UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA CONECTIVIDAD INTELIGENTE EN EL SECTOR FLORÍCOLA MEDIANTE SOLUCIONES DE REDES DE COMUNICACIÓN PARA MONITOREO REMOTO EN ZONAS RURALES PARA LA EMPRESA ARTIL ROBOTICS.

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la obtención del título de Ingenieras en Telecomunicaciones

ÁREA: Comunicaciones

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Electrónica, telecomunicaciones y sistemas de control

AUTOR: Ibeth Raquel Nuñez Aguiar

Katherin Stefania Silva Espin

TUTOR: Ing. Jesús Israel Guamán Molina, Mg.

Ambato – Ecuador

julio – 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA CONECTIVIDAD INTELIGENTE EN EL SECTOR FLORÍCOLA MEDIANTE SOLUCIONES DE REDES DE COMUNICACIÓN PARA MONITOREO REMOTO EN ZONAS RURALES PARA LA EMPRESA ARTIL ROBOTICS, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por las señoritas Ibeth Raquel Nuñez Aguiar y Katherin Stefania Silva Espin estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que las estudiantes han sido tutoradas durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, julio 2026

Ing. Jesús Israel Guamán Molina, Mg.

TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA CONECTIVIDAD INTELIGENTE EN EL SECTOR FLORÍCOLA MEDIANTE SOLUCIONES DE REDES DE COMUNICACIÓN PARA MONITOREO REMOTO EN ZONAS RURALES PARA LA EMPRESA ARTIL ROBOTICS es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad de las autoras.

Ambato, julio 2026.

Ibeth Raquel Nuñez Aguiar
C.C. 1805450309
AUTOR

Katherin Stefania Silva Espin
C.C. 1850657634
AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedemos todos nuestros derechos de autoras a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizamos su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, julio 2026.

Ibeth Raquel Nuñez Aguiar
C.C. 1805450309
AUTOR

Katherin Stefania Silva Espin
C.C. 1850657634
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por las señoritas Ibeth Raquel Nuñez Aguiar y Katherin Stefania Silva Espin estudiantes de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA CONECTIVIDAD INTELIGENTE EN EL SECTOR FLORÍCOLA MEDIANTE SOLUCIONES DE REDES DE COMUNICACIÓN PARA MONITOREO REMOTO EN ZONAS RURALES PARA LA EMPRESA ARTIL ROBOTICS nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente del Tribunal.

Ambato, julio 2026.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FRANKLIN OSWALDO
MAYORGA MAYORGA

Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
EDGAR PATRICIO
CORDOVA CORDOVA

Ing. Patricio Córdova Córdova, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
SANTIAGO MAURICIO
ALTAMIRANO MELENDEZ

Ing. Santiago Altamirano Melendez, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

Con mucho cariño, respeto y amor, dedico este y todos mis futuros logros a mi bella madre y abuelita, quienes con mucho esfuerzo dedican su vida para que la mía tenga metas y sueños.

Katherin Stefania Silva Espin

AGRADECIMIENTO

A Dios, por poner en mi corazón seguir esta carrera y brindarme todas las capacidades suficientes para lograr culminarla, por siempre sostenerme en su mano en mis momentos felices y caóticos, todo es gracias a ti ♡

A mi mami, Patricia, por ser mi principal motor, por trabajar día y noche para que nada me falte, sus ánimos y abrazos reconfortantes me motivaron a no rendirme, la vida entera me va a faltar para agradecerle.

A mi fiel compañera de noches de vela, mamita Mariana, quien se encargó de cuidar de mi salud y bienestar.

A Ibeth, por su dedicación y tiempo, deseo que este sea uno de varios logros que llegue a tener.

Al ingeniero Jesús Guamán, por brindarnos su guía, apoyo y conocimientos, los cuales fueron indispensables para culminar satisfactoriamente este trabajo.

A los ingenieros Julio Cuji, Pamela Castro, Danilo Miniguano y Santiago Altamirano, por su gran calidez y orientación a lo largo de este tiempo.

A la empresa Artil Robotics y todo su equipo que siempre tuvieron disposición de ayudarnos.

A Sebitas, por tenerme mucha paciencia, brindarme cariño y ser parte de mi camino.

A mi Angisito y mis queridos amigos Alex, Karina, Josué y Alan por estar desde el principio, gracias por hacer mi vida universitaria más divertida.

Katherin Stefania Silva Espin

DEDICATORIA

Con cariño dedico este y todos mis futuros logros a mis padres y hermano.

Ibeth Raquel Nuñez Aguiar

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la resiliencia para poder culminar con uno de mis propósitos.

A mi madre, Olivia, por su infinita paciencia y el amor con el que me acompaña cada día. Gracias por alentarme a ser mejor en todo lo que me propongo, por cuidarme y estar pendiente de mí.

A mi padre, Fabián, porque a pesar de todo, gran parte de lo que he logrado ha sido gracias a tu apoyo incondicional. Gracias por tu calidez y tu presencia silenciosa en todas esas noches en vela en las que venías a preguntarme cómo estaba o si necesitaba algo.

A mi campeón, mi amado hermano, Xavier, por ser siempre mi confidente y compañero en tantas travesuras. Gracias por estar para mí a pesar de la distancia y de lo ocupado que estas, por siempre hacerme sentir acompañada.

A Kathy por la paciencia y tiempo, deseo de todo corazón que logres todo lo que te propongas y que Diosito te bendiga siempre.

A el ing. Jesús que con toda su tolerancia fue una guía para culminar con este objetivo.

A el equipo de Artil Robotics por brindar su apoyo y colaboración en este trabajo.

A todos mis amiguitos del colegio, de la universidad y a mis amigas de la infancia, gracias por estar cada vez que necesité que alguien me escuchara. Gracias por estar en distintas etapas de mi vida y ocupar un lugarcito en mi corazón.

Ibeth Raquel Nuñez Aguiar

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA ..... **i**

APROBACIÓN DEL TUTOR ..... **ii**

AUTORÍA ..... **iii**

DERECHOS DE AUTOR ..... **iv**

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO ..... **v**

DEDICATORIA ..... **vi**

AGRADECIMIENTO ..... **vii**

DEDICATORIA ..... **viii**

AGRADECIMIENTO ..... **ix**

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS ..... **x**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **xv**

INDICE DE FIGURAS ..... **xix**

ÍNDICE DE ANEXOS ..... **xxiii**

RESUMEN EJECUTIVO ..... **xxiv**

ABSTRACT ..... **xxv**

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO **1**

1.1 Tema de investigación 1

1.1.1 Planteamiento del problema 1

1.2 Antecedentes investigativos 3

1.3 Fundamentación teórica 8

1.3.1 Conectividad en entornos rurales 8

1.3.2 Conectividad significativa 10

1.3.3 Agricultura de precisión 12

1.3.4 Internet de las Cosas (IoT) en agricultura 14

1.3.5 Sistemas de monitoreo agrícola 16

1.3.6 Sistemas de visión artificial en agricultura 17

1.3.7 Arquitecturas de procesamiento de datos 19

1.3.8 Tecnologías de comunicación para zonas rurales 19

1.3.9 Comparación de tecnologías de conectividad 25

1.3.10 Requerimientos de conectividad para monitoreo agrícola 26

1.3.11 Ingeniería de requisitos para formularios de propuestas tecnológicas 28

1.3.12 Dimensionamiento del tráfico de red 29

1.4 Objetivos 31

1.4.1 Objetivo general 31

1.4.2 Objetivos específicos 31

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA 33

2.1 Materiales 33

2.2 Métodos 33

2.2.1 Modalidad de la investigación 33

2.2.2 Población y muestra 34

2.2.3 Recolección de información 35

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos 36

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 38

3.1 Diagnóstico del caso de estudio 38

3.1.1 Caracterización física y operativa de la florícola 38

3.1.2 Caracterización del sistema de monitoreo robótico 41

3.1.3 Identificación de los datos generados por el sistema 42

3.1.4 Requerimientos del sistema 43

3.1.5 Requerimientos funcionales y no funcionales 48

3.2 Estimación de la demanda de tráfico y requerimientos de red 49

3.2.1 Escenarios de generación de tráfico 50

3.3 Estimación de la demanda de tráfico y ancho de banda 51

3.3.1 Tráfico de datos de imágenes por invernadero 51

3.3.2 Tráfico de datos de video por invernadero 52

3.3.3 Posible implementación de cámaras por invernadero 52

3.4 Análisis de los requisitos de ancho de banda de la red 53

3.4.1 Ancho de banda requerido en imágenes 53

3.4.2 Ancho de banda requerido en video 53

3.4.3 Escenario 1: Transmisión en tiempo real 55

3.4.4 Escenario 2: Transmisión en tiempo diferido 56

3.5 Evaluación de tecnologías de comunicación aplicables 57

3.5.1 Tecnologías candidatas evaluadas 57

3.5.2 1. Tecnologías de Acceso Local / Red Interna 58

3.5.3 2. Tecnologías de Acceso a Internet (WAN) 61

3.5.4 Tecnologías de Distribución o Transporte 64

3.5.5 Matriz comparativa multicriterio 66

3.6 Diseño de la arquitectura de red propuesta 69

3.6.1 Arquitectura lógica general de la solución 69

3.7 Diseño de la red inalámbrica 72

3.7.1 Arquitectura física de la solución inalámbrica 72

3.7.2 Selección y especificaciones técnicas de equipos inalámbricos 78

3.7.3 Diseño y dimensionamiento de radioenlaces 82

3.7.4 Consideraciones legales y permisos para la red inalámbrica propuesta 94

3.8 Diseño de la red de fibra óptica 95

3.8.1 Selección de equipos para la red óptica 101

3.8.2 Dimensionamiento técnico de la red de fibra óptica 110

3.9 Cobertura y dimensionamiento energético de la arquitectura 115

3.9.1 Cobertura de la arquitectura 115

3.9.2 Dimensionamiento energético 116

3.10 Mecanismos de acceso remoto seguro 122

3.10.1 Problemas del acceso remoto detrás de un proveedor 122

3.10.2 Requisitos mínimos para la selección del mecanismo de acceso remoto seguro 123

3.11 Validación cuantitativa, simulada y experimental de las arquitecturas ... 127

3.11.1 Indicadores y criterios de validación Indicadores y criterios de validación . 127

3.11.2 Validación experimental y simulada de la arquitectura de la Red Inalámbrica 128

3.11.3 Validación de sistema de radio frecuencia 136

3.11.4 Validación experimental y simulada de la arquitectura de la Red de Fibra óptica 141

3.12 Comparación de los resultados de las arquitecturas propuestas 152

3.13 Modelo de viabilidad tecno económica del diseño propuesto 153

3.13.1 Viabilidad Red Inalámbrica 156

3.13.2 Viabilidad Red Fibra óptica 160

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 164

4.1 Conclusiones 164

4.2 Recomendaciones 166

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 168

ANEXOS 175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recursos de información..... 35

Tabla 2. Características principales del entorno del caso de estudio 41

Tabla 3. Características operativas del sistema de monitoreo robótico 42

Tabla 4. Datos identificados que genera el sistema 43

Tabla 5. Acrónimos de en la norma ISO/IEC/IEEE 29148 [68]. 44

Tabla 6. Listado de Stakeholders 44

Tabla 7. Priorización de requerimientos del sistema de conectividad. 45

Tabla 8. Requerimientos Operacionales y de Usuario. 45

Tabla 9. Requerimientos iniciales del sistema 46

Tabla 10. Requerimientos de Arquitectura 47

Tabla 11. Requerimientos funcionales de la solución de conectividad 48

Tabla 12. Requerimientos no funcionales de la solución de conectividad 49

Tabla 13. Generación de datos de imágenes del sistema robótico 50

Tabla 14. Características de generación de video del sistema 51

Tabla 15. Datos totales generados en la florícola 52

Tabla 16. Resumen de escenarios de transmisión de datos..... 56

Tabla 17. Comparación de tecnologías de acceso local. 60

Tabla 18. Comparación técnica general de las tecnologías de backhaul candidatas de conectividad. 63

Tabla 19. Síntesis de las tecnologías de conectividad evaluadas..... 64

Tabla 20. Tabla comparativa de tecnologías de transporte. 66

Tabla 21. Tabla multicriterio de red de acceso. 67

Tabla 22. Tabla multicriterio de red de backhaul. 68

Tabla 23. Tabla multicriterio de red de transporte. 69

Tabla 24. Segmentación VLAN para la arquitectura de red 71

Tabla 25. Descripción de los criterios para el diseño de la red inalámbrica. 73

Tabla 26. Datos de los nodos 76

Tabla 27. Componentes del nodo principal..... 77

Tabla 28. Componentes de los nodos secundarios..... 77

Tabla 29. Elementos de acceso en los invernaderos 78

Tabla 30. Requisitos para la selección de equipos..... 79

Tabla 31. Comparación técnica de equipos candidatos para estación base de la red PtMP..... 79

Tabla 32. Evaluación de cumplimiento para equipos AP/estación base PtMP..... 80

Tabla 33. Comparación técnica de equipos candidatos para nodos secundarios 81

Tabla 34. Evaluación de cumplimiento para equipos CPE de nodos secundarios. 82

Tabla 35. Distancias de los enlaces en km. 84

Tabla 36. Descripción de los criterios para el diseño de la red de fibra óptica..... 96

Tabla 37. Componentes del nodo principal de la solución de fibra óptica. 99

Tabla 38. Componentes de los nodos secundarios de la solución de fibra óptica. .. 100

Tabla 39. Requisitos mínimos para la selección de equipos..... 101

Tabla 40. Comparación de equipos candidatos para Gateway principal. 102

Tabla 41. Selección de Gateway principal 102

Tabla 42. Comparación de equipos candidatos para OLT principal 103

Tabla 43. Selección de OLT principal 103

Tabla 44. Comparación de equipos candidatos para switch principal 104

Tabla 45. Selección de switch principal 105

Tabla 46. Comparación de equipos candidatos para ONU/ONT GPON. 106

Tabla 47. Selección de ONU para nodos secundarios. 106

Tabla 48. Comparación de equipos candidatos para switch PoE. 107

Tabla 49. Selección de switch PoE. 108

Tabla 50. Comparación de equipos candidatos para AP WiFi 108

Tabla 51. Selección de AP. 109

Tabla 52. Elementos pasivos y accesorios de los nodos secundarios. 110

Tabla 53. Distancias entre enlaces de fibra óptica. 111

Tabla 54. Requisitos para la selección del mecanismo de acceso remoto seguro 123

Tabla 55. Comparación técnica de alternativas 124

Tabla 56. Selección del mecanismo de acceso remoto seguro 124

Tabla 57. Alternativas para equipo subnet router 126

Tabla 58. Escenarios definidos para la validación técnica 127

Tabla 59. Indicadores y criterios para la validación de red inalámbrica. 128

Tabla 60. los indicadores y criterios para la validación de red de fibra óptica. 128

Tabla 61. Escenarios considerados para la validación de la red inalámbrica 128

Tabla 62. Análisis de resultados de simulación en Radio Mobile 132

Tabla 63. Resultados de validación complementaria en UISP Design Center 134

Tabla 64. Elementos instalados para cada nodo..... 138

Tabla 65. Resultados de conectividad en el sistema de radio enlace 140

Tabla 66. Comparación entre throughput registrado y demanda de referencia 141

Tabla 67. Indicadores considerados para la validación de la red de fibra óptica..... 142

Tabla 68. Resultados de la simulación OptiSystem. 148

Tabla 69. Resultados proyectados..... 151

Tabla 70. Comparación de los escenarios de transmisión..... 152

Tabla 71. Comparación de las arquitecturas propuestas 153

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Internet de las Cosas en la agricultura 14

Figura 2. Arquitectura IoT 16

Figura 3. Descripción general del 5GS [42]..... 20

Figura 4. Satélite GEO [44]. 21

Figura 5. Enlace Punto a Punto [48]. 22

Figura 6. Enlace Punto-multipunto [49]..... 23

Figura 7. Arquitectura de la red de acceso FTTH con GPON [55]..... 24

Figura 8. Reqview 29

Figura 9. Vista satelital del caso de estudio y distribución general del área de producción florícola. Google Earth..... 39

Figura 10. Intensidad de señal de la red móvil 4G de Claro 40

Figura 11. Intensidad de señal de la red móvil 4G de CNT 40

Figura 12. Intensidad de señal de la red móvil 4G de Movistar 40

Figura 13. Diseño lógico de la arquitectura de red propuesta..... 70

Figura 14. Ubicación de la torre en el predio. Google Earth 73

Figura 15. Topología física de la red inalámbrica propuesta. 75

Figura 16. Distribución física de los nodos..... 76

Figura 17. Distancias de cada enlace. UISP Design 84

Figura 18. Ejemplo de la primera zona de Fresnel [76]. 85

Figura 19. Límites a las transmisiones de UDBL [73]..... 89

Figura 20. Uso de la herramienta AirView Spectrum Analizer [78,79]. 93

Figura 21. Ubicación del nodo principal. Plano en AutoCAD. 96

Figura 22. Topología física de la red de fibra óptica. 98

Figura 23. Distribución física de nodos de la red de fibra óptica. 99

Figura 24. Distancias de la ubicación de nodos secundarios. Google Earth..... 111

Figura 25. Cobertura local en 5 GHz con puntos de acceso. UniFi Design Center. 116

Figura 26. Velocidad de datos y cobertura 5GHz. UniFi Design Center..... 116

Figura 27. Arquitectura con integración de acceso remoto..... 126

Figura 28. Ubicación de los nodos en Radio Mobile 129

Figura 29. Simulación del enlace NP-N1 en Radio Mobile..... 130

Figura 30. Simulación del enlace NP-N2 en Radio Mobile..... 130

Figura 31.Simulación del enlace NP-N3 en Radio Mobile..... 131

Figura 32. Simulación del enlace NP-N4 en Radio Mobile..... 131

Figura 33. Simulación del enlace NP-N5 en Radio Mobile..... 132

Figura 34. Ubicación de los nodos en UISP Design Center 133

Figura 35. Simulación del enlace NP-N1 en UISP Design Center 133

Figura 36. Simulación del enlace NP-N2 en UISP Design Center 133

Figura 37. Simulación del enlace NP-N3 en UISP Design Center 134

Figura 38. Simulación del enlace NP-N4 en UISP Design Center 134

Figura 39. Simulación del enlace NP-N5 en UISP Design Center 134

Figura 40. Instalación del nodo principal o NP..... 137

Figura 41. Instalación del CPE..... 137

Figura 42. Configuración del direccionamiento IP de la antena receptora del nodo repetidor. 138

Figura 43. Prueba de conectividad hacia 192.168.10.8 mediante el enlace inalámbrico dedicado. 139

Figura 44. Prueba de velocidad mediante el enlace inalámbrico dedicado propuesto. 140

Figura 45. Simulación de la red de fibra óptica. OptiSystem 144

Figura 46. Configuración nodo principal. OptiSystem. 145

Figura 47. Configuración nodos secundarios..... 145

Figura 48. Diagramas del BER y ojo de los Nodos Secundarios. 146

Figura 49. Potencia recibida Nodo 1. 147

Figura 50. Potencia recibida Nodo 2. 147

Figura 51. Potencia recibida Nodo 3. 147

Figura 52. Potencia recibida Nodo 4. 148

Figura 53. Potencia recibida Nodo 5. 148

Figura 54. Montaje experimental para la validación de fibra óptica mediante OTDR. 149

Figura 55. Medición OTDR del escenario 1 con tramo aproximado de 2.01 km 150

Figura 56. Medición experimental de un tramo de fibra óptica de aproximadamente 978.43 m..... 150

Figura 57. Interfaz de caracterización del canal de fibra óptica. Python. 151

Figura 58. Precios supuestos de la empresa. 155

Figura 59. Precios de Borde WAN. 155

Figura 60. Escenarios de ingresos del MSP. 156

Figura 61. Parámetros considerados para el análisis de costos de inversión (CAPEX) de la florícola..... 157

Figura 62. Costos de inversión (CAPEX) para la empresa Artil Robotics 157

Figura 63. OPEX mensual de la florícola 158

Figura 64. Retorno de inversión de la florícola..... 159

Figura 65. Escenarios de retorno de inversión de la empresa Artil Robotics 159

Figura 66. Dashboard económico del diseño de red inalámbrica 160

Figura 67. CAPEX de fibra. 160

Figura 68. CAPEX de inversión de la empresa. 161

Figura 69. OPEX mensual de la florícola 161

Figura 70. ROI de la propuesta de fibra. 162

Figura 71. Escenarios de retorno de inversión de la empresa Artil Robotics. 163

Figura 72. Dashboard económico del diseño de red de fibra óptica. 163

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Encuestas aplicadas al técnico operativo para levantamiento de requerimientos de la propuesta. 175

Anexo B. Configuración de red punto multipunto en Radio Mobile 184

Anexo C. Formularios para sistema de radiocomunicaciones de ARCOTEL 190

Anexo D. Hoja técnica del Ubiquiti LiteAP GPS 195

Anexo E. Hoja técnica del Ubiquiti NanoStation 5AC Loco 197

Anexo F. Hoja técnica del NanoBeam 5AC Gen2 199

Anexo G. Configuración de nodos secundarios en OptiSystem. 201

Anexo H. Análisis completo del CAPEX de red interna de la florícola para la red inalambrica 202

Anexo I. Análisis completo del CAPEX de red interna de la florícola para la red óptica. 203

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo desarrolló una propuesta tecnológica de conectividad inteligente para el sector florícola rural, orientada al monitoreo remoto de variables agroproductivas mediante el diseño y evaluación de alternativas de comunicación. Para ello, se inició con el análisis de requisitos operacionales y de usuario, tomando como referencia la norma ISO/IEC/IEEE 29148 y utilizando Reqview para mantener la trazabilidad entre necesidades, criterios de evaluación y selección de tecnologías. Con base en este proceso se determinaron como alternativas viables la red inalámbrica punto-multipunto y la red de fibra óptica GPON.

Las arquitecturas propuestas se estructuraron con un nodo principal y cinco nodos secundarios para proporcionar conectividad a los invernaderos, robots de monitoreo, puntos de acceso inalámbrico y demás equipos de red. El diseño físico, la distribución de los nodos y el análisis de cobertura se realizaron mediante AutoCAD, Google Earth, Radio Mobile y UISP Design. La alternativa inalámbrica fue evaluada considerando la cobertura, el nivel de señal, la capacidad de transmisión y las condiciones de propagación. La red GPON fue simulada en OptiSystem para analizar el comportamiento de la señal óptica y verificar el funcionamiento de los enlaces propuestos.

Finalmente, se realizó un análisis tecnoeconómico mediante el análisis de los costos de inversión, operación, mantenimiento y recuperación del capital. Los resultados permitieron establecer que ambas propuestas son técnica y económicamente factibles para el monitoreo remoto florícola. La red inalámbrica presenta mayor flexibilidad y menor inversión inicial, mientras que la fibra óptica ofrece mayor estabilidad, capacidad y posibilidad de crecimiento.

Palabras claves: Conectividad inteligente, sector florícola, red inalámbrica, fibra óptica, monitoreo remoto, análisis económico, Artil Robotics.

ABSTRACT

This study developed a smart connectivity technological proposal for the rural floriculture sector, aimed at the remote monitoring of agro-productive variables through the design and evaluation of communication alternatives. To this end, the process began with an analysis of operational and user requirements, referencing the ISO/IEC/IEEE 29148 standard and utilizing Reqview to maintain traceability among needs, evaluation criteria, and technology selection. Based on this process, Point-to-Multipoint (PtMP) wireless networks and Gigabit Passive Optical Networks (GPON) were identified as viable alternatives.

The proposed architectures were structured with a primary node and five secondary nodes to provide connectivity to greenhouses, monitoring robots, wireless access points, and other network equipment. Physical design, node distribution, and coverage analysis were conducted using AutoCAD, Google Earth, Radio Mobile, and UISP Design. The wireless alternative was evaluated by considering coverage, signal strength, transmission capacity, and propagation conditions. The GPON network was simulated in OptiSystem to analyze optical signal behavior and verify the operation of the proposed links.

Finally, a techno-economic analysis was conducted by evaluating investment, operational, maintenance, and capital recovery costs. The results established that both proposals are technically and economically feasible for remote floricultural monitoring. The wireless network presents greater flexibility and a lower initial investment, whereas the fiber optic network offers superior stability, higher capacity, and greater scalability.

Keywords: Intelligent connectivity, floriculture sector, wireless network, fiber optics, remote monitoring, economic analysis, Artil Robotics.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

"PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA CONECTIVIDAD INTELIGENTE EN EL SECTOR FLORÍCOLA MEDIANTE SOLUCIONES DE REDES DE COMUNICACIÓN PARA MONITOREO REMOTO EN ZONAS RURALES PARA LA EMPRESA ARTIL ROBOTICS."

1.1.1 Planteamiento del problema

El acceso a conectividad digital en áreas rurales constituye un desafío persistente a nivel global, siendo un factor determinante para la adopción de tecnologías de agricultura inteligente. La digitalización del sector agrícola permite diseñar sistemas sostenibles mediante el uso de sensores, análisis de datos avanzados, automatización y herramientas tecnológicas [1]. En América Latina y el Caribe, alrededor del 43,4% de la población rural tiene acceso a conectividad internet, mientras que en las zonas urbanas esta cifra alcanza aproximadamente el 79%, lo que revela una importante brecha digital entre los entornos rurales y urbanos [2]. Esta disparidad demuestra que gran parte de la población rural carece de conectividad confiable, limitando la adopción de tecnologías digitales en las actividades agrícolas. En consecuencia, la implementación de soluciones como sistemas de monitoreo remoto, dispositivos de Internet de las cosas (IoT), plataformas de agricultura de precisión y procesos de producción automatizados, tienden a ser más complicados de aplicar en zonas rurales con baja conectividad, lo que impide la mejora en la productividad y la sostenibilidad en el sector agrícola.

En Ecuador, la floricultura se ha consolidado como un pilar económico estratégico, posicionándose en uno de los sectores no petroleros más relevantes, generando más de 65 mil empleos directos y 55 mil indirectos [3], siendo el tercer país exportador de flores a nivel mundial con cifras mayores a 1.000 millones de dólares en ventas durante el 2024 [4]. Entre 2015 y 2024, el sector ha contribuido significativamente al desarrollo socioeconómico del país, demostrando ser un motor productivo que requiere

innovación tecnológica constante para mantener su competitividad internacional [4]. Hoy en día, la producción agrícola moderna se apoya cada vez más en herramientas digitales: sensores de campo, sistemas de análisis de datos y plataformas de monitoreo que permiten tomar mejores decisiones y hacer un uso más eficiente de los recursos. No obstante, esto no avanza al mismo ritmo en todos los sectores. Las zonas rurales dedicadas a la floricultura enfrentan la falta de infraestructura tecnológica y de conectividad que les permita acceder a estas soluciones [5]. Esta situación es particularmente evidente en cantones florícolas de la Sierra Norte del Ecuador como Cayambe, donde la ausencia de soluciones de comunicación adecuadas limita el acceso de los productores a prácticas más innovadoras y sostenibles, afectando tanto la eficiencia operativa como los estándares de calidad de la producción [6].

Las alternativas tecnológicas disponibles hoy en día presentan importantes limitaciones, las que se describen a continuación [7], [8]:

- Las redes móviles 4G muestran cobertura irregular y baja estabilidad en áreas rurales;
- Los servicios satelitales, si bien ofrecen cobertura global, implican costos elevados para pequeños y medianos productores;
- Las redes LPWAN requieren integración con tecnologías de mayor capacidad para soportar la transmisión de datos de alta frecuencia

En el nivel operativo, los productores florícolas enfrentan dificultades críticas para garantizar la eficiencia y sostenibilidad de sus cultivos. La inestabilidad de la conectividad impide el monitoreo de variables esenciales como humedad del suelo, temperatura, radiación solar y riesgos fitosanitarios. Esta situación provoca pérdidas, aumento de costos operativos, mayor vulnerabilidad frente a plagas y enfermedades [5], [9]. Por tanto, el problema central identificado es la insuficiente disponibilidad y confiabilidad de la conectividad de internet en el sector florícola rural ecuatoriano, lo cual restringe la implementación de soluciones de monitoreo remoto y gestión digital de procesos productivos.

Las causas que originan esta problemática son múltiples. Por un lado, la infraestructura de fibra óptica es escasa en áreas rurales debido a los altos costos de despliegue. Por otro, las redes móviles presentan cobertura desigual y baja estabilidad en los territorios agrícolas, mientras que los servicios satelitales no resultan económicamente accesibles para los pequeños y medianos productores. Además, existe una carencia de criterios técnicos para la selección de tecnologías de última milla en zonas de topografía compleja, lo que lleva a implementaciones ineficientes o costosas. A esto se suma la falta de políticas públicas efectivas que promuevan la equidad digital en el sector rural [4].

Los efectos de esta problemática se reflejan directamente en la operación y competitividad del sector. La limitada conectividad impide la implementación de sistemas de monitoreo remoto, afecta la eficiencia en la gestión de los cultivos, lo cual reduce la competitividad internacional del sector y profundiza la brecha digital entre áreas urbanas y rurales [5], [9].

Por lo que Artil Robotics, una empresa que incursiona en sistemas de monitoreo e inventario por medio de visión artificial, han identificado que la implementación de sus soluciones se ve limitada por la ausencia de infraestructura para conectividad en entornos florícolas ya que el sistema requiere subir una gran carga de datos a la nube. Esta situación crea la necesidad de establecer un diseño viable de red en el área de los invernaderos para obtener conexión a internet. La presente investigación busca desarrollar un modelo de conectividad adaptable y costo-efectivo, que garantice la transmisión de datos mediante la tecnología más adecuada, donde se analizarán varias tecnologías tanto de borde WAN, de distribución o backhaul y de acceso, habilitando así un monitoreo remoto efectivo e introduciendo mejoras en el sector de producción en entornos de invernadero.

1.2 Antecedentes investigativos

En la presente investigación, se consideran tesis relacionados con el diseño, simulación e implementación de soluciones tecnológicas de conectividad. Se analiza documentación de los últimos cinco años, con el propósito de identificar los avances tecnológicos, enfoques metodológicos y resultados obtenidos. Los proyectos integran

fibra óptica, redes inalámbricas (PtP o PtMP), conectividad satelital y redes híbridas para mejorar la comunicación y gestión inteligente de cultivos en zonas con limitaciones de infraestructura.

En 2023, dentro del contexto ecuatoriano, Chela Auky [10] diseñó e implementó una red inalámbrica para proveer servicio de telecomunicaciones en Las Cochas, provincia de Bolívar, utilizando energía de paneles solares para alimentación del sitio remoto. La investigación empleó un enfoque cuantitativo experimental con metodología Top-Down para el diseño de red. Los instrumentos incluyeron el software Radio Mobile v11.6.7 para simulación de radioenlaces, PVsyst para dimensionamiento del sistema fotovoltaico, SPSS Statistics para validación estadística mediante pruebas ANOVA, y Speedtest.net para mediciones en campo. Los equipos usados fueron Mimosa C5x y Mikrotik mANTBox en una banda de operación de 5 GHz para el enlace inalámbrico punto a punto de 5,58 km. En los resultados se demostró velocidades de 223,54 Mbps en descarga y 246,4 Mbps en subida, con latencia de 117 ms y relación señal-ruido entre 51-56 dB. El análisis económico demostró factibilidad con un retorno de inversión de 0,9 años para 55 clientes a $22,34/mes, con costos totales de infraestructura de aproximadamente $13.300 USD. El sistema de alimentación fotovoltaico constó de 5 paneles de 150W con banco de baterías 12V/33Ah para operación 24/7. Dentro de estudio se concluye que la tecnología inalámbrica representa una alternativa eficaz, rápida y económica para el despliegue de servicios de banda ancha en ubicaciones remotas.

En 2025, Oña José [11] diseñó e implementó una red WISP (Wireless Internet Service Provider), para interconectar tres sectores en la parroquia Simiatug (Cochaloma, Cutahua y Mindina). La investigación empleó un enfoque práctico e iterativo con metodología de estudio técnico de campo y diseño Top-Down para la planificación de red. Las herramientas empleadas incluyeron el software Google Earth en la parte de georreferenciación, Radio Mobile v11.6.7 para la simulación de radioenlaces y validación de zonas de Fresnel y Winbox 3.41 con la plataforma de Mimosa Cloud para la configuración y monitoreo remoto de equipos. Los equipos utilizados fueron radios Mimosa C5x (4.9-6.4 GHz, MIMO 2x2, hasta 700 Mbps), antenas direccionales RocketDish RD-5G30 (30 dBi) y routers MikroTik RB4011iGS+RM (nodo principal) y RB750Gr3 (nodos secundarios) con RouterOS v7.17.1, operando en banda 5GHz

para enlaces punto a punto (PtP) con distancias de 1.89 km, 7.05 km y 3.18 km respectivamente. En los resultados se demostró una tasa de transferencia superior a 500 Mbps en los enlaces PtP, con latencias hacia servidores DNS de Google de 14 ms en el nodo de 1-3 ms y relación señal-ruido adecuada en todos los enlaces. El análisis de viabilidad evidenció la factibilidad técnica al validar la línea de vista y presupuesto del enlace y se determina que la tecnología inalámbrica WISP es escalable y económicamente viable para el despliegue de servicios de banda ancha en zonas rurales montañosas.

En el año 2025, Guncay Lauro [12], desarrolló una investigación en la cual se analizó, diseñó e implementó un proveedor de servicios de internet inalámbrico (WISP) para la conectividad en comunidades rurales por medio de radioenlaces. El estudio planteó una metodología aplicada basada en revisión bibliográfica, simulación y pruebas, usando herramientas como Google Earth, UISP Design y equipos de las plataformas MikroTik y Ubiquiti para el diseño, configuración y validación de la red. Los resultados técnicos demostraron que para la tecnología airMAX AC 2x2 se espera una de 94 Mbps en 20 MHz, 188 Mbps en 40 MHz, 376 Mbps en 80 MHz y 752 Mbps en 160 MHz, con una tasa de éxito del 96 %. Además, en el ancho de banda de canal de 40 MHz hubo una capacidad de 154,6 Mbps para 30 CPE con planes de 20 Mbps, y en el enlace punto a punto tuvo una capacidad superior a 550 Mbps en un tramo de 500 m. En el aspecto económico se proyectaron 122 clientes con una necesidad de 281 Mbps contratados con un ROI de 187.97% y una TIR de 18.85%, con lo cual demostró viabilidad técnica y económica del proyecto.

Román Pino, en 2025 [13], desarrolló el proyecto titulado “Diseño e implementación de una red inalámbrica mesh alimentada con energía solar para proporcionar acceso a internet en la comunidad rural Normita del cantón La Troncal”, el objetivo de la investigación fue el diseño e implementación de una infraestructura de conectividad que permita brindar acceso a internet en una comunidad rural con limitaciones de cobertura por medio de una red inalámbrica en malla (Wireless Mesh Network) complementada con un sistema de alimentación basado en energía solar, con el propósito de garantizar el continuo funcionamiento del sistema en zonas con acceso restringido a la red eléctrica convencional. El estudio se desarrolló con un enfoque aplicado, con el diagnóstico del entorno geográfico y social de la comunidad,

identificación de barreras de conectividad y observación directa y el análisis técnico del diseño de radioenlaces punto a punto y la arquitectura de red propuesta. Para el levantamiento social se encuestó a 11 jefes de hogar, equivalente al total de la población. Los resultados evidenciaron que el 54.5% no tenían acceso a internet en sus hogares mientras que el 45.5% de las familias sí contaban con algún tipo de conexión, además, el 90.9% manifestó que es esencial para la educación. En los resultados el enlace alcanzó una distancia de 11,78 km y el secundario 19,89 km. En las pruebas reales, el enlace principal alcanzó 118,53 Mbps de descarga, 101,43 Mbps de subida, 7,34 ms de latencia y 0 % de pérdida de paquetes, mientras que el enlace secundario logró 108,45 Mbps de descarga, 117,62 Mbps de subida, 1,71 ms de latencia y 0 % de pérdida. En la red de acceso, los clientes piloto tuvieron señales de -46 dBm y -43 dBm, y los planes simétricos de 10 Mbps y 15 Mbps entregaron valores cercanos a los configurados. El sistema de respaldo energético, integrado por un módulo fotovoltaico de 435 Wp y un banco de baterías de 12 V y 36 Ah, tuvo un tiempo de funcionamiento autónomo de 7,2 horas. En la última encuesta aplicada el 100% de la población manifestó que la nueva conexión mejoró la situación previa.

En el trabajo de Rivera Jordán Christian Vladimir [14], en la Universidad Técnica de Ambato, desarrolló el proyecto de investigación “Evaluación georreferenciada del rendimiento de la tecnología Starlink en zonas rurales con brecha digital en la provincia de Tungurahua, Ecuador”, analizó el desempeño de los servicios de internet satelital de órbita baja como alternativa para mejorar la conectividad en zonas rurales. El estudio en el diagnóstico previo evidenció que solo el 38% de los hogares rurales dispone de acceso a internet y el 19.2% de las parroquias no cuenta con fibra óptica, mientras que las tecnologías terrestres típicas alcanzan de 1 a 5 Mbps y latencias iguales o superiores a 50 ms. Las pruebas de Starlink mostraron resultados favorables en varios puntos rurales, con velocidades de descarga de 115,0 Mbps en La Quigo, 145,0 Mbps en Salasaca, 130,0 Mbps en Teligote y 140,0 Mbps en El Rosario, así como velocidades de carga de 15,5 Mbps, 18,5 Mbps, 16,0 Mbps y 17,5 Mbps, respectivamente. En cuanto a latencia, se registraron valores de 44 ms en La Quigo, 34 ms en Salasaca, 39 ms en Teligote y 37 ms en El Rosario; además, el jitter promedio fue de 15,0 ms, 8,0 ms, 11,0 ms y 9,0 ms en esos mismos puntos, manteniéndose dentro del valor recomendado de 30 ms para servicios en tiempo real. No obstante, también

se identificaron puntos con desempeño deficiente, como Pondoa, donde solo se obtuvieron 1,8 Mbps de descarga, 0,4 Mbps de carga y 210 ms de latencia, y San Miguelito, con 85,0 Mbps de descarga, 7,5 Mbps de carga, 64 ms de ping y 35,0 ms de jitter. Estos resultados determinaron que Starlink es una potencial tecnología capaz de reducir la brecha digital en zonas rurales, evidenciando que los sistemas satelitales de órbita baja constituyen una alternativa viable para brindar acceso a internet en áreas con limitaciones técnicas y geográficas.

En 2026, Pantoja María [15] desarrolló un estudio de factibilidad técnica y económica orientado a la implementación de una red híbrida que combina radioenlace y fibra óptica GPON FTTH en la parroquia rural La Merced de Buenos Aires, cantón Urcuquí, provincia de Imbabura, para la empresa ProFyber. El trabajo inicia con de un diagnóstico de las condiciones de conectividad del sector, considerando factores geográficos, demográficos y de disponibilidad del servicio de internet. La metodología empleada integró encuestas aplicadas a 178 habitantes, análisis de cobertura existente y simulaciones técnicas mediante herramientas especializadas como Google Earth para el estudio topográfico, Radio Mobile y AirLink Ubiquiti para los radioenlaces, OptiSystem para la red óptica, y RedFTTH para el diseño de la red de distribución. La solución propuesta contempló tres segmentos de radioenlace en la banda de 5,8 GHz el primer enlace de 9,05 km, el segundo de 8,93 km y el ultimo de 7,64 km, integrados a una red de acceso FTTH GPON compuesta por una OLT Ubiquiti UF-OLT, ONT Huawei EchoLife EG8145V5, fibra ADSS y drop, cajas NAP y divisores ópticos en dos niveles de splitting de 1:4 y 1:16, con una proyección de hasta 256 usuarios. Los resultados de simulación mostraron potencias recibidas en los radioenlaces de entre -76.6 dBm y -65 dBm con Radio Mobile, y entre -64 dBm y -62 dBm con AirLink Ubiquiti, mientras que en la red FTTH GPON se registraron valores de -21,757 dBm y -21,835 dBm para los usuarios más cercano y lejano respectivamente, todos dentro de los márgenes operativos admisibles. Respecto al análisis económico, la inversión total estimada fue de $30.014,56 USD, abarcando equipos activos y pasivos, instalación y costos de operación y mantenimiento. La evaluación financiera a cinco años, con un inicio de 60 usuarios y un crecimiento proyectado hasta 230, arrojó un valor actual neto de $46.727,5 USD y una Tasa Interna de Retorno del 38 %, lo que confirman la rentabilidad del proyecto.

A partir de los antecedentes revisados, se evidencia que la conectividad rural constituye un problema recurrente en distintos contextos geográficos. Las soluciones propuestas en estudios previos incluyen radioenlaces, redes inalámbricas con energía solar, sistemas satelitales y arquitecturas híbridas que combinan fibra óptica con tecnologías inalámbricas. Aunque cada investigación responde a condiciones particulares, todas coinciden en la importancia de validar el desempeño de la red mediante parámetros técnicos como velocidad de transmisión, latencia, cobertura, estabilidad y disponibilidad del servicio.

Estos aportes sirven como referencia para el presente trabajo, ya que permiten adoptar criterios de evaluación aplicables al sector florícola rural. En este entorno, la conectividad no solo permite el acceso a Internet, sino que soporta procesos de monitoreo remoto basados en la transmisión de datos, imágenes y video. Por ello, los antecedentes analizados respaldan la necesidad de diseñar una arquitectura de conectividad que considere tanto la viabilidad técnica como la calidad del servicio requerida para aplicaciones agrícolas.

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Conectividad en entornos rurales

La conectividad en zonas rurales se define al conjunto de infraestructura, tecnologías, y capacidad tecnológica necesarias para proporcionar servicios de telecomunicaciones confiables y de alta velocidad en áreas geográficamente remotas o de baja densidad poblacional y limitada infraestructura tecnológica [16].

a. Brecha digital en zonas rurales

La conectividad en zonas rurales continúa siendo afectada por limitaciones en aspectos técnicos, económicos, sociales y normativos que dificultan el despliegue y la sostenibilidad de las redes de telecomunicaciones. La ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) señala que en áreas rurales y remotas la conectividad significativa enfrenta una serie de problemas mutuamente interrelacionados. El informe global de conectividad revela que la cantidad de usuarios de Internet en zonas

urbanas duplica a la de las zonas rurales, en varios países en desarrollo las áreas rurales aún dependen de la red 3G, cuando la conectividad significativa requiere al menos 4G [17–19].

b. Factores geográficos

La ubicación geográfica influye de manera directa en el diseño de la red, debido a la dispersión poblacional, tipografía irregular, vegetación y la distancia entre puntos de servicio aumentan la complejidad del acceso y del backhaul. En este escenario, el plan de conectividad en áreas remotas no depende solo de la cobertura nominal, sino también de la capacidad de la tecnología para ofrecer un servicio de calidad [18,19].

c. Factores económicos

El despliegue de infraestructura de telecomunicaciones en áreas rurales enfrenta importantes obstáculos relacionados con el costo adicional de cobertura. La normativa internacional, establecida por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), sugiere que la ampliación de la red es un mecanismo esencial para cerrar las brechas digitales. La aplicación real de soluciones de banda ancha fija puede resultar limitante debido a su complejidad y alto costo de instalación. Por lo tanto, en el ámbito de la ingeniería en redes, la tecnología móvil aparece como la opción más escalable y económicamente viable para establecer la conectividad base. Esto facilita una implementación más ágil ante las limitaciones geográficas y económicas en áreas rurales [18,19].

d. Importancia de la conectividad rural

La conectividad en zonas rurales no se limita al acceso a internet, sino también es un factor esencial para productividad, la inclusión y digitalización de actividades económicas. En el sector agrícola, la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) enfatiza que las tecnologías digitales pueden revolucionar la producción agrícola, mientras que la Unión Internacional de Telecomunicaciones relaciona la conectividad significativa con el uso práctico y efectivo de los servicios digitales en el ámbito económico y social [17–20].

e. Impacto en el desarrollo productivo

Una conectividad fiable facilita el intercambio de información operativa, implementar monitoreo remoto, automatización de procesos y el acceso a servicios de análisis y gestión. En áreas rurales de producción, esto se refleja en una mayor capacidad de supervisión, respuesta y automatización de recursos, especialmente cuando las operaciones requieren información concisa de sensores, plataformas o sistemas de apoyo a la toma de decisiones [20,21].

f. Impacto en el sector agrícola

En la agricultura, la conectividad facilita la incorporación de agricultura de precisión, automatización, sensorización, robótica y análisis de imágenes. Organismos como la FAO y estudios académicos afirman que estas tecnologías aumentan la eficiencia, sostenibilidad y productividad, siempre que exista una infraestructura que pueda transmitir información desde el campo hacia plataformas de procesamiento o monitoreo [20,22].

1.3.2 Conectividad significativa

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), este concepto es usado en estudios a cerca de inclusión digital para describir el acceso a internet que no posee las condiciones necesarias para que exista cobertura para que los usuarios aprovechen los servicios digitales. La conectividad significativa es la evolución de los indicadores tradicionales de acceso a Internet, los cuales únicamente consideran la disponibilidad de conexión, sin evaluar si dicha conexión permite realizar actividades digitales de manera efectiva. Esto no solo garantiza el acceso físico a la red, sino también la disponibilidad de dispositivos, datos y velocidad de conexión adecuados para el desarrollo socioeconómico [16].

a. Acceso a infraestructura de red

El principal componente de la conectividad significativa es la infraestructura de telecomunicaciones disponible. La Unión Internacional de Telecomunicaciones destaca que todavía existen diferencias significativas en la disponibilidad y calidad de

la red entre zonas rurales y urbanas. Esto significa que la presencia de señal no garantiza un servicio adecuado para aplicaciones exigentes de video, automatización y monitoreo [18,19].

b. Calidad de servicio

La calidad del servicio determina si la infraestructura puede sostener aplicaciones reales. Cisco define QoS (calidad del servicio) como la capacidad de una red para ofrecer servicios medibles y predecibles, gestionando variables como retardo, variación del retardo, ancho de banda y pérdida de paquetes. Por tanto, la conectividad significativa debe incorporar estos parámetros cuando se analizan soluciones de comunicación para entornos rurales [23].

c. Indicadores de conectividad

Los indicadores técnicos más utilizados para caracterizar una red son el ancho de banda, latencia, la variación de retardo, la pérdida de paquetes y fiabilidad. En redes que transportan datos se sensorización, imágenes y video, estos parámetros condicionan de forma directa la experiencia, confiabilidad y viabilidad de la aplicación [24,25].

- ***Ancho de banda***

Es la máxima velocidad de transferencia de datos entre los dos extremos de la red. Este límite esta dado por la infraestructura física de los enlaces (es la cota superior) y los flujos procedentes de otros nodos origen-destino que comparten algunos de los enlaces de la ruta en cuestión [26].

- ***Latencia***

Es el tiempo en que toman los paquetes en viajar a través de la red. La demora tiene dos componentes: fijos y variables [26], estos componentes se los describen como:

  - **Demora fija:** Es la demora predecible asociada con la preparación y encapsulación de los datos, transmisión de estos en el cable y el viaje hacia el receptor [26].

- **Demora variable:** Es impredecible que resultan de un paquete esperando por otro tráfico que está en cola en la interfaz que va a enviar. Si hay bastantes paquetes y estos son grandes entonces la demora se incrementará [26].

- ***Variación de retardo (Jitter)***

Es la variación en la demora experimentada por los paquetes en la red puede manifestarse a través de variaciones en la amplitud, intensidad de la señal, y otros elementos de estas transmisiones. Esto significa que los paquetes en el receptor tendrán una demora distinta de la que hubo en el emisor. Esto podría no notarse en transmisiones de archivos, pero en el caso de voz podría causar silencios donde no deberían existir [26].

- ***Pérdida de paquetes***

En una red es causada por la congestión en el tráfico de la red, este efecto difiere por el tipo de aplicación que se usa. Por ejemplo, en el caso de pérdida de múltiples paquetes de transmisión de voz causará que el mensaje sea ininteligible; o en el caso de un envío de un archivo, a través de un servicio de TCP tal como FTP, la pérdida de paquetes causarán que dichos paquetes sean retransmitidos, amplificando la congestión y consumiendo más ancho de banda debido a esta congestión [26].

- ***Fiabilidad:***

Se concibe como una propiedad del sistema de transmisión en su conjunto. En este caso se puede considerar como la tasa media de error en la red. Diversos factores pueden afectar a la fiabilidad: routers mal configurados o de bajas prestaciones que pueden alterar el orden de recepción de los paquetes en destino o provocar pérdidas de aquellos [26].

1.3.3 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es la tendencia que viene marcando la pauta en lo referente a la maximización de los recursos para el cultivo de todo tipo de especies comestibles, permitiéndonos controlar el uso óptimo de recursos como el agua y fertilizantes,

implementar los ambientes más propicios, lograr el mayor tamaño o la mayor cantidad de producción, etc [27].

a. Tecnologías utilizadas

En la agricultura de precisión y la agricultura inteligente, destacan las tecnologías que integran sensores, redes de sensorización inalámbrica, Internet de las cosas (IoT), sistemas de georreferenciación, plataformas de análisis de datos, automatización, visión artificial y comunicaciones inalámbricas. Estas tecnologías permiten capturar, transmitir, procesar y utilizar información acerca del cultivo agrícola y la toma de decisiones [28–30].

b. Beneficios en la producción agrícola

De los beneficios en la producción agrícola, uno de los principales es la optimización del uso de agua, fertilizantes e insumos, el incremento de la eficiencia operativa y la mejora del monitoreo. Esto facilita la toma de decisiones oportunas teniendo un potencial aumento en la productividad agrícola [31–33].

c. Agricultura inteligente

La agricultura inteligente se ha consolidado como una tendencia influyente que impulsa el desarrollo agrícola mediante la implementación de sistemas de información, generando eficiencias en costos operativos para incrementar los márgenes en la producción agrícola [34].

d. Digitalización de procesos agrícolas

La digitalización implica convertir variables y eventos del proceso agrícola en datos accesibles para supervisión, análisis y trazabilidad. La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) sostiene que las tecnologías digitales juegan un papel crítico en la transformación de la producción agrícola. El valor de esa digitalización depende de la capacidad de capturar, transmitir y procesar información de campo [20].

e. ***Automatización del monitoreo agrícola***

La automatización del monitoreo agrícola puede entenderse como la medición, control y transmisión remota de variables del entorno de cultivo mediante sensores, dispositivos electrónicos y tecnologías IoT. De este modo, se busca que los datos sean enviados inalámbricamente a un servidor para apoyar el seguimiento continuo y la gestión del sistema productivo [35].

1.3.4 Internet de las Cosas (IoT) en agricultura

El IoT (Internet of Things), es un término que se utiliza para describir el futuro de la tecnología ya que este se extiende a objetos, sensores y dispositivos que la gente usa todos los días. La conectividad de estos dispositivos es la base para el desarrollo independiente de aplicaciones y servicios colaborativos [36]. En el ámbito de la agricultura inteligente, se centra en la integración de sensores, tecnologías inalámbricas, microcontroladores y plataformas de procesamiento para que el monitoreo sea continuo y escalable [35].

Figura 1. Internet de las Cosas en la agricultura

a. Sensores y dispositivos conectados

Los sensores constituyen la capa física del IoT agrícola y generan datos sobre variables como temperatura, humedad, radiación, estado del cultivo o posición de equipos. La

literatura sobre smart agriculture destaca que el ecosistema suele apoyarse en nodos de adquisición, microcontroladores como Arduino y plataformas de procesamiento o almacenamiento como Raspberry Pi y servicios en la nube [22].

b. Plataformas de gestión de datos

Una arquitectura IoT requiere plataformas para almacenar, visualizar y analizar la información adquirida. Estas plataformas pueden residir en el borde, en la nube o en una arquitectura híbrida, su principal función es transformar los datos en información útil para la toma de decisiones operativas [22].

c. Arquitectura IoT

La arquitectura IoT en agricultura suele organizarse en capas: dispositivos de adquisición, red de comunicación y nivel de procesamiento o aplicación. Las revisiones especializadas en smart agriculture coinciden en que esta estructura permite integrar dispositivos, tecnologías de transmisión y plataformas de análisis dentro de un mismo flujo funcional [22].

d. Capa de dispositivos

Esta capa incluye sensores, cámaras, robots, estaciones de medición y nodos electrónicos que generan información primaria del entorno. Su diseño depende del tipo de variable observada y del nivel de detalle requerido por la aplicación agrícola [22].

e. Capa de comunicación

La capa de comunicación enlaza el dispositivo con el sistema de procesamiento mediante Wi-Fi, ZigBee, LoRa, NB-IoT, redes celulares u otros medios. La elección de la tecnología depende del alcance, consumo energético, volumen de datos y topología de la aplicación [22].

f. Capa de procesamiento

Aquí se ejecuta el almacenamiento, análisis, visualización y soporte a la toma de decisiones. Según NIST, el procesamiento puede desplegarse en nube, fog o Edge,

dependiendo de la proximidad requerida con la fuente de datos y de las exigencias de la latencia [37,38].

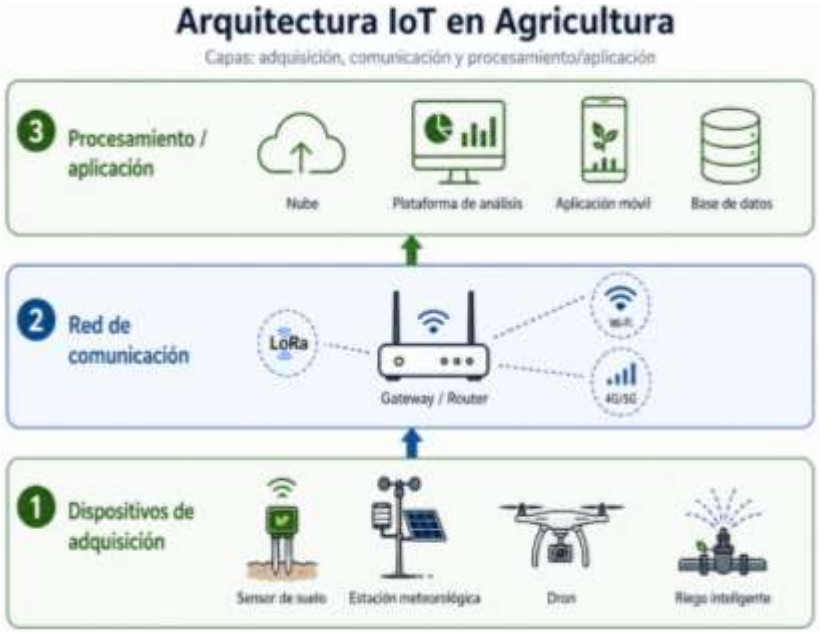


Figura 2. Arquitectura IoT

1.3.5 Sistemas de monitoreo agrícola

a. Monitoreo de cultivos

El monitoreo agrícola busca observar de forma sistemática el estado del cultivo, su entorno y su evolución, apoyándose en sensores, imágenes, plataformas remotas y análisis de datos. La revisión reciente sobre visión y monitoreo en agricultura destaca que estas tecnologías permiten observar el ciclo del cultivo con mayor detalle y frecuencia que los métodos manuales tradicionales [39].

b. Sensores ambientales

Dentro de los sistemas de monitoreo agrícola, los sensores ambientales cumplen un papel fundamental al registrar de forma continua variables del microclima y del entorno productivo, entre ellas la temperatura, la humedad y otras condiciones físicas relevantes para el cultivo. La utilidad de estos dispositivos va más allá de la medición, pues los datos que generan conforman series temporales para el seguimiento del

proceso como para la configuración de alertas y el análisis del comportamiento de las variables, ya sea en tiempo real o de manera diferida [22,39].

c. Sistemas de captura de imágenes

La captura de imágenes complementa el monitoreo ambiental al incorporar información visual del cultivo. En agricultura de precisión, los sistemas de visión se usan para seguimiento de crecimiento, evaluación fenológica, detección de estrés y otras tareas de observación automatizada [39].

d. Robótica agrícola

La robótica agrícola integra movilidad, percepción, sensorización y automatización para ejecutar tareas repetitivas o de observación en campo. La FAO y la literatura de smart agriculture reconocen a la robótica como una de las tecnologías clave de la agricultura digital avanzada [20,21,39].

e. Robots de monitoreo

Los robots de monitoreo se emplean para recorrer parcelas o invernaderos y capturar datos de sensores y cámaras en forma autónoma o semiautónoma. Su utilidad crece cuando la observación manual es costosa, lenta o insuficiente para obtener series de datos frecuentes y georreferenciadas [21,39].

f. Análisis fenológico

El análisis fenológico estudia etapas de crecimiento y desarrollo del cultivo, y puede automatizarse mediante imágenes y algoritmos de visión. Los sistemas vision-based aplicados a agricultura permiten extraer información relacionada con estado, crecimiento y atributos visibles de las plantas [39].

1.3.6 Sistemas de visión artificial en agricultura

a. Captura de imágenes agrícolas

La visión artificial agrícola parte de la adquisición de imágenes o video para representar visualmente el estado del cultivo. Su valor reside en que permite

transformar información visual en variables cuantificables y, por tanto, integrables a sistemas de monitoreo y apoyo a decisiones [39].

b. Cámaras de alta resolución

Las cámaras de alta resolución incrementan el detalle espacial disponible en cada escena, mejorando la posibilidad de identificar atributos finos del cultivo. Sin embargo, a mayor nivel de detalle más aumenta el volumen de datos a transportar y procesar, por consecuente, se debe analizar si es la capacidad de red y de cómputo es apta para su adopción [39].

c. Sistemas de adquisición de imágenes

Un sistema de adquisición de imágenes puede entenderse como el conjunto de hardware encargado de captar la imagen, integrado por elementos como la fuente de iluminación, el dispositivo de captura y la estructura o mecanismo de posicionamiento, cuya función es obtener imágenes adecuadas para su posterior procesamiento digital [40].

d. Procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes en agricultura transforma datos visuales en características o decisiones mediante algoritmos clásicos o modelos de aprendizaje. Las revisiones recientes muestran que estas técnicas se emplean en múltiples fases del ciclo agrícola y son una base central de los sistemas de visión inteligente [39].

e. Identificación de cultivos

La identificación visual permite diferenciar objetos, estructuras vegetales o estados del cultivo en función de patrones observables. En sistemas agrícolas, esta capacidad es útil para seguimiento de desarrollo, conteo, clasificación y diagnóstico visual [39].

f. Análisis de crecimiento vegetal

El análisis de crecimiento a partir de imágenes permite estimar cambios en tamaño, estructura o estado fenológico del cultivo. Esto resulta especialmente valioso cuando

se requiere seguimiento periódico y no invasivo en entornos controlados como invernaderos [39].

1.3.7 Arquitecturas de procesamiento de datos

a. Edge Computing

El edge computing acerca el procesamiento al lugar donde se generan los datos. NIST ubica el edge entre los dispositivos y la nube, y destaca que esta aproximación reduce la necesidad de enviar todo el tráfico al centro de datos, lo que resulta especialmente útil en aplicaciones con restricciones de latencia o conectividad intermitente [41].

b. Procesamiento local de datos

El procesamiento local permite filtrar, resumir, comprimir o priorizar información antes de transmitirla. En aplicaciones agrícolas, este enfoque reduce la carga sobre la red cuando los dispositivos generan grandes volúmenes de imágenes, video o telemetría [41].

c. Reducción de latencia

Al ejecutar parte del procesamiento cerca de la fuente, la latencia de extremo a extremo disminuye respecto a una arquitectura exclusivamente cloud. Esta característica vuelve al edge adecuado para monitoreo continuo, alarmas o preprocesamiento de datos visuales en campo [41].

1.3.8 Tecnologías de comunicación para zonas rurales

a. Redes móviles celulares

Las redes móviles constituyen una de las alternativas más viables para brindar acceso de banda ancha en zonas rurales, debido a su flexibilidad y menor costo relativo frente a muchas soluciones fijas. La Unió Internacional de Telecomunicaciones indica que la banda ancha móvil suele ser más accesible y que gran parte de la población depende de ella para conectarse, aunque en varias áreas rurales el nivel de red disponible aún no alcanza el requerido para conectividad significativa [17,19].

b. Arquitectura de redes móviles

La arquitectura de red móvil integra interfaz radio, núcleo de red, control de movilidad, señalización y provisión de servicios. 3GPP remarca que los estándares móviles abarcan no solo la interfaz aérea, sino también los protocolos e interfaces que habilitan el sistema completo de telecomunicaciones [42].

