requerimiento de repetidores adicionales*

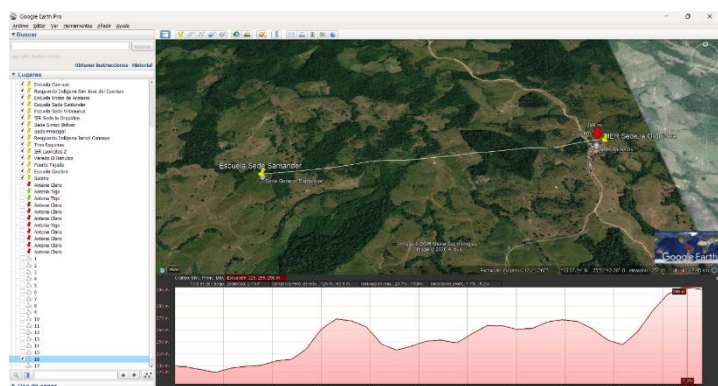


*Nota.* Imagen obtenida mediante Google Earth Pro para validar posibles escenarios de conectividad rural. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 18 demuestra que la distancia y las obstrucciones existentes obligarían a incorporar repetidores intermedios para mantener continuidad en el servicio.

### Figura 19

*Evaluación de enlace inalámbrico en zona de relieve irregular*



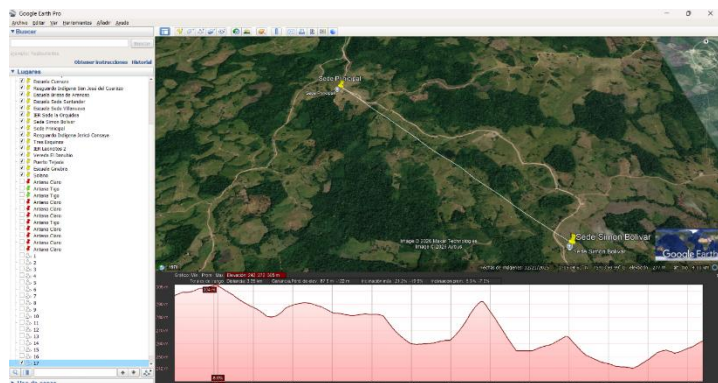
*Nota.* Captura utilizada para análisis técnico de propagación de señales en entorno amazónico.

*Fuente.* Autoría propia.

El relieve irregular observado en la Figura 19 representa una limitación importante para enlaces terrestres, debido a la dificultad de garantizar línea de vista continua entre estaciones.

## Figura 20

*Análisis topográfico de trayectoria entre comunidades rurales*

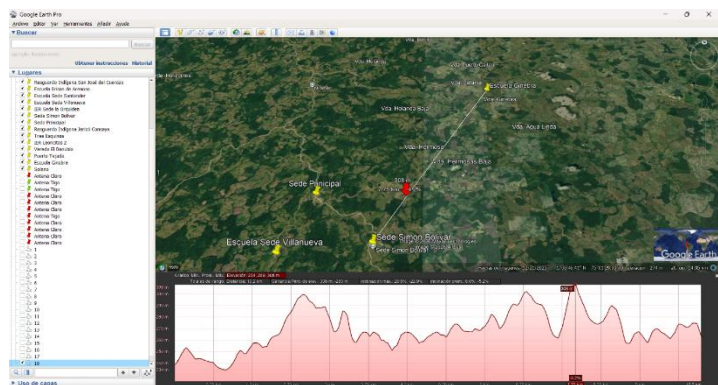


*Nota.* Perfil de elevación generado en Google Earth Pro para evaluación de conectividad entre nodos rurales. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 20 permite identificar diferencias significativas de elevación entre comunidades, situación que incrementa la complejidad operativa y los costos asociados a infraestructura de telecomunicaciones.

## Figura 21

*Evaluación de viabilidad para enlaces terrestres de microondas*

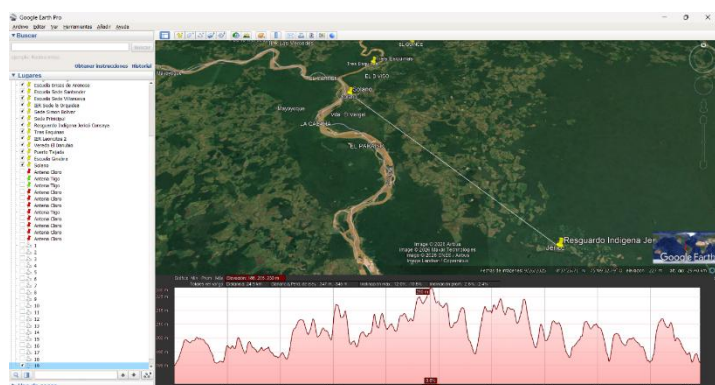


*Nota.* Imagen elaborada mediante Google Earth Pro para consolidar el análisis técnico de conectividad rural. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 21 resume las principales limitaciones identificadas en los escenarios evaluados, evidenciando que las condiciones geográficas y ambientales del municipio reducen considerablemente la viabilidad de una arquitectura basada exclusivamente en enlaces terrestres de microondas.

## Figura 22

*Evaluación de condiciones de propagación en entorno rural*



*Nota.* Captura generada en Google Earth Pro para evaluación de enlaces punto a punto. *Fuente.* Autoría propia.

En la Figura 22 se identifican distancias considerables entre nodos rurales, lo que incrementa la atenuación de la señal y reduce la viabilidad técnica de implementar enlaces de microondas de manera directa.

**Análisis Técnico de los Radioenlaces.** Los perfiles de elevación obtenidos permiten evidenciar que gran parte de las rutas evaluadas presentan obstrucciones significativas en la línea de vista (LOS), ocasionadas por variaciones topográficas, presencia de vegetación selvática y diferencias de altitud entre nodos.

En enlaces de microondas, la existencia de línea de vista es un requisito fundamental para garantizar estabilidad y disponibilidad del servicio. Sin embargo, en el contexto geográfico de Solano, la topografía irregular y la densidad arbórea afectan directamente la zona de Fresnel, generando pérdidas de señal y posibles interrupciones del enlace.

Para superar estas limitaciones sería necesaria la instalación de torres de entre 25 y 30 metros de altura, incrementando considerablemente los costos de infraestructura, transporte e instalación.

**Limitaciones Operativas y Económicas.** Además de las limitaciones geográficas, la implementación de infraestructura propia presenta dificultades operativas asociadas al acceso terrestre, mantenimiento y sostenibilidad del sistema.

Las estaciones de telecomunicaciones requerirían sistemas de energía autónoma basados en paneles solares y bancos de baterías, debido a la ausencia de red eléctrica estable en gran parte de las zonas rurales.

Asimismo, la ubicación aislada de las torres incrementa el riesgo de vandalismo, hurto de baterías, paneles solares y equipos de telecomunicaciones, comprometiendo la continuidad operativa del sistema.

Otro aspecto crítico corresponde a la dependencia jerárquica de los enlaces. En arquitecturas punto a punto, la falla de un nodo intermedio ocasiona la interrupción del servicio hacia los nodos posteriores, reduciendo la disponibilidad general de la red.

### ***Alternativa 2: Uso de Infraestructura Móvil Existente y Torres Propias***

La segunda alternativa evaluada consiste en aprovechar la infraestructura móvil existente de operadores como Claro y Tigo, complementándola con posibles torres adicionales para extender la cobertura hacia zonas rurales.

**Conexiones a Través de Antenas Existentes.** Las imágenes de Google Earth Pro muestran antenas de Claro y Tigo en la región, con distancias entre ellas que van de 12 km hasta 52 km.

Problema crítico: no existe línea de vista directa desde Solano hacia estas antenas, ya que la telefonía móvil se conecta a torres de otros municipios.

Esto implica que, aunque las antenas están presentes, no pueden garantizar conectividad estable hacia comunidades como El Danubio.

**Instalación de Torres Adicionales.** Para cubrir comunidades dispersas sería necesario instalar más torres propias, además de las de Claro y Tigo.

Cada torre requiere cimentación, estructura metálica, antenas direccionales y sistemas eléctricos autónomos.

Se incrementan los costos de CAPEX y OPEX por construcción, transporte de materiales y mantenimiento en zonas selváticas.

**Alimentación Eléctrica y Custodia.** Las torres necesitan bancos de baterías y paneles solares para garantizar energía continua.

En reuniones con operadores se ha reportado el robo frecuente de baterías y equipos en zonas apartadas.

La custodia de los equipos es un problema: ni Claro ni Movistar asumen responsabilidad plena por pérdidas en áreas rurales.

**Costos y Acuerdos Institucionales.** El alquiler de espacio en torres de operadores implica pagos recurrentes.

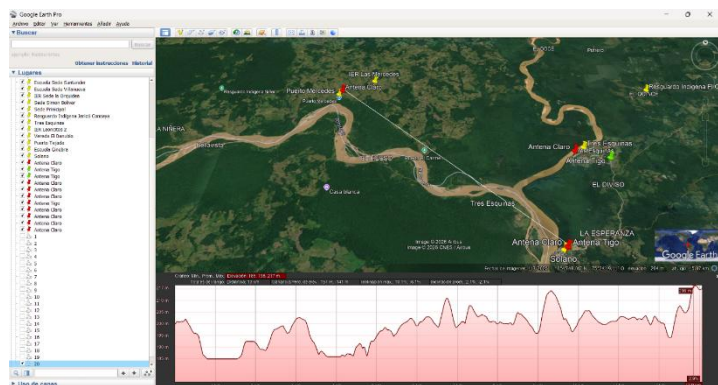
Los equipos adicionales (radios, antenas, routers, sistemas solares) elevan el costo total.

La dependencia de acuerdos con operadores limita la autonomía del proyecto.

**Conclusión de la Alternativa.** Aunque la existencia de antenas de Claro y Tigo representa una oportunidad, la falta de línea de vista, los problemas de seguridad, los costos de instalación y la dependencia de operadores externos hacen que esta alternativa sea parcialmente viable en áreas urbanas, pero inviable en comunidades rurales críticas como El Danubio.

### Figura 23

#### *Infraestructura de telecomunicaciones de operador móvil en Solano*



*Nota.* Captura de Google Earth Pro utilizada para identificar infraestructura de telecomunicaciones existente en el municipio de Solano. *Fuente.* Autoría propia.

La infraestructura identificada corresponde a estaciones base de operadores móviles ubicadas principalmente en la cabecera municipal, cuya cobertura se concentra en áreas urbanas y periurbanas.

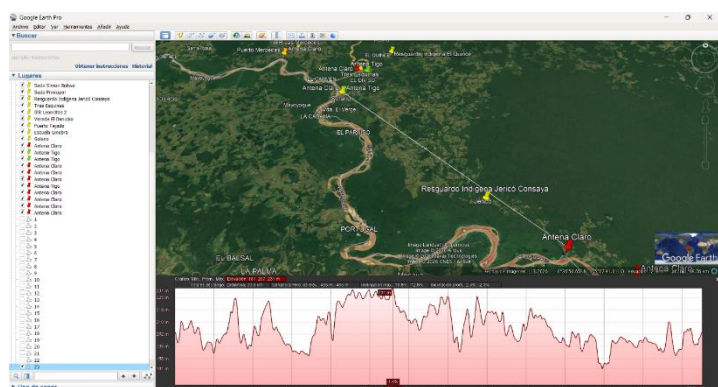


*Nota.* Captura obtenida mediante Google Earth Pro para identificar estaciones base de operadores móviles presentes en el municipio de Solano. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 25 muestra la ubicación de infraestructura de telecomunicaciones perteneciente a operadores móviles presentes en la región. Estas estaciones base proporcionan cobertura principalmente en la cabecera municipal y zonas cercanas, dejando amplias áreas rurales sin acceso estable al servicio.

## Figura 26

*Evaluación de cobertura y línea de vista desde antenas móviles existentes*

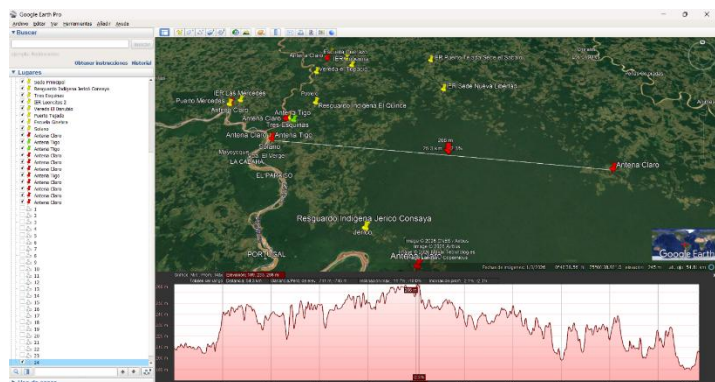


*Nota.* Perfil topográfico generado mediante Google Earth Pro para analizar condiciones de propagación desde estaciones móviles hacia comunidades rurales. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 26 evidencia que las condiciones geográficas y la densidad de vegetación afectan significativamente la propagación de señales LTE hacia las zonas rurales más alejadas. Aunque existen estaciones móviles operativas, las obstrucciones topográficas reducen considerablemente el alcance efectivo de cobertura.

## Figura 27

### *Análisis de propagación de señal desde infraestructura móvil regional*

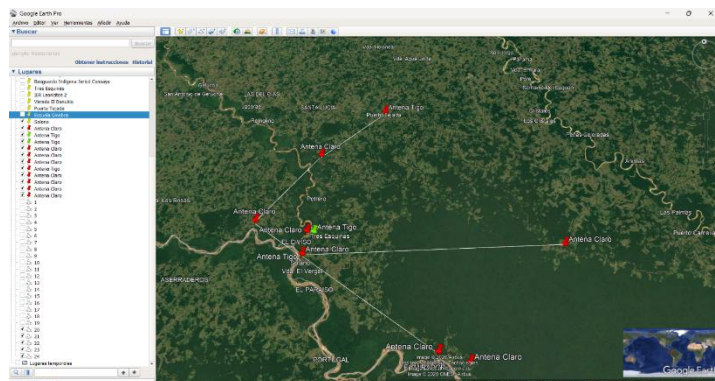


*Nota.* Imagen elaborada mediante Google Earth Pro para evaluar rutas de transporte de señal utilizadas por operadores móviles en la región. *Fuente.* Autoría propia.

En la Figura 27 se observa que gran parte de la conectividad móvil disponible en Solano depende de enlaces de transporte provenientes de otros municipios cercanos. Esto implica que las antenas locales funcionan principalmente como nodos de distribución limitada y no como infraestructura diseñada para cobertura rural de gran alcance.

## Figura 28

### *Limitaciones de cobertura rural mediante infraestructura móvil terrestre*



*Nota.* Captura utilizada para analizar restricciones geográficas asociadas a la expansión de cobertura móvil en zonas rurales dispersas. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 28 permite evidenciar que la expansión de cobertura mediante infraestructura móvil terrestre requeriría la instalación de nuevas torres, repetidores y enlaces adicionales para superar las barreras geográficas existentes. Estas condiciones incrementan significativamente los costos de despliegue, mantenimiento y sostenibilidad operativa del sistema.

### ***Limitaciones Técnicas y Económicas de la Infraestructura Móvil***

Aunque los operadores móviles presentes en la región disponen de infraestructura activa en la cabecera municipal, su cobertura hacia zonas rurales dispersas continúa siendo limitada debido a factores geográficos, económicos y operativos.

Las condiciones selváticas del municipio de Solano generan pérdidas de señal, degradación de cobertura LTE y dificultades para mantener enlaces estables a larga distancia. Asimismo, la dependencia de enlaces de transporte provenientes de otros municipios reduce la capacidad de expansión autónoma de la red local.

Desde el punto de vista económico, la ampliación de cobertura requeriría la instalación de nuevas estaciones base, torres de telecomunicaciones y sistemas de energía autónoma, incrementando considerablemente el CAPEX y el OPEX del proyecto.

En consecuencia, aunque la infraestructura móvil existente proporciona conectividad parcial en áreas urbanas, no representa una solución suficiente para garantizar cobertura integral y sostenible en las comunidades rurales objeto de estudio.

### ***Alternativa 3: Selección de Starlink como la Alternativa Más Viable***

El análisis técnico de las tres alternativas evaluadas evidencia que las soluciones basadas exclusivamente en infraestructura terrestre presentan limitaciones significativas para el contexto geográfico del municipio de Solano, Caquetá.

La implementación de radioenlaces propios mediante antenas de microondas requiere condiciones estrictas de línea de vista, torres de gran altura y mantenimiento permanente, factores que incrementan considerablemente la complejidad operativa y los costos del sistema.

Por otra parte, aunque existe infraestructura móvil en la cabecera municipal, su cobertura hacia zonas rurales continúa siendo limitada debido a la dispersión poblacional, la vegetación selvática y la dependencia de enlaces de transporte provenientes de otros municipios.

En contraste, la conectividad satelital mediante tecnología Starlink presenta ventajas técnicas relevantes para el contexto amazónico, incluyendo cobertura total, baja latencia y menores requerimientos de infraestructura terrestre.

En consecuencia, la alternativa basada en conectividad satelital complementada con distribución inalámbrica local representa la solución más viable para garantizar acceso sostenible a servicios digitales en las comunidades rurales objeto de estudio.

**Descripción Técnica.** La constelación LEO de Starlink ofrece acceso directo sin necesidad de infraestructura terrestre intermedia. Opera con latencias de 20–40 ms y velocidades comparables a fibra óptica urbana.

**Equipos Necesarios.** Kit Starlink (antena + router): \$2.000.000 – \$2.400.000 COP por unidad.

Instalación básica: \$800.000 – \$1.200.000 COP.

Suscripción mensual: \$200.000 – \$280.000 COP.

Infraestructura adicional: mínima, solo requiere conexión eléctrica local.

**Ventajas.** Independencia de la geografía y de la línea de vista terrestre.

Cobertura inmediata en zonas rurales dispersas.

Baja latencia y alta estabilidad.

Escalabilidad para replicar el modelo en otras veredas.

**Justificación Económica.** Aunque el costo inicial por terminal es mayor que aprovechar torres existentes, se eliminan gastos de construcción de torres, mantenimiento de enlaces y custodia de equipos. En zonas como El Danubio, donde los perfiles de elevación muestran distancias largas y pendientes irregulares, Starlink garantiza conectividad estable y segura.

**Conclusión.** La alternativa satelital es la más confiable y sostenible para el contexto amazónico, tanto por su independencia geográfica como por su facilidad de replicación.

### *Comparación de Alternativas*

**Tabla 3**

*Comparación técnica y de viabilidad de las alternativas de conectividad para la vereda El Danubio, Solano (Caquetá)*

Alternativa	Ventajas	Limitaciones	Viabilidad en El Danubio
Sistema propio con antenas	Control total del diseño	Alta dependencia entre nodos, obstrucción por vegetación, costos elevados	No viable
Infraestructura móvil existente + torres propias	Aprovecha torres ya instaladas, posibilidad de expansión	No hay línea de vista, altos costos, problemas de custodia y energía	Parcialmente viable
Starlink satelital	Cobertura total, baja latencia, independencia geográfica, costos claros	Costo inicial por kit y suscripción mensual	Viable y sostenible

*Nota.* Se comparan las alternativas de conectividad evaluadas mediante criterios técnicos, operativos y de viabilidad para determinar la solución más adecuada en el contexto rural analizado. *Fuente.* Autoría propia.

### ***Conclusión del Capítulo***

El análisis técnico y económico demuestra que las soluciones basadas en enlaces terrestres o torres presentan limitaciones severas por la topografía, la seguridad y los costos de mantenimiento. La alternativa satelital Starlink se consolida como la opción más confiable, segura y replicable para garantizar conectividad en zonas rurales del municipio de Solano, tomando El Danubio como punto de referencia para su implementación piloto.

### **Tabla 4**

#### *Comparación económica de alternativas (COP)*

Alternativa	CAPEX (Inversión inicial)	OPEX (Costos operativos/mantenimiento)	Observaciones
Sistema propio con antenas de microondas	- Construcción de torres: \$100.000.000 – \$160.000.000 COP por torre (mínimo 3–5 torres). - Radios de microondas: \$32.000.000 – \$48.000.000 COP por enlace. - Energía autónoma (paneles solares + baterías): \$20.000.000 – \$28.000.000 COP por sitio. - Equipos de red	- Mantenimiento anual: \$40.000.000 – \$60.000.000 COP. - Custodia y seguridad: \$20.000.000 – \$32.000.000 COP. - Reposición de baterías/equipos robados: \$12.000.000 – \$20.000.000 COP por evento.	Alta inversión inicial y costos recurrentes elevados. Vulnerabilidad por robos y falta de línea de vista.