Figura 3. Descripción general del 5GS [42].

c. Tecnologías 4G y 5G

4G LTE representa una evolución de banda ancha móvil ampliamente desplegada, mientras que 5G introduce una arquitectura más flexible y preparada para mayor capacidad, nuevos servicios y diversos casos de uso. 3GPP señala que 5G fue definido desde Release 15 y que su especificación cubre el sistema completo, permitiendo operación interoperable entre operadores y fabricantes [42].

d. Internet Satelital

El Internet satelital es una alternativa especialmente relevante en zonas remotas donde el despliegue terrestre resulta costoso o inviable. Las arquitecturas actuales combinan satélites GEO, MEO y LEO, y la evolución reciente apunta a una integración cada vez mayor con redes terrestres [43].

e. Satélite GEO

Los satélites geoestacionarios están colocados en órbita circular en el plan del ecuador de la Tierra. Más técnicamente, a órbita geoestacionaria es una órbita prograda circular en el plano ecuatorial con un período orbital igual a 24 h. El posicionamiento del satélite está a una altitud de 35.786 km, el período orbital coincide exactamente con la

rotación de la Tierra, por lo que el satélite aparece fijo en un punto del ecuador de la Tierra y, por lo tanto, parece permanecer estacionario en el mismo punto. Un satélite geoestacionario completa una revolución orbital en órbita circular, alrededor de la Tierra, cada 24h. La desventaja de un satélite GEO en sistemas de comunicación de voz es el retraso de ida y vuelta de aproximadamente 250 ms debido a la enorme distancia Tierra-satélite-Tierra [44].

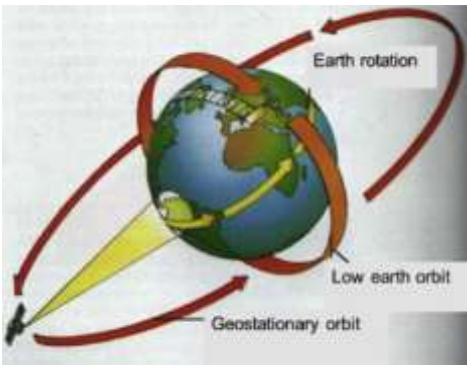


Figura 4. Satélite GEO [44].

f. Satélite LEO

Dentro de la categoría de satélites, los denominados LEO (Low Earth Orbit) operan en una banda altitudinal que va desde los 160 hasta los 2.000 kilómetros de altura respecto a la superficie terrestre, y son utilizados principalmente en aplicaciones de telecomunicaciones y monitoreo. Lo que los distingue de otras arquitecturas satelitales es su relativa proximidad al planeta, condición que reduce el trayecto que deben cubrir las ondas electromagnéticas y, como consecuencia directa, mejora la calidad del enlace en términos de latencia y ancho de banda disponible [45].

g. Redes inalámbricas terrestres

Una red inalámbrica terrestre se define como un sistema de comunicaciones de datos que permite la transmisión de información a través de ondas electromagnéticas mediante el aire. Utiliza una infraestructura situada exclusivamente en la superficie de la Tierra (como antenas, estaciones base y puntos de acceso) en lugar de satélites [46].

h. Enlaces Punto a Punto (PtP)

Un enlace punto a punto constituye una forma de comunicación en red donde dos equipos quedan conectados de manera exclusiva entre sí, sin necesidad de pasar por nodos intermedios que intervengan en la transmisión. Esta característica lo diferencia de otras configuraciones de red más complejas, ya que el intercambio de datos ocurre de extremo a extremo sin la participación de dispositivos adicionales como switches o routers. Dependiendo del contexto y los requerimientos del proyecto, este tipo de enlace puede materializarse mediante distintos medios físicos o inalámbricos, entre ellos la fibra óptica, las líneas telefónicas, los sistemas satelitales o las conexiones WiFi en configuración punto a punto [47].

Figura 5. Enlace Punto a Punto [48].

i. Enlaces Punto-multipunto

Los enlaces punto–multipunto permiten crear zonas de cobertura inalámbrica capaces de conectar varios puntos remotos con una estación central, facilitando la transmisión de datos, voz y video dentro de una misma infraestructura de red. Este tipo de enlace se utiliza comúnmente para interconectar sucursales, compartir información entre sedes, acceder a bases de datos centralizadas o distribuir el servicio de Internet hacia diferentes ubicaciones.

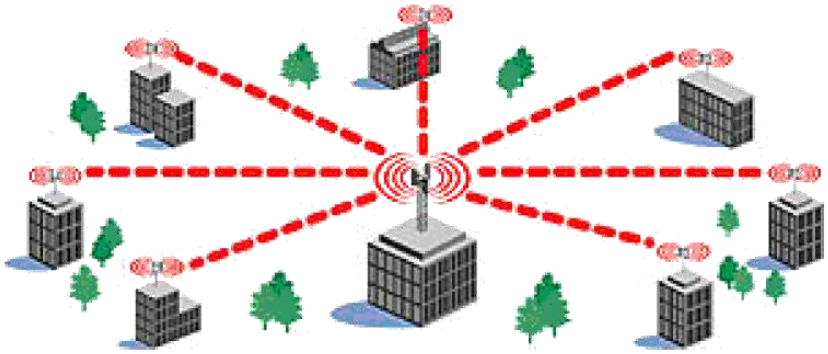


Figura 6. Enlace Punto-multipunto [49].

j. Redes WISP

Los proveedores de servicios de Internet inalámbricos (WISP) ofrecen acceso a Internet mediante tecnologías inalámbricas, en lugar de conexiones cableadas tradicionales como fibra o cable. A menudo prestan servicios en zonas rurales, desatendidas o de difícil acceso transmitiendo datos a través de señales de radio desde las torres a las ubicaciones de los clientes. Los WISP generalmente funcionan mediante sistemas inalámbricos fijos, donde una antena en el sitio del cliente se comunica con una estación base conectada a la red troncal de Internet. Este enfoque permite que las empresas y los hogares sin una infraestructura cableada sólida obtengan conectividad a Internet confiable [50].

k. Redes de fibra óptica

Una red de fibra óptica es un sistema de comunicación que utiliza finas hebras de vidrio o plástico, conocidas como fibras ópticas, para transmitir datos en forma de pulsos de luz. Estas redes están diseñadas para transportar grandes cantidades de datos a velocidades increíblemente altas a largas distancias, lo que las hace ideales para Infraestructura de Internet moderna. Las redes de fibra óptica ofrecen una transmisión de datos más rápida en comparación con los cables de cobre tradicionales, con mayor confiabilidad y capacidad de ancho de banda. Debido a que los datos se transfieren mediante luz, fibra óptica. Las redes son menos susceptibles a interferencias y degradación, lo que garantiza una conexión estable y de alta calidad [51].

l. Red troncal

Un enlace troncal de fibra óptica es una conexión principal que transporta grandes volúmenes de datos entre nodos críticos de una red, formando la columna vertebral de la infraestructura de comunicaciones. Funciona mediante fibra óptica monomodo, diseñada para minimizar la pérdida de señal y la dispersión a lo largo de largas distancias. Además, estos enlaces suelen incorporar tecnologías de multiplexación, como DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), que permiten transmitir múltiples canales de datos simultáneamente por la misma fibra, maximizando la capacidad sin necesidad de instalar más cables [52].

m. Redes FTTH/PON

Una red FTTH/PON es una red de acceso óptica en la que la fibra se extiende hasta el hogar del usuario (Fiber To The Home) y se apoya en una red óptica pasiva (Passive Optical Network), caracterizada por una arquitectura punto–multipunto que utiliza elementos pasivos en la red de distribución óptica, como divisores o splitters, para compartir la señal entre varios abonados [53,54].

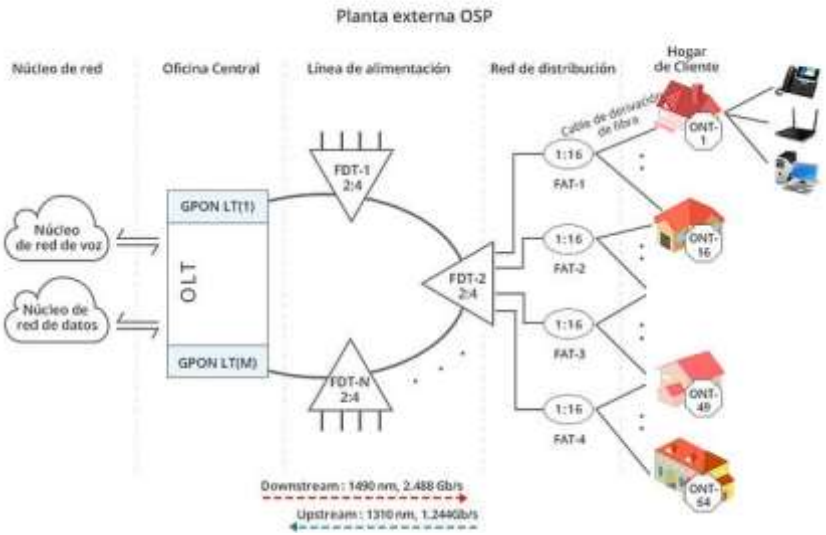


Figura 7. Arquitectura de la red de acceso FTTH con GPON [55].

1.3.9 Comparación de tecnologías de conectividad

a. Parámetros técnicos de evaluación

Existen parámetros medibles entre las tecnologías de comunicación para hacer una comparación entre ellas, como es el ancho de banda, la latencia, variación de retardo y la pérdida de paquetes, con estos parámetros es posible hacer una comparación de tecnologías para evaluar la óptima y que sea empleada en distintos escenarios de comunicación y datos.

b. Capacidad de transmisión

La capacidad de transmisión se entiende como la cantidad de información que un sistema puede transferir en una ventana de tiempo determinada, es expresado por bits por segundo o sus múltiplos [15]

c. Cobertura

La cobertura define el alcance espacial efectivo de la red. En zonas rurales/remotas, este criterio no restringe la disponibilidad de la señal, sino la posibilidad real de mantener el servicio vigente a diferentes distancias, topografía y condiciones de propagación del entorno [16,17].

d. Criterios de selección tecnológica

La elección de la tecnología debe basarse en un balance entre las necesidades propias de la aplicación y la viabilidad real de implementación. En este sentido, no puede afirmarse que exista una solución tecnológica universalmente adecuada para todos los contextos. La alternativa más conveniente estará determinada por factores como la cantidad de datos a transmitir, la distancia de cobertura requerida, la latencia tolerable, la disponibilidad de energía, los costos asociados y escalabilidad del sistema [17,22].

e. Costos de implementación

En los costos de implementación está incluido la instalación, operación, mantenimiento e infraestructuras de telecomunicaciones. En zonas rurales, este

concepto adjudica cierto peso por la baja densidad de usuarios y las largas distancias que se deben cubrir para prestar servicio en esa zona [17,18].

f. Escalabilidad

La escalabilidad se refiere a la facultad que tiene una red o sistema para incrementar su tamaño, su capacidad operativa o el volumen de tráfico que soporta, sin afectar su funcionamiento ni su desempeño. En el ámbito de las telecomunicaciones, esto significa que la infraestructura debe poder ajustarse al crecimiento de usuarios, servicios o recursos a través de ampliaciones graduales que resulten técnica y operativamente factibles [56].

g. Facilidad de despliegue

La facilidad de despliegue está asociada a aspectos como el tiempo requerido para la instalación, la necesidad de obras civiles, la complejidad del proceso de alineación, la obtención de permisos y las características propias del terreno. En contextos rurales o del sector florícola, este criterio puede favorecer la elección de tecnologías inalámbricas o satelitales, especialmente cuando la implementación de fibra óptica no resulta factible a corto plazo [17].

1.3.10 Requerimientos de conectividad para monitoreo agrícola

a. Transmisión de imágenes

La transmisión de imágenes exige una red con capacidad suficiente para transportar archivos o secuencias de capturas de forma constante, de manera que se garantice la continuidad del monitoreo. A diferencia de la telemetría, cada imagen contiene un volumen de información considerablemente mayor por evento, por lo que su efecto sobre el desempeño de la red está estrechamente condicionado por factores como la resolución, la frecuencia de captura y el nivel de compresión aplicado [39].

b. Volumen de datos generado

El volumen de datos corresponde a la cantidad de información que un sistema genera, almacena o transmite en un intervalo determinado, y puede expresarse en bits, bytes o

sus múltiplos. En sistemas de transmisión, este volumen depende del número de muestras, paquetes o eventos generados y del tamaño de información asociado a cada uno [57].

c. Frecuencia de transmisión

La frecuencia de transmisión es la carga temporal sobre la red, es decir, es el envío continuo de información audiovisual a través de una red de comunicación. Esta exige una alta capacidad de transporte de datos y una red estable, especialmente en aplicaciones que operan en tiempo real [58].

d. Transmisión de video

La transmisión de video constituye un servicio de telecomunicaciones que demanda un elevado ancho de banda debido a la gran cantidad de información que transporta y a su operación en tiempo real. Su desempeño depende directamente del comportamiento de la red y de los mecanismos de calidad de servicio implementados [59].

e. Resolución de video

La resolución de video es la cantidad total de píxeles que conforman cada imagen o fotograma del video, y normalmente se expresa mediante el número de píxeles en sentido horizontal y vertical. Este parámetro determina el nivel de detalle que puede reproducirse; por ello, a mayor resolución, mayor capacidad de representar información visual [60].

f. Bitrate requerido

El bitrate corresponde a la cantidad de bits que un enlace debe transportar para mantener la transmisión de video conforme al códec y a la configuración utilizada. En este contexto, los estándares RTP aplicados a H.264 y H.265/HEVC establecen la forma en que estos flujos de video comprimido se encapsulan sobre redes IP, por lo que el bitrate se convierte en un parámetro fundamental para el dimensionamiento de enlaces destinados a sistemas de monitoreo visual [61].

g. Transmisión de datos de sensores

La telemetría proveniente de sensores generalmente demanda una menor capacidad de ancho de banda en comparación con la transmisión de imágenes o video; sin embargo, requiere que la red garantice estabilidad, periodicidad y confiabilidad en el envío de la información. En entornos agrícolas, estos datos suelen representar el fundamento del monitoreo permanente, del almacenamiento histórico de variables y de la identificación oportuna de eventos [22,39].

h. Telemetría ambiental

La telemetría ambiental comprende el envío periódico de variables del entorno, tales como temperatura y humedad, generalmente en paquetes de reducido tamaño. Aunque este tipo de información no genera una alta demanda de caudal en la red, sí adquiere importancia por el número de nodos involucrados y por la continuidad temporal con la que debe mantenerse su transmisión [22].

i. Datos de operación del robot

Los datos operativos de un robot abarcan información relacionada con su estado de funcionamiento, posición, eventos asociados a la misión, nivel de energía y, en determinados casos, parámetros vinculados con la navegación. Aunque este tipo de datos suele representar una carga menor para la red en comparación con la transmisión de video, resulta esencial para el seguimiento de la operación y para la coordinación del robot con otros servicios o componentes del sistema [21,39].

1.3.11 Ingeniería de requisitos para formularios de propuestas tecnológicas

La ingeniería de requisitos es una etapa crítica en el desarrollo de sistemas ya que permite identificar, analizar, documentar, validar y gestionar las necesidades que debe satisfacer una solución [62].

a. Norma ISO/IEC/IEEE 29148

Esta norma proporciona un marco de referencia en ingeniería para definir los requisitos en sistemas y software. Su propósito es especificar los procesos requeridos para ingeniería de sistemas y productos de software, además de definir los productos de información asociados a dichos procesos [62].

La norma ISO/IEC/IEEE 29148 ofrece un tratamiento integrado de los procesos y productos en la ingeniería de requisitos para software y sistemas. El alcance de la norma cubre la definición, análisis, especificación, validación y gestión de requisitos de forma permanente; esta norma resulta útil para proyectos tecnológicos [63].

b. Reqview para la gestión de requisitos

La ingeniería de requisitos suele apoyarse en software que facilita la organización de requisitos, trazabilidad y generación de documentación. Reqview es una herramienta de soporte explícito para la norma ISO/IEC/IEEE 29148, permite describir requisitos estructurados y relacionados a través de mecanismos de trazabilidad. Dispone de plantillas y tutoriales para el desarrollo de requisitos [64].

Figura 8. Reqview

1.3.12 Dimensionamiento del tráfico de red

a. Cálculo del volumen de datos

El dimensionamiento del tráfico se refiere al proceso de estimar tanto la cantidad de información que será generada por el sistema como la velocidad a la que dicha información deberá ser transportada a través de la red. En aplicaciones agrícolas, este

análisis debe diferenciar al menos tres fuentes principales de datos: imágenes, video y telemetría, debido a que cada una de ellas presenta comportamientos y exigencias de carga distintos sobre la infraestructura de comunicación [22,39].

b. Datos generados por imágenes

El cálculo para imágenes fijas está dado por el tamaño por captura y frecuencia de envío. De este modo, el tráfico total puede estimarse a partir del producto entre el tamaño de cada imagen y la cantidad de capturas realizadas en un intervalo determinado, considerando además el efecto de la compresión y la sobrecarga introducida por los protocolos de comunicación cuando sea necesario [41].

c. Datos generados por video

El volumen de total que genera un video está dado por el total del bitrate y tiempo de transmisión, tras definir estos aspectos se toma en cuenta el codec, resolución, fps y la compresión a usar, el cálculo del volumen se expresa como tasa por de bits por duración de flujo [61,65].

d. Dimensionamiento del ancho de banda

El ancho de banda requerido no depende exclusivamente del volumen total de datos que genera un sistema, sino también de la distribución temporal de ese tráfico y de la cantidad de nodos que acceden de manera simultánea a la red. Su dimensionamiento debe considerar tanto la tasa promedio de transmisión como los picos de demanda que pueden presentarse durante la operación. Además, incorporando márgenes de capacidad que permitan absorber variaciones del tráfico, sobrecarga de protocolos y posibles incrementos futuros, con el fin de garantizar un desempeño estable, evitar congestión y mantener la calidad del servicio esperada [24].

e. Escenario de transmisión en tiempo real

En un esquema de transmisión en tiempo real, la red debe ser capaz de mantener de forma continua la tasa de datos mientras la información se genera, incrementando la demanda de ancho de banda, especialmente en aplicaciones basadas en video o en flujos secuenciales continuos. Por esta razón, este tipo de operación presenta una

mayor sensibilidad frente a parámetros de desempeño como la latencia, la variación del retardo y la pérdida de paquetes, ya que dichas afectaciones pueden degradar directamente la continuidad y la calidad de la comunicación [23,24].

f. Escenario de transmisión diferida

En un esquema de transmisión diferida, la información puede conservarse de forma temporal en el dispositivo terminal o en la capa de borde, para ser transferida posteriormente cuando las condiciones de conectividad sean más favorables. Este enfoque disminuye la carga instantánea sobre el enlace durante la operación habitual y es particularmente conveniente en escenarios donde la red presenta disponibilidad intermitente o cuando el tráfico visual generado excede la capacidad efectiva del medio de acceso [38,41].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta tecnológica de conectividad inteligente para el sector florícola en zonas rurales, mediante la integración de soluciones de redes de comunicación que permitan el monitoreo remoto eficiente de variables agroproductivas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar los requisitos técnicos y la viabilidad de implementación de diversas tecnologías de comunicación aplicables al sector florícola rural.
- Diseñar una arquitectura de red que integre tecnologías seleccionadas y permita la transmisión eficiente de datos y el monitoreo remoto de fincas florícolas.
- Desarrollar un prototipo de arquitectura de red en un entorno de prueba para validar su rendimiento técnico.

- Elaborar un modelo de viabilidad tecnoeconómica del diseño propuesto para determinar su aplicabilidad en fincas florícolas rurales.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Los materiales utilizados en esta investigación se enfocaron en el diseño y evaluación de una propuesta de conectividad para una florícola rural. Se utilizaron instrumentos de recolección de información, documentación técnica, fichas de equipos de comunicación, planos del área de estudio y diferentes herramientas de software que se listan a continuación:

- Reqview permitió organizar los requerimientos del sistema
- AutoCAD se usó para representar el trazado físico de la red
- Google Earth sirvió para ubicar los nodos
- Radio Mobile y UISP Design permitieron analizar los enlaces inalámbricos
- OptiSystem se empleó para validar el comportamiento de la red de fibra óptica.

También se utilizaron equipos para pruebas de laboratorio, como radios para el enlace inalámbrico y un carrete de fibra con un OTDR para la parte de red de fibra.

Por último, se utilizaron hojas de cálculo para estimar los costos de inversión, operación y retorno económico de las propuestas.

Con estos recursos fue posible sustentar el diseño técnico y el análisis de viabilidad de las alternativas planteadas.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos inicialmente planteados, el presente Trabajo de Titulación tiene cuatro modalidades de investigación.

Para establecer la base teórica y metodológica de este estudio, la etapa inicial fue una revisión bibliográfica y documental. Durante esta etapa se consultaron artículos científicos, tesis de pregrado o posgrado y normativas vigentes, priorizando investigaciones enfocadas en conectividad rural, tecnologías inalámbricas y arquitecturas de red para agricultura inteligente. Estudiar el estado del arte permitió identificar las opciones tecnológicas actuales y evaluar experiencias previas en el campo. Gracias a los estudios se definieron los criterios técnicos y buenas prácticas que sustentan el diseño de la red propuesto en esta investigación.

Posteriormente, se realizó una investigación de campo mediante entrevistas semiestructuradas con personal técnico de la empresa Artil Robotics, responsable del desarrollo del sistema de monitoreo robótico utilizado en el invernadero de floricultura. Además, se realizó un estudio técnico in situ para analizar el entorno operativo del sistema robótico y las condiciones de conectividad del área. Esta fase fue importante para identificar los requisitos operativos, las limitaciones ambientales y las necesidades de comunicación.

Con base en la información recopilada durante la fase de diagnóstico, se desarrolló una investigación aplicada con el objetivo de proponer una o más soluciones tecnológicas. Esta etapa se centró en el diseño de una arquitectura de conectividad capaz de soportar la transmisión confiable de imágenes y datos de monitoreo generados por el sistema de inspección robótica desplegado en los invernaderos.

Finalmente, se realizó una investigación experimental mediante la simulación y evaluación de un prototipo de conectividad funcional en un entorno de simulación, también por medio de pruebas físicas en laboratorio. En esta etapa, se analizaron parámetros clave de rendimiento de la red, para verificar la viabilidad de la arquitectura propuesta y su capacidad para satisfacer los requisitos del sistema.

2.2.2 Población y muestra

Dado que esta investigación se centra en el diseño técnico y la evaluación de una arquitectura de conectividad para sistemas de monitoreo agrícola, no se pretende realizar un análisis estadístico en una población extensa. En su lugar, se adopta un

enfoque de estudio de caso técnico que permite analizar los requisitos de conectividad y la viabilidad tecnológica en un entorno operativo representativo.

La población conceptual corresponde a entornos de producción florícola ubicados en zonas rurales o periurbanas, donde las tecnologías de monitoreo requieren infraestructuras de comunicación confiables para transmitir datos operativos e imágenes para la inspección de cultivos. Estos entornos presentan desafíos de conectividad debido a las condiciones geográficas, las limitaciones de infraestructura y la creciente integración de tecnologías de monitoreo.

Para el desarrollo de esta investigación, se seleccionó una instalación florícola específica como caso de estudio, donde un sistema de monitoreo robótico desarrollado por Artil Robotics opera en invernaderos para capturar imágenes y datos de monitoreo de cultivos. Este escenario proporcionó las condiciones necesarias para analizar los requisitos de comunicación, evaluar la viabilidad de tecnologías de conectividad y diseñar una arquitectura de red capaz de soportar la transmisión confiable de datos en condiciones operativas rurales reales.

2.2.3 Recolección de información

La recolección de información se organizó con el fin de cumplir los objetivos establecidos, enfocándose en obtener datos técnicos, operativos y experimentales que permitan diseñar, validar y optimizar la propuesta de conectividad para el monitoreo remoto de variables agroproductivas. En la Tabla 1 se muestra el plan de recolección.

Tabla 1. Recursos de información

Criterio	**Descripción**
¿Para qué?	Obtener información técnica y operativa que permita diseñar, implementar y evaluar una propuesta de conectividad híbrida, garantizando el monitoreo remoto eficiente de variables agroproductivas para mejorar la gestión de la producción de flores.
¿De qué personas u objetos?	Dispositivos tecnológicos para monitoreo, personal de la empresa Artil Robotics e instalaciones de prueba.
¿Cómo?	Mediante observación directa del comportamiento de la red y dispositivos en condiciones de prueba, pruebas funcionales de conectividad y registro de parámetros de calidad de servicio.
¿Con qué?	Fichas técnicas, listas de verificación, registros de pruebas de red, herramientas de medición de conectividad, softwares de redes, documentación de protocolos y dispositivos de monitoreo.
¿Cuándo?	Durante el periodo académico enero - julio 2026 donde se desarrollará mediante las siguientes etapas:

Criterio	Descripción
	Fase de diagnóstico y levantamiento: análisis de infraestructura y recursos. Fase de evaluación de tecnologías: revisión teórica, simulaciones y pruebas parciales de distintas soluciones de conectividad. Fase de diseño de la arquitectura de red: integración de tecnologías seleccionadas y elaboración del modelo de red. Fase de validación y pruebas: simulación o implementación del prototipo en un entorno de laboratorio. Fase de evaluación final y recomendaciones: análisis de resultados, ajustes al sistema y recomendaciones para replicabilidad y escalabilidad.
¿Dónde?	En los laboratorios de la empresa Artil Robotics.
¿Cuántas veces?	Se realizarán varios ciclos de prueba.

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos obtenidos se realizó de manera estructurada para verificar el cumplimiento de los objetivos específicos de la investigación. El procedimiento incluyó los siguientes pasos:

- Revisión y depuración de la información obtenida mediante entrevistas, observación directa, inspecciones en el sitio y documentación proporcionada por la empresa Artil Robotics.

- Clasificación de la información de acuerdo con las características del entorno florícola, el funcionamiento del sistema de monitoreo robótico y las necesidades de conectividad identificadas.

- Organización de requisitos operacionales, de usuario, funcionales y de arquitectura con ReqView.

- Tabulación de los datos generados por el sistema de monitoreo, para el cálculo de tráfico total y el ancho de banda requerido en los escenarios de transmisión en tiempo real y diferido.

- Registro de los resultados obtenidos mediante cálculos, simulaciones y pruebas experimentales en tablas comparativas, considerando parámetros como capacidad de transmisión, potencia recibida, nivel de señal, pérdidas, factor de calidad y tasa de error de bits.

- Comparación de los resultados técnicos con los requisitos definidos para determinar el cumplimiento y la viabilidad de las alternativas inalámbrica y de fibra óptica.

- Organización de los costos de inversión y operación para calcular los indicadores económicos correspondientes a cada alternativa.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diagnóstico del caso de estudio

3.1.1 Caracterización física y operativa de la florícola

Esta fase permitió identificar las características físicas, operativas y tecnológicas del entorno florícola donde se planea implementar el sistema de monitoreo. La información se obtuvo mediante visitas técnicas, observación directa del sitio, entrevistas semiestructuradas con el personal de Artil Robotics y representantes de la florícola, además con apoyo complementario de imágenes satelitales. Los instrumentos de entrevistas se presentan en el Anexo A.

Como caso de estudio se tomó una finca florícola perteneciente a la empresa AGROGANA S.A., ubicada en la provincia de Cotopaxi, Ecuador. La empresa se dedica a la producción y exportación de rosas y otras flores para mercados internacionales [66]. El proceso de producción de las flores se lleva a cabo en invernaderos que permiten condiciones controladas para el cultivo a gran escala, esta florícola fue elegida debido a que la empresa Artil Robotics realiza las pruebas de monitoreo en sus invernaderos.

Las mediciones obtenidas mediante la herramienta Google Earth de forma satelital muestran que el área de producción del invernadero es de aproximadamente 87.454m². Esta área total corresponde a la zona productiva compuesta por varios invernaderos donde no hay grandes obstáculos visibles entre ellos como árboles, montañas, casas etc. Las distancias entre invernaderos varían de 5 a 10 metros, un parámetro importante para analizar los requisitos de interconexión, la distribución local e implementación de infraestructuras de red.

En la Figura 9 se muestra la vista satelital de la florícola utilizada para identificar la distribución espacial general del área de producción.

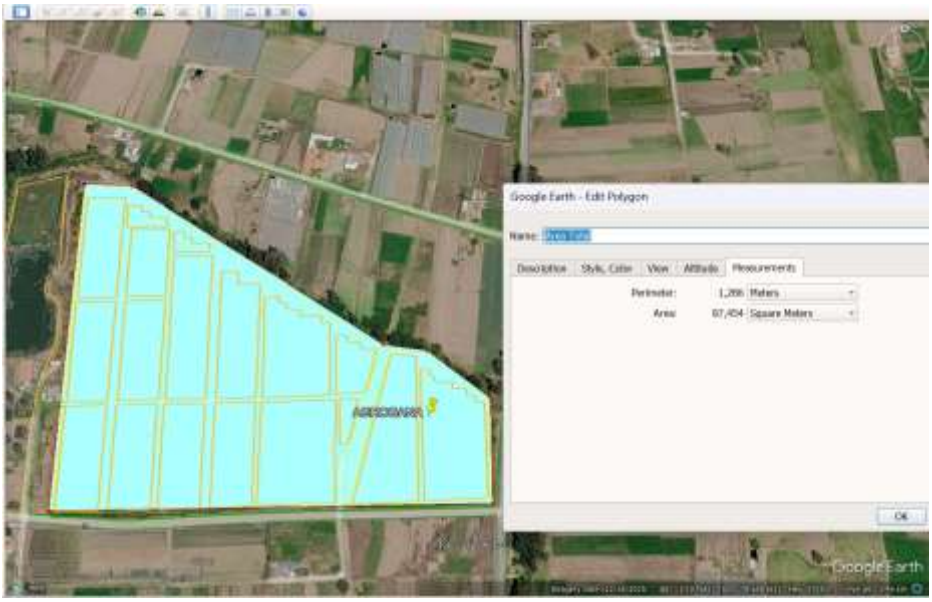


Figura 9. Vista satelital del caso de estudio y distribución general del área de producción florícola. Google Earth

a. Situación actual

Según la información obtenida de entrevistas realizadas, en el área de estudio se utilizan 18 invernaderos para el cultivo de rosas. Cada invernadero tiene dimensiones variables, las medidas promedio aproximadas son de 100 m de largo por 50 m de ancho, y una altura media de 5 m, esas serán las medidas de referencia para el posterior diseño de la red. Las estructuras están compuestas principalmente por marcos de madera y metálicos con cubiertas de plástico.

El sitio cuenta con electricidad y postes que se distribuyen en el área de producción ya que los invernaderos hacen uso de esta, el suministro eléctrico es de 220 V y existe suministro de energía de respaldo mediante un generador eléctrico.

En cuanto a la infraestructura de telecomunicaciones, se verificó que en la zona existen FDB (Cajas de Distribución de Fibra Óptica), por lo cual hay acceso a este medio de comunicación. El área que tiene el servicio fibra óptica proporcionada por un proveedor local de internet está ubicada aproximadamente a 150 metros de la zona de invernaderos. Es decir, dicho servicio no se extiende al área de invernaderos donde se planea implementar el monitoreo agrícola.

También se identificó cobertura celular de operadores como Claro y Movistar, con un nivel de señal medio, mientras que CNT presenta un nivel bajo. En la Figura 10, Figura 11 y Figura 12, se plasma la respectiva verificación de cobertura de cada operadora respectivamente a través del mapa de cobertura Servicio Móvil Avanzado (SMA) que publica ARCOTEL en su web [67].

Figura 10. Intensidad de señal de la red móvil 4G de Claro

Figura 11. Intensidad de señal de la red móvil 4G de CNT

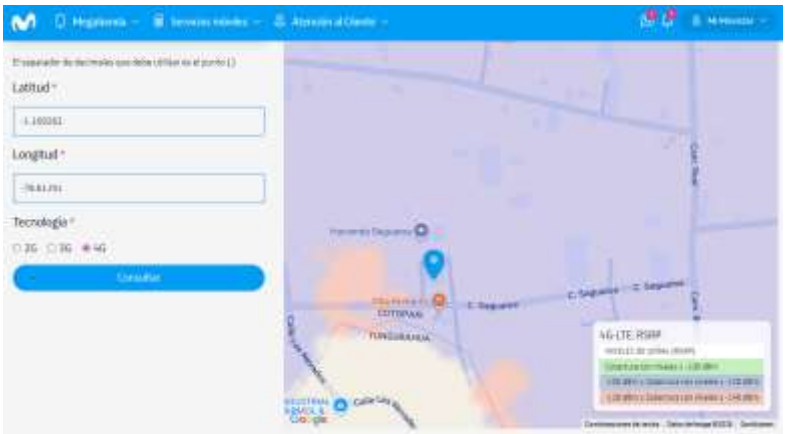


Figura 12. Intensidad de señal de la red móvil 4G de Movistar

Las principales características del entorno de estudio se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Características principales del entorno del caso de estudio

Parámetro	Descripción
Empresa florícola	AGROGANA S.A.
Ubicación	Yambo, Provincia de Cotopaxi, Ecuador
Longitud	-78.608404
Latitud	-1.108557
Temperatura promedio	17°C
Número aproximado de invernaderos	18
Dimensiones promedio de los invernaderos	100 m × 50 m
Altura promedio de los invernaderos	5 m
Material de la estructura	Estructura de madera y metal con cubierta plástica
Distancia entre invernaderos	5 – 10 m
Área aproximada del sistema productivo	87.454 m²
Conectividad a internet existente	Disponible únicamente en la oficina administrativa
Distancia entre la oficina y los invernaderos	150 metros
Tipo de conexión a internet	Fibra óptica por un ISP local
Conectividad dentro de los invernaderos	No disponible
Cobertura de red celular	Operadores disponibles: Claro y Movistar
Infraestructura eléctrica	220 V
Sistemas de respaldo energético	Generadores eléctricos

3.1.2 Caracterización del sistema de monitoreo robótico

El sistema de monitoreo robótico analizado en esta investigación es desarrollado por Artil Robotics y se considera como el escenario base de referencia para el análisis de conectividad dentro del caso de estudio. Su principal objetivo es obtener imágenes o videos de las plantas de rosas para analizar su estado fenológico, apoyando procesos como la evaluación del crecimiento y el conteo de flores.

El sistema opera como una plataforma de inspección móvil que se desplaza sobre rieles instalados en la estructura del invernadero. Durante su recorrido, el robot captura datos visuales del cultivo mediante un módulo de visión integrado y procesa o almacena la información obtenida a través de una unidad de procesamiento a bordo.

El equipo de desarrollo espera que el robot pueda operar de forma autónoma durante las rutas de inspección, generar y almacenar localmente datos de inspección que posteriormente se transmitan a una plataforma en la nube para su análisis con modelos de visión artificial. Es decir, el sistema impone requerimientos de conectividad

inalámbrica en invernaderos y la capacidad de transferencia de datos desde el entorno de producción hacia la red externa.

El sistema desarrollado por parte de Artil Robotics se encuentra en la fase de prototipo. No obstante, como proyección operativa se planteó el estudio de caso con la implementación de un robot por cada uno de los invernaderos. Las principales características operativas del sistema se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Características operativas del sistema de monitoreo robótico

Parámetro	**Valor**
Tipo de sistema	Robot de monitoreo agrícola
Entorno de operación	Invernaderos florícolas
Método de desplazamiento	Rieles en sistema suspendido
Velocidad promedio	0.5 m/s
Tiempo de recorrido promedio por invernadero	2 a 3 horas
Número de robots por invernadero	1
Tipo de monitoreo	Inspección fenológica de rosas
Tipo de operación	Autónomo con supervisión humana

3.1.3 Identificación de los datos generados por el sistema

Los que se identificaron fueron: datos visuales en modo imagen, datos visuales en modo video y datos de telemetría del estado operativo del robot.

Dependiendo de la configuración operativa, el sistema puede capturar imágenes o videos, pero no ambos simultáneamente. En modo imagen, se capturan fotografías individuales de los cultivos. En el modo video se graban secuencias cortas de vídeo de los cultivos para su inspección y posterior análisis. Por ello, los datos deben tratarse como escenarios de tráfico independientes durante el proceso de dimensionamiento de la red.

Adicionalmente, el sistema genera datos de telemetría de la parte operativa del robot como: calidad del enlace inalámbrico, latencia, uso de recursos y almacenamiento. Se prevé la integración futura de sensores adicionales que generen telemetría ambiental de temperatura, humedad del ambiente, humedad del suelo, pH, etc.

Así mismo, se mencionó la incorporación de cámaras fijas en los invernaderos como reemplazo al sistema robótico, lo cual puede representar una fuerte fuente de tráfico visual, ya sea mediante captura periódica de imágenes o transmisión de video, por ello la propuesta de arquitectura de comunicación debe considerar la escalabilidad proyectada por la empresa. Por lo tanto, la metodología presentada en el estudio permitirá escalar el flujo de datos para adaptarse a las necesidades de la empresa.

En la Tabla 4 se observa la clasificación de estos datos, tanto los actuales como los proyectados.

Tabla 4. Datos identificados que genera el sistema

Tipo de dato	Formato	Finalidad	Frecuencia
Imágenes del robot	Archivos de imagen	Monitoreo fenológico, crecimiento y conteo	Captura discreta durante el recorrido
Video del robot	Archivos o secuencias de video	Inspección continua y análisis complementario	Generación continua durante la inspección
Telemetría del robot	Paquetes de estado o registros	Supervisión operativa del robot	Periódica o por evento
Imágenes de cámaras fijas (proyectivo)	Archivos de imagen	Monitoreo complementario de zonas específicas	Periódica o por evento
Video de cámaras fijas (proyectivo)	Archivos o secuencias de video	Vigilancia o inspección continua	Continua o por evento
Sensores futuros	Por definir	Escalabilidad del sistema	Periódica

3.1.4 Requerimientos del sistema

En la investigación se usó la norma ISO/IEC/IEEE 29148 como referencia metodológica al estructurar el proceso de identificación y documentación de requisitos del sistema de conectividad propuesto [63]. Su aplicación permitió detectar las necesidades en el entorno florícola como: cobertura, transmisión de imágenes generada por sistemas de monitoreo y disponibilidad del servicio dentro de requisitos tecnológicos y verificables. Los requisitos obtenidos conforman la base para el análisis de las alternativas de tecnologías de comunicación y el dimensionamiento de tráfico que debe soportar el sistema de monitoreo.

Para ello se usaron como apoyo las plantillas establecidas en la norma ISO/IEC/IEEE 29148 del software Reqview que proporciona las directrices para el desarrollo de proyectos de ingeniería de requerimientos.

En la Tabla 5 se presentan los requerimientos de los Stakeholders, los requerimientos iniciales y requerimientos de arquitectura.

Tabla 5. Acrónimos de en la norma ISO/IEC/IEEE 29148 [68].

Acrónimo	Descripción
StSR	Requerimientos de los Stakeholders
SySR	Requerimientos iniciales del sistema
SRSH	Requerimientos de arquitectura

a. Listado de Stakeholders

Los Stakeholders son personas que participan directa o indirectamente en la propuesta, cada una con un rol específico. En total, seis personas forman parte del proyecto colaborando con distintas funciones específicas. En la Tabla 6 se detalla la información y el rol que cumple cada una de ellas.

Tabla 6. Listado de Stakeholders

STAKEHOLDERS		
#	Involucrados	Función
1	Ing. Marcelo Ortiz	Tutor empresarial de Artil Robotics
2	Ing. Andy Sampedro	Desarrollador del robot de monitoreo de Artil Robotics
3	Ing. Eduardo Cradenas	Técnico Operativo
4	Ing. Jesús Guaman	Tutor del Trabajo de Titulación
5	Srta. Ibeth Nuñez	Autora del Trabajo de Titulación
6	Srta. Katherin Silva	Autora del Trabajo de Titulación

En colaboración con el Ing. Marcelo Ortiz, se definieron los requerimientos de los stakeholders. También se definieron los requisitos operacionales y de usuario, establecidos con el Ing. Eduardo Cárdenas, técnico operativo, y el Ing. Andy Sampedro, desarrollador del prototipo del sistema abordado en la propuesta.

Tras haber definido los requerimientos del sistema, se establecen las necesidades y prioridades. En la Tabla 7 se presentan los requerimientos correspondientes al sistema junto a las prioridades de cada uno.

Las prioridades fueron definidas junto a los stakeholders, principalmente con los interesados en la solución.

Tabla 7. Priorización de requerimientos del sistema de conectividad.

Prioridad	Descripción
Alta	Requerimientos indispensables para el funcionamiento del sistema. Su incumplimiento afecta de manera directa la operación de la propuesta.
Media	Requerimientos importantes para mejorar el desempeño y la confiabilidad del sistema, aunque no condicionan totalmente el funcionamiento básico.
Baja	Requerimientos complementarios que aportan valor al sistema, pero cuya ausencia no afecta de forma significativa su operación principal.

Elaborado por: El investigador [68].

b. Requerimientos Operacionales y de Usuario

Los requerimientos operaciones se establecen las condiciones con las cuales debe funcionar el sistema, en este caso la propuesta de conectividad. Se considera el entorno de la florícola, la disponibilidad energética, la cobertura y operación de una jornada laboral.

A través de los requerimientos de usuario se describen las capacidades de los usuarios finales como transmisión de información y acceso remoto a los equipos de red. Estos requerimientos son las necesidades de los Stakeholders que sirven para definir la arquitectura de conectividad propuesta. En la Tabla 8 se detallan ambos requerimientos.

Tabla 8. Requerimientos Operacionales y de Usuario.

Requerimientos de los Stakeholders					
		Prioridad			
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Relación
REQUERIMIENTOS OPERACIONALES					
StSR1	La solución debe operar durante las jornadas de monitoreo agrícola.	X			
StSR2	La infraestructura de red debe disponer de alimentación eléctrica estable para los equipos.	X			
StSR3	El nodo principal debe contar con acceso a Internet para la subida de datos.	X			
StSR4	La red debe comunicar los invernaderos con el punto principal de conexión.	X			
StSR5	Los equipos deben funcionar en condiciones propias del entorno florícola rural.	X			
REQUERIMIENTOS DE USUARIO					
StSR6	El sistema debe permitir la transmisión de imágenes y video generados por el sistema de monitoreo agrícola.	X			

Requerimientos de los Stakeholders					
		Prioridad			
#	**Requerimientos**	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Relación**
StSR7	El acceso remoto a equipos y servicios debe realizarse de forma segura para tareas de administración, diagnóstico y soporte.	X			
StSR8	La solución debe permitir crecimiento futuro en número de invernaderos, nodos y robots sin rediseñar completamente la red.	X			
StSR9	La solución debe adaptarse al esquema operativo de carga diferida por lotes cuando no sea necesario transmitir en tiempo real.	X			

A través de la encuesta y entrevista con el técnico operativo se establecieron los requerimientos de usuarios y operativos del sistema, en el Anexo A se observa los requerimientos propuestos, su determinación de prioridad para tener coherencia con los requerimientos iniciales del sistema y su justificación.

c. Requerimientos del sistema

La Tabla 9 describe los requisitos iniciales del sistema (SySR) de monitoreo agrícola en la cual se detallan los requerimientos establecidos por los Stakeholders y siguiendo la estructura propuesta por la norma ISO/IEC/IEEE 29148. De esta manera, se definen los parámetros que el sistema debe cumplir para satisfacer las necesidades operativas, técnicas y funcionales del entorno de monitoreo.

Tabla 9. Requerimientos iniciales del sistema

Requerimientos del Sistema					
		Prioridad			
#	**Requerimientos**	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Relación**
REQUERIMIENTOS DE USO					
SySR1	La solución debe transmitir imágenes, video y telemetría.	X			StSR6
SySR2	Los nodos deben comunicarse con el nodo principal.	X			StSR4
SySR3	El sistema debe permitir la subida de datos a Internet.	X			StSR3
SySR4	La solución debe admitir transmisión en tiempo real o diferida.	X			StSR9
REQUERIMIENTOS DE RENDIMIENTO					
SySR5	La red debe operar durante las jornadas de monitoreo.	X			StSR1
SySR6	El enlace debe soportar la carga programada de archivos.	X			StSR6, StSR9
SySR7	La solución debe permitir agregar nuevos nodos.	X			StSR8
REQUERIMIENTOS FISICOS					

Requerimientos del Sistema					
		Prioridad			
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Relación
SySR8	Los equipos deben contar con alimentación eléctrica estable.	X			StSR2
SySR9	Los nodos deben ubicarse en puntos estratégicos.	X			StSR4
SySR10	Los equipos deben protegerse del entorno florícola rural.	X			StSR5
REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD					
SySR11	El acceso remoto debe realizarse mediante conexión segura.	X			StSR7
SySR12	Los equipos deben protegerse contra accesos no autorizados.	X			StSR7, StSR5

d. Requerimientos de Arquitectura

Los requerimientos de arquitectura (SRSH), definen las condiciones técnicas de hardware y software para el diseño, integración y funcionamiento solución de comunicación propuesta para el sector florícola rural. La selección de estos elementos considera la integración de equipos de red, nodos de acceso, mecanismos de transmisión de datos, herramientas de administración remota, que fueron seleccionados en función de su compatibilidad, capacidad de comunicación, estabilidad, escalabilidad y adaptación en condiciones agrícolas. La Tabla 10 detalla los principales requerimientos de arquitectura para el desarrollo de la propuesta tecnológica de conectividad agrícola.

Tabla 10. Requerimientos de Arquitectura

Requerimientos de Arquitectura					
		Prioridad			
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Relación
REQUERIMIENTOS DE DISEÑO					
SRSH1	La arquitectura debe considerar un nodo principal con acceso a Internet.	X			SySR3
SRSH2	Los nodos remotos deben conectarse al nodo principal de la red.	X			SySR2
SRSH3	La red debe emplear una topología adecuada para varios invernaderos.	X			SySR7
SRSH4	Los nodos deben ubicarse considerando cobertura y línea de vista.	X			SySR9
REQUERIMIENTOS LOGICOS					
SRSH5	La arquitectura debe separarse por capas.	X			SySR1, SySR2
SRSH56	El sistema debe permitir transmisión en tiempo real o diferida.	X			SySR64
SRSH7	La red debe permitir administración remota segura de los equipos.	X			SySR11
REQUERIMIENTOS DE HARDWARE					

Requerimientos de Arquitectura					
		Prioridad			
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Relación
SRSH8	Los equipos deben ser compatibles con transmisión de imágenes y video.	X			SySR1, SySR6
SRSH9	Los nodos deben integrar equipos de comunicación, energía y protección.	X			SySR8, SySR10
REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE Y GESTIÓN					
SRSH10	El sistema debe permitir monitorear el estado de nodos y enlaces.		X		SySR5
SRSH11	La solución debe registrar eventos básicos de conectividad.		X		SySR11, SySR12
REQUERIMIENTOS ELECTRICOS					
SRSH12	Los nodos deben contar con alimentación estable y protección ambiental.	X			SySR8, SySR10

3.1.5 Requerimientos funcionales y no funcionales

La identificación de requerimientos funcionales y no funcionales constituye una etapa fundamental dentro del proceso de ingeniería de requisitos, se lo hizo a partir de la clasificación de los requerimientos operacionales, del sistema y arquitectura. Esto permite definir tanto las funciones que el sistema debe realizar como las restricciones y características de desempeño que debe cumplir durante su operación.

Para la estimación de la demanda de tráfico, es necesario el levantamiento de requerimientos, mismos que contribuyen a la evaluación de tecnologías de comunicación y el diseño de la arquitectura de red.

En la Tabla 11 y Tabla 12 se resumen los principales requerimientos funcionales y no funcionales del sistema y su relación con los requerimientos establecidos previamente.

Tabla 11. Requerimientos funcionales de la solución de conectividad

		Prioridad			
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Relación
REQUERIMIENTOS FUNCIONALES					
RF1	La red debe transmitir imágenes, video y datos del monitoreo agrícola.	X			StSR6, SySR1
RF2	Los nodos remotos deben comunicarse con el nodo principal de la finca.	X			StSR4, SySR2, SRSH2
RF3	El nodo principal debe permitir la subida de datos hacia Internet.	X			StSR3, SySR3, SRSH1
RF4	El sistema debe permitir transmisión en tiempo real o diferida.	X			StSR9, SySR4, SRSH6

		Prioridad			
#	**Requerimientos**	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Relación**
RF5	La solución debe permitir acceso remoto para monitoreo y administración.	X			StSR7, SySR11, SRSH7
RF6	La red debe permitir agregar nuevos nodos en los invernaderos.	X			StSR8, SySR7, SRSH3
RF7	El sistema debe permitir revisar el estado básico de nodos y enlaces.		X		SySR5, SRSH10

Tabla 12. Requerimientos no funcionales de la solución de conectividad

		Prioridad			
#	**Requerimientos**	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Relación**
REQUERIMIENTOS NO FUNCIONALES					
RNF1	La solución debe operar durante las jornadas de monitoreo agrícola.	X			StSR1, SySR5
RNF2	El enlace debe soportar la carga programada de archivos pesados.	X			SySR6
RNF3	Los nodos deben ubicarse en puntos estratégicos para cobertura y línea de vista.	X			SySR9, SRSH4
RNF4	Los equipos deben contar con alimentación eléctrica estable.	X			StSR2, SySR8
RNF5	Los equipos deben protegerse frente al entorno florícola rural.	X			StSR5, SySR10, SRSH12
RNF6	El acceso remoto debe realizarse mediante mecanismos seguros.	X			StSR7, SySR11
RNF7	Los equipos deben protegerse contra accesos o manipulación no autorizada.	X			SySR12
RNF8	La arquitectura debe facilitar mantenimiento y crecimiento futuro.		X		StSR8, SRSH3

Estos requerimientos representan las capacidades necesarias para la infraestructura de la arquitectura de red propuesta en el entorno rural. Una vez establecidos dichos requerimientos, el siguiente paso es estimar la demanda de tráfico generada por el sistema robótico de monitoreo y determinar los correspondientes requerimientos de capacidad de red.

3.2 Estimación de la demanda de tráfico y requerimientos de red

Para la estimación de la demanda de tráfico del sistema se definió un modelo de generación de datos que represente su comportamiento durante los ciclos de inspección. El tráfico depende del modo de operación, del volumen de información generado en cada recorrido y del tipo de datos asociados a la inspección, como se mencionó anteriormente, se tomará como referencia un invernadero de tamaño promedio con un área de 5000 m^2 para el análisis de información recolectada.

3.2.1 Escenarios de generación de tráfico

a. Generación de datos de imagen

El sistema de monitoreo robótico captura imágenes, en promedio se capturan aproximadamente 3000 imágenes de un invernadero de 5000 m^2. Cada imagen se genera mediante un módulo de cámara de 64 megapíxeles, con un tamaño de archivo promedio de aproximadamente 3 MB.

A medida que se desplaza el robot a través del invernadero las imágenes se capturan individualmente, cada imagen cubre aproximadamente de 2 a 5 metros del cultivo, esto depende de la altura del sistema de monitoreo. Los archivos se almacenan localmente en el robot antes de ser transmitidos a la nube cuando hay conectividad disponible. Las principales características de la generación de imágenes se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Generación de datos de imágenes del sistema robótico

Parámetro	**Valor**
Dispositivo de captura	Cámara Arducam OV64A40
Resolución nominal del sensor	64 MP
Tamaño promedio de imagen	3 MB
Formato de imagen	PNG/JPG
Número de imágenes promedio por recorrido	3000
Frecuencia de recorrido	Semanal
Método de captura	Imágenes individuales
Método de transmisión	Diferido / por lotes

b. Generación de datos de video

El sistema también realiza grabaciones de video durante las actividades de inspección dentro del invernadero, el sistema genera aproximadamente 16 grabaciones de video durante un ciclo completo de inspección en un invernadero de tamaño promedio.

Cada video tiene una duración promedio de 600 segundos y su códec de compresión es H.265 a una resolución de 1080p. El tamaño promedio del archivo de cada video es de 1,1 GB aproximadamente, lo que resulta en una generación total de datos de video de aproximadamente 17,6 GB por ciclo de inspección de invernadero. Las principales características de los datos de video generados se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14. Características de generación de video del sistema

Parámetro	**Valor**
Resolución de video	1080p
Codec de compresión	H.265
Número de videos por recorrido	16
Duración promedio por video	600 s
Tamaño aproximado por video	1.1 GB
Tamaño total generado por recorrido	17.6 GB
Método de transmisión	Diferido / por lotes

c. Generación de Datos de telemetría

Además de los datos de imagen y vídeo, el sistema robótico genera datos de telemetría operacional asociados a sus actividades de monitorización. Estos datos incluyen información sobre el estado del sistema y parámetros operativos relacionados con el proceso de inspección, tienen un tamaño aproximado de 100 KB por sesión operativa y se generan cuando el robot se activa para un ciclo de monitorización.

3.3 Estimación de la demanda de tráfico y ancho de banda

3.3.1 Tráfico de datos de imágenes por invernadero

El tráfico de datos corresponde al flujo de información generado por los dispositivos conectados a la red, tomando en referencia un invernadero este se calcula con el número de fotografías capturadas por el robot durante un recorrido y el tamaño promedio de cada archivo, dando como resultado la cantidad total de datos de imagen generados que se muestra en la Ecuación 1, la captura se realiza una vez por semana, entonces tráfico no se considera continuo, sino como una carga diferida.

$$\boldsymbol{D_{imágenes} = N_{imágenes} \times T_{imagen}} \quad (1)$$

Donde:

$N_{imágenes} = número\ de\ imagenes\ capturadas$

$T_{\boldsymbol{imagen}} = tamaño\ promedio\ de\ cada\ imagen$

$$D_{\boldsymbol{imágenes}} = 3000 \times 3MB$$

$$D_{\boldsymbol{imágenes}} = 9000MB$$

$$D_{imágenes} = 9\ GB$$

Por lo tanto, el sistema genera aproximadamente 9 GB de datos de imágenes durante un solo ciclo de inspección en un invernadero.

3.3.2 Tráfico de datos de video por invernadero

Los datos de video totales generados por ciclo de inspección de invernadero se estiman utilizando la Ecuación 2.

$$\boldsymbol{D_{video} = N_{videos} \times T_{video}} \quad (2)$$

Donde:

$N_{videos} = número\ de\ videos$

$T_{video} = tamaño\ promedio\ de\ cada\ video$

$$D_{video} = 16 \times 1.1GB$$

$$D_{video} = 17.6\ GB$$

Por lo tanto, el total de datos de video generados durante un ciclo de inspección dentro de un invernadero es de aproximadamente 17.6 GB.

3.3.3 Posible implementación de cámaras por invernadero

La Tabla 15 presenta los datos totales generador en la florícola del caso de estudio si se deseara implementar cámaras.

Tabla 15. Datos totales generados en la florícola

Escenario	**Invernaderos**	**Datos por invernadero**	**Total generado**
Escenario base (imágenes)	18	9 GB	162 GB
Escenario video	18	17.6 GB	316.8 GB

3.4 Análisis de los requisitos de ancho de banda de la red

Para el cálculo del ancho de banda de transmisión se relaciona el volumen total de datos con el tiempo disponible para transmitirlos, esto depende de la Ecuación 3.

$$\boldsymbol{BW_t(Mbps) = \frac{D_t(GB) * 8000}{T_t(s)}} \quad (3)$$

Donde:

$BW_t = ancho\ de\ banda\ de\ transmisión\ en\ Mbps$
$D_t = volumen\ total\ de\ datos\ a\ transmitir, en\ GB$
$T_t = tiempo\ de\ transmisión, en\ segundos$

3.4.1 **Ancho de banda requerido en imágenes**

En el escenario de generación de imágenes del sistema, el total es de 9GB por recorrido, siendo el volumen que se transmite, el ancho de banda requerido es:

En 3 horas:

$$BW_{img}(Mbps) = \frac{9 * 8000}{10800} = 6.67\ Mbps$$

En 4 horas:

$$BW_{img}(Mbps) = \frac{9 * 8000}{14400} = 5\ Mbps$$

Por lo tanto, el ancho de banda requerido para la transmisión de imágenes es 6.67 Mbps.

3.4.2 Ancho de banda requerido en video

En el escenario de video, el sistema genera 17.6GB por recorrido, el ancho de banda requerido es:

En 3 horas:

$$BW_{video}(Mbps) = \frac{17.6 * 8000}{10800} = 13.04\ Mbps$$

En 4 horas:

$$BW_{video}(Mbps) = \frac{17.6 * 8000}{14400} = 9.78\ Mbps$$

Entonces el ancho de banda requerido para la transmisión de video es de 13.04 Mbps.

Los resultados obtenidos demuestran que el ancho de banda requerido para la transmisión depende directamente de la cantidad de datos generados (imagen y video) y el tiempo disponible para enviarlos. Por ello, si el tiempo de transmisión es menor, mayor será la capacidad que debe ofrecer la red.

La estimación de los requisitos de ancho de banda de la red debe considerar las características operativas del sistema de monitoreo robótico y la naturaleza de los datos generados. A diferencia de los sistemas de monitoreo en tiempo real, como la videovigilancia o las redes de control industrial, el sistema de inspección robótica analizado en esta investigación no requiere la transmisión inmediata de datos. En cambio, el sistema genera grandes volúmenes de datos multimedia que pueden transmitirse a la nube una vez finalizado el proceso de inspección.

En entornos de agricultura de precisión, es común utilizar mecanismos de transmisión de almacenamiento y reenvío, donde los dispositivos de monitoreo almacenan los datos recopilados localmente y los transmiten posteriormente cuando hay conectividad de red. Esta estrategia reduce la demanda instantánea de la red y evita el sobredimensionamiento innecesario de la infraestructura de comunicación.

El presente sistema almacena las imágenes y el video capturados localmente y transmite los datos a la plataforma en la nube una vez que detecta conectividad a internet. Además, el sistema no requiere que los datos de inspección se carguen en el tiempo real, lo que permite la transmisión de datos programada o por lotes.

Por esta razón, la estimación del ancho de banda se realizó considerando dos escenarios de transmisión diferentes.

3.4.3 Escenario 1: Transmisión en tiempo real

Aunque el sistema no requiere transmisión en tiempo real, este escenario se evaluó como caso de referencia para comprender la demanda máxima de red que se produciría si los datos generados se transmitieran inmediatamente durante el proceso de inspección.

Si estos datos se transmitieran durante el proceso de inspección, que dura aproximadamente 3 horas, la tasa de transmisión requerida se puede estimar con el ancho de banda requerido calculado previamente, se considera un margen adicional 20% por sobrecarga de protocolos, retransmisiones y variaciones de tráfico.

El tiempo de duración del recorrido del robot dentro del invernadero es aproximadamente 3 horas:

$$T = 3\ h = 10800\ seg$$

a. Cálculo para imágenes

Se considera el ancho de banda requerido en imágenes ya calculado anteriormente y se aplica el margen del 20%:

$$BW_{imagen} = 6.67\ Mbps * 1.2$$

$$BW_{imagen} = 8.004 \approx 8\ Mbps$$

Para transmitir las imágenes en tiempo real se requiere 8 Mbps por invernadero.

b. Cálculo para video

Aplicando el margen del 20%:

$$BW_{video} = 13.04\ Mbps * 1.2$$

$$BW_{video} = 15.648\ Mbps \approx 15.65\ Mbps$$

Para transmitir el video en tiempo real se requiere aproximadamente 15.65 Mbps por robot.

3.4.4 Escenario 2: Transmisión en tiempo diferido

En este escenario el robot almacena los datos localmente durante el recorrido y los transmite en una ventada de tiempo definida, en este caso es de 4 horas.

Para el cálculo de la transmisión diferida se requiere de la ventana de carga disponible, se usa la Ecuación 3 y el margen del 20%.

a. Cálculo para imágenes

$$BW_{img} = 5Mbps * 1.2$$

$$BW_{img} = 6\ Mbps$$

Para transmitir imágenes en tiempo diferido se requiere 6 Mbps.

b. Cálculo para video

Margen del 20%:

$$BW_{video} = 9.78Mbps * 1.2$$

$$BW_{video} = 11.74\ Mbps$$

Se requiere de 11.74 Mbps para transmitir video en tiempo diferido.

La Tabla 16 muestra los valores obtenidos en los escenarios de transmisión de datos, donde se toma en cuenta si se agruparan los invernaderos de la florícola.

Tabla 16. Resumen de escenarios de transmisión de datos

Tipo de transmisión	**Tiempo de transmisión**	**Tasa recomendada por invernadero**	**4 invernaderos por AP**	**5 invernaderos por AP**
Tiempo Real				
Imágenes	3 h	8 Mbps	32 Mbps	40 Mbps
Video	3 h	15,65 Mbps	62,60 Mbps	78,25 Mbps
Tiempo Diferido				
Imágenes	4 h	6 Mbps	24 Mbps	30 Mbps
Video	4 h	11,74 Mbps	46,96 Mbps	58,70 Mbps

Los resultados obtenidos demuestran que la transmisión en tiempo diferido reduce la demanda instantánea del ancho de banda en comparación a la transmisión en tiempo

real. Al determinar una ventana de tiempo más amplia el requerimiento por invernadero se reduce para imágenes de 8 Mbps a 6 Mbps y de video de 15.65 Mbps a 11.75 Mbps. Por esta razón, se considera más conveniente el almacenamiento local y la transmisión de datos en tiempo diferido.