---

	(routers/switches):		
	\$8.000.000 – \$12.000.000		
	COP.		
Infraestructura móvil existente + torres propias (Claro/Tigo)	- Alquiler de espacio en torres: \$2.000.000 – \$4.000.000 COP/mes por torre. - Instalación de equipos adicionales: \$40.000.000 – \$60.000.000 COP. - Torres adicionales propias: \$100.000.000 – \$160.000.000 COP cada una. - Energía autónoma: \$20.000.000 – \$28.000.000 COP por sitio.	- Pago mensual de alquiler: \$24.000.000 – \$48.000.000 COP/año. - Mantenimiento y custodia: \$32.000.000 – \$48.000.000 COP/año. - Riesgo de pérdidas por vandalismo/robos.	Menor CAPEX si se aprovechan torres existentes, pero OPEX elevado y cobertura insuficiente en zonas críticas como El Danubio.
Starlink satelital	- Kit Starlink (antena + router): \$2.000.000 – \$2.400.000 COP por unidad. - Instalación básica: \$800.000 – \$1.200.000 COP. - No requiere torres ni sistemas eléctricos adicionales (solo conexión a red local).	- Suscripción mensual: \$200.000 – \$280.000 COP. - Mantenimiento mínimo (autogestionado por usuario). - Reposición de equipos: bajo riesgo, costo controlado.	Menor CAPEX y OPEX. Cobertura inmediata y confiable en zonas rurales dispersas. Solución más viable y sostenible.

---

*Nota.* Se presentan los costos estimados de implementación y operación de las alternativas de conectividad analizadas, expresados en pesos colombianos (COP). *Fuente.* Autoría propia.

### Conclusión económica

Sistema propio con antenas: inversión inicial superior a \$500 millones COP y costos recurrentes muy altos.

Infraestructura móvil existente: reduce algo el CAPEX, pero el OPEX sigue siendo elevado y la cobertura insuficiente.

Starlink: inversión inicial baja (\$2–3 millones COP por kit) y costos mensuales controlados (\$200–280 mil COP). Es la alternativa más económica y confiable para comunidades rurales como El Danubio.

### Figura 29

*Arquitectura conceptual de conectividad híbrida propuesta para Solano, Caquetá*



*Nota.* Diagrama conceptual elaborado para representar la integración entre proveedores de última milla, enlaces de transporte mediante microondas y distribución inalámbrica local dentro del

modelo propuesto. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 29 representa la estructura general de la arquitectura híbrida planteada para el municipio de Solano, Caquetá. El modelo integra un proveedor de acceso principal a Internet, un nodo central de distribución y enlaces inalámbricos de transporte que permiten extender conectividad hacia sectores rurales dispersos.

Posteriormente, la señal es redistribuida mediante redes inalámbricas locales hacia usuarios finales, incluyendo viviendas, instituciones educativas y espacios comunitarios.

Esta arquitectura busca reducir la dependencia de infraestructura cableada y facilitar la expansión progresiva de cobertura en territorios con limitaciones geográficas y operativas.

### **Simulación y Evaluación del Modelo**

Una vez analizadas las alternativas de conectividad disponibles para el municipio de Solano, Caquetá, y seleccionada la arquitectura híbrida más adecuada para el contexto rural estudiado, se procede a desarrollar la simulación y evaluación técnica del modelo propuesto.

El propósito de este capítulo consiste en validar conceptualmente el comportamiento de la solución planteada, considerando variables relacionadas con cobertura, capacidad, desempeño, distribución de ancho de banda y sostenibilidad operativa.

La simulación se desarrolla bajo un enfoque analítico y descriptivo, apoyado en herramientas de modelado conceptual, análisis técnico y estimaciones de comportamiento de red mediante MATLAB y Google Earth Pro.

Debido al alcance aplicado de la investigación, no se plantea una implementación física completa del sistema, sino la validación funcional de una arquitectura técnicamente viable para territorios rurales dispersos.

La propuesta integra acceso satelital mediante tecnología Starlink, distribución

inalámbrica de corto alcance y acceso comunitario local, buscando minimizar las limitaciones geográficas identificadas en las soluciones convencionales basadas exclusivamente en infraestructura terrestre.

### ***Arquitectura del Modelo Propuesto***

La arquitectura propuesta para el municipio de Solano, Caquetá, se fundamenta en un esquema comunitario centralizado de distribución de conectividad rural.

El modelo plantea la instalación del servicio satelital Starlink en la Institución Educativa Rural (IER) Leoncitos, debido a sus condiciones favorables de infraestructura, disponibilidad de energía y ubicación estratégica dentro de la comunidad.

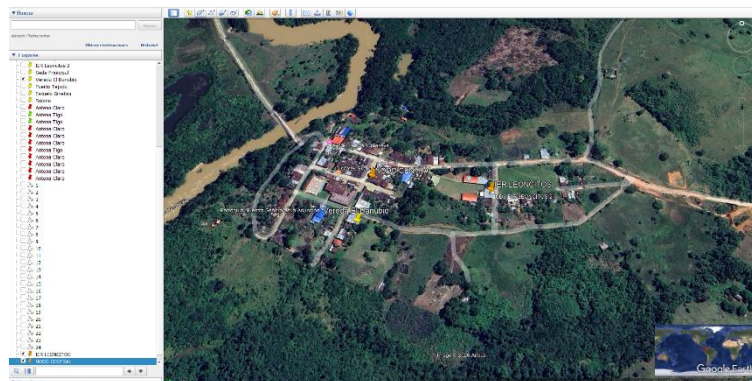
Desde este punto, la conectividad es distribuida mediante un enlace inalámbrico hacia un nodo central comunitario encargado de redistribuir el servicio hacia los usuarios finales.

En el nodo central se propone la instalación de una antena omnidireccional de cobertura local, permitiendo suministrar acceso inalámbrico a viviendas, instituciones cercanas y usuarios comunitarios dentro del área de influencia.

El modelo busca minimizar la necesidad de infraestructura terrestre compleja, reducir costos de implementación y facilitar la administración comunitaria del servicio.

### **Figura 30**

*Ubicación del nodo principal y nodo central comunitario en la vereda El Danubio*



*Nota.* Imagen satelital utilizada para representar la ubicación propuesta del nodo principal en la IER Leoncitos y del nodo central comunitario dentro de la vereda El Danubio, municipio de Solano, Caquetá. Elaboración propia mediante Google Earth Pro. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 30 representa la ubicación general de los nodos planteados para la arquitectura de conectividad rural propuesta.

El nodo principal fue ubicado en la Institución Educativa Rural (IER) Leoncitos, mientras que el nodo central comunitario fue localizado estratégicamente dentro de la zona de mayor concentración poblacional de la vereda El Danubio.

La ubicación seleccionada permite optimizar cobertura, reducir distancias promedio de distribución y facilitar la administración comunitaria del servicio.

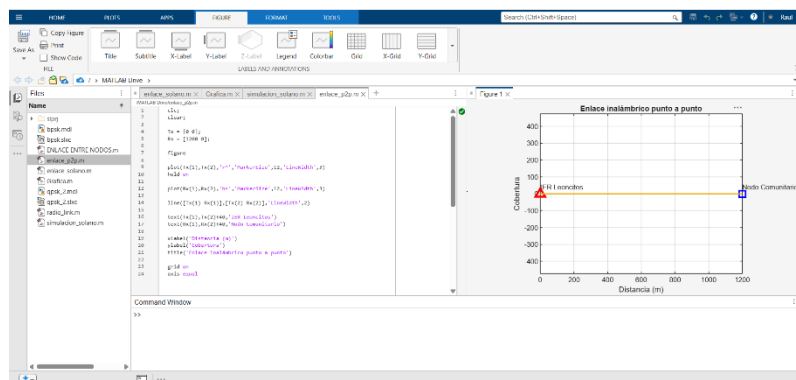
**Topología Técnica del Modelo Comunitario Propuesto.** Con el propósito de aterrizar técnicamente el modelo planteado, se definió una topología de red basada en dispositivos comerciales reales utilizados actualmente en soluciones de conectividad inalámbrica rural.

La arquitectura incorpora un sistema Starlink Gen 3 como punto principal de acceso a Internet instalado en la IER Leoncitos, conectado a un router MikroTik RB5009 encargado de administrar el tráfico, direccionamiento IP y control de ancho de banda.

Posteriormente, la conectividad es distribuida mediante un enlace inalámbrico punto a punto (PtP) hacia un nodo central comunitario.

En dicho nodo se plantea la instalación de una antena omnidireccional de cobertura local destinada a redistribuir el servicio hacia viviendas, usuarios e instituciones comunitarias cercanas.

Asimismo, el modelo incorpora routers domésticos o puntos de acceso locales en cada vivienda para facilitar el acceso final de los usuarios.

**Figura 31***Topología técnica del modelo comunitario propuesto*

*Nota.* Representación conceptual del enlace inalámbrico punto a punto entre la IER Leoncitos y el nodo central comunitario. *Fuente.* Autoría propia mediante MATLAB.

La Figura 31 representa conceptualmente el enlace inalámbrico principal encargado de transportar conectividad desde la IER Leoncitos hacia el nodo central comunitario.

El modelo permite visualizar la distribución general del sistema y la relación entre el nodo transmisor y el punto de redistribución comunitaria.

**Tabla 5***Equipos propuestos para la arquitectura de red*

Dispositivo	Modelo sugerido	Función
Internet satelital	Starlink Gen 3	Acceso principal a Internet
Router principal	MikroTik RB5009	Gestión de tráfico y red
Antena PtP	Ubiquiti LiteBeam 5AC	Enlace inalámbrico
Antena Omni	Rocket Prism 5AC + Omni	Cobertura comunitaria
Router/AP usuario	TP-Link Archer C80	Acceso doméstico
Sistema energético	Kit solar 1500W	Respaldo energético

*Nota.* Se relacionan los equipos seleccionados para la implementación de la arquitectura híbrida propuesta, considerando sus características técnicas y funcionalidad dentro del modelo de conectividad. *Fuente.* Autoría propia.

### ***Simulación Técnica del Modelo***

La simulación técnica del modelo se desarrolló considerando un escenario comunitario compuesto por:

- un nodo principal Starlink instalado en la IER Leoncitos;
- un enlace inalámbrico punto a punto;
- un nodo central comunitario;
- múltiples usuarios simultáneos;
- viviendas e instituciones rurales.

La validación desarrollada corresponde a una simulación conceptual orientada a estimar el comportamiento general de la arquitectura bajo condiciones controladas de operación rural.

**Parámetros Técnicos de Simulación.** Para el desarrollo del modelo se consideraron parámetros promedio asociados al desempeño de servicios Starlink y redes inalámbricas rurales de corto alcance.

### **Tabla 6**

#### *Parámetros técnicos de simulación*

Parámetro	Valor estimado
Velocidad Starlink	150 Mbps
Latencia promedio	20–60 ms
Número de usuarios	20
Cobertura aproximada	500–800 m

Frecuencia inalámbrica	5 GHz
Tipo de distribución	PtP + Omni
Disponibilidad estimada	99 %
RSSI promedio	-45 a -74 dBm

*Nota.* Se muestran los parámetros utilizados para la simulación del modelo de conectividad, los cuales sirven como base para la evaluación del desempeño técnico de la propuesta. *Fuente.*

Autoría propia.

**Simulación RF del Enlace Principal.** Con el propósito de validar técnicamente la viabilidad del modelo propuesto, se desarrolló una simulación RF utilizando MATLAB y el modelo de propagación Longley-Rice.

La simulación representa el enlace inalámbrico principal entre la Institución Educativa Rural (IER) Leoncitos y el nodo central comunitario encargado de redistribuir el servicio hacia usuarios finales.

Para la simulación se utilizaron parámetros aproximados de propagación inalámbrica y características técnicas de equipos comerciales utilizados actualmente en soluciones de conectividad rural.

Los resultados obtenidos permitieron estimar niveles de señal recibida, margen de operación y estabilidad general del enlace bajo condiciones rurales de operación.

### **Tabla 7**

#### *Parámetros técnicos del enlace inalámbrico simulado*

Variable	Valor
Frecuencia operación	5 GHz
Potencia transmisión	25 dBm

Sensibilidad receptor	-75 dBm
Altura antena transmisor	25 m
Altura antena receptor	15 m
Modelo propagación	Longley-Rice
Tipo enlace	Punto a Punto
Tecnología simulada	Ubiquiti LiteBeam 5AC

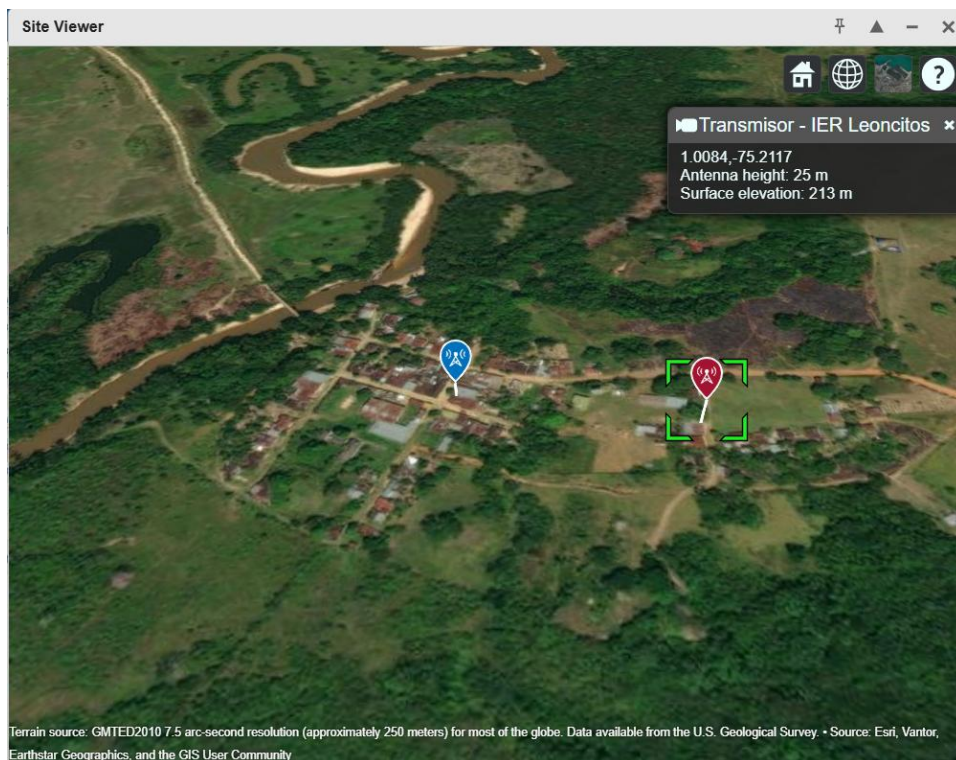
---

*Nota.* Se presentan las variables técnicas configuradas para el análisis del enlace inalámbrico, incluyendo potencia, frecuencia, distancia y demás parámetros relevantes para la simulación.

*Fuente.* Autoría propia.

**Figura 32**

*Vista tridimensional del nodo transmisor propuesto en la IER Leoncitos*



*Nota.* Imagen generada mediante MATLAB utilizando el modelo de propagación Longley-Rice para representar el nodo transmisor principal propuesto en la IER Leoncitos, municipio de Solano, Caquetá. *Fuente.* Autoría propia.

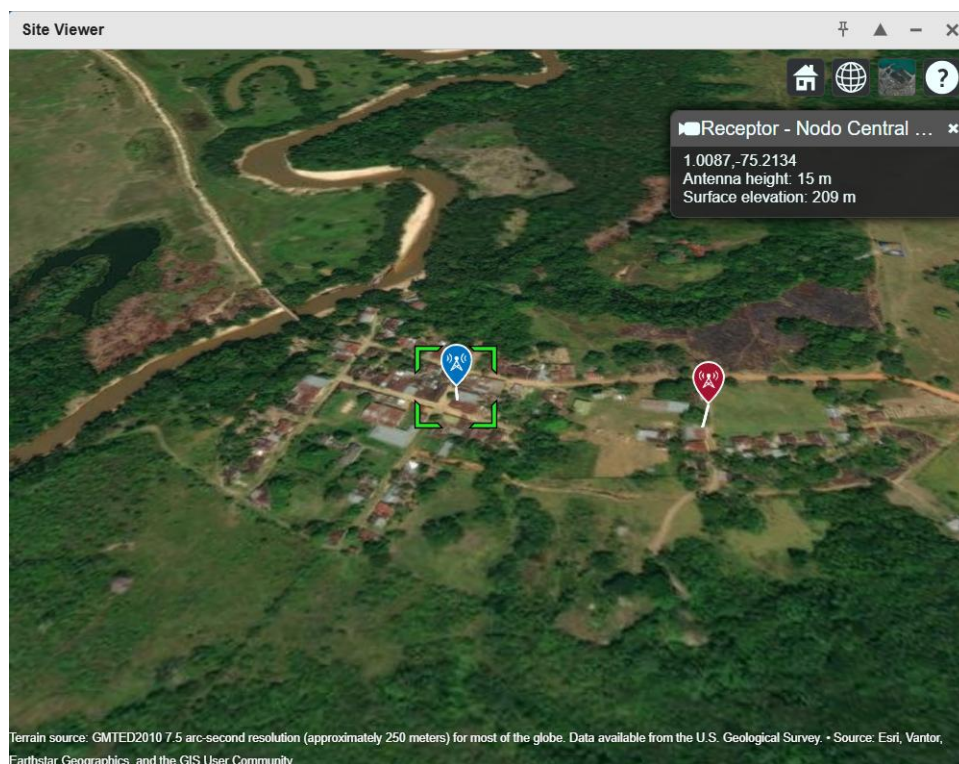
La Figura 32 representa el nodo transmisor principal de la arquitectura propuesta, ubicado en la Institución Educativa Rural (IER) Leoncitos.

En este punto se plantea la instalación del sistema satelital Starlink y del enlace inalámbrico encargado de transportar conectividad hacia el nodo central comunitario.

La ubicación seleccionada presenta condiciones favorables de infraestructura, acceso energético y estabilidad operativa para el despliegue del sistema.

### Figura 33

*Vista tridimensional del nodo receptor comunitario propuesto*



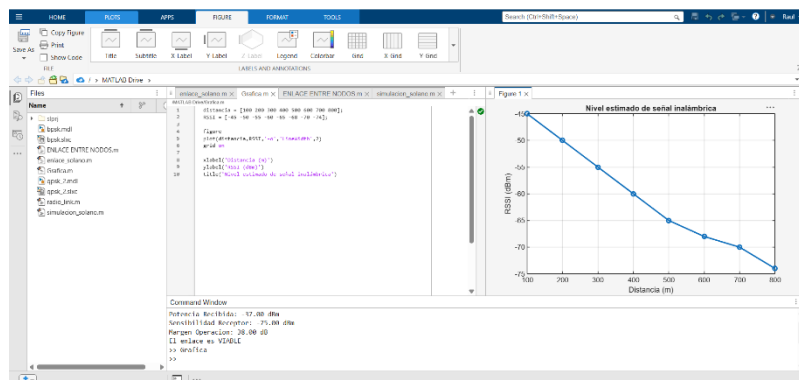
*Nota.* Imagen generada mediante MATLAB para representar el nodo receptor comunitario dentro del modelo de conectividad rural propuesto para la vereda El Danubio, municipio de Solano, Caquetá. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 33 muestra el nodo receptor comunitario encargado de redistribuir el servicio hacia viviendas, instituciones y usuarios finales mediante cobertura inalámbrica local.

La ubicación del nodo fue seleccionada estratégicamente dentro de la zona de mayor concentración poblacional de la comunidad, permitiendo optimizar cobertura y reducir distancias promedio de distribución hacia los usuarios.

**Figura 34**

*Variación estimada del nivel de señal respecto a la distancia*



*Nota.* Simulación desarrollada en MATLAB para representar la variación estimada del nivel de señal inalámbrica respecto a la distancia desde el nodo central comunitario. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 34 representa la disminución progresiva del nivel de señal inalámbrica (RSSI) conforme aumenta la distancia respecto al nodo central comunitario.

Los resultados obtenidos muestran niveles funcionales de señal dentro del área estimada de cobertura, permitiendo garantizar conectividad básica para viviendas e instituciones cercanas.

Asimismo, los valores de RSSI simulados evidencian condiciones adecuadas para servicios de navegación web, educación virtual y comunicación comunitaria bajo escenarios rurales de operación.

**Tabla 8**

*Resultados obtenidos en la simulación MATLAB*

Variable evaluada	Resultado
Potencia recibida	-37 dBm
Sensibilidad receptor	-75 dBm

Margen operación	38 dB
Estado enlace	Viable
Cobertura estimada	800 m
RSSI máximo	-45 dBm
RSSI mínimo	-74 dBm

*Nota.* Se resumen los resultados obtenidos en la simulación del modelo propuesto, permitiendo evaluar el comportamiento del enlace y el desempeño general de la red bajo las condiciones establecidas. *Fuente.* Autoría propia.

Los resultados obtenidos durante la simulación en MATLAB evidencian condiciones adecuadas de estabilidad y desempeño para el enlace inalámbrico propuesto.