3.5 Evaluación de tecnologías de comunicación aplicables

La evaluación de tecnologías de comunicación tuvo como propósito la identificación de la alternativa más conveniente para garantizar la conectividad en la florícola muestra de estudio. Por lo tanto, se analizaron diferentes opciones de acceso local y backhaul para el transporte de datos, tomando en cuenta las características técnicas y el comportamiento de estas frente a las condiciones operativas del sistema como el ancho de banda requerido, latencia, cobertura, disponibilidad, facilidad de despliegue y compatibilidad con aplicaciones de automatización, monitoreo y transmisión de información. Con base a la información reunida y la comparativa de las tecnologías de comunicación, se estructuró una tabla de análisis multicriterio que permitió evaluar técnicamente las tecnologías candidatas y respaldar la elección de la arquitectura de conectividad más idónea.

3.5.1 Tecnologías candidatas evaluadas

En esta fase se consideraron cuatro tecnologías candidatas para la aplicación de la conectividad en el sector florícola, las tecnologías muestras de estudio son: radioenlaces inalámbricos terrestres tipo PtP, red móvil, internet satelital Starlink y fibra óptica. La selección de estas alternativas corresponde a su viabilidad para resolver problemas de conectividad en zonas rurales, su aplicación puede variar desde enlaces de acceso, backhaul o red troncal, dependiendo de la estructura disponible en la ubicación geográfica y requisitos del sistema.

Se debe analizar de forma separada las tecnologías de acceso local y de backhaul ya que los requerimientos de cada segmento no son equivalentes. En la red interna los criterios evaluables son cobertura dentro del lugar, facilidad de instalación, resistencia a condiciones ambientales, capacidad de alimentación de equipos terminales y compatibilidad con equipos terminales. En el backhaul, las variables de capacidad de

transmisión, latencia, disponibilidad del servicio, dependencia de infraestructura, escalabilidad y costo de implementación para conectar la florícola con la red externa. Debido a esta razón se las analiza en apartados diferentes permitiendo una comparación más clara y coherente de las funciones principales de cada tecnología en el sistema de conectividad propuesto.

Para analizar de forma ordenada la conectividad requerida en la florícola, las tecnologías fueron clasificadas en dos grupos: tecnologías de acceso local y tecnologías de backhaul. La tecnología de acceso local o también llamada red interna está encargada de conectar los dispositivos finales del invernadero (robot/cámaras), mientras que la red de backhaul transportan la información desde la red interna hacia la red de internet. De este modo, las tablas comparativas sustentan la toma de decisiones al momento de definir la propuesta de conectividad siendo esta coherente con las condiciones del sistema en el entorno florícola rural.

3.5.2 1. Tecnologías de Acceso Local / Red Interna

Entre las tecnologías de acceso local se consideraron las tecnologías de Wifi 802.11 b/g/n/ac, Zigbee, LoRaWAN, Bluetooth y ethernet. Entre los criterios técnicos se tomaron en cuenta los que son orientados al funcionamiento interno de la red como ancho de banda, latencia, cobertura, frecuencia, disponibilidad, facilidad de despliegue y compatibilidad con aplicaciones de automatización y dispositivos finales. Estos parámetros permiten analizar el rendimiento teórico y aplicabilidad de cada tecnología en el entorno florícola en zonas rurales, donde la distribución de invernaderos y condiciones del ambiente están directamente relacionadas al comportamiento de la red.

a. Wifi 6

La Tabla 17 señala que Wifi 6 presenta un ancho de banda de hasta 800 Mbps y latencias inferiores a 10 m. su cobertura por nodo se ubica entre 30 y 100 m operando en las bandas 2.4, 5 y 5 GHz, por lo que su desempeño puede verse afectado debido a las condiciones del invernadero. Su fuerte radica en su buena capacidad para soportar video, imágenes y tráfico de alta demanda.

En este estudio, se sugiere que la función más adecuada para esta tecnología es la de red de acceso local en zonas cercanas como: áreas de empaque, cuartos técnicos o lugares donde opera el robot dentro de la florícola. Su implementación es viable cuando se requiere alta capacidad de transmisión de información. Sin embargo, presenta una limitación es la degradación del rendimiento en zonas con obstrucción o topología compleja. Por ello, se sugiere su implementación a distancias cortas con un diseño de cobertura optimizado.

b. Zigbee

En el análisis comparativo de la Tabla 17Tabla 17, Zigbee ofrece un ancho de banda de hasta 250 kbps con latencias entre 20 y 100 ms. Su cobertura por nodo es de 100 m aproximadamente, aunque puede ampliarse a través de topologías mesh. Opera en 2.4 GHz.

Como objeto de este estudio, al tener un consumo energético y CAPEX bajo y buena escalabilidad, la convierte en una alternativa eficiente para aplicaciones IoT de monitoreo distribuido y como red de sensores y control interno. A pesar de técnicamente viable no es capaz de soportar video o grandes volúmenes de datos, por lo que no se la recomienda como tecnología principal sino como complemento para sensores de campo.

c. LoRaWAN

Según la Tabla 17, LoRaWAN es una tecnología con un ancho de banda muy bajo, con un rango de 0.3 a 50 kbps, con latencias altas del orden de segundos. Esta tecnología destaca por su muy bajo consumo energético y su elevada escalabilidad para redes con gran cantidad de nodos.

En esta investigación, se establece que su función más adecuada es la de conectividad IoT para telemetría de largo alcance, especialmente en áreas abiertas o puntos lejanos a la finca florícola ya que posee una cobertura amplia en un rango de entre 5 y 15 km. Su viabilidad es alta en aplicaciones de monitoreo ambiental y sensado, sin embargo, se limita por el tráfico intensivo, imágenes o video.

d. Bluetooth BLE

De acuerdo con el análisis comparativo de la Tabla 17, Bluetooth BLE dispone de un ancho de banda medio de 1 Mbps, latencias de 15 a 40 ms y coberturas cortas de 10 a 50 m.

En este estudio, el uso adecuado sería para comunicación a corto alcance o configuración local, por esta razón, su viabilidad es limitada para la propuesta de conectividad.

e. Ethernet

En la Tabla 17se describe que Ethernet ofrece un ancho de banda superior a 10 Gbps, con latencia mínima y alta disponibilidad. Su cobertura depende de su cableado, con una distancia que debe ser de hasta 100 m por tramo.

En esta propuesta se define que su función más adecuada es la de infraestructura fija para estaciones de procesamiento. Su implementación es viable en puntos fijos, sin embargo, se limita en terrenos extensos debido a la necesidad de cableado.

En la Tabla 17, se describe la comparación entre las tecnologías disponibles para sustentar la selección de la tecnología de acceso local idónea.

Tabla 17. Comparación de tecnologías de acceso local.

Parámetro técnico	**WiFi 6**	**Zigbee (802.15.4)**	**LoRaWAN**	**Bluetooth (BLE)**	**Ethernet**
Ancho de banda máximo	Muy alto (hasta 1 Gbps)	Bajo (250 kbps)	Muy bajo (0.3 - 50 kbps)	Medio (2 Mbps)	Muy alto (10+ Gbps)
Latencia típica	Baja (<10 ms)	Media (20-100 ms)	Alta (segundos)	Media (15-40 ms)	Mínima (<1 ms)
Cobertura por nodo	Corta (30-100m)	Media (10-100m - Mesh)	Muy amplia (5-15 km)	Corta (10-50m)	Cable (100m por tramo)
Frecuencia de operación	2.4 / 5 / 6 GHz	2.4 GHz	Sub-GHz (915 MHz/868 MHz)	2.4 GHz	Banda base
Sensibilidad climática	Media (Humedad/ Obstáculos)	Baja	Muy Baja (Alta penetración)	Media	Nula (si el cable es exterior)
Infraestructura requerida	Routers / APs	Coordinador + Nodos	Gateway + Servidor	Dispositivo central	Switches / Cableado

Parámetro técnico	WiFi 6	Zigbee (802.15.4)	LoRaWAN	Bluetooth (BLE)	Ethernet
Escalabilidad	Media	Alta (Red Mesh)	Muy alta (Miles de nodos)	Baja	Limitada físicamente
Disponibilidad (SLA)	99.9%	Alta	Muy alta	Media	99.99%
Requisitos de energía	Altos	Muy bajos (Batería años)	Extremadamente bajos	Muy bajos	Constante (PoE)
Regulación / espectro	Libre (No licenciado)	Libre (No licenciado)	Libre (No licenciado)	Libre	No aplica
Adecuación IoT florícola	Media (Zonas de empaque)	Alta (Control de invernadero)	Óptima (Campo abierto)	Baja (Sensores móviles)	Alta (Sistemas fijos)
Soporte para video	Excelente	No	No	No	Excelente
Viabilidad en montaña	Limitada por obstáculos	Buena (por saltos Mesh)	Excelente (Línea de vista)	Mala	Difícil (por cableado)

3.5.3 2. Tecnologías de Acceso a Internet (WAN)

En las tecnologías de acceso a internet se consideró a internet satelital, red móvil terrestre, internet fijo inalámbrico WISP y fibra óptica, estas son las alternativas disponibles que tiene el sistema para transportar los datos desde la red local hacia una red externa, ya sea un proveedor de servicios, plataforma en la nube o servidor remoto.

a. Radioenlace PtP

De acuerdo con el análisis comparativo de la Tabla 18, esta tecnología es capaz de alcanzar los 150 Mbps, manteniendo latencias entre 17 y 24 ms. La cobertura efectiva oscila entre 10 y 40 km, aunque esto se limita a la topografía y la línea de vista. Por lo general, opera en bandas de 2.4, 5 o 5.8 GHz, donde el despeje de la zona de Fresnel resulta indispensable para garantizar la estabilidad del enlace.

En este caso de estudio, la función más adecuada es la del backhaul local, ya que, interconecta nodos fijos dentro de la florícola o entre puntos cercano de agregación de tráfico. Se valida su potencial para redes agrícolas privadas, sin embargo, se señala como riesgo la interrupción del enlace por pérdida de línea de vista o interferencias.

b. Red Móvil 4G/5G

Este estudio toma en cuenta el escenario de 4G rural, la Tabla 18 indica que esta tecnología indica velocidades de hasta 110 Mbps de descarga y 37 Mbps de subida por celda LTE, latencias de 30 ms a 60 ms y un alcance de 5 a 15 km por estación base en zona rural en la banda de 700 MHz. La red móvil no requiere de línea de vista directa entre la red troncal y el usuario. Su desempeño depende de la cobertura disponible de la operadora, la congestión de red y capacidad de la celda.

El rendimiento de la red móvil se limita a la fluctuación de cobertura en áreas rurales y la dependencia del operador. Por esta razón, el estudio la considera adecuada si existe cobertura celular rural, y sugiere contratar planes de datos corporativos para mitigar riesgos.

c. Internet Satelital Starlink

Según la Tabla 18, brinda velocidades de descarga entre 85 y 145 Mbps, subida entre 7.5 y 18.5 Mbps y latencias entre 35 y 65 ms. Su fortaleza es que proporciona cobertura regional satelital y no depende de infraestructura terrestre local para el acceso final. Esta tecnología no requiere de línea de vista directa, pero si necesita visibilidad hacia el satélite.

Sin embargo, sus limitaciones de esta tecnología están ligadas a la sensibilidad climática, consumo energético del equipo terminal, costos del servicio, interferencias por vegetación o condiciones climáticas. En la investigación, Starlink es planteada como acceso principal a internet en zonas remotas o también como enlace de respaldo en caso de fallas de red terrestre.

d. Fibra Óptica

La fibra óptica es la alternativa cableada más estable y mayor capacidad, en la Tabla 18, de describe como una red de alta velocidad con gran capacidad de transporte de datos y latencias de 1 a 10 ms y capacidades entre 1 y 10 Gbps en redes FTTH. Sin embargo, su implementación en áreas rurales implica obra civil, tendido físico de cable e inversión significativa.

Con el fin de visualizar las principales diferencias técnicas y operativas entre las tecnologías de backhaul candidatas a evaluarse, se presenta la Tabla 18, en la cual se comparan parámetros técnicos como capacidad, latencia, cobertura, infraestructura requerida, disponibilidad, requerimientos energéticos y adecuación para monitoreo remoto. Esta comparación es la base para el análisis posterior para escoger la tecnología más adecuada para resolver los problemas de conectividad en la florícola de estudio.

Tabla 18. Comparación técnica general de las tecnologías de backhaul candidatas de conectividad.

Parámetro técnico	**Internet satelital (Starlink)**	**Red móvil terrestre (4G rural)**	**Internet fijo inalámbrico WISP (PtP - PtMP)**	**Fibra óptica**
Ancho de banda máximo	85–145 Mbps DL; 7.5–18.5 Mbps UL	hasta 110 Mbps DL y 37 Mbps UL por celda LTE	hasta 150 Mbps por enlace PtP	1–10 Gbps en redes FTTH
Latencia típica	35–65 ms	30–60 ms en redes LTE	17–24 ms	1–10 ms en redes ópticas
Cobertura por nodo	cobertura regional satelital [1]	5–15 km por estación base rural	10–40 km por radioenlace PtP	depende del tendido de fibra
Frecuencia de operación	banda Ku/Ka (≈10–30 GHz)	banda 700 MHz (B28)	2.4 GHz / 5 GHz / 5.8 GHz	No aplica
Sensibilidad climática	moderada (atenuación por lluvia)	baja a moderada	moderada (afectado por obstáculos y clima)	Muy baja
Infraestructura requerida	terminal satelital + router	estación base + backhaul	torres + radios + antenas direccionales	cableado óptico + nodos activos
Escalabilidad	alta mediante nuevos terminales	media aumentando estaciones base	media–alta agregando enlaces	muy alta en redes ópticas
Disponibilidad (SLA)	99–99.5 %	99–99.9 % redes móviles	97–99 % redes inalámbricas	hasta 99.99 % redes ópticas
Requisitos de energía	50–100 W terminal	1–2 kW estación base	10–40 W nodo radio	100–300 W nodos activos
Regulación / espectro	No requiere espectro para usuario	Espectro licenciado LTE	Bandas libres ISM	No aplica
Adecuación para IoT florícola	Adecuada para monitoreo remoto	Adecuada con cobertura celular	Adecuada para redes privadas agrícolas	excelente como backbone
Soporte para video	Video con >80 Mbps	Video depende de la capacidad	Video en enlaces de alta capacidad [3]	excelente soporte para video
Viabilidad en topografía montañosa	alta	media	Media (requiere LoS)	baja–media

En la arquitectura planteada, la función más coherente es la red troncal o backbone principal, sirviendo de base para que tecnologías inalámbricas puedan extender la conectividad hacia sectores específicos de la finca. Esta tesis indica que como backbone es excelente y ante el riesgo de cortes por obras externas, se recomienda contratar la disponibilidad del servicio (SLA) con el proveedor de internet. La disponibilidad dependerá directamente del servicio vigente en la zona y lo que se contrate. En el caso de la florícola estudiada se cuenta con acceso a fibra óptica a través de un proveedor de internet. En la Tabla 19 se presenta la síntesis te las tecnologías WAN.

Tabla 19. Síntesis de las tecnologías de conectividad evaluadas

Parámetros	**Radioenlace PtMP**	**Fibra óptica**	**Starlink**	**Red móvil 4G/5G**
Tipo de solución	Red inalámbrica multipunto	Red cableada de alta capacidad	Internet satelital	Red celular pública
Uso principal	Conectar varios nodos remotos con un nodo principal	Conectar nodos mediante enlaces físicos	Dar salida a internet en zonas rurales	Conectar dispositivos mediante cobertura móvil
Capacidad para imágenes/video	Alta	Muy alta	Media/alta	Variable
Cobertura en finca	Alta con línea de vista	Alta con tendido físico	No cubre nodos internos por sí sola	Depende de cobertura del operador
Escalabilidad	Alta para varios nodos	Media/alta, requiere nuevo tendido	Media, depende de equipos adicionales	Media, depende de señal y planes
Despliegue en zona rural	Rápido y flexible	Más complejo por canalización/tendido	Rápido	Rápido si existe cobertura
Estabilidad	Alta si existe línea de vista	Muy alta	Variable por clima/congestión	Variable por señal y operador
Mantenimiento	Medio	Bajo/medio	Bajo	Bajo
Adecuación al proyecto	Alta	Alta	Media	Media/baja

3.5.4 Tecnologías de Distribución o Transporte

e. Radioenlace PtMP inalámbrico

El enlace punto multipunto inalámbrico conecta varios nodos remotos con el nodo principal a través de enlaces de radio. La Tabla 20, describe que ésta trabaja en las bandas 5 GHz o 5.8 GHz, con capacidades aproximadas de 100 a 450 Mbps por sector,

dependiendo del equipo, la distancia y la línea de vista. La latencia típica esta entre 2 y 10 ms, es capaz de cubrir distancias de 500 m a 5 km.

f. Fibra óptica

En la Tabla 20 se detalla que las velocidades que ésta ofrece es 1 Gbps hasta 10 Gbps, con una latencia muy baja, generalmente menor a 1–5 ms. En redes GPON puede alcanzar hasta 20 km y atender hasta 64 ONUs.

Es una alternativa robusta debido a su velocidad y baja latencia, pero requiere de infraestructura y mano de obra civil para su despliegue.

g. Mesh inalámbrico

Esta tecnología consta en la interconexión de varios nodos inalámbricos entre sí con el objetivo de extender la cobertura de la red. La Tabla 20 describe las bandas de trabajo del mesh inalámbrico que está en 2.4 GHz y 5 GHz, con capacidades aproximadas de 50 a 300 Mbps, dependiendo de la cantidad de saltos y calidad de señal, y a latencia típica varía entre 10 y 50 ms.

Es útil para cubrir la cobertura en zonas específicas, sin embargo, para ser usada como red de transporte principal no se recomienda ya que el rendimiento disminuye cuando existen varios saltos, la calidad de la señal se degrada o existen interferencias ambientales como es el caso de los invernaderos de la florícola.

h. LTE Privado

El LTE privado es una red celular que se implementa localmente para brindar conectividad a varios usuarios o dispositivos en un área específica. La Tabla 20 describe los parámetros técnicos de esta tecnología, describiendo que puede alcanzar velocidades de 100 Mbps a 1 Gbps, con latencias entre 20 y 40 ms. Su obertura está entre 1 y 5km por celda, lo que permite cubrir áreas amplias.

Para la implementación de esta tecnología se requiere infraestructura como son estaciones base, antenas, tarjetas SIM y regulación del espectro. Aunque es una tecnología viable es costosa debido a la ausencia de infraestructura de red en zonas rurales. La Tabla 20 realiza la comparación de las tecnologías de transporte.

Tabla 20. Tabla comparativa de tecnologías de transporte.

Parámetro técnico	**Radioenlace PtMP inalámbrico**	**Fibra óptica**	**Mesh inalámbrico**	**LTE privado**
Ancho de banda máximo	100 a 450 Mbps por sector	1 Gbps a 10 Gbps	50 a 300 Mbps	100 Mbps a 1 Gbps
Latencia típica	2 a 10 ms	< 1 a 5 ms	10 a 50 ms	20 a 40 ms
Cobertura por nodo	500 m a 5 km con línea de vista	Hasta 20 km en GPON	50 a 300 m por nodo	1 a 5 km por celda
Frecuencia de operación	5 GHz / 5.8 GHz	No usa RF	2.4 GHz / 5 GHz	Bandas LTE autorizadas
Sensibilidad climática	Media; afectado por obstáculos, lluvia intensa e interferencia	Baja; inmune a interferencia RF	Media; afectado por obstáculos y saturación	Media; depende de señal, obstáculos y cobertura
Infraestructura requerida	Torre o mástil, antena sectorial, CPE, PoE y línea de vista	Postes, fibra, ODF, cajas, fusiones, OLT/ONU	Varios AP o nodos repetidores	eNodeB, core LTE, antenas, SIM y licencias
Escalabilidad	Alta; 10 a 30 clientes por sector	Alta; 32 a 64 ONUs por puerto GPON	Media; rendimiento baja con varios saltos	Alta; muchos usuarios por celda
Disponibilidad / SLA	95 % a 99 % si está bien diseñado	99 % o superior	90 % a 95 %	95 % a 99 %
Requisitos de energía	Bajo a medio, 10 a 25 W por equipo	Medio, 5 a 20 W por ONU/AP	Medio, 10 a 20 W por nodo	Alto, 50 W a más de 200 W
Regulación / espectro	Uso libre, pero con límite de potencia	No requiere espectro	Uso libre, sujeto a interferencia	Requiere espectro autorizado o licenciado
Adecuación para la florícola	Alta, útil para varios invernaderos	Alta, pero requiere tendido físico	Media, útil como apoyo de cobertura	Media, viable pero más costosa
Soporte para video	Bueno, soporta video si hay buen enlace	Excelente, ideal para video e imágenes	Regular, baja con varios saltos	Bueno, depende del ancho de banda disponible
Viabilidad en topografía montañosa	Buena si existe línea de vista	Media, depende del tendido	Baja a media	Media, depende de cobertura celular

3.5.5 Matriz comparativa multicriterio

Para la fundamentar de manera objetiva la selección de la tecnología, se realizó una matriz comparativa multicriterio. Esta metodología permitió evaluar varios criterios, asignando a cada uno un peso proporcional a su relevancia dentro del sistema. El resultado no busca señalar a una sola tecnología como “la mejor” de forma absoluta,

sino en identificar que alternativa es la más adecuada para cada función dentro de la arquitectura de red.

a. Metodología de evaluación

Se elaboró dos matrices de cumplimiento, una para la red de acceso y una para el backhaul, estas matrices están basadas en los requerimientos iniciales del sistema y los requerimientos de arquitectura definidos previamente. La valoración se realizó mediante una escala binaria, donde "1" representa el cumplimiento del requisito y "0" el incumplimiento.

- ***Matriz multicriterio red de acceso***

La Tabla 21, indica que tecnologías de red de acceso cumplen los requerimientos establecidos previamente en la arquitectura propuesta.

Tabla 21. Tabla multicriterio de red de acceso.

Parámetro	**WiFi 6**	**Zigbee 802.15.4**	**LoRaWAN**	**Bluetooth BLE**	**Ethernet**
SySR1	1	0	0	0	1
SySR2	1	1	1	0	1
SySR3	1	0	0	0	1
SySR5	1	1	1	0	1
SySR6	1	0	0	0	1
SySR7	1	1	1	1	1
SySR9	1	1	1	0	1
SySR10	1	1	1	0	1
SySR11	1	0	0	0	1
SRSH3	1	1	1	0	1
Puntuación	10	6	6	1	10
Resultado	Seleccionado	Alternativa para sensores	Alternativa para telemetría rural	No recomendado	Alternativa robusta cableada

Ethernet obtuvo una buena puntuación, no se selecciona como tecnología de red de acceso ya que el sistema de monitoreo considera robots o nidos de monitoreo que requieren movilidad dentro del entorno florícola, no es la mejor opción para este caso. Wifi 6 es seleccionado, ya que permite la transmisión de información de forma inalámbrica, puede integrarse fácilmente con otras tecnologías. Wifi 6 también permite

que los dispositivos de monitoreo se conecten de forma inalámbrica a la red y suban la información previamente recolectada en la florícola.

- ***Matriz Multicriterio red de backhaul***

La Tabla 22 muestra la que tecnologías cumplen con los requerimientos de la arquitectura de red propuesta respecto a la red de backhaul.

Tabla 22. Tabla multicriterio de red de backhaul.

Parámetro	Radioenlace PtMP	Fibra óptica	Starlink	Red móvil 4G/5G
SySR1	1	1	1	1
SySR2	1	1	0	0
SySR3	1	1	1	1
SySR5	1	1	1	0
SySR6	1	1	1	0
SySR7	1	1	0	1
SySR9	1	1	1	1
SySR10	1	1	1	1
SySR11	1	1	1	1
SRSH3	1	1	0	0
Puntuación	10	10	7	6
Resultado	Seleccionado	Alternativa robusta	Alternativa viable de backhaul	Alternativa de respaldo condicionada

La matriz comparativa multicriterio permite observar que las tecnologías que presentan mayor compatibilidad con los requisitos del proyecto son el radioenlace punto-multipunto y la fibra óptica. El radioenlace PtMP resulta adecuado para comunicar varios nodos remotos ubicados en invernaderos con un nodo principal, mientras que la fibra óptica ofrece una solución robusta, estable y de alta capacidad para la transmisión de imágenes, video y datos agrícolas. Por tanto, ambas tecnologías se consideran viables para el diseño de la solución de conectividad florícola.

- ***Matriz Multicriterio de red de Transporte***

En la Tabla 23, se realiza la tabla multicriterio de la red de transporte, respecto a los requerimientos establecidos previamente.

Tabla 23. Tabla multicriterio de red de transporte.

Parámetro	Radioenlace PtMP inalámbrico	Fibra óptica	Mesh inalámbrico	LTE privado
SySR1	1	1	0	1
SySR2	1	1	1	1
SySR3	1	1	1	1
SySR5	1	1	0	1
SySR6	1	1	0	1
SySR7	1	1	1	1
SySR9	1	1	1	1
SySR10	1	1	1	1
SySR11	1	1	1	1
SRSH3	1	1	0	1
Puntuación	10	10	6	10
Resultado	Seleccionado	Alternativa robusta	Alternativa complementaria	Alternativa especializada condicionada

Con base a la matriz de cumplimiento se selecciona la arquitectura PtMP para red de transporte ya que cumple con los requerimientos del sistema y permite conectar el nodo principal con los secundarios sin necesidad de extender cableado físico. La fibra óptica es una alternativa robusta por su alta capacidad, baja latencia y estabilidad. Aunque su implementación es compleja y requiere de infraestructura se puede implementar para satisfacer las necesidades de la florícola.

3.6 Diseño de la arquitectura de red propuesta

3.6.1 Arquitectura lógica general de la solución

Tras haber definido los requerimientos de la arquitectura de red, analizado el tráfico que debe soportar y las tecnologías viables para su implementación, en la Figura 13. Diseño lógico de la arquitectura de red propuesta se plasma la arquitectura lógica general de la solución.

La arquitectura lógica propuesta se estructura por capas, con el fin de separar las funciones de adquisición de datos, acceso, agregación, transporte, seguridad y servicios en la nube.

Figura 13. Diseño lógico de la arquitectura de red propuesta

A continuación, se describe el funcionamiento de cada capa:

b. Capa de adquisición

La capa de adquisición está conformada por los dispositivos instalados dentro de los invernaderos. En esta capa se considera que la red pueda soportar las diferentes fuentes de datos que se revisaron en la Tabla 4.

c. Capa de acceso

Permite la conexión de los dispositivos de la capa de adquisición hacia la red local. Esta capa se compone de puntos de acceso Wi-Fi ubicados cerca de los invernaderos, de manera que el robot pueda asociarse a la red durante su recorrido o en puntos definidos de carga o subida de información. En esta capa también podrían conectarse cámaras IP mediante Wi-Fi o Ethernet si la empresa decide añadir dichos dispositivos.

d. Capa de agregación

Esta capa está compuesta por switches, encargados de recibir el tráfico generado por los puntos de acceso, cámaras IP y sensores. Estos deben ser PoE (Power over Ethernet) debido a que esto reducirá el cableado, lo cual es crítico a la hora de instalar en zonas agrícolas. La ubicación de los switches es importante, ya que deben brindar conexión a los dispositivos sin superar la distancia máxima recomendada de 100 m para enlaces Ethernet, conforme a los criterios de cableado estructurado establecidos en ANSI/TIA-568 e ISO/IEC 11801.

También ordena el tráfico antes de enviarlo hacia la capa de transporte y mejora el rendimiento de la red. Se recomienda aplicar segmentación lógica mediante VLAN ya que reduce dominios de broadcast y permite aplicar políticas diferenciadas de seguridad y priorización [69].

La segmentación lógica sugerida se presenta en la Tabla 24:

Tabla 24. Segmentación VLAN para la arquitectura de red

VLAN	**Uso**	**Justificación**
VLAN 10	Administración	Gestión de routers, switches, AP, radios, OLT/ONT o equipos de red.
VLAN 20	Robots móviles	Tráfico de imágenes, video y telemetría del robot.
VLAN 30	Cámaras IP	Tráfico de videovigilancia fija.
VLAN 40	Sensores IoT	Datos ambientales de bajo consumo y bajo ancho de banda.

e. Capa de transporte

Define el medio que interconecta los nodos de agregación con el nodo principal o gateway de la florícola. En esta investigación se consideran dos alternativas de diseño:

- ***Red inalámbrica***

Se plantea una topología de transporte punto a multipunto, debido a la distribución espacial de los invernaderos y la necesidad de interconectar varios nodos secundarios hacia un nodo principal de concentración. A diferencia de una topología punto a punto, donde cada enlace establece una comunicación dedicada entre dos ubicaciones

específicas, la topología punto a multipunto permite que una estación base central atienda varios nodos remotos desde un mismo punto [70].

- ***Red por fibra óptica***

La capa de transporte se implementa mediante enlaces ópticos desde el nodo principal hacia los nodos secundarios o puntos de distribución cercanos a los invernaderos. Esta opción ofrece mayor estabilidad, capacidad y menor susceptibilidad a interferencias electromagnéticas, aunque es una mayor inversión en cuanto a infraestructura.

f. Capa de núcleo/Gateway

La capa de núcleo o gateway se encarga de la interconexión de la red local de la florícola con Internet y con la plataforma en la nube. En esta capa se ubica el router principal, firewall, servidor de VPN o equipo de seguridad perimetral.

Esta capa es clave para el monitoreo remoto de la red ya que, a través de una VPN, el administrador puede ingresar a los equipos de red de forma segura.

g. Capa de nube y servicios

En esta capa se consideran servicios como almacenamiento de imágenes, dashboards y servicios de procesamiento. Es decir, en esta capa se da la solución final tanto para la empresa que desarrolla el sistema de monitorización y para el personal de la florícola que vendría a ser el beneficiario directo del proyecto.

3.7 Diseño de la red inalámbrica

3.7.1 Arquitectura física de la solución inalámbrica

Se selecciona la alternativa inalámbrica para la capa de transporte porque permite conectar el área productiva de los invernaderos con el gateway principal de la red, ubicado en el punto donde la florícola dispone de acceso a Internet. Esta solución es conveniente ya que la distancia entre ambos puntos supera los 100 m recomendados para conexiones Ethernet sobre par trenzado y el costo de instalación de cableado seria

mayor. Además, en la visita técnica se observó una torre de telecomunicaciones en el predio, lo que facilitaría la instalación de los equipos necesarios para los radioenlaces.

En la Figura 14 se muestra la ubicación de la torre identificada, y también la distancia más cercana a la concentración de los invernaderos.

Figura 14. Ubicación de la torre en el predio. Google Earth

a. Criterios de diseño de la red inalámbrica

Se establecieron criterios técnicos, operativos, ambientales y normativos derivados de los requerimientos funcionales y no funcionales definidos previamente, estos criterios se describen en la Tabla 25.

Tabla 25. Descripción de los criterios para el diseño de la red inalámbrica.

Criterio de diseño	Aplicación en el diseño	Requerimientos relacionados
Distribución física de nodos	Ubicar nodos secundarios en puntos estratégicos para agrupar varios invernaderos cercanos.	StSR4, SySR2, SySR9, SRSH4, RF2, RNF3
Topología de transporte	Definir una topología punto a multipunto entre el nodo principal y los nodos secundarios.	StSR4, StSR8, SySR2, SySR7, SRSH2, SRSH3, RF2, RF6
Línea de vista y Fresnel	Verificar línea de vista, despeje de zona de Fresnel, altura de antenas y orientación de enlaces.	SySR9, SRSH4, RNF3

Criterio de diseño	Aplicación en el diseño	Requerimientos relacionados
Capacidad de red	Dimensionar la red para soportar imágenes, video, telemetría y carga diferida de archivos.	StSR6, StSR9, SySR1, SySR4, SySR6, RF1, RF4, RNF2
Escalabilidad	Permitir agregar nuevos invernaderos, robots, cámaras o nodos sin rediseñar toda la arquitectura.	StSR8, SySR7, SRSH3, RF6, RNF8
Administración remota segura	Gestionar equipos mediante VLAN de administración y acceso remoto seguro por VPN.	StSR7, SySR11, RF5, RNF6
Protección ambiental y física	Usar equipos protegidos, gabinetes, canalización y medidas contra humedad, polvo y manipulación.	StSR5, SySR10, SySR12, SRSH12, RNF5, RNF7
Alimentación eléctrica	Considerar alimentación estable, PoE y respaldo energético para nodos principales y secundarios.	StSR2, SySR8, SRSH12, RNF4
Cumplimiento normativo	Ajustarse a los lineamientos del ARCOTEL	RNF3, RNF5
Mantenimiento	Facilitar monitoreo de enlaces, diagnóstico de fallas, reemplazo de equipos y crecimiento futuro.	SySR5, SRSH10, RF7, RNF8

La red inalámbrica se diseña considerando todos los criterios, ya que esto permitirá realizar una arquitectura que cumpla no solo con los requerimientos de los interesados sino también con los criterios base para un correcto funcionamiento de enlaces inalámbricos.

b. Topología punto a multipunto propuesta

Se descarta una topología punto a punto hacia cada invernadero, debido a que incrementaría la cantidad de radios, antenas, soportes, canales de operación y puntos de administración en el nodo de concentración. En el caso de la florícola que tiene 18 invernaderos, implementar un enlace PtP independiente por invernadero generaría una alta densidad de antenas en el mismo punto físico y mayor complejidad de alineación, mantenimiento y planificación espectral.

Según Cisco cuando varios equipos inalámbricos operan en zonas de cobertura cercanas, es necesario emplear canales no solapados para evitar incrementos en la utilización del canal e interferencia entre radios; si dos puntos de acceso o radios se escuchan en el mismo canal, deben compartir el medio, reduciendo la eficiencia del tiempo aire disponible [71].

Por esta razón, se propone una topología punto a multipunto, similar al modelo empleado por redes WISP [72], donde una estación base ubicada en el nodo de

concentración se comunica con varios nodos remotos. En este diseño, los CPEs (Customer Premises Equipments) no corresponden a cada invernadero individual, sino a nodos de agregación que atienden varios invernaderos mediante switch y puntos de acceso locales, tal como se observa en la Figura 15.

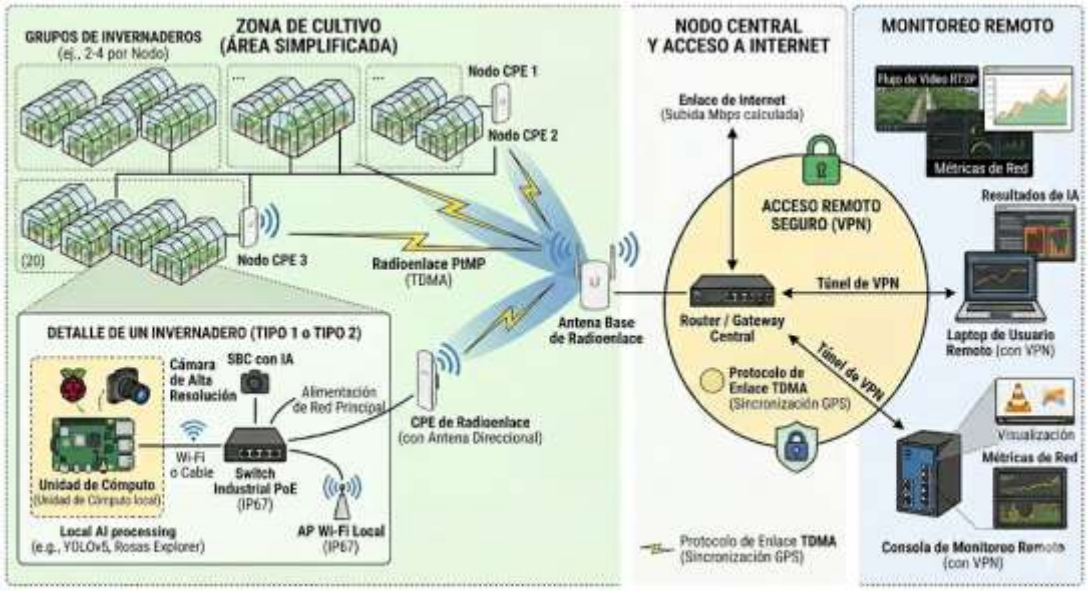


Figura 15. Topología física de la red inalámbrica propuesta.

c. Distribución física de nodos

Los nodos fueron ubicados para que puedan agrupar de 2 a 4 invernaderos contiguos o cercanos y que al cablear o instalar puntos de acceso WiFi se cubra la mayoría de su área, también se consideró ubicarlos en puntos donde existen postes de electricidad o torre en el caso del nodo principal, la correcta disposición de los nodos secundarios favorece el uso de una antena sectorial en el nodo principal. En la Figura 16 se observa cómo fueron colocados y su respectiva agrupación de invernaderos que se diferencia por colores.

Figura 16. Distribución física de los nodos

En la Tabla 26 se detallan los datos considerados para el diseño, estos fueron obtenidos a través de la herramienta Google Earth.

Tabla 26. Datos de los nodos

Nombre del nodo	Latitud (GMS)	Longitud (GMS)	Latitud (° decimales)	Longitud (° decimales)	Elevación (m s.n.m.)	Distancia al nodo principal (m)
Nodo principal	1° 6'34.34"S	78°36'39.53" O	-1.109539	-78.610982	2710	0
Nodo 1	1° 6'28.06"S	78°36'40.19" O	-1.107795	-78.611164	2711	183
Nodo 2	1° 6'30.98"S	78°36'36.88" O	-1.108605	-78.610245	2707	200
Nodo 3	1° 6'30.57"S	78°36'33.16" O	-1.108491	-78.609211	2706	312
Nodo 4	1° 6'33.33"S	78°36'30.21" O	-1.109258	-78.608391	2704	390
Nodo 5	1° 06' 31.25"S	78°36'39.61" O	-1.108681	-78.611003	2710	120

Tras analizar la ubicación de los nodos secundarios, se observa claramente que encajan en un sector mejor de 90°, las distancias muestran que no es necesario usar mucha potencia de transmisión en el nodo principal, esto se debe tomar en cuenta al momento de seleccionar los equipos y en la simulación de los enlaces radioeléctricos.

d. Componentes físicos del nodo principal y nodos secundarios

- ***Nodo principal***

Físicamente, el nodo principal está compuesto por un router o gateway principal, un switch administrable, un equipo de radio base con antena sectorial, un sistema de respaldo eléctrico y un gabinete de comunicaciones. En la Tabla 27 se detallan los componentes del nodo principal.

Tabla 27. Componentes del nodo principal

Componente	**Función**
Gateway principal	Realiza enrutamiento, NAT, firewall, VPN y control entre VLAN.
Switch administrable	Interconecta los equipos del nodo principal y permite segmentación por VLAN.
Radio base PtMP	Proporciona conectividad inalámbrica hacia los nodos secundarios.
Antena sectorial	Cubre el sector donde se encuentran ubicados los nodos secundarios.
UPS o sistema de respaldo	Mantiene operativa la red durante interrupciones eléctricas.
Gabinete de comunicaciones	Protege los equipos frente a humedad, polvo y manipulación.
Sistema de puesta a tierra	Protege los equipos frente a descargas eléctricas o sobretensiones.

- ***Nodos secundarios***

En estos nodos se instala un radio cliente o CPE, orientado hacia la estación base del nodo principal. A partir de este enlace, la conectividad se distribuye hacia los invernaderos mediante un switch PoE y puntos de acceso Wi-Fi. Esta estructura permite que los robots móviles se conecten a la red local cuando se encuentren dentro del área de cobertura Wi-Fi del invernadero o del nodo correspondiente. Asimismo, permite integrar cámaras IP y sensores IoT sin modificar la red de transporte inalámbrica. En la Tabla 28, se describen los componentes de los nodos secundarios.

Tabla 28. Componentes de los nodos secundarios

Componente	**Función**
CPE	Recibe el enlace inalámbrico desde el nodo principal.
Switch PoE	Distribuye la conectividad local y alimenta AP o cámaras mediante PoE.
Gabinete exterior	Protege equipos de humedad, polvo y condiciones ambientales.
Energía eléctrica / UPS	Alimenta los equipos activos y permite continuidad básica.

e. Elementos de acceso en los invernaderos

En Tabla 29 se describen los equipos de acceso que permiten conectar los dispositivos finales.

Tabla 29. Elementos de acceso en los invernaderos

Elemento	Función
AP Wi-Fi	Conexión inalámbrica del robot móvil.
Cable UTP exterior	Conexión entre AP/cámara y switch PoE.
Cámara IP	Monitoreo visual, si aplica.
Robot	Captura imágenes o video y los transmite hacia la red.
Almacenamiento local	Permite guardar imágenes en caso de conectividad intermitente.

En conjunto, la arquitectura física inalámbrica propuesta permite organizar la red en tres niveles: nodo principal, nodos secundarios y red de acceso en invernaderos y permite que la solución sea escalable, ya que nuevos invernaderos pueden incorporarse conectándose al nodo secundario más cercano o agregando nuevos nodos remotos dentro del sector de cobertura.

3.7.2 Selección y especificaciones técnicas de equipos inalámbricos

La selección de equipos inalámbricos se realiza en base a los criterios de diseño definidos previamente, con el propósito de mantener la trazabilidad entre las necesidades del sistema y los equipos propuestos, en esta sección solo se va a seleccionar la estación base del nodo principal y el equipo remoto compatible al primero, la selección de los equipos del nodo principal y secundario nombrados anteriormente como router y switches se van a realizan en la selección de equipos para los nodos fibra óptica ya que serían los mismos.

a. Requisitos mínimos para la selección de equipos inalámbricos

Son los requisitos que deben cumplir los equipos y son considerados para su correcta elección, ya que aquí se debe tener mucho cuidado en no elegir equipos incompatibles, sobredimensionados o que no cumplan con los requisitos previamente definidos del diseño de la red.

En la Tabla 30 se establecen los requisitos que deben cumplir los equipos y son base para la selección de los equipos porque sirven para evaluar y justificar su selección. En la Tabla 32 y Tabla 34 se observa su aplicación directa.

Tabla 30. Requisitos para la selección de equipos

Código	Requisito mínimo para la selección
REQ-E1	Operación en banda de 5 GHz
REQ-E2	Compatibilidad con topología punto a multipunto
REQ-E3	Capacidad para tráfico de imágenes, video y telemetría
REQ-E4	Potencia de transmisión ajustable
REQ-E5	Ganancia adecuada para enlaces cortos
REQ-E6	Alimentación mediante PoE
REQ-E7	Administración y monitoreo remoto
REQ-E8	Protección para operación en exteriores
REQ-E9	Menor complejidad física de instalación
REQ-E10	Costo referencial adecuado
REQ-E11	Ecosistema de marca y compatibilidad de gestión
REQ-E12	Facilidad de configuración y mantenimiento

b. Selección de equipos para el nodo principal

Para la elección de la estación base se comparan cuatro dispositivos de diferentes marcas, donde también se realiza un análisis de las antenas que son compatibles, en la Tabla 31 se describe sus características técnicas.

Tabla 31. Comparación técnica de equipos candidatos para estación base de la red PtMP

Parámetro de selección	Ubiquiti LiteAP GPS	Ubiquiti Rocket Prism 5AC Gen2 + AM-5G20-90	MikroTik mANTBox ax 15s	TP-Link WBS510 + TL-ANT5819MS
Función en la red PtMP	AP sectorial integrado para enlaces PtMP	Radio base + antena sectorial externa para PtMP	AP sectorial integrado para PtMP	Radio base + antena sectorial externa para PtMP
Banda de operación	5 GHz	5 GHz	2.4 GHz / 5 GHz	5 GHz
Tecnología inalámbrica	airMAX ac	airMAX ac + airPrism	Wi-Fi 6 / 802.11ax	IEEE 802.11a/n
Capacidad referencial	Hasta 450+ Mbps TCP/IP real	Hasta 500+ Mbps TCP/IP real	574 Mbps en 2.4 GHz y 2400 Mbps en 5 GHz	Hasta 300 Mbps teóricos
Antena	Sectorial integrada	Sectorial externa AM-5G20-90	Sectorial integrada	Sectorial externa TL-ANT5819MS
Ganancia de antena	17 dBi	19.4–20.3 dBi	12 dBi en 2.4 GHz / 15 dBi en 5 GHz	19 dBi
Cobertura sectorial	Aproximadamente 90°	91° HPOL / 85° VPOL a 6 dB	Aproximadamente 60° en 5 GHz y 90° en 2.4 GHz	120° a 6 dB / 90° a 3 dB

Parámetro de selección	Ubiquiti LiteAP GPS	Ubiquiti Rocket Prism 5AC Gen2 + AM-5G20-90	MikroTik mANTBox ax 15s	TP-Link WBS510 + TL-ANT5819MS
Interfaz de red	1 puerto Gigabit Ethernet	1 puerto Gigabit Ethernet	1 puerto Gigabit Ethernet + 1 puerto SFP compatible 2.5G	2 puertos 10/100 Mbps
Gestión y monitoreo	airOS / UISP	airOS / UISP, airView, airMagic, SNMP, SSH	RouterOS v7	PharOS / Pharos Control
Control de interferencia / co-ubicación	GPS Sync	GPS Sync + airPrism	No especifica GPS Sync	No especifica GPS Sync
Protección exterior	Exterior, -40 a 70 °C, ESD/EMP ±24 kV	Exterior, -40 a 80 °C, ESD/EMP ±24 kV, carcasa metálica	IP55, -40 a 70 °C	IP65, protección ESD 15 kV y rayos 6 kV
Precio radio	$156 aprox.	$249 aprox.	$276 aprox.	$71 aprox.
Precio antena	No requiere	$220 aprox.	No requiere	$160 aprox.

A continuación, se realiza la selección del equipo, esto se realiza a través de los requisitos de los equipos definidos previamente, en la Tabla 32 se puede observar la respectiva selección, donde cumple el requisito se representa con "1" y no cumple con "0".

Tabla 32. Evaluación de cumplimiento para equipos AP/estación base PtMP

Requisito	Ubiquiti LiteAP GPS	Rocket Prism 5AC Gen2 + AM-5G20-90	MikroTik mANTBox ax 15s	TP-Link WBS510 + TL-ANT5819MS
REQ-E1	1	1	1	1
REQ-E2	1	1	1	1
REQ-E3	1	1	1	1
REQ-E4	1	1	1	1
REQ-E5	1	0	1	0
REQ-E6	1	1	1	1
REQ-E7	1	1	1	1
REQ-E8	1	1	1	1
REQ-E9	1	0	1	0
REQ-E10	1	0	1	1
REQ-E11	1	1	1	0
REQ-E12	1	0	0	1
Total	**12/12**	**8/12**	**10/12**	**9/12**
Resultado	Seleccionado	Alternativa robusta	Alternativa viable	Alternativa económica

Se opta por el Ubiquiti LiteAP GPS tras analizar que satisface todas las exigencias del diseño. Al integrar radio y antena sectorial en un solo dispositivo, facilita enormemente el despliegue físico en campo, opera en 5 GHz, tiene interfaces Gigabit y PoE, y ofrecer sincronización GPS para mitigar el ruido entre equipos. Su implementación

representa una ventaja financiera ya que es más asequible que las soluciones de componentes separados y al evitar el sobredimensionamiento en las distancias cortas de la finca florícola, esta elección se alinea a una optimización del CAPEX o costos de inversión a largo plazo, que también es un análisis económico importante que se va a realizar en las próximas secciones.

c. Equipos candidatos para nodos secundarios

Debido a que en la sección anterior se seleccionó una estación base Ubiquiti LiteAP GPS, la comparación de estaciones cliente se realiza dentro del mismo ecosistema airMAX AC para mantener compatibilidad de gestión. En la Tabla 33 se puede observar la comparación realizada.

Tabla 33. Comparación técnica de equipos candidatos para nodos secundarios

Parámetro	**NanoStation 5AC Loco**	**NanoBeam 5AC Gen2**	**LiteBeam 5AC Gen2**	**PowerBeam 5AC Gen2**
Función	Station/CPE airMAX AC	Station/CPE airMAX AC	Station/CPE airMAX AC	Station/CPE airMAX AC
Compatibilidad con AP seleccionado	Compatible con LiteAP GPS	Compatible con LiteAP GPS	Compatible con LiteAP GPS	Compatible con LiteAP GPS
Banda de operación	5 GHz	5 GHz	5 GHz	5 GHz
Frecuencia	5150–5875 MHz	5150–5875 MHz	5150–5875 MHz	5150–5875 MHz
Ganancia de antena	13 dBi	19 dBi	23 dBi	25 dBi
Ancho de canal	10/20/30/40/50/60/80 MHz	10/20/30/40/50/60/80 MHz	PtMP: 10/20/30/40 MHz	PtMP: 10/20/30/40 MHz
Interfaz Ethernet	1 puerto Gigabit	2 puertos Gigabit	1 puerto Gigabit	1 puerto Gigabit
Alimentación	PoE pasivo 24 V	PoE pasivo 24 V	PoE pasivo 24 V	PoE pasivo 24 V
Consumo máximo	7 W	8.5 W	7 W	8.5 W
Procesador / memoria	Atheros MIPS 74Kc / 64 MB DDR2	Atheros MIPS 74Kc 720 MHz / 128 MB DDR2	MIPS 74Kc / 64 MB DDR2	MIPS 74Kc / 64 MB
Protección exterior	Sí	Sí	Sí	Sí
Administración	airOS / UISP	airOS / UISP	airOS / UISP	airOS / UISP
Complejidad física	Baja	Baja	Media	Alta
Adecuación a distancias cortas	Alta	Media/alta	Media	Baja
Precio referencial	$ 45–55 aprox.	$ 99 aprox.	$ 64–70 aprox.	$ 90–160 aprox.

Parámetro	NanoStation 5AC Loco	NanoBeam 5AC Gen2	LiteBeam 5AC Gen2	PowerBeam 5AC Gen2
Observación	Opción más adecuada para enlaces cortos y bajo costo	Opción robusta con mayor margen de enlace	Mayor ganancia; requiere ajuste de potencia	Sobredimensionado para enlaces menores a 1km

A continuación, se realiza la respectiva evaluación de cumplimiento de requisitos mínimos planteados al igual que se realizó con los equipos de la estación base, en la Tabla 34 se puede observar la evaluación.

Tabla 34. Evaluación de cumplimiento para equipos CPE de nodos secundarios.

Parámetros	NanoStation 5AC Loco	NanoBeam 5AC Gen2	LiteBeam 5AC Gen2	PowerBeam 5AC Gen2
REQ-E1	1	1	1	1
REQ-E2	1	1	1	1
REQ-E3	1	1	1	1
REQ-E4	1	1	1	1
REQ-E5	1	1	0	0
REQ-E6	1	1	1	1
REQ-E7	1	1	1	1
REQ-E8	1	1	1	1
REQ-E9	1	1	0	0
REQ-E10	1	1	1	0
REQ-E11	1	1	1	1
REQ-E12	1	1	1	0
Total	**12/12**	**12/12**	**10/12**	**8/12**
Resultado	Seleccionado	Alternativa robusta	Alternativa condicionada	No prioritario

El NanoStation 5AC Loco y el NanoBeam 5AC Gen2 obtienen la misma puntuación de cumplimiento, por ello se consideran ambos para el diseño. El NanoStation 5AC Loco por su antena de 13 dBi es suficiente para enlaces cortos y NanoBeam con los 19 dBi de ganancia puede ser útil para los nodos más lejanos. Otro parámetro que puede influir en su selección es su precio ya que el primero es más económico mientras el segundo es más costoso debido a su mayor alcance.

3.7.3 Diseño y dimensionamiento de radioenlaces

Esta sección tiene como finalidad validar la viabilidad técnica de la red inalámbrica punto a multipunto por medio de cálculos y simulaciones.

Las herramientas de planificación radioeléctrica empleadas son Radio Mobile y UISP Design Center para contrastar los resultados teóricos con simulaciones, esto es un gran recurso para analizar si los enlaces tienen viabilidad.

Se utilizan los parámetros técnicos descritos en las fichas técnicas del Ubiquiti LiteAP GPS como estación base, Ubiquiti NanoStation 5AC Loco y NanoBeam 5AC Gen2 como estaciones cliente, sus fichas técnicas completas se encuentran en el Anexo D, Anexo E y Anexo F, respectivamente.

El diseño se realizará principalmente en la banda 5725–5850 MHz debido a que se encuentra considerada en la Norma Técnica de Espectro de Uso Libre y de Espectro para Uso Determinado en Bandas Libres de ARCOTEL, el numeral 2.1.8 expresa que los sistemas que operen en esa banda pueden utilizar antenas con ganancia mayor a 6 dBi y hasta 23 dBi sin reducción de potencia; si la ganancia supera 23 dBi, se debe reducir 1 dB de potencia por cada dB excedente [73][74].

a. Distancia de los enlaces y perfil del terreno

Las distancias de los enlaces se obtuvieron a través de UISP Design que lo realiza automáticamente al proporcionar las coordenadas geográficas de cada punto y la altura de las antenas, para la estación base se considera una altura de 15 metros y para los CPEs una altura de 12 metros. En la Figura 17 se plasma la distancia y perfil del terreno de cada enlace, si se comparan con las distancias obtenidas en la Tabla 26 por medio de Google Earth se observa que son muy similares.

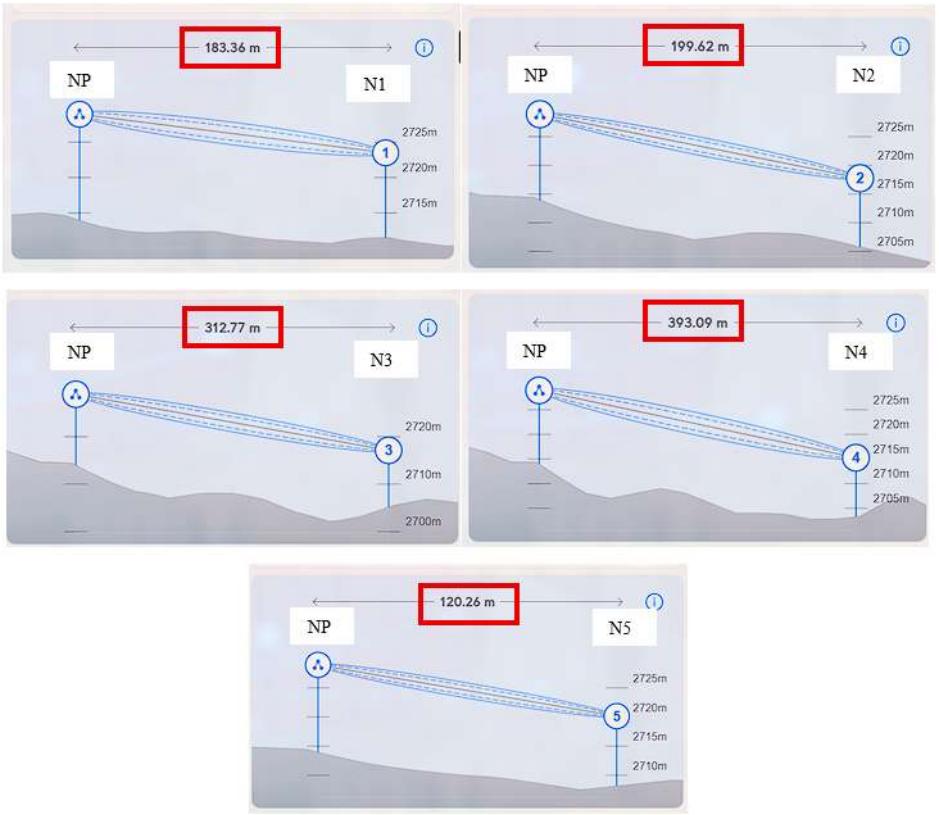


Figura 17. Distancias de cada enlace. UISP Design

Como se puede observar no existen obstrucciones y el perfil del terreno no tiene irregularidades prominentes, lo cual facilita la viabilidad de los enlaces. En la Tabla 35 se presentan los datos de las distancias en Km ya que sirven de referencia para los cálculos que se van a realizar.

Tabla 35. Distancias de los enlaces en km.

Enlace	**Distancia**
NP – N1	0.18336 km
NP – N2	0.19962 km
NP – N3	0.31277 km
NP – N4	0.39309 km
NP – N5	0.12026 km

b. Línea de vista y zona de Fresnel

La línea de vista corresponde a la trayectoria directa entre la antena transmisora y la antena receptora. Para enlaces en banda de 5 GHz no basta con que exista visibilidad física entre los puntos, ya que la señal electromagnética se propaga ocupando un volumen alrededor de la trayectoria directa esto se denomina zona de Fresnel. La

Recomendación ITU-R P.530 indica que, para frecuencias superiores a 2 GHz, la teoría de difracción requiere un despeje mínimo equivalente al 60 % del radio de la primera zona de Fresnel para aproximarse a condiciones de propagación en espacio libre [75].

En otras palabras, en caso de existir un obstáculo entre las antenas como el árbol mostrado en la Figura 18, la distancia entre su punto de mayor altura y la línea de vista debe ser superior al 60 % del valor correspondiente a la primera zona de Fresnel calculada para dicho punto [76].

Es decir:

$$r2 \geq r1 \cdot 0.6$$

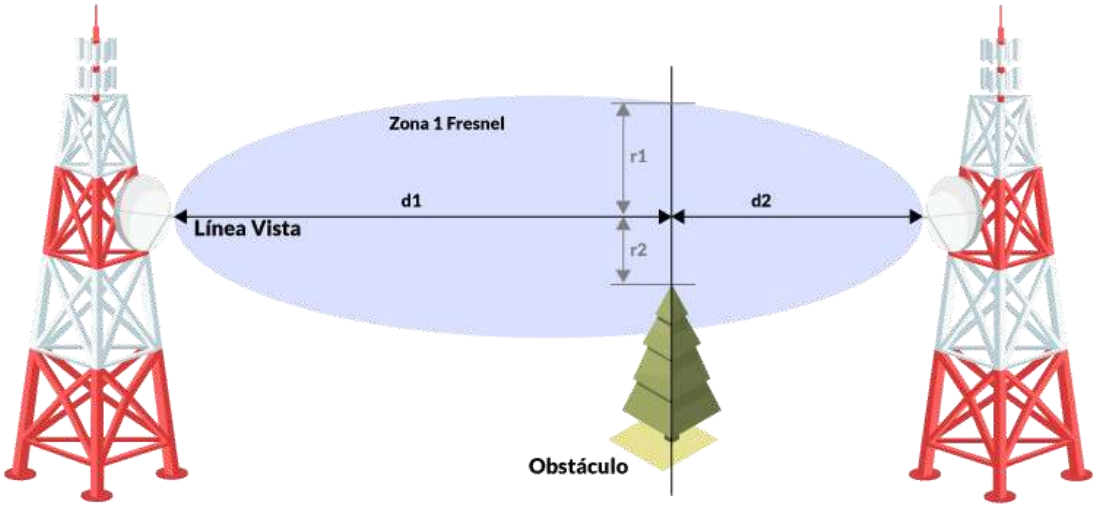


Figura 18. Ejemplo de la primera zona de Fresnel [76].

Para calcular el radio de la primera zona de Fresnel en un punto cualquiera del trayecto se emplea la Ecuación 4:

$$r_1 = 17.32\sqrt{\frac{d_1 d_2}{f(d_1 + d_2)}} \tag{4}$$

Donde:

r_1 = Radio de la primera zona de Fresnel (m)

$d_1 =$ Distancia desde el transmisor hasta el punto evaluado (km)

$d_2 =$ Distancia desde el punto evaluado hasta el receptor (km)

$f =$ Frecuencia de operación (GHz)

La fórmula en el punto medio del enlace es la que se visualiza en la Ecuación 5:

$$\boldsymbol{r_1 = 17.32\sqrt{\frac{D}{4f}}} \tag{5}$$

Donde:

$D =$ Distancia total (km) ($D = d_1 + d_2$)

A continuación, se realiza el cálculo de la primera zona de Fresnel para los enlaces aplicando la Ecuación 2, la frecuencia de referencia es 5.8 GHz.

- ***Cálculo de la primera zona de Fresnel del enlace NP – N1***

$$r_1 = 17.32\sqrt{\frac{0.18336}{4(5.8)}}$$

$$r_1 = 1.54\,m$$

- ***Cálculo de la primera zona de Fresnel del enlace NP – N2***

$$r_1 = 17.32\sqrt{\frac{0.19962}{4(5.8)}}$$

$$r_1 = 1.61\ \text{m}$$

- ***Cálculo de la primera zona de Fresnel del enlace NP – N3***

$$r_1 = 17.32\sqrt{\frac{0.31277}{4(5.8)}}$$

$$r_1 = 2.01\,m$$

- ***Cálculo de la primera zona de Fresnel del enlace NP – N4***

$$r_1 = 17.32\sqrt{\frac{0.39309}{4(5.8)}}$$

$$r_1 = 2.25\,m$$

- ***Cálculo de la primera zona de Fresnel del enlace NP – N5***

$$r_1 = 17.32\sqrt{\frac{0.12026}{4(5.8)}}$$

$$r_1 = 1.25\,m$$

c. Pérdida por espacio libre

La pérdida por espacio libre representa la atenuación que sufre la señal electromagnética al propagarse entre dos antenas en un trayecto sin obstáculos. Para su cálculo se emplea la expresión de la Ecuación 6:

$$\boldsymbol{FSPL = 92.45 + 20log_{10}(f) + 20log_{10}(D)} \tag{6}$$

Donde:

$FSPL =$ Pérdida por espacio libre (dB)

$f =$ Frecuencia de operación (GHz)

$D =$ Distancia del enlace (km)

Ya que al aumentar la frecuencia aumentan las perdidas, para el calculo se considera la frecuencia de 5.850 GHz que corresponde al extremo superior de la banda 5725–5850 MHz.