Asimismo, el margen de operación calculado y los niveles estimados de señal permiten validar técnicamente la viabilidad del modelo comunitario de conectividad planteado para el municipio de Solano, Caquetá.

### ***Evaluación de Capacidad y Desempeño***

Con el propósito de estimar el comportamiento del sistema frente a diferentes niveles de demanda, se realizó una distribución teórica de capacidad considerando usuarios simultáneos y velocidad promedio disponible.

#### **Tabla 9**

##### *Distribución estimada de capacidad por usuarios*

Usuarios simultáneos	Velocidad promedio estimada	Estado del servicio
10 usuarios	10–15 Mbps	Óptimo
20 usuarios	5–10 Mbps	Estable
30 usuarios	3–5 Mbps	Aceptable

40 usuarios

1–3 Mbps

Congestión parcial

*Nota.* Se presenta la asignación estimada del ancho de banda disponible entre los usuarios potenciales de la red comunitaria, considerando un escenario de operación normal. *Fuente.*

Autoría propia.

Los resultados muestran que el sistema puede soportar adecuadamente actividades como navegación web, videollamadas, educación virtual y servicios digitales básicos bajo escenarios de demanda moderada.

Asimismo, la baja latencia proporcionada por Starlink mejora significativamente la experiencia de usuario frente a soluciones GEO tradicionales.

### ***Comparación Técnica Frente a Alternativas Terrestres***

Con el fin de validar la pertinencia del modelo híbrido propuesto, se realizó una comparación conceptual frente a las alternativas evaluadas en el Capítulo 2.

#### **Tabla 10**

##### *Comparación técnica de alternativas de conectividad*

Variable	Microondas tradicional	Infraestructura móvil	Starlink híbrido
Dependencia LOS	Alta	Media	Baja
Cobertura rural	Limitada	Parcial	Total
Latencia	Baja	Media	Baja
Complejidad operativa	Alta	Alta	Media
Costos infraestructura	Altos	Altos	Moderados
Escalabilidad	Limitada	Limitada	Alta
Dependencia de torres	Alta	Alta	Baja

*Nota.* Se comparan las principales características técnicas de las alternativas evaluadas, considerando cobertura, capacidad, latencia, escalabilidad y facilidad de implementación.

*Fuente.* Autoría propia.

### ***Evaluación Económica del Modelo***

La evaluación económica del proyecto se desarrolló considerando costos aproximados de adquisición, instalación y operación de los equipos requeridos para implementar el sistema comunitario propuesto.

**Tabla 11**

*Costos estimados de implementación (CAPEX)*

Equipo	Cantidad	Valor aproximado
Kit Starlink Gen 3	1	\$2.500.000
Router MikroTik RB5009	1	\$1.200.000
Antena PtP	2	\$1.500.000
Antena Omni	1	\$1.800.000
Routers usuarios	5	\$1.000.000
Sistema solar	1	\$3.000.000
Cableado y accesorios	1	\$800.000
Instalación	1	\$1.500.000
<b>Total estimado</b>		<b>\$13.300.000</b>

*Nota.* Se detallan los costos aproximados asociados a la adquisición e instalación de la infraestructura requerida para la puesta en marcha del modelo de conectividad propuesto. *Fuente.* Autoría propia.

**Tabla 12***Costos operativos mensuales estimados (OPEX)*

Concepto	Valor mensual
Servicio Starlink	\$250.000
Mantenimiento	\$150.000
Soporte técnico	\$100.000
Reposición equipos	\$80.000
Energía y baterías	\$70.000
<b>Total mensual estimado</b>	<b>\$650.000</b>

*Nota.* Se presentan los costos mensuales estimados para la operación, mantenimiento y sostenibilidad del sistema de conectividad propuesto. *Fuente.* Autoría propia.

**Escenario de Sostenibilidad Comunitaria.** La sostenibilidad financiera del modelo depende directamente del número de usuarios vinculados y de la capacidad organizativa de la comunidad.

Por esta razón, se plantea un esquema de distribución compartida del servicio, mediante el cual múltiples usuarios contribuyen colectivamente al sostenimiento operativo de la red.

**Tabla 13**

Escenario estimado de sostenibilidad comunitaria

Usuarios aportantes	Aporte mensual por usuario	Ingreso mensual
10	\$30.000	\$300.000
20	\$35.000	\$700.000
30	\$35.000	\$1.050.000

*Nota.* Se proyecta un escenario de sostenibilidad financiera basado en el número de usuarios, ingresos esperados y costos operativos del modelo comunitario de conectividad. *Fuente.* Autoría propia.

### ***Resultados Generales de la Simulación***

La simulación desarrollada permitió validar técnicamente el comportamiento general de la arquitectura híbrida propuesta para entornos rurales del municipio de Solano, Caquetá.

**Tabla 14**

*Resultados generales de la simulación*

Variable evaluada	Resultado
Cobertura rural	Adecuada
Latencia	Baja
Escalabilidad	Alta
Dependencia infraestructura terrestre	Baja
Viabilidad técnica	Alta
Viabilidad económica	Media
Complejidad operativa	Moderada
Adaptabilidad territorial	Alta

*Nota.* Se consolidan los principales indicadores técnicos y económicos obtenidos durante la simulación del modelo de conectividad, permitiendo una evaluación integral de su viabilidad.

*Fuente.* Autoría propia.

Los resultados obtenidos evidencian que la conectividad satelital LEO permite superar las principales barreras geográficas presentes en el territorio evaluado.

Asimismo, la arquitectura híbrida reduce significativamente la dependencia de infraestructura terrestre compleja y facilita la ampliación progresiva de cobertura mediante distribución inalámbrica comunitaria.

Desde el punto de vista técnico, el modelo demuestra capacidad suficiente para soportar servicios básicos de conectividad rural bajo escenarios de demanda moderada.

No obstante, la sostenibilidad económica del sistema depende principalmente de modelos comunitarios de gestión y redistribución del servicio, permitiendo optimizar costos individuales de acceso.

En consecuencia, la arquitectura propuesta representa una solución técnicamente viable, adaptable y escalable para mejorar la conectividad en comunidades rurales dispersas de la Amazonía colombiana.

## **Segunda Simulación del Diseño de Red Inalámbrica Rural para la Vereda El Danubio**

### ***Escenario de Estudio y Análisis Geográfico***

La vereda El Danubio presenta una distribución semi dispersa de viviendas, zonas con vegetación moderada y ausencia de infraestructura de telecomunicaciones cableada. Debido a estas condiciones, se plantea una solución de conectividad inalámbrica basada en tecnologías airMAX AC de Ubiquiti y acceso principal a Internet mediante Starlink.

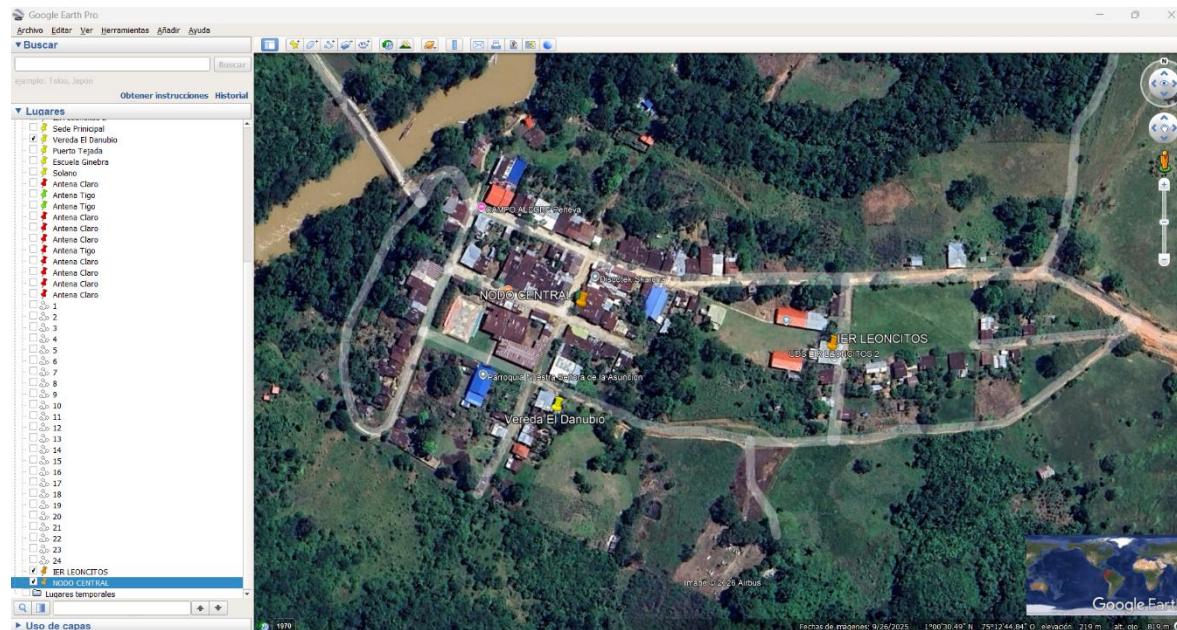
La propuesta considera un nodo central encargado de redistribuir el servicio de Internet hacia diferentes viviendas mediante enlaces inalámbricos punto a multipunto (PtMP), permitiendo cobertura en zonas cercanas y alejadas.

La ubicación del nodo central fue seleccionada estratégicamente teniendo en cuenta la distribución de las viviendas, la topografía del terreno y la facilidad para irradiar señal hacia la

mayor cantidad de usuarios posibles. Adicionalmente, se evaluó la presencia de vegetación y posibles obstáculos físicos que pudieran afectar la propagación inalámbrica.

### Figura 35

*Distribución geográfica de viviendas y ubicación propuesta del nodo central en la vereda El Danubio.*



*Nota.* La imagen muestra la distribución geográfica de las viviendas, zonas de vegetación y ubicación estratégica del nodo central propuesto para la distribución inalámbrica del servicio de Internet en la vereda El Danubio. La ubicación fue seleccionada considerando cobertura, línea de vista y facilidad de expansión futura de la red. *Fuente.* Autoría propia mediante Google Earth Pro.