- ***Cálculo de pérdida por espacio libre del enlace NP – N1***

$$FSPL = 92.45 + 20log_{10}(5.850) + 20log_{10}(0.18336)$$

$$FSPL = 93.06\,dB$$

- ***Cálculo de pérdida por espacio libre del enlace NP – N2***

$$FSPL = 92.45 + 20log_{10}(5.850) + 20log_{10}(0.19962)$$

$$FSPL = 93.80\ dB$$

- ***Cálculo de pérdida por espacio libre del enlace NP – N3***

$$FSPL = 92.45 + 20log_{10}(5.850) + 20log_{10}(0.31277)$$

$$FSPL = 97.70\ dB$$

- ***Cálculo de pérdida por espacio libre del enlace NP – N4***

$$FSPL = 92.45 + 20log_{10}(5.850) + 20log_{10}(0.39309)$$

$$FSPL = 99.68\ dB$$

- ***Cálculo de pérdida por espacio libre del enlace NP – N5***

$$FSPL = 92.45 + 20log_{10}(5.850) + 20log_{10}(0.12026)$$

$$FSPL = 89.40\ dB$$

d. Potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE)

También conocida como EIRP (Effective Isotropic Radiated Power), determina la potencia efectiva irradiada por el sistema transmisor considerando la potencia configurada en el radio, la ganancia de la antena y las pérdidas del sistema de transmisión. En Ecuador es la Agencia de Regulación y Control de Telecomunicaciones quien regula los límites de emisión dependiendo de la banda UDBL, en la Figura 19 se observa la tabla obtenida de la Resolución ARCOTEL-2018.

Bandas de Operación	Potencia Pico Máxima del Transmisor (mW)	P.I.R.E. (mW)	Densidad de P.I.R.E. (mW/MHz)
915 – 928 MHz*	500	----	----
2400 – 2483.5 MHz*	1000	----	----
5150 – 5250 MHz*	50	200	10
5250 – 5350 MHz*	250	1000	50
5470 – 5725 MHz*	250	1000	50
5725-5850 MHz*	1000	---	----
57 – 64 GHz	500	20000	

Bandas de Operación	Intensidad de campo máximo
24.05 – 24.25 GHz	2 500 000 μV/m a 3 m

Figura 19. Límites a las transmisiones de UDBL [73].

En algunos diseños de enlaces inalámbricos se toma en cuenta que la PIRE no exceda los 36 dBm o 4000mW en la banda 5725–5850 MHz [10,77], para este diseño se va a considerar que no sobrepase los 30 dBm ya que la herramienta de UISP Design limita a ese valor como medida de seguridad para garantizar que los equipos cumplan con la ley en cualquier canal de la banda de 5 GHz, esto en el diseño no es restrictivo ya que al ser enlaces cortos ese valor es suficiente para garantizar que no hayan interferencias. La PIRE se calcula mediante la Ecuación 7:

$$\boldsymbol{PIRE = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX}} \tag{7}$$

Donde:

$\boldsymbol{PIRE}$ = potencia isotrópica radiada equivalente (dBm)

$\boldsymbol{P_{TX}}$ = potencia de transmisión configurada en el radio (dBm)

$\boldsymbol{G_{TX}}$ = ganancia de la antena transmisora (dBi)

$\boldsymbol{L_{TX}}$ = pérdidas por cable, conectores o adaptadores (dB)

En el presente diseño no se consideran pérdidas por cable coaxial ni conectores RF, debido a que los equipos seleccionados integran radio y antena en una misma unidad.

Ya que se conoce que la PIRE no debe sobrepasar los 30 dBm, la ganancia de la antena transmisora es 17 dBi y considerado una pérdida de 0 dB en conectores, la potencia de transmisión máxima sería:

$$\boldsymbol{P_{TX} = PIRE - G_{TX} + L_{TX}}$$

$$P_{TX} = 30 - 17 + 0$$

$$P_{TX} = 13\ dBm$$

e. Potencia recibida

Permite estimar el nivel de señal que llega al receptor después de considerar la potencia transmitida, las ganancias de antenas y las pérdidas del trayecto. Este parámetro permite determinar si el enlace puede operar de manera estable.

La potencia recibida se calcula mediante la Ecuación 8 o también con la Ecuación 9:

$$\boldsymbol{P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - FSLP + G_{RX} - L_{RX}} \quad (8)$$

O de forma más directa:

$$\boldsymbol{P_{RX} = PIRE - FSLP + G_{RX} - L_{RX}} \quad (9)$$

Donde:

$\boldsymbol{P_{RX}}$ = potencia recibida (dBm)

$\boldsymbol{P_{TX}}$ = potencia transmitida (dBm)

$\boldsymbol{G_{TX}}$ = ganancia de la antena transmisora (dBi)

$\boldsymbol{G_{RX}}$ = ganancia de la antena receptora (dBi)

$\boldsymbol{L_{TX}}$ = pérdidas en transmisión (dB)

$\boldsymbol{L_{RX}}$ = pérdidas en recepción (dB)

A continuación, se realiza el cálculo de cada enlace en base a la Ecuación 9 considerando la PIRE igual a 30 dBm, las pérdidas de recepción en 0 dBm, ya que de igual forma tanto el radio como la antena ya vienen integrados.

- ***Cálculo de potencia recibida del enlace NP – N1***

$$P_{RX} = 30\ dBm - 93.06\ dB + 13\ dBi - 0\ dB$$

$$P_{RX} = -50.06\ dBm$$

- ***Cálculo de potencia recibida del enlace NP – N2***

$$P_{RX} = 30\ dBm - 93.80\ dB + 13\ dBi - 0\ dB$$

$$P_{RX} = -50.80\ dBm$$

- ***Cálculo de potencia recibida del enlace NP – N3***

$$P_{RX} = 30\ dBm - 97.90\ dB + 13\ dBi - 0\ dB$$

$$P_{RX} = -54.70\ dBm$$

- ***Cálculo de potencia recibida del enlace NP – N4***

$$P_{RX} = 30\ dBm - 99.68\ dB + 13\ dBi - 0\ dB$$

$$P_{RX} = -56.68\ dBm$$

- ***Cálculo de potencia recibida del enlace NP – N5***

$$P_{RX} = 30\ dBm - 89.40\ dB + 13\ dBi - 0\ dB$$

$$P_{RX} = -46.40\ dBm$$

f. Margen de desvanecimiento

Permite determinar la diferencia entre la potencia recibida y la sensibilidad mínima del receptor, en la Ecuación 10 se representa dicha formula y se realizan los respectivos cálculos por cada enlace.

$$\boldsymbol{M = P_{RX} - S_{RX}} \tag{10}$$

$M =$ potencia recibida (dB)

$P_{RX} =$ potencia recibida (dBm)

$S_{RX} =$ sensibilidad del receptor (dBm)

Según los datos técnicos del equipo Ubiquiti Loco5AC, para la modulación 64QAM 5/6, la sensibilidad de recepción es −74dBm.

- ***Cálculo de margen del enlace NP – N1***

$$M = -50.06\ dB - (-74\ dBm)$$

$$M = 23.94\ dB$$

- ***Cálculo de margen del enlace NP – N2***

$$M = -50.80\ dB - (-74\ dBm)$$

$$M = 23.20\ dB$$

- ***Cálculo de margen del enlace NP – N3***

$$M = -54.70\ dB - (-74\ dBm)$$

$$M = 19.30\ dB$$

- ***Cálculo de margen del enlace NP – N4***

$$M = -56.68\ dB - (-74\ dBm)$$

$$M = 17.32\ dB$$

- ***Cálculo de margen del enlace NP – N5***

$$M = -46.40\ dB - (-74\ dBm)$$

$$M = 27.60\ dB$$

Según los resultados obtenidos, todos los enlaces presentan una potencia recibida superior a la sensibilidad del receptor.

g. Selección de canal e interferencia

La selección final del canal deberá realizarse considerando el nivel de ruido e interferencia presente en campo mediante un análisis de espectro, ya que al usar una banda no licenciada el ruido no es constante.

Ubiquiti ofrece herramientas como airView o airMagic para identificar canales con menor ruido, menor ocupación y mejor relación señal a ruido. AirView permite visualizar las frecuencias en uso, la actividad sobre cada frecuencia y el nivel de ruido o interferencia esperado para apoyar la planificación del canal [78,79].

En la se observa el uso de airView en las bandas de 4,9 GHz a 6,4 GHz, donde entre 5400 MHz y 5500 MHz hay más saturación, este ejemplo es extraído de la "Guía para escanear canales con airView".

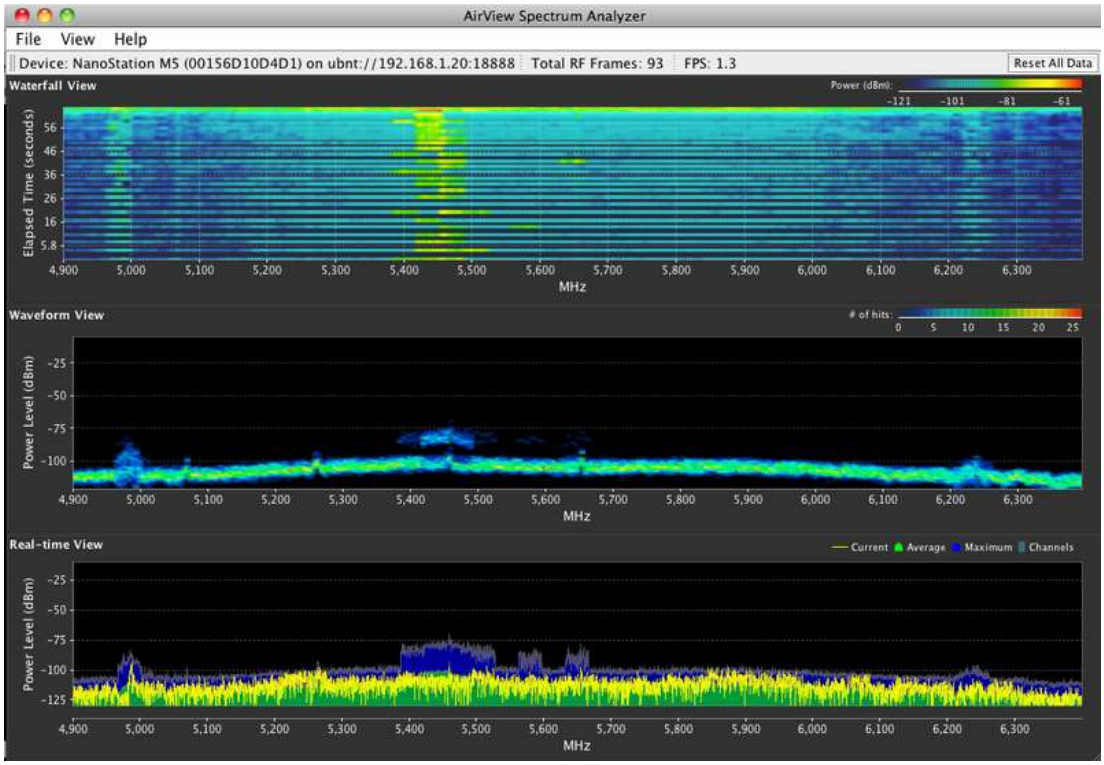


Figura 20. Uso de la herramienta AirView Spectrum Analizer [78,79].

La red inalámbrica se configura dentro de la banda 5725–5850 MHz y para la simulación en Radio Mobile se utilizó una frecuencia promedio de 5787.5 MHz.

Para el diseño inicial se mantiene un ancho de canal de 40 MHz, debido a que permite obtener mayor capacidad para transportar tráfico agregado de cámaras, puntos de acceso y dispositivos de monitoreo. Pero si en campo se detecta alta ocupación del espectro o interferencia, se podrá reducir el ancho de canal a 20 MHz para priorizar estabilidad sobre capacidad máxima.

3.7.4 Consideraciones legales y permisos para la red inalámbrica propuesta

La red inalámbrica propuesta es una red privada interna ya que el objetivo es interconectar nodos de comunicación de la florícola, los robots de monitoreo, posibles cámaras fijas y equipos de red, sin prestar servicios de telecomunicaciones a terceros.

ARCOTEL menciona que el uso del espectro radioeléctrico para la operación de redes privadas requiere considerar el tipo de banda utilizada, las condiciones técnicas de operación y los trámites correspondientes para una eventual implementación. En el caso de enlaces inalámbricos en bandas libres, la normativa diferencia entre espectro de uso libre y espectro para Uso Determinado en Bandas Libres, conocido como UDBL. Este último aplica cuando las bandas libres se utilizan para la prestación de servicios de telecomunicaciones, soporte de radiodifusión u operación de redes privadas [73].

Para el presente diseño se considera el uso de la banda de 5 GHz, especialmente el rango de 5725–5850 MHz, debido a su aplicación en enlaces punto a punto y punto multipunto de alta capacidad. ARCOTEL establece condiciones técnicas para estas bandas, por lo que el diseño respeta los límites de potencia, ganancia de antena, canalización y operación sin causar interferencia perjudicial [73]. Por ello, en el cálculo del radioenlace se considero el ajuste de potencia de transmisión y el cálculo de la PIRE, evitando operar los equipos a su potencia máxima cuando las distancias entre nodos son menores a 400 m.

En una futura implementación, la florícola o responsable del proyecto debe realizar el trámite de registro o autorización de red privada ante ARCOTEL por medio de un título habilitante de autorización de uso de frecuencias, solicitando la autorización de red privada [80]. Entre los requisitos publicados por ARCOTEL para redes privadas se incluyen la solicitud general, la declaración de responsabilidad sobre los puntos donde se instalará la red y la documentación técnica correspondiente [81]. En este trabajo, dichos formularios fueron considerados como parte del análisis normativo y se presentan llenos en el Anexo C.

Los equipos de telecomunicaciones seleccionados para la red inalámbrica deben ser o estar homologados en el sistema de homologación de ARCOTEL antes de su instalación. La homologación permite comprobar que el equipo cumple con las condiciones técnicas exigidas para su operación en el país [82].

La propuesta de red inalámbrica no solo debe cumplir criterios técnicos de cobertura, capacidad y disponibilidad, sino también condiciones regulatorias relacionadas con el uso del espectro, operación de red privada, homologación de equipos y prevención de interferencias. Por esta razón, el diseño incorporó el cálculo de potencia, la selección de banda de operación, el ajuste de PIRE y la revisión documental de formularios ARCOTEL.

3.8 Diseño de la red de fibra óptica

La arquitectura física de fibra óptica se plantea como una alternativa de conectividad robusta en cuanto a capacidad, estabilidad y escalabilidad en el entorno florícola rural. Esta arquitectura considera un nodo principal y 5 secundarios, distribuidos en lugares estratégicos en los invernaderos para capturar la información.

Para esta solución se propone una arquitectura basada en GPON/FTTX ya que, GPON opera bajo una estructura punto-multipunto a través de divisores ópticos pasivos, los cuales permiten distribuir la conectividad desde una OLT hacia varias ONU/ONT, sin requerir equipos activos en planta externa [83]. La tecnología GPON se caracteriza por tener tasas nominales de hasta 2,488 Gbit/s en bajada y 1,244 Gbit/s en subida, estos valores son adecuados para escenarios donde se requiere una alta capacidad de

transporte de datos como son imágenes y video [84]. Además, en la visita técnica realizada a la finca florícola se observaron FDB (Cajas de Distribución de Fibra Óptica), lo cual facilita el diseño de fibra ya que existen proveedores de internet en la zona. Para colocar el rack con el nodo principal se lo hace en la oficina de la florícola ya que cuenta con conexión eléctrica estable como se observa en la Figura 21.

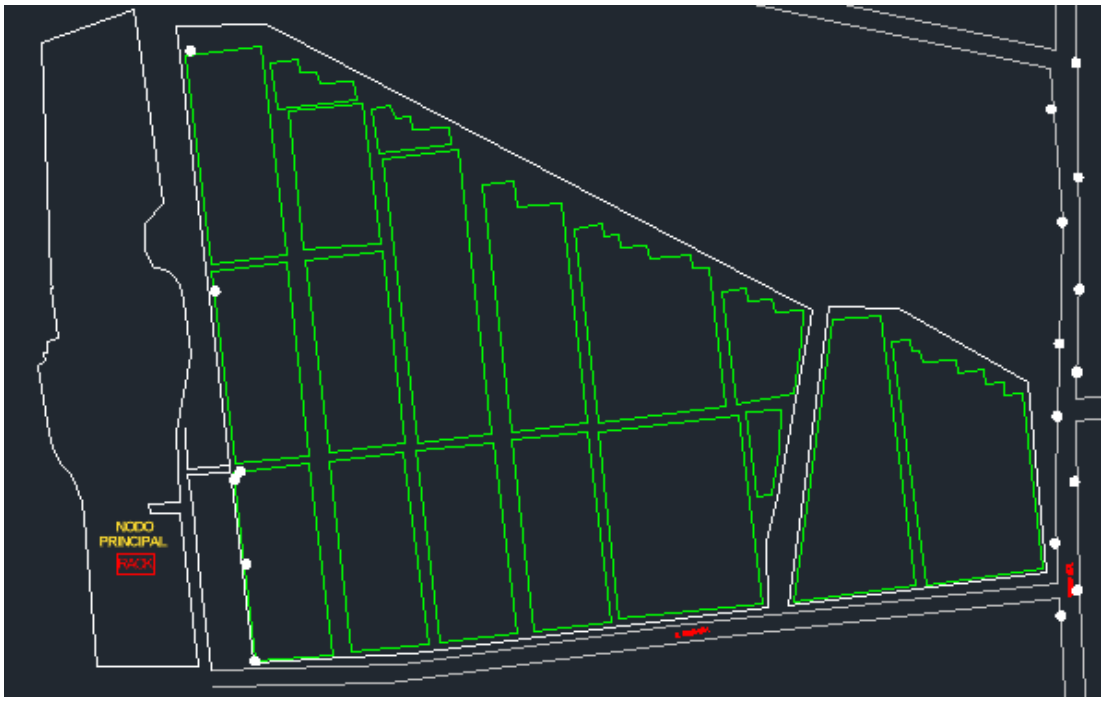


Figura 21. Ubicación del nodo principal. Plano en AutoCAD.

a. Criterios de diseño de la solución de fibra óptica

Para el diseño físico de la red de fibra óptica se consideraron criterios técnicos, operativos y ambientales asociados al contexto florícola. Estos criterios permiten garantizar que la infraestructura de la propuesta sea viable en zonas rurales, resistente a condiciones agrícolas y compatible con los requerimientos del sistema de monitoreo de la propuesta de conectividad. En la Tabla 36 se describen los criterios.

Tabla 36. Descripción de los criterios para el diseño de la red de fibra óptica

Criterio de diseño	Aplicación en el diseño de fibra óptica	Requerimientos relacionados
Medio de transmisión	Se emplea fibra óptica monomodo como medio principal entre el nodo principal y los nodos secundarios, debido a su alta capacidad, estabilidad y baja pérdida de señal.	StSR6, SySR1, RF1, RNF2

Criterio de diseño	Aplicación en el diseño de fibra óptica	Requerimientos relacionados
Topología de red	Se plantea una arquitectura GPON/FTTx punto–multipunto, donde el nodo principal distribuye la conectividad hacia los nodos secundarios mediante un splitter óptico.	StSR4, SySR2, SRSR3, RF2
Nodo principal	Se ubica en la oficina o cuarto técnico, concentrando el acceso a Internet, router, OLT, switch principal, ODF y sistema de respaldo energético.	StSR3, SySR3, SRSR1, RF3
Nodos secundarios	Se instalan en puntos estratégicos cercanos a los invernaderos para entregar conectividad local a cámaras, Raspberry Pi, AP Wi-Fi o dispositivos de monitoreo agrícola.	StSR4, SySR9, SRSR2, RF2
Distribución óptica	Se utiliza un splitter óptico 1:8 para conectar los cinco nodos secundarios propuestos, manteniendo tres salidas disponibles para futuras ampliaciones.	SySR7, SRSR3, RF6, RNF8
Integración con red local	Cada nodo secundario incorpora ONU/ONT, switch PoE y punto de acceso Wi-Fi o conexión Ethernet para enlazar los dispositivos de campo.	SySR1, SRSR8, RF1, RF2
Alimentación y protección física	Se consideran UPS, protección eléctrica, gabinetes y canalización o tendido protegido para resguardar los equipos frente al entorno florícola rural.	StSR2, StSR5, SySR8, RNF5
Gestión y seguridad	Se contempla administración remota segura, revisión del estado de nodos y protección contra accesos no autorizados.	StSR7, SySR11, SRSR7, RF5
Escalabilidad	La red permite agregar nuevos nodos, invernaderos o dispositivos de monitoreo sin modificar completamente la arquitectura física.	StSR8, SySR7, RF6, RNF8

La red de fibra óptica se diseña considerando la ubicación de los invernaderos, la distribución de los nodos y las distancias existentes entre ellos. La trazabilidad presentada permite relacionar la arquitectura con los requerimientos de transmisión de imágenes y video, comunicación entre nodos, envío de información, acceso remoto seguro y escalabilidad. De esta manera, la solución GPON/FTTx responde a las condiciones técnicas y operativas identificadas en el entorno florícola rural.

b. Topología de fibra óptica propuesta

La topología corresponde a una red punto-multipunto pasiva, compuesta por una OLT ubicada en el nodo principal, un divisor óptico y varias ONU/ONT instaladas en los nodos secundarios. Esta disposición posibilita que un único enlace troncal óptico se ramifique hacia múltiples puntos de servicio dentro de la florícola. Esta estrategia reduce la necesidad de implementar enlaces independientes y simplifica la infraestructura de planta externa.

El nodo principal se conecta a proveedor de Internet, el router de borde, switch principal y la OLT. A partir de la OLT se conecta un módulo GPON hacia el divisor óptico 1:8, el cual distribuye la fibra a los nodos secundarios. En cada nodo secundario se instala una ONU/OLT, encargada de convertir la señal óptica en ethernet, permitiendo conectar un switch PoE, un punto de acceso Wi-Fi, robots, cámaras o dispositivos para el monitoreo agrícola. En la Figura 22 se muestra la topología física de la red de fibra óptica.

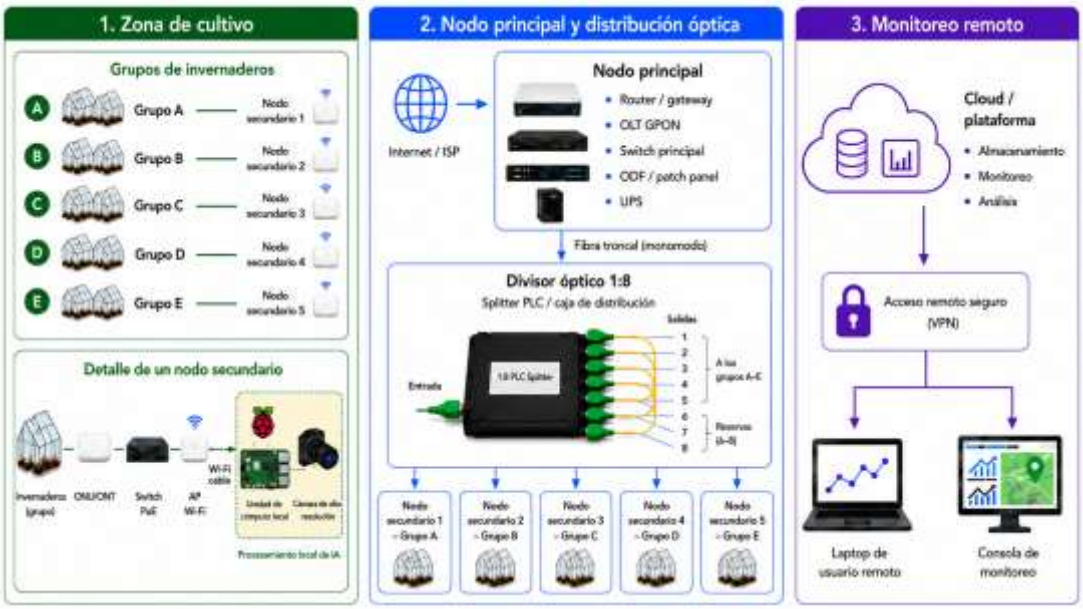


Figura 22. Topología física de la red de fibra óptica.

Esta topología es adecuada porque evita coloca equipos activos entre el nodo principal y los nodos secundarios, reduciendo así el consumo energético y facilitando la administración de la red. Además, la red GPON permite hacer enlaces hasta 2km en condiciones de diseño y las distancias de cada nodo en la florícola están en el rango técnico permitido [84].

c. Distribución física de nodos

Para la alternativa de fibra óptica se mantuvieron los mismos puntos considerados en el diseño inalámbrico. El nodo principal está ubicado en 1°06'32.99" S 78°36'42.99" O, lugar donde está la oficina, ahí se dispone de energía eléctrica estable, acceso al servicio de internet del proveedor y condiciones adecuadas para instalar equipos de red. En los puntos secundarios se sugiere la instalación de gabinetes de protección,

rosetas ópticas, ONU/ONT, switch PoE y equipos de acceso local. En la Figura 23 se muestra la distribución física de los nodos.

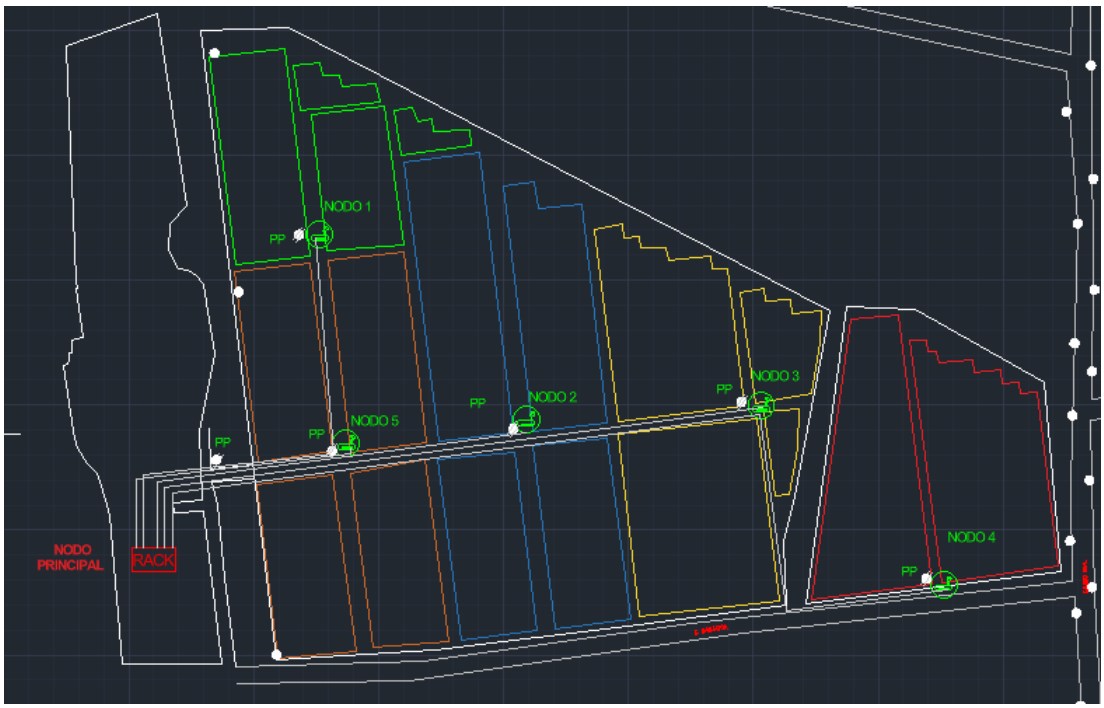


Figura 23. Distribución física de nodos de la red de fibra óptica.

d. Componentes físicos del nodo principal y nodos secundarios

- ***Nodo Principal***

La solución de fibra óptica está estructurada en dos niveles, un nodo principal y sus nodos secundarios. en el nodo principal se centran los equipos de acceso, enrutamiento y distribución óptica. En la Tabla 37 se describen los componentes y función de cada elemento del nodo principal.

Tabla 37. Componentes del nodo principal de la solución de fibra óptica.

Componente	**Equipo o elemento sugerido**	**Función**
Router de borde	Router empresarial o equipo equivalente	Gestiona la conexión WAN, direccionamiento IP, NAT, firewall, VLAN y acceso remoto seguro.
OLT GPON	OLT de 8 puertos GPON	Equipo central de la red óptica. Administra las ONU/ONT conectadas a los nodos secundarios.
Módulo GPON SFP	Transceptor GPON compatible con la OLT	Permite la transmisión óptica desde la OLT hacia la red de distribución.

Componente	Equipo o elemento sugerido	Función
Switch principal	Switch Gigabit administrable	Interconecta router, OLT, servidores locales, equipo de administración y otros servicios internos.
ODF o patch panel óptico	Distribuidor óptico de fibra	Organiza, protege y facilita la conexión de la fibra troncal, patch cords y divisores ópticos.
Splitter óptico	Divisor PLC 1:8	Divide la señal óptica hacia los cuatro nodos secundarios propuestos.
UPS	Sistema de respaldo eléctrico	Mantiene activo el nodo principal ante interrupciones breves del suministro eléctrico.
Gabinete o rack	Gabinete mural o rack de comunicaciones	Protege y ordena los equipos de red, energía y fibra óptica.
Sistema de puesta a tierra	Barra de tierra y protección eléctrica	Reduce riesgos eléctricos y protege los equipos ante descargas o variaciones de tensión.

- ***Nodos Secundarios***

En los nodos secundarios permiten la llegada de la fibra a los invernaderos, transformando la señal óptica a ethernet obteniendo así conectividad Wi-Fi para los equipos finales. En la se describe la función de los componentes de los nodos secundarios. En la Tabla 38 se presentan los componentes considerados para los nodos secundarios y la función que cumplen dentro de la arquitectura.

Tabla 38. Componentes de los nodos secundarios de la solución de fibra óptica.

Componente	Equipo o elemento sugerido
ONU/ONT GPON	ONU GPON equivalente o equipo compatible
Roseta óptica o caja terminal	Caja de terminación óptica
Switch PoE	Switch Gigabit PoE administrable o no administrable
Punto de acceso Wi-Fi	AP Wi-Fi para interior o exterior según el invernadero
Router local, opcional	Router compacto o equivalente
Gabinete de protección	Gabinete IP65 o similar.
Protección eléctrica	Supresor, regulador o mini UPS
Cableado interno	UTP Cat 6, patch cords ópticos y canaletas

e. Elementos de acceso en los invernaderos

Los elementos de acceso utilizados en los invernaderos son los mismos considerados en la alternativa inalámbrica, debido a que las dos arquitecturas emplean dispositivos finales equivalentes.

La arquitectura física de fibra óptica se plantea como una infraestructura estable y escalable para transportar los datos generados en la florícola. Mediante el uso de tecnología GPON punto-multipunto, la conectividad puede distribuirse hacia las

distintas zonas de trabajo de forma ordenada. Esta alternativa permite conectar equipos de borde, puntos de acceso, cámaras, robots y sistemas de monitoreo remoto, manteniendo una red con buena capacidad de crecimiento y adecuada para futuras ampliaciones.

3.8.1 Selección de equipos para la red óptica

La selección de equipos de la red óptica se realiza a partir del diseño definido anteriormente con la finalidad de mantener la trazabilidad del sistema de monitoreo.

a. Requisitos mínimos para la selección de equipos de red óptica

La Tabla 39 se definen los requisitos mínimos considerados para la selección de equipos de la red óptica. Los equipos candidatos deben Tabla 39considerar la compatibilidad con la arquitectura GPON propuesta.

Tabla 39. Requisitos mínimos para la selección de equipos

Código	**Requisito mínimo para la selección de equipos de fibra óptica**
REQ-FO1	Compatibilidad con redes de fibra óptica GPON.
REQ-FO2	Soporte para topología punto a multipunto.
REQ-FO3	Capacidad para operar con un splitter óptico 1:8.
REQ-FO4	Capacidad para conectar al menos cinco nodos secundarios.
REQ-FO5	Interfaces Gigabit Ethernet o superiores.
REQ-FO6	Administración y monitoreo remoto.
REQ-FO7	Compatibilidad entre equipos del ecosistema óptico, especialmente OLT–ONU/ONT.
REQ-FO8	Soporte para segmentación o gestión de red mediante VLAN, QoS o funciones equivalentes.
REQ-FO9	Bajo consumo energético para operación con respaldo eléctrico.
REQ-FO10	Facilidad de instalación, configuración y mantenimiento.
REQ-FO11	Disponibilidad comercial y soporte técnico accesible.
REQ-FO12	Costo referencial adecuado para una red florícola rural.

b. Selección de equipos para nodo principal

Para la selección de equipos del nodo principal se consideran los equipos activos que afectan directamente en el desempeño, administración y escalabilidad de la red de fibra óptica. La selección se realiza en base al cumplimiento de los requisitos previamente establecidos, si cumple con el requisito se evalúa con “1”, caso contrario con “0”. La Tabla 40 evalúa los equipos candidatos para el Gateway del nodo principal.

Tabla 40. Comparación de equipos candidatos para Gateway principal.

Parámetro de selección	**MikroTik RB5009UG+S+IN**	**TP-Link Omada ER7206**	**UniFi Cloud Gateway Ultra**	**UniFi Cloud Gateway Max**
Función en la red	Router/gateway principal	Gateway VPN empresarial	Gateway administrable UniFi	Gateway administrable UniFi de mayor capacidad
Compatibilidad con red GPON	Compatible mediante Ethernet/SFP+ hacia switch u OLT	Compatible mediante Ethernet/SFP hacia switch u OLT	Compatible mediante Ethernet hacia switch u OLT	Compatible mediante Ethernet 2.5G hacia switch u OLT
Puertos principales	7 GbE + 1 puerto 2.5G + 1 SFP+ 10G	1 SFP GbE + 5 RJ45 GbE	1 WAN 2.5G + 4 LAN GbE	5 puertos 2.5 GbE
VLAN / segmentación	Sí	Sí	Sí	Sí
NAT / firewall	Sí	Sí	Sí	Sí
VPN / acceso remoto seguro	Sí	Sí	Sí	Sí
Administración remota	RouterOS, WinBox, WebFig	Omada SDN / nube	UniFi Network	UniFi Network
Capacidad de crecimiento	Alta	Media-alta	Media	Alta
Consumo energético	Medio, máx. 25 W	Medio	Bajo, máx. 6,2 W	Medio
Facilidad de configuración	Media	Alta	Alta	Alta
Precio aproximado	$219	$ 150	$129	$199 – $264 aprox.

En la Tabla 41 se realiza la selección del Gateway principal de la red de fibra óptica.

Tabla 41. Selección de Gateway principal

Requisito	**MikroTik RB5009UG +S+IN**	**TP-Link Omada ER7206**	**UniFi Cloud Gateway Ultra**	**UniFi Cloud Gateway Max**
REQ-FO1	1	1	1	1
REQ-FO2	1	1	1	1
REQ-FO3	1	1	1	1
REQ-FO4	1	1	1	1
REQ-FO5	1	1	1	0
REQ-FO6	1	1	1	1
REQ-FO7	0	1	1	0
REQ-FO8	1	1	1	1
REQ-FO9	1	1	1	1
REQ-FO10	1	1	1	1
REQ-FO11	1	1	1	1
REQ-FO12	1	1	1	0
Total	11/12	12/12	12/12	9/12

Requisito	MikroTik RB5009UG +S+IN	TP-Link Omada ER7206	UniFi Cloud Gateway Ultra	UniFi Cloud Gateway Max
Resultado	Alternativa viable	Alternativa viable	Seleccionado	Alternativa de mayor costo

Entre los routers están el UniFi Cloud Gateway Ultra y el TP-Link Omada ER7206 cumplen la totalidad de requisitos. Sin embargo, se selecciona como Gateway principal el UniFi Cloud Gateway Ultra ya que ofrece mayor flexibilidad técnica, mejor capacidad de crecimiento y compatibilidad neutral con varios equipos.

En la Tabla 42 se evalúan los equipos candidatos para la OLT GPON

Tabla 42. Comparación de equipos candidatos para OLT principal

Parámetro de selección	Ubiquiti UFiber OLT 4	TP-Link DeltaStream DS-P7001-04	VSOL V1600G0-B	C-Data FD1604S-B1 / FD1604S-B0
Función en la red	OLT GPON para nodo principal	OLT GPON tipo pizza-box	OLT GPON compacta para FTTx	OLT GPON compacta para ISP/FTTx
Compatibilidad GPON	Sí	Sí	Sí	Sí
Puertos PON	4 GPON	4 GPON	4 GPON	4 GPON
Capacidad para 5 nodos secundarios	Sí	Sí	Sí	Sí
Soporte de splitter	Hasta 128 ONU por puerto PON	Relación 1:128 por puerto PON	Relación 1:64 / 1:128 según módulo o versión	Relación 1:128
Uplink	SFP/SFP+	1 SFP+ 10G + 1 RJ45 Gigabit	2 GE RJ45 + 2 SFP+ 10G	4 GE + 4 SFP + 2 SFP+ 10G
Administración	UISP / gestión web	DPMS, SNMP, CLI, Web UI	Cloud-EMS / gestión L2-L3	Web / CLI / SNMP
Compatibilidad con ONU/ONT	Alta con ONU UFiber	Alta con ONT TP-Link / estándar GPON	Requiere validar ONU compatible	Requiere validar ONU compatible
Escalabilidad	Alta para red pequeña/mediana	Alta	Alta	Alta
Facilidad de configuración	Alta dentro del ecosistema UFiber	Media/alta	Media	Media
Aplicación recomendada	Red GPON pequeña con equipos UFiber	Red GPON con gestión tipo proveedor	Red FTTx compacta y escalable	Red ISP/FTTx con varios uplinks
Precio aproximado	$899 – $1189 aprox.	$900 – $1200 aprox.	$700 – $1000 aprox.	$700 –$ 1100 aprox.

La Tabla 43 presenta la selección de la OLT principal.

Tabla 43. Selección de OLT principal

Requisito	Ubiquiti UFiber OLT 4	TP-Link DeltaStream DS-P7001-04	VSOL V1600G0-B	C-Data FD1604S-B1 / FD1604S-B0
REQ-FO1	1	1	1	1
REQ-FO2	1	1	1	1
REQ-FO3	1	1	1	1
REQ-FO4	1	1	1	1
REQ-FO5	1	1	1	1
REQ-FO6	1	1	1	1
REQ-FO7	1	0	0	0
REQ-FO8	1	1	1	1
REQ-FO9	1	0	1	1
REQ-FO10	1	0	0	0
REQ-FO11	1	1	0	0
REQ-FO12	1	0	1	1
Total	12/12	8/12	9/12	9/12
Resultado	Seleccionado	Alternativa robusta	Alternativa viable	Alternativa viable

En la evaluación de la OLT GPON se prioriza la compatibilidad integral con la arquitectura propuesta, por ello, el REQ-FO7 destaca la compatibilidad entre equipos del ecosistema óptico ya que la OLT debe operar correctamente con las ONT/ONT instaladas en los nodos secundarios. Por esta razón, Ubiquiti UFiber OLT 4 es el equipo seleccionado como OLT GPON del nodo principal ya que cumple con la totalidad de los requisitos establecidos en la arquitectura de red de fibra óptica propuesta. Este equipo es compatible con redes GPON, permite topología punto-multipunto y dispone capacidad suficiente para los nodos secundarios de la arquitectura propuesta. La Tabla 44 presenta las alternativas de switch principal.

Tabla 44. Comparación de equipos candidatos para switch principal

Parámetro de selección	UniFi Switch Ultra	TP-Link Omada TL-SG2008	MikroTik CSS610-8G-2S+IN	MikroTik CRS112-8G-4S-IN
Función en la red	Switch administrable compacto para gateway, OLT y gestión.	Switch administrable para red pequeña.	Switch compacto con uplinks SFP+ para expansión.	Switch administrable con puertos Ethernet y SFP.
Relación con la red de fibra óptica	Integra gateway, OLT GPON y red local por Ethernet.	Integra equipos del nodo principal por Ethernet.	Integra equipos Ethernet y permite expansión óptica 10G.	Integra equipos Ethernet y posibles enlaces SFP 1G.
Puertos Ethernet	8 puertos Gigabit	8 puertos Gigabit	8 puertos Gigabit	8 puertos Gigabit
Puertos SFP/SFP+	No dispone	No dispone	2 SFP+ 10G	4 SFP 1G

Parámetro de selección	UniFi Switch Ultra	TP-Link Omada TL-SG2008	MikroTik CSS610-8G-2S+IN	MikroTik CRS112-8G-4S-IN
VLAN / segmentación	Sí, hasta 256 VLAN	Sí, 802.1Q VLAN	Sí, mediante SwOS Lite	Sí, mediante RouterOS
QoS / control de tráfico	STP/RSTP, rate limit, storm control	QoS, ACL, IGMP Snooping	Funciones L2 básicas	Funciones L2/L3 avanzadas
Administración remota	UniFi Network	Omada SDN / Web / CLI / SNMP	SwOS Lite	RouterOS
Compatibilidad con la arquitectura	Alta, por ecosistema UniFi	Alta, pero usa Omada	Alta, pero usa MikroTik	Alta, pero usa MikroTik
Consumo energético	8–9 W aprox.	6,4–8,7 W aprox.	11 W máx.	10 W máx.
Facilidad de mantenimiento	Alta	Alta	Media	Media
Precio aproximado	$129	$70 – $90	$119	$153

En la Tabla 45se realiza la selección del switch del nodo principal de la arquitectura de red óptica propuesta.

Tabla 45. Selección de switch principal

Requisito	UniFi Switch Ultra	TP-Link Omada TL-SG2008	MikroTik CSS610-8G-2S+IN	MikroTik CRS112-8G-4S-IN
REQ-FO1	1	1	1	1
REQ-FO2	1	1	1	1
REQ-FO3	1	1	1	1
REQ-FO4	1	0	1	1
REQ-FO5	1	1	1	1
REQ-FO6	1	1	1	1
REQ-FO7	1	1	0	0
REQ-FO8	1	1	1	1
REQ-FO9	1	1	1	0 1
REQ-FO10	1	1	1	0
REQ-FO11	1	1	1	1
REQ-FO12	1	1	0	0
Total	12/12	11/12	10/12	9/12
Resultado	Seleccionado	Alternativa económica	Alternativa robusta	Alternativa viable

En la evaluación se consideraron los equipos que cumplen con los requisitos REQ-FO1 a REQ-FO4 desde el punto de vista de integración con la arquitectura propuesta, el switch interconecta el Gateway, la OLT y la red de gestión. Por lo tanto, se selecciona el switch UniFi Switch Ultra porque presenta una relación adecuada entre

capacidad, administración y compatibilidad con los equipos anteriormente seleccionados.

c. Selección de equipos para nodo secundario

La selección de equipos para los nodos secundarios se consideran los equipos activos que determinan compatibilidad, capacidad, alimentación, administración y conexión local de los invernaderos.

La Tabla 46 presenta los equipos candidatos para ONU/ONT GPON.

Tabla 46. Comparación de equipos candidatos para ONU/ONT GPON.

Parámetro de selección	**UFiber Loco**	**UFiber Nano G**	**WaveFiber ONU**	**UFiber WiFi 6**
Función en la red	ONU GPON compacta	ONU GPON con pantalla de diagnóstico	ONU GPON con puerto 2.5 GbE	CPE GPON con Wi-Fi 6 integrado
Compatibilidad con la OLT seleccionada	Alta con UFiber OLT 4	Alta con UFiber OLT 4	Alta dentro del ecosistema UISP/Fiber	Alta dentro del ecosistema UISP/Fiber
Interfaz óptica	1 puerto SC/APC GPON ITU-T G.984	1 puerto SC/APC GPON ITU-T G.984	1 puerto SC/APC GPON ITU-T G.984	1 puerto SC/APC GPON ITU-T G.984
Interfaz LAN	1 puerto GbE RJ45	1 puerto GbE RJ45	1 puerto RJ45 1/2.5 GbE	4 puertos GbE RJ45
Velocidad GPON	2.488 Gbps bajada / 1.244 Gbps subida	2.488 Gbps bajada / 1.244 Gbps subida	2.488 Gbps bajada / 1.244 Gbps subida	GPON con Wi-Fi 6 integrado
Administración	Ethernet in-band / PON	Ethernet in-band / PON	Ethernet in-band / PON	Ethernet in-band / PON
Alimentación	Micro-USB 5 V o PoE pasivo 24 V	PoE pasivo 24 V	PoE pasivo 24 V	USB-C 5 V o PoE pasivo 24 V
Consumo máximo	3.5 W	Bajo consumo	5 W	11 W
Aplicación en el nodo secundario	Adecuada para ONU + switch PoE + AP externo	Adecuada si se requiere diagnóstico visual	Adecuada si se requiere puerto 2.5 GbE	Útil si se desea Wi-Fi integrado
Precio aproximado	$49	$69	$49	$99

En la Tabla 47 se realiza la evaluación de los equipos.

Tabla 47. Selección de ONU para nodos secundarios.

Requisito	**UFiber Loco**	**UFiber Nano G**	**WaveFiber ONU**	**UFiber WiFi 6**
REQ-FO1	1	1	1	1
REQ-FO2	1	1	1	1
REQ-FO3	1	1	1	1

Requisito	UFiber Loco	UFiber Nano G	WaveFiber ONU	UFiber WiFi 6
REQ-FO4	1	1	1	1
REQ-FO5	1	1	1	1
REQ-FO6	1	1	1	1
REQ-FO7	1	1	1	1
REQ-FO8	1	1	1	1
REQ-FO9	1	1	1	0
REQ-FO10	1	1	1	0
REQ-FO11	1	1	1	1
REQ-FO12	1	1	1	0
Total	12/12	12/12	12/12	9/12
Resultado	Seleccionado	Alternativa viable	Alternativa viable	Alternativa no prioritaria

Se selecciona la UFiber Loco como ONU/ONT para los nodos secundarios ya que cumple con los requisitos establecidos en la propuesta de arquitectura. Se priorizó la compatibilidad con la OLT seleccionada anteriormente, debido a que la correcta operación entre OLT y ONU depende no solo del estándar GPON, sino también de la gestión, aprovisionamiento y perfiles soportados por el fabricante. Por esta razón se consideran equipos del ecosistema Ubiquiti/UISP Fiber con la finalidad de reducir riesgos de incompatibilidad en los nodos secundarios.

La Tabla 48 presenta los equipos candidatos para los switches de los nodos secundarios.

Tabla 48. Comparación de equipos candidatos para switch PoE.

Parámetro de selección	TP-Link TL-SG1005P	TP-Link TL-SG108PE	UniFi Switch Lite 8 PoE	TP-Link Omada TL-SG2210MP
Función en la red	Switch PoE básico	Switch PoE Easy Smart	Switch PoE administrable L2	Switch PoE administrable Omada
Relación con la red de fibra óptica	Se conecta a la ONU/ONT por Ethernet	Se conecta a la ONU/ONT por Ethernet	Se conecta a la ONU/ONT por Ethernet	Se conecta a la ONU/ONT por Ethernet
Puertos Ethernet	5 Gigabit	8 Gigabit	8 Gigabit	8 Gigabit + 2 SFP
Puertos PoE	4 PoE+	4 PoE+	4 PoE+	8 PoE+
Presupuesto PoE	65 W	64 W	52 W	150 W
VLAN / segmentación	No administrable	Sí, gestión Easy Smart	Sí, gestión L2	Sí, gestión Omada
Administración remota	No	Web / utilidad Easy Smart	UniFi Network	Omada SDN / nube
Compatibilidad con ONU UFiber Loco	Sí, mediante Ethernet Gigabit	Sí, mediante Ethernet Gigabit	Sí, mediante Ethernet Gigabit	Sí, mediante Ethernet Gigabit

Parámetro de selección	TP-Link TL-SG1005P	TP-Link TL-SG108PE	UniFi Switch Lite 8 PoE	TP-Link Omada TL-SG2210MP
Aplicación recomendada	Nodo económico básico	Nodo secundario con gestión y costo moderado	Nodo gestionado con ecosistema UniFi	Nodo con alta demanda PoE
Precio aproximado	$40–50	$59,99 aprox.	$109	$130–170 aprox.

Se realiza la evaluación de los equipos candidatos para el switch PoE de nodos secundarios, en la Tabla 49 se presenta dicha información.

Tabla 49. Selección de switch PoE.

Requisito	TP-Link TL-SG1005P	TP-Link TL-SG108PE	UniFi Switch Lite 8 PoE	TP-Link Omada TL-SG2210MP
REQ-FO1	1	1	1	1
REQ-FO2	1	1	1	1
REQ-FO3	1	1	1	1
REQ-FO4	1	1	1	1
REQ-FO5	1	1	1	1
REQ-FO6	0	1	1	1
REQ-FO7	1	1	1	1
REQ-FO8	0	1	1	1
REQ-FO9	1	1	1	0
REQ-FO10	1	1	1	0
REQ-FO11	1	1	1	1
REQ-FO12	1	1	12	0
Total	10/12	12/12	12/12	9/12
Resultado	Alternativa Económica	Alternativa Viable	Seleccionado	Alternativa sobredimensionada

Se selecciona el UniFi Switch Lite 8 PoE como switch PoE para los nodos secundarios, debido a que cumple con la totalidad de los requisitos planteados para la arquitectura. Este equipo permite conectar la ONU/ONT, alimentar el AP Wi-Fi mediante PoE y disponer de puertos adicionales, sin sobredimensionar la infraestructura. Por esta razón, se escoge este switch ya que ofrece equilibrio entre capacidad, gestión y costo de la propuesta de red de fibra óptica. La

Tabla 50 presenta los equipos candidatos para el AP WiFi.

Tabla 50. Comparación de equipos candidatos para AP WiFi

Parámetro de selección	TP-Link EAP225-Outdoor	TP-Link EAP610-Outdoor	Ubiquiti UniFi U6 Mesh	MikroTik wAP ax
Función en la red	AP Wi-Fi exterior para	AP Wi-Fi 6 exterior para	AP Wi-Fi 6 interior/exterior	AP Wi-Fi 6 exterior

Parámetro de selección	TP-Link EAP225-Outdoor	TP-Link EAP610-Outdoor	Ubiquiti UniFi U6 Mesh	MikroTik wAP ax
	nodo secundario	nodo secundario		gestionado con RouterOS
Relación con la red de fibra óptica	Se conecta al switch PoE del nodo secundario	Se conecta al switch PoE del nodo secundario	Se conecta al switch PoE del nodo secundario	Se conecta al switch PoE del nodo secundario
Tecnología inalámbrica	Wi-Fi 5 AC1200	Wi-Fi 6 AX1800	Wi-Fi 6	Wi-Fi 6 AX3000
Velocidad referencial	867 Mbps en 5 GHz + 300 Mbps en 2.4 GHz	1201 Mbps en 5 GHz + 574 Mbps en 2.4 GHz	Wi-Fi 6, cobertura hasta 140 m² y más de 250 clientes	2400 Mbps en 5 GHz + 574 Mbps en 2.4 GHz
Puerto Ethernet	Gigabit	Gigabit	Gigabit	2 puertos Gigabit
Alimentación PoE	Sí	802.3at PoE	PoE 44–57 V	802.3af/at PoE
Protección exterior	IP65	IP68 / intemperie	IPX5	IP54
Gestión remota	Omada SDN	Omada SDN	UniFi Network	RouterOS / CAPsMAN
VLAN / SSID	Sí	Sí	Sí	Sí
Compatibilidad con switch TL-SG108PE	Sí	Sí	Sí	Sí
Consumo energético	Bajo/medio	Medio	Máx. 13 W	Máx. 9 W
Precio aproximado	$76,98 + IVA	$138,99 + IVA	$179	$89

En la Tabla 51 se realiza la selección del AP.

Tabla 51. Selección de AP.

Requisito	TP-Link EAP225-Outdoor	TP-Link EAP610-Outdoor	Ubiquiti UniFi U6 Mesh	MikroTik wAP ax
REQ-FO1	1	1	1	1
REQ-FO2	1	1	1	1
REQ-FO3	1	1	1	1
REQ-FO4	1	1	1	1
REQ-FO5	1	1	1	1
REQ-FO6	1	1	1	1
REQ-FO7	1	1	1	1
REQ-FO8	1	1	1	1
REQ-FO9	1	1	1	1
REQ-FO10	1	1	1	0
REQ-FO11	1	1	1	1
REQ-FO12	1	1	0	1
Total	12/12	12/12	11/12	11/12
Resultado	Alternativa económica	Seleccionado	Alternativa viable	Alternativa viable

Ya que el AP se integra directamente en la red se selecciona el Ubiquiti UniFi U6 Mesh como punto de acceso Wi-Fi para los nodos secundarios, ya que ofrece conectividad Wi-Fi 6, puerto Gigabit Ethernet, alimentación PoE y protección para instalación en exteriores. Además, su compatibilidad con el switch PoE previamente seleccionado permite integrarlo de forma directa en la arquitectura del nodo secundario.

La Tabla 52 presenta elementos pasivos y accesorios del nodo secundario. Estos equipos no requieren ser evaluados ya que su selección depende de compatibilidad física, tipo de conector y buenas prácticas de instalación en el entorno florícola. Se prioriza la incorporación de elementos destinados a proteger la fibra óptica, organizar el cableado, mitigar riesgos eléctricos y facilitar el mantenimiento de la infraestructura instalada en campo.

Tabla 52. Elementos pasivos y accesorios de los nodos secundarios.

Elemento	Especificación mínima	Función en el nodo secundario
Roseta óptica / caja terminal	Compatible con fibra monomodo y conectores SC/APC.	Recibir y proteger la acometida óptica proveniente del splitter 1:8.
Patch cord y pigtail óptico	Fibra monomodo con conectores SC/APC.	Conectar la fibra de llegada con la ONU/ONT GPON.
Adaptadores ópticos	Tipo SC/APC.	Permitir la unión entre conectores ópticos dentro del nodo.
Gabinete de comunicaciones	Gabinete mural o exterior, preferible IP65.	Proteger la ONU/ONT, switch PoE, fuentes y cableado frente a humedad y polvo.
Cableado Ethernet	Cable UTP Cat 6 o superior con conectores RJ45.	Interconectar ONU/ONT, switch PoE, AP Wi-Fi, cámara y unidad de cómputo local.
Canalización y protección mecánica	Ductería, canaleta o tubo corrugado.	Proteger fibra y cableado frente a manipulación, humedad o maquinaria agrícola.
Protección eléctrica	Supresor de picos, puesta a tierra y fuente regulada.	Proteger los equipos activos ante variaciones eléctricas o descargas.
Respaldo energético	Mini UPS o respaldo local según consumo del nodo.	Mantener la operación del nodo ante cortes breves de energía.
Organización y etiquetado	Etiquetas, sujetadores y reserva técnica de cable.	Facilitar mantenimiento, identificación de fallas y futuras ampliaciones.

3.8.2 Dimensionamiento técnico de la red de fibra óptica

Se considera la arquitectura propuesta de 1 nodo principal, un splitter 1:8 y cinco nodos secundarios. El cálculo se realiza tomando como referencia la metodología de

presupuesto óptico, donde la pérdida total del enlace se obtiene a partir de la atenuación de fibra, conectores, empalmes, splitter y pérdidas adicionales [15].

a. Distancia entre los enlaces de fibra óptica

Las distancias de los enlaces se obtuvieron a través del software de Google Earth, que lo realiza automáticamente al colocar los puntos de referencia de cada enlace de fibra dentro de la florícola. En la Figura 24 se indica las distancias que existen entre el nodo principal y los nodos secundarios.

Figura 24. Distancias de la ubicación de nodos secundarios. Google Earth

La Tabla 53 resume las distancias entre el nodo principal y los nodos secundarios obtenidas de Google Earth.

Tabla 53. Distancias entre enlaces de fibra óptica.

Número de Nodo	**Longitud de fibra configurada**
Nodo secundario 1	0,255 km
Nodo secundario 2	0,240 km
Nodo secundario 3	0,357 km
Nodo secundario 4	0,537 km
Nodo secundario 5	0,150 km

b. Cálculo de longitud y atenuación de fibra

Se consideran las distancias desde el nodo principal hacia los cinco nodos secundarios ubicados en la florícola. A cada distancia medida se le agrega una reserva técnica de,

10% contemplando curvaturas, ingreso a gabinetes, empalmes y holgura para mantenimiento. Para este diseño se trabaja en la ventana de 1550 nm, por lo que se adopta un coeficiente de atenuación de:

$$\alpha = 0.22\, {}^{dB}/_{km}$$

Para el cálculo de atenuación por fibra se emplea la Ecuación 11.

$$\boldsymbol{L_{fibra} = \alpha * D} \quad \textbf{(11)}$$

Donde:

$\boldsymbol{L_{fibra}}$: Atenuación de fibra

$\boldsymbol{\alpha}$: Coeficiente de atenuación

$\boldsymbol{D}$: Longitud de la rama en km

- ***Cálculo de atenuación de fibra del enlace en*** los ***nodos secundarios***

$$Nodo\ 1 = 0{,}22 \times 0{,}255 = 0{,}0561\ dB$$

$$Nodo\ 2 = 0{,}22 \times 0{,}240 = 0{,}0528\ dB$$

$$Nodo\ 3 = 0{,}22 \times 0{,}357 = 0{,}0785\ \text{dB}$$

$$Nodo\ 4 = 0{,}22 \times 0{,}537 = 0{,}1181\ \text{dB}$$

$$Nodo\ 5 = 0{,}22 \times 0{,}150 = 0{,}0330\ \text{dB}$$

- ***Cálculo*** de ***longitud total de los cinco enlaces***

$$L_{total} = 0{,}255 + 0{,}240 + 0{,}357 + 0{,}537 + 0{,}150 = 1{,}539\ km$$

- ***Cálculo de la atenuación total acumulada por fibra***

$$A_{total\ fibra} = 0{,}0561 + 0{,}0528 + 0{,}0785 + 0{,}1181 + 0{,}0330 = 0{,}3385\ dB$$

c. Cálculo de Presupuesto óptico y potencia recibida

La pérdida total del enlace se calcula mediante la Ecuación 12:

$$\boldsymbol{L_{total} = L_{fibra} + L_{splitter} + L_{conectores} + L_{emplames} + M} \qquad (\mathbf{12})$$

Un divisor 1:8 presenta una pérdida de inserción aproximada de 10,5 dB [15]**.** Además, se consideran cuatro conectores de 0,5 dB, dos empalmes de 0,1 dB y un margen de seguridad de 3, valores típicos de 0,5 dB para conectores y 0,1 dB para empalmes por fusión en el cálculo de pérdidas de una red FTTH GPON.

La parte fija de pérdidas del enlace es:

$$L_{fija} = 10{,}5 + (4 \times 0{,}5) + (2 \times 0{,}1) + 3$$

$$L_{fija} = 10{,}5 + 2 + 0{,}2 + 3 = 15{,}7\ dB$$

A este valor se suma la pérdida por fibra de cada rama:

$$Nodo\ 1 = 15{,}7 + 0{,}0561 = 15{,}7561\ dB$$

$$Nodo\ 2 = 15{,}7 + 0{,}0528 = 15{,}7528\ \text{dB}$$

$$Nodo\ 3 = 15{,}7 + 0{,}0785 = 15{,}7785\ \text{dB}$$

$$Nodo\ 4 = 15{,}7 + 0{,}1181 = 15{,}8181\ \text{dB}$$

$$Nodo\ 5 = 15{,}7 + 0{,}0330 = 15{,}7330\ \text{dB}$$

Para comprobar que el presupuesto óptico cumple, se compara la pérdida total con el presupuesto máximo admitido para GPON clase B+. La recomendación ITU-T G.984.2 establece para GPON B+ una pérdida óptica máxima de 28 dB a 1490 nm y 1310 nm; por tanto, los valores obtenidos, menores a 16 dB, se encuentran dentro del margen permitido [85] . La rama más crítica es la del Nodo secundario 4.