### ***Análisis de Perfil de Elevación y Viabilidad del Enlace***

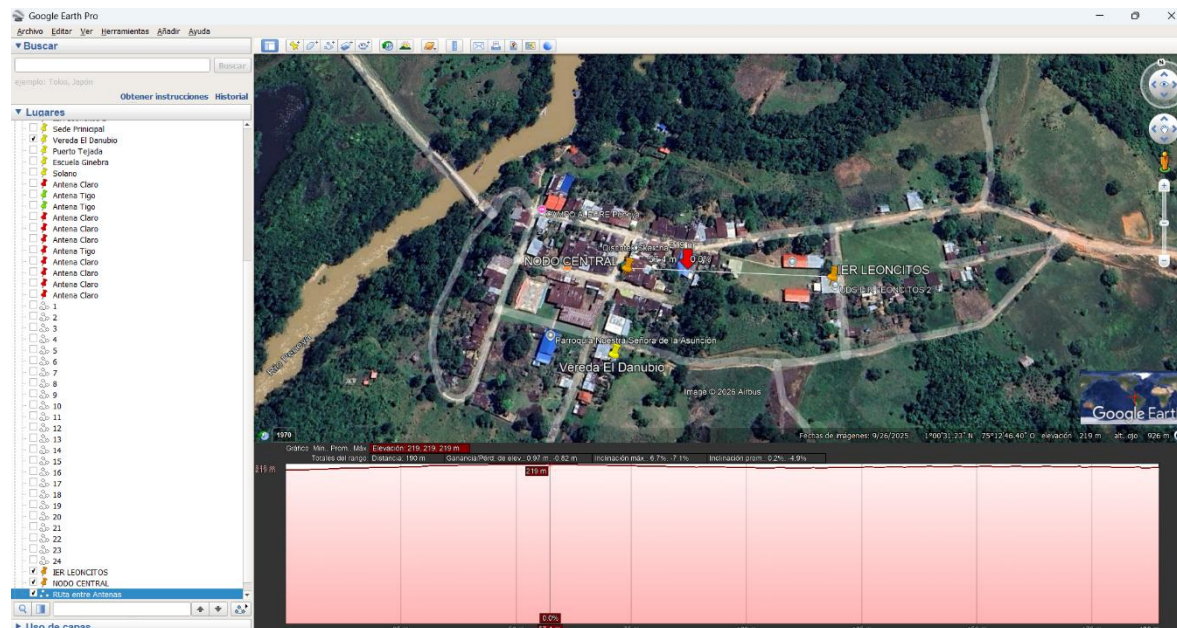
Con el fin de validar la viabilidad del radioenlace principal, se realizó un análisis del perfil de elevación utilizando Google Earth Pro. El estudio permitió verificar la existencia de línea de vista entre el punto de acceso principal y el nodo central de distribución.

El análisis evidenció variaciones mínimas de elevación y ausencia significativa de obstáculos naturales, permitiendo establecer un enlace inalámbrico estable sin necesidad de torres de gran altura. Sin embargo, se recomienda instalar mástiles de entre 6 y 12 metros para mejorar la zona de Fresnel y garantizar estabilidad ante crecimiento de vegetación o condiciones climáticas.

La distancia aproximada del enlace principal es cercana a 186 metros, lo cual permite trabajar adecuadamente en la banda de 5 GHz con tecnologías airMAX AC manteniendo buena capacidad y baja latencia.

### Figura 36

*Perfil de elevación entre el nodo principal y el nodo central de distribución.*



*Nota.* El perfil de elevación permite verificar la existencia de línea de vista entre los puntos del enlace principal. Se evidencian variaciones mínimas de terreno, lo cual favorece la estabilidad del radioenlace y reduce la necesidad de torres de gran altura. *Fuente.* Autoría propia mediante Google Earth Pro.

### ***Diseño de la Topología de Red Propuesta***

La topología propuesta se basa en una arquitectura híbrida PtP (Punto a Punto) y PtMP (Punto a Multipunto).

Inicialmente, el servicio de Internet es recibido mediante un kit Starlink, el cual se conecta a un radio PowerBeam 5AC encargado de transmitir el enlace principal hacia otro PowerBeam 5AC ubicado en el nodo central.

Posteriormente, el nodo central distribuye la conectividad mediante un Rocket Prism 5AC conectado a una antena omnidireccional de 13 dBi operando en la banda de 5 GHz.

La distribución final hacia los usuarios se realiza de dos maneras:

Viviendas cercanas:

se conectan directamente a la antena omnidireccional utilizando routers WiFi compatibles con 5 GHz.

Viviendas alejadas o con obstáculos:

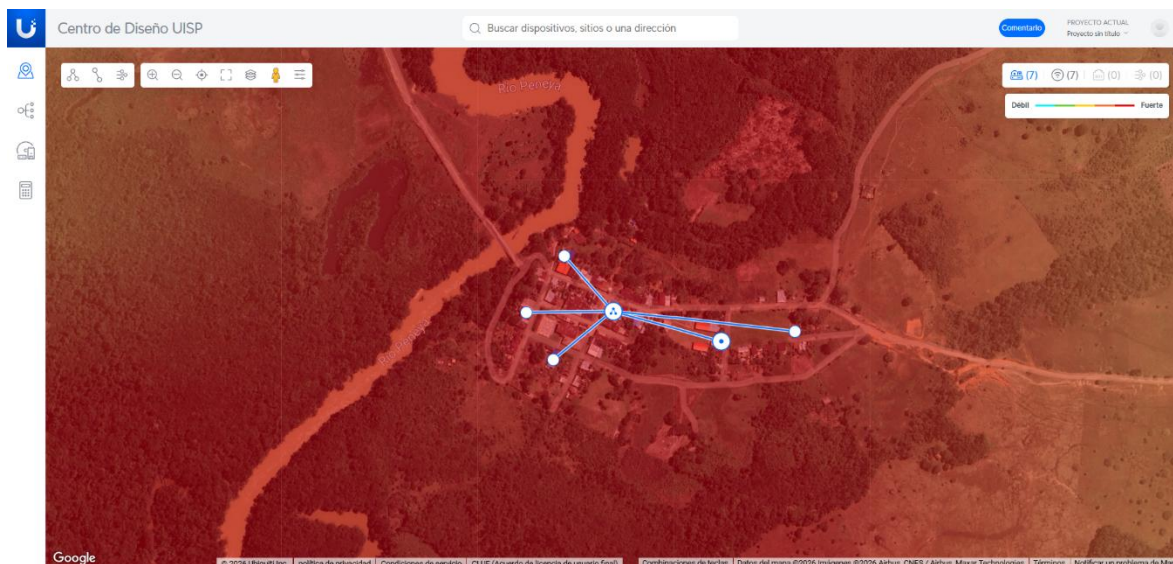
utilizan estaciones LiteBeam 5AC para recibir la señal inalámbrica y posteriormente distribuirla localmente mediante routers WiFi internos.

La antena omnidireccional trabaja en 5 GHz utilizando tecnología airMAX AC, permitiendo distribuir conectividad en 360° alrededor del nodo central.

Cada vivienda requiere un router WiFi local para distribuir Internet hacia celulares, computadores y televisores inteligentes dentro de la casa.

## Figura 37

*Topología propuesta para la distribución inalámbrica de Internet en la vereda El Danubio.*



*Nota.* La topología propuesta integra un enlace principal punto a punto (PtP) utilizando PowerBeam 5AC y una distribución punto a multipunto (PtMP) mediante Rocket Prism 5AC y antena omnidireccional de 13 dBi. Las viviendas cercanas reciben la señal directamente mediante routers WiFi, mientras que las viviendas alejadas utilizan LiteBeam 5AC como estación receptora. *Fuente.* Autoría propia mediante UISP Design Center.

### ***Simulación Inalámbrica en UISP Design Center***

La red fue simulada mediante la herramienta UISP Design Center de Ubiquiti, permitiendo validar cobertura, capacidad de transmisión y comportamiento de los enlaces inalámbricos.

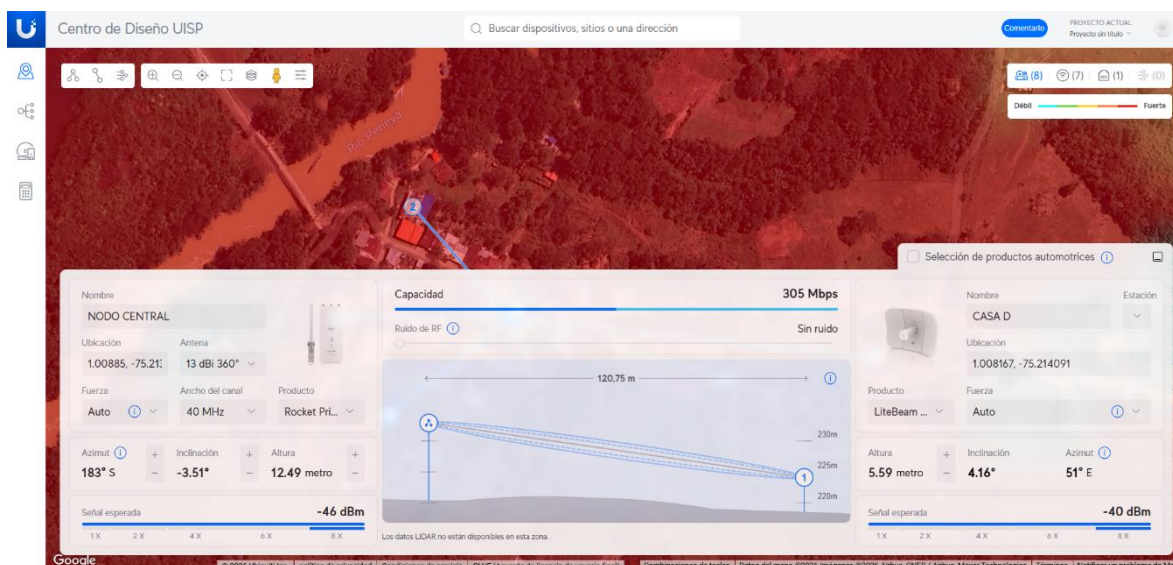
La simulación mostró capacidades superiores a 300 Mbps en los enlaces cliente, niveles de señal entre -36 dBm y -59 dBm y cobertura adecuada para la distribución planteada.

El uso de la antena omnidireccional permitió irradiar cobertura en 360°, facilitando la conexión simultánea de múltiples usuarios desde un único nodo central.

Durante la simulación se identificó que las viviendas más cercanas pueden conectarse directamente mediante routers WiFi compatibles con 5 GHz, mientras que las viviendas ubicadas en zonas más alejadas requieren el uso de LiteBeam 5AC para garantizar estabilidad y mejor recepción.

### Figura 38

*Simulación de cobertura y enlaces inalámbricos en UISP Design Center.*



*Nota.* La simulación realizada en UISP Design Center permite visualizar la cobertura inalámbrica, los enlaces cliente y el comportamiento de la distribución en 360°. Los resultados evidencian capacidades superiores a 300 Mbps y niveles de señal adecuados para la operación de la red propuesta. *Fuente.* Autoría propia mediante UISP Design Center.