El margen disponible respecto al presupuesto GPON B+ se calcula con la Ecuación 13.

$$\boldsymbol{M_{disponible} = PB - L_{total}} \qquad (\mathbf{13})$$

Donde:

$M_{disponible}$: $Margen\ disponible\ (dB)$

$PB =\ Presupuesto\ óptico\ de\ la\ clase\ GPON\ (dB)$

$\boldsymbol{L_{total}}$: $Pérdidas\ totales\ del\ enlace\ óptico\ (dB)$

Reemplazando los valores en la Ecuación 13:

$$M_{disponible} = 28 - 15{,}8181 = 12{,}1819\ dB$$

Por tanto, incluso en la rama de mayor longitud existe un margen óptico aproximado de 12,18 dB, lo que indica que el enlace cumple con el presupuesto óptico.

d. Cálculo de Potencia recibida

La potencia recibida se calcula con la Ecuación 14:

$$\boldsymbol{P_{RX} = P_{TX} - L_{total}} \qquad (\mathbf{14})$$

Tomando una potencia de transmisión conservadora de:

$$P_{TX} = 1.5\ dBm$$

Las potencias de los nodos secundarios son:

$$Nodo\ 1 = 1{,}5 - 15{,}7561 = -14{,}2561\ dBm$$

$$Nodo\ 2 = 1{,}5 - 15{,}7528 = -14{,}2528\ \text{dBm}$$

$$Nodo\ 3 = 1{,}5 - 15{,}7785 = -14{,}2785\ \text{dBm}$$

$$Nodo\ 4 = 1{,}5 - 15{,}8181 = -14{,}3181\ \text{dBm}$$

$$Nodo\ 5 = 1{,}5 - 15{,}7330 = -14{,}2330\ \text{dBm}$$

El valor más bajo de potencia recibida es nuevamente del Nodo secundario 4**.** Este resultado evidencia que la señal óptica llega con un nivel adecuado a los nodos secundarios. Por lo tanto, la arquitectura propuesta con splitter 1:8 cumple con el presupuesto óptico requerido y presenta un margen suficiente para operar en la red de conectividad florícola propuesta.

e. Cálculo de Verificación de capacidad de transmisión

Para la red florícola propuesta se consideran cinco nodos secundarios, por lo que la capacidad promedio teórica por nodo se obtiene dividiendo la capacidad total del puerto PON entre el número de nodos conectados:

$$C_{descendente} = \frac{2.488\ Gbps}{5}$$

$$C_{descendente} = 0.4976\ Gbps = 497{,}6\ Mbps$$

$$C_{ascendente} = \frac{1.244\ Gbps}{5}$$

$$C_{ascendente} = 0{,}2488\ Gbps = 248{,}8\ Mbps$$

Cada nodo secundario tendría una capacidad promedio teórica aproximada de 497,6 Mbps en bajada y 248,8 Mbps en subida.

3.9 Cobertura y dimensionamiento energético de la arquitectura

3.9.1 Cobertura de la arquitectura

Para validar la cobertura local se usa el software de UniFi Design Center y el plano de la florícola obtenido de AutoCAD. El equipo seleccionado es el mismo AP (Access Point) en las dos propuestas de arquitectura, por ende, la cobertura es la misma.

La Figura 25 y Figura 26 indican la simulación de cobertura primaria y velocidad de datos de la cobertura local en 5 GHz con puntos de acceso UniFi U6 Mesh en los nodos secundarios respectivamente.

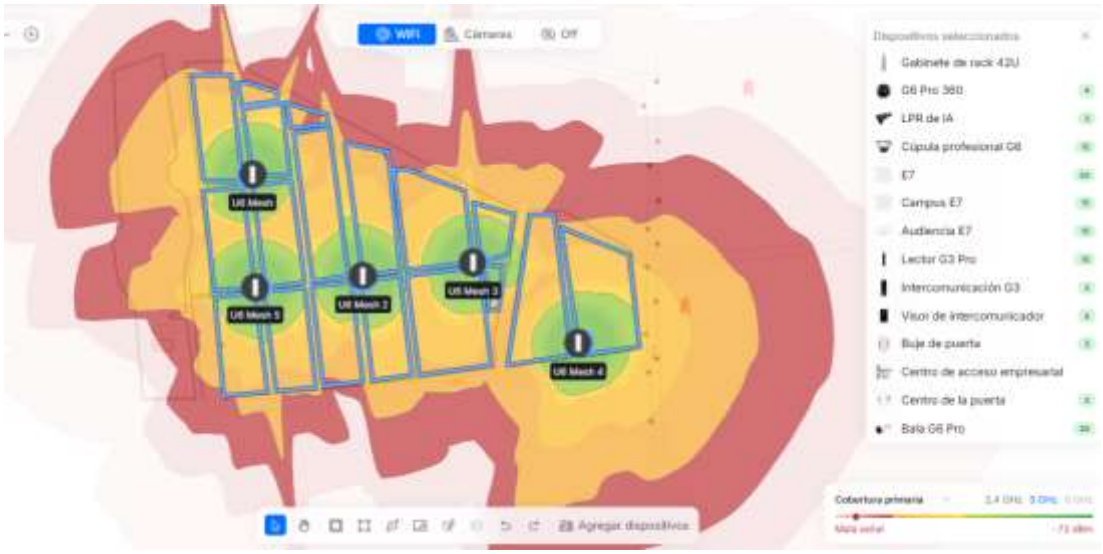


Figura 25. Cobertura local en 5 GHz con puntos de acceso. UniFi Design Center.

Figura 26. Velocidad de datos y cobertura 5GHz. UniFi Design Center.

Por lo tanto, la validación de cobertura local confirma que la arquitectura inalámbrica y de fibra óptica es funcional para la florícola del caso de estudio. En cada nodo secundario existe un punto de acceso en puntos estratégicos, reduciendo distancias y favoreciendo a la conectividad del sistema de monitoreo.

3.9.2 Dimensionamiento energético

f. Dimensionamiento energético red inalámbrica

El dimensionamiento energético se realizó considerando los equipos activos seleccionados para el nodo principal y los cinco nodos secundarios.

Se consideran los consumos máximos especificados por el fabricante y se aplica un margen de seguridad para compensar pérdidas y futuras ampliaciones. Los equipos son los siguientes:

- **Nodo principal:** UniFi Cloud Gateway Max + Ubiquiti LiteAP GPS+ UniFi Switch 24 PoE.
- **Nodo secundario:** CPE Ubiquiti NanoStation 5AC Loco + UniFi Switch Lite 8 PoE + UniFi U6 Mesh.

La potencia necesaria total se calcula mediante la Ecuación 15.

$$\boldsymbol{P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 \dots \dots P_n} \qquad (\mathbf{15})$$

Dónde:
E: Energía requerida en Wh

$\boldsymbol{P_{diseño}}$**:** Potencia de diseño en W

$\boldsymbol{t}$: Tiempo de autonomía en horas

Se aplica un margen de seguridad para cubrir pérdidas, variaciones de carga y futuras ampliaciones:

$$P_{diseño} = P_{total} * 1.20$$

Para respaldo energético se utiliza la Ecuación 16:

$$\boldsymbol{E = P_{diseño} * t} \qquad (\mathbf{16})$$

Dónde:
E: Energía requerida en Wh

$\boldsymbol{P_{diseño}}$**:** Potencia de diseño en W

$\boldsymbol{t}$: Tiempo de autonomía en horas

- ***Nodo principal inalámbrico***

En la Tabla 31, Tabla 40 y Tabla 41 se encuentra el consumo máximo de cada equipo activo, se calcula con la Ecuación 17.

$$\boldsymbol{P_{NP} = P_{Gateway} + P_{switch} + P_{estación}} \quad (\mathbf{17})$$

$$P_{NP} = 16.1 + 25 + 7.1$$

$$P_{NP} = 48.2W$$

Se aplica un margen de seguridad del 30% para el respaldo energético, pérdidas del UPS y reserva operativa:

$$P_{NP-diseño} = 48.2 * 1.30$$

$$P_{NP-diseño} = 62.66\ W$$

Para una autonomía mínima de una hora:

$$E_{NP} = 62.66W * 1h$$

$$E_{NP} = 62.66\ Wh$$

El nodo principal inalámbrico requiere aproximadamente 62,66 Wh para una hora de autonomía, considerando gateway, switch principal y radio base PtMP.

- ***Nodo Secundario***

En la Tabla 32, Tabla 44 y Tabla 45 se encuentra el consumo máximo de los equipos mencionados.

Un nodo secundario base a la Ecuación 18:

$$\boldsymbol{P_{NS} = P_{CPE} + P_{Switch} + P_{AP}} \quad (\mathbf{18})$$

$$P_{NS} = 7 + 8 + 13$$

$$P_{NS} = 28\,W$$

Aplicando el margen del 20%:

$$P_{NS-diseño} = 28 * 1.20$$

$$P_{NS-diseño} = 33.6W$$

Cada nodo secundario requiere 33.6Wh para operar el CPE, switch PoE y AP Wi-Fi local.

Para los 5 nodos secundarios:

$$P_{5NS} = 33.6W * 5W = 168\,W$$

Para una autonomía de una hora:

$$E_{NS} = 168W * 1h = 168Wh$$

Para los cinco nodos secundarios se requiere:

$$E_{5NS} = 168W * 1h = 168Wh$$

- ***Potencia necesaria total de la arquitectura inalámbrica***

La potencia necesaria total se calcula con la Ecuación 19:

$$\boldsymbol{P_{total} = P_{NP-diseño} + P_{5NS}} \qquad (\mathbf{19})$$

$$P_{total} = 62..W + 168\,W = 230.66\,W$$

Autonomía mínima de una hora:

$$E_{total} = 230.66W * 1h$$

$$E_{total} = 230.66\,Wh$$

La red inalámbrica propuesta requiere 230,66 Wh para mantener operativos el nodo principal y los cinco nodos secundarios durante una hora si se consideran únicamente equipos de red.

g. Dimensionamiento energético red óptica

Para este dimensionamiento se consideran los mencionados en la parte del dimensionamiento energético de la red inalámbrica, pero con los equipos respectivos a la red óptica teniendo en cuenta que todos los equipos son de la Ubiquiti/UniFi. Los equipos de cada nodo se detallan a continuación:

- **Nodo principal:** UniFi Cloud Gateway Max + UFiber OLT 4 + UniFi Switch 24 PoE.
- **Nodo secundario:** UFiber Loco + UniFi Switch Lite 8 PoE + UniFi U6 Mesh.

Para estimar la potencia necesaria se consideran los equipos activos de la red de fibra óptica y las condiciones definidas previamente.

La potencia necesaria total se calcula con la Ecuación 15 indicada previamente:

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 \dots \dots P_n$$

Para respaldo energético se utiliza la Ecuación 16:

$$\boldsymbol{E = P_{diseño} * t}$$

- ***Nodo Principal***

En las Tabla 40, Tabla 41 y Tabla 42 se encuentra el consumo máximo de cada equipo activo.

En el nodo principal no se considera alimentación PoE para cargas de campo, se toma el consumo sin salida PoE del switch mediante la Ecuación 20.

$$\boldsymbol{P_{NP} = P_{Gateway} + P_{OLT} + P_{switch}} \qquad (\mathbf{20})$$

$$P_{NP} = 16.1 + 35 + 25 = 76.1\ W$$

$$P_{NP} = 76.1\ W$$

Se aplica un margen de seguridad del 30%:

$$P_{NP-diseño} = 76.1 * 1.30$$

$$P_{NP-diseño} = 98.93\ W$$

Para una autonomía mínima de una hora:

$$E_{NP} = 98.93W * 1h$$

$$E_{NP} = 98.93\ Wh$$

- ***Nodo Secundario***

En la Tabla 43,Tabla 44 y Tabla 45 y se encuentra el consumo máximo de los equipos mencionados.

Un nodo secundario base a la Ecuación 21.

$$\boldsymbol{P_{NS} = P_{ONU} + P_{Switch} + P_{AP}} \qquad (\mathbf{21})$$

$$P_{NS} = 3.5 + 8 + 13$$

$$P_{NS} = 24.5\ W$$

Aplicando el margen del 20%:

$$P_{NS-diseño} = 24.5 * 1.20$$

$$P_{NS-diseño} = 29.4\ W$$

Cada nodo secundario requiere 29.4Wh para operar con sus componentes activos.

Calculando para los 5 nodos:

$$P_{5NS} = 29.4W * 5 = 147\ W$$

Se requiere una autonomía de mínimo una hora, entonces:

$$E_{NS} = 29.4W * 1h = 24.9\ Wh$$

para los cinco nodos secundarios se requiere:

$$E_{5NS} = 147W * 1h = 147\ Wh$$

- ***Potencia necesaria total de arquitectura de la red óptica***

Con la Ecuación 19, indicada previamente se calcula la potencia necesaria total de la arquitectura de red óptica.

$$P_{total} = P_{NP-diseño} + P_{5NS}$$

$$P_{total} = 98.93\ W + 147\ W = 245.93\ W$$

Para una autonomía mínima de una hora:

$$E_{total} = 245.93W * 1h$$

$$E_{total} = 245.93\ Wh$$

La arquitectura de red de fibra óptica requiere de 246Wh aproximadamente para mantener el nodo principal y los cinco secundarios operativos durante una hora, considerando únicamente equipos de red.

3.10 Mecanismos de acceso remoto seguro

Uno de los requerimientos de la empresa era que la infraestructura de red permita realizar una administración remota, este mecanismo debe garantizar la supervisión de los equipos, la verificación de los enlaces y el acceso directo a los dispositivos instalados en los invernaderos especialmente a los robots agrícolas.

Dado que la salida a Internet dependerá de proveedores externos, en otros casos puede ser por medio de fibra óptica, radioenlaces, Starlink o redes celulares 4G, la red rara vez dispondrá de una dirección IP pública estática o de control total sobre el equipo de borde. Exponer los dispositivos internos mediante redirección de puertos resulta inviable y peligroso.

3.10.1 Problemas del acceso remoto detrás de un proveedor

Los dispositivos internos operan tras un enrutador de borde. Si el proveedor de servicios de Internet asigna una IP pública fija, una técnica habitual consiste en redirigir puertos hacia el interior, esto expone a la red a ataques obligando a mantener

políticas de firewall estrictas y expone servicios críticos como SSH, HTTP/HTTPS o SNMP a escaneos desde el exterior.

Otro problema es cuando el ISP implementa esquemas de traducción de direcciones a gran escala, como Carrier-Grade NAT (CGNAT). Las redes de operadores suelen emplear el bloque de direcciones compartidas 100.64.0.0/10, un espacio normado para el direccionamiento interno de operadores [86]. Bajo CGNAT, la infraestructura de la florícola queda oculta e inalcanzable directamente desde Internet.

Por ello no se recomienda la administración basada en puertos públicos. La arquitectura exige que los equipos de la florícola inicien conexiones externas seguras.

3.10.2 Requisitos mínimos para la selección del mecanismo de acceso remoto seguro

En la Tabla 54 se resumen los requisitos mínimos considerados para la selección del mecanismo de acceso remoto seguro. Estos requisitos sirven como base para evaluar las alternativas tecnológicas y justificar la selección final.

Tabla 54. Requisitos para la selección del mecanismo de acceso remoto seguro

Código	Requisito mínimo para la selección
REQ-AR1	Funcionamiento detrás de NAT o CGNAT sin requerir IP pública fija
REQ-AR2	No requerir apertura de puertos hacia Internet
REQ-AR3	Cifrado seguro de las comunicaciones remotas
REQ-AR4	Acceso remoto por SSH a los robots
REQ-AR5	Acceso a equipos de red que no permiten instalar cliente VPN, como radios, switches, OLT, ONT o routers
REQ-AR6	Compatibilidad con distintos medios de salida a Internet: fibra óptica, radioenlace, Starlink o router 4G/5G
REQ-AR7	Administración mediante usuarios, grupos o políticas de acceso
REQ-AR8	Facilidad de implementación.
REQ-AR9	Escalabilidad para varios invernaderos, robots y nodos de red
REQ-AR10	Compatibilidad con herramientas de monitoreo de red.
REQ-AR11	Bajo costo de implementación.
REQ-AR12	Facilidad de mantenimiento, revocación de accesos y operación remota

a. Alternativas para acceso remoto seguro

Para la selección del mecanismo de acceso remoto se comparan cuatro alternativas: VPN tradicional mediante WireGuard/IPSec, Reverse SSH, ZeroTier/Remote.it y Tailscale. La comparación se realiza considerando el escenario de la florícola, donde

la red privada puede estar detrás de un proveedor de Internet y se requiere acceso tanto a equipos de red como los robots.

Tabla 55. Comparación técnica de alternativas

Alternativa	**Base técnica**	**Funciona con NAT/CGNAT**	**Apertura de puertos**	**Acceso a equipos sin cliente instalado**
WireGuard /IPsec	VPN de capa 3; WireGuard encapsula paquetes IP cifrados sobre UDP	Limitado si no hay servidor o extremo alcanzable	Generalmente sí, en el servidor VPN	Sí, mediante rutas VPN
Reverse SSH	Túnel SSH reverso usando ssh -R	Sí	No en la florícola; sí puede requerir servidor externo	No práctico
ZeroTier / Remote.it	Red virtual o conexión remota sin port forwarding	Sí	No	Limitado; requiere equipo puente o configuración adicional
Tailscale	Red privada *overlay* basada en WireGuard, ACL y *subnet routers*	Sí	No	Sí, mediante *subnet router*

b. Evaluación de cumplimiento para la selección del mecanismo de acceso remoto

A continuación, en la Tabla 56 se realiza la evaluación de cumplimiento de cada alternativa con base en los requisitos definidos previamente. Donde cumple el requisito se representa con "1" y cuando no cumple o lo hace de forma limitada se representa con "0".

Tabla 56. Selección del mecanismo de acceso remoto seguro

Requisito	**VPN tradicional WireGuard/IPSec**	**Reverse SSH**	**ZeroTier / Remote.it**	**Tailscale**
REQ-AR1	0	1	1	1
REQ-AR2	0	1	1	1
REQ-AR3	1	1	1	1
REQ-AR4	1	1	1	1
REQ-AR5	1	0	0	1
REQ-AR6	1	1	1	1
REQ-AR7	1	0	1	1
REQ-AR8	0	1	1	1
REQ-AR9	1	0	1	1
REQ-AR10	1	0	1	1
REQ-AR11	0	1	1	1
REQ-AR12	0	0	1	1
Total	**7/12**	**7/12**	**10/12**	**12/12**
Resultado	Alternativa técnica viable	Solo respaldo puntual	Alternativa secundaria	Seleccionado

Se selecciona Tailscale como mecanismo principal de acceso remoto seguro.

c. Funcionamiento del acceso remoto con Tailscale

Tailscale permite que los equipos autorizados formen parte de una red privada denominada tailnet donde los dispositivos pueden comunicarse mediante conexiones cifradas punto a punto basadas en WireGuard. De acuerdo con la documentación oficial, Tailscale permite conectar dispositivos y servicios de forma segura a través de diferentes redes, creando una red tipo malla entre los equipos registrados [87].

En el presente diseño cumple con estas dos funciones:

- **Acceso directo a los robots de monitoreo:** El robot ejecutan el cliente VPN de forma nativa. Esto permite habilitar sesiones SSH (Tailscale SSH) para auditar el sistema, validar la captura de imágenes, gestionar el almacenamiento local y actualizar rutinas operativas.

- **Gestión de infraestructura mediante subnet router:** Para los equipos incompatibles con el cliente (radios, switches, routers, OLT, ONT o cámaras IP), se configura un nodo intermedio. Esta pasarela enlaza de forma segura el tailnet con la subred física, integrando toda la electrónica de red bajo las mismas políticas de acceso remoto.

En la Figura 27 se observa el funcionamiento lógico propuesto.

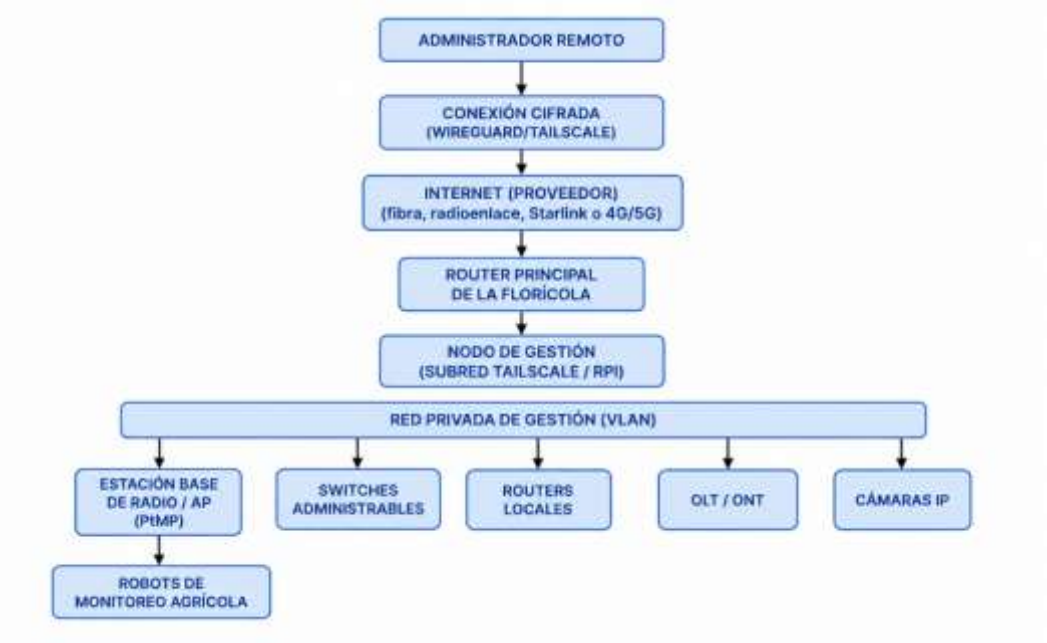


Figura 27. Arquitectura con integración de acceso remoto

Se propone una red privada virtual tipo overlay sobre la conectividad física existente utilizando Tailscale. Esta plataforma crea una red privada basada en identidades, denominada tailnet. Las conexiones se establecen de punto a punto mediante cifrado WireGuard eliminando la necesidad de configurar complejas reglas de NAT o abrir puertos en los enrutadores de los proveedores de servicio.

d. Equipo recomendado para funcionar como subnet router

La documentación oficial de Tailscale menciona que se puede usar casi cualquier dispositivo que ejecute el cliente Tailscale como subnet router, y recomienda dispositivos Linux por su estabilidad y capacidades de red, en la Tabla 56 se presentar las alternativas.

Tabla 57. Alternativas para equipo subnet router

Equipo candidato	**Función en la red**	**Requisito técnico principal**
Raspberry Pi dedicada	Nodo de acceso remoto para pruebas	Linux, Tailscale e IP forwarding
Mini PC con Linux	Nodo de gestión permanente	Linux, Ethernet Gigabit y operación continua
PC industrial con Linux	Gateway de gestión robusto	Linux, interfaces LAN y protección física
Servidor local existente	Subnet router y monitoreo local	Sistema compatible con Tailscale y conexión a la VLAN de gestión

Se considera como opción más adecuada una mini PC con Linux, debido a que puede operar de forma permanente en el nodo principal de comunicaciones y anunciar hacia Tailscale las subredes internas de gestión. Como prototipo, una Raspberry Pi dedicada es suficiente.

3.11 Validación cuantitativa, simulada y experimental de las arquitecturas

h. Diseño de validación técnica

Se establecieron cinco escenarios de simulación y experimentación. Cada escenario se relaciona con indicadores de desempeño, herramientas de análisis y criterios de aceptación previamente definidos. Esta permite comparar los resultados obtenidos con los requerimientos técnicos establecidos para el sistema de conectividad de la florícola. La Tabla 58 presenta los escenarios propuestos para la validación del diseño.

Tabla 58. Escenarios definidos para la validación técnica

Escenario	Diseño evaluado	Tipo de validación	Herramienta o medio	Variables evaluadas
1	Red inalámbrica	Simulación	Radio Mobile	Línea de vista, zona de Fresnel, pérdidas de propagación, potencia recibida y margen del enlace
2	Red inalámbrica	Simulación complementaria	UISP Design Center	Nivel de señal, capacidad estimada, modulación y desempeño de los equipos
3	Red inalámbrica	Prueba experimental	Radioenlace implementado	Conectividad, latencia, pérdida de paquetes y velocidad de transmisión
4	Red de fibra óptica	Simulación	OptiSystem	Potencia óptica recibida, factor Q, BER y diagrama de ojo
5	Red de fibra óptica	Prueba experimental	OTDR	Distancia, atenuación, eventos y continuidad del tramo

Los escenarios 1, 2 y 3 se utilizaron para evaluar la alternativa inalámbrica, mientras que los escenarios 4 y 5 correspondieron a la red de fibra óptica.

3.11.1 Indicadores y criterios de validación Indicadores y criterios de validación

La Tabla 59 presenta los indicadores y criterios para la validación de red inalámbrica.

Tabla 59. Indicadores y criterios para la validación de red inalámbrica.

Indicador	Herramienta	Criterio de aceptación	Escenario
Línea de vista	Radio Mobile	Trayecto sin obstrucciones críticas	1
Zona de Fresnel	Radio Mobile	Despeje suficiente del trayecto	1
Potencia recibida	Radio Mobile y UISP Design Center	Superior a la sensibilidad del receptor	1 y 2
Margen del enlace	Radio Mobile	Mayor que 0 dB	1
Capacidad estimada	UISP Design Center	Superior a la demanda de tráfico	2
Modulación	UISP Design Center	Compatible con la capacidad requerida	2
Conectividad	Ping	Respuesta entre los extremos	3
Latencia	Ping	Dentro del requisito del sistema	3
Pérdida de paquetes	Ping	Dentro del límite establecido	3
Velocidad de transmisión	Herramienta de medición	Superior a la demanda evaluada	3

La Tabla 60 presenta los indicadores y criterios para la validación de red de fibra óptica.

Tabla 60. los indicadores y criterios para la validación de red de fibra óptica.

Indicador	Herramienta	Criterio de aceptación	Escenario
Potencia óptica recibida	OptiSystem	Dentro del rango operativo de la ONU/ONT	4
Factor Q	OptiSystem	Compatible con un BER aceptable	4
BER	OptiSystem	$\leq 1 * 10^{-10}$	4
Diagrama de ojo	OptiSystem	Apertura visible sin cierre significativo	4
Distancia del tramo	OTDR	Cercana a la longitud nominal	5
Atenuación	OTDR	Coherente con la fibra monomodo utilizada	5
Eventos ópticos	OTDR	Eventos identificables en la traza	5
Continuidad	OTDR	Sin interrupciones antes del final del tramo	5

3.11.2 Validación experimental y simulada de la arquitectura de la Red Inalámbrica

En la Tabla 61 se muestran los indicadores evaluados para la red inalámbrica.

Tabla 61. Escenarios considerados para la validación de la red inalámbrica

Escenario	Método de validación	Indicadores evaluados	Herramienta
Escenario 1	Simulación de propagación de los radioenlaces	Línea de vista, despeje de la primera zona de Fresnel, pérdidas de propagación, potencia recibida y margen sobre la sensibilidad	Radio Mobile

Escenario 2	Simulación de la arquitectura punto a multipunto con los equipos seleccionados	Nivel de señal, ruido RF, relación señal-ruido, modulación, capacidad estimada por enlace, demanda por nodo y utilización del sector PtMP	UISP Design Center y cálculos de capacidad
Escenario 3	Caracterización experimental de un enlace AP–CPE	Conectividad, latencia local, pérdida de paquetes y throughput de subida y descarga extremo a extremo	Ping y Speedtest

a. Validación mediante la simulación en Radio Mobile

La validación de los radioenlaces se realizó mediante Radio Mobile, para contrastar los cálculos teóricos, la herramienta considera ubicación geográfica, perfil del terreno, frecuencia de operación, altura de antenas, potencia de transmisión, sensibilidad del receptor, ganancia de antenas y condiciones estadísticas del enlace. El proceso de configuración del software se evidencia en el Anexo B.

En la Figura 28 se plasma como fueron ubicados los nodos, esto en base a las ubicaciones previas obtenidas de Google Earth.

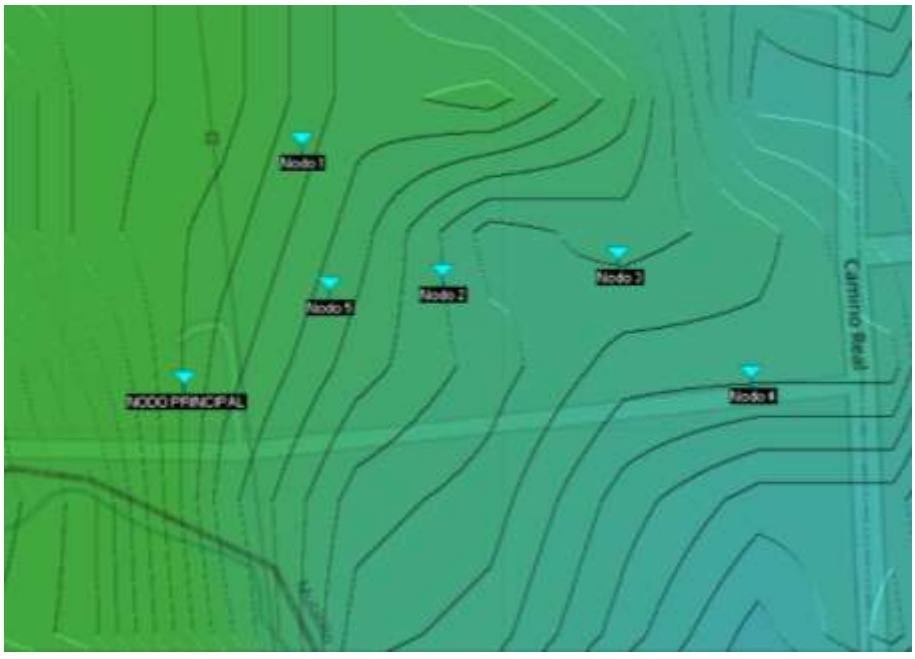


Figura 28. Ubicación de los nodos en Radio Mobile

Los resultados de la simulación de cada enlace se presentan en la Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32 y Figura 33 respectivamente.

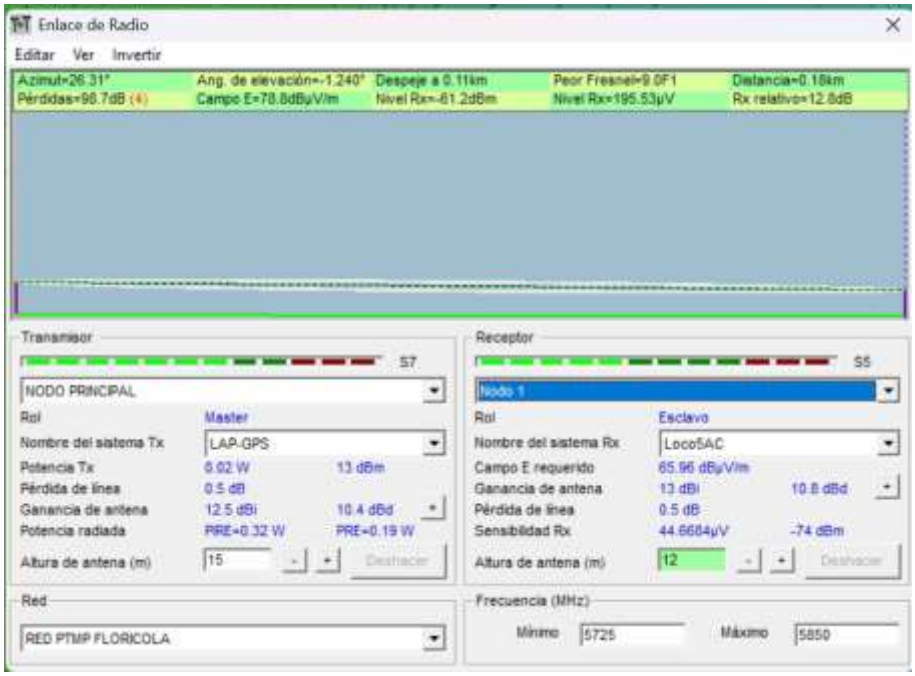


Figura 29. Simulación del enlace NP-N1 en Radio Mobile

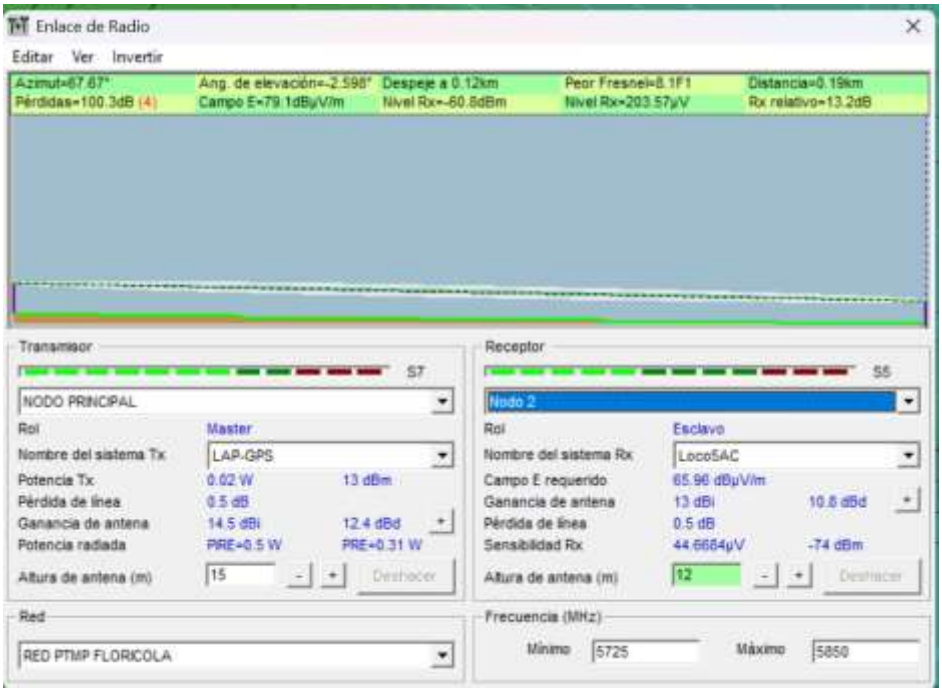


Figura 30. Simulación del enlace NP-N2 en Radio Mobile

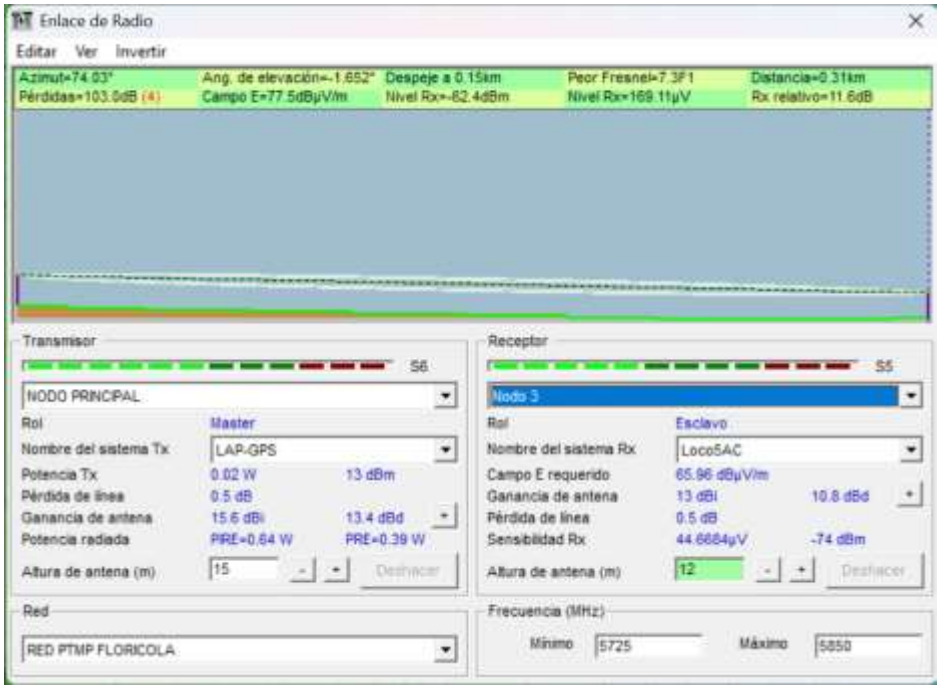


Figura 31.Simulación del enlace NP-N3 en Radio Mobile

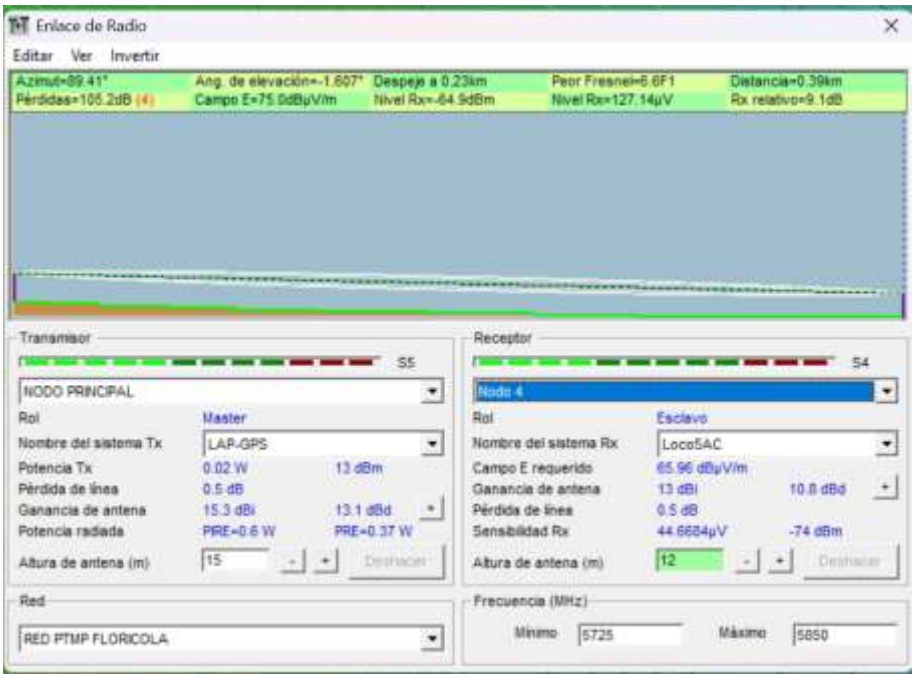


Figura 32. Simulación del enlace NP-N4 en Radio Mobile

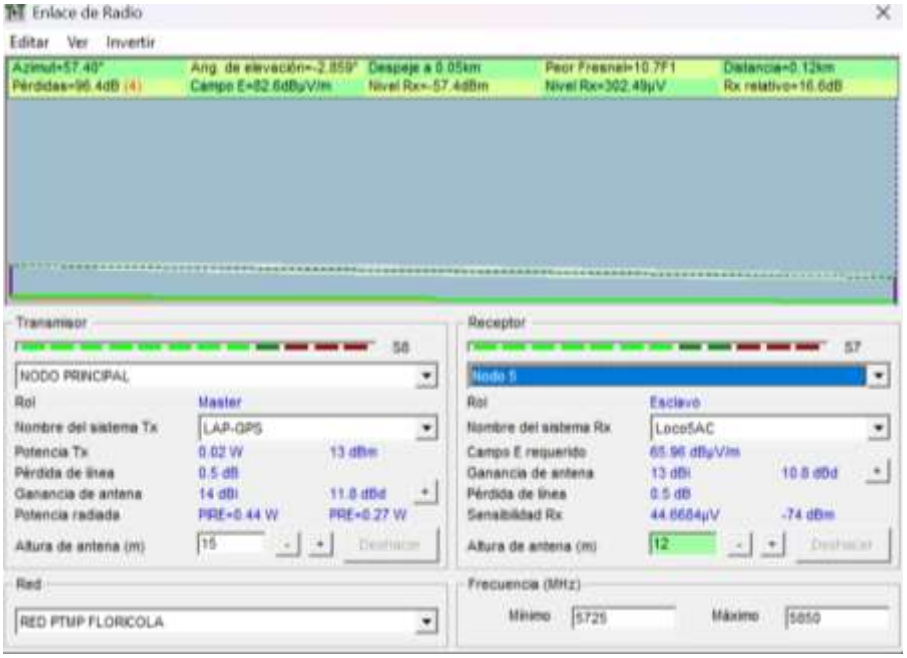


Figura 33. Simulación del enlace NP-N5 en Radio Mobile

En la Tabla 62 se resumen los resultados de cada simulación.

Tabla 62. Análisis de resultados de simulación en Radio Mobile

Enlace	**Espacio libre (dB)**	**Pérdida total de propagación (dB)**	**Mínimo despeje Fresnel**	**Margen sobre umbral (dB)**	**Potencia Rx estimada (dBm)**
NP – N1	92.9	98.7	9.0 F1	12.8	-64.2
NP – N2	93.4	100.3	8.1 F1	13.2	-63.8
NP – N3	97.5	103.0	7.3 F1	11.6	-65.4
NP – N4	99.5	105.2	6.6 F1	9.1	-67.9
NP – N5	89.2	96.4	10.7 F1	16.6	-60.4

Todos los enlaces presentan línea de vista, despeje de Fresnel suficiente y margen positivo sobre la sensibilidad adoptada.

b. Validación complementaria en UISP Design Center

Otra herramienta muy útil para la planificación de radioenlaces es UISP Design Center propio de Ubiquiti, esta permite simular directamente con equipos de su marca y al haber elegido el LAP-GPS para la estación base y para los nodos secundarios el NanoStation 5AC Loco, la simulación del comportamiento de estos equipos es de gran ayuda para el diseño, en la Figura 34 se muestra la ubicación de los nodos en el mapa.

Figura 34. Ubicación de los nodos en UISP Design Center

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de cada enlace en las. Las potencias configuradas fueron 13 dbm en la estación base y 17 dBm en los nodos secundarios.

Figura 35. Simulación del enlace NP-N1 en UISP Design Center

Figura 36. Simulación del enlace NP-N2 en UISP Design Center

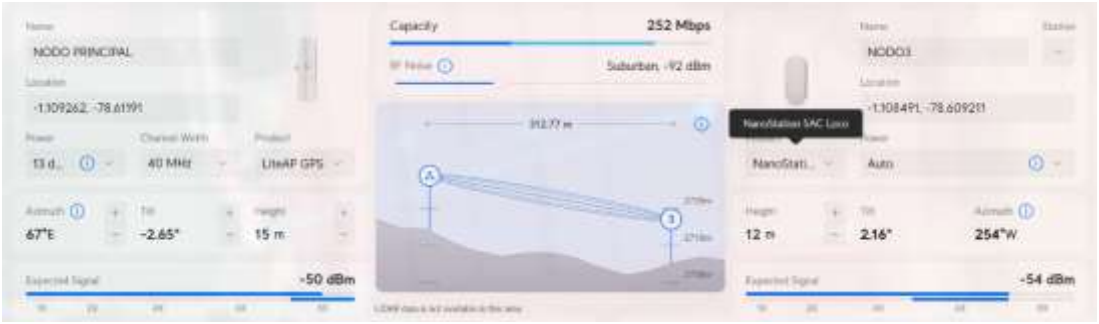


Figura 37. Simulación del enlace NP-N3 en UISP Design Center

Figura 38. Simulación del enlace NP-N4 en UISP Design Center

Figura 39. Simulación del enlace NP-N5 en UISP Design Center

En la Tabla 63, se resumen los parámetros obtenidos de la simulación de cada enlace:

Tabla 63. Resultados de validación complementaria en UISP Design Center

Enlace	**Ruido RF**	**Capacidad estimada**	**Señal esperada en AP**	**Señal esperada en CPE**
NP–N1	-92 dBm	290 Mbps	-46 dBm	-53 dBm
NP–N2	-92 dBm	290 Mbps	-46 dBm	-50 dBm
NP–N3	-92 dBm	252 Mbps	-50 dBm	-54 dBm
NP–N4	-92 dBm	252 Mbps	-52 dBm	-57 dBm
NP–N5	-92 dBm	305 Mbps	-43 dBm	-46 dBm

A partir de los resultados se concluye que todos los enlaces presentan capacidad estimada superior a 250 Mbps a nivel individual y niveles de señal adecuados para su operación. Sin embargo, al tratarse de una topología punto a multipunto, esa capacidad no representa un ancho de banda para cada nodo de manera simultánea, sino una capacidad referencial en condiciones simuladas.

i. Análisis de capacidad por nodo.

La capacidad del sector se distribuye entre los nodos activos mediante el tiempo de aire asignado (TDMA), por ello el rendimiento de cada nodo va a depender de la cantidad de los nodos transmitiendo, la calidad de señal, el nivel de ruido, la modulación y el tráfico generado.

Para complementar la simulación se determinó la demanda asociada con cada nodo secundario y se estimó la utilización conjunta del sector PtMP. El análisis consideró la distribución de los 18 invernaderos entre los cinco nodos secundarios.

La demanda del nodo (i) se calculó mediante la Ecuación 21:

$$\boldsymbol{D_i = n_i R_{inv}} \tag{21}$$

Donde:

$\boldsymbol{D_i}$ = es la demanda de tráfico del nodo (i), (Mbps)

$\boldsymbol{n_i}$ = es el número de invernaderos asociados al nodo (i).

$\boldsymbol{R_{inv}}$ = es la tasa de transmisión requerida por cada invernadero, (Mbps)

Se evaluaron dos condiciones de tráfico. La primera corresponde al escenario operativo seleccionado para la propuesta, basado en almacenamiento local y transmisión diferida. En la tabla se muestran los resultados finales.

Tabla 63. Demanda de tráfico y capacidad estimada por nodo

Nodo	Invernaderos asociados	Capacidad estimada (C_i)	Demanda diferida	Demanda crítica
N1	4	290 Mbps	46,96 Mbps	62,60 Mbps
N2	4	290 Mbps	46,96 Mbps	62,60 Mbps
N3	4	252 Mbps	46,96 Mbps	62,60 Mbps
N4	2	252 Mbps	23,48 Mbps	31,30 Mbps
N5	4	305 Mbps	46,96 Mbps	62,60 Mbps
Total	18		211,32 Mbps	281,70 Mbps

La comparación individual muestra que la capacidad estimada de cada enlace supera la demanda del nodo correspondiente. No obstante, esta comparación no considera que todos los CPE comparten el tiempo de aire de la estación base.

3.11.3 Validación de sistema de radio frecuencia

Para la validación del prototipo del sistema de comunicación inalámbrica se realizó un enlace de radiofrecuencia con una distancia promedio de 90 metros, que representa la distancia de uno de los enlaces de la florícola, específicamente del nodo NP-N5, esto se seleccionó debido a la distancia entre cada punto y por la infraestructura disponible para la instalación del radio base y CPE.

Los equipos seleccionados para la prueba de enlace fueron seleccionados según la disponibilidad de la empresa y los nodos se ubicaron según la facilidad de despliegue.

En la Figura 40 se presenta la instalación de la antena y el radio (Ubiquiti Rocket Prism M5) que representa el nodo principal del diseño (NP) para realizar las pruebas de funcionamiento.

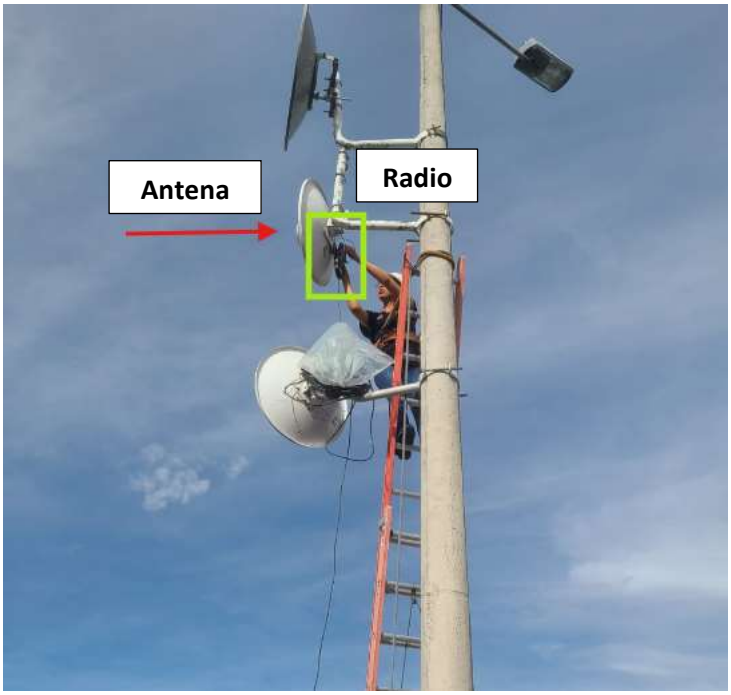


Figura 40. Instalación del nodo principal o NP

Para la antena receptora se eligió una antena Ubiquiti Loco M5 debido a su disponibilidad y compatibilidad con el equipo del nodo principal, en la Figura 41 se muestra la instalación de esta.

Figura 41. Instalación del CPE

En la Tabla 64 se presenta los elementos instalados para cada uno de los nodos

Tabla 64. Elementos instalados para cada nodo.

Nodo	Elementos instalados	Función dentro del sistema
Nodo principal o estación base	Antena principal, estación base o radio, switch, inyector PoE, cable UTP	Concentrar la comunicación del enlace punto–multipunto y gestionar la transmisión de datos hacia el nodo remoto.
Nodo remoto 1	CPE con antena integrada, inyector PoE, cable UTP, soporte metálico y caja de conexión	Enviar o recibir información desde el punto remoto hacia la estación base mediante el enlace inalámbrico.

La primera antena instalada en el nodo repetidor se configuró considerando que debía establecer comunicación con la antena ubicada en uno de los puntos de cobertura del invernadero. Esta configuración forma parte del radioenlace diseñado para proporcionar conectividad inalámbrica en los diferentes sectores de la florícola y permitir que la información recolectada por el robot sea enviada hacia el servidor central.

Se asignó a la antena la dirección IP 192.168.10.5/24 para la realización de pruebas de configuración, como se presenta en la Figura 42. De esta manera, la antena receptora del nodo repetidor cumple la función de recibir el tráfico de datos proveniente de los puntos remotos del invernadero y redirigirlo hacia el nodo central, donde se realiza el almacenamiento, procesamiento y monitoreo de las imágenes obtenidas.

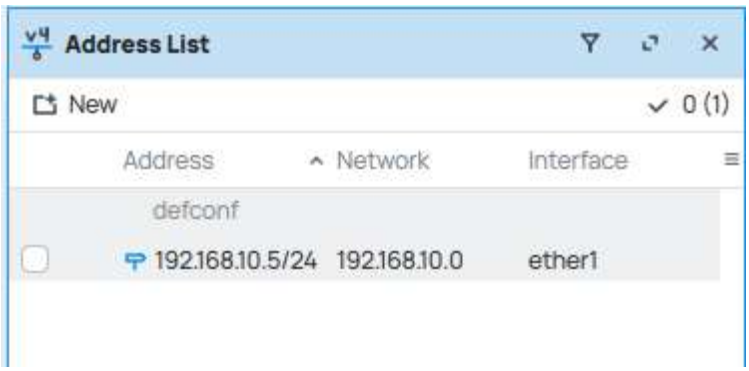


Figura 42. Configuración del direccionamiento IP de la antena receptora del nodo repetidor.

Las pruebas de conectividad se realizaron hacia la dirección IP 192.168.10.8, que simula al equipo de destino del sistema de monitoreo instalado en la florícola. Estas pruebas se efectuaron utilizando el enlace inalámbrico dedicado.

El objetivo de esta evaluación fue comprobar la estabilidad de la comunicación entre el computador de monitoreo y el equipo de destino, considerando que el robot debe enviar las imágenes capturadas hacia el servidor o nodo central para su almacenamiento y análisis. Además, como prueba complementaria, se evaluó la velocidad de internet del enlace, con el fin de verificar la capacidad de transmisión disponible para el envío de imágenes y datos generados durante el monitoreo de las flores.

Las pruebas de conectividad permitieron determinar si el radioenlace es viable para la subida de los datos que requiere el sistema y fue posible analizar el desempeño del enlace dedicado en términos de respuesta, disponibilidad y capacidad de transmisión de información.

La Figura 43 muestra la prueba de ping realizada desde el computador de monitoreo hacia la dirección 192.168.10.8 mediante el enlace inalámbrico dedicado.

Figura 43. Prueba de conectividad hacia 192.168.10.8 mediante el enlace inalámbrico dedicado.

La Figura 44 muestra la prueba de velocidad de internet realizada en el nodo remoto, con la finalidad de evaluar el desempeño del enlace inalámbrico dedicado en el envío y recepción de datos. Esta prueba permitió conocer la capacidad del radioenlace para subir la información generada por el robot de monitoreo, con un ancho de banda de

subida promedio de 88 Mbps, que es más que suficiente para una distancia similar a las de cada nodo de la red inalámbrica.

Figura 44. Prueba de velocidad mediante el enlace inalámbrico dedicado propuesto.

La Tabla 65 presenta el resumen de los resultados obtenidos durante las pruebas de conectividad correspondientes al escenario postest. Estas pruebas se realizaron hacia la dirección IP 192.168.10.8, correspondiente al equipo de destino del sistema de monitoreo, con el propósito de verificar la estabilidad de la comunicación mediante el enlace inalámbrico dedicado implementado.

Tabla 65. Resultados de conectividad en el sistema de radio enlace

Prueba	**Destino**	**Paquetes enviados**	**Paquetes recibidos**	**Paquetes perdidos**	**Pérdida**	**Latencia promedio**
Primer intento hacia el destino	192.168.10.8	20	20	0	0 %	5 ms
Segundo intento hacia el destino	192.168.10.8	100	100	0	0 %	8 ms

Los resultados obtenidos evidencian que el enlace inalámbrico presentó una comunicación estable entre el nodo de adquisición y el equipo de destino. En ambos intentos no se registró pérdida de paquetes, alcanzando un 0 % de pérdida, lo cual indica que la transmisión de datos se realizó de forma continua y confiable.

Asimismo, las latencias promedio de 5 ms y 8 ms reflejan tiempos de respuesta bajos, adecuados para el envío de imágenes y datos generados por el robot de monitoreo

dentro de la florícola. Estos valores permiten concluir que el radioenlace propuesto soportará el tráfico de cada robot e inclusive de cámaras de video.

j. Prueba de throughput extremo a extremo resultados

El throughput registrado superó las dos demandas de referencia bajo las condiciones de la prueba. Sin embargo, el valor de 88,3 Mbps corresponde al trayecto completo hacia Internet e incluye el radioenlace, la red local, el proveedor, el enrutamiento externo y el servidor de destino. Por esta razón, no representa exclusivamente el throughput del radioenlace.

En la Tabla 66 se registra la comparación y por lo tanto viabilidad.

Tabla 66. Comparación entre throughput registrado y demanda de referencia

Escenario	**Demanda de referencia**	**Throughput registrado**	**Resultado**
Transmisión diferida	58,70 Mbps	88,3 Mbps	Cumple
Transmisión continua crítica	78,25 Mbps	88,3 Mbps	Cumple en la prueba individual

3.11.4 Validación experimental y simulada de la arquitectura de la Red de Fibra óptica

Una vez definida la arquitectura física de la red de fibra óptica, se validó en el software de OptiSystem. Esta herramienta permite simular enlaces ópticos a nivel de capa física, resultando de gran ayuda para analizar el comportamiento de la señal óptica en sistemas de transmisión basados en fibra. OptiSystem es utilizado para planificar y evaluar enlaces ópticos mediante generadores de señal, moduladores, fibra óptica, divisores, componentes que ayudan a analizar el desempeño de un enlace [88] .

La simulación de la propuesta es una red óptica pasiva conformada de un nodo principal y 5 secundarios, correspondientes a la arquitectura de fibra óptica planteada en la florícola. Este modelo considera una distribución punto-multipunto pasiva a través de un divisor óptico, permitiendo validar el transporte de la señal óptica hacia los nodos secundarios ubicados en lugares estratégicos en la florícola.

La validación de la propuesta se centra en el comportamiento físico del enlace óptico, considerando la transmisión de la señal desde el nodo principal, el divisor óptico hasta la recepción de esta en los nodos secundarios. La recomendación ITU-T G.984.2 define las especificaciones de capa física para redes GPON, incluyendo parámetros relacionados con la transmisión y presupuestos ópticos [85].

El objetivo de la simulación es verificar que la propuesta de la red de fibra óptica sea técnicamente viable para el sistema de conectividad florícola ya que permite evaluar parámetros de potencia óptica, calidad de la señal, tasa de bit error y diagrama del ojo. Estos parámetros permiten verificar que la señal óptica recibida en los nodos secundarios mantiene las condiciones adecuadas para transmitir la información generada por el sistema de monitoreo agrícola.

a. Indicadores considerados para la validación

Para organizar la evaluación se definieron indicadores relacionados con el desempeño de la señal y las características del medio óptico. La Tabla 67 presenta los indicadores considerados en cada escenario.

Tabla 67. Indicadores considerados para la validación de la red de fibra óptica.

Escenario	Método de validación	Indicadores evaluados	Herramienta
Escenario 4	Simulación de la arquitectura GPON	Potencia óptica recibida, factor Q, BER y diagrama de ojo	OptiSystem
Escenario 5	Caracterización de tramos pasivos de fibra	Distancia, atenuación, pérdida de retorno, eventos y continuidad	OTDR

La potencia recibida se utilizó para comprobar que la señal alcanzara cada nodo dentro del rango de operación de la ONU/ONT seleccionada. El factor Q y el BER permitieron evaluar la calidad de la señal digital, mientras que el diagrama de ojo se utilizó como una representación visual de la distorsión y separación entre los niveles lógicos. En la evaluación experimental, la traza del OTDR permitió determinar la longitud del tramo y observar cambios producidos por conexiones, terminaciones o discontinuidades.

b. Escenario 4: simulación de la red GPON en OptiSystem

El escenario 4 tuvo como objetivo representar el comportamiento de la arquitectura de fibra óptica propuesta para la florícola. El modelo se configuró con un nodo principal, un divisor óptico 1:8 y cinco ramas correspondientes a los nodos secundarios. Las longitudes de las ramas se establecieron según las distancias definidas durante el dimensionamiento de la red.

La simulación se desarrolló en cinco etapas:

- Generación de la secuencia de datos en el nodo principal.
- Modulación eléctrica y generación de la portadora óptica.
- Distribución de la señal mediante el divisor óptico 1:8.
- Configuración de la longitud de fibra correspondiente a cada nodo secundario.
- Recepción y análisis de la señal mediante medidores de potencia, fotodetectores, filtros y analizadores de BER y diagrama de ojo.

Los componentes de la simulación en OptiSystem son los siguientes:

- ***Nodo Principal***
  - **PRBS Generator:** Genera la secuencia binaria de datos para representar la información transmitida.
  - **NRZ Pulse Generator:** Convierte la secuencia binaria en una señal eléctrica con formato NRZ.
  - **CW Laser:** Genera la portadora óptica para la transmisión por fibra.
  - **Mach-Zehnder Modulator:** Modula la señal óptica a partir de la señal eléctrica de entrada.
  - **Power Splitter 1:8:** Divide la señal óptica hacia las salidas destinadas a los nodos secundarios.
- ***Nodo Secundario***

- **Optical Fiber:** Representa el tramo de fibra entre el nodo principal y cada nodo secundario.
- **Optical Power Meter:** Permite medir la potencia óptica recibida en cada rama.
- **PIN Photodetector:** Convierte la señal óptica recibida en señal eléctrica.
- **Low Pass Bessel Filter:** Filtra la señal eléctrica para reducir componentes no deseados.
- **3R Regenerator:** Regenera la señal recibida para su análisis posterior.
- **BER Analyzer:** Evalúa la tasa de error de bit y el factor de calidad de la señal.
- **Eye Diagram Analyzer:** Permite observar la apertura del diagrama de ojo y la calidad de la señal recibida.

La Figura 45 presenta el modelo completo de la red implementado en OptiSystem.

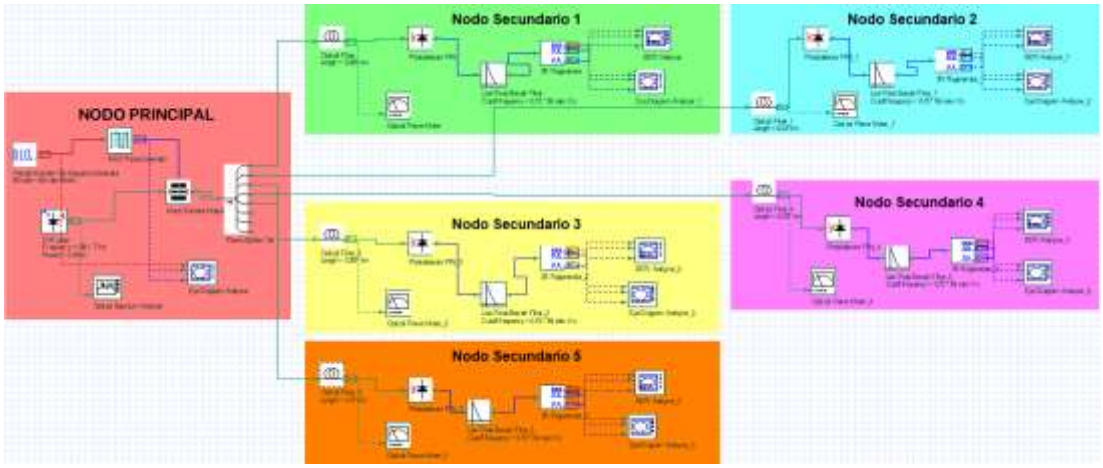


Figura 45. Simulación de la red de fibra óptica. OptiSystem

La configuración del nodo principal se muestra en la Figura 46, mientras que la Figura 47 presenta la configuración utilizada en los nodos secundarios. Los parámetros específicos de cada rama se encuentran detallados en el Anexo G.

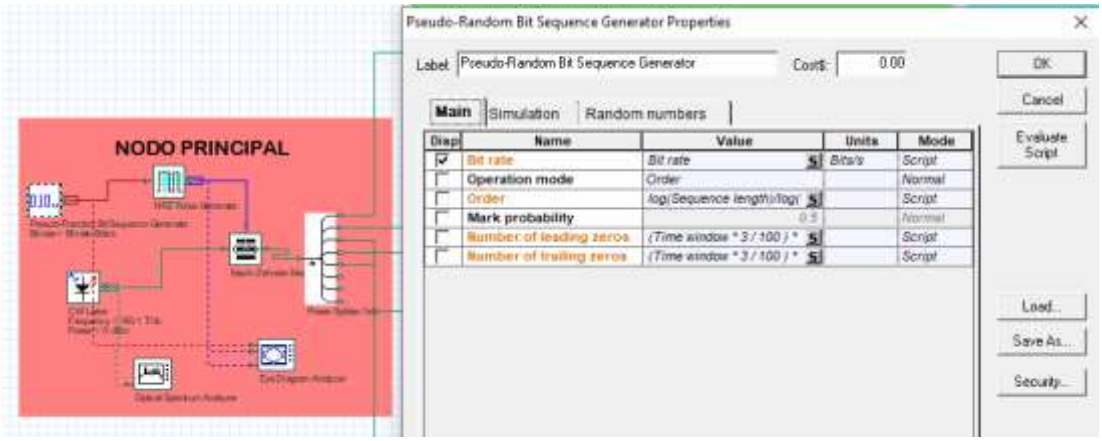


Figura 46. Configuración nodo principal. OptiSystem.

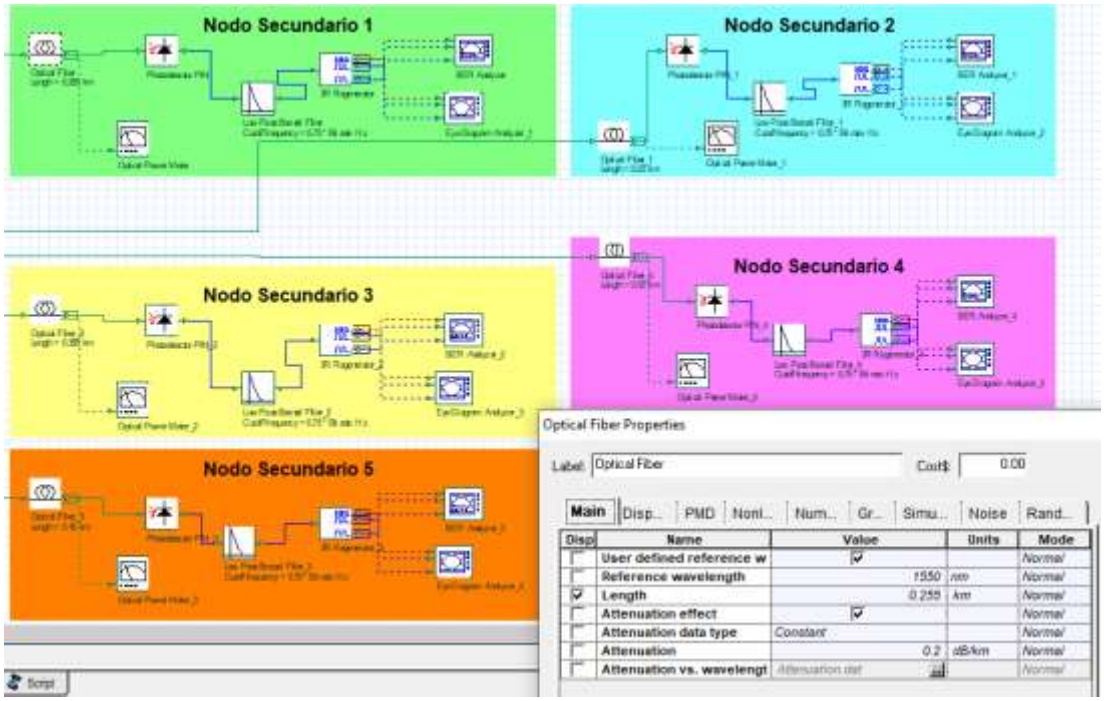


Figura 47. Configuración nodos secundarios

- ***Resultados de la simulación de red de fibra óptica***

La potencia recibida permite analizar la pérdida de señal en cada rama óptica, mientras que el factor Q, el BER (tasa de error de bits) y el diagrama de ojo permiten evaluar la calidad de transmisión. La presencia de un diagrama del ojo con apertura adecuada indica una menor distorsión en la señal y muna separación clara entre los niveles lógicos de la señal. Los valores bajos del BER señala una baja probabilidad de errores

en la transmisión de datos. Las Figura 48 presenta los diagramas de BER y de ojo obtenidos para los nodos secundario.

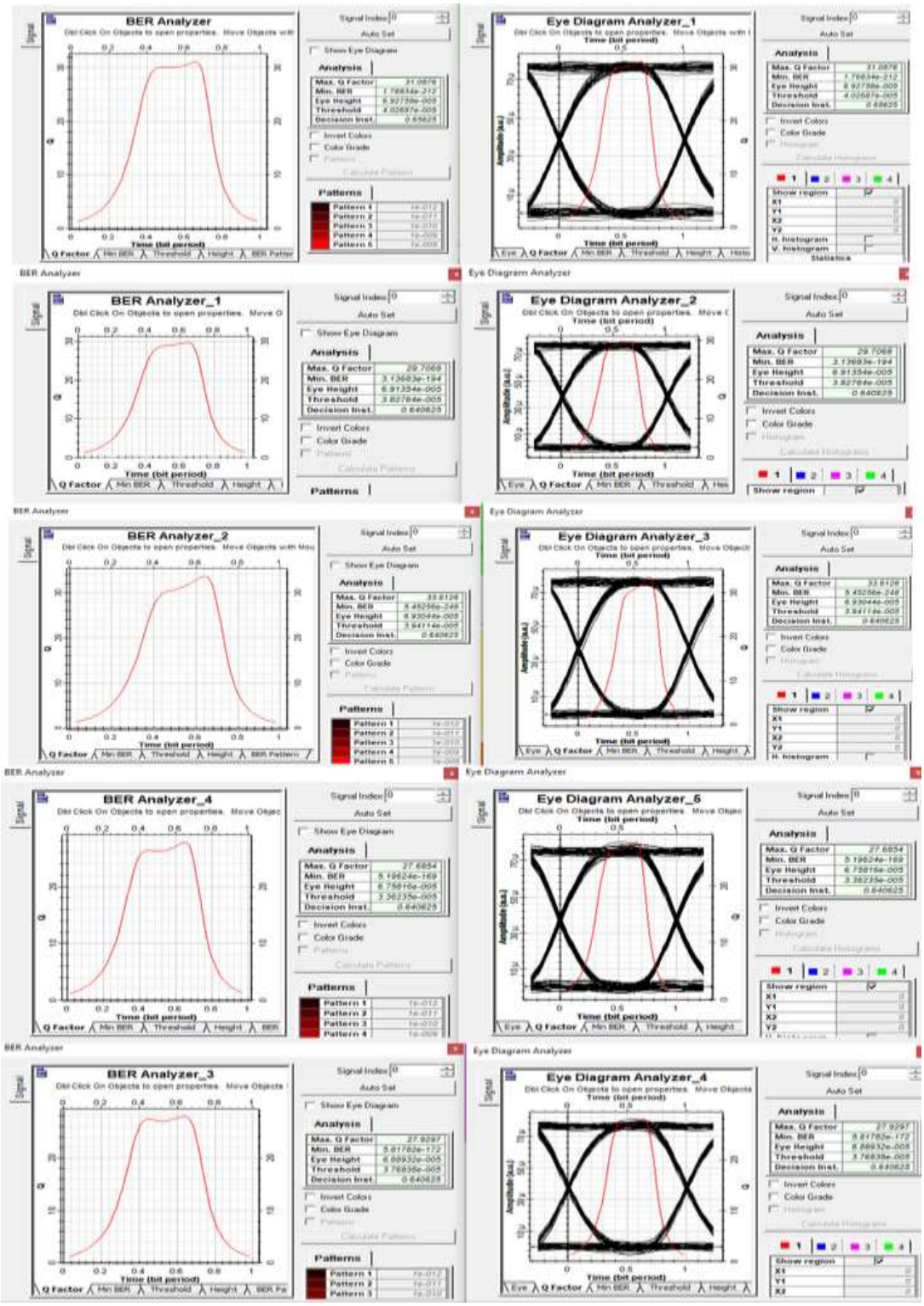


Figura 48. Diagramas del BER y ojo de los Nodos Secundarios.

La potencia óptica recibida en cada nodo secundario se obtuvo mediante el instrumento Optical Power Meter de OptiSystem, ubicado a la salida de cada tramo de fibra óptica y antes del fotodetector PIN, permitiendo comparar los valores calculados y simulados.

Las Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52 y Figura 53 indican la potencia recibida de cada enlace óptico secundario respectivamente que son parecidas a las obtenidas en los cálculos realizados previamente.

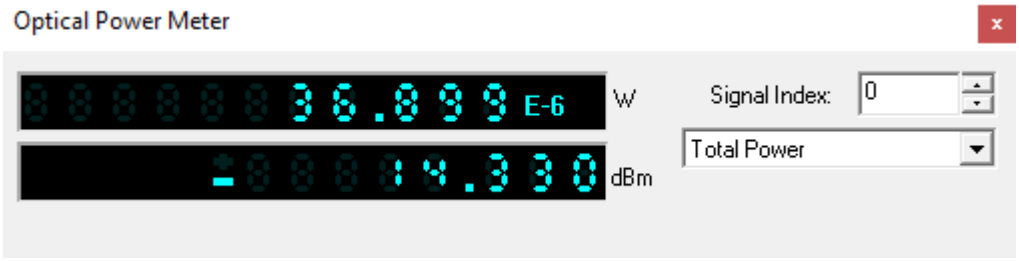


Figura 49. Potencia recibida Nodo 1.

Figura 50. Potencia recibida Nodo 2.

Figura 51. Potencia recibida Nodo 3.

Figura 52. Potencia recibida Nodo 4.

Figura 53. Potencia recibida Nodo 5.

La Tabla 68 resume los resultados obtenidos en los cinco nodos secundarios.

Tabla 68. Resultados de la simulación OptiSystem.

Nodo secundario	Potencia recibida	Factor Q máximo	BER mínimo
Nodo 1	-14,330 dBm	31,0876	$1{,}76834 * 10^{-212}$
Nodo 2	-14,227 dBm	29,7068	$3{,}13683 * 10^{-194}$
Nodo 3	-14,250 dBm	33,6128	$5{,}45256 * 10^{-248}$
Nodo 4	-14,286 dBm	27,6854	$5{,}19624 * 10^{-169}$
Nodo 5	-14,209 dBm	27,9297	$5{,}81782 * 10^{-172}$

Los resultados obtenidos de la simulación en OptiSystem corroboran que todos los nodos secundarios presentan potencias recibidas cercanas a -14 dBm, que son valores adecuados de recepción óptica en la propuesta de red óptica. Además, el factor Q es elevado y los valores del BER son mínimos, evidenciando una transmisión estable y baja probabilidad de error.

Debe considerarse que estos resultados corresponden a un modelo de simulación de la capa física. Por esta razón, no representan mediciones realizadas sobre una red GPON implementada ni incluyen los efectos de tráfico real, asignación dinámica de ancho de banda, configuración de las ONU/ONT o sobrecarga de protocolos.

c. Escenario 5: medición experimental mediante OTDR

Con el objetivo de complementar la simulación a través de la evaluación experimental del medio físico. Para ello, se emplearon un OTDR, bobinas de fibra óptica monomodo, patch cords y conectores ópticos. La traza obtenida permitió determinar la longitud aproximada del enlace, la atenuación de la fibra e identificar la posición de eventos relacionados con conectores, empalmes o terminaciones.

- ***Descripción de montaje experimental***

El montaje experimental incluyó un OTDR, patch cords, conectores ópticos y bobinas de fibra monomodo, utilizadas para representar las distancias del enlace. Con esta configuración se comprobó la continuidad del trayecto óptico y se identificaron los eventos correspondientes a conectores y empalmes. La Figura 54 muestra el montaje experimental de la validación de red óptica con OTDR.

Figura 54. Montaje experimental para la validación de fibra óptica mediante OTDR.

Dentro del escenario 5 se evaluaron dos configuraciones experimentales. La primera correspondió a un tramo nominal cercano a 2 km y la segunda a un tramo aproximado de 1 km. Los parámetros y resultados de ambas mediciones se presentan a continuación.

La Figura 55 permite verificar la distancia del enlace e identificar eventos asociados a conexiones o terminaciones.

Figura 55. Medición OTDR del escenario 1 con tramo aproximado de 2.01 km

La Figura 56 muestra el comportamiento del enlace extendido, permitiendo identificar pérdidas, eventos intermedios y final del tramo óptico.

Figura 56. Medición experimental de un tramo de fibra óptica de aproximadamente 978.43 m.

Los resultados obtenidos en el OTDR evidencian que la arquitectura de fibra óptica propuesta es técnicamente viable para el entorno florícola, ya que los enlaces evaluados mantienen condiciones adecuadas de transmisión y permiten sustentar la implementación de una red óptica como alternativa de conectividad.

- ***Validación complementaria en Python de la caracterización del canal***

Como complemento de la simulación realizada en OptiSystem y de las mediciones experimentales con OTDR, se desarrolló una aplicación en Python para proyectar el comportamiento del canal óptico en los cinco nodos secundarios de la arquitectura GPON. Las mediciones de 2,01487 km y 978,43 m se utilizaron como referencia experimental, principalmente mediante el coeficiente de atenuación de 0,189 dB/km obtenido en la primera prueba.

La aplicación consideró las distancias de cada rama, la pérdida del divisor óptico 1:8, cuatro conectores, dos empalmes y un margen de diseño de 3 dB. Para cada nodo se calcularon la pérdida de fibra, la pérdida total de diseño, la potencia óptica recibida, el margen respecto a la sensibilidad de la ONU/ONT y el retardo de propagación. En la Figura 57 se muestra la interfaz de Pyhton.

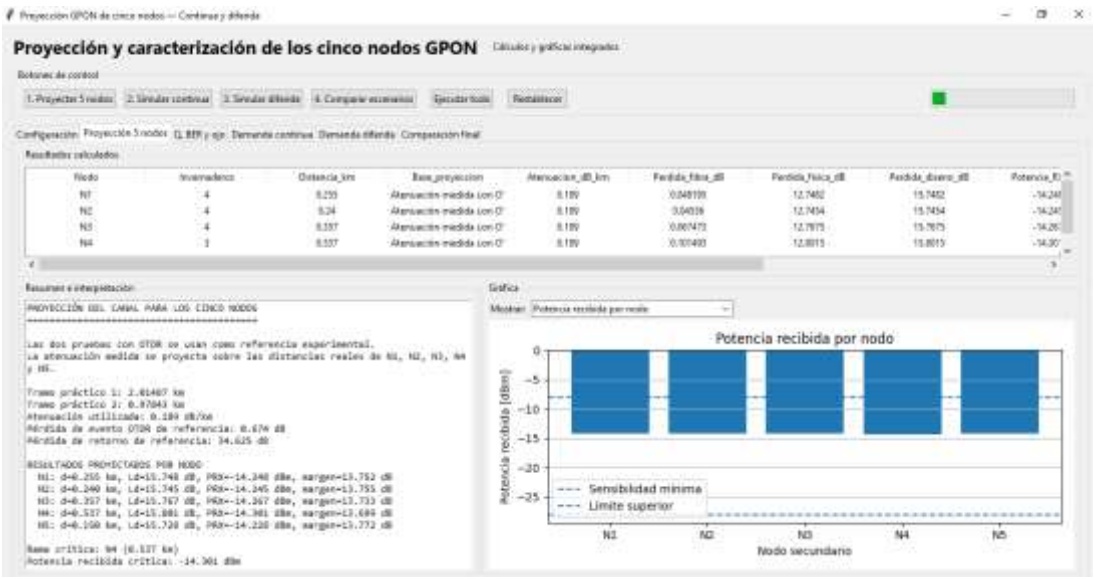


Figura 57. Interfaz de caracterización del canal de fibra óptica. Python.

En la Tabla 69 se resume los resultados proyectados de la caracterización del canal óptico.

Tabla 69. Resultados proyectados

Nodo	Distancia (km)	Pérdida de diseño (dB)	Potencia recibida (dBm)	Margen (dB)
N1	0,255	15,748	−14,248	13,752
N2	0,240	15,745	−14,245	13,755
N3	0,357	15,767	−14,267	13,733

Nodo	Distancia (km)	Pérdida de diseño (dB)	Potencia recibida (dBm)	Margen (dB)
N4	0,537	15,801	−14,301	13,699
N5	0,150	15,728	−14,228	13,772

Las potencias recibidas se encontraron entre −14,301 dBm y −14,228 dBm, dentro del rango operativo definido para las ONU/ONT.

Se obtuvieron los factores Q superiores a 27 y valores de BER inferiores a 1×10^{-10}en los escenarios continuo y diferido. Los diagramas de ojo mostraron una apertura definida, por lo que la variación de la tasa de transmisión no produjo cambios significativos en las condiciones físicas del canal.

La Tabla 70, presenta la comparativa entre los escenarios de transmisión continua y diferida de la propuesta de fibra óptica.

Tabla 70. Comparación de los escenarios de transmisión

Indicador	Continua	Diferida	Variación
Demanda agregada	281,70 Mbps	211,32 Mbps	−24,99 %
Throughput promedio	282,83 Mbps	211,17 Mbps	−25,34 %
Utilización del enlace	22,74 %	16,98 %	−25,33 %
Retardo promedio	0,8149 ms	0,8142 ms	−0,08 %
Jitter	0,0045 ms	0,0036 ms	−19,89 %
Pérdida de paquetes	0 %	0 %	0 %
Tiempo de finalización	2,489 h	3,334 h	+33,93 %

En los dos escenarios se atendieron con la capacidad ascendente de 1,244 Gbps. La transmisión diferida redujo aproximadamente una cuarta parte de la demanda y utilización instantánea del enlace, sin embargo, aumentó el tiempo necesario para completar la transferencia. Estos resultados corresponden a un modelo equivalente y no sustituyen una prueba real con la OLT y las cinco ONU/ONT operando simultáneamente.

3.12 Comparación de los resultados de las arquitecturas propuestas

La arquitectura inalámbrica y de fibra óptica presentaron resultados técnicos adecuados para transportar los datos generados por el sistema de monitoreo florícola. La red inalámbrica obtuvo capacidades simuladas entre 252 Mbps y 305 Mbps, mientras que en la prueba experimental se registró una velocidad de subida de 88 Mbps, latencias entre 5 ms y 8 ms y 0 % de pérdida de paquetes. Estos resultados

muestran que esta alternativa puede atender la demanda estimada, con la ventaja de requerir menor infraestructura física y permitir una instalación más rápida.

En la red de fibra óptica, la simulación presentó potencias recibidas entre −14,330 dBm y −14,209 dBm, factores Q entre 27,6854 y 33,6128 y valores de BER inferiores a 1×10^{-10}. Además, la capacidad nominal ascendente distribuida entre los cinco nodos fue de 248,8 Mbps por nodo. Las mediciones con OTDR permitieron comprobar la continuidad y distancia de los tramos pasivos evaluados. La Tabla 71 presenta la comparación de las arquitecturas propuestas.

Tabla 71. Comparación de las arquitecturas propuestas

Criterio	**Red inalámbrica**	**Red de fibra óptica**
Capacidad	252–305 Mbps simulados	248,8 Mbps ascendentes nominales por nodo
Validación experimental	88 Mbps, 5–8 ms y 0 % de pérdida	Continuidad y distancia verificadas mediante OTDR
Medio de transmisión	Radiofrecuencia en 5 GHz	Fibra óptica monomodo
Ventaja principal	Menor costo y rápida instalación	Mayor estabilidad y capacidad de ampliación
Limitación principal	Sensible a interferencia y capacidad compartida	Mayor inversión y complejidad de instalación
ROI anual	73,8 %	52,5 %
Recuperación de inversión	16,3 meses	22,8 meses

En términos generales, la alternativa inalámbrica presenta mejores condiciones económicas y mayor facilidad de despliegue, por lo que resulta apropiada cuando se requiere una implementación rápida y con menor inversión inicial. La red de fibra óptica ofrece mayor estabilidad, inmunidad frente a interferencias y capacidad de crecimiento, aunque requiere una inversión superior. Por tanto, la selección final dependerá del presupuesto disponible, las condiciones de instalación y las necesidades futuras de ampliación de la florícola.

3.13 Modelo de viabilidad tecno económica del diseño propuesto

El modelo económico se desarrolló bajo el enfoque de servicio administrado, debido a que la empresa Artil Robotics no solo implementaría el sistema robótico, sino que también se encargaría de instalar, configurar, monitorear y mantener la infraestructura

de conectividad necesaria para su funcionamiento. Es decir, la empresa cumple el rol de un MSP (proveedor de servicios administrados) que entrega soporte técnico y gestión continua de la solución.

El análisis contempla tanto los costos de implementación en la florícola como la inversión, los ingresos y la recuperación económica de la empresa encargada de operar el servicio. El estudio toma como referencia dos propuestas de red: la red inalámbrica punto a multipunto y la red de fibra óptica.

Para los dos diseños se realizó un Excel automatizado, el archivo está conformado por estas secciones principales:

- **Guía:** explica cómo usar el modelo económico y qué significa cada sección.
- **Supuestos:** contiene los datos base del caso, como nodos, mensualidad, beneficio estimado, costos operativos y crecimiento de clientes.
- **CAPEX Florícola:** calcula la inversión de la red interna instalada en la florícola.
- **Borde WAN:** compara alternativas de salida a Internet: fibra, Starlink e híbrido.
- **CAPEX MSP:** estima la inversión inicial de la empresa de robótica para operar como proveedor administrado.
- **OPEX:** calcula los costos mensuales de operación por escenario.
- **ROI Cliente:** analiza si a la florícola le conviene económicamente implementar la solución.
- **Ingresos MSP:** calcula la rentabilidad mensual para la empresa de robótica.
- **Flujo MSP:** proyecta el flujo de caja a 36 meses.
- **Fuentes:** registra referencias de fabricantes, proveedores y criterios de cotización.

- **Dashboard:** resume los principales indicadores económicos.

Al realizar la parte de la viabilidad tecnoeconómica, ambos diseños comparten los supuestos que se muestra en la Figura 58, estos son los precios referenciales que toma la empresa para realizar los cobros de la instalación, mantenimiento y servicios. La parte de Borde WAN que se indican en la Figura 59 son los precios de cómo llega el internet a la florícola y el escenario de ingresos del MSP que se muestra en la Figura 58.

Supuestos generales del modelo

Valores referenciales editables. Actualizar dependiendo la floricola

Parámetro	Valor editable	Unidad	Fuente/criterio
Nodos remotos iniciales	5	nodos	Diseño base
Usuarios por nodo	4	usuarios/nodo	Levantamiento
Ancho de banda objetivo por nodo	30	Mbps	Criterio MSP
Contingencia CAPEX	10.0%	%	Presupuestación
% CAPEX cliente financiado por MSP	0.0%	%	Modelo de negocio
Florícolas activas desde mes 1	$1.00	clientes	Escenario base
Mensualidad MSP por florícola	$700.00	USD/mes	Comercial editable
Costo variable MSP por florícola	$200.00	USD/mes	Operativo editable
Costo fijo MSP mensual	$100.00	USD/mes	Operativo editable
Tarifa instalación/proyecto por florícola	$3,000.00	USD	Comercial editable
Mes expansión a 3 florícolas	7	mes	Crecimiento
Mes expansión a 5 florícolas	13	mes	Crecimiento
Mes expansión a 10 florícolas	25	mes	Crecimiento
Beneficio operativo mensual del cliente	$1,500.00	USD/mes	Ahorro/productividad
Internet fibra corporativa mensual	$50.00	USD/mes	Cotizar con ISP local
Starlink mensual	$60.00	USD/mes	Starlink Ecuador
Energía mensual red interna	$20.00	USD/mes	Estimación
Mantenimiento preventivo mensualizado	-	USD/mes	Criterio operativo
Plataforma monitoreo/cloud mensual	$20.00	USD/mes	Herramientas MSP
Repuestos y contingencias mensualizadas	$50.00	USD/mes	Criterio operativo
Visitas técnicas/transporte mensualizado	$45.00	USD/mes	Criterio operativo

Figura 58. Precios supuestos de la empresa.

Escenarios de borde WAN

Solo costos de activación, terminal y mensualidad de la salida a Internet.

Escenario	Tipo costo	Elemento	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (USD)	Subtotal CAPEX	OPEX mensual
Fibra corporativa	CAPEX	Activación/instalación ISP	Acometida, instalación o activación	servicio	1	-	-	-
Fibra corporativa	CAPEX	Router de borde propio	Router/firewall detrás del CPE del ISP	u	1	-	-	-
Fibra corporativa	CAPEX	Protección/UPS borde	Protección eléctrica del punto WAN	u	1	-	-	-
Fibra corporativa	OPEX	Plan fibra corporativa	Mensualidad del proveedor	mes	1	$50.00	-	$50.00
Fibra corporativa	OPEX	IP pública / empresarial	IP pública o plan empresarial	mes	1	$15.00	-	$15.00
Starlink	CAPEX	Kit Starlink	Terminal, router y accesorios base	u	1	$389.00	$389.00	-
Starlink	CAPEX	Montaje Starlink	Soporte, mástil y fijación	u	1	$50.00	$50.00	-
Starlink	CAPEX	Protección/UPS Starlink	UPS y supresión eléctrica	u	1	$120.00	$120.00	-
Starlink	CAPEX	Cableado/instalación	Canalización ligera hasta router	servicio	1	$50.00	$50.00	-
Starlink	OPEX	Plan Starlink	Mensualidad del plan	mes	1	$60.00	-	$60.00
Híbrido Fibra+Starlink	CAPEX	Fibra + Starlink borde	Activación fibra + kit Starlink + protección	lote	1	$1,079.00	$1,079.00	-
Híbrido Fibra+Starlink	OPEX	Fibra + IP + Starlink	Mensualidad de ambos servicios	mes	1	$275.00	-	$275.00

Escenario	CAPEX borde WAN	OPEX mensual WAN
Fibra corporativa	-	$65.00
Starlink	$609.00	$60.00
Híbrido Fibra+Starlink	$1,079.00	$275.00

Figura 59. Precios de Borde WAN.

Escenarios de ingresos del MSP

Rentabilidad mensual simple administrando varias floricolas

Escenario	Floricolas activas	Mensualidad por floricola	Ingreso mensual	Costo variable por floricola	Costo variable total	Costo fijo MSP	Utilidad operativa mensual	CAPEX MSP	Payback simple (meses)
Conservador	1	$1.000,00	$1.000,00	$55,00	$55,00	$250,00	$695,00	$5.760,00	8,29
Inicial comercial	3	$1.000,00	$3.000,00	$55,00	$165,00	$250,00	$2.585,00	$5.760,00	2,23
Crecimiento	5	$1.000,00	$5.000,00	$55,00	$275,00	$250,00	$4.475,00	$5.760,00	1,29
Escalado	10	$1.000,00	$10.000,00	$55,00	$550,00	$250,00	$9.200,00	$5.760,00	0,63

01_Supuestos | 02_CAPEX_Fibra | 03-Borde_WAN | 04_CAPEX_MSP | 05_OPEX | 06_ROI_Cliente | 07_Ingresos_MSP | 08_Flu

Figura 60. Escenarios de ingresos del MSP.

Cabe resaltar que estos valores pueden ser variables y se mencionan inicialmente porque ambos diseños comparten los mismos valores.

3.13.1 Viabilidad Red Inalámbrica

a. Costos de capital asociados con la implementación de sistema

De acuerdo con el Excel automatizado, el CAPEX de la red interna de la florícola es de USD 9755,90, considerando equipos, infraestructura, cableado, energía, protección eléctrica, instalación, configuración y una contingencia del 10 %. En la Figura 61 se muestran los campos considerados para el análisis y se detallan todos los componentes en su totalidad en el Anexo H, de igual forma se realizó con precios referenciales, esto puede variar dependiendo los proveedores, disponibilidad de equipos y mano de obra.

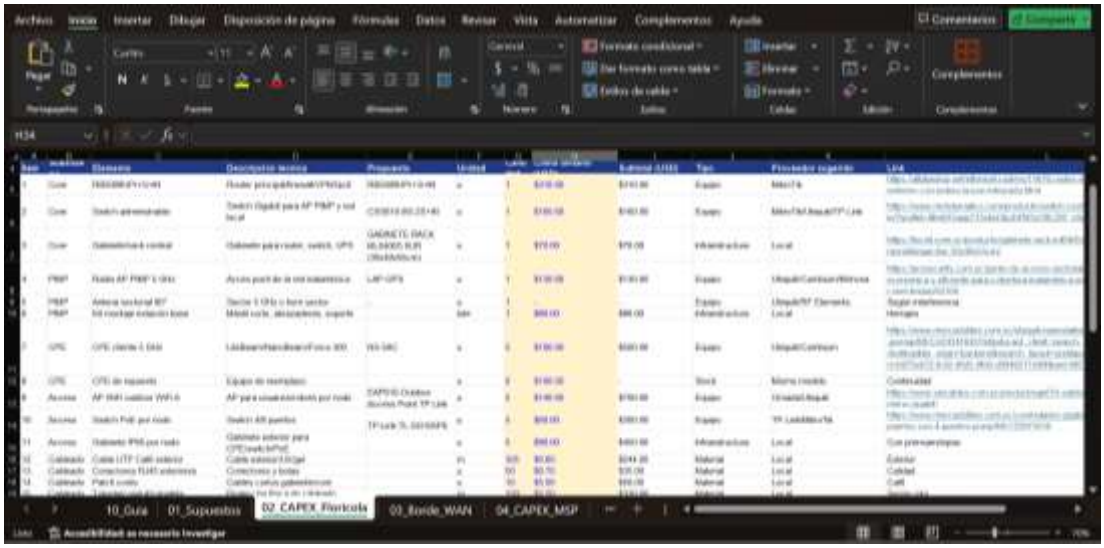


Figura 61. Parámetros considerados para el análisis de costos de inversión (CAPEX) de la florícola

También se analizó el CAPEX inicial de la empresa de robótica, ya que se mencionó que actuaría como un MSP. Esta inversión incluye herramientas técnicas, equipos de medición, elementos de seguridad, stock de repuestos, documentación, logística y capacitación. El valor estimado para esta inversión es de USD 3.470, como se presenta en la Figura 62.

CAPEX inicial del MSP

Inversión de la empresa para operar, instalar, documentar y monitorear varias floricolas

Ítem	Categoría	Elemento	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (USD)	Subtotal (USD)
1	Herramientas	Laptop técnica	Configuración, documentación y monitoreo	u	1	$850.00	$850.00 Indispensable
2	Herramientas	Kit crimpado y tester	Crimpadora, ponchadora, tester, pelacables	lote	1	$250.00	$250.00 Instalación UTP
3	Medición	Analizador WiFi/RF portátil	Escaneo RF y diagnóstico WiFi	u	1	$200.00	$200.00 App/equipo dedicado
4	Medición	Multímetro/medidor PoE	Medición eléctrica básica y PoE	u	1	$120.00	$120.00 Campo
5	Seguridad	EPP y trabajo en altura	Casco, arnés, guantes, línea de vida	lote	1	$500.00	$500.00 No omitir
6	Stock	Stock repuestos inicial	CPE, PoE, AP, supresores, conectores	lote	1	$450.00	$450.00 Continuidad
7	Software	Dominio/web/comercial	Página básica, dominio, correo	lote	1	$120.00	$120.00 Presentación
8	Software	Plantillas/documentación	Memorias, checklist, actas, diagramas	lote	1	$80.00	$80.00 Estandarización
9	Logística	Transporte/movilización inicial	Herramientas, combustible inicial	lote	1	$600.00	$600.00 Depende ubicación
10	Capacitación	Capacitación técnica inicial	MikroTik/Ubiquiti/RF/seguridad	lote	1	$300.00	$300.00 Calidad
						Subtotal CAPEX M	**$3,470.00**
						TOTAL CAPEX MI	**$3,470.00**

Figura 62. Costos de inversión (CAPEX) para la empresa Artil Robotics

b. Análisis de costos operativos como planes de servicio

El OPEX de la red inalámbrica incluye los costos recurrentes necesarios para mantener operativa la arquitectura propuesta. Dentro de estos rubros se consideran la salida a Internet, energía, plataforma de monitoreo, repuestos prorrateados, visitas técnicas, transporte y la gestión administrada por parte de la empresa de robótica. En la Figura 67, se muestra el análisis bajo la tecnología de Fibra e Internet satelital Starlink.

OPEX mensual por florícola

Costos recurrentes por cliente. Se separa Internet de gestión, mantenimiento y energía.

Concepto	Fibra mensual (USD)	Starlink mensual (USD)	Híbrido mensual (USD)	Anual Fibra	Anual Starlink	Anual Híbrido
Internet WAN	$50,00	$60,00	$110,00	$600,00	$720,00	$1.320,00
IP pública/plan empresarial	$15,00	-	$15,00	$180,00	-	$180,00
Energía red interna	$20,00	$20,00	$20,00	$240,00	$240,00	$240,00
Mantenimiento preventivo	-	-	-	-	-	-
Plataforma monitoreo/cloud	$20,00	$20,00	$20,00	$240,00	$240,00	$240,00
Repuestos prorrateados	$50,00	$50,00	$50,00	$600,00	$600,00	$600,00
Visitas/transporte	$45,00	$45,00	$45,00	$540,00	$540,00	$540,00
Gestión MSP	$700,00	$700,00	$700,00	$8.400,00	$8.400,00	$8.400,00
TOTAL OPEX	**$900,00**	**$895,00**	**$960,00**	**$10.800,00**	**$10.740,00**	**$11.520,00**

02_CAPEX_Fibra | 03-Borde_WAN | 04_CAPEX_MSP | 05_OPEX | 06_ROI_Cliente | 07_Ingresos_MSP | 08_Flujo_M

Figura 63. OPEX mensual de la florícola

c. Cálculo de retorno de inversión

- ***ROI esperado en la florícola***

En el escenario con fibra corporativa, el CAPEX total considerado es de USD 9755,90, con un OPEX mensual de USD 900 y un beneficio operativo mensual estimado de USD 1500. El beneficio neto mensual es de USD 600, obteniéndose un ROI anual de 73,8 % y un periodo de recuperación aproximado de 16,26 meses.

Para el escenario con Starlink, el CAPEX total asciende a USD 10364,90, debido a la inversión adicional del kit, montaje y protección del sistema satelital. En este caso, el ROI anual es de 70,04 % y el periodo de recuperación es de aproximadamente 17,13 meses.

En la Figura 64 observa que la alternativa con fibra corporativa presenta el mejor desempeño económico, siempre que exista disponibilidad del servicio en la zona de estudio, como es el caso de AGROGANA. Sin embargo, Starlink representa una alternativa viable para zonas rurales sin cobertura de fibra.

ROI del cliente florícola

Evalúa si a la florícola le conviene invertir considerando ahorro/productividad.

Escenario WAN	CAPEX interno	CAPEX borde WAN	CAPEX total	OPEX mensual	Beneficio mensual	Beneficio neto mensual	ROI anual	Payback (meses)
Fibra corporativa	$9,755.90	-	$9,755.90	$900.00	$1,500.00	$600.00	73.8%	16.3
Starlink	$9,755.90	$609.00	$10,364.90	$895.00	$1,500.00	$605.00	70.0%	17.1
Híbrido Fibra+Starlink	$9,755.90	$1,079.00	$10,834.90	$960.00	$1,500.00	$540.00	59.8%	20.1

Figura 64. Retorno de inversión de la florícola

- ***ROI esperado en la empresa Artil Robotics***

Bajo el modelo de servicio administrado planteado, la recuperación de la inversión inicial tiene relación directa con la cantidad de florícolas administradas al mes. Cuando una florícola hace uso del servicio, la utilidad operativa mensual es USD 400, lo que sitúa el período de recuperación del CAPEX en aproximadamente 8,68 meses. Sin embargo, al ampliar la cobertura a tres florícolas, se escala hasta USD 1.400 y el tiempo de recuperación es de solo 2,48 meses. En la Figura 65 se muestra el análisis realizado.

Escenarios de ingresos del MSP

Rentabilidad mensual simple administrando varias florícolas.

Escenario	Florícolas activas	Mensualidad por florícola	Ingreso mensual	Costo variable por florícola	Costo variable total	Costo fijo MSP	Utilidad operativa mensual	CAPEX MSP	Payback simple (meses)
Conservador	1	$700.00	$700.00	$200.00	$200.00	$100.00	$400.00	$3,470.00	8.7
Inicial comercial	3	$700.00	$2,100.00	$200.00	$600.00	$100.00	$1,400.00	$3,470.00	2.5
Crecimiento	5	$700.00	$3,500.00	$200.00	$1,000.00	$100.00	$2,400.00	$3,470.00	1.4
Escalado	10	$700.00	$7,000.00	$200.00	$2,000.00	$100.00	$4,900.00	$3,470.00	0.7

Figura 65. Escenarios de retorno de inversión de la empresa Artil Robotics

Estos números reflejan que la propuesta no únicamente resulta conveniente para el productor que contrata el servicio, sino que también representa un negocio sostenible para la empresa encargada de implementar, supervisar y dar mantenimiento al sistema robótico.

d. Resumen del análisis tecnoeconómico

El dashboard económico evidencia que el diseño de red inalámbrica propuesto es viable para el caso florícola analizado. Con un CAPEX de red interna de USD 9.755,90, un OPEX mensual desde USD 895 y un ROI anual de 73,8 % en el escenario con fibra, la inversión podría recuperarse en aproximadamente 16,3 meses. Además, el modelo de servicio administrado resulta favorable para la empresa de robótica conforme aumenta el número de florícolas atendidas.

En la Figura 66 se muestra el dashboard realizado en Excel.

Dashboard económico MSP/WISP para florícolas

Resumen ejecutivo de inversión, operación, ROI y recuperación.

Indicador	Valor	Comentario
CAPEX red interna por florícola	**$9,755.90**	Red privada interna con contingencia.
CAPEX borde WAN - fibra	**-**	Activación/equipo terminal de borde.
CAPEX borde WAN - Starlink	**$609.00**	Kit, montaje y protección.
CAPEX inicial MSP	**$3,470.00**	Herramientas, stock, software y logística.
OPEX mensual con fibra	**$900.00**	Internet + soporte + mantenimiento.
OPEX mensual con Starlink	**$895.00**	Starlink + soporte + mantenimiento.
ROI anual cliente - fibra	**73.8%**	Depende del beneficio operativo mensual.
Payback cliente - fibra (meses)	**16.3**	Meses de recuperación de inversión.
Payback MSP flujo dinámico (mes)	**2.0**	Con crecimiento 1→3→5→10 florícolas.

Figura 66. Dashboard económico del diseño de red inalámbrica

3.13.2 Viabilidad Red Fibra óptica

a. Costos de capital de capital asociados con la implementación del sistema

La red de fibra óptica propuesta se basa en una arquitectura GPON compuesta por un nodo principal, un divisor óptico 1:8 y cinco nodos secundarios. En el nodo principal se concentran el gateway, la OLT GPON y el switch principal; mientras que en los nodos secundarios se ubican la ONU/ONT, el switch PoE y el AP Wi-Fi para brindar conectividad local a los grupos de invernaderos.

Esta alternativa se orienta a una solución de mayor estabilidad, capacidad de transmisión y vida útil, adecuada para escenarios donde se requiere transportar imágenes, video, telemetría y datos de monitoreo de forma continua o programada.

El CAPEX de la florícola de caso de estudio se muestra en la Figura 67 y se profundiza en el Anexo I.

Figura 67. CAPEX de fibra.

Adicionalmente se realizó el CAPEX inicial de la empresa Artil Robotics, como en el análisis tecnoeconómico de la red inalámbrica, se incluye las herramientas, equipos, elementos de seguridad, etc. Se estima un valor aproximado de $5760 como se observa en la Figura 68.

Figura 68. CAPEX de inversión de la empresa.

b. Análisis de costos operativos como planes de servicios

El OPEX de la red de fibra óptica incluye los costos recurrentes necesarios para mantener operativa la infraestructura. En este caso se consideran los mismos rubros base que en la red inalámbrica mostrados en la Figura 69, donde tendría un costo de $900.

OPEX mensual por florícola

Costos recurrentes por cliente. Se separa Internet de gestión, mantenimiento y energía.

Concepto	Fibra mensual (USD)	Starlink mensual (USD)	Híbrido mensual (USD)	Anual Fibra	Anual Starlink	Anual Híbrido
Internet WAN	$50,00	$60,00	$110,00	$600,00	$720,00	$1.320,00
IP pública/plan empresarial	$15,00	-	$15,00	$180,00	-	$180,00
Energía red interna	$20,00	$20,00	$20,00	$240,00	$240,00	$240,00
Mantenimiento preventivo	-	-	-	-	-	-
Plataforma monitoreo/cloud	$20,00	$20,00	$20,00	$240,00	$240,00	$240,00
Repuestos prorrateados	$50,00	$50,00	$50,00	$600,00	$600,00	$600,00
Visitas/transporte	$45,00	$45,00	$45,00	$540,00	$540,00	$540,00
Gestión MSP	$700,00	$700,00	$700,00	$8.400,00	$8.400,00	$8.400,00
TOTAL OPEX	**$900,00**	**$895,00**	**$960,00**	**$10.800,00**	**$10.740,00**	**$11.520,00**

02_CAPEX_Fibra | 03-Borde_WAN | 04_CAPEX_MSP | 05_OPEX | 06_ROI_Cliente | 07_Ingresos_MSP | 08_Flujo_M

Figura 69. OPEX mensual de la florícola

c. Cálculo de retorno de inversión

- ***ROI esperado de la florícola***

El ROI permite comparar el beneficio económico neto frente a la inversión realizada. Con fibra corporativa se estima el CAPEX total de $13703.23 con un OPEX de $900 y un beneficio mensual de $1500. El beneficio neto mensual $600.

En la Figura 70 se muestra el ROI esperado de la empresa con la propuesta de fibra.

ROI del cliente floricola

Evalúa si a la floricola le conviene invertir considerando ahorro/productividad

Escenario WAN	CAPEX interno	CAPEX borde WAN	CAPEX total	OPEX mensual	Beneficio mensual	Beneficio neto	ROI anual	Payback (meses)
Fibra corporativa	$13.703,23	-	$13.703,23	$900,00	$1.500,00	$600,00	52,5%	22,8
Starlink	$13.703,23	$609,00	$14.312,23	$895,00	$1.500,00	$605,00	50,7%	23,7
Hibrido Fibra+Starlink	$13.703,23	$1.079,00	$14.782,23	$960,00	$1.500,00	$540,00	43,8%	27,4

01_Supuestos | 02_CAPEX_Fibra | 03-Borde_WAN | 04_CAPEX_MSP | 05_OPEX | 06_ROI_Cliente | 07_Ingresos_MSP

Figura 70. ROI de la propuesta de fibra.

Este ROI anual para el escenario de fibra corporativa es de 52,5 %, y el periodo de recuperación de la inversión es de aproximadamente 22,8 meses. Esto quiere decir que la inversión podría recuperarse en un tiempo cercano a un año y once meses, siempre que se mantengan los costos y beneficios estimados en el análisis realizado en el Excel.

- ***ROI esperado en la empresa Artil Robotics***

En cuanto la florícola hace uso del servicio de fibra la utilidad operativa mensual es de $695 situando al CAPEX en una recuperación de 8.29 meses. Sin embargo, si se amplía la cobertura a 3 florícolas la utilidad es de $2585 y el tiempo de recuperación es de 2.23 meses. Este análisis se muestra en la Figura 71.

Escenarios de ingresos del MSP

Rentabilidad mensual simple administrando varias floricolas.

Escenario	Floricolas activas	Mensualidad por floricola	Ingreso mensual	Costo variable por floricola	Costo variable total	Costo fijo MSP	Utilidad operativa mensual	CAPEX MSP	Payback simple (meses)
Conservador	1	$1.000,00	$1.000,00	$55,00	$55,00	$250,00	$695,00	$5.760,00	8,29
Inicial comercial	3	$1.000,00	$3.000,00	$55,00	$165,00	$250,00	$2.585,00	$5.760,00	2,23
Crecimiento	5	$1.000,00	$5.000,00	$55,00	$275,00	$250,00	$4.475,00	$5.760,00	1,29
Escalado	10	$1.000,00	$10.000,00	$55,00	$550,00	$250,00	$9.200,00	$5.760,00	0,63

03-Borde_WAN | 04_CAPEX_MSP | 05_OPEX | 06_ROI_Cliente | 07_Ingresos_MSP | 08_Flujo_MSP | 09_Fuentes | 00_Dashboard

Figura 71. Escenarios de retorno de inversión de la empresa Artil Robotics.

Los resultados obtenidos indican que esta propuesta es conveniente para el cliente que contrata el servicio y un negocio rentable.

d. Resumen del análisis tecno económico

En la Figura 72 se presenta la evidencia económica del diseño de red de fibra óptica propuesto para el caso de estudio. El CAPEX de red interna de $13703.23, un OPEX mensual de $900 y un ROI anual de 52.5% en el escenario con fibra y con una recuperación aproximadamente 22.8 meses, demostrando que el servicio es favorable si se aumenta el número de florícolas atendidas.

Dashboard económico - Red de fibra óptica GPON para florícola

Resumen ejecutivo de inversión, operación, ROI y recuperación de la arquitectura propuesta.

Indicador	Valor	Comentario
CAPEX red interna por florícola	$13.703,23	Inversión inicial con contingencia técnica.
CAPEX borde WAN - fibra	-	Costos recurrentes mensuales.
CAPEX borde WAN - Starlink	$609,00	Costos recurrentes anuales.
CAPEX inicial MSP	$5.760,00	Ahorro/productividad estimada.
OPEX mensual con fibra	$900,00	Beneficio anual - OPEX anual.
OPEX mensual con Starlink	$895,00	Periodo de recuperación.
ROI anual cliente - fibra	**52,5%**	Depende del beneficio operativo mensual.
Payback cliente - fibra (meses)	**16,3**	Meses de recuperación de inversión.
Payback MSP flujo dinámico (mes)	**2,0**	Con crecimiento 1→3→5→10 florícolas.

04_CAPEX_MSP | 05_OPEX | 06_ROI_Cliente | 07_Ingresos_MSP | 08_Flujo_MSP | 09_Fuentes | 00_Dashboard

Figura 72. Dashboard económico del diseño de red de fibra óptica.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El análisis sistemático de los requisitos técnicos y la viabilidad de implementación determinó las necesidades críticas de conectividad en el sector florícola rural, fundamentando el desarrollo de una propuesta de conectividad inteligente. La adopción de la norma ISO/IEC/IEEE 29148 proporcionó un marco riguroso para la ingeniería de requisitos, permitiendo estructurar de forma precisa las necesidades operacionales, de usuario y de arquitectura. Asimismo, el uso de la plataforma ReqView garantizó la trazabilidad bidireccional entre las demandas del entorno agrícola y los criterios de evaluación tecnológica. Como resultado, se estableció que la combinación de fibra óptica para el segmento de transporte y enlaces inalámbricos punto-multipunto (PtMP) para la distribución constituyen las alternativas tecnológicas más viables para superar las barreras geográficas y de infraestructura del caso de estudio.

- El diseño de la arquitectura de red e integración tecnológica se consolidó mediante una topología jerárquica que articula los segmentos de transporte, distribución y acceso, estructurada a través de un nodo principal y cinco nodos secundarios distribuidos estratégicamente. Esta configuración garantiza el transporte eficiente de datos y el monitoreo remoto en tiempo real de variables críticas mediante la interconexión de invernaderos, robots de monitoreo y puntos de acceso inalámbrico. La viabilidad física y los criterios de cobertura de la infraestructura fueron rigurosamente sustentados mediante herramientas de ingeniería: AutoCAD permitió el modelado del tendido de la red óptica y postería, mientras que Google Earth, Radio Mobile y UISP Design facultaron la georreferenciación y el cálculo de parámetros de propagación esenciales, tales como la línea de vista (LoS), el despeje de la primera zona de Fresnel y la orientación óptima de los sistemas radiantes.

- La evaluación de la alternativa inalámbrica obtuvo márgenes de enlace entre 9,1 dB y 16,6 dB y potencias recibidas simuladas entre −67,9 dBm y −60,4 dBm. En UISP Design Center se estimaron capacidades individuales de 252 Mbps a 305 Mbps, con un nivel de ruido de −92 dBm y señales esperadas entre −43 dBm y −57 dBm. En el prototipo experimental se registró una velocidad de subida promedio de 88 Mbps, latencias de 5 ms y 8 ms y una pérdida de paquetes del 0 %. La velocidad medida fue superior a los 58,70 Mbps requeridos para transmitir, de forma diferida, el video generado por cinco invernaderos. Sin embargo, las capacidades simuladas corresponden a cada enlace y no representan un ancho de banda simultáneo por nodo, debido a que en una topología PtMP el tiempo de aire se comparte entre los equipos activos.

- La validación de la red de fibra óptica en OptiSystem comprobó el desempeño técnico del enlace óptico propuesto para los nodos secundarios. Los resultados mostraron potencias recibidas entre −14,209 dBm y −14,330 dBm, con factores Q máximos entre 27,6854 y 33,6128, y valores de BER mínimos del orden de 10^{-169} a 10^{-248}. Estos resultados indican que el diseño óptico presenta niveles adecuados de potencia recibida, alta calidad de señal y una probabilidad de error extremadamente baja, por lo que la fibra óptica resulta técnicamente viable como medio de transporte para la arquitectura propuesta.

- El modelo de viabilidad tecnoeconómica confirmó la aplicabilidad y sostenibilidad financiera de ambas tecnologías analizadas para el contexto florícola rural, presentando escenarios diferenciados de inversión. La alternativa inalámbrica destaca por su alta eficiencia financiera a corto plazo, impulsada por una menor inversión inicial (CapEx) que se traduce en un Retorno de Inversión (ROI) anual del 73.8% y un periodo de recuperación de la inversión (Payback) de apenas 16.3 meses. En contraposición, la solución de fibra óptica, aunque demanda un mayor gasto de capital inicial, proyecta un ROI anual del 52.5% con una recuperación a los 22.8 meses, justificando su viabilidad mediante una escalabilidad superior, inmunidad al ruido electromagnético y una vida útil prolongada a largo plazo. Se concluye que ambas propuestas son factibles, debiendo orientarse la selección final según la estrategia de la empresa: maximizar el ahorro inmediato (inalámbrica) o

asegurar una infraestructura heredada de alta capacidad para la automatización avanzada (fibra óptica).

- La comparación de las arquitecturas mostró que ambas son técnicamente viables para el monitoreo florícola, aunque responden a distintas prioridades. La red inalámbrica presentó capacidades entre 252 Mbps y 305 Mbps, latencias de 5 ms a 8 ms, 0 % de pérdida de paquetes y un periodo de recuperación de 16,3 meses, por lo que resulta más conveniente para una implementación inicial con menor inversión. La fibra óptica obtuvo potencias cercanas a −14 dBm, factores Q superiores a 27 y BER inferiores a $1 * 10^{-10}$ofreciendo mayor estabilidad y posibilidad de crecimiento, aunque con una recuperación de 22,8 meses. Por tanto, la elección dependerá del presupuesto disponible y de las necesidades futuras de ampliación en las flosícolas.

4.2 Recomendaciones

- Para garantizar una validación periódica de los requisitos técnicos, operacionales y de usuario con los actores involucrados en la finca florícola, especialmente con el personal técnico, operarios y responsables del monitoreo agroproductivo. Esta validación debe mantenerse documentada bajo el enfoque de la norma ISO/IEC/IEEE 29148 y gestionarse en ReqView, con el fin de actualizar la trazabilidad de los requisitos cuando se incorporen nuevos invernaderos o servicios de red. De esta manera, la arquitectura podrá adaptarse a cambios futuros sin perder coherencia entre las necesidades del sistema, los criterios de diseño y la selección tecnológica.

- Se recomienda revisar y aplicar la normativa vigente de ARCOTEL antes del diseño o implementación de radioenlaces para asegurar el cumplimiento de los requisitos relacionados a el uso de frecuencias, homologación de equipos y permisos de operación.

- En la florícola se sugiere utilizar equipos, gabinetes, conectores y cableado adecuados para exteriores, es importante ya que en los invernaderos se presentan condiciones ambientales que pueden afectar a los equipos de red.

- La viabilidad tecnoeconómica debe ser actualizada constantemente, considerando variaciones en precios de equipos, costos de instalación, mantenimiento, servicio de Internet y ampliaciones de la red. De esta manera, el análisis de CAPEX, OPEX y ROI se reflejará con mayor precisión la operatividad de la propuesta de conectividad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] B. Basso and J. Antle, “Digital agriculture to design sustainable agricultural systems,” *Nature Sustainability*, vol. 3, Apr. 2020, pp. 254–256.

[2] Y.E.D.S. LA DIGITALIZACIÓN, “CONECTIVIDAD RURAL EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE,” 2022.

[3] Ministerio de Producción Comercio Exterior e Inversiones, “Ecuador reafirma su liderazgo en la industria florícola mundial con la inauguración de Expo Flor 2024,” 2024.

[4] A.B. Espinoza, S.N.T. Gia, and V.E.S. Muñoz, “Sector florıcola: Contribución al desarrollo socioeconómico del Ecuador, 2015–2024,” *GADE: Revista Cientıfica*, vol. 5, 2025, pp. 755–778.

[5] R.F. Prieto Ramón, “La Agricultura Digital como un proceso de innovación para la Transformación Productiva del Sector Florıcola Ecuatoriano.,” Quito: EPN, 2024., 2024.

[6] L. Dıaz Gispert, M.S. De La Torre Altamirano, and C.S. Almeida Dávalos, “Alternativa de desarrollo local para el sector florıcola de Cayambe, Ecuador,” *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 14, 2022, pp. 225–235.

[7] H. Jradi, F. Nouvel, A.E. Samhat, J.-C. Prévotet, and M. Mroue, “A seamless integration solution for LoRaWAN into 5G system,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, 2023, pp. 16238–16252.

[8] M.S.M. Rafi, M. Behjati, and A.S. Rafsanjani, “Reliable and cost-efficient IoT connectivity for smart agriculture: A comparative study of LPWAN, 5G, and hybrid connectivity models,” *International Conference on Smart Computing and Informatics*, Springer, 2025, pp. 389–411.

[9] D.A.O. Camacho and E.J.V. Erazo, “Impacto en la brecha digital, tras la implementación de una estación celular rural en Ecuador,” *Visionario Digital*, vol. 6, 2022, pp. 98–118.

[10] A.M. Chela Tualombo, “Diseño e implementación de una red inalámbrica para proveer servicio de telecomunicaciones en las Cochas, energizado con paneles solares.,” Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo, 2023.

[11] J.L. Oña Riera, M.A. Álvarez, and others, “Diseño e implementación de una red WISP para interconectar tres sectores rurales en la Provincia de Bolıvar, Cantón Guaranda, parroquia Simiatug.,” ESPOL. FIEC, 2025.

[12] L.G. Guncay Tigre, “Proveer acceso a internet en áreas rurales a través de radio enlace: diseño, estudio e implementación,” Universidad Técnica Particular de Loja, 2025.

[13] R.A. Pino Carrillo, “Diseño e implementación de una red inalámbrica mesh alimentada con energıa solar para proporcionar acceso a internet en la comunidad rural ‘normita’ del cantón La Troncal.,” Universidad Católica de Cuenca., 2025.

[14] C. Rivera, “Evaluación georreferenciada del rendimiento de la tecnología Starlink en zonas rurales con brecha digital en la provincia de Tungurahua, Ecuador,” Universidad Técnica de Ambato, 2026.

[15] M. Pantoja, “Análisis de factibilidad para la implementación de una red hibrida de radio enlace y red GPON FTTH enfocada a la zona rural parroquia La Merced de Buenos Aires del cantón Urcuquí en la provincia de Imbabura para la empresa ProFyber SCC,” Universidad Técnica del Norte, 2026.

[16] IEEE Standards Association, “6G Rural Connectivity and Intelligent Village,” 2024.

[17] International Telecommunication Union, *Telecommunications/ICTs for rural and remote areas: Output Report on ITU-D Question 5/1 for the study period 2018–2021*, Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, 2021.

[18] International Telecommunication Union, *Achieving Universal and Meaningful Digital Connectivity: Setting Ambitious Yet Achievable Targets for 2030*, Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, 2022.

[19] International Telecommunication Union, *Global Connectivity Report 2022: Executive Summary*, Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, 2022.

[20] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *The digital revolution and its potential to transform the use of motorized mechanization and agricultural practices*, FAO, 2022.

[21] A. Monteiro, S. Santos, and P. Gonçalves, “Precision agriculture for crop and livestock farming—Brief review,” *Animals*, vol. 11, 2021, p. 2345.

[22] N.R. Gatkal, S.M. Nalawade, R.K. Sahni, G.B. Bhanage, A.A. Walunj, P.B. Kadam, and M. Ali, “Review of IoT and electronics enabled smart agriculture,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 17, 2024, pp. 1–14.

[23] Cisco Systems Inc., “Preguntas frecuentes sobre Calidad de servicio (QoS)”. Cisco. Accedido el 13 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible: https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/quality-of-service-qos/qos-policing/22833-qos-faq.html.”

[24] Cisco Systems Inc., “Implementing Quality of Service. Cisco, 2008. Accessed: Mar. 14, 2026. [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/en/us/products/ios-nx-os-software/quality-of-service-qos/index.html.”

[25] FAO, “Leveraging automation and digitalization for precision agriculture. 2022. Accessed: Mar. 14, 2026. [Online]. Available: https://openknowledge.fao.org/items/0533e090-2a77-43e8-b371-d27e32e0529c.”

[26] X.F. López Andrade, “Rediseño de la red con calidad de servicios para datos y tecnología de voz sobre IP en el Ilustre Municipio de Ambato,” Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ambato, 2008.

[27] D. Villón, “Diseño de una red de sensores inalámbrica para agricultura de precisión,” Pontificia Universidad Católica del Perú, 2011.

[28] A. Vela, “Estudio de la Agricultura de Precisión Enfocado en la Implementación de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) para el Monitoreo de Humedad y Temperatura en Cultivos – Caso de Estudio Hacienda Cabalinus Ubicada en la Provincia de Los Ríos,” *Revista Plotécnica*, vol. 38, 2016.

[29] J.P. Tovar Soto, J.D. los S. Solórzano Suárez, A. Badillo Rodríguez, and G.O. Rodríguez Cainaba, “Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual,” *Lámpsakos*, Nov. 2019, pp. 86–105.

[30] G. Olivera Ruiz and G.K. Perez Espinoza, “Sensores y aplicaciones de IoT en entornos agrícolas: mapeo sistemático,” 2025.

[31] A. Nuñez, G. Boisier, and L. Klerkx, “Sistemas de ordeña automatizados: implicancias en las prácticas laborales de trabajadores de lecherías del sur de Chile,” *Mundo Agrario*, vol. 25, Aug. 2024, p. e248.

[32] A.M. Hualpa Zúñiga and J.E. Rangel Díaz, “Trazabilidad en el sector agrícola: una revisión para el periodo 2017 – 2022,” *Agronomía Mesoamericana*, Feb. 2023, p. 51828.

[33] C.A. Calapaqui Israel, “Desarrollo de un sistema inteligente para el cultivo de claveles,” Universidad Politécnica Salesiana, 2022.

[34] S.F.P.D. Musa, K.H. Basir, and E. Luah, “The Role of Smart Farming in Sustainable Development,” *International Journal of Asian Business and Information Management*, vol. 13, Jul. 2021, pp. 1–12.

[35] E. Marín Garcia, J.N. Torres Marín, and A. Chaverra Lasso, “Smart Greenhouse and Agriculture 4.0,” *Revista Científica*, vol. 46, Jan. 2023, pp. 37–50.

[36] L.I. Erick Barbecho, “Diseño e implementación de una plataforma basada en IoT para la gestión de promociones de artículos en establecimientos comerciales,” Universidad Politécnica Salesiana, 2021.

[37] M. Iorga, L. Feldman, R. Barton, M.J. Martin, N. Goren, and C. Mahmoudi, *Fog computing conceptual model*, National Institute of Standards and Technology, 2018.

[38] M.H. Annie Sokol, *NIST Cloud Computing Standards Roadmap*, National Institute of Standards and Technology, 2013.