### ***Selección de Dispositivos y Costos Estimados***

La selección de dispositivos se realizó considerando cobertura, capacidad, estabilidad y costos de implementación para zonas rurales.

Los equipos principales corresponden a tecnologías airMAX AC de Ubiquiti, debido a su compatibilidad con enlaces PtP y PtMP, bajo costo operativo y facilidad de administración.

Entre los dispositivos utilizados se encuentran:

PowerBeam 5AC para el enlace troncal.

Rocket Prism 5AC como estación base.

Antena omnidireccional de 13 dBi para distribución.

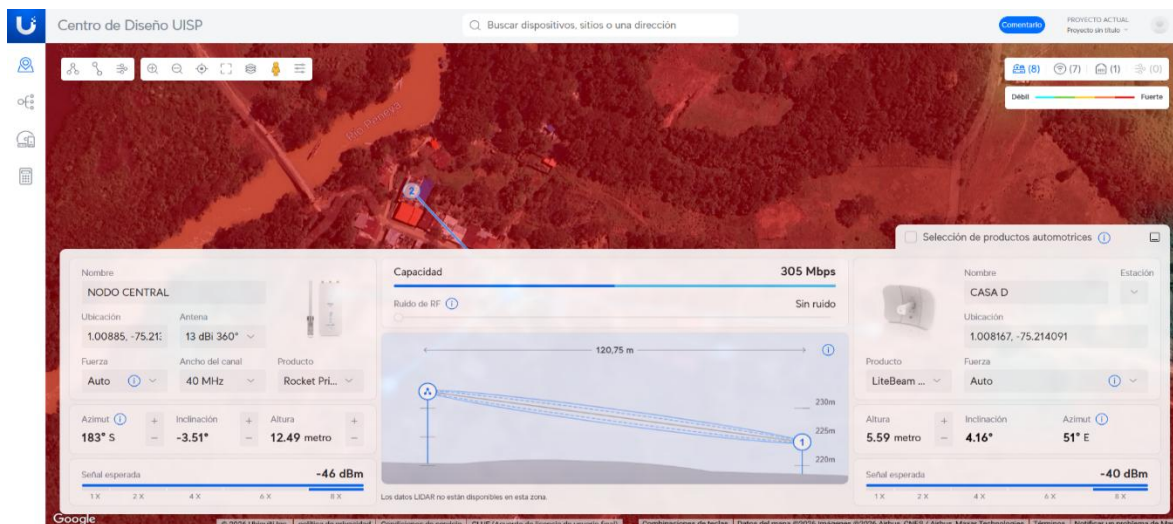
LiteBeam 5AC para clientes alejados.

Routers WiFi domésticos para distribución interna en las viviendas.

Los costos estimados corresponden únicamente a equipos de infraestructura inalámbrica y no incluyen costos adicionales de instalación eléctrica, mástiles, canalización, mano de obra ni sistemas de respaldo energético.

## Figura 39

*Equipos seleccionados y costos aproximados de implementación.*



*Nota.* La selección de dispositivos y costos estimados fue realizada utilizando UISP Design Center de Ubiquiti. Los equipos seleccionados corresponden a tecnologías airMAX AC, priorizando cobertura, estabilidad, capacidad de transmisión y reducción de costos para entornos rurales. *Fuente.* Autoría propia mediante UISP Design Center.

## ***Análisis Económico y Rentabilidad***

Se realizó una estimación financiera considerando costos de equipos, instalación y operación mensual del sistema.

Los valores simulados indican que el proyecto puede alcanzar sostenibilidad económica mediante planes de servicio compartidos entre los habitantes de la vereda.

La propuesta considera un modelo comunitario donde la inversión principal corresponde al nodo central y distribución troncal, mientras que cada vivienda asume únicamente el costo de su equipo receptor y router local.

La simulación de rentabilidad evidenció un punto de equilibrio cercano a los 15 meses, demostrando viabilidad económica para comunidades rurales con baja cobertura de operadores tradicionales.

Se estima que la inversión inicial del nodo principal puede oscilar entre \$4.000.000 y \$6.000.000 COP dependiendo de la infraestructura adicional requerida, mientras que cada vivienda tendría costos aproximados entre \$250.000 y \$600.000 COP según el tipo de conexión implementada.

Las viviendas cercanas únicamente requerirían un router WiFi compatible con 5 GHz, mientras que las viviendas alejadas necesitarían adicionalmente una LiteBeam 5AC para recepción de señal.

### ***Funcionamiento General del Sistema***

El funcionamiento general del sistema inicia con la recepción del servicio satelital Starlink. Posteriormente, el enlace principal es transportado mediante radios PowerBeam hacia el nodo central de distribución.

Desde el nodo central, la antena omnidireccional distribuye la señal inalámbrica en la banda de 5 GHz hacia las diferentes viviendas.

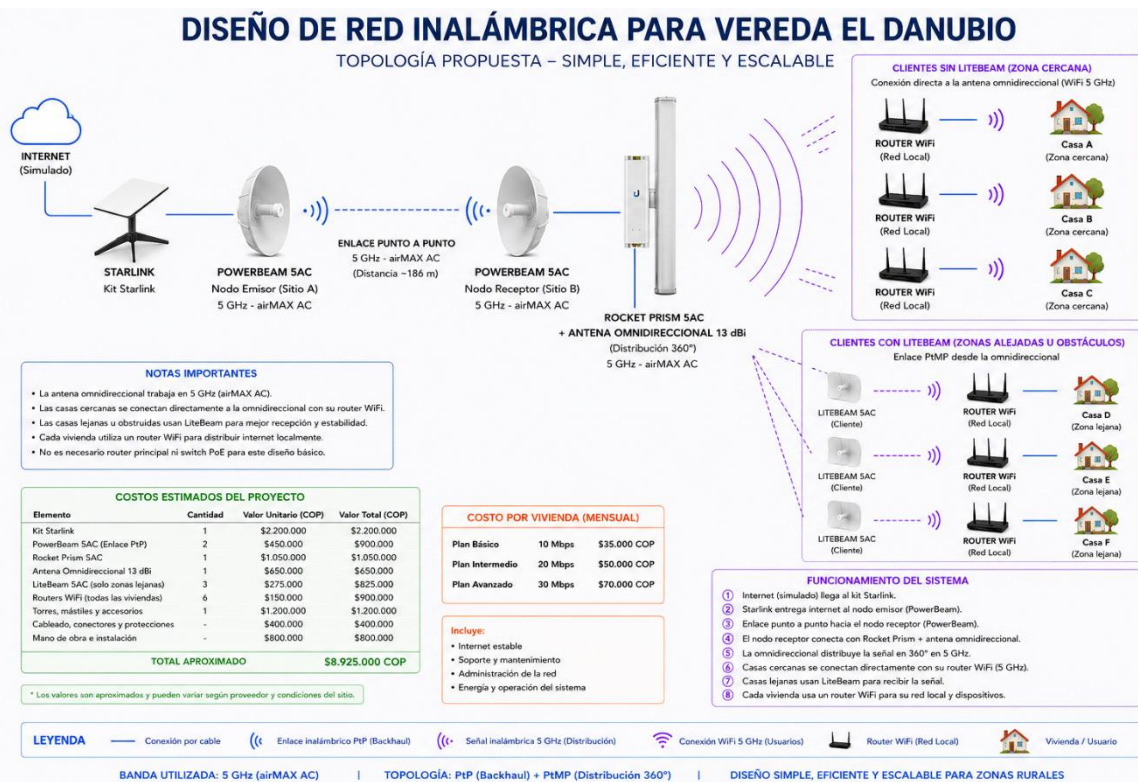
Las viviendas cercanas pueden conectarse directamente mediante routers WiFi compatibles con 5 GHz, mientras que las viviendas más alejadas utilizan LiteBeam 5AC como estación cliente receptora.

Finalmente, cada vivienda utiliza un router WiFi local para distribuir Internet a dispositivos internos como teléfonos móviles, computadores y televisores inteligentes.

La solución propuesta permite una arquitectura escalable, flexible y de bajo costo operativo, adecuada para zonas rurales donde no existe cobertura tradicional de fibra óptica o redes cableadas.

## Figura 40

*Funcionamiento general del sistema inalámbrico propuesto para la vereda El Danubio.*



*Nota.* La imagen presenta el funcionamiento general de la red inalámbrica rural propuesta, integrando el servicio satelital Starlink, el enlace principal punto a punto mediante PowerBeam

5AC y la distribución punto a multipunto utilizando Rocket Prism 5AC con antena omnidireccional de 13 dBi. Las viviendas cercanas reciben conectividad mediante routers WiFi configurados como clientes receptores de 5 GHz, mientras que las viviendas alejadas utilizan estaciones LiteBeam 5AC conectadas posteriormente a routers WiFi domésticos para distribuir Internet dentro de cada vivienda. *Fuente.* Autoría propia.

## Conclusiones

El análisis desarrollado permitió evidenciar que las limitaciones de conectividad en el municipio de Solano, Caquetá, no obedecen únicamente a la ausencia de infraestructura de telecomunicaciones, sino a una combinación de factores geográficos, económicos y operativos que dificultan la implementación de modelos tradicionales de acceso a Internet. La dispersión poblacional, la presencia de selva densa, las variaciones topográficas y las dificultades de acceso terrestre convierten a este territorio en un escenario altamente complejo para el despliegue de redes convencionales.

La evaluación técnica de las alternativas basadas en radioenlaces de microondas demostró que, aunque este tipo de tecnología permite transportar grandes volúmenes de información en escenarios con línea de vista despejada, su implementación en Solano presenta limitaciones significativas. Los perfiles topográficos obtenidos mediante Google Earth Pro evidenciaron obstrucciones permanentes en la línea de vista (LOS), ocasionadas por elevaciones intermedias, vegetación selvática y variaciones altitudinales. Estas condiciones obligarían a instalar torres de gran altura, repetidores intermedios y sistemas energéticos autónomos, incrementando considerablemente los costos de despliegue y mantenimiento del sistema.

Asimismo, el análisis de la infraestructura móvil existente permitió establecer que los operadores tradicionales presentan cobertura limitada hacia las zonas rurales dispersas del municipio. Aunque compañías como Claro y Movistar disponen de estaciones base en áreas urbanas, su alcance hacia veredas alejadas continúa siendo insuficiente debido a la dependencia de infraestructura terrestre, las restricciones geográficas y la baja rentabilidad económica de estos mercados rurales. En consecuencia, las redes móviles actuales no garantizan cobertura

integral ni estabilidad suficiente para soportar aplicaciones críticas como educación virtual, telemedicina o servicios digitales comunitarios.