[39] S. Ghazal, A. Munir, and W.S. Qureshi, "Computer vision in smart agriculture and precision farming: Techniques and applications," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 13, Sep. 2024, pp. 64–83.

[40] H.M. Wilson Ayo, "Desarrollo de un sistema de inspección automático de PCB'S mediante visión artificial," 2021.

[41] O. Kotevska, J. Johnson, and A.G. Kusne, "Analyzing Data Privacy for Edge Systems," *2022 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, IEEE, 2022, pp. 223–228.

[42] 3GPP, "5G System Overview," Aug. 2022.

[43] J. Krause, "Non-TerrestrialNetworks (NTN)," May. 2024.

[44] B. Yannick, "Satellite Lithium-Ion Batteries," 2014, pp. 311–344.

[45] Repsol, "Satélites LEO: qué son y aplicaciones," 2026.

[46] D. Chicaiza, "Diseño una red inalámbrica de acceso a internet en las principales zonas turísticas del GAD Alausí," 2017.

[47] ElTècnic, "¿Qué es un enlace punto a punto?," 2026.

[48] T. Toledo, "Internet por Radio Enlace WIFI: Qué es y cómo funciona."

[49] E. Networks, "Enlaces Multipunto," 2016.

[50] F. Connect, "Wireless Internet Service Providers (WISPs) Definition and Meaning," 2025.

[51] TailWind, "What Is A Fiber Optic Network? Components, Types & Benefits," 2024.

[52] Claridad.tech, "¿Qué es un enlace troncal de fibra óptica?," 2025.

[53] M.S. Ab-Rahman, Z.A. Manaf, I.H. Kaharudin, and I.-S. Hwang, "Customer Edge Downstream Detection for Automatic Restoration Scheme in FTTH-PON Distribution Network," *Photonics*, vol. 9, Aug. 2022, p. 560.

[54] D. Andrango, "Propuesta de factibilidad técnica para la implementación de un ISP con red FTTH en el Valle de Los Chillos parroquia de Alangasí," Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2023.

[55] franklin, "Una visión general de la red de acceso FTTH con GPON," Nov. 2018.

[56] A. Abuarqoub, "A Review of the Control Plane Scalability Approaches in Software Defined Networking," *Future Internet*, vol. 12, Mar. 2020, p. 49.

[57] N. Dugarte Jerez, R. Medina, and R. Rojas, “Desarrollo del Prototipo de un Sistema de Adquisición de Datos para la Digitalización de la Señal Electrocardiográfica de Alta Resolución,” *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, vol. 43, 2012, pp. 27–35.

[58] M.E. Guevara-Valdivia, “Monitoreo a distancia de los dispositivos automáticos implantables cardiovasculares (marcapasos, desfibriladores automáticos implantables y resincronizadores cardiacos),” *Archivos de cardiologıa de México*, vol. 79, 2009, pp. 221–225.

[59] K.C. Pozo Guerrero and M.X. Leiva Pilataxi, “Análisis de rendimiento de transmisión de vıdeo en una red de acceso PON,” 2025.

[60] M. Armenteros Gallardo and F. Utray Delgado, “La señal de vıdeo,” 2013.

[61] S. Wenger, M.M. Hannuksela, T. Stockhammer, M. Westerlund, and D. Singer, *RTP payload format for H. 264 video*, 2005.

[62] G. Parra-Quero, O. Palma-Urdaneta, E. Torres-Samuel, and F. Durán-Garrido, “Caracterización de buenas prácticas en la elicitación de requisitos de software referidas en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148,” 2020.

[63] ISO, IEC, and IEEE, *ISO/IEC/IEEE 29148:2011 Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering*, International Organization for Standardization, 2011.

[64] A. Strominger, “Introduction | ReqView Starter Guide Tutorial,” 2025.

[65] Y.-K. Wang, Y. Sanchez, T. Schierl, S. Wenger, and M.M. Hannuksela, *RTP payload format for high efficiency video coding (HEVC)*, 2016.

[66] A. S.A., “Doña Natalia by Agrogana - About Us,” 2024.

[67] A. de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, “Mapa de cobertura del Servicio Móvil Avanzado,” 2026.

[68] C. Carlos, “Sistema automatizado basado en una arquitectura IoT para la gestión y monitoreo del ambiente de un galpón de crianza de pollos en la avícola AVICAMP,” Feb. 2026.

[69] D.J.O. Goenaga and D.O.C. Arteaga, “Arquitectura tecnológica segura con segmentación VLAN y monitoreo SIEM para la modernización de la red corporativa de TecnoSoluciones S.A.S.,” 2025.

[70] C.C. CCTV, “Enlaces punto a punto y multipunto: diferencias y beneficios de cada uno,” Jun. 2023.

[71] C. Systems, *Cisco Unified Wireless Network Solution Guide*, Cisco Systems, 2026.

[72] G.E.S. Castro, “Diseño de un sistema inalámbrico punto-multipunto con segmentación de tráfico por VLAN, para brindar servicio de internet a la parroquia Barbones del cantón El Guabo en la provincia de El Oro por medio de la empresa ISP CESCONET,” Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2018.

[73] A. de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), *Norma Técnica de Espectro de Uso Libre y de Espectro para Uso Determinado en Bandas Libres*, Quito, Ecuador: ARCOTEL, 2018.

[74] A. de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, *Norma de espectro de uso libre y espectro para uso determinado en bandas libres*, Quito, Ecuador: ARCOTEL, 2018.

[75] I.T.U.R.S. (ITU-R), *Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems*, International Telecommunication Union, 2015.

[76] P. Comunicaciones, “Zonas de Fresnel en un radioenlace,” Jul. 2018.

[77] D.F.L. Velastegui and M.R.V. Viracucha, “Diseño de una red de alta capacidad para el enlace Quito–Lago Agrio utilizando radios SDH para el transporte de datos,” 2010.

[78] U. Inc., “airMAX - Guide to Channel Scanning with airView,” 2026.

[79] U. Networks, *airView Spectrum Analyzer Datasheet*, Ubiquiti Networks, 2013.

[80] A. de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), *Reglamento para Otorgar Títulos Habilitantes para Servicios del Régimen General de Telecomunicaciones y Frecuencias del Espectro Radioeléctrico*, ARCOTEL, 2016.

[81] A. de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), “Requisitos: Red Privada,” 2026.

[82] A. de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), “Homologación de Equipos Terminales de Telecomunicaciones,” 2026.

[83] I.T.U.T.S.S. (ITU-T), *Broadband Access and In-Premises Networks*, International Telecommunication Union, 2025.

[84] U. Networks, *UFiber GPON Datasheet*, Ubiquiti Networks, 2019.

[85] I.T.U.T.S.S. (ITU-T), *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification*, International Telecommunication Union, 2019.

[86] Y. Rekhter, B. Moskowitz, D. Karrenberg, G.J. de Groot, and E. Lear, *Address Allocation for Private Internets*, Internet Engineering Task Force (IETF), 1996.

[87] T. Inc., “What is Tailscale?,” Sep. 2025.

[88] O.S. Inc., “OptiSystem Overview,” 2026.

[89] D. Bliznakoff del Valle, “IoT: Tecnologías, usos, tendencias y desarrollo futuro,” UOC – URL, 2014.

[90] J.W. Díaz Luna, “Sistema de monitoreo inteligente basado en tecnología IoT e inteligencia artificial aplicado a la crianza de alevines, en la Provincia Sucumbíos, Cantón Sucumbíos, Parroquia Playón de San Francisco,” Sep. 2022.

[91] G.J. Bharat Kumar, “Internet of Things (IOT) and Cloud Computing in Hybrid Organisations using Monitoring Systems,” *2018 3rd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, 2018, pp. 348–351.

[92] T.-D. Wu, Z.-J. Chen, C.-C. Chang, and H.-F. Wang, “Design of a Wireless Sensor Network for Open Ocean Aquaculture Based on 802.11 ac Wireless Bridge and LoRa™ Technology,” *2020 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, 2020, pp. 1–2.

[93] M. Catelani, L. Ciani, A. Bartolini, C. Del Rio, G. Guidi, and G. Patrizi, “Reliability Analysis of Wireless Sensor Network for Smart Farming Applications,” *Sensors*, vol. 21, Nov. 2021, p. 7683.

[94] T. Ojha, S. Misra, and N. Raghuwanshi, “Wireless Sensor Networks for Agriculture: The State-of-the-Art in Practice and Future Challenges,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 118, 2015.

[95] K. Yuan, “Research on the Stability of Power Supply in Electronic Communication,” 2016.

[96] C. Tonato Chuquimarca and S. Sinche Maita, “Análisis comparativo entre arquitecturas de sistemas IoT,” *RITI Journal*, vol. 10, 2022, pp. 40–55.

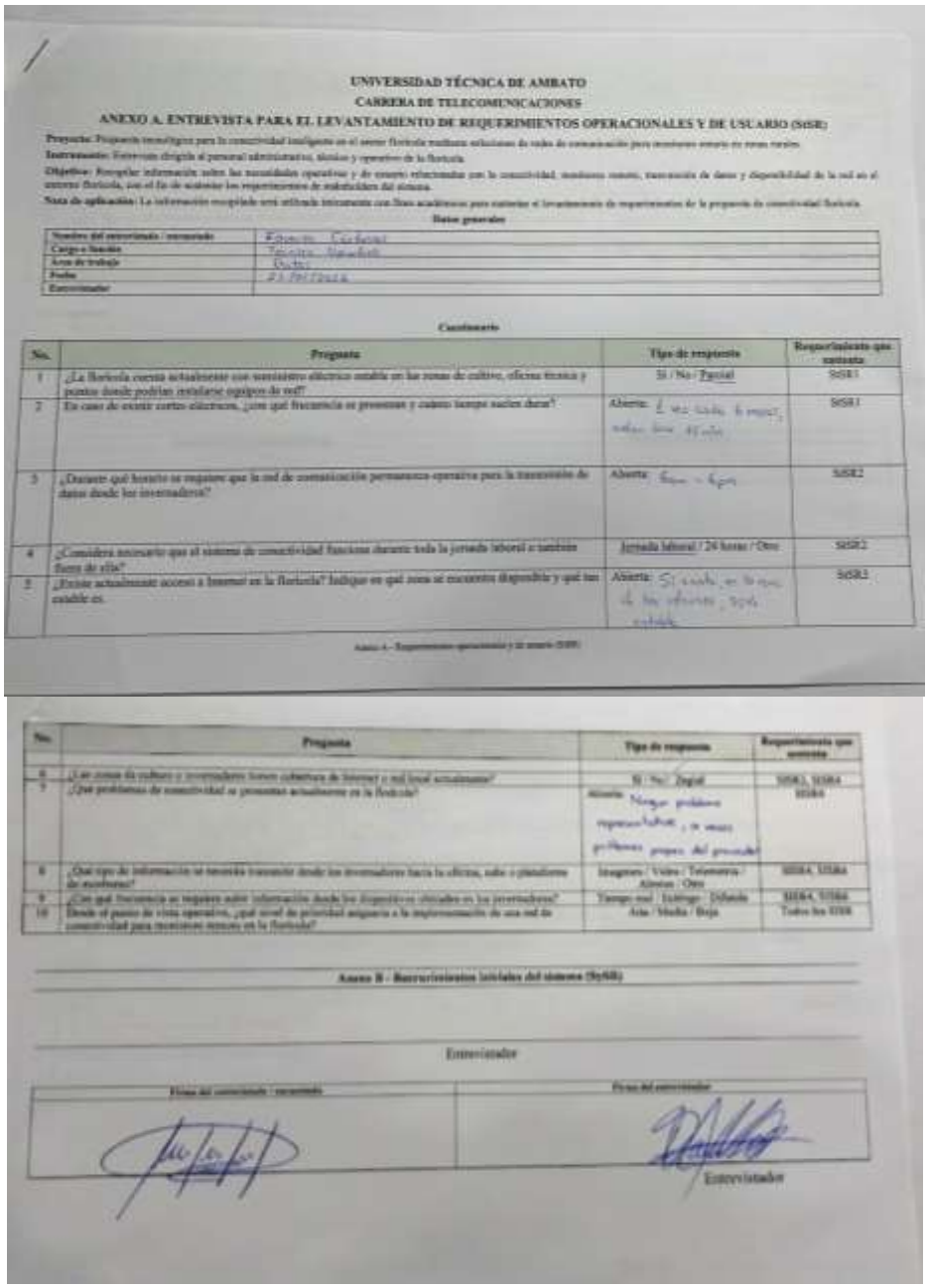
[97] S. Morocho O., “Modelo Jerárquico de redes escalables con Mikrotik.”

[98] U. Networks, *LiteAP AC Datasheet: Model LAP-GPS*, Ubiquiti Networks, 2018.

ANEXOS

Anexo A. Resumen de las entrevistas aplicadas al técnico operativo para levantamiento de requerimientos de la propuesta.

En la Figura A1. Se muestra la encuesta de los requerimientos de usuario y operacionales.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

ANEXO A. ENTREVISTA PARA EL LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS OPERACIONALES Y DE USUARIO (StSR)

Proyecto: Propuesta tecnológica para la conectividad inteligente en el sector florícola mediante soluciones de redes de comunicación para monitoreo remoto en zonas rurales.

Instrumento: Entrevista dirigida al personal administrativo, técnico y operativo de la floricola.

Objetivo: Recopilar información sobre las necesidades operativas y de usuario relacionadas con la conectividad, monitoreo remoto, transmisión de datos y disponibilidad de la red en el entorno florícola, con el fin de sustentar los requerimientos de stakeholders del sistema.

Nota de aplicación: La información recopilada será utilizada únicamente con fines académicos para sustentar el levantamiento de requerimientos de la propuesta de conectividad florícola.

Datos generales

Nombre del entrevistado / encuestado	[illegible]
Cargo o función	[illegible]
Área de trabajo	[illegible]
Fecha	23/10/2025
Entrevistador	

Cuestionario

No.	Pregunta	Tipo de respuesta	Requerimiento que sustenta
1	¿La floricola cuenta actualmente con suministro eléctrico estable en las zonas de cultivo, oficina técnica y puntos donde podrían instalarse equipos de red?	Si / No / Parcial	StSR1
2	En caso de existir cortes eléctricos, ¿con qué frecuencia se presentan y cuánto tiempo suelen durar?	Abierta: [illegible]	StSR1
3	¿Durante qué horario se requiere que la red de comunicación permanezca operativa para la transmisión de datos desde los invernaderos?	Abierta: [illegible]	StSR2
4	¿Considera necesario que el sistema de conectividad funcione durante toda la jornada laboral o también fuera de ella?	Jornada laboral / 24 horas / Otro	StSR2
5	¿Existe actualmente acceso a Internet en la floricola? Indique en qué zona se encuentra disponible y qué tan estable es.	Abierta: [illegible]	StSR3

Anexo A – Requerimientos operacionales y de usuario (StSR)

No.	Pregunta	Tipo de respuesta	Requerimiento que sustenta
6	¿Las zonas de cultivo y invernaderos tienen cobertura de Internet o red local actualmente?	Si / No / Digital	StSR1, StSR4
7	¿Qué problemas de conectividad se presentan actualmente en la floricola?	Abierta: Ninguno problema representativo, o varios problemas propios del proyecto	StSR4
8	¿Qué tipo de información se necesita transmitir desde los invernaderos hacia la oficina, sobre plataforma de monitoreo?	Imágenes / Video / Telemetría / Alertas / Otro	StSR4, StSR6
9	¿Con qué frecuencia se requiere subir información desde los dispositivos ubicados en los invernaderos?	Tiempo real / Intervalo / Diferido	StSR4, StSR6
10	Desde el punto de vista operativo, ¿qué nivel de prioridad asignaría a la implementación de una red de conectividad para monitoreo remoto en la floricola?	Alta / Media / Baja	Todos los StSR

Anexo B – Requerimientos iniciales del sistema (StSR)

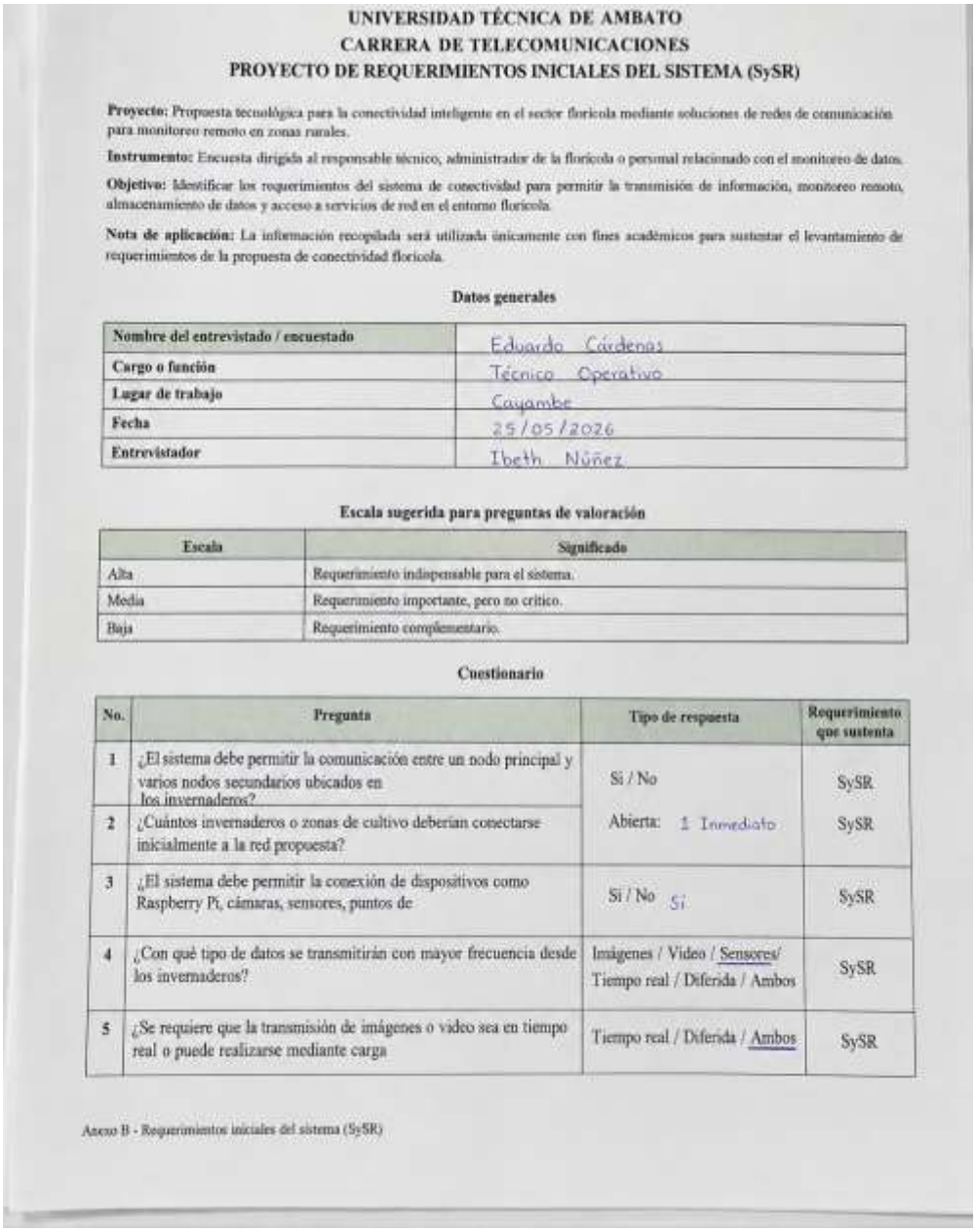
Entrevistador

Firma del entrevistado / encuestado	Firma del entrevistador
[signature]	[signature]

Entrevistador

Figura A1. Encuesta de los requerimientos de usuario y operacionales.

En la Figura A2. Se muestra la encuesta de los requerimientos iniciales del sistema.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES
PROYECTO DE REQUERIMIENTOS INICIALES DEL SISTEMA (SySR)

Proyecto: Propuesta tecnológica para la conectividad inteligente en el sector floricola mediante soluciones de redes de comunicación para monitoreo remoto en zonas rurales.

Instrumento: Encuesta dirigida al responsable técnico, administrador de la floricola o personal relacionado con el monitoreo de datos.

Objetivo: Identificar los requerimientos del sistema de conectividad para permitir la transmisión de información, monitoreo remoto, almacenamiento de datos y acceso a servicios de red en el entorno floricola.

Nota de aplicación: La información recopilada será utilizada únicamente con fines académicos para sustentar el levantamiento de requerimientos de la propuesta de conectividad floricola.

Datos generales

Nombre del entrevistado / encuestado	Eduardo Cárdenas
Cargo o función	Técnico Operativo
Lugar de trabajo	Cayambe
Fecha	25/05/2026
Entrevistador	Ibeth Núñez

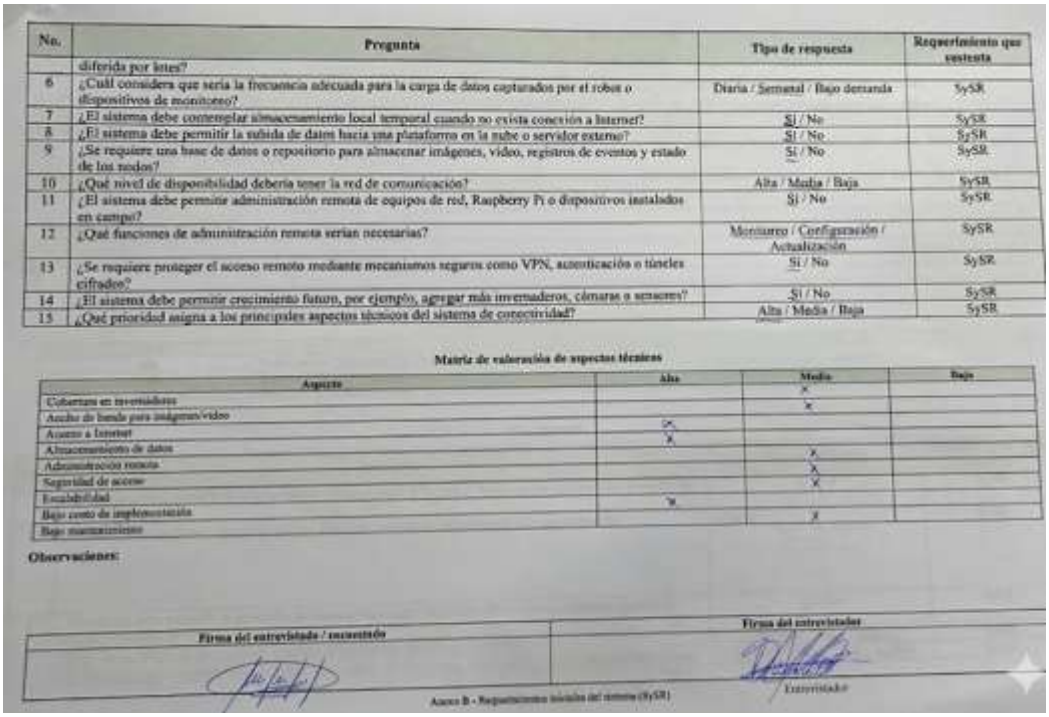
Escala sugerida para preguntas de valoración

Escala	Significado
Alta	Requerimiento indispensable para el sistema.
Media	Requerimiento importante, pero no crítico.
Baja	Requerimiento complementario.

Cuestionario

No.	Pregunta	Tipo de respuesta	Requerimiento que sustenta
1	¿El sistema debe permitir la comunicación entre un nodo principal y varios nodos secundarios ubicados en los invernaderos?	Si / No	SySR
2	¿Cuántos invernaderos o zonas de cultivo deberían conectarse inicialmente a la red propuesta?	Abierta: 1 Inmediato	SySR
3	¿El sistema debe permitir la conexión de dispositivos como Raspberry Pi, cámaras, sensores, puntos de	Si / No Si	SySR
4	¿Con qué tipo de datos se transmitirán con mayor frecuencia desde los invernaderos?	Imágenes / Video / Sensores/ Tiempo real / Diferida / Ambos	SySR
5	¿Se requiere que la transmisión de imágenes o video sea en tiempo real o puede realizarse mediante carga	Tiempo real / Diferida / Ambos	SySR

Anexo B - Requerimientos iniciales del sistema (SySR)



No.	Pregunta	Tipo de respuesta	Requerimiento que contesta
	diferida por lotes?		
6	¿Cuál considera que sería la frecuencia adecuada para la carga de datos capturados por el robot o dispositivos de monitoreo?	Diaria / Semanal / Bajo demanda	SySR
7	¿El sistema debe contemplar almacenamiento local temporal cuando no exista conexión a Internet?	Sí / No	SySR
8	¿El sistema debe permitir la subida de datos hacia una plataforma en la nube o servidor externo?	Sí / No	SySR
9	¿Se requiere una base de datos o repositorio para almacenar imágenes, video, registros de eventos y estado de los nodos?	Sí / No	SySR
10	¿Qué nivel de disponibilidad debería tener la red de comunicación?	Alta / Media / Baja	SySR
11	¿El sistema debe permitir administración remota de equipos de red, Raspberry Pi o dispositivos instalados en campo?	Sí / No	SySR
12	¿Qué funciones de administración remota serían necesarias?	Monitoreo / Configuración / Actualización	SySR
13	¿Se requiere proteger el acceso remoto mediante mecanismos seguros como VPN, autenticación o túneles cifrados?	Sí / No	SySR
14	¿El sistema debe permitir crecimiento futuro, por ejemplo, agregar más invernaderos, cámaras o sensores?	Sí / No	SySR
15	¿Qué prioridad asigna a los principales aspectos técnicos del sistema de conectividad?	Alta / Media / Baja	SySR

Matriz de valoración de aspectos técnicos

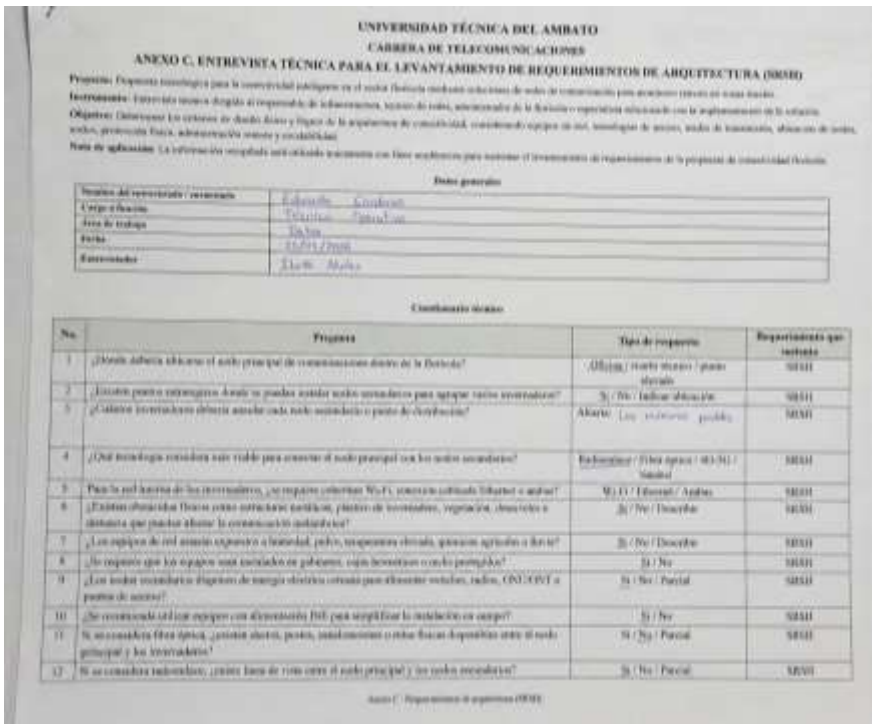
Aspecto	Alta	Media	Baja
Cobertura en invernaderos		X	
Ancho de banda para imágenes/video		X	
Acceso a Internet	X		
Almacenamiento de datos		X	
Administración remota		X	
Seguridad de acceso		X	
Escalabilidad	X		
Bajo costo de implementación		X	
Bajo mantenimiento			

Observaciones:

Firma del entrevistado / encuestador	Firma del entrevistador

Figura A2. Encuesta de los requerimientos iniciales del sistema.

En la Figura A3. Se muestra la encuesta de los requerimientos de arquitectura del sistema.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL AMBATO

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

ANEXO C. ENTREVISTA TÉCNICA PARA EL LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS DE ARQUITECTURA (SRSD)

Proyecto: Propuesta tecnológica para la conectividad inalámbrica en el sector florícola mediante soluciones de redes de comunicación para monitoreo remoto en zonas rurales

Instrumento: Entrevista técnica dirigida al responsable de infraestructura, técnico de redes, administrador de la floricola o especialista relacionado con la implementación de la solución.

Objetivo: Determinar los criterios de diseño físico y lógico de la arquitectura de conectividad, considerando equipos de red, tecnologías de acceso, medios de transmisión, ubicación de nodos, protección física, administración remota y escalabilidad.

Nota de aplicación: La información recopilada será utilizada únicamente con fines académicos para sustentar el levantamiento de requerimientos de la propuesta de conectividad florícola.

Datos generales

Nombre del entrevistado / encuestado	Eduardo Escobar
Cargo o función	Técnico Telecom
Área de trabajo	Tecnia
Fecha	03/04/2026
Entrevistador	Lucas Mejía

Cuestionario técnico

No.	Pregunta	Tipo de respuesta	Requerimiento que contesta
1	¿Dónde debería ubicarse el nodo principal de comunicaciones dentro de la floricola?	Oficina / cuarto técnico / punto elevado	SRSD
2	¿Existen puntos estratégicos donde se puedan instalar nodos secundarios para agrupar varios invernaderos?	Sí / No / Indicar ubicación	SRSD
3	¿Cuántos invernaderos debería atender cada nodo secundario o punto de distribución?	Abierto: Los invernaderos pueden	SRSD
4	¿Qué tecnología considera más viable para conectar el nodo principal con los nodos secundarios?	Radioenlace / Fibra óptica / 4G/5G / Satélite	SRSD
5	Para la red interna de los invernaderos, ¿se requiere cobertura Wi-Fi, conexión cableada Ethernet o ambas?	Wi-Fi / Ethernet / Ambas	SRSD
6	¿Existen obstáculos físicos como estructuras metálicas, plásticos de invernaderos, vegetación, árboles o distancias que puedan afectar la comunicación inalámbrica?	Sí / No / Describir	SRSD
7	¿Los equipos de red estarán expuestos a humedad, polvo, temperaturas elevadas, químicos agrícolas o fuego?	Sí / No / Describir	SRSD
8	¿Se requiere que los equipos sean instalados en gabinetes, cajas herméticas o cuarto protegido?	Sí / No	SRSD
9	¿Los nodos secundarios dispondrán de energía eléctrica estable para alimentar switches, radios, ONU/ONT o puntos de acceso?	Sí / No / Parcial	SRSD
10	¿Se recomienda utilizar equipos con alimentación PoE para simplificar la instalación en campo?	Sí / No	SRSD
11	Si se considera fibra óptica, ¿existen ductos, postes, canalizaciones o rutas físicas disponibles entre el nodo principal y los invernaderos?	Sí / No / Parcial	SRSD
12	Si se consideran radioenlaces, ¿existe línea de vista entre el nodo principal y los nodos secundarios?	Sí / No / Parcial	SRSD

Anexo C - Requerimientos de arquitectura (SRSD)

Figura A3. Encuesta de los requerimientos de arquitectura.

Análisis de Requerimientos

En las tablas de desarrolla el análisis de requerimientos de la propuesta tecnológica para la conectividad inteligente en el sector florícola y sobre todo se presenta su justificación. Para su estructuración se consideraron los lineamientos de la norma ISO/IEC/IEEE 29148, organizando los requerimientos en StSR, SySR y SRSH.

Requerimientos de Stakeholders (StSR)					
#	**Requerimientos**	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Justificación**
StSR1	La solución debe operar durante las jornadas de monitoreo agrícola.	X			La operación durante las jornadas de monitoreo es necesaria para asegurar que los datos generados en campo sean capturados y transmitidos oportunamente. En sistemas IoT agrícolas, el monitoreo continuo permite supervisar variables y eventos relevantes para la toma de decisiones, especialmente cuando existen dispositivos conectados a Internet para el seguimiento de cultivos o procesos productivos [20].
StSR2	La infraestructura de red debe disponer de alimentación eléctrica estable para los equipos.	X			La disponibilidad de energía es un factor esencial para la operación de tecnologías de automatización agrícola, debido a que ningún sistema de monitoreo o comunicación puede funcionar correctamente sin una fuente eléctrica estable. La FAO señala que la infraestructura energética es clave para habilitar tecnologías digitales y de automatización en zonas rurales [20].
StSR3	El nodo principal debe contar con acceso a Internet para la subida de datos.	X			El acceso a Internet en el nodo principal permite que la información capturada por sensores, cámaras o dispositivos de monitoreo pueda enviarse hacia plataformas externas o servicios en la nube. En arquitecturas IoT, la conectividad con Internet es la base para conectar dispositivos, transmitir datos y procesarlos posteriormente en servidores o plataformas cloud [89].
StSR4	La red debe comunicar los invernaderos con el punto principal de conexión.	X			La comunicación entre zonas de cultivo y un punto principal permite centralizar la conectividad, el procesamiento y la administración de la red. En diseños de redes rurales tipo WISP, los enlaces punto a punto y punto multipunto se utilizan para conectar usuarios o nodos alejados cuando el tendido de fibra no es viable o resulta costoso inicialmente [12].
StSR5	Los equipos deben funcionar en	X			Los dispositivos instalados en campo deben considerar condiciones

Requerimientos de Stakeholders (StSR)					
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Justificación
	condiciones propias del entorno florícola rural.				ambientales y físicas propias de zonas rurales, tales como humedad, polvo, exposición solar, vegetación y obstáculos. En sistemas IoT, la protección de equipos y sensores es necesaria para mantener la confiabilidad de las mediciones y evitar fallas por exposición a ambientes agresivos [68].
StSR6	El sistema debe permitir la transmisión de imágenes y video generados por el sistema de monitoreo agrícola.	X			La transmisión de imágenes y video exige mayor capacidad de red que la telemetría convencional, por lo que la arquitectura debe considerar enlaces con suficiente ancho de banda. En el ámbito agrícola, el uso de sensores, cámaras de alta resolución y robots permite recopilar información para automatización y monitoreo remoto, pero requiere infraestructura de comunicación adecuada [20].
StSR7	El acceso remoto a equipos y servicios debe realizarse de forma segura para tareas de administración, diagnóstico y soporte.	X			La administración remota de equipos permite monitorear, configurar y diagnosticar la infraestructura sin desplazamientos constantes al sitio. Sin embargo, en sistemas IoT se requiere proteger los datos y dispositivos mediante autenticación robusta y cifrado, con el fin de preservar la integridad de las comunicaciones [68].
StSR8	La solución debe permitir crecimiento futuro en número de invernaderos, nodos y robots sin rediseñar completamente la red.	X			La escalabilidad es necesaria para permitir la incorporación progresiva de nuevos invernaderos, cámaras, sensores o robots. En redes rurales, los modelos híbridos con radioenlaces y fibra óptica permiten ampliar cobertura en etapas, optimizando la inversión y preparando la infraestructura para crecimiento futuro [12].
StSR9	La solución debe adaptarse al esquema operativo de carga diferida por lotes cuando no sea necesario transmitir en tiempo real.	X			La carga diferida permite administrar mejor el ancho de banda cuando se transmiten archivos pesados, como imágenes o video. En arquitecturas IoT, el uso de almacenamiento local y posterior envío a la nube permite equilibrar las limitaciones de procesamiento, conectividad y almacenamiento en aplicaciones agrícolas o rurales [68].

Requerimientos del Sistema (SySR)					
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Justificación
SySR1	La solución debe transmitir imágenes, video y telemetría.	X			La red debe soportar diferentes tipos de tráfico, desde telemetría de baja tasa hasta imágenes y video de mayor demanda. En sistemas IoT, los datos pueden generarse

Requerimientos del Sistema (SySR)					
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Justificación
					desde sensores, cámaras y dispositivos conectados, por lo que la red debe permitir su transmisión hacia plataformas de procesamiento o visualización [20].
SySR2	Los nodos deben comunicarse con el nodo principal.	X			La comunicación entre nodos secundarios y nodo principal permite centralizar el tráfico y organizar la red de forma jerárquica. En sistemas de monitoreo IoT, los nodos remotos recopilan información y la envían hacia un nodo coordinador o unidad de procesamiento para su almacenamiento y análisis [90].
SySR3	El sistema debe permitir la subida de datos a Internet.	X			La subida de datos hacia Internet permite que la información generada en campo pueda almacenarse, procesarse o visualizarse en plataformas externas. En arquitecturas IoT, la nube complementa las limitaciones locales de almacenamiento y procesamiento, permitiendo gestionar grandes volúmenes de datos [68,91].
SySR4	La solución debe admitir transmisión en tiempo real o diferida.	X			La red debe permitir transmitir datos críticos en tiempo real y archivos pesados de forma diferida. En sistemas de monitoreo, la visualización en tiempo real facilita respuestas rápidas ante eventos críticos, mientras que el almacenamiento local permite conservar datos cuando la conectividad no está disponible [90,92].
SySR5	La red debe operar durante las jornadas de monitoreo.	X			La red de comunicación debe mantenerse operativa durante las jornadas planificadas de monitoreo, ya que en aplicaciones agrícolas la operación continua de la red es necesaria para disponer de información oportuna sobre el estado del área supervisada. Catelani et al. señalan que la operación continua de una red WSN es esencial para proporcionar información a tiempo sobre el estado real del área monitoreada, y que la confiabilidad debe evaluarse considerando fallas de hardware y errores de comunicación [93].
SySR6	El enlace debe soportar la carga programada de archivos.	X			La carga programada permite transmitir imágenes y video sin saturar permanentemente el enlace de comunicación. En redes de acceso rural, la capacidad disponible depende de variables como distancia, ruido, condiciones del entorno y características de las antenas, por lo que es necesario planificar el uso del ancho de banda [12].
SySR7	La solución debe permitir agregar nuevos nodos.	X			La solución de conectividad debe permitir la incorporación de nuevos nodos de comunicación, sensores, cámaras o robots sin rediseñar completamente la arquitectura. En un entorno florícola, esta

Requerimientos del Sistema (SySR)					
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Justificación
					característica es importante porque la cantidad de invernaderos o puntos de monitoreo puede aumentar con el tiempo. Ojha et al. indican que las redes WSN presentan escalabilidad y que el desempeño de una aplicación agrícola puede mejorarse agregando nuevos nodos a la arquitectura existente [94].
SySR8	Los equipos deben contar con alimentación eléctrica estable.	X			La fuente de alimentación en sistemas de comunicación cumple un papel central en la operación del sistema, y que una alimentación estable permite que los equipos funcionen de manera segura y normal; además, una falla eléctrica puede interrumpir los equipos y detener el sistema de comunicación [95].
SySR9	Los nodos deben ubicarse en puntos estratégicos.	X			La ubicación estratégica de los nodos permite mejorar cobertura, línea de vista, calidad de enlace y facilidad de mantenimiento. En redes inalámbricas rurales, la planeación del enlace debe considerar zona de Fresnel, obstáculos, distancia y condiciones físicas del entorno para garantizar estabilidad [12].
SySR10	Los equipos deben protegerse del entorno florícola rural.	X			Los equipos instalados en campo deben protegerse frente a humedad, polvo, variaciones de temperatura, lluvia, agroquímicos y condiciones propias del entorno rural florícola. Ojha et al. señalan que, debido a su despliegue en ambientes agrícolas abiertos, las redes de sensores sufren los efectos de condiciones ambientales severas, por lo que deben considerarse mecanismos de tolerancia y protección frente a dichos efectos [94].
SySR11	El acceso remoto debe realizarse mediante conexión segura.	X			El acceso remoto debe implementarse con mecanismos que garanticen autenticación y cifrado, evitando exponer directamente los dispositivos a Internet. En IoT, la seguridad de los datos y dispositivos requiere medidas como autenticación robusta y encriptación para proteger la integridad de las comunicaciones [68].
SySR12	Los equipos deben protegerse contra accesos no autorizados.		X		La protección contra accesos no autorizados permite prevenir manipulación física o lógica de los equipos instalados en campo. En redes IoT, la seguridad física y lógica es necesaria para mantener la integridad de los datos, proteger los nodos y evitar fallos causados por intervención externa [68,92].

Requerimientos de Arquitectura (SRSH)					
#	**Requerimientos**	**Alta**	**Media**	**Baja**	**Justificación**
SRSH1	La arquitectura debe considerar un nodo principal con acceso a Internet.	X			El nodo principal permite concentrar el tráfico de la red y conectar la infraestructura local con Internet. En IoT, las puertas de enlace actúan como intermediarias entre la red local y la red de área amplia, facilitando la transferencia de información mediante distintos protocolos [68,96].
SRSH2	Los nodos remotos deben conectarse al nodo principal de la red.	X			La conexión de nodos remotos hacia un nodo principal permite estructurar la red como un sistema de monitoreo centralizado. En redes de sensores, los nodos transmisores envían información hacia un nodo coordinador o plataforma central para procesamiento, almacenamiento y visualización [90].
SRSH3	La red debe emplear una topología adecuada para varios invernaderos.	X			La topología debe seleccionarse según la cantidad de nodos, cobertura requerida y posibilidad de crecimiento. En redes WISP, los enlaces punto a punto se emplean para transportar grandes cantidades de datos entre dos puntos, mientras que los enlaces punto-multipunto permiten conectar varios clientes o nodos desde una estación base [12].
SRSH4	Los nodos deben ubicarse considerando cobertura y línea de vista.	X			En enlaces inalámbricos, la ubicación de los nodos debe considerar línea de vista, zona de Fresnel, distancia y obstáculos, ya que estos factores influyen directamente en la calidad del enlace y el ancho de banda disponible. Esta planificación es fundamental en redes rurales por radioenlace [12].
SRSH5	La arquitectura debe separar acceso local, agregación y backhaul.	X			La separación por capas permite organizar la red en acceso, distribución/agregación y núcleo, facilitando administración, seguridad y escalabilidad. En arquitecturas WISP, la capa de acceso conecta los usuarios finales, la distribución aplica políticas y QoS, y el núcleo concentra servicios principales de red [12,97].
SRSH6	El sistema debe permitir transmisión en tiempo real o diferida.	X			La arquitectura debe soportar tanto datos críticos en tiempo real como carga diferida de archivos pesados. En sistemas IoT, la comunicación con plataformas cloud permite equilibrar almacenamiento, procesamiento y transmisión de datos según las capacidades de la red local [68,91].
SRSH7	La red debe permitir administración remota segura de los equipos.	X			La administración remota permite monitorear, configurar y diagnosticar equipos de red instalados en campo. En redes ISP/WISP, los servicios de administración, control y monitoreo forman parte de la infraestructura de red,

Requerimientos de Arquitectura (SRSH)					
#	Requerimientos	Alta	Media	Baja	Justificación
					mientras que en IoT se requiere asegurar el acceso mediante autenticación y cifrado [12].
SRSH8	Los equipos deben ser compatibles con transmisión de imágenes y video.	X			Los equipos seleccionados deben soportar tráfico multimedia generado por cámaras, Raspberry Pi o robots agrícolas. En agricultura digital, el uso de cámaras de alta resolución, sensores y robots demanda infraestructura de comunicación suficiente para transferir datos de monitoreo y automatización [20].
SRSH9	Los nodos deben integrar equipos de comunicación, energía y protección.	X			Cada nodo debe integrar equipos de red, alimentación y protección física para operar de forma confiable en campo. En redes WISP se consideran equipos de red, puntos de acceso, antenas cliente, infraestructura de soporte y enlaces inalámbricos como componentes básicos para garantizar la conectividad [12]
SRSH10	El sistema debe permitir monitorear el estado de nodos y enlaces.	X			El monitoreo del estado de nodos y enlaces permite detectar fallas, pérdida de conectividad, saturación o degradación de señal. En redes ISP/WISP, los servicios de administración, control y monitoreo son parte de la infraestructura necesaria para mantener estabilidad y calidad de servicio [12].
SRSH11	La solución debe registrar eventos básicos de conectividad.		X		El registro de eventos permite documentar caídas, reconexiones, fallas y comportamiento de los enlaces. En sistemas IoT, el almacenamiento en bases de datos locales o en la nube permite conservar información histórica para análisis, visualización y toma de decisiones [90].
SRSH12	Los nodos deben contar con alimentación estable y protección ambiental.	X			La arquitectura debe contemplar energía estable y protección ambiental para los nodos instalados en campo. La FAO resalta que la infraestructura energética y de conectividad es crítica para el funcionamiento de la automatización agrícola, especialmente en zonas rurales con limitaciones de servicios básicos [20].

Anexo B. Configuración de red punto multipunto en Radio Mobile

En la Figura B1 se muestra la configuración del mapa, es importante elegir la correcta escala ya que al ser enlaces cortos se deben visualizar bien los nodos, el tamaño elegido fue 1 km.

Figura B1. Configuración de las propiedades de mapa.

En la figura B2 se ubican los nodos, se agregaron en la ventana de “Propiedades de las unidades” y en la Figura B3 se muestra su distribución en el mapa.

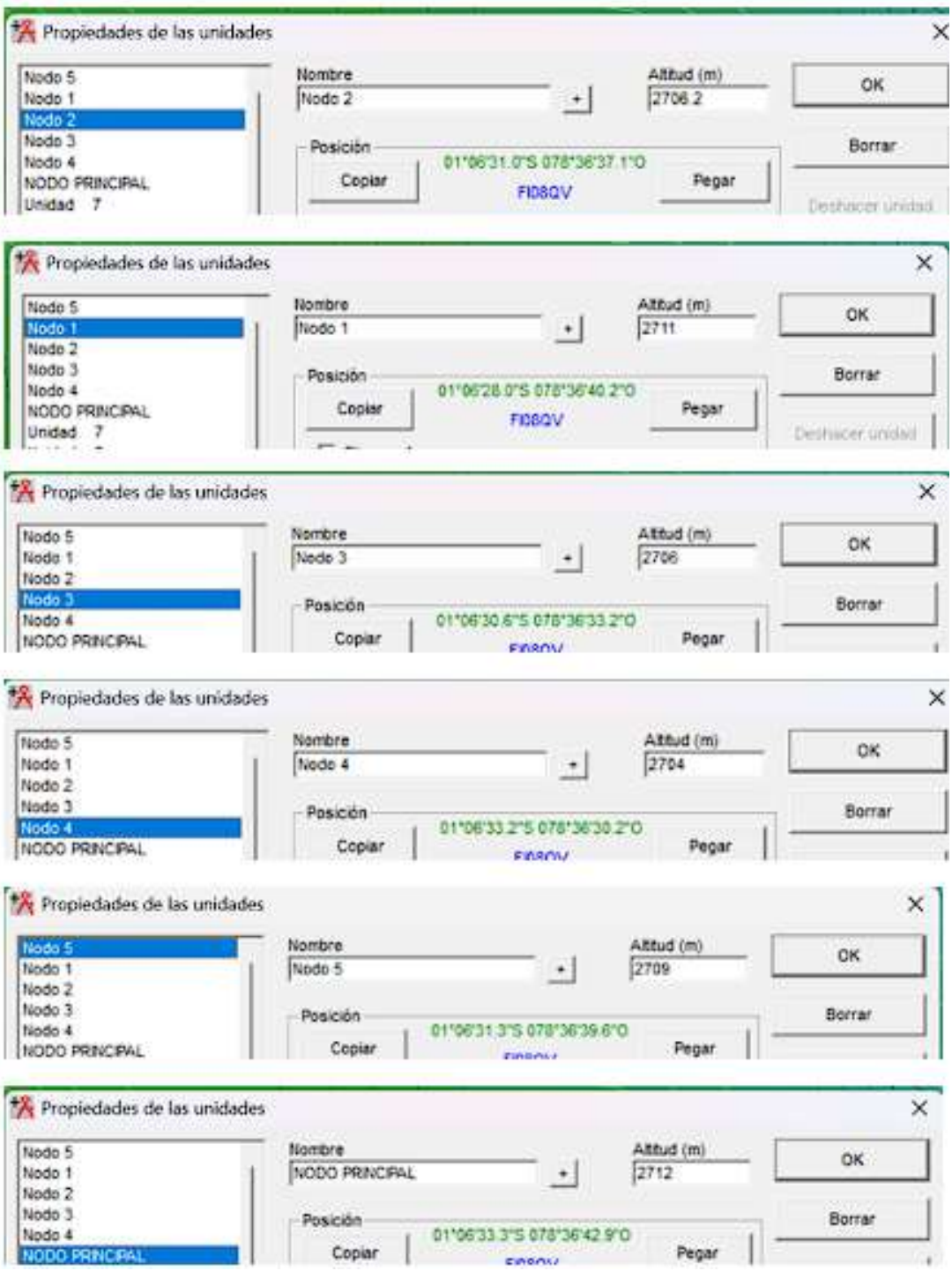


Figura B2. Configuración del nodo principal al nodo 5.

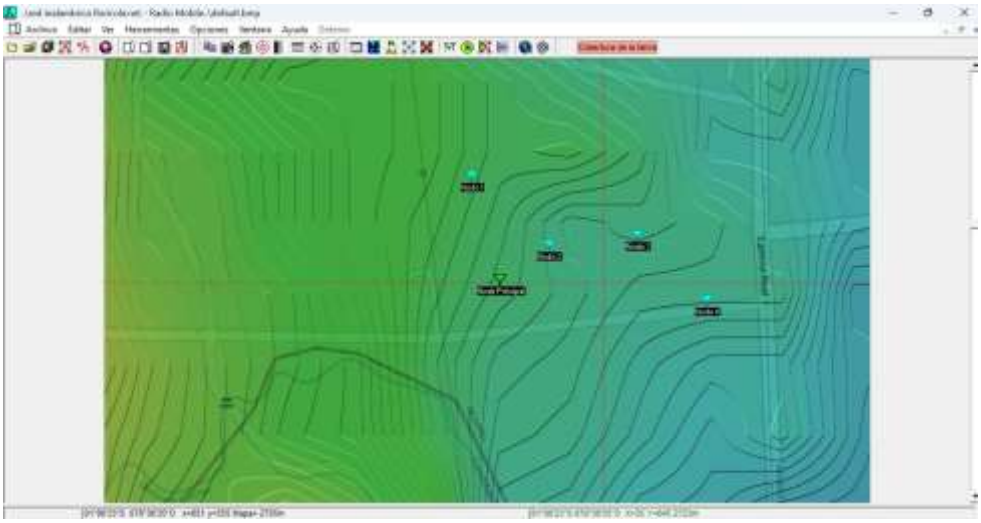


Figura B3. Distribución de cada nodo en Radio Mobile.

Luego se procedió a crear la red en la sección “Propiedades de las redes” tal como se observa en la Figura B4.

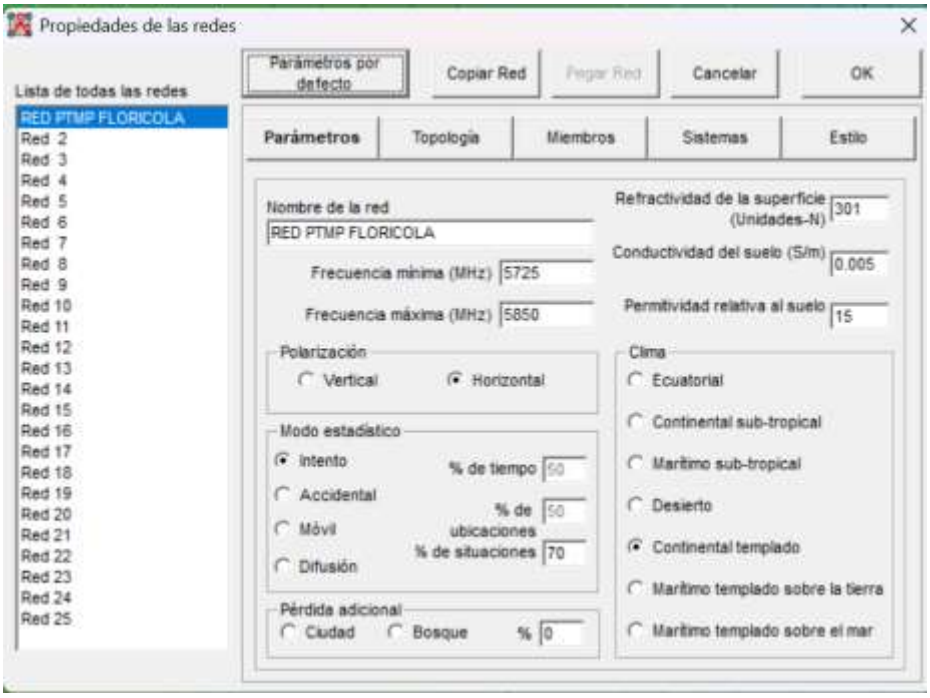


Figura B4. Configuración de los parámetros de la red.

En la parte de “Sistemas” se configuran los parámetros de la estación base y del CPE, en la Figura B5 y Figura B6 se muestra los parámetros configurados de cada uno respectivamente, los diagramas de radiación de cada antena se obtuvieron de la página oficial de Ubiquiti.

Figura B5. Configuración de los parámetros de la estación base.

Figura B6. Configuración de los parámetros del CPE.

Por último, en la parte de “Miembros” se configura el rol de cada unidad antes definida, donde el nodo principal es configurado como “Master” y cada nodo secundario como “Esclavo”, en las siguiente Figura B7 se observa el ejemplo de configuración.

Figura B7. Configuración de los parámetros de la estación base.

De igual forma se puede configurar parámetros de alineación de las antenas como azimut y ángulo de elevación como se observa en la Figura B8.

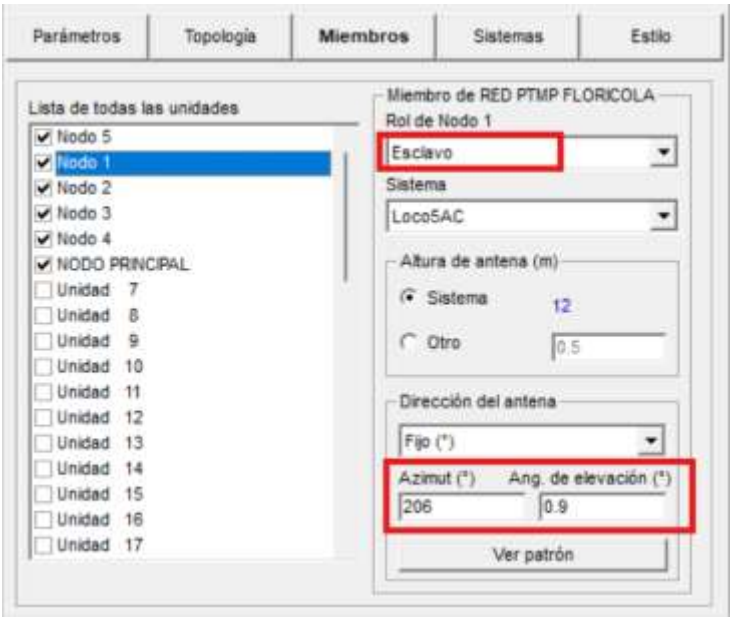


Figura B8. Configuración de los parámetros del CPE.

Por último, se muestra la configuración realizada en cada antena para que tengan una correcta alineación, en la Figura B9 se configuró la antena del nodo principal y en la Figura B10 la de los nodos secundarios.

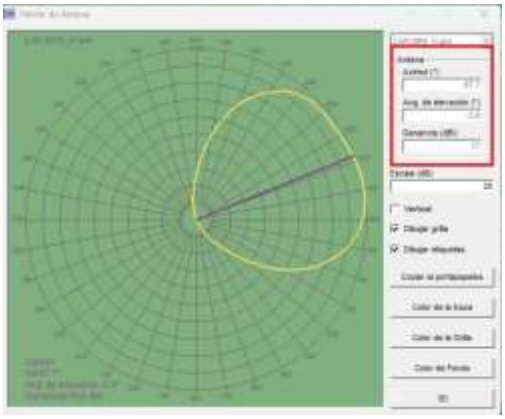


Figura B9. Patrón de radiación de la antena ubicada en el nodo principal.

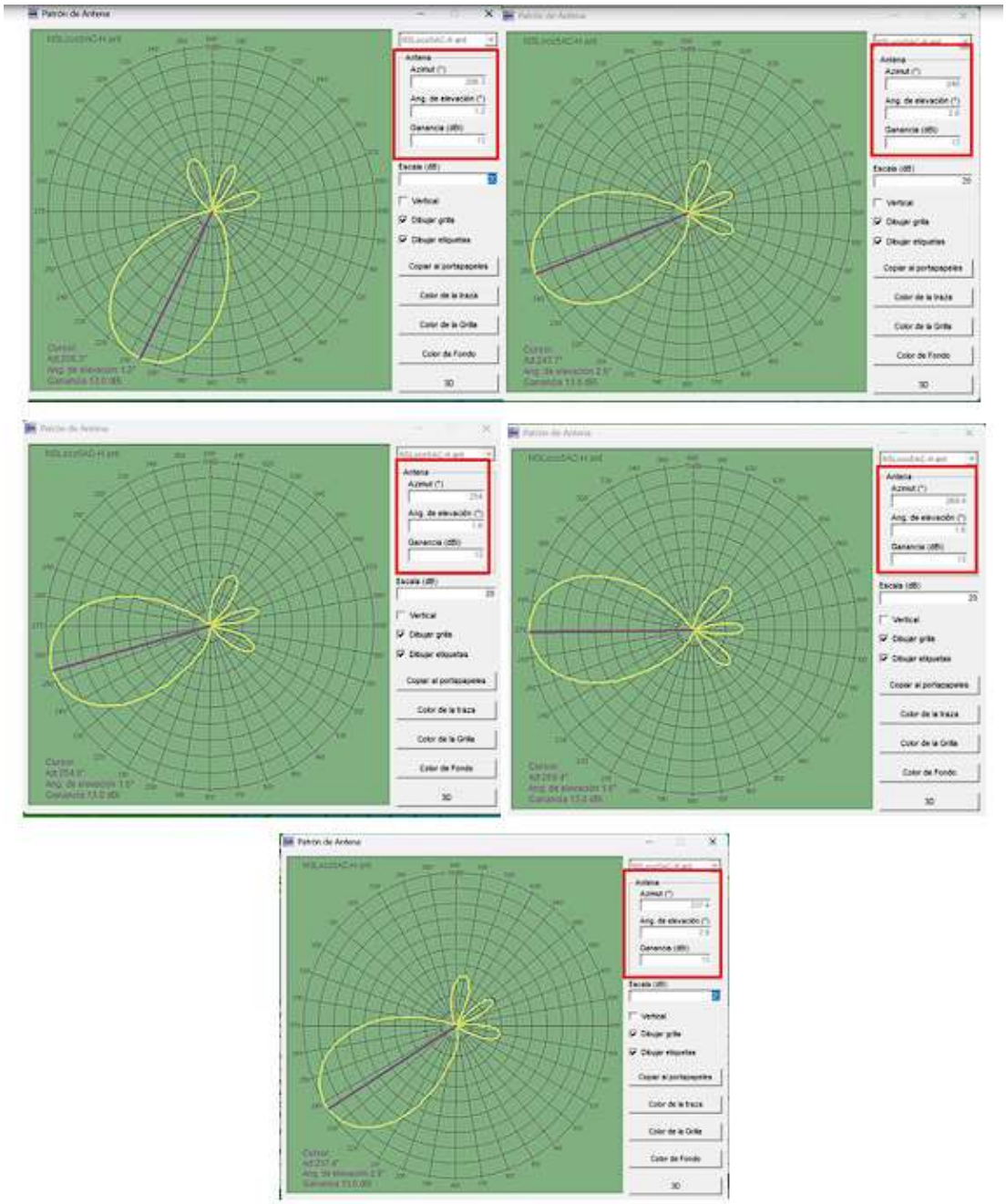


Figura B10. Patrón de radiación del nodo 1 al nodo 5.

Anexo C. Formularios para sistema de radiocomunicaciones de ARCOTEL

En la Figura C1 se observa el formulario FO-DRE-01.

Código: FO-DRE-01 Versión: 01	FORMULARIO PARA INFORMACION DE LA INFRAESTRUCTURA DEL SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES												
1	2	3	4	5	6	7	8		9		10	11	12	13
CODIGO ESTRUCTURA	NOMBRE DEL SITIO	PROVINCIA	CANTON	CIUDAD/LOCALIDAD	PARROQUIA (RURAL/CABECERA CANTONAL)	DIRECCIÓN (Calle y Nro.), LOCALIDAD	COORDENADAS GEOGRAFICAS (WGS84)		ALTURA ESTRUCTURA		TIPO DE ESTRUCTURA	FUENTE DE ENERGIA	ESTRUCTURA NUEVA / EXISTENTE	PROPIETARIO DE LA ESTRUCTURA
							LATITUD (°)(')(") XX°XX'XX.XX"S	LONGITUD (°)(')(") XX°XX'XX.XX"W	S.N.M. [m]	BASE-CIMA [m]				
S1	NODO PRINCIPAL	COTOPAXI	Salcedo	Hacienda Saguatoa	Antonio José Holguín	Calle San Luis y Camino Real	01°06'33.34"S	78°36'39.53"W	2710	15	TORRE NO AUTOSOPORTADA		EXISTENTE	USUARIO
S2	NODO 1	COTOPAXI	Salcedo	Hacienda Saguatoa	Antonio José Holguín	Calle San Luis y Camino Real	01°06'28.06"S	78°36'40.19"W	2711	12	MÁSTIL		EXISTENTE	USUARIO
S3	NODO 2	COTOPAXI	Salcedo	Hacienda Saguatoa	Antonio José Holguín	Calle San Luis y Camino Real	01°06'30.98"S	78°36'36.88"W	2707	12	MÁSTIL		EXISTENTE	USUARIO
S4	NODO 3	COTOPAXI	Salcedo	Hacienda Saguatoa	Antonio José Holguín	Calle San Luis y Camino Real	01°06'30.57"S	78°36'33.16"W	2706	12	MÁSTIL		EXISTENTE	USUARIO
S5	NODO 4	COTOPAXI	Salcedo	Hacienda Saguatoa	Antonio José Holguín	Calle San Luis y Camino Real	CAMINO REAL, HACIENDA	78°36'30.21"W	2704	12	MÁSTIL		EXISTENTE	USUARIO
S6	NODO 5	COTOPAXI	Salcedo	Hacienda Saguatoa	Antonio José Holguín	Calle San Luis y Camino Real	01°06'33.33"S	78°36'39.61"W	2710	12	MÁSTIL		EXISTENTE	USUARIO

Figura C1. Información de la estructura del sistema de radiocomunicaciones.

En la Figura C2 se observa el formulario FO-DRE-02.

Código: FO-DRE-02 Versión: 01	FORMULARIO PARA INFORMACION DE ANTENAS						
1	2	3	4		5	6	7	8
CODIGO DE ANTENA	MARCA	MODELO	RANGO DE OPERACIÓN [MHz]		TIPO	IMPEDANCIA [Ω]	GANANCIA [dBi]	DIAMETRO [m]
			FREC. INICIAL	FREC. FINAL				
A1	UBIQUITI	LITEAP GPS	5150.00	5875.00	SECTORIAL INTEGRADA	50	17	
A2	UBIQUITI	NANOSTATION 5AC LOCO	5150.00	5875.00	PANEL DIRECCIONAL INTEGRADA	50	13	
A3	UBIQUITI	NANOBEAM 5AC GEN2	5150.00	5875.00	DIRECCIONAL INTEGRADA	50	19	0.189

Figura C2. Formulario para información de antenas

En la siguiente Figura C3 se observa el formulario FO-DRE-03.

Código: FO-DRE-03 Versión: 01	**FORMULARIO PARA PATRONES DE RACIACION DE ANTENAS**	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

1)

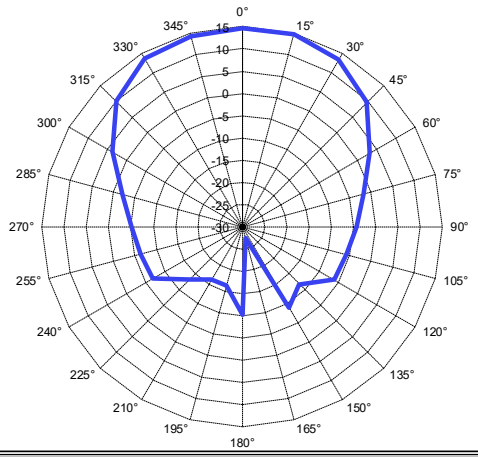
PATRONES DE RADIACION DE ANTENA

MARCA:	*UBIQUITI*	MODELO:	*LITEAP GPS*	TIPO:	*SECTORIAL INTEGRADA*

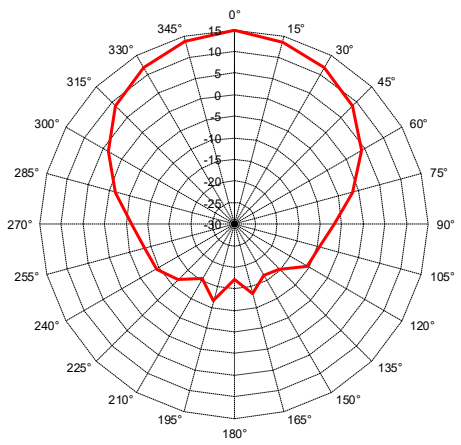
Ingrese los valores de ganancia (dBd) para cada radial.

RADIAL / *PLANO*	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
HORIZONTAL	*14.7*	*14.8*	*13.45*	*9.55*	*3.25*	*-1.75*	*-4.15*	*-5.65*	*-6.05*	*-11.8*	*-8.95*	*-27.5*	*-10.3*	*-16.3*	*-16.3*	*-13.3*	*-6.85*	*-6.35*	*-5.05*	*-2.05*	*3.75*	*10.2*	*13.7*	*14.4*
VERTICAL	*14.9*	*13.7*	*11.85*	*8.75*	*4.05*	*-1.65*	*-6.75*	*-9.45*	*-10.6*	*-15.2*	*-16.2*	*-13.5*	*-17.2*	*-11.8*	*-15.4*	*-11.8*	*-9.25*	*-8.55*	*-6.25*	*-1.55*	*3.65*	*8.75*	*12*	*13.8*

PATRON DE RADIACION HORIZONTAL



PATRON DE RADIACION VERTICAL



2)

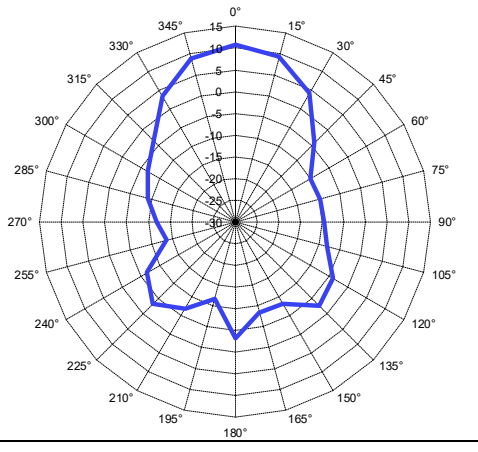
PATRONES DE RADIACION DE ANTENA

MARCA:	*UBIQUITI*	MODELO:	*NANOSTATION 5AC LOCO*	TIPO:	*PANEL DIRECCIONAL INTEGRADA*

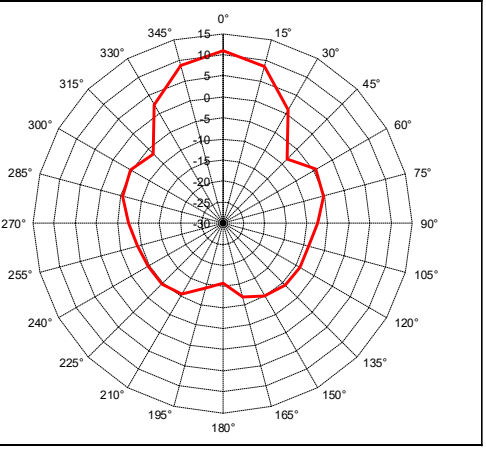
Ingrese los valores de ganancia (dBd) para cada radial.

RADIAL / *PLANO*	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
HORIZONTAL	*10.9*	*9.35*	*4.25*	*-4.25*	*-10.1*	*-9.75*	*-9.55*	*-8.05*	*-4.05*	*-2.65*	*-8.05*	*-8.25*	*-3.05*	*-11.6*	*-6.95*	*-3.25*	*-6.55*	*-13.6*	*-12*	*-9.15*	*-6.65*	*-3.35*	*3.45*	*8.85*
VERTICAL	*10.9*	*8.55*	*1.15*	*-8.45*	*-4.45*	*-5.15*	*-7.45*	*-8.95*	*-8.95*	*-9.15*	*-9.95*	*-11.9*	*-15.8*	*-14.2*	*-10.6*	*-9.65*	*-9.55*	*-9.15*	*-7.65*	*-5.35*	*-4.65*	*-6.65*	*2.35*	*8.85*

PATRON DE RADIACION HORIZONTAL



PATRON DE RADIACION VERTICAL



3)

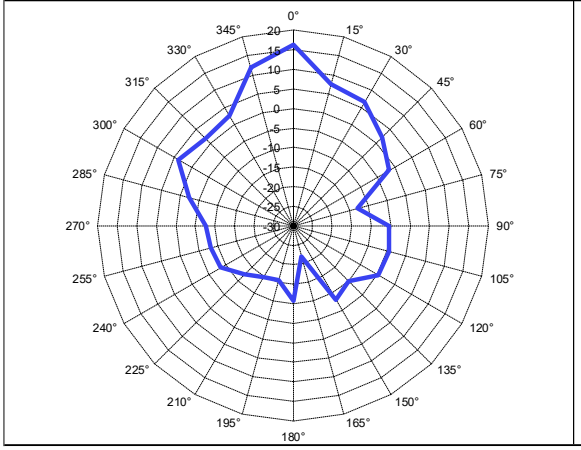
PATRONES DE RADIACION DE ANTENA

MARCA:	*UBIQUITI*	MODELO:	*NANOBEAM 5AC GEN2*	TIPO:	*DIRECCIONAL INTEGRADA*

Ingrese los valores de ganancia (dBd) para cada radial.

RADIAL / *PLANO*	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
HORIZONTAL	*16.4*	*7.55*	*6.55*	*2.15*	*-1.65*	*-13.1*	*-5.35*	*-4.45*	*-4.75*	*-9.95*	*-7.95*	*-22*	*-10.9*	*-15.7*	*-14.9*	*-12.3*	*-8.65*	*-8.05*	*-7.75*	*-2.35*	*3.85*	*1.75*	*2.45*	*12*
VERTICAL	*16.8*	*10.7*	*4.25*	*1.05*	*3.65*	*0.35*	*-3.65*	*-4.35*	*-3.15*	*-4.25*	*-6.45*	*-6.65*	*-10.7*	*-7.75*	*-6.55*	*-4.85*	*-2.25*	*-2.75*	*-2.25*	*-0.75*	*-0.35*	*-2.05*	*1.15*	*13.6*

PATRON DE RADIACION HORIZONTAL



PATRON DE RADIACION VERTICAL

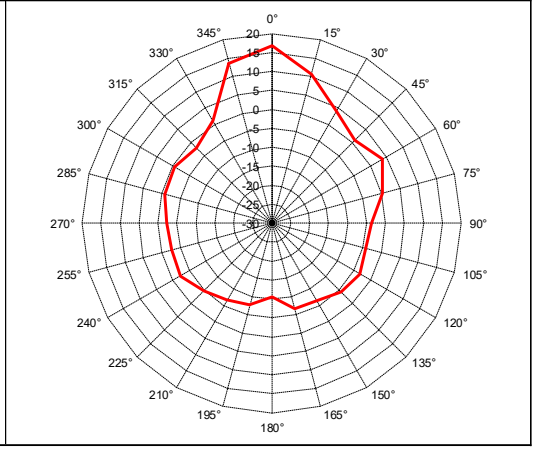


Figura C3. Formulario para patrones de radiación de antenas

En la siguiente Figura C4 se observa el formulario FO-DRE-04

Código: FO-DRE-04 **Versión: 01**	**FORMULARIO PARA INFORMACION DE EQUIPOS**	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

1	2	3	4	5	6	7		8	9	10
CODIGO DEL EQUIPO	**TIPO DE ESTACION**	**MARCA**	**MODELO**	**SEPARACION ENTRE Tx Y Rx [MHz]**	**POTENCIA MAXIMA DE SALIDA [W/dBm]**	**RANGO DE FRECUENCIAS [MHz]**		**TIPO DE MODULACION**	**SENSIBILIDAD [dBm]**	**MAXIMA DESVIACION DE FRECUENCIA [KHz]**
						FREC. INICIAL	**FREC. FINAL**			
E1	FIJA	UBIQUITI	LITEAP GPS	0	0.316 W / 25 dBm	5725	5850	OFDM / AIRMAX AC / 256QAM	-74	0
E2	FIJA	UBIQUITI	NANOSTATION 5AC LOCO	0	0.316 W / 25 dBm	5725	5850	OFDM / AIRMAX AC / 256QAM	-74	0.00
E3	FIJA	UBIQUITI	NANOBEAM 5AC GEN2	0	0.316 W / 25 dBm	5725	5850	OFDM / AIRMAX AC / 256QAM	-74	0.00

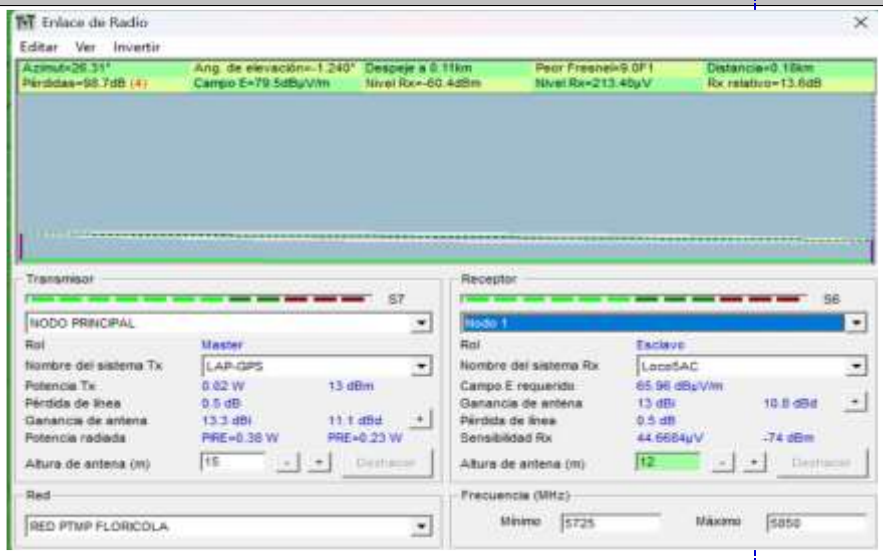
Figura C4. Formulario para información de equipos

Código: FO-DRE-07 Versión: 01	**FORMULARIO PARA EL SERVICIO FIJO TERRESTRE** (PERFIL TOPOGRAFICO DE LOS ENLACES PUNTO-PUNTO)	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

1) CARACTERISTICAS TECNICAS DEL ENLACE

NOMBRE DEL SITIO TX			NODO PRINCIPAL		NOMBRE DEL SITIO RX		NODO 1	
No.	AZIMUT Tx (°):	AZIMUT Rx (°):	ANGULO ELEV. Tx (°):	ANGULO ELEV. Rx (°):	DISTANCIA. (Km):	SENSIBILIDAD. (dBm):	MARGEN DE DESV. (dB):	CONFIABILIDAD (%):
E1	26.31	206.3	-1.24	1.24	0.18336	-74	13.6	99

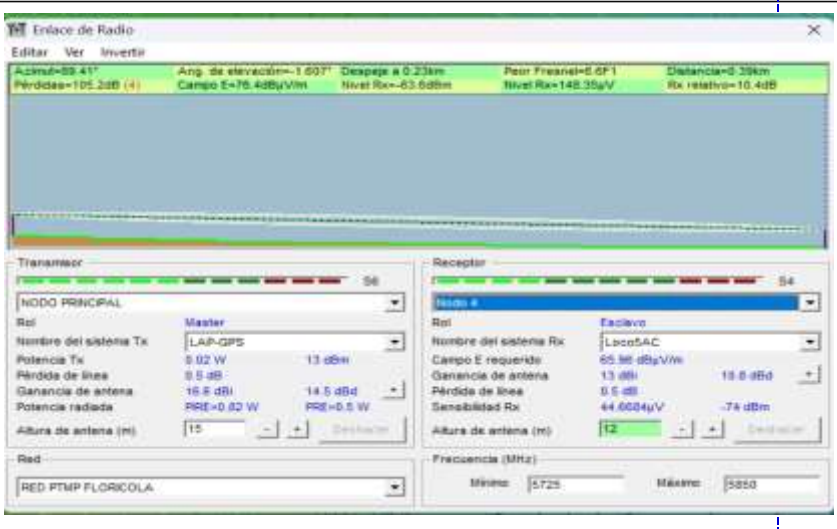
2) GRAFICO DEL PERFIL TOPOGRAFICO:



1) CARACTERISTICAS TECNICAS DEL ENLACE

NOMBRE DEL SITIO TX			NODO PRINCIPAL		NOMBRE DEL SITIO RX		NODO 4	
No.	AZIMUT Tx (°):	AZIMUT Rx (°):	ANGULO ELEV. Tx (°):	ANGULO ELEV. Rx (°):	DISTANCIA. (Km):	SENSIBILIDAD. (dBm):	MARGEN DE DESV. (dB):	CONFIABILIDAD (%):
E4	89.41	269.4	-1.61	1.61	0.39309	-74	10.4	90

2) GRAFICO DEL PERFIL TOPOGRAFICO:



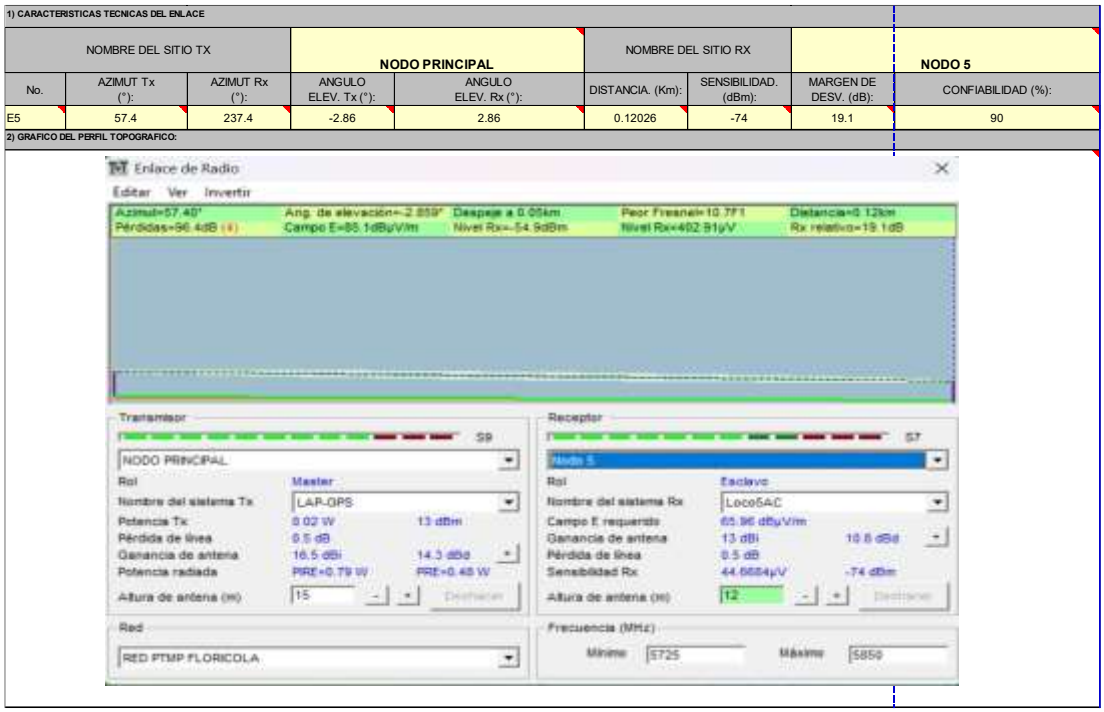


Figura C4. Perfil topográfico de los enlaces

Anexo D. Hoja técnica del Ubiquiti LiteAP GPS

En la Figura D1 se observan sus características, potencia de transmisión y frecuencia de operación, en la Figura D2 sus patrones de radiación.

LiteAP GPS

LAP-GPS	
Dimensions (Mount Not Included)	360.98 x 124.57 x 71.28 mm (14.21 x 4.90 x 2.81")
Weight (No Mount)	752 g (1.66 lb)
Mounting Kit	Pole Mounting Kit (Included)
Networking Interface	(1) 10/100/1000 Ethernet Port
Memory	DDR2 64 MB
Max. Power Consumption	7.1W
Max. TX Power	25 dBm
Antenna Gain	17 dBi
Power Supply	24V, 0.3A PoE Adapter (Included)
Power Method	Passive PoE (Pairs 4, 5+; 7, 8 Return)
Processor Specs	Atheros MIPS 74Kc, 533 MHz
Shock and Vibration	ETSI300-019-1.4
ETSI Specification	EN 302 326 DN2
ESD/EMP Protection	± 24 kV Contact / Air
RoHS Compliance	Yes
Operating Temperature	-40 to 70° C (-40 to 158° F)
Operating Humidity	5 to 95% Noncondensing
Certifications	FCC, IC, CE

Output Power: 25 dBm							
TX Power Specifications				RX Power Specifications			
Modulation	Data Rate	Avg. TX	Tolerance	Modulation	Data Rate	Sensitivity	Tolerance
airMAX ac	1x BPSK (½)	25 dBm	± 2 dB	airMAX ac	1x BPSK (½)	-96 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (½)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (½)	-95 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (¾)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (¾)	-92 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (½)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (½)	-90 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (¾)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (¾)	-86 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (½)	25 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (½)	-83 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (¾)	24 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (¾)	-77 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (¾)	23 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (¾)	-74 dBm	± 2 dB
	8x 256QAM (¾)	21 dBm	± 2 dB		8x 256QAM (¾)	-69 dBm	± 2 dB
	8x 256QAM (¾)	21 dBm	± 2 dB		8x 256QAM (¾)	-65 dBm	± 2 dB

Operating Frequency (MHz)		
Worldwide		5150 - 5875
USA	U-NII-1 5150 - 5250	U-NII-3 5725 - 5850

Management Radio (MHz)	
Worldwide	2412 - 2472
USA	2412 - 2462

Figura D1. Principales características técnicas del LAP-GPS [98].

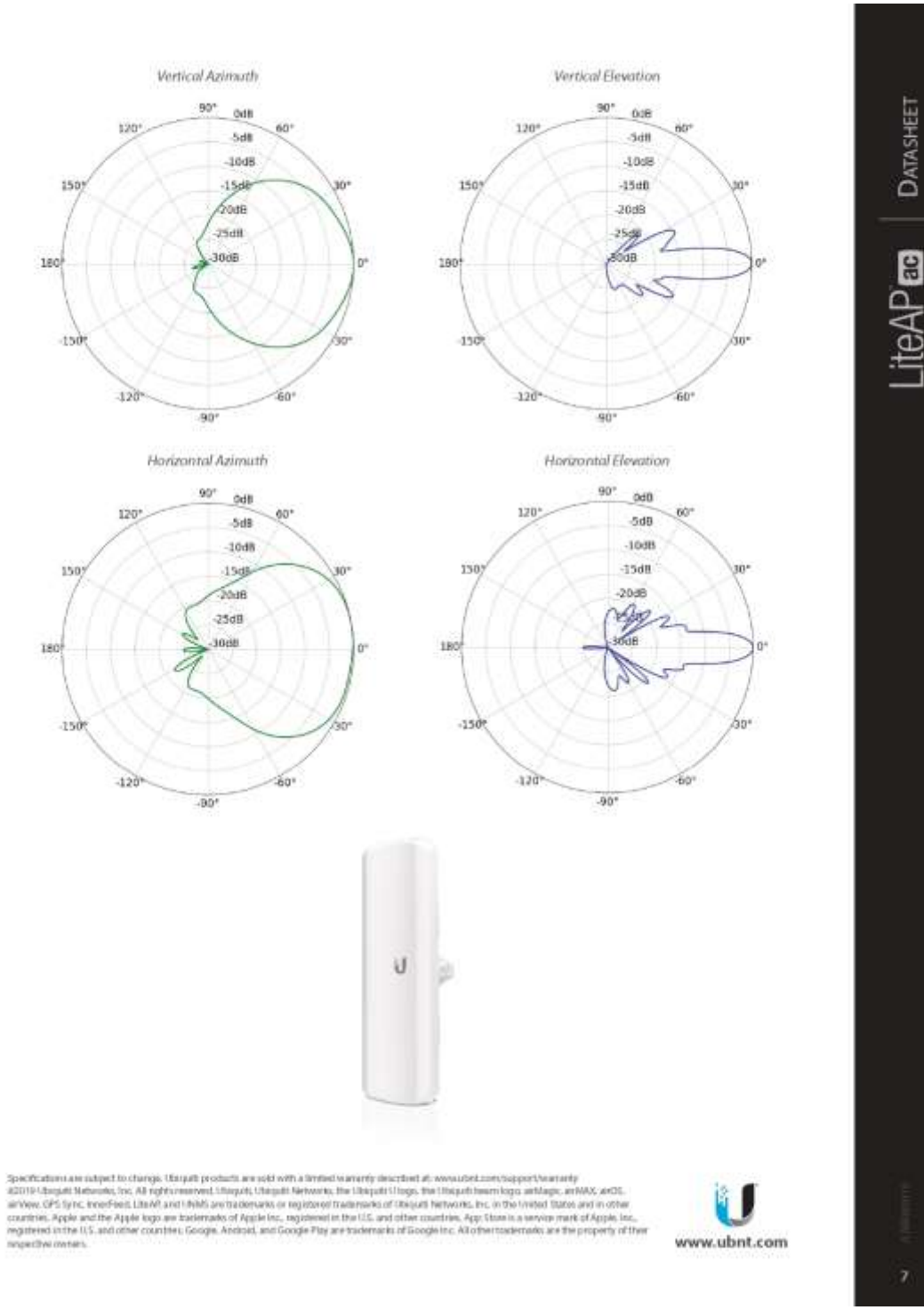


Figura D2. Patrones de radiación del LAP-GPS

Anexo E. Hoja técnica del Ubiquiti NanoStation 5AC Loco

En la Figura E1 se observan sus características, potencia de transmisión y frecuencia de operación, en la Figura E2 sus patrones de radiación.

Specifications

LocoSAC	
Dimensions	179 x 77.5 x 59.1 mm (7.05 x 3.05 x 2.33")
Weight	180 g (6.35 oz)
Power Supply	24V, 0.3A Gigabit PoE Supply*
Max. Power Consumption	7W
Power Method	Passive PoE 2-Pair (Pairs 4, 5+, 7, 8 Return)
Gain	13 dBi
Networking Interface	10/100/1000 Mbps Ethernet Port
Channel Bandwidths	10/20/30/40/50/60/80 MHz
Processor Specs	Atheros MIPS 74Kc, 560 MHz
Memory	64 MB DDR2
Cross-pol Isolation	20 dB Minimum
Max. VSWR	1.8:1
Beamwidth	45° (H-pol) / 45° (V-pol) / 45° (Elevation)
Polarization	Dual Linear
Enclosure	Outdoor UV Stabilized Plastic
LEDs	(1) Power
Mounting	Pole Mount (Kit Included)
Operating Temperature	-40 to 70° C (-40 to 158° F)
Operating Humidity	5 to 95% Noncondensing
RoHS Compliance	Yes
ESD/EMP Protection	±24kV Contact/Air
Shock & Vibration	ETSI300-019-1.4
Certifications	CE, FCC, IC

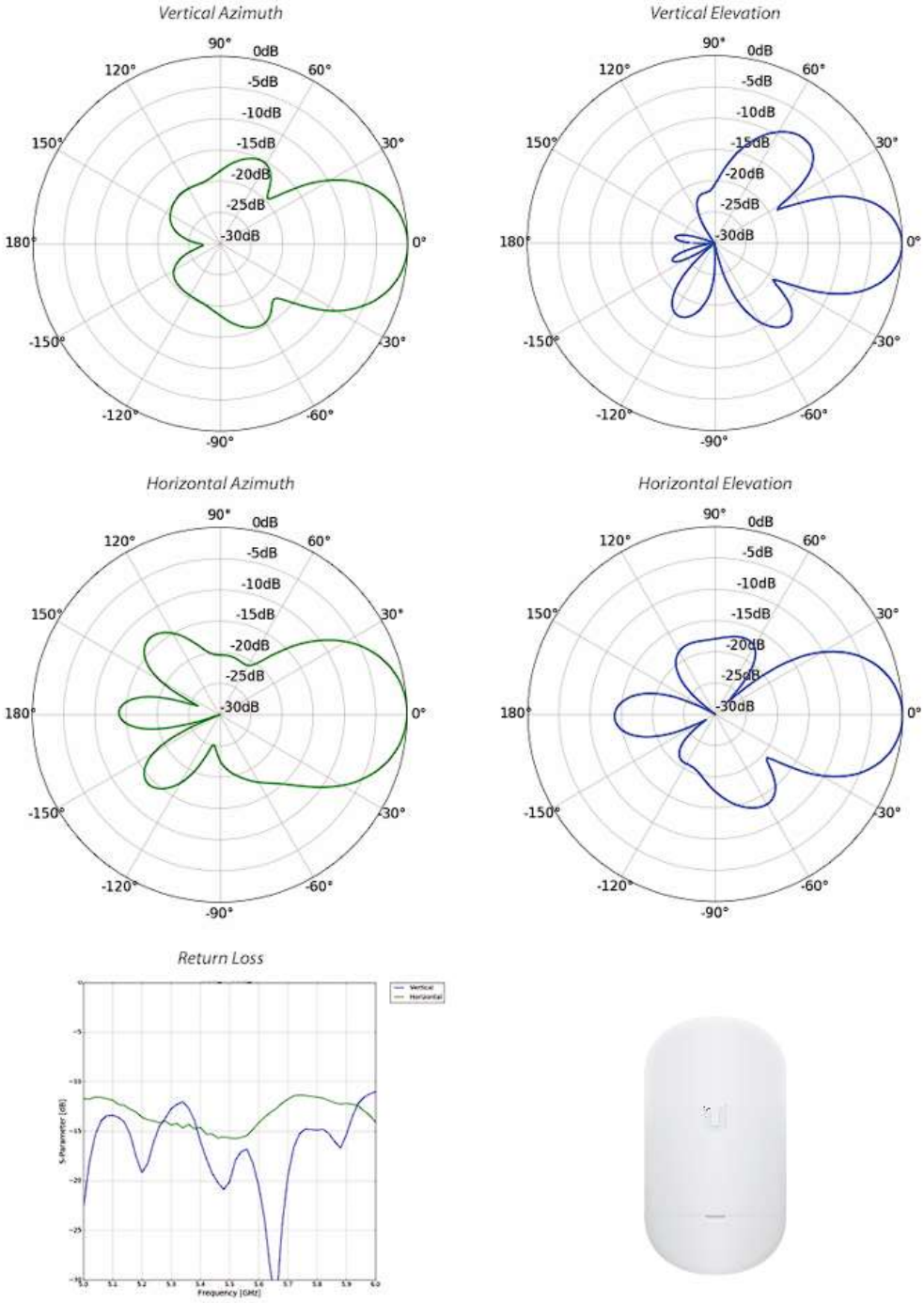
* Not included. Recommended PoE Adapter: POE-24-12W-G

Operating Frequency (MHz)				
Worldwide				5150 - 5875
USA	U-NII-1: 5150 - 5250	U-NII-2A: 5250 - 5350 MHz	U-NII-2C: 5470 - 5725 MHz	U-NII-3: 5725 - 5850

Management Radio (MHz)	
Worldwide	2412 - 2472
USA	2412 - 2462

Output Power: 25 dBm							
5 GHz TX Power Specifications				5 GHz RX Power Specifications			
Modulation	Data Rate	Avg. TX	Tolerance	Modulation	Data Rate	Sensitivity	Tolerance
airMAX ac	1x BPSK (½)	25 dBm	± 2 dB	airMAX ac	1x BPSK (½)	-96 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (½)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (½)	-95 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (¾)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (¾)	-92 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (½)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (½)	-90 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (¾)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (¾)	-86 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (⅔)	25 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (⅔)	-83 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (¾)	24 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (¾)	-77 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (⅚)	23 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (⅚)	-74 dBm	± 2 dB
	8x 256QAM (¾)	21 dBm	± 2 dB		8x 256QAM (¾)	-69 dBm	± 2 dB
	8x 256QAM (⅚)	21 dBm	± 2 dB		8x 256QAM (⅚)	-65 dBm	± 2 dB

Figura E1. Principales características técnicas del Ubiquiti NanoStation 5AC Loco



Specifications are subject to change. Ubiquiti products are sold with a limited warranty described at: www.ubnt.com/support/warranty
The limited warranty requires the use of arbitration to resolve disputes on an individual basis, and, where applicable, specify arbitration instead of jury trials or class actions.
©2017-2019 Ubiquiti Networks, Inc. All rights reserved. Ubiquiti, Ubiquiti Networks, the Ubiquiti U logo, airFiber, airMagic, airMAX, airOS, airView, NanoStation, and UNMS are trademarks or registered trademarks of Ubiquiti Networks, Inc. in the United States and in other countries. Apple and the Apple logo are trademarks of Apple Inc., registered in the U.S. and other countries. App Store is a service mark of Apple Inc. Android, Google, Google Play, the Google Play logo and other marks are trademarks of Google LLC. All other trademarks are the property of their respective owners. All other trademarks are the property of their respective owners.

www.ubnt.com

Figura E2. Patrones de radiación del Ubiquiti NanoStation 5AC Loco

Anexo F. Hoja técnica del NanoBeam 5AC Gen2

En la Figura E1 se observan sus características, potencia de transmisión y frecuencia de operación, en la Figura E2 sus patrones de radiación.

Specifications

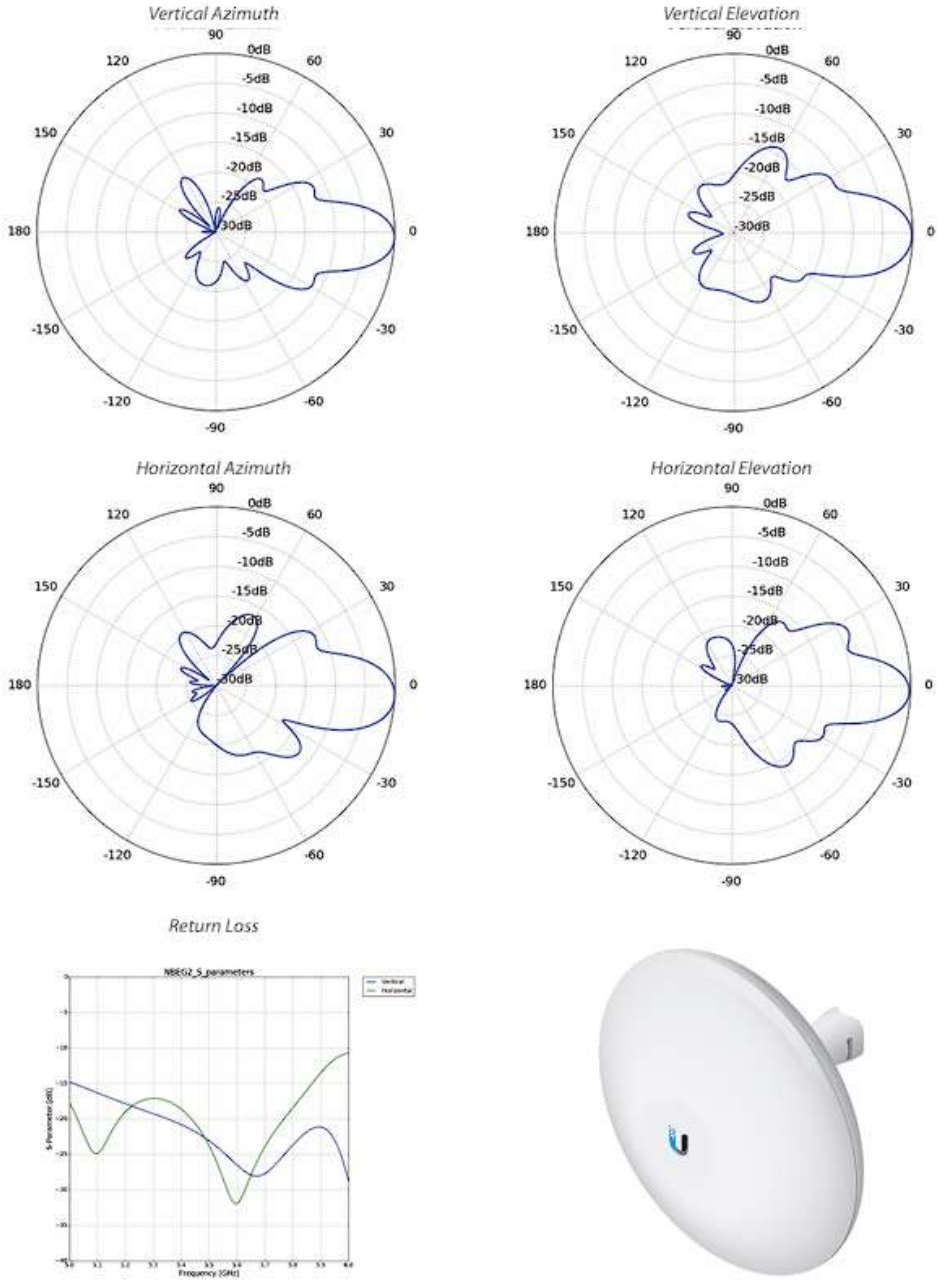
NBE-5AC-Gen2		
Dimensions (Mount Included)	189 x 189 x 125 mm (7.44 x 7.44 x 4.92")	
Weight (Mount Included)	0.530 kg (1.17 lb)	
Power Supply	24V, 0.5A Gigabit PoE Adapter (Included)	
Max. Power Consumption	8.5W	
Gain	19 dBi	
Networking Interface	(2) 10/100/1000 Ethernet Ports Wi-Fi for Management	
Processor Specs	Atheros MIPS 74Kc, 720 MHz	
Memory	128 MB DDR2, 8 MB Flash	
LEDs	Power, Ethernet, (4) Signal Strength	
Signal Strength LEDs	Software-Adjustable to Correspond to Custom RSSI Levels	
Max. VSWR	1.5:1	
Channel Sizes	PtP Mode	PtMP Mode
	10/20/30/40/50/60/80 MHz	10/20/30/40 MHz
Polarization	Dual Linear	
Enclosure	Outdoor UV Stabilized Plastic	
Mounting	Pole-Mount (Kit Included), Wall-Mount	
Wind Loading	45.4 N @ 200 km/h (10.2 lbf @ 125 mph)	
Wind Survivability	200 km/h (125 mph)	
ESD/EMP Protection	Air: ± 24 kV, Contact: ± 24 kV	
Operating Temperature	-40 to 80° C (-40 to 176° F)	
Operating Humidity	5 to 95% Noncondensing	
Certifications	CE, FCC, IC	
RoHS Compliance	Yes	
Salt Fog Test	IEC 68-2-11 (ASTM B117), Equivalent: MIL-STD-810 G Method 509.5	
Vibration Test	IEC 68-2-6	
Temperature Shock Test	IEC 68-2-14	
UV Test	IEC 68-2-5 at 40° C (104° F), Equivalent: ETS 300 019-1-4	
Wind-Driven Rain Test	ETS 300 019-1-4, Equivalent: MIL-STD-810 G Method 506.5	

Operating Frequency (MHz)				
Worldwide	5150 - 5875			
USA	U-NII-1: 5150 - 5250	U-NII-2A: 5250 - 5350 MHz	U-NII-2C: 5470 - 5725 MHz	U-NII-3: 5725 - 5850

Management Radio (MHz)	
Worldwide	2412 - 2472
USA	2412 - 2462

NBE-5AC-Gen2 Output Power: 25 dBm							
TX Power Specifications				RX Power Specifications			
Modulation	Data Rate	Avg. TX	Tolerance	Modulation	Data Rate	Sensitivity	Tolerance
airMAX ac	1x BPSK (½)	25 dBm	± 2 dB	airMAX ac	1x BPSK (½)	-96 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (½)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (½)	-95 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (¾)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (¾)	-92 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (½)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (½)	-90 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (¾)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (¾)	-86 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (⅔)	24 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (⅔)	-83 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (¾)	23 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (¾)	-77 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (⅚)	22 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (⅚)	-74 dBm	± 2 dB
	8x 256QAM (¾)	21 dBm	± 2 dB		8x 256QAM (¾)	-69 dBm	± 2 dB
	8x 256QAM (⅚)	20 dBm	± 2 dB		8x 256QAM (⅚)	-65 dBm	± 2 dB

Figura E1. Principales características técnicas del NanoBeam 5AC Gen2



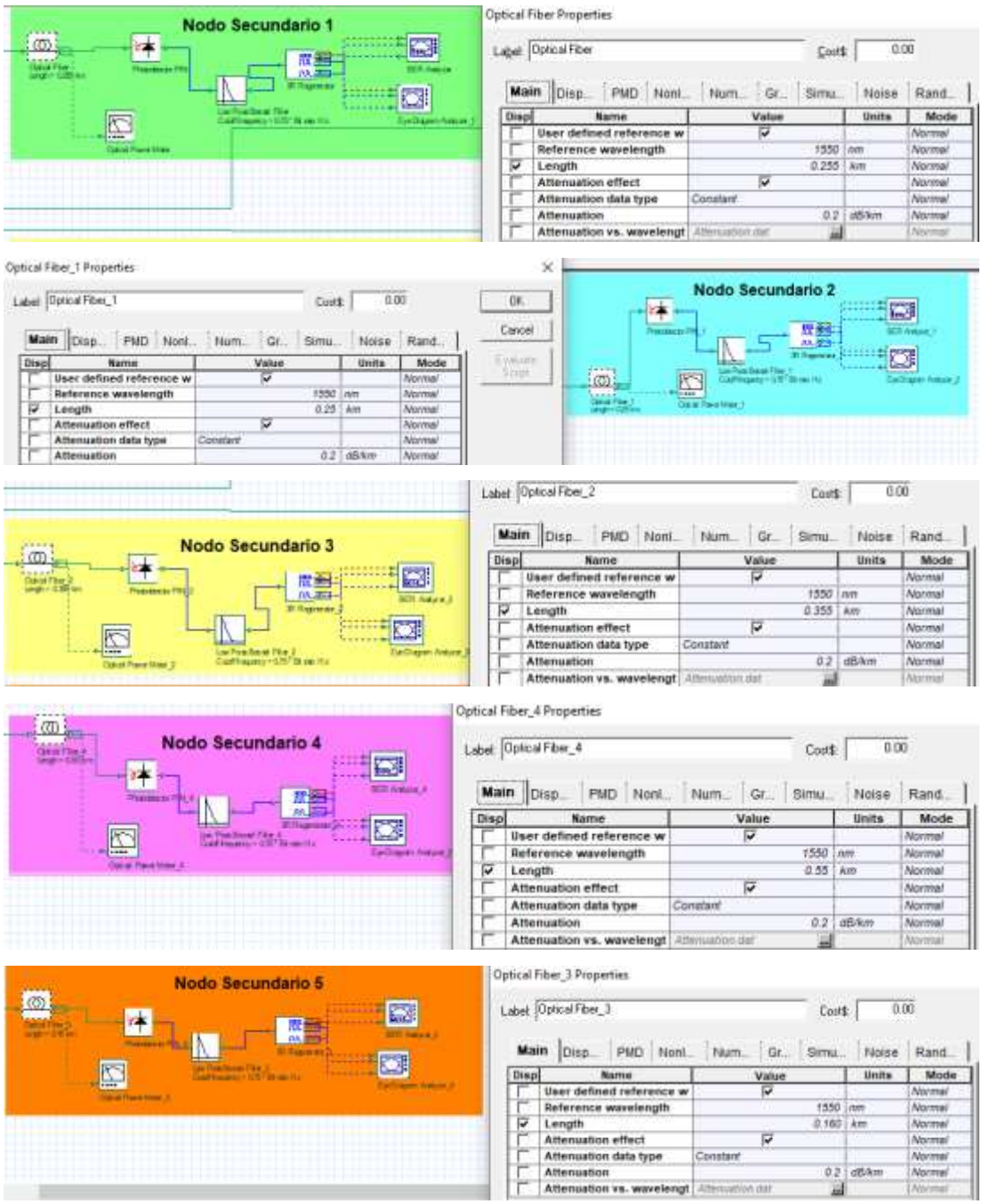
Specifications are subject to change. Ubiquiti products are sold with a limited warranty described at: www.ubnt.com/support/warranty
©2014-2018 Ubiquiti Networks, Inc. All rights reserved. Ubiquiti, Ubiquiti Networks, the Ubiquiti U logo, the Ubiquiti beam logo, airMagic, airMAX, airOS, airView, NanoBeam, NanoBridge, and UNMS are trademarks or registered trademarks of Ubiquiti Networks, Inc. in the United States and in other countries. All other trademarks are the property of their respective owners.

www.ubnt.com

AJNB020818

Figura F2. Patrones de radiación del NanoBeam 5AC Gen2

Anexo G. Configuración de nodos secundarios en OptiSystem.



Anexo H. Análisis completo del CAPEX de red interna de la florícola para la red inalámbrica

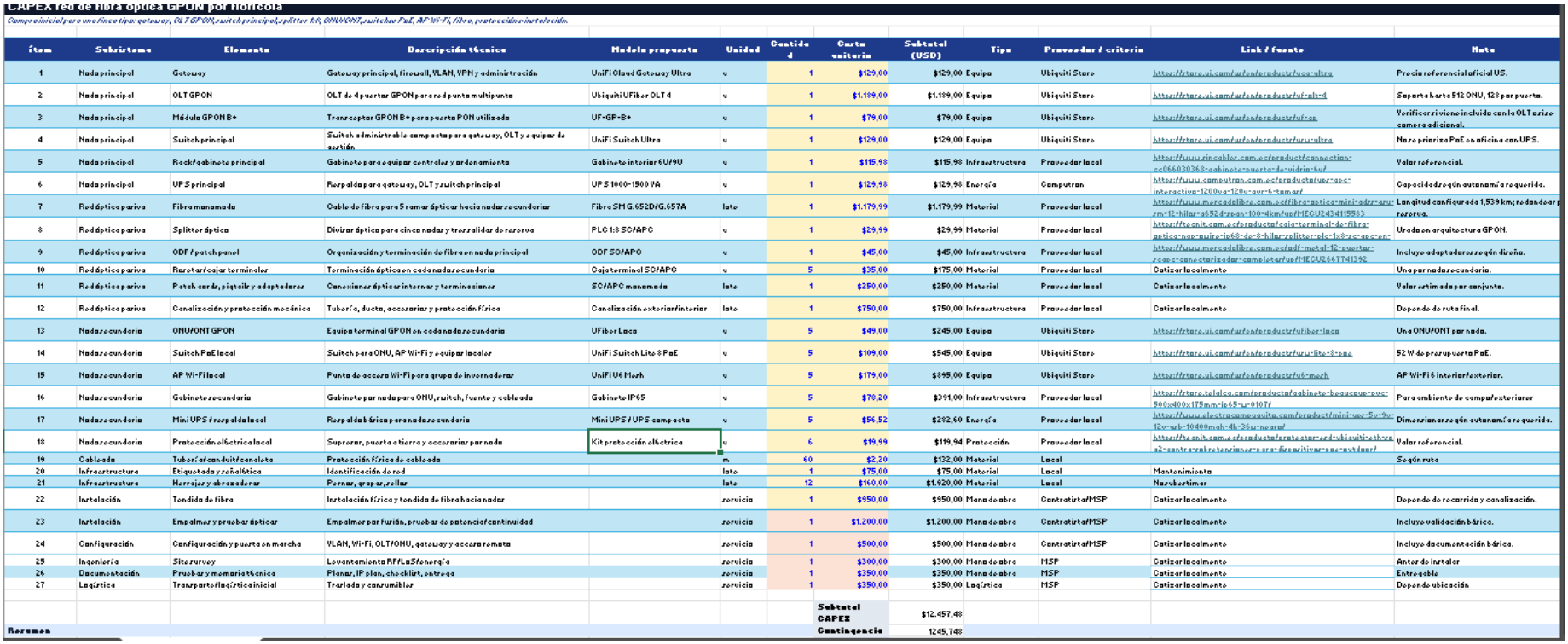
CAPEX red interna por florícola

Compra inicial para una floricola tipo: core, PMP, CPE, WiFi local, energía, protección, infraestructura e instalación.

Ítem	Nodo/Sitio	Elemento	Descripción técnica	Proveedor	Unidad	Cant.	Costo unitario	Subtotal (USD)	Tipo	Proveedor sugerido	Link
1	Core	RB5009UPr+S+IN	Router principal/firewall/VPN/QoS	RB5009UPr+S+IN	u	1	$310.00	$310.00	Equipo	MikroTik	
2	Core	Switch administrable	Switch Gigabit para AP PMP y red local	CSS610-8G-2S+IN	u	1	$160.00	$160.00	Equipo	MikroTik/Ubiquiti/TP-Link	
3	Core	Gabinete/rack central	Gabinete para router, switch, UPS	GABINETE RACK MLB4083 6UR (30×40×85cm)	u	1	$70.00	$70.00	Infraestructura	Local	
4	PMP	Radio AP PMP 5 GHz	Acces point de la red inalambrica	LAP-GPS	u	1	$130.00	$130.00	Equipo	Ubiquiti/Cambium/Mimosa	
5	PMP	Antena sectorial 90°	Sector 5 GHz o hom sector	-	u	1	-	-	Equipo	Ubiquiti/RF Elements	Según interferencia
6	PMP	Kit montaje estación base	Mástil corto, abrazaderas, soporte		kits	1	$80.00	$80.00	Infraestructura	Local	Hierbas
7	CPE	CPE cliente 5 GHz	LiteBeam/NanoBeam/Force 300	NS-5AC	u	5	$100.00	$500.00	Equipo	Ubiquiti/Cambium	
8	CPE	CPE de repuesto	Equipo de reemplazo		u	0	$100.00	-	Stock	Mismo modelo	Continuidad
9	Acceso	AP WiFi outdoor WiFi 6	AP para usuarios/móviles por nodo	EAP610-Outdoor Access Point TP Link	u	6	$140.00	$700.00	Equipo	Omada/Ubiquiti	
10	Acceso	Switch PoE por nodo	Switch 4/8 puertos	TP-Link TL-SG105PE	u	5	$80.00	$300.00	Equipo	TP-Link/MikroTik	
11	Acceso	Gabinete IP65 por nodo	Gabinete exterior para CPE/switch/PoE		u	5	$90.00	$450.00	Infraestructura	Local	Con prensaestopas
12	Cableado	Cable UTP Cat6 exterior	Cable exterior/UV/gel		m	305	$0.80	$244.00	Material	Local	Exterior
13	Cableado	Conectores RJ45 exteriores	Conectores y botas		u	50	$0.70	$35.00	Material	Local	Calidad
14	Cableado	Patch cords	Cables cortos gabinete/torre		u	10	$5.00	$50.00	Material	Local	Cat6
15	Cableado	Tubería/conduit/canaleta	Protección física de cableado		m	100	$2.20	$330.00	Material	Local	Según ruta
16	Energía	UPS central 1000 VA	Respaldo nodo principal		u	1	$250.00	$250.00	Energía	APC/Forza	Obligatorio
17	Energía	UPS/regulador por nodo	Respaldo pequeño por nodo		u	5	$90.00	$450.00	Energía	Local	Opcional
18	Protección	Supresores Ethernet	Protección sobretensiones UTP		u	12	$25.00	$300.00	Protección	Ubiquiti/MikroTik	Ambos extremos
19	Protección	Puesta a tierra central	Varilla, conductor, caja, conectores		u	1	$250.00	$250.00	Protección	Eléctrico	Obligatorio
20	Protección	Kit puesta a tierra por nodo	Protección para gabinete/mástil		u	5	$120.00	$600.00	Protección	Eléctrico	Según norma
21	Infraestructura	Mástil/soporte central	Soporte antena sectorial		u	1	-	-	Infraestructura	Local	Según LoS
22	Infraestructura	Mástil/soporte remoto	Soporte CPE por nodo		u	5	$90.00	$450.00	Infraestructura	Local	Sin vibración
23	Infraestructura	Herrajes y abrazaderas	Pernos, grapas, sellos		kits	1	$160.00	$160.00	Material	Local	No subestimar
24	Infraestructura	Etiquetado y señalética	Identificación de red		kits	1	$80.00	$80.00	Material	Local	Mantenimiento
25	Ingeniería	Site survey	Levantamiento RF/LoS/energía		servicio	1	$300.00	$300.00	Mano de obra	MSP	Antes de instalar
26	Instalación	Montaje e instalación	Instalación física y alineación		servicio	1	$1,100.00	$1,100.00	Mano de obra	MSP	Cerrojo
27	Configuración	Configuración red	VLANs, QoS, firewall, VPN, monitoreo		servicio	1	$1,000.00	$1,000.00	Mano de obra	MSP	Valor principal
28	Documentación	Pruebas y memoria técnica	Planos, IP plan, checklist, entrega		servicio	1	$350.00	$350.00	Mano de obra	MSP	Entregable
29	Logística	Transporte/logística inicial	Traslado y consumibles		servicio	1	$250.00	$250.00	Logística	MSP	Depende ubicación

Subtotal CAPEX interno	$8,865.00
Contingencia	$888.90
TOTAL CAPEX interno	$9,753.90
CAPEX interno por nodo	$1,951.18

Anexo I. Análisis completo del CAPEX de red interna de la florícola para la red óptica.



CAPEX red de fibra óptica GPON por florícola

Campo inicial para una finca tipo: gateway, OLT GPON, switch principal, splitter 1:8, ONU/ONT, switches PoE, AP Wi-Fi, fibra, protección e instalación.

Ítem	Subsistema	Elemento	Descripción técnica	Modelo propuesto	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Subtotal (USD)	Tipo	Proveedor / criterio	Link / fuente	Nota
1	Nodo principal	Gateway	Gateway principal, firewall, VLAN, VPN y administración	UniFi Cloud Gateway Ultra	u	1	$129,00	$129,00	Equipo	Ubiquiti Store	https://store.ui.com/us/en/products/ucg-ultra	Precio referencial a fecha US.
2	Nodo principal	OLT GPON	OLT de 4 puertos GPON para red punto a multipunto	Ubiquiti UFiber OLT 4	u	1	$1.189,00	$1.189,00	Equipo	Ubiquiti Store	https://store.ui.com/us/en/products/uf-olt-4	Soporta hasta 512 ONU, 128 por puerto.
3	Nodo principal	Módulo GPON B+	Transceptor GPON B+ para puerto PON utilizado	UF-GP-B+	u	1	$79,00	$79,00	Equipo	Ubiquiti Store	https://store.ui.com/us/en/products/uf-sp	Verificar si viene incluido con la OLT antes de comprar adicional.
4	Nodo principal	Switch principal	Switch administrable compacto para gateway, OLT y equipos de gestión	UniFi Switch Ultra	u	1	$129,00	$129,00	Equipo	Ubiquiti Store	https://store.ui.com/us/en/products/usw-ultra	Hace priorización PoE en oficina con UPS.
5	Nodo principal	Rack/gabinete principal	Gabinete para equipar controlar y ordenamiento	Gabinete interior 6U/9U	u	1	$115,98	$115,98	Infraestructura	Proveedor local	https://www.zincablor.com.ec/products/connection-cc066030268-gabinete-puerta-de-vidrio-6u/	Valor referencial.
6	Nodo principal	UPS principal	Respaldo para gateway, OLT y switch principal	UPS 1000-1500 VA	u	1	$129,98	$129,98	Energía	Camputron	https://www.camputron.com.ec/products/ups-ec-interactive-1200va-120w-avr-6-tom.asp	Capacidad según autonomía requerida.
7	Red óptica pasiva	Fibra monomodo	Cable de fibra para 5 romas ópticas hacia nodos secundarios	Fibra SM G.652D/G.657A	bote	1	$1.179,99	$1.179,99	Material	Proveedor local	https://www.mercadolibre.com.ec/fibra-optica-mini-adss-span-12-hilos-6524-mean-100-4km-tubo/MEC U2424115583	Longitud configurada 1,539 km; redondear para reserva.
8	Red óptica pasiva	Splitter óptico	Divisor óptico para cinco nodos y tres salidas de reserva	PLC 1:8 SC/APC	u	1	$29,99	$29,99	Material	Proveedor local	https://tienda.snit.com.ec/products/caja-terminal-de-fibra-optica-para-equipo-ip68-de-8-hilos-splitter-plc-1x8-sc-apc-en-	Usado en arquitectura GPON.
9	Red óptica pasiva	ODF / patch panel	Organización y terminación de fibra en nodo principal	ODF SC/APC	u	1	$45,00	$45,00	Infraestructura	Proveedor local	https://www.mercadolibre.com.ec/odf-metal-12-puertos-rosas-conectorizados-completo/tue/MEC U2667741292	Incluye adaptadores según diseño.
10	Red óptica pasiva	Roseta/caja terminales	Terminación óptica en cada nodo secundario	Caja terminal SC/APC	u	5	$35,00	$175,00	Material	Proveedor local	Cotizar localmente	Una por nodo secundario.
11	Red óptica pasiva	Patch cords, pigtails y adaptadores	Conexiones ópticas internas y terminaciones	SC/APC monomodo	lote	1	$250,00	$250,00	Material	Proveedor local	Cotizar localmente	Valor estimado por conjunto.
12	Red óptica pasiva	Canalización y protección mecánica	Tubería, ducto, accesorios y protección física	Canalización exterior/interior	lote	1	$750,00	$750,00	Infraestructura	Proveedor local	Cotizar localmente	Depende de ruta final.
13	Nodos secundarios	ONU/ONT GPON	Equipo terminal GPON en cada nodo secundario	UFiber Loco	u	5	$49,00	$245,00	Equipo	Ubiquiti Store	https://store.ui.com/us/en/products/ufiber-loco	Una ONU/ONT por nodo.
14	Nodos secundarios	Switch PoE local	Switch para ONU, AP Wi-Fi y equipos locales	UniFi Switch Lite 8 PoE	u	5	$109,00	$545,00	Equipo	Ubiquiti Store	https://store.ui.com/us/en/products/usw-lite-8-poe	52 W de presupuesto PoE.
15	Nodos secundarios	AP Wi-Fi local	Punto de acceso Wi-Fi para grupo de invernaderos	UniFi U6 Mesh	u	5	$179,00	$895,00	Equipo	Ubiquiti Store	https://store.ui.com/us/en/products/u6-mesh	AP Wi-Fi 6 interior/exterior.
16	Nodos secundarios	Gabinete secundaria	Gabinete por nodo para ONU, switch, fuente y cableado	Gabinete IP65	u	5	$78,20	$391,00	Infraestructura	Proveedor local	https://store.telalca.com/products/gabinete-hexagonal-pvc-500x400x175mm-ip65-u-0107/	Para ambiente de campo/exteriores.
17	Nodos secundarios	Mini UPS / respaldo local	Respaldo básico para nodos secundarios	Mini UPS / UPS compacta	u	5	$56,52	$282,60	Energía	Proveedor local	https://www.electrocomequipos.com/products/mini-ups-5v-9v-12v-usb-10400mah-4h-36u-no.aspx	Dimensionar según autonomía requerida.
18	Nodos secundarios	Protección eléctrica local	Supresor, puesta a tierra y accesorios por nodo	Kit protección eléctrica	u	6	$19,99	$119,94	Protección	Proveedor local	https://tienda.snit.com.ec/products/protector-red-ubiquiti-eth-rs-a2-contra-sobretensiones-para-direccion-ip-en-outdoor/	Valor referencial.
19	Cableado	Tubería/conduit/canaleta	Protección física de cableado		m	60	$2,20	$132,00	Material	Local		Según ruta
20	Infraestructura	Etiquetado y señalética	Identificación de red		lote	1	$75,00	$75,00	Material	Local	Mantenimiento	
21	Infraestructura	Herrajes y abrazaderas	Pernos, grapas, sellos		lote	12	$160,00	$1.920,00	Material	Local	No subestimar	
22	Instalación	Tendido de fibra	Instalación física y tendido de fibra hacia nodos		servicio	1	$950,00	$950,00	Mano de obra	Contratista/MSP	Cotizar localmente	Depende de recorrido y canalización.
23	Instalación	Empalmes y pruebas ópticas	Empalmes por fusión, pruebas de potencia/continuidad		servicio	1	$1.200,00	$1.200,00	Mano de obra	Contratista/MSP	Cotizar localmente	Incluye validación física.
24	Configuración	Configuración y puesta en marcha	VLAN, Wi-Fi, OLT/ONU, gateway y acceso remoto		servicio	1	$500,00	$500,00	Mano de obra	Contratista/MSP	Cotizar localmente	Incluye documentación física.
25	Ingeniería	Sitio survey	Levantamiento RF/LoS energía		servicio	1	$300,00	$300,00	Mano de obra	MSP	Cotizar localmente	Antes de instalar
26	Documentación	Pruebas y memoria técnica	Planos, IP plan, checklist, entrega		servicio	1	$350,00	$350,00	Mano de obra	MSP	Cotizar localmente	Entregable
27	Logística	Transporte/logística inicial	Traslado y consumibles		servicio	1	$350,00	$350,00	Logística	MSP	Cotizar localmente	Depende ubicación
							Subtotal CAPEX	$12.457,48				
Resumen							**Contingencia**	1245,748				