Frente a estas limitaciones, la tecnología satelital de órbita baja (LEO) implementada por Starlink se identificó como la alternativa técnicamente más viable para el contexto de Solano, Caquetá. A diferencia de los sistemas tradicionales GEO, Starlink ofrece menores niveles de latencia, mayores velocidades de transmisión y cobertura total en zonas selváticas sin depender de infraestructura terrestre intermedia. Estas características permiten superar las barreras geográficas del territorio y garantizar condiciones de conectividad adecuadas para aplicaciones de tiempo real.

No obstante, el estudio también permitió concluir que la principal limitación de la solución propuesta no corresponde al componente técnico, sino al componente económico. Los costos asociados a la adquisición del kit satelital, el pago mensual del servicio y los sistemas de energía representan una barrera importante para familias rurales de bajos ingresos. Por esta razón, la propuesta incorpora un modelo de distribución comunitaria mediante nodos compartidos, lo que permite optimizar recursos, ampliar cobertura y reducir costos individuales de acceso.

La simulación técnica y financiera desarrollada evidenció que el modelo híbrido propuesto resulta funcional para la prestación de servicios básicos de conectividad rural, alcanzando niveles adecuados de cobertura, capacidad y desempeño. Sin embargo, bajo escenarios conservadores de adopción y recaudo, la sostenibilidad financiera depende de factores como el incremento gradual de usuarios, el fortalecimiento de esquemas comunitarios de gestión y la optimización de costos operativos.

Finalmente, se concluye que las arquitecturas híbridas basadas en conectividad satelital LEO, enlaces inalámbricos de distribución y modelos comunitarios representan una alternativa técnicamente coherente para territorios rurales de difícil acceso en la Amazonía colombiana. El modelo planteado puede servir como referencia para futuras iniciativas de conectividad rural en regiones con condiciones geográficas similares, contribuyendo al cierre de la brecha digital y al fortalecimiento del acceso a servicios educativos, sociales y productivos en comunidades históricamente excluidas de la infraestructura tradicional de telecomunicaciones.

### Referencias Bibliográficas

- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2020). *Conectividad rural en América Latina y el Caribe: Un diagnóstico y recomendaciones de política*. <https://publications.iadb.org>
- Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC). (2022). *Marco regulatorio del sector TIC en Colombia*. <https://www.crcm.gov.co>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2023). *Indicadores básicos de tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC)*. <https://www.dane.gov.co>
- Galperin, H., & Mariscal, J. (2020). *Digital connectivity in Latin America: Bridging the rural gap*. MIT Press.
- GSMA. (2021). *The state of mobile internet connectivity report 2021*. GSM Association. <https://www.gsma.com>
- International Telecommunication Union (ITU). (2022). *Measuring digital development: Facts and figures 2022*. <https://www.itu.int>
- Internet Society. (2018). *Community network manual: How to build the Internet yourself*. <https://www.internetsociety.org>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2023). *Índice de brecha digital 2023*. Gobierno de Colombia. <https://www.mintic.gov.co>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2020). *Bridging the rural digital divide*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org>
- Rey-Moreno, C., Graaf, M., & Gillwald, A. (2018). Community networks in Latin America: Challenges and opportunities. *Information Technologies & International Development*, 14, 1–16.

- Song, J., & Bae, S. (2019). Wireless network technologies for rural connectivity: A review. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2763–2795.  
<https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2892678>
- Raúl, B. G., Sonia, C. U., William, N. N., & Hugo, S. O. Análisis Técnico basado en estándares internacionales para la implementación del Data Center de apoyo a la gestión tecnológica y de formación por competencias en el CEET del SENA Distrito Capital.
- Bareño-Gutiérrez, R., Sevillano, A. M. L., Díaz-Piraquive, F. N., & González-Crespo, R. (2021, July). Analysis of WEB Browsers of HSTS Security Under the MITM Management Environment. In *International Conference on Knowledge Management in Organizations* (pp. 331-344). Springer, Cham.
- Bareño-Gutiérrez, R., Sevillano, A. M. L., Díaz-Piraquive, F. N., & González-Crespo, R. (2021). Analysis of WEB Browsers of HSTS Security Under the MITM Management Environment. In *Knowledge Management in Organizations: 15th International Conference, KMO 2021, Kaohsiung, Taiwan, July 20-22, 2021, Proceedings 15* (pp. 331-344). Springer International Publishing.
- López, A., Jiménez, Y., Bareño, R., Balamba, B., & Sacristán, J. (2019, October). E-Health System for the Monitoring, Transmission and Storage of the Arterial Pressure of Chronic-Hypertensive Patients. In *2019 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)* (pp. 1-6). IEEE.
- Raúl, B. G., & Sevillano, A. M. L. (2017, October). Services cloud under HSTS, Strengths and weakness before an attack of man in the middle MITM. In *2017 Congreso Internacional de Innovacion y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)* (pp. 1-5). IEEE.

- Urrea, S. E. C., Núñez, W. N., Osorio, H. E. S., Paez, N. A. F., & Gutierrez, R. B. (2017). Sistema de votación electrónico con características de seguridad SSL/TLS e IPsec en Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 16(1), 75-84.
- Bareño-Gutiérrez R., Sevillano A.M.L., Díaz-Piraquive F.N., González-Crespo R. (2021) Analysis of WEB Browsers of HSTS Security Under the MITM Management Environment. In: Uden L., Ting IH., Wang K. (eds) Knowledge Management in Organizations. KMO 2021. Communications in Computer and Information Science, vol 1438. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81635-3\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81635-3_27)
- BAREÑO, Gutiérrez, R., Sevillano, A. M. L., Díaz-Piraquive, F. N., & González-Crespo, R. (2021, July). Analysis of WEB Browsers of HSTS Security Under the MITM Management Environment. In *International Conference on Knowledge Management in Organizations* (pp. 331-344). Springer, Cham.
- Bareño Gutiérrez, R. (2013). Elaboración de un estado de arte sobre el protocolo IPV6; y su implementación sobre protocolos de enrutamiento dinámico como RIPNG, EIGRP y OSPF basado sobre la plataforma de equipos cisco.
- Barreño Gutiérrez, R., & Lengerke, O. (2014). Voto electrónico con SSL/TLS e IPSEC. url: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/12268>
- Urrea, S. E. C., Núñez, W. N., Gutiérrez, R. B., & Osorio, H. E. S. Gestión de conocimiento soportado en TIC para entidades educativas de formación por competencias SENA–CEET. In *VI Congreso Internacional de Formación y Gestión del Talento Humano*. “Enfoques y Modelos para la Formación, la Innovación y la (p. 392).

- Moreno Judy; Bareño Raul (2021) Seguridad en la administración y calidad de los datos; Estudio de casos por contextos. 1 edición, editorial Ediciones de la U; ISBN 978-958-792-317-9.  
<https://isbn.camlibro.com.co/catalogo.php?mode=detalle&nt=386998>
- Suárez Violeta; Bareño Raul; (2021). Una mirada a las historias clínicas digitales, la calidad del dato, sus estándares, aspectos de ciberseguridad y su interoperabilidad en Colombia. En libro: Seguridad en la administración y calidad de los datos; Estudio de casos por contextos. 1 edición; volumen 1, editorial ediciones de la U. pags 11-28.
- Álvarez Víctor., Bareño Raúl., Sosa Juan; (2021). La importancia de la analítica y la inteligencia artificial en la salud; en el análisis de muertes neonatales y perinatales en Bogotá D.C. en libro: Seguridad en la administración y calidad de los datos; Estudio de casos por contextos. 1 edición volumen 1, editorial ediciones de la U. pags 83-95
- Gutiérrez, R. B. (2022). Machine Learning predictivo a partir de la analítica y de modelos de inteligencia artificial. Un caso de estudio. In Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era (pp. 759-767). Instituto Antioqueño de Investigación (IAI). Researchgate.net
- Gutiérrez, R. B. (2022). Machine Learning predictivo a partir de la analítica y de modelos de inteligencia artificial. Un caso de estudio. *en la Nueva Era*, 759.
- Suárez, J. D. L. S. S., Córdoba, S. M. G., Mariño, D. C. A., Gutiérrez, R. B., & Soto, J. P. T. (2022). Impacto de la implementación de una plataforma como servicio para apoyar procesos de Formación empresarial mediante la modalidad MOOC. In Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era (pp. 791-799). Instituto Antioqueño de Investigación (IAI).
- Suárez, J. D. L. S. S., Córdoba, S. M. G., Mariño, D. C. A., Gutiérrez, R. B., & Soto, J. P. T. (2022). Impacto de la implementación de una plataforma como servicio para apoyar

procesos de Formación empresarial mediante la modalidad MOOC. *en la Nueva Era*, 791.

Bareño Gutiérrez, R., et al. (2023). UCompensar: La academia motor en la transformación digital y automatización de la industria 4.0. primera edición, Ediciones de la U  
<https://repositoriocrai.ucompensar.edu.co/handle/compensar/5251>

Bareño Gutiérrez, R., et al. (2023). Algoritmos de machine learning aplicados al sector salud: una realidad para la toma de decisiones desde la analítica de datos. UCompensar: La academia motor en la transformación digital y automatización de la industria 4.0. (pp 19-45). Ediciones de la U <https://repositoriocrai.ucompensar.edu.co/handle/compensar/5251>

Bareño Gutiérrez, R., et al. (2023). Migración a la nube en PYMES y MIPYMES: una revisión basada en buenas prácticas desde la gestión TI. UCompensar: La academia motor en la transformación digital y automatización de la industria 4.0. (pp 51-71). Ediciones de la U  
<https://repositoriocrai.ucompensar.edu.co/handle/compensar/5251>

Bareño Gutiérrez, R. B. (2024). Explorando el Universo IPv6: Para la innovación de un mundo Interconectado. Primera edición, Ediciones de la U.  
<https://repositoriocrai.ucompensar.edu.co/handle/compensar/5253>

Bareño-Gutiérrez, Raúl, Báez-Rodríguez, Helber L, & Carvajal, Jhonatan. (2025). Cybersecurity recommendations under the implementation of defense-in-depth policies in organizations: systematic review of the literature. *Información tecnológica*, 36(3), 1-12.  
<https://dx.doi.org/10.4067/s0718-07642025000300001>

Bareño-Gutiérrez, R., Báez-Rodríguez, H. L., & Carvajal, J. (2025). Recomendaciones de ciberseguridad bajo la implementación de políticas de defensa en profundidad en las

organizaciones: revisión sistemática de la literatura. Información tecnológica, 36(3), 1-12. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-07642025000300001>